



# **RAPPORT DE STAGE**

## **ANNEE 2021-2022**

**TITRE :** Modélisation hydrologique prenant en compte la gestion pour l'évaluation de la vulnérabilité et de l'adaptation au changement climatique sur le bassin versant de la Seille

---

**Laboratoire d'accueil :** INRAE Antony

1 rue Pierre-Gilles de Gennes

CS 10030 92160 Antony Cedex

**Maîtres de stage :** SOUTIF-BELLENGER Myriam et THIREL Guillaume

**Tuteur Ecole :** COMBE Gaël

---

**Stage :** 2A Assistant Ingénieur

**Filière :** Master HCE

**Etudiante :** ABRAHÃO CAMPOS SALLES Thais

---

**Sujet confidentiel :** Non

**Juin à Septembre 2022**

## REMERCIEMENTS

*Je remercie tout d'abord mes encadrants, Myriam Soutif-Bellenger et Guillaume Thirel, pour leur attention, leurs bons conseils et leur extraordinaire orientation qui ont contribué énormément au développement de ce travail.*

*Je remercie vivement tous les membres de l'équipe HYDRO, en particulier Charles Perrin, Vazken Andréassian, Olivier Delaigue et Maria Helena Ramos, pour m'avoir si bien accueillie et pour toutes les échanges au cours des trois derniers mois. Leur encouragement et bonne humeur ont contribué à un environnement de travail agréable et collaboratif.*

*Je remercie de plus les enseignants de l'École Nationale Supérieure de l'Énergie, l'Eau et l'Environnement pour la qualité de l'enseignement, pour toute l'attention à mon égard, pour défier mes limites et m'encourager à faire de mon mieux.*

*Pour finir je voudrais exprimer ma profonde gratitude à ma famille, qui tout au long de ma vie a soutenu ma formation et mes aspirations professionnelles, ainsi qu'à Gabriel pour leur affection et compagnie.*

## RÉSUMÉ

Dans le cadre de ce travail, un modèle hydrologique du bassin versant de la Seille (Nord-est de la France), prenant en compte la gestion de l'étang de Lindre, a été utilisé afin de faire une évaluation de la vulnérabilité du territoire et de l'adaptation au changement climatique. L'étude a été réalisée sur l'horizon 2041-2070, par rapport à un état de référence 1976-2005, et compare des scénarios contrastés d'émissions de gaz à effet de serre (RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5). La stratégie d'adaptation évoquée dans ce travail consiste à utiliser l'étang de Lindre pour écrêter les crues et soutenir les étiages, élargissant son rôle actuel centré sur la pisciculture.

Les résultats issus de la modélisation hydrologique sans tenir compte de la gestion alternative de l'étang de Lindre sur l'horizon 2041-2070 indiquent : (1) une tendance à la hausse des débits pendant l'hiver et printemps et une grande variabilité sur l'évolution des débits pendant l'été et automne; (2) une fréquence d'évènements de crue accrue significativement à Nomeny et à Metz ; (3) une fréquence d'évènements d'étiages accrue moins fortement à Metz ; (4) des crues plus longues, alors que l'effet du changement climatique sur la durée des étiages est moins explicite.

Les résultats issus de la modélisation hydrologique prenant en compte de la gestion alternative de l'étang de Lindre sur l'horizon 2041-2070 indiquent que : (1) l'impact de l'adaptation sur les crues à Metz et Nomeny est faible ; (2) la durée des étiages à Metz est réduite.

Finalement, les conclusions apportées par ce travail, concernant la ressource en eau dans les scénarios futurs, peuvent intéresser les acteurs clés sur le territoire (agriculteurs et les services contrôleurs et réglementaires de l'Etat), ainsi que de les soutenir dans l'élaboration de politiques d'adaptation.

## **ABSTRACT**

In this study, a hydrological model of the Seille river watershed (northeastern France) taking into account the water management of Lindre reservoir was used to assess its vulnerability and the adaptation to climate change. This study was carried out over the 2041-2070 horizon, compared to 1976-2005 reference period, and compares contrasting scenarios of greenhouse gases emissions (RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5). The adaptation strategy discussed in this study is to use the Lindre reservoir to reduce floods and to support periods of low discharges, expanding its current role centered on fish farming.

The results from the hydrological modeling without taking into account the alternative water management in the Lindre's reservoir over the 2041-2070 horizon indicate: (1) an upward trend in flows during winter and spring and a large variability in the discharge evolution during the summer and autumn; (2) an increased frequency of flood events more significantly in Nomeny and Metz; (3) a reduced increase of the frequency of low water events in Metz; (4) longer-lasting floods, while the effect of climate change on the duration of low water levels is less explicit.

The results from the hydrological modeling taking into account the alternative water management of the Lindre reservoir over the 2041-2070 horizon indicate: (1) the impact of adaptation on floods in Metz and Nomeny is low; (2) a reduction in the duration of low water levels in Metz.

Finally, the conclusions brought by this work, concerning the water resource in the future scenarios, can interest the key actors on the territory (farmers and the controlling and regulatory services of the State), as well as supporting them in the elaboration adaptation policies.

## TABLE DE MATIERES

TABLE DE FIGURES.....	6
LISTE DES TABLEAUX.....	7
INTRODUCTION .....	8
1. ETAT DE L'ART .....	9
1.1 Modèles hydrologiques.....	9
1.2 Projections climatiques .....	10
1.3 Etudes d'impact du changement climatique sur l'hydrologie .....	11
2. ZONE D'ETUDE.....	12
2.1 Localisation.....	12
2.2 Lithologie.....	12
2.3 Occupation du sol .....	13
2.4 Régime hydrologique et risques.....	14
3. BASE DE DONNEES .....	14
3.1 Données hydro-climatiques .....	14
3.2 Etang de Lindre : courbe hauteur-surface-volume.....	16
3.3 Seuils de crue et d'étiage .....	16
4. METHODOLOGIE.....	17
4.1 Modélisation hydrologique prenant en compte la gestion de l'étang de Lindre.....	17
4.1.1 Modèle hydrologique GR5J et le package airGRiwr.....	17
4.1.2 Gestion de l'étang : pratiques actuelles et modèle de gestion .....	19
4.2 Evaluation de l'impact du changement climatique.....	20
4.3 Evaluation d'un scénario d'adaptation de la gestion de l'étang de Lindre .....	20
4.4 Indicateurs d'événements extrêmes .....	20
5. RESULTATS.....	21
5.1 Performance du modèle hydrologique en prenant compte la gestion actuelle de l'étang de Lindre .....	21
5.2 Impact du changement climatique en prenant compte la gestion actuelle de l'étang de Lindre.....	23
5.3 Impact du changement climatique en prenant compte la gestion alternative de l'étang de Lindre.....	25
6. DISCUSSION.....	27
6.1 Analyse des résultats.....	27
6.2 Apports, limitations et perspectives .....	27
7. CONCLUSION.....	28
REFERENCES .....	29
ANNEXES.....	31
Annexe A : Dates de début de vidange – Simulation avec les données SAFRAN sur la période 1984-2019 .....	31
Annexe B : Dates de début de vidange – Simulation avec les données des projections DRIAS sur la période 1950-2100 .....	32

Annexe C : Schéma de la chronique de remplissage et vidange de l'étang de Lindre sur la période de calage.....	33
--	----

## TABLE DE FIGURES

Figure 1 - Localisation du bassin et des sous-bassins versants de la Seille, MNT et stations hydrométriques. Sources : IGN, BD Carthage et Banque Hydro .....	12
Figure 2 – Occupation du sol du bassin versant de la Seille. Source : Corine Land Cover (2018) .....	13
Figure 3 – Evolution moyenne saisonnière de la précipitation et l'évapotranspiration potentielle pour le sous-bassin plus en amont (Moyenvic – A7581020) entre la période future (2041-2070) et la période historique (1976-2005). .....	15
Figure 4 – Courbe hauteur-surface-volume de l'étang de Lindre.....	16
Figure 5 – Schéma de la structure du package airGRiwr pour le modèle hydrologique GR5J. Source : Dorchie et al. (2021) .....	18
Figure 6 – Régimes hydrologiques et courbes des débits classés observés, simulés et projetés sur les sous-bassins étudiés pendant la période 1985-2019 (Moyenvic et Nomeny) et 1985-2015 (Metz). Les 13 courbes projetées représentent les 13 projections disponibles pour les 5 couples GCM/RCM. On attirera l'attention sur le fait que la période d'intérêt allant au-delà de 2005, il y a autant de courbes que de RCP disponible pour un couple donné ....	22
Figure 7 – Indicateurs de fréquence d'étiage et de crue pour la station de Metz (1985-2015) et de crue pour la station Nomeny (1985-2019) .....	23
Figure 8 – Indicateur de fréquence d'étiage et de crue pour la station de Metz et de crue pour la station de Nomeny – Périodes historique (1976-2005) et futur moyen (2041-2070) ..	24
Figure 9 – Variation du nombre d'évènements extrêmes entre la période historique (1976-2005) et le futur moyen (2041-2070) .....	24
Figure 10 – Indicateur de durée moyenne d'étiage et de crue pour la station Metz et de crue pour la station Nomeny – Périodes historique (1976-2005) et futur moyen (2041-2070) .....	25
Figure 11 – Indicateur de fréquence des évènements extrêmes à Metz et Nomeny en prenant en compte ou non la gestion alternative de l'étang de Lindre - Futur moyen (2041-2070) .	26
Figure 12 – Indicateur de durée moyenne des évènements extrêmes à Metz et Nomeny en prenant compte ou non la gestion alternative de l'étang de Lindre - Futur moyen (2041-2070) .....	26

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 – Jeu de simulations climatiques choisis.....	15
Tableau 2 – Seuils de crue pour les stations Nomeny et Metz .....	17
Tableau 3 – Seuils d’étéage pour la station Metz.....	17
Tableau 4 – Calibration de la gestion de l’étang de Lindre .....	19
Pour le soutien d’étéage, le volume minimum à conserver dans l’étang a été défini à 8.000 Mm <sup>3</sup> (cf Figure 3). Les conditions de soutien d’étéage à Metz sont présentées ci-dessous et tiennent compte les valeurs de débit associés aux seuils de crue et d’étéage (cf. Tableau 5 et Tableau 6): .....	20
Tableau 7 – Paramètres et performance de calage obtenu sur les différents sous-bassins étudiés .....	21
Tableau 8 – Ecart du débit journalier moyen entre le futur moyen (2041-2070) et la période historique (1976-2005) par saison .....	23

## INTRODUCTION

Le bassin versant de la Seille est un territoire qui connaît des conflits d'intérêts concernant la ressource en eau. Il s'agit d'un territoire largement dédié à l'agriculture et qui présente de nombreux étangs, notamment l'étang de Lindre, le plus grand étang piscicole de France (Département de la Moselle, 2017). Le Domaine de Lindre est composé de nombreux habitats environnementaux, est inscrit dans un périmètre Natura 2000<sup>1</sup> et bénéficie du label Ramsar<sup>2</sup> (Parrilla et Barataud, 2020).

La gestion actuelle de l'étang de Lindre est centrée sur l'activité piscicole et, par conséquent, des vidanges pour la pêche sont nécessaires tous les 1 à 3 ans. Les vidanges sont déclenchées au début de l'automne et se font progressivement au cours de cette saison. Le remplissage du bassin s'effectue ensuite au cours de l'hiver, ce qui correspond à la période des pluies. Par ailleurs, la gestion de l'étang de Lindre est contrainte par un objectif de maintien d'un niveau d'eau suffisamment haut pour la préservation de la biodiversité périphérique à l'étang et la pisciculture. De plus, le barrage de l'étang de Lindre est classé au titre de la sécurité publique pour la protection des personnes et des biens, et des manœuvres de vidange sont donc nécessaires lors de crues importantes pour ne pas mettre en danger l'ouvrage.

Les agriculteurs accusent la gestion de l'étang d'aggraver les inondations en aval, causant des dommages à leur production, et se plaignent que l'étang n'assure pas de rôle d'écrêteur de crue. Pour cela, le niveau opérationnel du barrage devrait en effet être réduit de manière significative, ce qui aurait pour conséquence de compromettre l'activité piscicole et la protection de la biodiversité de la réserve.

Historiquement, le bassin versant de la Seille a souffert des inondations, surtout hivernales. Cependant, dans les années plus récentes (2016 et 2021), des crues estivales ont eu lieu qui ont causé des dommages aux agriculteurs pendant la période de récolte. Le manque d'eau, qui n'était pas une préoccupation fréquente, est devenu un sujet suite aux années de sécheresse successives (2017, 2018, 2019, 2020 et 2022).

Le changement climatique crée des incertitudes sur la connaissance des ressources en eau futures, ce qui peut conduire à une intensification des conflits existants. L'objectif de ce travail est donc d'évaluer l'impact du changement climatique dans le bassin versant de la Seille sur l'horizon futur moyen (2041-2070). Pour cela, une modélisation hydrologique de la zone d'étude sera réalisée en tenant compte de la gestion de l'étang de Lindre. De plus, une proposition de gestion alternative de l'étang de Lindre sera élaborée afin d'explorer sa capacité à écrêter les crues et à soutenir les étiages.

---

<sup>1</sup> Sites naturels ou semi-naturels de l'Union européenne ayant une grande valeur patrimoniale, par la faune et la flore exceptionnelles qu'ils contiennent

<sup>2</sup> Zone humide d'importance internationale inscrite sur la liste établie par la Convention de Ramsar



# 1. ETAT DE L'ART

## 1.1 Modèles hydrologiques

Les modèles hydrologiques permettent de transformer, à un pas de temps donnée, des séries temporelles décrivant le climat d'un bassin versant en une série de débits. Ces modèles sont utilisés pour différents objectifs tels que la prévision des crues et des étiages, les études d'impact du changement climatique sur l'hydrologie, les études d'impact anthropique sur l'hydrologie (construction d'aménagements hydrauliques), etc.

Différentes approches de modélisation pluie-débit existent dans la littérature :

- Les modèles à base conceptuelle : ils représentent le bassin versant comme une succession de réservoirs conceptuels liés entre eux par des fonctions des transferts. Les modèles pluie-débit du Génie Rural (GR) sont exemples de modèles conceptuelles parcimonieux qui ont une bonne performance pour les bassins contrastés en France et dans le monde (e.g. GR5J, Le Moine, 2008) ;
- Les modèles à base physique : ils représentent le bassin versant à partir des équations physiques décrivant des processus discrétisés (e.g. Isba-Modcou, Habets et al, 2008) ;
- Les modèles à base empirique : ils cherchent à reproduire la dynamique des variables de sortie en fonction des variables d'entrées sans tenter de décrire le processus élémentaire ;

Concernant le degré de discrétisation spatiale les modèles sont classés comme :

- Modèles globaux : ils représentent le fonctionnement hydrologique du bassin versant de manière homogène, sans tenir en compte la variabilité spatiale des paramètres et la répartition des débits internes au sein du bassin versant (e.g. GR5J, Le Moine, 2008)
- Modèles distribués : ils découpent les bassins versant en mailles fines, prenant en compte la variabilité spatiale des paramètres du bassin versant et les données météorologiques (e.g. Isba-Modcou, Habets et al, 2008). En raison du grand nombre des paramètres demandés, le temps de paramétrisation et de calcul est important ;
- Modèles semi-distribués : Ils proposent une approche intermédiaire entre les deux modèles précédents, en découpant le bassin versant selon des sous-bassins versant. Ils peuvent offrir au modélisateur un bon compromis entre la quantité de paramètres, le niveau de précision des résultats et le temps de paramétrisation/calcul.

Par rapport à la discrétisation temporelle, les modèles peuvent fonctionner à différents pas de temps, notamment horaire (e.g. pour les prévisions de crues) ou annuel (e.g. pour la quantification de la ressource en eau à grande échelle), avec des pas de temps intermédiaires journalier (e.g. GR5J, Le Moine, 2008) et mensuel. Le pas de temps journalier est pertinent dans le contexte français, les indicateurs de bon état des masses d'eau de surface s'appuyant généralement sur des débits journaliers (VCN10, ...).

On souligne ainsi l'intérêt des modèles conceptuels et globaux ou semi-distribués, tels que les modèles GR. Ces derniers nécessitent peu de paramètres ce qui facilite et améliore la procédure de calage et permet donc d'obtenir de très bonnes performances. De plus, leur rapidité de compilation permet d'effectuer de nombreuses simulations, et donc d'effectuer des simulations d'ensemble.

Les modèles hydrologiques peuvent intégrer la gestion des ressources en eau (prélèvements et injection de flux). Récemment, un nouvel outil a été développé, airGRiwrn (Dorchies, 2022), permettant de prendre en compte la gestion dans les modèles GR, modèles parcimonieux et performants, largement utilisés à travers le monde, et de façon semi-distribuée, permettant d'effectuer des études d'impact plus précises spatialement. En calant un modèle prenant en compte la gestion, il est possible d'obtenir un jeu de paramètres naturalisés par rapport à cette gestion (Terrier et al., 2020). Un tel jeu de paramètres permet ensuite de modéliser le comportement naturel du bassin versant, soit les débits tels qu'ils seraient sans la gestion, et de tester des gestions alternatives dans le cadre de travaux sur l'adaptation.

## 1.2 Projections climatiques

Les projections climatiques sont générées à partir de modèles numériques complexes, dont l'objectif est de représenter de manière fiable le comportement du système climatique en réponse à différentes contraintes, appelées forçages, qui lui sont imposés (Météo-France, 2020). Les forçages sont des perturbations (naturelles ou anthropiques) d'origine extérieure au système climatique qui modifient leur bilan radiatif. Dès le début de l'industrialisation, on observe une augmentation de la pression exercée sur le climat par les forçages anthropiques dus aux activités humaines tels que les émissions de gaz à effet de serre (GES) et d'aérosols liés par exemple à la pollution et les changements dans l'usage du sol (Météo-France, 2020). Afin de modéliser le climat futur, il faut donc faire des hypothèses sur l'évolution des forçages anthropiques, ce qui dépend d'un ensemble de facteurs (croissance démographique, choix politiques, développement socioéconomique, évolution technologique, etc) qui ne peuvent être difficiles de prédits avec certitude. Pour cela, les climatologues utilisent différents scénarios dont chacun correspond à une représentation plausible du comportement futur des sociétés humaines.

Dans le cadre du cinquième rapport du GIEC (2014), quatre scénarios représentatifs ont été retenus, comprenant un scénario strict d'atténuation (RCP<sup>3</sup>2.6), deux scénarios intermédiaires (RCP 4.5 et RCP 6.0) et un scénario d'émissions très élevées de GES (RCP 8.5). Ces scénarios d'émission sont utilisés en entrée des modèles de circulation général (GCM) qui envisagent de simuler l'évolution du climat à l'échelle mondiale. En raison de notre compréhension imparfaite du système climatique, le climat simulé diffère d'un modèle à l'autre pour un scénario d'émission donné et il est donc nécessaire de considérer de larges ensembles de projections climatiques (Météo-France, 2020).

La résolution des GCM (150 à 200 km) est insuffisante pour représenter adéquatement les phénomènes météorologiques locaux, rendant nécessaire de mettre en œuvre la méthodologie de descente d'échelle. Cette méthodologie consiste à utiliser des modèles de climat régionaux (RCM) qui sont disponibles en France à 12 km de résolution (Météo-France, 2020).

Le jeu de données DRIAS-2020 s'appuie sur des simulations climatiques régionales qui ont subi un débiaisage statistique par la méthode Adamont et qui permettent finalement d'obtenir des projections à 8 km de résolution. Trois scénarios RCP sont ainsi disponibles : RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 (Météo-France, 2020).

---

<sup>3</sup> Representative Concentration Pathways (RCP)

Les principales sources d'incertitudes des projections climatiques sont la variabilité naturelle intrinsèque du système climatique, l'incertitude des modèles climatiques et des scénarios socioéconomiques, aussi que les incertitudes associées à la méthode de correction des erreurs systématiques (biais) des modèles RCP (Météo-France, 2020).

### **1.3 Etudes d'impact du changement climatique sur l'hydrologie**

En utilisant les projections climatiques comme données d'entrée de modèles hydrologiques, il est possible d'effectuer une étude d'impact du changement climatique sur l'hydrologie.

A l'échelle de la France, le projet Explore 2070 a ainsi évalué les impacts du changement climatique sur les milieux aquatiques et la ressource en eau à l'échéance 2070. L'étude indique une diminution (10% à 40%) significative globale de débits annuels sur le territoire français (Chauveau et al., 2013). Globalement, le projet a évalué une baisse prononcée des débits d'étiage et estime que les crues évolueront de manière plus hétérogène et moins importante (Chauveau et al., 2013). Cependant, l'étude souligne que l'intensité des crues peut augmenter dans le Nord-est de la France, notamment la partie Est du district Rhin-Meuse (Chauveau et al., 2013).

A l'échelle du bassin versant de la Moselle, de la Sarre (Nord-est de la France) et du Rhin, le projet MOSARH21 (Thirel et al., 2019) montrent une légère augmentation des débits annuels moyens, qui pourrait même devenir importante pour le scénario radiatif RCP 8.5. L'aléa de crue devrait s'intensifier dans un futur proche (2021-2050). En revanche, dans un futur plus lointain (2071-2100), l'évolution des indicateurs de crue est incertaine, les projections hydrologiques étant divergentes. Les débits d'étiages seraient à la baisse dans le futur proche. Leur évolution dans un futur lointain est plus incertaine, allant de la baisse drastique à une augmentation sensible selon le scénario choisi.

Les études d'impact du changement climatique sur l'hydrologie ont des incertitudes liées aux entrées du modèle, à la structure du modèle (i.e. les équations) et au paramètre choisi défini lors du calage (Lemaitre-Basset et al., 2021). Les incertitudes et la variabilité des résultats obtenus sont souvent d'un ordre de grandeur comparable aux changements simulés, ce qui invite à la prudence (Chauveau et al., 2013). Néanmoins, la convergence des résultats sur les grandes tendances encourage des politiques d'adaptation (Chauveau et al., 2013).

Au regard de l'état de l'art sur les modèles hydrologiques existant, sur les projections climatiques en France métropolitaine, et la nécessité de mettre en place des stratégies d'adaptation au changement climatique, nous souhaitons donc mobiliser les projections DRIAS et l'outil airGRiwrn afin d'effectuer une étude d'impact du changement climatique sur l'hydrologie du bassin versant de la Seille et évaluer une stratégie d'adaptation de la gestion de l'étang de Lindre.

## 2. ZONE D'ETUDE

### 2.1 Localisation

La Seille est une rivière française située dans la région du Grand Est qui s'écoule sur 137,7 km dans les départements de la Meurthe-et-Moselle et de la Moselle. Ce cours d'eau de plaine, lent et moyennement abondant, prend sa source en amont de l'étang de Lindre et se jette dans la Moselle à Metz (Figure 1).

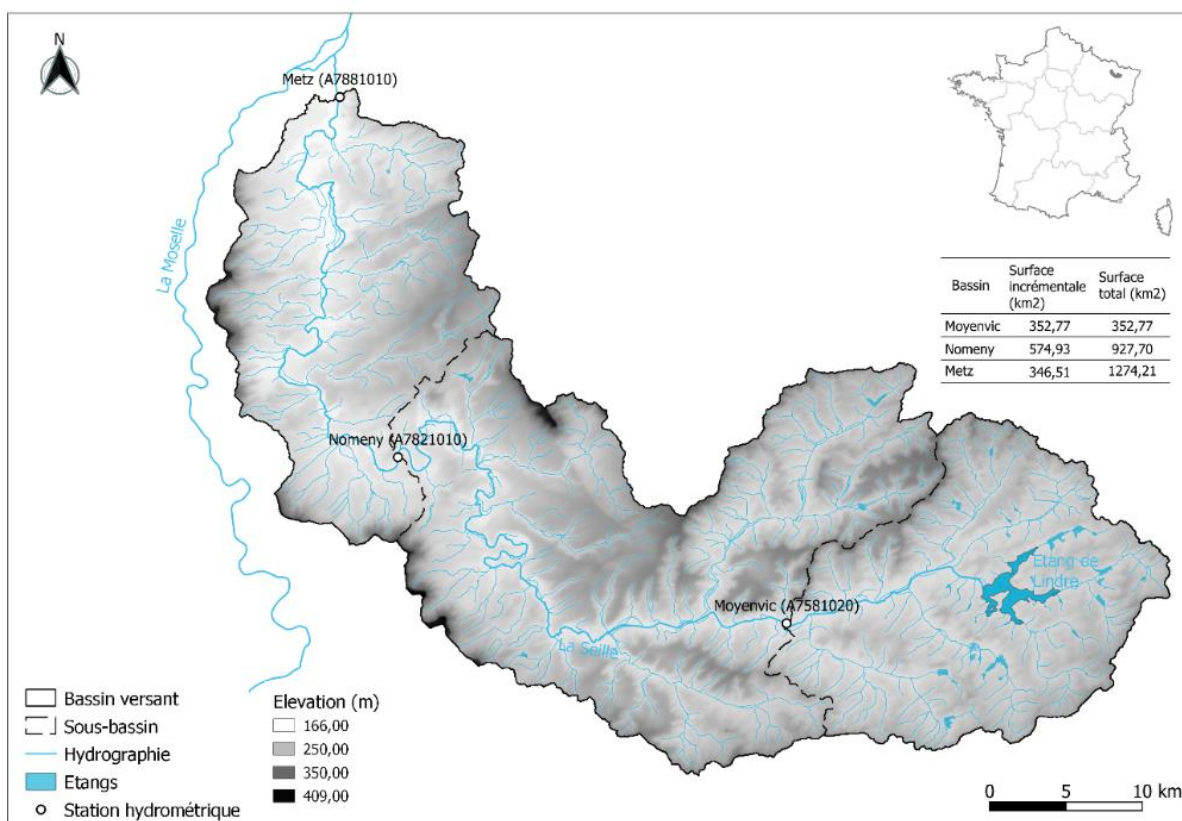


Figure 1 - Localisation du bassin et des sous-bassins versants de la Seille, MNT et stations hydrométriques. Sources : IGN, BD Carthage et Banque Hydro

### 2.2 Lithologie

La nature lithologique du bassin versant est marquée par une prédominance des roches imperméables (marnes et argiles) avec une surface d'affleurement de 74,3%, contre 21,2% pour les roches semi-imperméables (calcaire et marno-calcaire) et seulement 5,4% pour les roches perméables (grès, calcaire et alluvions) (El Ghachi, 2007). Par conséquent, la majorité du terrain favorise essentiellement le ruissellement au détriment de l'infiltration, situation qui détermine les modalités de circulation d'eau ainsi que l'alimentation du cours d'eau.

## 2.3 Occupation du sol

Le bassin versant de la Seille a une surface totale égale à 1.274 km<sup>2</sup> (Delaigue et al. 2020) et son territoire est largement dédié à l'agriculture. La surface est majoritairement occupée par de grandes cultures céréalières de blé, orge, colza (Figure 2), qui peuvent servir à l'alimentation animale des élevages sur le territoire.

La partie en amont du bassin versant correspond au Saulnois. L'économie de ce secteur a longtemps reposé sur l'exploitation du sel, activité qui a donné le nom de la Seille et du Saulnois (Parrilla et Barataud, 2020). Dans cette partie du bassin, la présence des étangs est remarquable, notamment, l'étang du Lindre dont l'origine remonte au XIII<sup>ème</sup> siècle (Domaine Départemental de Lindre, 2016). Cet étang, avec une surface de 620 ha et un volume d'environ 13 Mm<sup>3</sup>, est le plus grand étang piscicole de la France (Banas, 2001). Le Domaine de Lindre est un milieu halophile remarquable lié aux résurgences d'eau salée et une réserve de biodiversité notamment ornithologique. La Seille porte les marques des anciens aménagements, qui ont conduit à la rectification du tracé pour faciliter le transport du sel, et aussi la présence des digues de protection contre les inondations au niveau des villages (El Ghachi, 2007).

En aval du Saulnois, les aménagements du cours d'eau sont moins importants, jusqu'à l'agglomération messine, secteur à fort enjeu humain et économique. Dans ce secteur, on retrouve donc des aménagements servant à protéger ces enjeux contre les inondations.

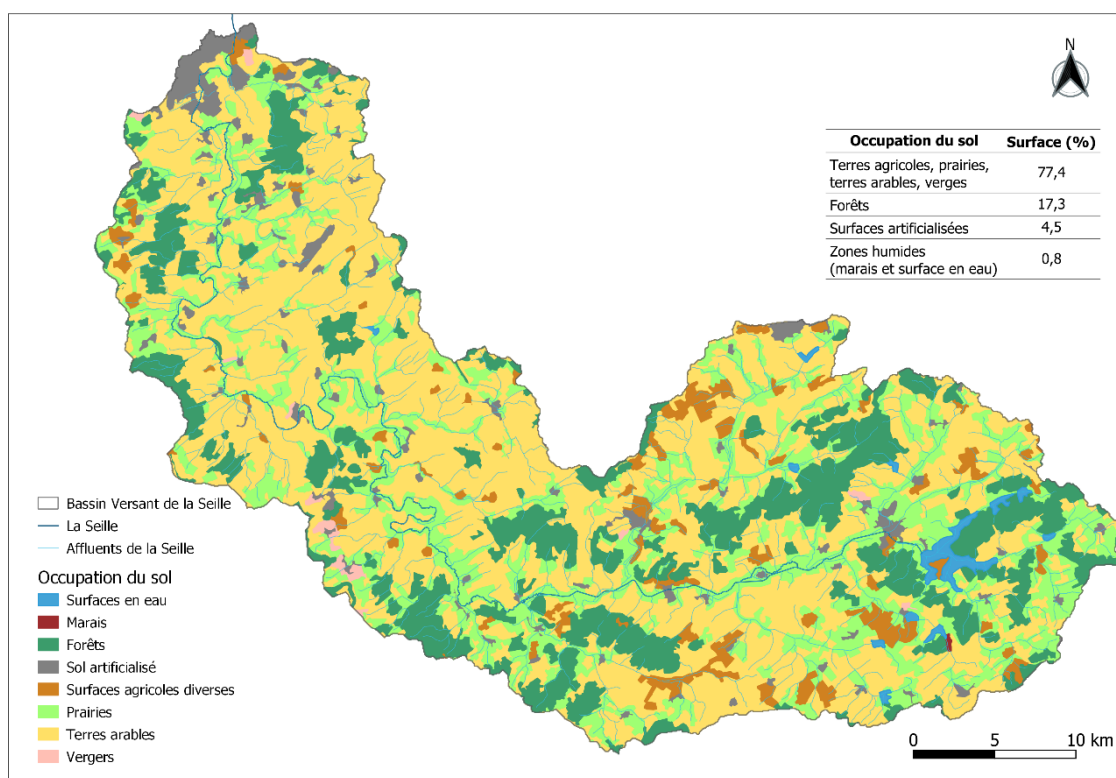


Figure 2 – Occupation du sol du bassin versant de la Seille. Source : Corine Land Cover (2018)

## 2.4 Régime hydrologique et risques

Le régime hydrologique du bassin versant est pluvial-océanique, ce qui se distingue par des hautes eaux en hiver et des basses eaux en été. Le régime est influencé à la fois par des causes naturelles (pluie et substratum) et anthropiques (prélèvements et vidange de l'étang de Lindre). La vidange de l'étang de Lindre normalement s'effectue fin août jusqu'à fin novembre.

Historiquement, les crues sont plus communes dans le bassin versant que les sécheresses, qui représentent une préoccupation récente liée essentiellement à la qualité de l'eau (El Ghachi, 2007). Suite aux années de sécheresse successives (2017, 2018, 2019, 2020 et 2022), le manque d'eau est devenu donc un sujet crucial. Les crues se déclenchent habituellement en période hivernale. Néanmoins, des crues estivales exceptionnelles se sont produites en 2016 et 2021, qui ont causé des dommages aux cultures pendant leur période de maturation.

L'étang de Lindre est aujourd'hui au cœur de débats sur les ressources en eau dans la zone d'étude. Celui-ci est perçu localement comme le « robinet de la Seille ». Les agriculteurs pensent que l'étang aggrave les inondations et ils aimeraient qu'il devienne un bassin écrêteur de crue. Avec le changement climatique, les tensions sur la ressource en eau pourraient être encore plus fortes et l'utilisation éventuellement de l'étang pour faire du soutien d'étiage est donc envisagée.

## 3. BASE DE DONNEES

### 3.1 Données hydro-climatiques

Les données observées de pluie et les données nécessaires pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle utilisées dans le cadre de ce travail sont issues de la base SAFRAN<sup>4</sup> (Vidal et al., 2010) sur la période de 1984 à 2019. Les données observées de débit sont issues du HydroPortail (Leleu et al., 2014) sur la période de 1984 à 2019 pour les stations Moyenvic (A7581020) et Nomeny (A7821010) et 1984 à 2015 pour la station Metz (A7881010). Ces données sont nettoyées et rendues disponibles dans le laboratoire d'accueil (Delaigue et al., 2020).

Les données projetées de pluie et les données nécessaires pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle sont issues du jeu de données DRIAS-2020, disponible sur le portail DRIAS, sur la période de 1950 à 2100. Ces projections sont disponibles pour trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre, les Radiative Concentration Pathways (RCP) 2.6 (le moins émissif), 4.5 et 8.5 (le plus émissif). Dans le cadre de ce travail, un ensemble de treize simulations du climat passé et futur a été choisi, parmi les 30 simulations disponibles basées sur 12 couples GCM<sup>5</sup>/RCM<sup>6</sup> (Tableau 1). Les simulations retenues font partie de la liste courte conseillée par DRIAS (DRIAS, 2020), afin de prendre en compte de manière satisfaisante les incertitudes liées aux modèles climatiques.

---

<sup>4</sup> Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie

<sup>5</sup> General Circulation Model (GCM)

<sup>6</sup> Regional Climate Model (RCM)

Tableau 1 – Jeu de simulations climatiques choisis

GCM	RCM	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
CNRM-CM5	Aladin63 V2	X	X	X
CNRM-CM5	Racmo22E v2			
IPSL-CM5A-MR	WRF381P		X	X
IPSL-CM5A-MR	RCA4			
HadGEM2-ES	RegCM4-6			
HadGEM2-ES	CCLM4-8-17		X	X
EC-EARTH	Racmo22E v2	X	X	X
EC-EARTH	RCA4			
MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	X	X	X
MPI-ESM-LR	REMO (2009)			
NorESM1-M	HIRHAM5 v3			
NorESM1-M	REMO (2015)			

Scénario inexistant  
x Simulations climatiques retenues

Le changement climatique envisagé sur le futur moyen (2041-2070) par rapport à la période (1976-2005) se traduit globalement par une augmentation des précipitations totales de l'évapotranspiration potentielle annuelle. Pendant l'hiver, les projections convergent vers une hausse de pluie plus marquée, alors que pendant l'été on observe une forte variabilité dans les projections sur les pluies (Figure 3). Ces évolutions sont cohérentes avec celles notées dans le rapport décrivant les projections DRIAS-2020 (DRIAS, 2020).

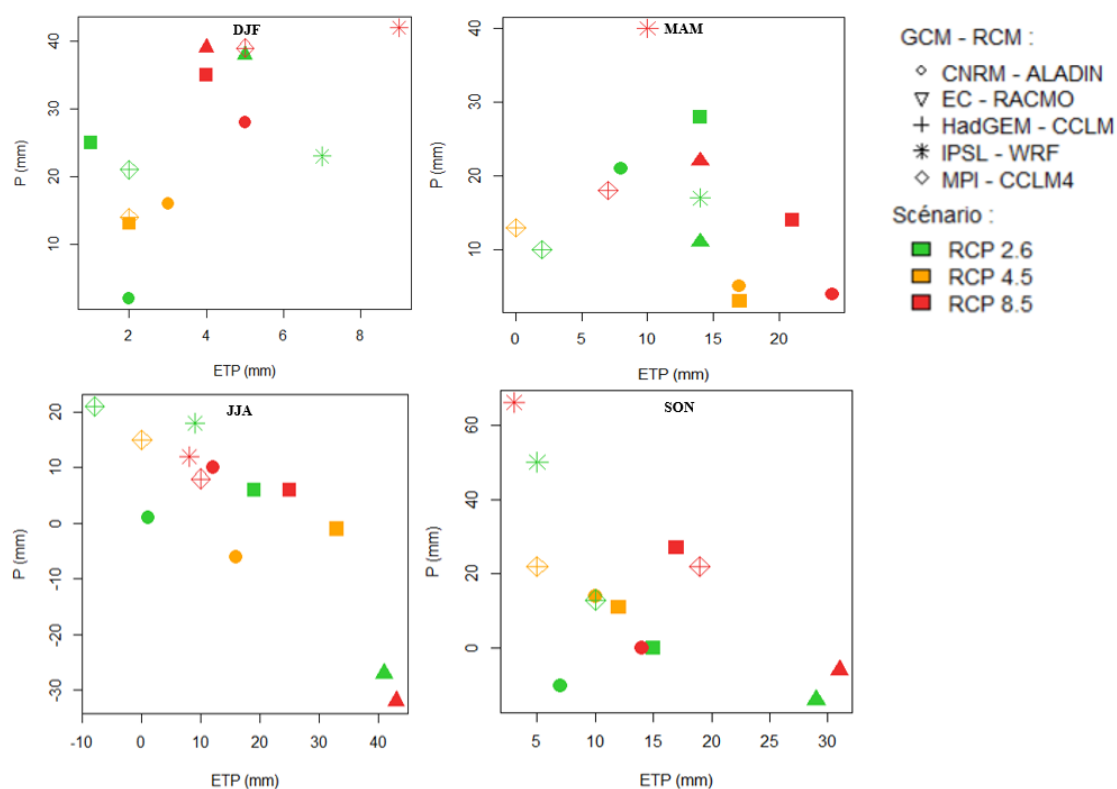


Figure 3 – Evolution moyenne saisonnière de la précipitation et l'évapotranspiration potentielle pour le sous-bassin plus en amont (Moyenvic – A7581020) entre la période future (2041-2070) et la période historique (1976-2005).

### 3.2 Etang de Lindre : courbe hauteur-surface-volume

L'étang de Lindre, propriété du Département de la Moselle depuis 1976, possède une superficie de 620 ha et sa contenance est d'environ 13 millions de mètres cube d'eau. Sa forme est caractérisée par trois cornées (Zommange, Guermange et Assenoncourt) séparés par des digues intermédiaires.

A partir du relevé bathymétrique fourni par le Domaine de Lindre, le MNT<sup>7</sup> du réservoir a été construit et sa courbe hauteur-surface-volume (Figure 4) a été déduite entre la cote du fond de l'étang (206,0 m) et la cote du déversoir principal (211,3 m). Cette courbe permettra de dimensionner les valeurs pour les stratégies d'adaptation (volume d'écrêtage et volume de soutien) de façon à ne pas trop perdre de hauteur.

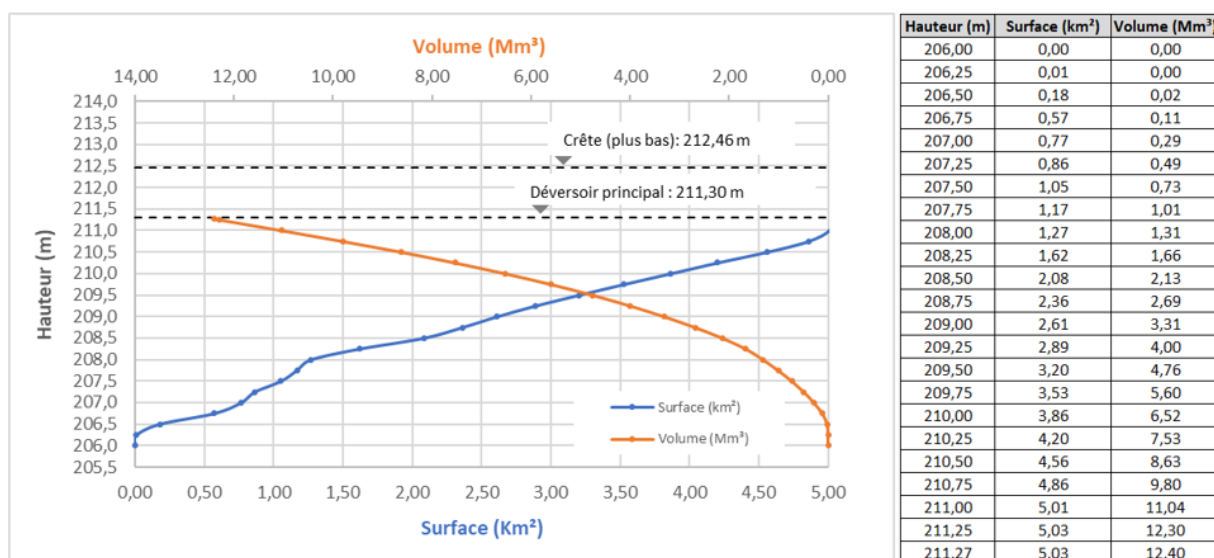


Figure 4 – Courbe hauteur-surface-volume de l'étang de Lindre

Le volume total obtenu (12,7 Mm<sup>3</sup>) à partir du MNT est proche de la valeur attendue (13 Mm<sup>3</sup>) et pour la praticité le volume total adopté dans ce travail sera donc arrondi à 13 Mm<sup>3</sup>.

### 3.3 Seuils de crue et d'étiage

Les valeurs des seuils de crue (Tableau 2) ont été obtenues à partir du Règlement Départemental d'Annonce de Crue (2016). Ce document présente, pour les stations Nomeny et Metz, les valeurs en hauteur d'eau des crues historiques, ainsi que la date et les niveaux de vigilance associés : jaune (risque de crue n'entraînant pas des dommages significatifs), orange (risque de crue génératrice de débordements importants) et rouge (risque de crue exceptionnelle/majeure).

Le débit moyen journalier de chaque crue historique a été obtenu à partir de la série de mesure sur HydroPortail. Exceptionnellement pour le seuil rouge à Metz, la valeur de débit a été obtenue à partir de la courbe de tarage, car le débit mesuré à la date de l'évènement n'était pas cohérent avec d'autres événements de crue qui ont eu des débits plus élevés mais des hauteurs inférieures.

<sup>7</sup> Modèle numérique de terrain (MNT)



Les seuils rouges pour la station Nomeny et jaune pour la station Metz n'étaient pas associés à une crue historique et, par conséquent, il n'y avait pas de hauteur d'eau définie. Ainsi, pour ces cas, les hauteurs d'eau ont été estimées par extrapolation à partir des valeurs de hauteur d'eau des événements de classe adjacente.

Tableau 2 – Seuils de crue pour les stations Nomeny et Metz

<b>Station : Nomeny</b>			
<b>Classe</b>	<b>Date</b>	<b>Hauteur (m)</b>	<b>Débit (m<sup>3</sup>/s)</b>
Jaune	03/02/2013	2,66	58,1
Orange	24/12/2010	3,22	95,6
Rouge	-	3,81*	133*
<b>Station : Metz</b>			
<b>Classe</b>	<b>Date</b>	<b>Hauteur (m)</b>	<b>Débit (m<sup>3</sup>/s)</b>
Jaune	-	3,25*	74,5*
Orange	15/01/2004	3,72	105
Rouge	16/10/1981	4,47	143*

\* Valeurs estimées

Les valeurs de seuil d'étiage (Tableau 3) sont issues du Bulletin de Suivi d'Etiage Région Grand Est (2021) pour la station Metz. Les niveaux de vigilance associées sont : gris, (étiage légèrement marqué), jaune (étiage marqué), orange (étiage sévère) et rouge (étiage extrêmement sévère).

Tableau 3 – Seuils d'étiage pour la station Metz

<b>Classe</b>	<b>Débit (m<sup>3</sup>/s)</b>
Gris	1,88
Jaune	1,50
Orange	1,09
Rouge	0,67

On remarque l'absence de valeurs réglementaires de seuils de crue pour Moyenvic et de crue e d'étiage pour Moyenvic et Nomeny. Le calcul des valeurs des seuils manquantes ne fait partie des objectifs prioritaires de ce travail.

## 4. METHODOLOGIE

### 4.1 Modélisation hydrologique prenant en compte la gestion de l'étang de Lindre

#### 4.1.1 Modèle hydrologique GR5J et le package airGRiwrn

Le modèle hydrologique conceptuel GR5J (Le Moine, 2008) a été adopté pour simuler les débits à un pas de temps journalier à l'aide de cinq paramètres à optimiser, X1 à X5. Les données d'entrée sont la précipitation (P) et l'évapotranspiration potentielle (E) et le modèle est composé de deux réservoirs : production et routage (Figure 5).

La première opération est la neutralisation de P par E pour déterminer une pluie nette ( $P_n$ ) et une évapotranspiration nette ( $E_n$ ). Ensuite, dans le réservoir de production,  $X_1$  (mm) représente la capacité maximale du réservoir et S (mm) le contenu du réservoir au début du jour k, déterminé par le bilan entre l'eau alimentant le réservoir de production ( $P_s$ ) et l'évapotranspiration réelle ( $E_s$ ). De plus, une percolation issue du réservoir de production (Perc) est calculée. Cette valeur est ajoutée à la proportion de précipitation nette qui ne va pas dans le réservoir de production et ne s'évapore pas, ce qui donne la quantité d'eau qui atteint le routage du modèle ( $P_r$ ).

$P_r$  est donc routée par l'hydrogramme unitaire (UH) qui dépend du paramètre  $X_4$  (jours), qui correspond au temps de base de l'hydrogramme. A chaque pas de temps, les débits sont calculés à partir de la convolution des pluies antérieures, étant 90% du débit ( $Q_9$ ) transféré au réservoir de routage, alors que 10% du débit est plus rapidement transféré à l'exutoire ( $Q_1$ ).

Dans le réservoir de routage,  $X_3$  (mm) correspond à la capacité à un jour du réservoir et  $R_1$  (mm) le niveau du réservoir en début du pas de temps. Le débit final Q (mm/jour) correspond à la somme des débits partiels, issus du réservoir de routage ou de la branche rapide, corrigés par une fonction qui dépend du coefficient d'échange en eau  $X_2$  (mm/jour) et du seuil de changement de signe de l'échange  $X_5$  (adimensionnel).

Les débits issus du sous bassin en amont sont transférés au sous-bassin en aval grâce au paramètre lag L (jours), qui représente, plus précisément, le délai entre la précipitation maximale et le débit de pointe.

Le package airGR (Coron et al., 2017, 2022) permet la modélisation hydrologique semi-distribuée. Le package airGRiwrn (Dorchies, 2022), qui repose sur airGR, permet une modélisation intégrant les prélèvements et rejets d'eau dans les modèles GR semi-distribués. Cet outil sera donc utilisé, afin de prendre en compte la gestion de l'étang de Lindre, dont la dynamique de vidange impacte le débit de la Seille, et permet d'obtenir les débits simulés à plusieurs stations

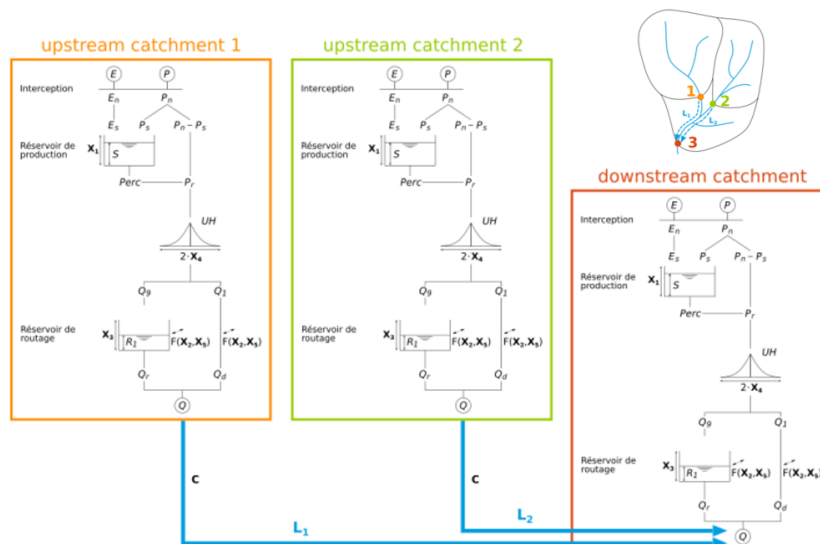


Figure 5 – Schéma de la structure du package airGRiwrn pour le modèle hydrologique GR5J. Source : Dorchies et al. (2021)

#### 4.1.2 Gestion de l'étang : pratiques actuelles et modèle de gestion

La gestion actuelle de l'étang de Lindre est centrée sur l'activité piscicole et, par conséquent, des vidanges pour la pêche sont nécessaires tous les 1 à 3 ans. Les vidanges sont déclenchées au début de l'automne et se font progressivement au cours de cette saison. Le remplissage du bassin s'effectue ensuite au cours de l'hiver, ce qui correspond à la période des pluies. Par ailleurs, la gestion de l'étang de Lindre est contrainte par un objectif de maintien d'un niveau d'eau suffisamment haut pour la préservation de la biodiversité périphérique à l'étang et la pisciculture.

La gestion de l'étang est dynamique et les dates de début et de fin de vidange varient donc à chaque vidange. Les dates exactes de début et de fin de la période de vidange, ainsi que les débits de vidange journaliers sur la période passée (1984-2019), ne sont pas connues avec précision.

Afin de prendre en compte le remplissage et la vidange de l'étang de Lindre, un modèle de gestion simplifié a été mis en place et validé préalablement au stage. Il prend en données d'entrée les dates de démarrage des vidanges annuelles estimées préalablement (Annexe A) au stage et utilise les paramètres suivants :

- $L_1$  : la durée d'augmentation initiale de la vidange, constituée dans un premier temps d'un débit égal à une interpolation linéaire de zéro jusqu'à  $Q_{\max}$ ,
- $Q_{\max}$  : le débit de vidange maximal, qui forme un plateau jusqu'à la condition  $V_{\text{fin}}$  ou  $\text{DOY}_{\max}$ ,
- $V_{\text{fin}}$  : le volume à atteindre dans le réservoir pour commencer à déclencher la fin de la vidange,
- $\text{DOY}_{\max}$  : le jour de l'année maximal auquel déclencher la fin de la vidange,
- $L_{\text{fin}}$  : la durée de la phase finale de la vidange, dont le débit forme une interpolation linéaire entre  $Q_{\max}$  et zéro.

Préalablement au stage, un calage à la station de Moyenvic (A7581020), la plus en amont, a permis de déterminer les paramètres du modèle de gestion (Tableau 4).

Tableau 4 – Calibration de la gestion de l'étang de Lindre

$L_1$ (jours)	$Q_{\max}$ (m <sup>3</sup> /s)	$V_{\text{fin}}$ (m <sup>3</sup> )	$\text{DOY}_{\max}$ (jour de l'année)	$L_{\text{fin}}$ (jours)
9	3	3.10 <sup>6</sup>	310	20

Le modèle hydrologique influencé par l'étang de Lindre (i.e. avec inclusion du modèle de gestion) a ensuite été étendu à l'ensemble de la Seille, soit jusqu'à la station aval de la Seille à Metz (A7881010) et ajoutant le sous-bassin versant intermédiaire de la Seille à Nomeny (A7821010). Le calage a été effectué en optimisant le critère KGE (Gupta et al., 2009) appliqué à la racine des débits, afin de ne pas favoriser des débits trop élevés ou trop faibles sur la période entre 01/09/1984 et 31/08/2019, avec une période d'initialisation de 365 jours, afin d'atténuer l'effet des conditions aux limites initiales du modèle.

## 4.2 Evaluation de l'impact du changement climatique

L'étude de vulnérabilité au changement climatique sera mise en place à partir des données de projections climatiques, associés à différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre (RCP 2.6, 4.5, et 8.5). La période de référence considérée dans le cadre de ce travail sera entre 1976 et 2005 et la période future entre 2041 et 2070.

Selon une étude précédente réalisée au sein de l'équipe, la vidange de l'étang s'est produite 21 fois sur la période de 1984-2019 (Annexe C). Ainsi, il y a une probabilité de 64% de chances qu'une vidange se produise une année donnée, voire qu'une vidange se produise environ tous les 19 mois. Les projections hydrologiques prenant en compte la gestion de l'étang de Lindre déclencheront des vidanges aléatoirement à partir de cette probabilité annuelle.

Le début de la période de vidange sera défini prenant en compte la probabilité de chaque jour de septembre et octobre de déclencher la vidange. Les probabilités seront obtenues à partir de l'évaluation sur l'horizon passé (1984-2019). Finalement, la vidange se déroulera normalement jusqu'à ce que le  $V_{fin}$  ou  $DOY_{max}$  soit atteint.

## 4.3 Evaluation d'un scénario d'adaptation de la gestion de l'étang de Lindre

Une gestion alternative de l'étang de Lindre sera proposée afin d'évaluer conjointement sa capacité i) d'écrêtement de crue et ii) de soutien d'étiage.

L'écrêtement des crues concerne les mois avec un risque de fortes précipitations (novembre à mars). Durant cette période, l'objectif est de vider le réservoir jusqu'à un volume minimum à conserver dans l'étang fixé à 10.000 Mm<sup>3</sup> (cf Figure 4), afin de ne pas trop varier le niveau de la retenue, ce qui aurait un impact sur la biodiversité périphérique. Le volume évacué journalièrement pour atteindre et maintenir ce niveau est de 3 m<sup>3</sup>/s.

Pour le soutien d'étiage, le volume minimum à conserver dans l'étang a été défini à 8.000 Mm<sup>3</sup> (cf Figure 4). Les conditions de soutien d'étiage à Metz sont présentées ci-dessous et tiennent compte des valeurs de débit associés aux seuils de crue et d'étiage (cf. Tableau 5 et Tableau 6):

- Le soutien d'étiage se déclenche quand le débit passe en-dessous de 1,09 m<sup>3</sup>/s (niveau d'alerte orange) et prend la valeur de 0,41 m<sup>3</sup>/s, soit la différence entre le niveau d'alerte orange et le niveau d'alerte jaune ;
- Si malgré le soutien, le débit à Metz redevient inférieur à 1,09 m<sup>3</sup>/s, le débit de soutien d'étiage sera fixé à deux fois 0,41 m<sup>3</sup>/s. Le soutien d'étiage ne s'interrompt que si le débit passe au-dessus de 1,69 m<sup>3</sup>/s, ce qui correspond au niveau intermédiaire entre le niveau d'étiage légèrement marqué (1,88 m<sup>3</sup>/s) et marqué (1,50 m<sup>3</sup>/s).

## 4.4 Indicateurs d'évènements extrêmes

Afin d'évaluer les évènements extrêmes, deux indicateurs seront utilisés : la fréquence et la durée moyenne par évènement, détaillés ci-dessous :

- Un évènement extrême est constitué par l'ensemble des jours où le débit a dépassé le seuil réglementaire. La longueur minimale entre deux évènements était fixée à 3 jours ;
- La fréquence correspond au nombre d'évènements extrêmes qui se produisent dans la période d'analyse.

- La durée moyenne par évènement est la somme des durées des évènements extrêmes pendant la période d'analyse, divisée par le nombre d'évènements.

## 5. RESULTATS

Les projections hydrologiques prenant en compte la gestion de l'étang de Lindre, présentées ci-dessous, ont utilisé des dates de vidanges générées sur l'horizon 1950-2100 (Annexe B).

### 5.1 Performance du modèle hydrologique en prenant compte la gestion actuelle de l'étang de Lindre

Le calage du modèle hydrologique a été effectué entre les débits observés et le débit simulé (en utilisant les données SAFRAN) sur la période de 01/09/1984 à 31/08/2019, en tenant compte une période d'initialisation de 365 jours.

Les paramètres obtenus pour le calage (Tableau 7) montrent des valeurs cohérentes : peu de variation des valeurs de paramètres entre chaque sous-bassin, pas de valeur limite. Les valeurs de la fonction objectif (KGE de la racine du débit), comprises entre 0,92 et 0,94 (le maximum est à 1), indiquent une très bonne performance du modèle hydrologique avec prise en compte de la gestion de l'étang de Lindre.

Tableau 7 – Paramètres et performance de calage obtenu sur les différents sous-bassins étudiés

Station	Paramètres du modèle hydrologique						KGE
	lag	X1	X2	X3	X4	X5	
A7581020 (Moyenvic)	0,35	211,55	-1,27	40,38	1,91	0,43	0,92
A7821010 (Nomeny)	0,27	193,65	-0,79	24,50	2,15	0,42	0,94
A7881010 (Metz)	0,57	148,41	-0,97	10,70	2,00	0,40	0,94

On observe globalement que les simulations  $Q_{sim}$  (i.e. en utilisant SAFRAN) et les projections  $Q_{proj}$  (i.e. en utilisant DRIAS) sur la période de calage sont capables de représenter, de façon satisfaisante, la majeure partie des débits et les régimes hydrologiques de chaque sous-bassin (Figure 6). On remarque néanmoins que le  $Q_{proj}$  sont généralement plus élevés en hiver par rapport aux  $Q_{sim}$ , en particulier à Moyenvic. Les projections climatiques produisent davantage de précipitations sur ces mois d'hiver.

De plus, la fréquence d'étiage et de crue pour les stations Metz et Nomeny, montrent que les valeurs observées sont comprises entre les valeurs minimales et maximales simulées avec les projections sur la période de calage, confirmant que notre ensemble de modèles climatiques paraît bien simuler les évènements extrêmes (Figure 6).

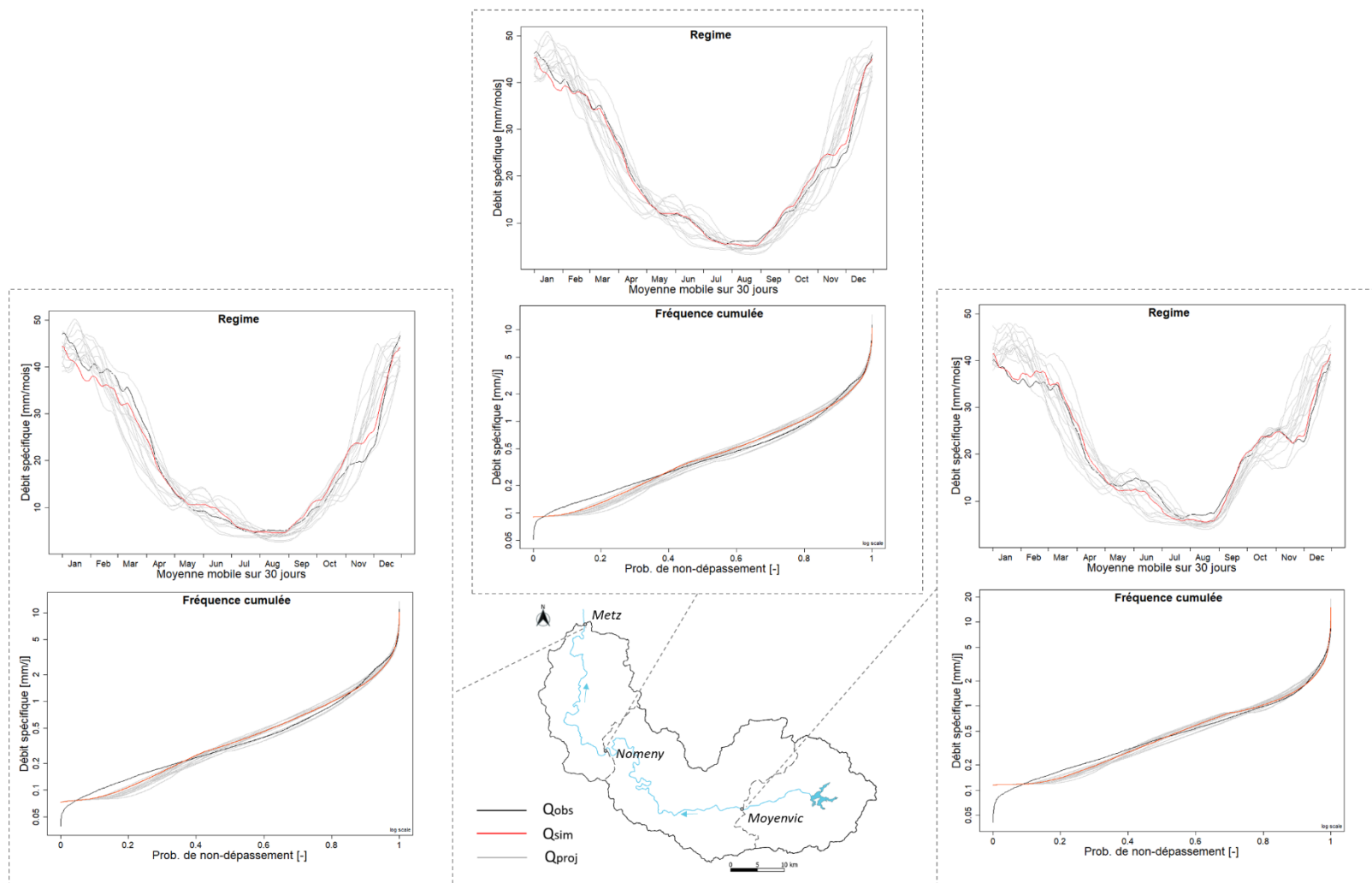


Figure 6 – Régimes hydrologiques et courbes des débits classés observés, simulés et projetés sur les sous-bassins étudiés pendant la période 1985-2019 (Moyenvic et Nomeny) et 1985-2015 (Metz). Les 13 courbes projetées représentent les 13 projections disponibles pour les 5 couples GCM/RCM. On attirera l'attention sur le fait que la période d'intérêt allant au-delà de 2005, il y a autant de courbes que de RCP disponible pour un couple donné

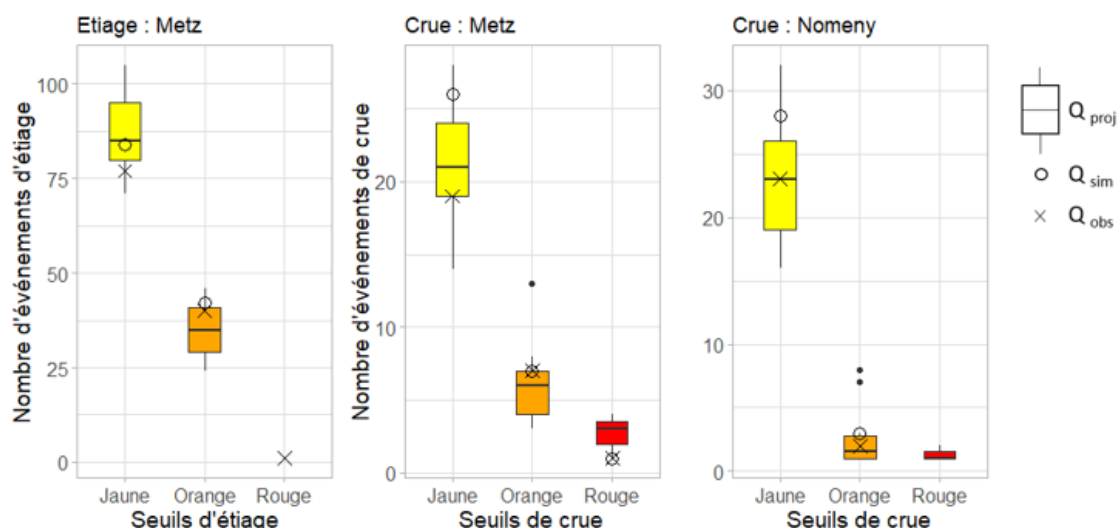


Figure 7 – Indicateurs de fréquence d’étiage et de crue pour la station de Metz (1985-2015) et de crue pour la station Nomeny (1985-2019)

## 5.2 Impact du changement climatique en prenant compte la gestion actuelle de l’étang de Lindre

Les effets du changement climatique sur la ressource en eau (Tableau 8) sont variables pour chaque saison de l’année. Pour l’hiver et le printemps, on observe une augmentation des débits moyens journaliers, qui peut atteindre respectivement 33% et 20%, pour le scénario RCP 8.5. En été et en automne, l’impact du changement climatique est plus incertain, on remarque une variabilité forte sur les évolutions entre les débits futurs et historiques.

Tableau 8 – Ecart du débit journalier moyen entre le futur moyen (2041-2070) et la période historique (1976-2005) par saison

Station	Scénario	Ecart du débit journalier moyen entre la période future et la période historique par saison - moy [min ; max] (%)			
		DJF	MAM	JJA	SON
Moyenvic	RCP 2.6	17 [6 ; 26]	13 [8 ; 17]	12 [9 ; 13]	-9 [-16 ; -1]
	RCP 4.5	21 [7 ; 36]	11 [-5 ; 26]	-6 [-32 ; 20]	4 [-19 ; 46]
	RCP 8.5	33 [-19 ; 63]	19 [-10 ; 38]	15 [-27 ; 36]	9 [-18 ; 72]
Nomeny	RCP 2.6	16 [6 ; 23]	14 [7 ; 19]	12 [6 ; 17]	-11 [-21 ; 1]
	RCP 4.5	18 [5 ; 35]	11 [-7 ; 21]	-7 [-31 ; 30]	10 [-19 ; 57]
	RCP 8.5	30 [17 ; 57]	19 [-9 ; 36]	14 [-26 ; 28]	13 [-23 ; 86]
Metz	RCP 2.6	16 [7 ; 22]	14 [7 ; 20]	12 [4 ; 17]	-13 [-23 ; 1]
	RCP 4.5	18 [5 ; 36]	11 [-8 ; 21]	-7 [-31 ; 33]	11 [-15 ; 58]
	RCP 8.5	30 [16 ; 57]	20 [-9 ; 37]	14 [-26 ; 29]	13 [-23 ; 88]

Concernant la fréquence d’évènements extrêmes, les résultats montrent (Figure 8) que le changement climatique intensifiera plus significativement la fréquence de crues à Nomeny et à Metz et moins significativement la fréquence d’étiage à Metz.

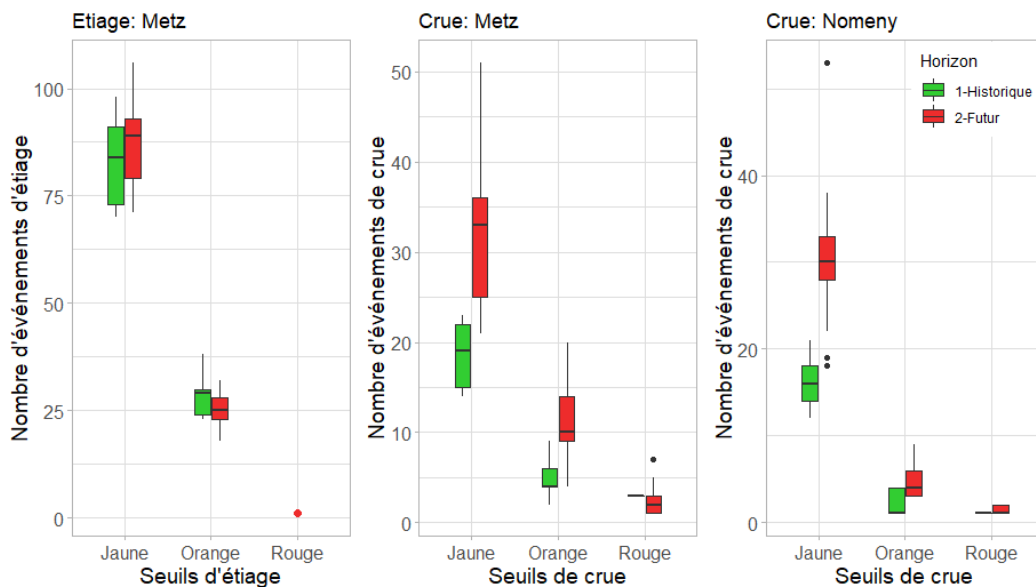


Figure 8 – Indicateur de fréquence d’étiage et de crue pour la station de Metz et de crue pour la station de Nomeny – Périodes historique (1976-2005) et futur moyen (2041-2070)

La différence entre le nombre d’événements extrêmes dans la période historique et future est variable selon chaque projection (Figure 9). Cependant, on remarque que cette variabilité est plus importante pour l’étiage.

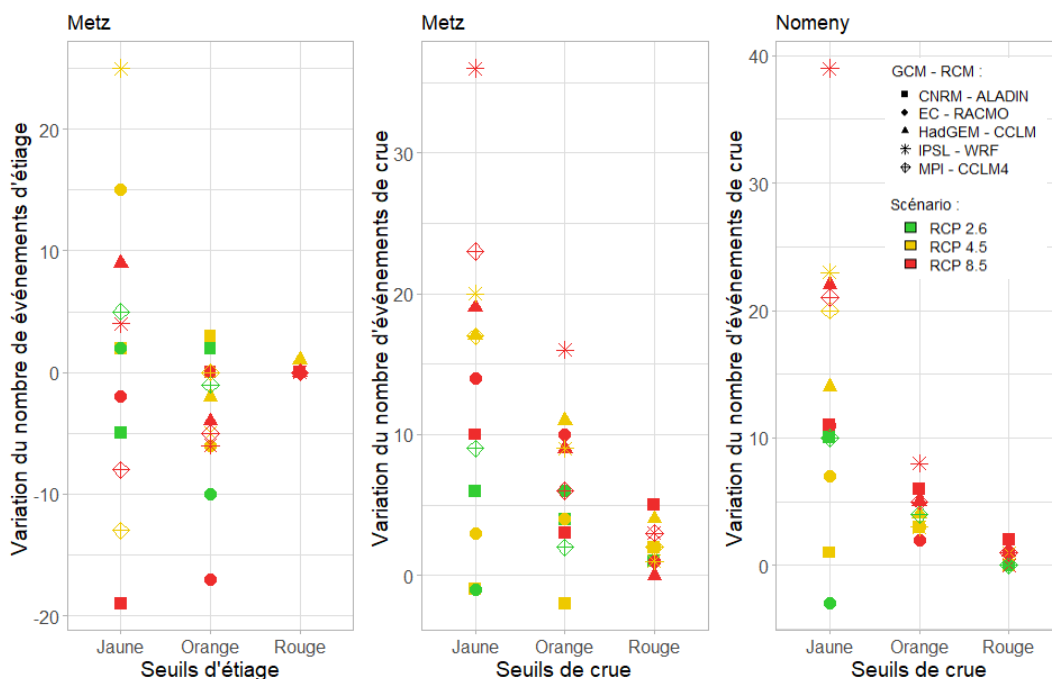


Figure 9 – Variation du nombre d’événements extrêmes entre la période historique (1976-2005) et le futur moyen (2041-2070)

Concernant la durée des événements extrêmes, les résultats montrent que les crues dureront plus longtemps, alors que l’effet du changement climatique sur l’étiage est moins explicite.



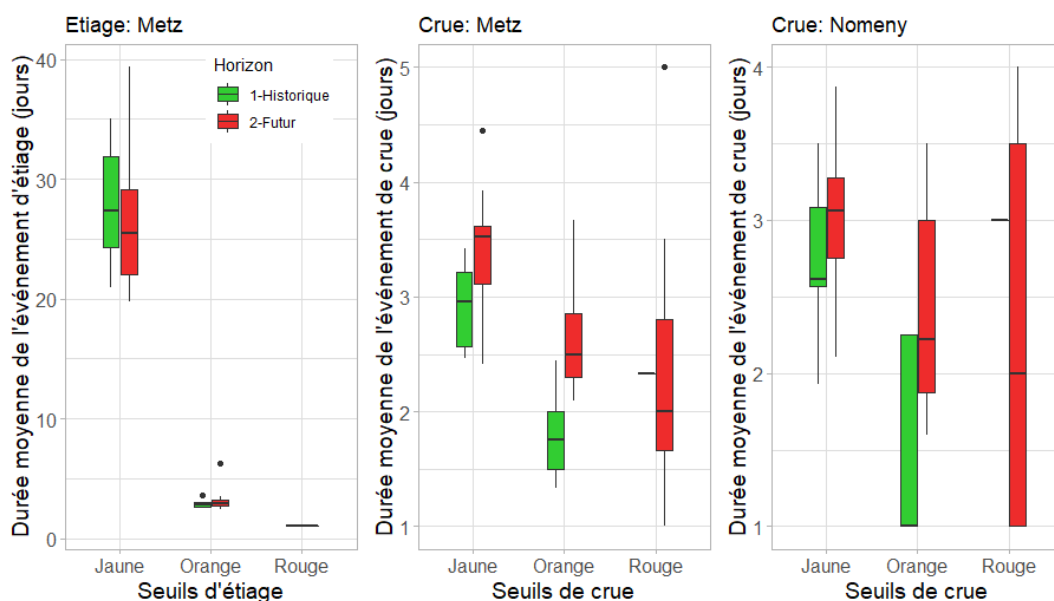


Figure 10 – Indicateur de durée moyenne d’étéage et de crue pour la station Metz et de crue pour la station Nomeny – Périodes historique (1976-2005) et futur moyen (2041-2070)

### 5.3 Impact du changement climatique en prenant compte la gestion alternative de l’étang de Lindre

Avec la gestion alternative de l’étang de Lindre (Figure 11 et Figure 12), les évènements d’étéage de niveau jaune sont plus fréquents. La gestion alternative permet cependant de réduire la fréquence des étéages orange et rouge. De plus, la gestion alternative permet de réduire la durée des étéages pour tous les seuils. Ainsi l’augmentation du nombre d’évènements jaunes pourrait être trompeuse, un même évènement pouvant être divisé en plus de petits évènements plus courts avec la gestion alternative.

En revanche, l’impact sur les crues à Metz et Nomeny est plus faible, à la fois pour le nombre d’évènements et leur durée. Par conséquent, le volume d’écroulement de crue est insuffisant pour produire un effet significatif sur les stations situées loin en aval (Moyenvic et Metz).

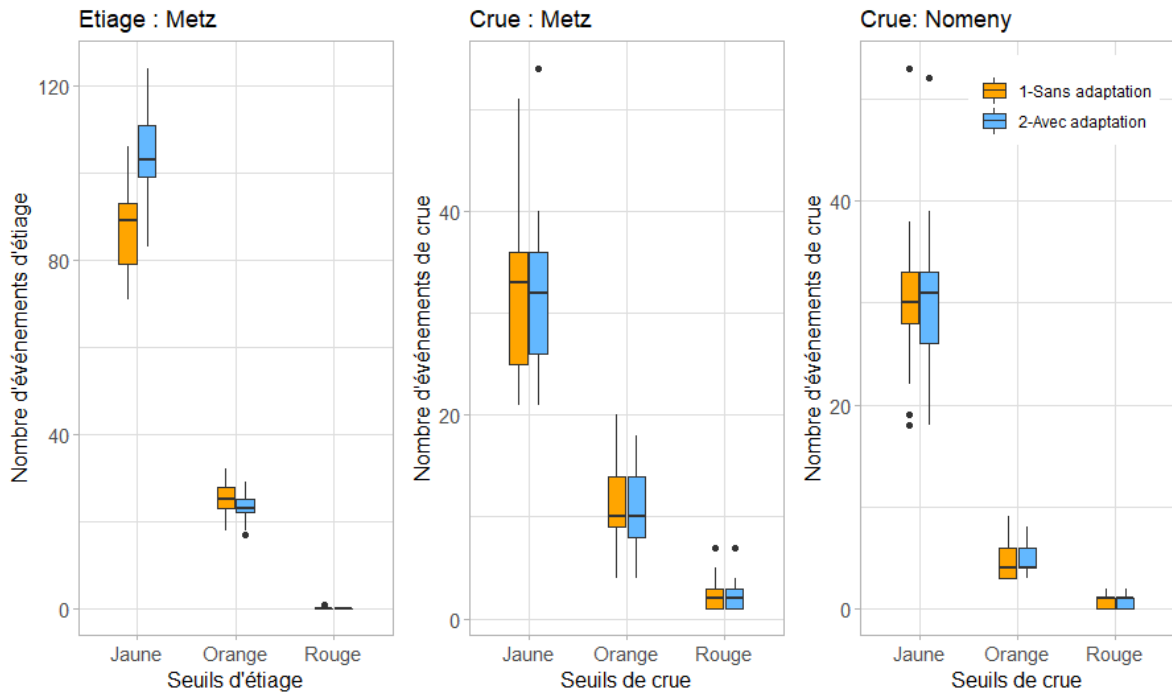


Figure 11 – Indicateur de fréquence des évènements extrêmes à Metz et Nomeny en prenant en compte ou non la gestion alternative de l'étang de Lindre - Futur moyen (2041-2070)

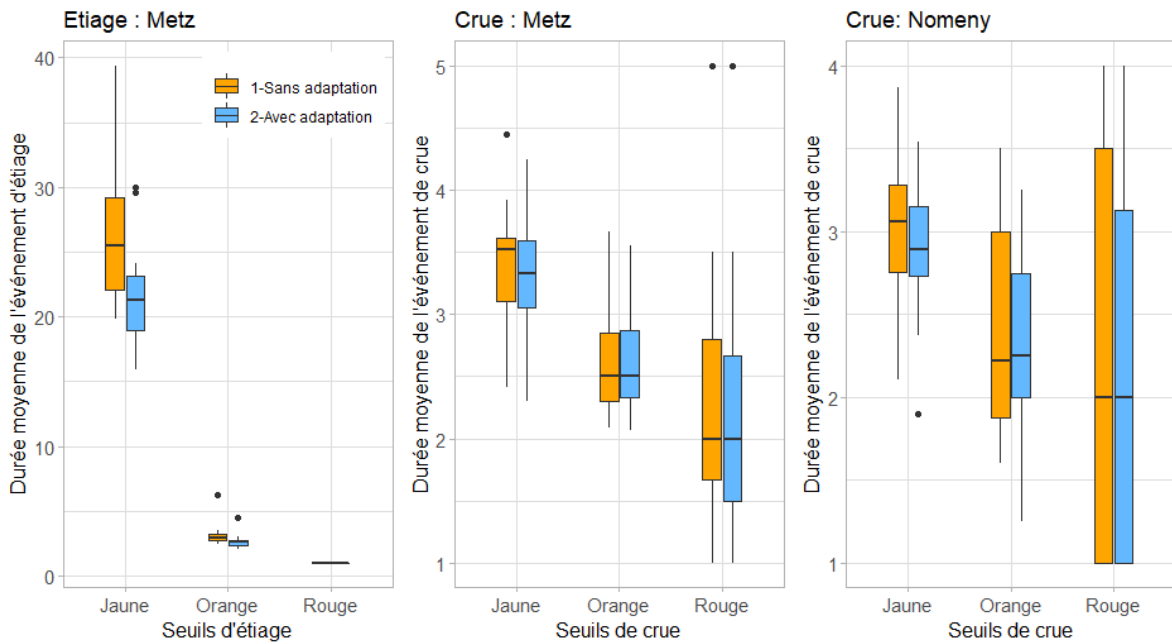


Figure 12 – Indicateur de durée moyenne des évènements extrêmes à Metz et Nomeny en prenant compte ou non la gestion alternative de l'étang de Lindre - Futur moyen (2041-2070)

## 6. DISCUSSION

### 6.1 Analyse des résultats

Les résultats obtenus dans l'étude des impacts du changement climatique sur le bassin versant de la Seille, avec la gestion actuelle de l'étang de Lindre, montrent une tendance à la hausse des débits pendant l'hiver et printemps et une grande variabilité sur l'évolution des débits pendant l'été et automne. De plus, la fréquence d'évènements de crue augmentera plus significativement à Nomeny et à Metz, tandis que la fréquence d'évènements d'étiage augmentera moins fortement à Metz. Concernant la durée des événements extrêmes, les résultats montrent que les crues dureront plus longtemps, alors que l'effet du changement climatique sur la durée des étiages est plus incertain.

Ces résultats sont en accord avec les résultats des études antérieures menées sur la France. L'intensification des crues hivernales et la forte variabilité des débits obtenus sur la période d'étiage estivale sont cohérentes avec les simulations du projet Explore 2070, sur la région Nord-est (Est du district Rhin-Meuse), et plus notamment avec le projet MOSARH21, menée à l'échelle du bassin versant de la Moselle, de la Sarre et du Rhin.

Les résultats obtenus, en prenant en compte la gestion alternative de l'étang de Lindre, montrent la capacité limitée de l'étang à écrêter les crues et soutenir les étiages des stations de Metz et Nomeny. Cela peut s'expliquer d'une part par la contrainte de ne pas modifier sensiblement le niveau d'eau de la retenue, car cela impacte l'activité piscicole et la biodiversité, ce qui a conduit à tester une stratégie maintenant un volume important dans l'étang. D'autre part, l'étang est situé à la tête du bassin versant, et le débit produit en aval de ce dernier joue probablement plus grandement sur les crues à Nomeny et à Metz que le débit intercepté par l'étang. Malgré tout, les résultats montrent que la gestion alternative de l'étang de Lindre est capable de réduire la durée des étiages à Metz. Il est probable que les effets de cette stratégie alternative soient plus importants à la station de Moyenvic, station représentative des enjeux agricoles souffrant des inondations régulières.

### 6.2 Apports, limitations et perspectives

Ce travail a permis d'évaluer les impacts du changement climatique sur l'hydrologie à l'échelle du bassin versant de la Seille. Les autres études menées sur ce sujet ont été faites à l'échelle de la France ou plus larges (e.g. la Moselle), ou bien sur autres bassins que celui de la Seille. De plus, la modélisation hydrologique a pris en compte de façon explicite la gestion actuelle de l'étang de Lindre, ce qui permet de prendre en compte l'impact du changement climatique sur sa gestion et de tester des stratégies alternatives, répondant à de réelles demandes sur le territoire. Ainsi, une proposition d'adaptation face au changement climatique a été menée à partir de la gestion alternative de l'étang de Lindre. L'adaptation proposée explore la possibilité d'élargir le rôle et donc écrêter les crues et soutenir les étiages, ce qui est souhaité pour le secteur agricole concerné par les conséquences liées aux événements extrêmes.

L'adaptation de la gestion de l'étang a été faite de manière simplifiée, en tenant compte des limites de temps et d'information lors de ce travail. On remarque que les volumes pour l'écrêtement de crues et d'étiage, fixés dans le cadre de ce travail, méritent d'être présentés et discutés avec le gestionnaire de l'étang afin de vérifier sa viabilité opérationnelle, compte tenu des diverses contraintes imposées à la gestion de l'étang liées, notamment, à l'activité piscicole,

à la biodiversité et à la sécurité du barrage. A partir de ce dialogue, la gestion alternative de l'étang de Lindre peut être améliorée.

Par ailleurs, il sera nécessaire de compléter ce travail par l'intégration de l'ensemble des projections DRIAS.

L'impact du changement climatique et de la stratégie d'adaptation sur les niveaux d'eau dans l'étang de Lindre aurait également pu être analysé.

## 7. CONCLUSION

Ce mémoire portait sur l'utilisation d'un modèle hydrologique prenant en compte la gestion pour l'évaluation de la vulnérabilité et l'adaptation au changement climatique sur le bassin versant de la Seille. Le modèle hydrologique GR5J à l'aide de l'outil de gestion airGRiwrn avait une bonne performance pendant l'étape de calage, ce qui a été vérifié par la valeur du critère KGE comprises entre 0,92 et 0,94, en sachant que la valeur idéale à atteindre est 1.

Dans un premier temps, les impacts du changement climatique ont été évalués dans le bassin versant de la Seille, en prenant en compte la gestion actuelle de l'étang de Lindre, sur l'horizon futur moyen (2041-2070) par rapport à la période de référence (1976-2005). Actuellement, l'étang a une gestion centrée sur l'activité piscicole, ce qui implique des vidanges en début d'automne tous les 1 à 3 ans. La gestion actuelle maintient par ailleurs un débit élevé nécessaire à la biodiversité et à la pisciculture. Les résultats ont montré que les ressources en eau seront affectées différemment à chaque saison de l'année. Pour l'hiver et printemps on observe une augmentation des débits moyens journaliers, qui peuvent atteindre respectivement 33% et 20%, pour le scénario le plus critique (RCP 8.5). En été et en automne, l'impact du changement climatique est plus incertain. Concernant la durée des événements extrêmes, les résultats montrent que les crues dureront plus longtemps, alors que l'effet du changement climatique sur l'étiage est plus incertain.

Dans un second temps, une gestion alternative de l'étang de Lindre a été proposée et évaluée afin d'explorer sa capacité d'écarter des crues et soutenir l'étiage. Les résultats obtenus, en prenant en compte la gestion alternative de l'étang de Lindre, montrent une réduction de la durée des étiages à Metz, une diminution du nombre d'évènements de niveau orange, mais une augmentation du nombre d'évènements de niveau jaune, une fois qu'ils sont devenus plus courts. L'impact de la gestion sur les crues à Metz et Nomeny paraît peu significatif. Néanmoins, une évaluation à la station de Moyenvic, plus en amont, serait nécessaire pour finaliser l'évaluation. L'évaluation à Moyenvic n'a été pas comprise dans ce travail en raison de l'absence de valeurs réglementaires de seuils d'étiage et le calcul des seuils sortait des objectifs prioritaires de ce travail.

La connaissance apportée par ce travail sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie de la Seille peut intéresser les acteurs clés sur le territoire (agriculteurs et les services contrôleurs et réglementaires de l'Etat) et ouvre la voie à l'utilisation de modélisations hydrologiques intégrées et parcimonieuses pour évaluer des stratégies d'adaptation au changement climatique.

## REFERENCES

- Chauveau, M., Chazot, S., Perrin, C., Bourgin, P.-Y., Sauquet, E., Vidal, J.-P., Rouchy, N., Martin, E., David, J., Norotte, T., Maugis, P., De Lacaze, X., 2013. Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? *Houille Blanche* 5–15. <https://doi.org/10.1051/lhb/2013027>
- Coron, L., Delaigue, O., Thirel, G., Dorchies, D., Perrin, C. and Michel, C. (2022). airGR: Suite of GR. Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. R package version 1.7.0, doi: 10.15454/EX11NA, URL: <https://CRAN.R-project.org/package=airGR>.
- Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C. and Andréassian, V. (2017). The Suite of Lumped GR Hydrological Models in an R package. *Environmental Modelling and Software*, 94, 166-171, doi: 10.1016/j.envsoft.2017.05.002.
- Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement, 2021. Bulletin de Suivi d'Etiage Région Grand Est.
- Domaine Départemental de Lindre, 2016. Consignes écrites - Document décrivant l'organisation de l'exploitant.
- Dorchies, D., Delaigue, O., Thirel, G., 2021. airGRiwrn: an extension of the airGR R-package for handling Integrated Water Resources Management modeling (other). *pico*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-2190>
- El Ghachi, M., 2007. La Seille : Un système fluvial anthropisé (Hydrologie).
- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., Martinez, G.F., 2009. Decomposition of the mean squared error 651 and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.* 652 377, 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Masson G., Banas D., François D., Cizel O., Leglize L., Didier S., Corbonnois J., 2005, Vidange des étangs piscicoles : contraintes réglementaires et d'exploitation et Incidences environnementales (Emptying of extensive fishponds : practices, control and environmental incidences). In: *Bulletin de l'Association de géographes français*, 82e année, 2005-
- Météo-France, 2020. Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole.
- Météo-France, 2020. Short list DRIAS-2020.
- Moine, N.L., n.d. Le bassin versant de surface vu par le souterrain : une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit ? 348.
- Parrilla, T.G., Barataud, F., 2020. Une Seille, des Seilles.
- Service interministériel des affaires civiles et économiques de défense et de la protection civile, 2016. Règlement Départemental d'Annonce de Crue.
- Thirel, G., Collet, L., Rousset, F., Delaigue, O., Francois, D., Gailhard, J., Lelay, M., Perrin, C., Reverdy, M., Samacoits, R., Terrier, M., Vidal, J.-P., Wagner, J.-P., 2021. The CHIMERE 21 project 31.

Vidal, J.P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J.M. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1627–1644. doi: 10.1002/joc.2003

## ANNEXES

### Annexe A : Dates de début de vidange – Simulation avec les données SAFRAN sur la période 1984-2019

Début de vidange	
11/09/1986	06/09/2001
15/09/1987	05/09/2002
21/09/1990	07/10/2003
12/09/1992	16/09/2004
07/09/1994	01/09/2007
20/09/1995	01/09/2009
07/10/1996	10/09/2011
03/09/1997	13/09/2013
15/09/1998	12/09/2015
02/09/1999	19/09/2017
01/09/2000	

**Annexe B : Dates de début de vidange – Simulation avec les données des projections DRIAS sur la période 1950-2100**

Début de vidange			
09/10/1950	10/09/1985	06/09/2025	15/09/2060
11/09/1951	20/09/1987	08/10/2026	01/09/2061
21/09/1954	20/09/1988	10/09/2028	09/09/2062
10/09/1955	01/09/1989	18/09/2029	14/09/2064
03/09/1956	14/09/1991	01/09/2031	14/09/2065
14/09/1958	02/09/1993	02/09/2032	01/09/2069
02/09/1961	17/09/1994	11/09/2034	11/09/2072
03/09/1962	09/10/1995	09/10/2035	12/09/2073
06/09/1964	02/09/1996	10/09/2036	21/09/2074
09/10/1965	14/09/1999	12/09/2037	19/09/2075
04/09/1966	20/09/2000	21/09/2038	13/09/2076
13/09/1969	01/09/2004	19/09/2040	01/09/2077
09/09/1970	15/09/2006	02/09/2043	05/09/2078
04/09/1971	12/09/2007	02/09/2044	11/09/2079
11/09/1974	08/10/2011	16/09/2048	03/09/2080
01/09/1976	16/09/2013	04/09/2050	06/09/2083
09/09/1977	10/09/2016	01/09/2051	16/09/2084
10/09/1978	20/09/2017	21/09/2052	01/09/2091
19/09/1979	14/09/2018	19/09/2053	03/09/2095
08/10/1981	15/09/2019	10/09/2054	21/09/2096
03/09/1983	21/09/2020	10/09/2058	02/09/2100
05/09/1984	19/09/2024	05/09/2059	02/09/2100



### Annexe C : Schéma de la chronique de remplissage et vidange de l'étang de Lindre sur la période de calage

