



HAL
open science

Etude de l'impact du changement climatique sur la gestion des lacs-réservoirs de la Seine

F. Dehay

► **To cite this version:**

F. Dehay. Etude de l'impact du changement climatique sur la gestion des lacs-réservoirs de la Seine. Sciences de l'environnement. 2012. hal-02597326

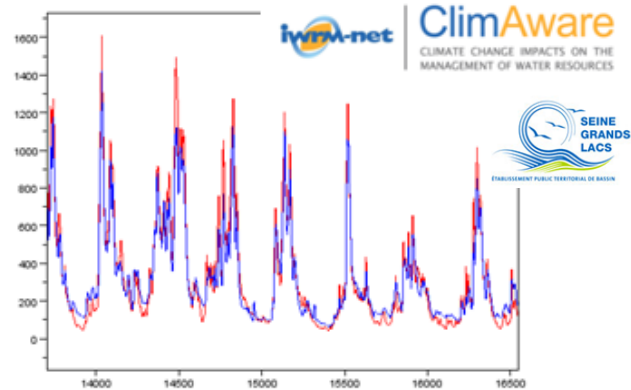
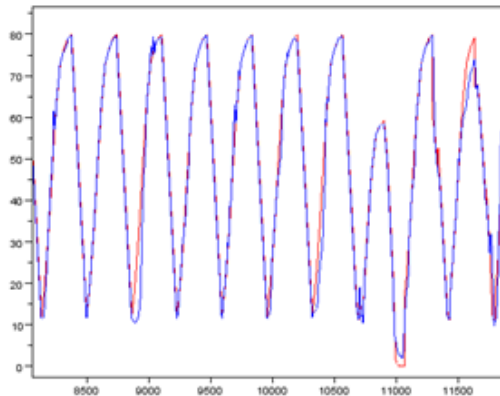
HAL Id: hal-02597326

<https://hal.inrae.fr/hal-02597326v1>

Submitted on 15 May 2020

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

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



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*Etude de l'impact du
changement climatique sur la
gestion des lacs-réservoirs de
la Seine*

**DEHAY Florine
Promotion Fes**

**Maître de Stage: M. DORCHIES David
Tuteur de Stage: M FINAUD-GUYOT Pascal**

Mémoire présenté pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES

Stage réalisé du 1 février au 31 juillet 2012

Résumé

Les lacs-réservoirs de la Seine : modélisation du bassin versant de la Seine

Dans le cadre du projet européen Climaware, une modélisation du bassin versant de la Seine avec pour exutoire Paris a été réalisée afin d'étudier l'effet du changement climatique sur les règles de gestion des quatre lacs-réservoirs de la Seine (lac Aube, lac Marne, lac Seine, lac Pannecière).

Il s'agit du modèle TGR de type GR, dans un premier temps réalisé et calé sans prendre en compte les quatre lacs-réservoirs. Suivant certaines conditions, telles que la courbe de gestion de ces lacs et leurs volumes maximum et minimum admissibles, il a fallu les intégrer au modèle. Différents cas ont dû être déterminés auparavant, selon les particularités des lacs.

Il faut reproduire au mieux les effets des lacs, leur courbe de volume et les débits dans les rivières, afin d'avoir un modèle le plus exact possible. Les chroniques de débits utilisées pour son calage sont celles des débits naturalisés, débits mesurés desquels l'influence des lacs a été effacée. Les autres actions anthropiques (prélèvements AEP...) sont présentes.

Les indicateurs de performance indiquant que le modèle était suffisamment proche de la réalité, il a alors été possible de passer à la phase suivante, c'est-à-dire la modélisation avec les forçages des modèles climatiques du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat).

Ces simulations doivent permettre d'établir une tendance de l'effet des lacs en temps futur par rapport au temps présent. Pour cela, quatorze ensembles de données fournies par le GIEC (sept en temps présent et sept en temps futur) ont été utilisées dans les simulations.

De ces simulations, il semble apparaître que le futur sera plus sec que le présent, avec des crues mieux absorbées et des étiages plus sévères, que les dépassements du débit de référence diminuent sur les rivières Aube et Marne, et que, si leurs causes restent inchangées pour la Marne, elles évoluent pour les autres lacs.

Abstract

“Study about the impact of the climate change on the management of the dams of the Seine.”

The Seine dams : model of the Seine river bassin

Within the European project Climaware, a model of the Seine river basin with the release in Paris was made in order to study the effect of the climate change on the management rules of the four dams of the Seine (the Grands Lacs de Seine : Aube, Marne, Seine and Pannecière).

This model uses TGR of the GR kind, which first didn't take into account the dams so it could be propped up. Following some rules such as the dam management rule curve and the maximum and minimum volumes in the lake, the dams had to be integrated to the model. Several cases were determined with the particularities of the dams.

The lakes' effects, their volume curve and the discharges in the rivers have to be reproduced at the best so the model can be most accurate. The used discharges for the wedging are those of the naturalized flows, measured flow in which the lakes' influence was erased. The other anthropic actions are untouched.

As the estimators implied that the model was accurate, the second phase of the model could begun, the modeling with the seven global circulation models of the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).

Those simulations should indicate a tendency of the lakes' effects in present and future time. In order to do that, 14 series of datas from the IPCC (7 in future time and 7 in present time) were used in the simulations.

It seems that the future will be drier than the present, with better absorbed floods and low flows more severe. The floods on the rivers Aube and Marne decrease, but even If the causes of those floods do not change for the lake Marne, they change for the other lakes.

Sigles et Abréviations :

Sigles :

Cemagref : Centre national du Machinisme Agricole, du Génie rural, des Eaux et Forêts

G-EAU : Gestion de l'Eau, Acteurs et Usages

Giec : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

Irstéa : Institut de Recherche en Science et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

SGL : Seine Grands Lacs

Abréviations :

BV : Bassin Versant

BVI : Bassin Versant Intermédiaire

EPST : Etablissement Public à caractère Scientifique et Technologie

ETP : Evapotranspiration

GRK : Génie Rural Kalman

GR4J : Génie Rural à 4 paramètres Journaliers

LRK : Lag & route for Kalman filter [1]

TGR : Transfert Génie Rural

UMR : Unité Mixte de Recherche

Symboles utilisés :

t : temps

Q : débit

V : volume

Qsim : débit simulé

Qobs : débit observé

Qprélèvement : débit prélevé dans la rivière en amont du lac

Qrestitution ou **Qrest** : débit restitué à la rivière en aval du lac

Qthr : débit restitué théorique à la rivière en aval du lac pour les calculs à la prise

Qamont : débit intermédiaire au niveau de la connexion du lac, sortant de la partie hydrologique et hydraulique du calcul et entrant dans la partie prise ou restitution.

Qaval : débit sortant du point de calcul (station ou connexion) dans la rivière

Qréférence : débit de référence (voir glossaire)

Qréservé : débit réservé (voir glossaire)

Qcanalin : débit maximum autorisé dans le canal d'aménée du lac

Qcanalout : débit maximum autorisé dans le canal de restitution du lac

Vcourbe : volume théorique du lac donné par la courbe de gestion

Vlac : volume du lac

Vlacmax : volume maximum admissible dans le lac

Vlacmin : volume minimum admissible dans le lac, afin que le cheptel piscicole puisse survivre

Vlac_{prise} : volume dans le lac à l'issue de la connexion de prise

Vlth : volume dans le lac intermédiaire pour les calculs à la restitution

Rel : fiabilité

Vul : vulnérabilité

Rel : résilience

Glossaire

Etiage : Période de l'année où le débit dans la rivière est très bas

Débit réservé : seuil de débit minimum dans la rivière garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces présentes. Il ne doit pas être inférieur au 1/10ème du module

Débit de référence : seuil de débit maximum dans la rivière, au-delà duquel on considère qu'il y a une crue.

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| RESUME | 3 |
| ABSTRACT | 4 |
| SIGLES ET ABREVIATIONS :..... | 5 |
| SOMMAIRE | 7 |
| LISTE DES FIGURES | 9 |
| LISTE DES TABLEAUX..... | 11 |
| LISTE DES ANNEXES | 12 |
| INTRODUCTION | 13 |
| 1 CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE..... | 14 |
| 1.1 Le projet Climaware..... | 14 |
| 1.1.1 Un projet européen | 14 |
| 1.1.2 La partie française | 15 |
| 1.2 Le bassin versant de la Seine | 15 |
| 1.2.1 Seine Grands Lacs (SGL)..... | 16 |
| 1.2.2 Présentation des lacs-réservoirs..... | 16 |
| 1.3 Le modèle TGR (Transfert Génie Rural) | 17 |
| 1.3.1 Les modules composant TGR..... | 18 |
| 1.3.1.1 Le module GR4J | 18 |
| 1.3.1.2 Le module LRK..... | 19 |
| 1.3.2 TGR et mise en réseau | 19 |
| 1.4 Calage | 20 |
| 1.5 Débits naturalisés et temps observés | 21 |
| 1.6 Les forçages climatiques du GIEC | 23 |
| 2 INSERTION DES LACS-RESERVOIRS DANS LE MODELE..... | 26 |
| 2.1 Insertion des lacs | 26 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 2.2 | Règles de gestion | 27 |
| 2.2.1 | Les lacs en dérivation : Aube, Seine et Marne..... | 28 |
| 2.2.1.1 | Connexion de prise : fonction de prise | 28 |
| 2.2.1.2 | Connexion de restitution : fonction de restitution | 30 |
| 2.2.2 | Le lac Pannecièrè | 32 |
| 2.2.3 | Résumé | 34 |
| 2.3 | Climat observé : débits aux connexions | 35 |
| 3 | ETUDE DE LA PERFORMANCE DES LACS | 38 |
| 3.1 | Objectifs | 38 |
| 3.2 | Fiabilité, vulnérabilité | 40 |
| 3.2.1 | Présentation | 40 |
| 3.2.2 | Résultats | 42 |
| 3.3 | Ecrêtage des crues | 43 |
| 3.3.1 | Présentation | 43 |
| 3.3.2 | Résultats | 43 |
| 3.4 | Jours de défaillance sous les seuils d'étiage | 48 |
| 3.4.1 | Présentation | 48 |
| 3.4.2 | Résultats | 49 |
| 3.4.2.1 | Seuil d'alerte | 49 |
| 3.4.2.2 | Seuil d'alerte renforcée | 51 |
| 3.5 | Taux de remplissage du lac | 54 |
| 3.5.1 | Présentation | 54 |
| 3.5.2 | Résultats | 55 |
| | CONCLUSION | 58 |
| | BIBLIOGRAPHIE | 60 |
| | ANNEXES | 62 |

Liste des Figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : La Seine et le bassin versant étudié | 16 |
| Figure 2 : Courbe de gestion du lac-réservoir Aube [4] | 17 |
| Figure 3 : Schéma du BVI | 17 |
| Figure 4 : Schéma de GR4J | 18 |
| Figure 5 : Schéma de LRK | 19 |
| Figure 6 : Schéma du modèle TGR | 20 |
| Figure 7 : Schéma de la mise en réseau | 20 |
| Figure 8 : Courbes du débit naturalisé et du débit simulé à Paris (en haut, courbe complète, en bas, détail de la courbe) | 22 |
| Figure 9 : Valeurs des Nash pour les débits naturalisés | 23 |
| Figure 10 : Tendances climatiques des 7 modèles du GIEC | 24 |
| Figure 11 : Variation des pluies et de l'ETP selon les 7 modèles climatiques du GIEC | 25 |
| Figure 12 : Résultats des deux modèles (GR4J et TGR) pour les 7 modèles climatiques | 25 |
| Figure 13 : Schéma des connexions | 27 |
| Figure 14 : Schéma de résumé des connexions des Lacs | 27 |
| Figure 15 : Schéma de la connexion de prise | 28 |
| Figure 16 : Schéma de la connexion de restitution | 30 |
| Figure 17 : Schéma du lac Pannecière | 32 |
| Figure 18 : Courbes du lac Pannecière entre 1972 et 1983 | 36 |
| Figure 19 : Nash à l'aval des lacs | 37 |
| Figure 20 : Courbe de gestion du lac Pannecière | 38 |
| Figure 21 : Simulation TP (1961-1990) du volume du lac de Pannecière pour les 7 modèles de forçage climatique | 39 |
| Figure 22 : Simulation TF (1946-1965) du volume du lac de Pannecière pour les 7 modèles de forçage climatique | 40 |

| | |
|--|-----------|
| Figure 23 : Vulnérabilité (à gauche) et fiabilité (à droite) par rapport aux crues pour les 9 connexion temps observés..... | 41 |
| Figure 24 : Graphique de la fiabilité des connexions en crue | 42 |
| Figure 25 : Graphique de la fiabilité des connexions lors des étiages | 43 |
| Figure 41 : Pourcentage de dépassement du débit de référence à l'aval du lac Aube | 44 |
| Figure 42 : Pourcentage de dépassement du débit de référence à l'aval du lac Seine..... | 44 |
| Figure 43 : Pourcentage de dépassement du débit de référence à l'aval du lac Pannecièrè..... | 45 |
| Figure 44 : Pourcentage de dépassement du débit de référence à l'aval du lac Marne | 45 |
| Figure 45 : Résumé des raisons des dépassement du débit de référence, moyenné sur les 7 simulations en TP et en TF | 47 |
| Figure 32 : Pourcentage de dépassement du seuil d'alerte pour le lac Aube | 49 |
| Figure 33 : Pourcentage de dépassement du seuil d'alerte pour le lac Seine | 50 |
| Figure 34 : Pourcentage de dépassement du seuil d'alerte pour le lac Pannecièrè | 50 |
| Figure 35 : Pourcentage de dépassement du seuil d'alerte pour le lac Marne | 51 |
| Figure 36 : Pourcentage de dépassement du seuil d'alerte renforcée pour le lac Aube | 51 |
| Figure 37 : Pourcentage de dépassement du seuil d'alerte renforcée pour le lac Seine | 52 |
| Figure 38 : Pourcentage de dépassement du seuil d'alerte renforcée pour le lac Pannecièrè | 52 |
| Figure 39 : Pourcentage de dépassement du seuil d'alerte renforcée pour le lac Marne | 53 |
| Figure 40 : Réusmé des dépassements des seuils d'alerte et d'alerte renforcée..... | 53 |
| Figure 26 : Exemple de remplissage des lacs au 12/07/2012 (source : site de Seine Grands Lacs [4]) | 54 |
| Figure 27 : Taux de remplissage minimaux du lac Aube en temps observé simulé, temps présent et temps futur..... | 55 |
| Figure 28 : Taux de remplissage minimaux du lac Seine en temps observé simulé, temps présent et temps futur..... | 55 |
| Figure 29 : Taux de remplissage minimaux du lac Pannecièrè en temps observé simulé, temps présent et temps futur | 56 |
| Figure 30 : Taux de remplissage minimaux du lac Marne en temps observé simulé, temps présent et temps futur..... | 56 |
| Figure 31 : Taux de remplissage minimum pour les quatre lacs..... | 57 |

Liste des Tableaux

| | |
|---|-----------|
| Tableau 1 : Les différents modèles de forçage climatique | 24 |
| Tableau 2 : Calcul du débit initial en prise | 29 |
| Tableau 3 : Ajustement du débit prélevé..... | 29 |
| Tableau 4 : Calcul du débit initial de restitution | 31 |
| Tableau 5 : Ajustement du débit restitué | 31 |
| Tableau 6 : Calcul du débit théorique restitué..... | 32 |
| Tableau 7 : Valeurs des débits réservés et de référence du lac Pannecière..... | 33 |
| Tableau 8 : Volumes limites du lac Pannecière | 33 |
| Tableau 9 : Débit du canal du Rivernais..... | 33 |
| Tableau 10 : Résumé des différents cas..... | 34 |
| Tableau 11 : Liste des connexions | 39 |
| Tableau 12 : Seuils lors des étiages..... | 49 |

Liste des Annexes

| | |
|--|----|
| 1. Synoptiques des lacs..... | 62 |
| 2. Courbe de gestion des lacs..... | 66 |
| 3. Carte des stations et des BVI, et liste des stations | 68 |
| 4. Annexe : Les connexions des lacs | 69 |
| 5. Annexe : Schéma de l'ordre de simulation des stations et des connexions | 70 |
| 6. Valeurs pour les lacs Aube, Marne et Seine | 71 |
| 7. Courbes de résultats des lacs en débits naturalisés..... | 72 |

Introduction

Le réchauffement climatique correspond à un phénomène d'augmentation de la température moyenne de l'atmosphère et des océans. Cette augmentation a été mesurée sur plusieurs décennies à l'échelle mondiale, et elle indique un accroissement de la quantité de chaleur de la surface de la Terre. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) a élaboré plusieurs rapports sur cette question, et le dernier, publié en 2007, affirme que le réchauffement climatique est probablement d'origine humaine, et s'élèverait à 0.74°C en plus en moyenne. De plus, il serait dû aux émissions de gaz à effet de serre [2].

Ce phénomène aura différents impacts, sur les climats, les écosystèmes et les populations. En particulier, il aura un impact sur les ressources en eaux, accroissant le stress hydrique par endroit et multipliant les phénomènes extrêmes tels les orages.

Des études sur ce sujet sont en cours, tel le projet européen Climaware, et sa partie sur les Grands Lacs de la Seine, dans le cadre duquel s'inscrit le stage « Etude de l'impact du changement climatique sur la gestion des lacs-réservoirs de la Seine ».

Parmi les nombreuses fonctions d'un lac, celles qui nous intéressent plus particulièrement lors de ce stage sont l'écrêtage des crues et le soutien d'étiage afin de maintenir un débit minimum dans les rivières.

Le but est donc ici d'étudier l'impact du changement climatique sur la gestion des grands lacs de la Seine, ainsi que leur réaction face à des étiages sévères et des crues, entraînant éventuellement la création de nouvelles règles de gestion.

Pour cela, une modélisation des règles de gestion de ces lacs sera effectuée. Ces règles modélisées seront ensuite ajoutée à un modèle du bassin versant de la Seine codé en langage C et Scilab préalablement développé puis calé sans les lacs. Seules des fonctions Scilab ont été manipulées lors de ce stage.

Une fois ce modèle complété et calé, plusieurs simulations en temps présent et en temps futur seront effectuées afin d'analyser la réaction des lacs face aux changements climatiques proposés en entrées du modèle.

1 Contexte Général de l'étude

Dans cette partie, je vais présenter le contexte du stage, qui a été effectué au sein de l'équipe de l'Unité Mixte de Recherche G-EAU, à l'Irstéa de Montpellier. Il s'inscrit dans le projet européen Climaware, sur le changement climatique, et concerne le bassin versant (BV) de la Seine, à l'amont de Paris.

1.1 Le projet Climaware

1.1.1 Un projet européen

Climaware [3] est un projet européen sur l'étude des impacts du changement climatique sur le management des ressources en eau. Il se déroule sur trois ans, de septembre 2010 à décembre 2013. Il comprend cinq partenaires :

- Department of Hydraulic Engineering and Water Resources Management, à l'Université de Kassel en Allemagne
- Center for Environmental Systems Research (CESR), à l'Université de Kassel en Allemagne
- Les centres de l'Irstéa d'Antony et de Montpellier en France
- L'Etablissement Public Territorial de Bassin (EPTB) Seine Grand Lac (SGL), basé à Paris en France
- Istituto Agronomico Mediterraneo di Bari, à Bari en Italie.

Ce projet a pour objectif d'étudier les effets du changement climatique sur les conditions hydromorphologiques ainsi que sur les changements dans les flux des rivières et leurs conséquences (fréquence d'inondation, sécheresse, utilisation de l'eau dans certains secteurs...). Un autre de ses buts est d'examiner les incertitudes des modèles et des scénarios. Enfin, il devrait permettre de définir des stratégies d'adaptation concernant les programmes des mesures de la Directive Cadre sur l'Eau, la gestion de barrage et les pratiques d'irrigation.

Il regroupe trois cas d'étude. Le premier se situe en Allemagne. Il est axé sur l'hydromorphologie du bassin versant (BV) de la Fulda. Le second est en France, et concerne les lacs de la Seine (voir paragraphe suivant). Le dernier, basé en Italie, est axé sur l'utilisation de l'eau en agriculture dans les Pouilles.

Une fois ces trois études effectuées, ces trois cas pourront alors être comparés, en prenant en compte le changement climatique et la gestion appliquée, il sera possible de voir si un transfert des mesures régionales à plus grande échelle ne serait pas possible.

1.1.2 La partie française

Cette partie concerne donc les lacs-réservoirs de la Seine, et l'effet du changement climatique sur leurs règles de gestion.

Le BV de la Seine est géré par plusieurs réservoirs, les Grand lacs de la Seine, présentés dans le paragraphe suivant. Ces lacs remplissent plusieurs objectifs. Ils soutiennent les étiages, écrêtent les crues, fournissent de l'eau pour l'irrigation, permettent le renouvellement des aquifères et produisent l'hydro-électricité.

L'un des objectifs de cette étude est d'évaluer l'impact du changement climatique sur la gestion de ces lacs-réservoirs entre 2046 et 2065. Le second concerne la prévision d'étiages sévères ainsi que la conception de nouvelles règles de gestion plus appropriées, à court terme en adaptant le droit de l'eau, à moyen terme en améliorant la gestion de l'eau avec les infrastructures existantes, et à long terme en construisant de nouveaux réservoirs.

Afin de répondre à ces objectifs, un modèle du bassin versant de la Seine a été réalisé par David Dorchies. Ce modèle a ensuite été calé avec des débits observés desquels l'effet des lacs avait été retiré, avant que des simulations soient effectuées avec des chroniques de climat en temps présent et futur, développées par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) et définies au paragraphe 1.6.

Une fois ce modèle calé et validé, il est alors possible de passer à l'étape suivante, l'intégration de lac-réservoirs et la modélisation de leurs règles de gestion actuelles. Cette étape est expliquée dans la partie 2.

Puis, une fois que ces règles sont correctement modélisées, plusieurs simulations avec les chroniques de climat du GIEC sont effectuées, afin d'étudier la performance des lacs et la pertinence de ces règles de gestion. La performance des lacs est analysée dans la partie 3.

Une fois ceci effectué, les courbes de remplissage des lacs pourront être optimisées en prenant en compte l'évolution de l'hydrologie du bassin versant, et une régulation centralisée des lacs pourra être mise en place. Il sera alors possible d'évaluer si ces règles de gestion optimisée seront suffisantes face au changement climatique et si les infrastructures devraient être modifiées.

1.2 Le bassin versant de la Seine

La Seine prend sa source en Côte-d'Or, à Source Seine, et se jette dans la Manche entre le Havre et Honfleur, en Seine-Maritime. Fleuve de 777 km de longueur, elle coule dans le bassin parisien et traverse 13 départements. Son bassin versant total, avec son exutoire au Havre, a une surface de 78 650 km². Il possède un climat océanique, où les précipitations s'étalent sur toute l'année et ont une moyenne annuelle de 700 mm/an. Parmi ses principaux affluents, on trouve notamment l'Yonne (293 km de long), la Marne (525 km de long), l'Aube (248 km de long), l'Oise (302 km de long), le Loing (166 km de long) et l'Eure (225 km de long).

L'espace étudié est constitué du BV de la Seine, avec pour exutoire Paris-Austerlitz. Il inclut notamment les sous-bassins de la Marne, de l'Aube, de la Seine et de l'Yonne. Ce BV étudié a une surface de 43 824 km², et est visible sur la figure ci-dessous.

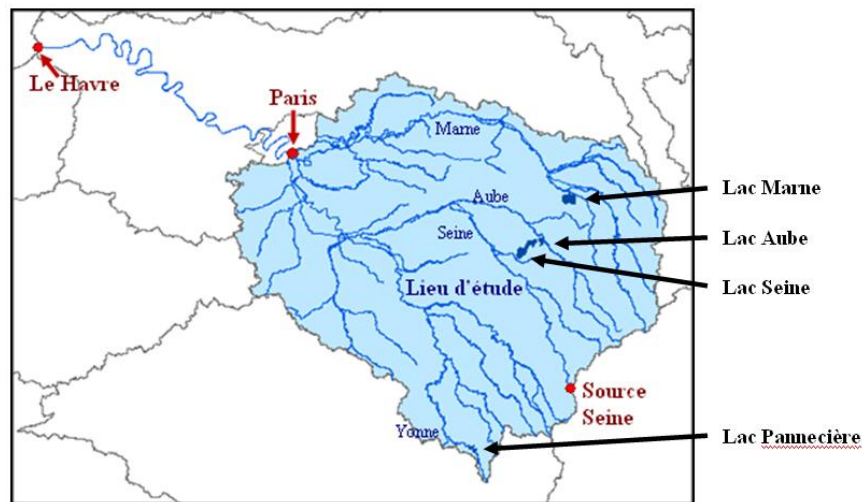


Figure 1 : La Seine et le bassin versant étudié

1.2.1 Seine Grands Lacs (SGL)

L'Etablissement Public Territorial de Bassin (EPTB) Seine Grands Lacs, dont le siège se situe à Paris a pour mission essentielle de surveiller et d'agir pour soutenir les étiages et écrêter les crues afin de limiter les inondations dans le BV de la Seine. Pour se faire, elle exploite quatre lacs-réservoirs, trois en dérivation des rivières Aube, Seine et Marne, et un situé sur l'Yonne. Ainsi, plus de 800 millions de m³ d'eau peuvent être stockés.

La gestion des lacs doit répondre à plusieurs enjeux, incluant la protection des habitations et des infrastructures contre les inondations. La ressource en eau doit aussi être gérée de manière à assurer l'eau potable, la navigation et la préservation des cultures. Un autre enjeu important auquel doit répondre SGL est la restauration et la préservation de l'équilibre écologique des cours d'eau, ainsi que l'aménagement du BV de la Seine.

Pour cela, il lui faut non seulement contrôler les ouvrages et les réhabiliter si nécessaire, mais aussi coopérer avec les autres acteurs du BV de la Seine (Départements, Régions, Agence de l'Eau Seine-Normandie), et participer à la politique de l'eau du BV.

Source : [4]

1.2.2 Présentation des lacs-réservoirs

Afin de limiter les crues à Paris et de soutenir les étiages, quatre lacs réservoirs ont été construits sur la Marne, la Seine, l'Aube et l'Yonne (voir figure 1). Un synoptique et la courbe de gestion de chacun des lacs sont disponibles en annexes 1 et 2.

L'exploitation de l'ouvrage est effectuée selon un règlement d'eau. Celui-ci est défini par un arrêté préfectoral, suivant les avis des organismes de bassin suite à une enquête hydraulique sur les

effets de l'ouvrage sur les communes riveraines des rivières influencées. Sont ainsi définis les volumes d'eau que doit contenir l'ouvrage et les débits minimum à conserver dans l'Aube.

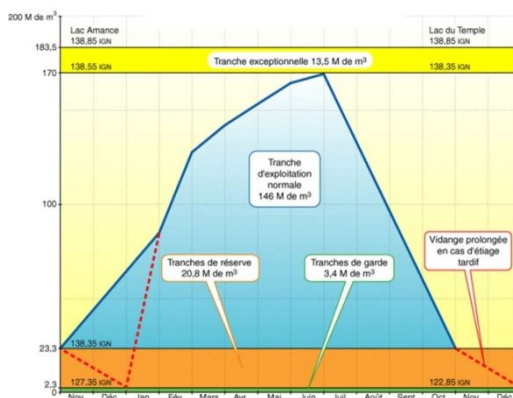


Figure 2 : Courbe de gestion du lac-réservoir Aube [4]

Une courbe de gestion (voir figure au dessus) du réservoir est donc définie. Elle commence le premier novembre par le remplissage du bassin jusqu'à fin juin, suivie d'une vidange depuis début juillet jusqu'à fin octobre. Lors de l'exploitation de l'ouvrage, cette courbe de gestion est suivie au maximum. Ainsi, même en cas de sur-remplissage suite à une crue, le réservoir sera vidé du surplus jusqu'à retrouver le volume théorique qu'il devrait avoir selon la courbe de gestion.

1.3 Le modèle TGR (Transfert Génie Rural)

Afin de modéliser le BV de la Seine, nous avons utilisé le modèle TGR, développé par Simon Munier dans sa thèse « Modélisation intégrée des écoulements pour la gestion en temps réel d'un bassin versant anthropisé » [1]. Il s'agit d'un modèle semi-distribué, c'est-à-dire un compromis entre l'approche distribuée cherchant à représenter les écoulements selon des mailles très fines, et l'approche globale qui ne s'intéresse qu'aux entrées/sorties, sans se préoccuper de ce qui se passe entre les deux.

Dans ce modèle, on utilise le bassin versant intermédiaire (BVI), c'est-à-dire le bassin versant à qui l'on a retiré les sous-bassins versants des affluents du cours d'eau (voir schéma ci-dessous).

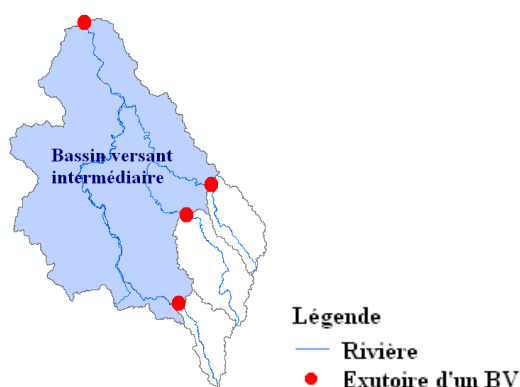


Figure 3 : Schéma du BVI

Ce modèle TGR couple un module hydrologique, utilisant les données de climat (pluie, évapotranspiration (ETP)), avec un module hydraulique, utilisant la surface du BVI et la distance à la station aval pour les calculs.

La carte des 25 stations et leurs BVI est située en annexe 3.

Lors de ce projet, on supposera que tous les BV ont le même comportement hydrologique. Un seul modèle sera utilisé pour tous, avec des paramètres de calage différents. De plus, la pluie et l'ETP sont uniformes sur tout le BVI, comme pour tout modèle hydrologique global.

Le bassin versant de la Seine est ainsi divisé en 25 BVI, avec pour exutoires les 25 stations des débits naturalisés situées en amont de Paris. Les débits naturalisés sont les débits réels dans la rivière desquels l'influence des lacs a été retirée. La carte de ces stations et des BVI est située en annexe 3.

1.3.1 Les modules composant TGR

Nous avons utilisé pour le modèle TGR les modules GR4J (Génie Rural à 4 paramètres journaliers, partie hydrologique) et LRK (Lag & Route for Kalman filter, partie hydraulique).

1.3.1.1 Le module GR4J

Ce module, non linéaire, permet de calculer la production de pluie nette et les échanges avec la nappe. Il dépend de quatre paramètres, la capacité du réservoir de production S , les pertes ou gains par les échanges avec la nappe IGF, la capacité à un jour du réservoir de routage K et une constante de temps de l'hydrogramme unitaire T . Ce module permet de transformer des données de climat, qui sont la pluie et l'ETP, en débits. Ces débits sont considérés comme des apports latéraux.

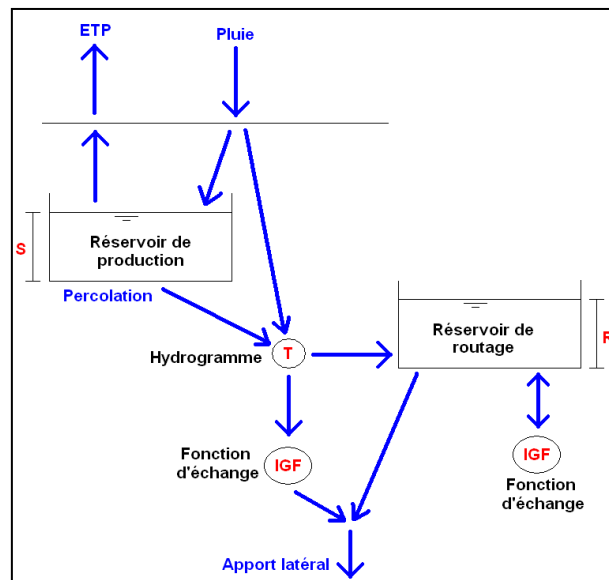


Figure 4 : Schéma de GR4J

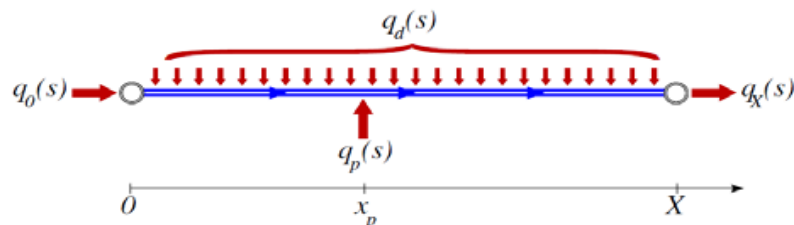
Les pluies et les ETP seront considérées comme uniformes sur l'ensemble d'un BVI, mais différentes selon le BVI considéré. Les paramètres seront donc différents selon les BVI, et il faudra donc les caler.

Au départ, un module GRK (Génie Rural Kalman) à trois paramètres avait été utilisé à la place. Cependant, il était moins précis en étiage, aussi a-t-il été remplacé par ce module GR4J.

1.3.1.2 Le module LRK

Il s'agit d'un modèle simplifié à base physique du transfert de débit dans un bief semi-infini, développé par Simon Munier [1]. Il permet le calcul du débit aval q_x en fonction du débit amont q_0 , des débits latéraux ponctuels q_p ainsi que des débits latéraux diffus q_d . Ces trois débits étant indépendants, chaque contribution au débit aval est calculée indépendamment par une fonction de transfert de type premier ordre, avec un retard représentant les phénomènes d'atténuation et de retard typiques de la propagation en cours d'eau. Ces fonctions de transfert sont calculées à l'aide de deux paramètres différents pour chaque entrée, une constante de temps τ et un retard K .

Cependant, ces apports se font dans un même cours d'eau, et il est possible de penser qu'il existe une relation entre ces couples de paramètres (τ, K) et les caractéristiques physiques du bief. Dans sa thèse [1], Simon Munier a ainsi établi ces relations. Ce modèle dépend donc de deux paramètres, une constante de temps τ_0 et un retard K_0 .



$$q_x(s) = TF_0(s)q_0(s) + TF_p(x_p, s)q_p(s) + TF_d(s)q_d(s)$$

$$\begin{cases} TF_0(s) = \frac{e^{-\tau_0 s}}{1+K_0 s} \\ TF_p(x_p, s) = \frac{e^{-\tau_p(X-x_p)s}}{1+K_p(X-x_p)s} \\ TF_d(s) = \frac{1}{1+K_d s} \end{cases} \quad \begin{cases} \tau_p(x) = \frac{x}{X}(\tau_0 + K_0) - \sqrt{\frac{x}{X}}K_0 \\ K_p(x) = \sqrt{\frac{x}{X}}K_0 \\ K_d = \frac{\tau_0 + K_0}{2} \end{cases}$$

Figure 5 : Schéma de LRK

1.3.2 TGR et mise en réseau

Ces deux modules, GR4J et LRK, sont ensuite réunis dans le module TGR. Le débit calculé dans TGR à partir des données de climat est injecté dans LRK comme un apport latéral diffus. Cela permet de calculer le débit à l'exutoire du BVI.

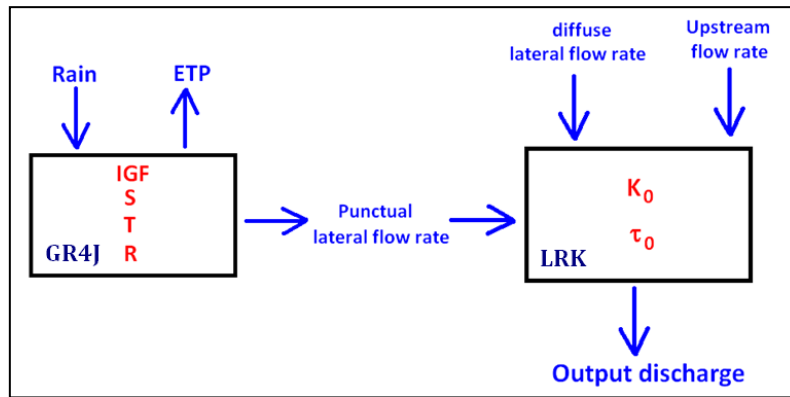


Figure 6 : Schéma du modèle TGR

Ensuite, il faut appliquer ce module aux 25 BVI. Pour cela, il faut effectuer une mise en réseau des BVI. TGR est tout d'abord appliqué aux BV amont, avant d'être appliqué au BVI aval. Les débits provenant des BV amont sont considérés comme des apports latéraux ponctuels.

Le schéma de la mise en réseau est visible ci-dessous.

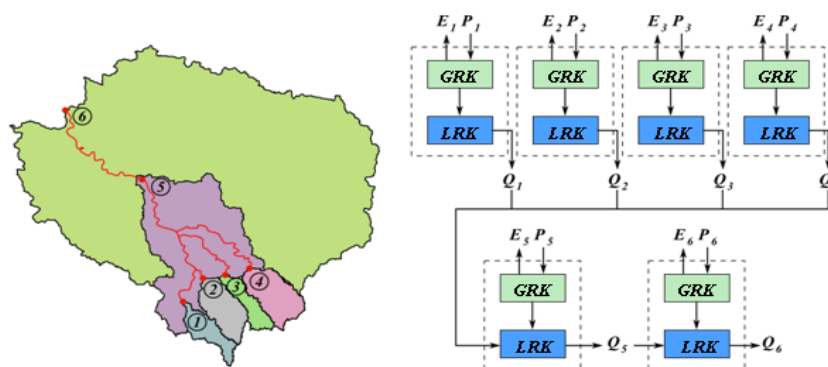


Figure 7 : Schéma de la mise en réseau

Les modules GR4J et LRK, ainsi que TGR, ont été codés en langage C, afin d'avoir une grande rapidité de calcul. En effet, ces fonctions calculent pour chaque BVI un vecteur résultat sur toute la période, journée par journée. Le temps de calcul serait beaucoup plus élevé avec Scilab. De plus, ce logiciel est moins performant pour ce genre de calcul.

1.4 Calage

A partir de ces débits naturalisés, le modèle a été calé avec une méthode dite du simplex [5].

Pour chacun de ces vecteurs, un critère est calculé. Ici, il s'agissait de trouver le vecteur des paramètres minimisant la somme des carrés des écarts entre débits observés et débits simulés (SSE), défini par la relation ci-dessous :

$$SSE = \sum_{k=1}^N (Q_{obs}(k) - Q_{sim}(k))^2$$

N représente le nombre de pas de temps, et $Q_{obs}(k)$ et $Q_{sim}(k)$ les débits observé et simulé au pas de temps k , respectivement. Le vecteur donnant le résultat le plus proche de la réalité est le minimum global de ce calcul et est celui qui est retenu pour la suite.

La période d'étude est scindée en deux sous-périodes, P1 et P2, afin d'appliquer une méthode de calage-contrôle croisé. Ainsi, le modèle est tout d'abord calé sur la période P1, puis contrôlé sur la période P2. Ensuite, le modèle est calé sur P2 et contrôlé sur P1. Le contrôle, en calculant le critère de performance sur une période non utilisée pour le calage, permet de s'assurer que les paramètres obtenus ne dépendent pas trop des données utilisées lors de la période de calage. De même, le calcul en inversant les périodes de calage et de contrôle permet de vérifier si effectivement, les paramètres ne sont pas trop dépendants des données. En effet, si cela est vérifié, les paramètres devraient être équivalents quelle que soit la période de calage.

Une fois cela effectué, il est possible de calculer les paramètres en les calant sur toute la période P0. Dans ce cas, il n'y a pas de contrôle, et les résultats devraient être équivalents à ceux obtenus précédemment.

Afin de vérifier l'adéquation des paramètres retenus, ainsi que les comparer selon la période de calage choisie, un indicateur, le Nash, est calculé pour chaque période et chaque BVI, selon la relation ci-dessous.

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{k=1}^N (Q_{sim}(k) - Q_{obs}(k))^2}{\sum_{k=1}^N (Q_{obs}(k) - moyenne(Q_{obs}(k)))^2}$$

Rappelons que N représente le nombre de pas de temps, et $Q_{obs}(k)$ et $Q_{sim}(k)$ les débits observé et simulé au pas de temps k , respectivement. Un Nash de 100% indique que le résultat est identique au débit de référence.

Cette phase de calage dépend beaucoup des vecteurs initiaux proposés. En effet, le but de cette méthode est de trouver le minimum global de l'objet dans un espace à cinq dimensions, et le risque de tomber dans un minimum local est élevé.

1.5 Débits naturalisés et temps observés

Les débits naturalisés ont été calculés par SGL au niveau des 25 stations étudiées [6]. Il s'agit des débits réels dans les cours d'eau sur lesquels l'influence de l'homme (lacs-réservoirs, irrigation...) a été retirée. Les chroniques de débits vont du 01/08/1958 au 31/07/2010, s'étalant sur 52 ans. Le calage du modèle a été effectué avec ces débits, afin d'obtenir des résultats les plus proches possible des débits mesurés.

L'évapotranspiration (ETP) et la pluie sur chaque BVI ont été calculées par l'équipe de l'Irstea d'Antony, à partir de la base de données SAFRAN de Météo France [7]. Cette base de données

découpe la France en mailles de 8 km sur 8 km sur lesquelles sont calculés la pluie totale, la température et l'ETP. Une moyenne de la pluie et de l'ETP ont été sur chaque BVI en fonction de la surface des mailles incluses dans le BVI. Les ETP fournies par Météo France sont issues de la formule de calcul de ETP de type Penman Monteith, et ont de nombreuses incertitudes.

Le modèle hydrologique nécessitant des conditions initiales, l'état de remplissage des réservoirs de production et de routage, un temps de chauffage de trois ans est appliqué lors de la simulation. En effet, lors de ces 3 premières années, les sorties du modèle dépendent beaucoup de l'état initial des réservoirs. Cette période n'est donc pas utilisée pour le calage.

Une fois la simulation effectuée pour chaque BVI, on obtient le débit à l'exutoire de ces BVI. La courbe ci-dessous est le résultat obtenu à Paris.

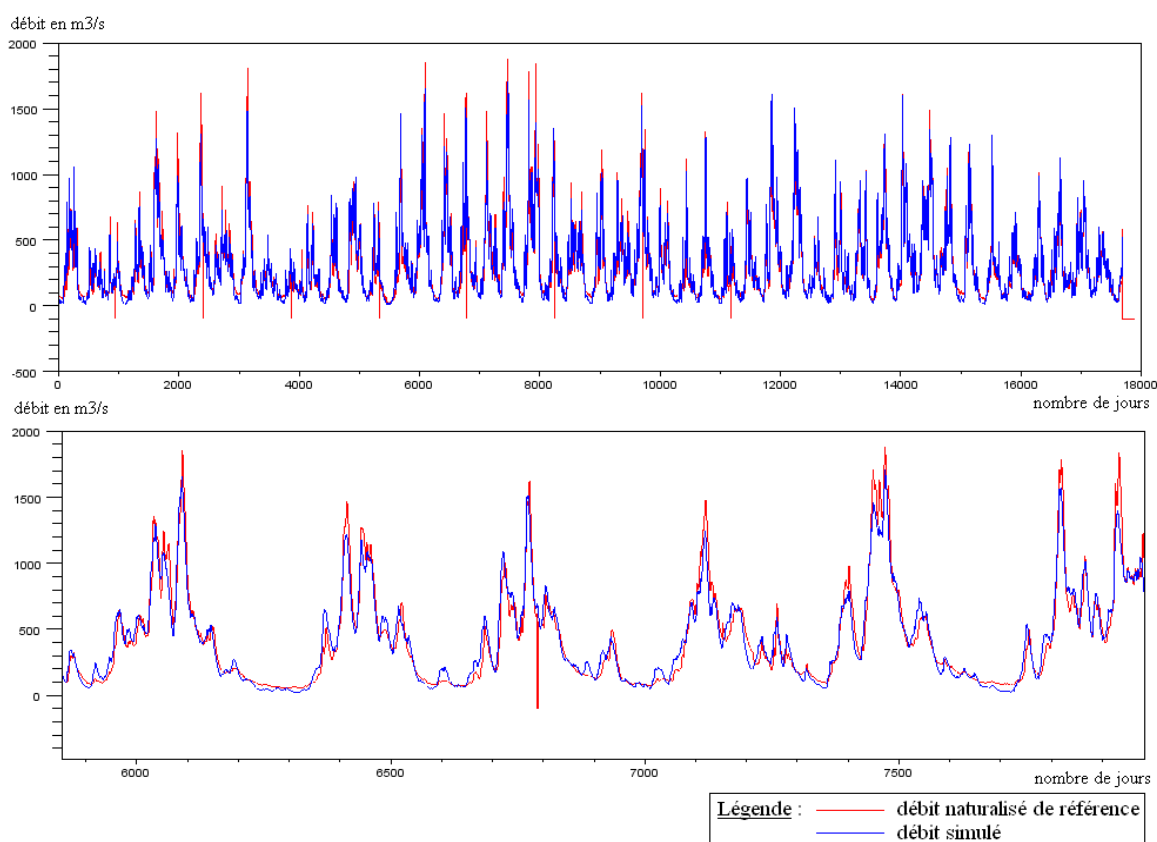


Figure 8 : Courbes du débit naturalisé et du débit simulé à Paris (en haut, courbe complète, en bas, détail de la courbe)

On peut voir sur ces courbes que la simulation est assez proche des débits de référence. De plus, les Nash sont très élevés, comme le montre la figure ci-dessous. Ainsi, on atteint 93% à Paris.

Il semble y avoir une sous-estimation des débits amont, notamment au niveau des crues..

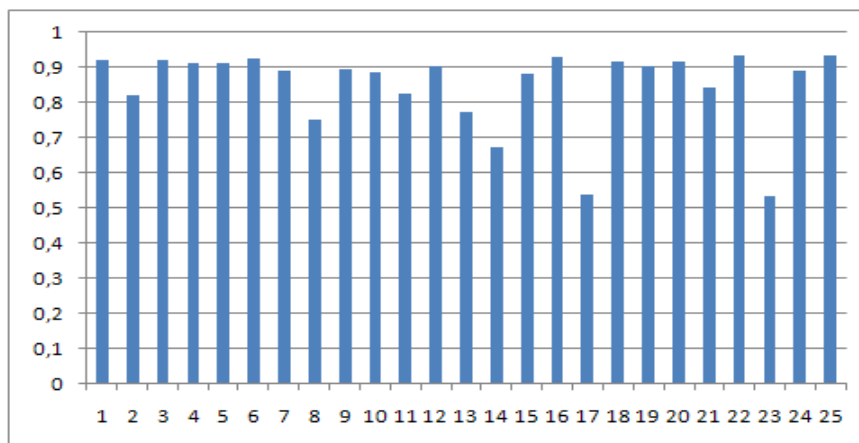


Figure 9 : Valeurs des Nash pour les débits naturalisés

On peut voir qu'il y a deux Nash inférieurs à 0.6. En effet, au niveau de la station 23, correspondant au Grand Morin à Montry, la précision des mesures ne permet pas d'avoir des débits inférieurs à $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Lors des étiages, il y a donc une impossibilité de trouver un résultat exact. La station 17 correspondant à la Seine à Alfortville est située à la confluence de plusieurs BVI amont, dont certains présentent déjà des incertitudes. Par conséquent, il est plus difficile d'analyser son comportement dans cette étude.

Mis à part pour ces stations, les résultats sont assez bons.

1.6 Les forçages climatiques du GIEC

Le GIEC, organisme intergouvernemental créé en 1988 à l'initiative de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), est ouvert à tous les pays membres de l'ONU et de l'OMM. Sa mission est d'évaluer des informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique concernant le changement climatique, que ce soit les risques liés à ce changement, les conséquences possibles, ou des stratégies d'adaptation. Cependant, il ne peut poursuivre de recherche ni suivre l'évolution de variables climatiques, mais synthétiser des travaux existants.

Le GIEC produit régulièrement des rapports d'évaluation des connaissances relatives au changement climatique, ainsi que des rapports spéciaux, visant à répondre à une question précise, et des documents techniques sur toutes sortes de sujets liés au changement climatique, tels les gaz à effet de serre.

Source : [8]

A l'aide des documents du CERFACS [9] ayant ré-analysé les données de la base SAFRAN, les membres de l'équipe de l'Irstéa à Antony ont pu obtenir quatorze chroniques de pluie et d'ETP pour chaque BVI, sept en temps présent et sept en temps futur, selon différents modèles de simulation.

Les dates de simulations vont du 01/08/1961 au 31/07/1991 en temps présent, pour une période de 30 ans, et du 01/08/2046 au 31/07/2065 en temps futur, pour une période durant 19 ans.

| Temps présent | Temps futur |
|---------------|---------------|
| CCCMA-CGCM | CCCMA-CGCM |
| ECHAM5-MPI | ECHAM5-MPI |
| GFDL-CM2.0 | GFDL-CM2.0 |
| GFDL-CM2.1 | GFDL-CM2.1 |
| MRI-CGCM2.3.2 | MRI-CGCM2.3.2 |
| GISS-MODEL-ER | GISS-MODEL-ER |
| ARPV3 | ARPV3 |

Tableau 1 : Les différents modèles de forçage climatique

Ces modèles ont de fortes incertitudes, en temps présent comme en temps futur. Sur la figure ci-dessous, on peut voir que les pluies simulées en temps présent s'écartent des pluies observées, même si les courbes des températures semblent se superposer en automne et au printemps.

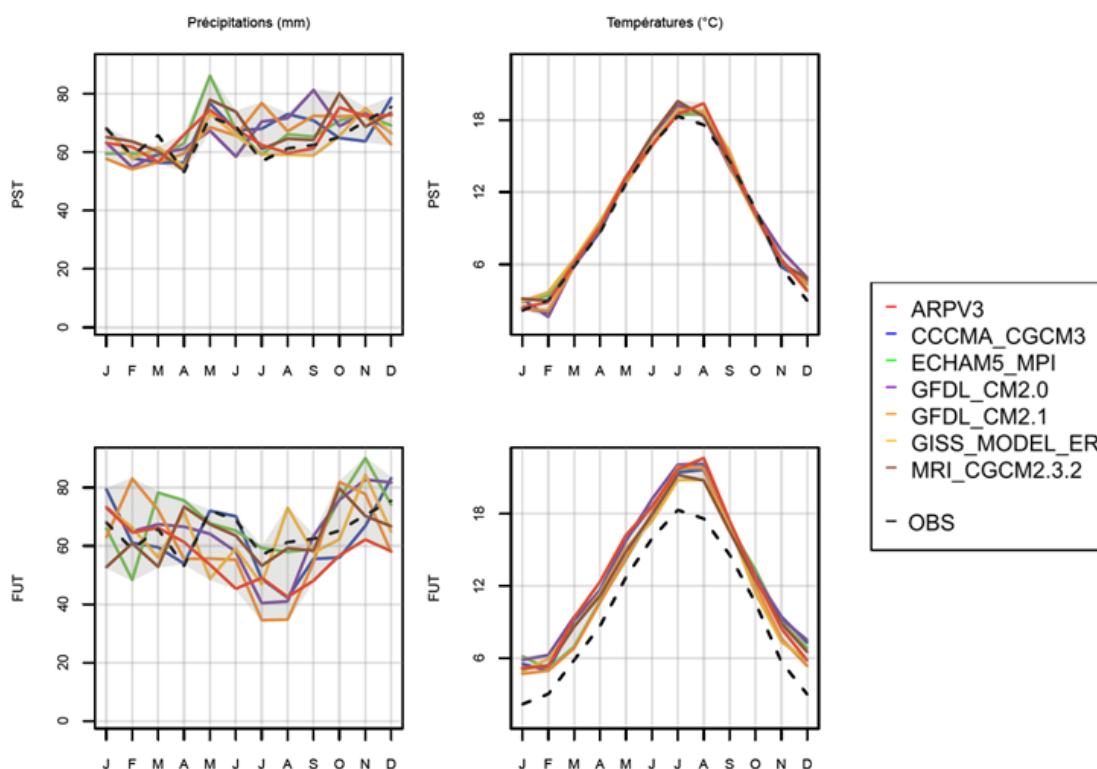


Figure 10 : Tendances climatiques des 7 modèles du GIEC

D'après la figure 11, les précipitations des modèles du GIEC baissent de mai en septembre par rapport à celles observées. De plus, des divergences apparaissent en hiver. L'évapotranspiration augmente entre 17% et 33% en moyenne sur l'année.

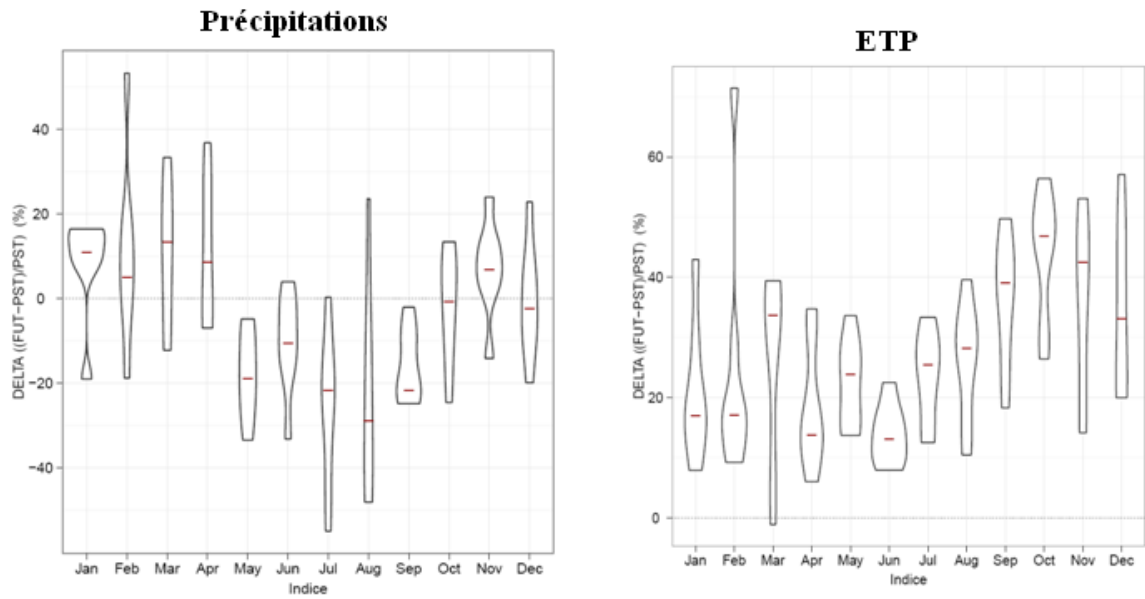


Figure 11 : Variation des pluies et de l'ETP selon les 7 modèles climatiques du GIEC

Sur la figure 12, une diminution de débit moyen annuel est visible. Cette baisse pourrait varier entre 15 % et 40 %. Les étiages semblent être plus marqués, mais ce résultat est très incertain en raison des biais de simulations. Il n'y a aucune tendance claire pour les crues, à cause des écarts des simulations.

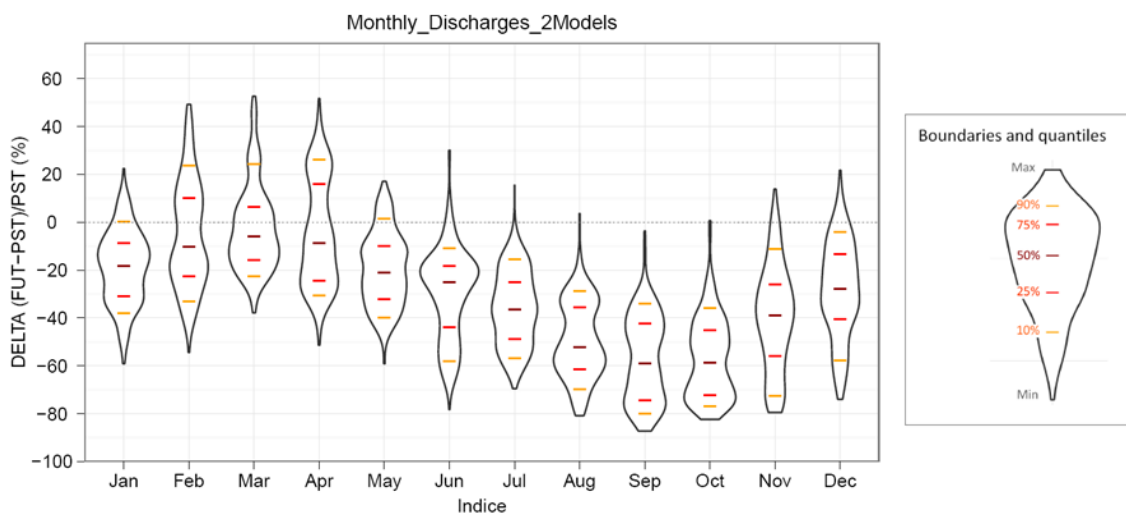


Figure 12 : Résultats des deux modèles (GR4J et TGR) pour les 7 modèles climatiques

2 Insertion des lacs-réservoirs dans le modèle

A partir du modèle TGR mis en place et calé par David Dorchies, j'ai pu réfléchir à un moyen d'y insérer les quatre lacs-réservoirs. Il m'a tout d'abord fallu les étudier afin de les simplifier, avant de les intégrer au modèle. Puis il a fallu définir les règles de gestion des lacs afin de les modéliser.

2.1 Insertion des lacs

Afin d'intégrer les lacs-réservoirs dans le modèle, il a tout d'abord fallu déterminer quelles étaient les données nécessaires et celles qu'il est possible d'omettre.

Pour cela, un synoptique a été réalisé pour chaque lac (voir en annexe 1).

Sur ces synoptiques sont indiqués les débits de référence et les débits réservés dans la ou les rivières où sont pris et/ou restitués les débits. On y trouve aussi les limitations causées par le volume maximum du lac et le débit maximum autorisé dans les canaux d'amenée et de restitution. Les distances entre les stations amont et aval et les lieux de prise et de restitution des débits y sont aussi mentionnées.

A l'aide de ces synoptiques, il m'a été possible de réfléchir à la manière dont les lacs réservoirs pouvaient être intégrés au modèle. Suite à cela, les données utilisables dans la simulation ont pu être identifiées, et celles qui manquaient ont pu être obtenues à l'aide de Seine Grands Lacs, comme la distance aux stations amont et aval.

Ces synoptiques ont aussi permis d'envisager une simplification de la modélisation des lacs afin de les intégrer au modèle. Ainsi, le schéma de chaque lac aura été découpé en deux types de connexions à une rivière :

- La connexion de prise, où un débit est prélevé de la rivière selon certaines contraintes.
- La connexion de restitution, où un débit est rendu à la rivière également selon certaines contraintes.

Une connexion d'un lac découpe un BVI existant en deux. De ce fait, deux nouveaux BVI sont créés, avec pour exutoire la connexion pour le bassin amont. Les surfaces de ces BVI ont été déterminées grâce au MNT (Modèle Numérique de Terrain).

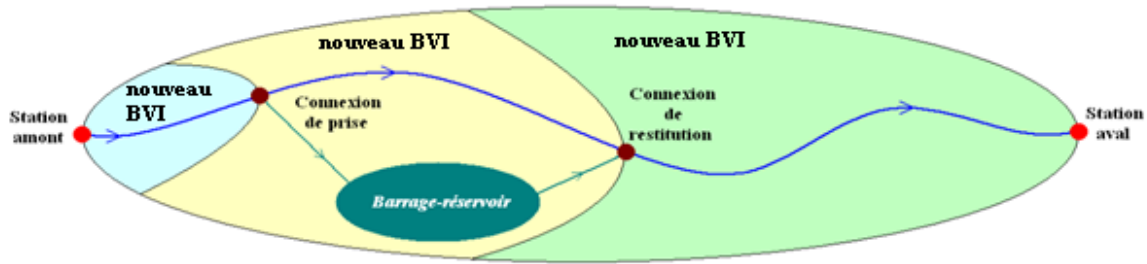


Figure 13 : Schéma des connexions

Ainsi, le Lac Aube, le plus simple, a une connexion de prise et une de restitution sur la rivière Aube.

Pour le Lac Seine, la prise se fait sur la rivière Seine. Une partie de son débit restitué se rejette dans la Vieille Seine. Cependant, cette dernière a un débit inconnu. En effet, il n'y a pas de station amont utilisée dans le modèle pour ce bras de la Seine. De plus, il se jette dans la Seine très en amont de la station aval de Mery-Sur-Seine, utilisée dans le modèle comme exutoire d'un BVI (à 41.8 km de la restitution). On considérera donc que tout le débit se rejette dans la Seine en une seule connexion de restitution.

Le Lac Marne totalise quatre connexions, deux de prise et deux de restitution, une sur la Blaise et une sur la Marne. La restitution en Blaise étant bien inférieure à celle en Marne, on peut la considérer comme un complément [4]. De plus, la Blaise et le canal de restitution dans la Marne se rejoignent 450m avant la jonction avec la Marne.

Le Lac Pannecière se trouve directement sur l'Yonne, sans dérivation. De plus, la station théorique de Chaumard, utilisée dans le modèle, se situe dans le lac et n'a donc pas de réalité physique. Cette station sera donc considérée à la fois comme une connexion de prise et une connexion de restitution.

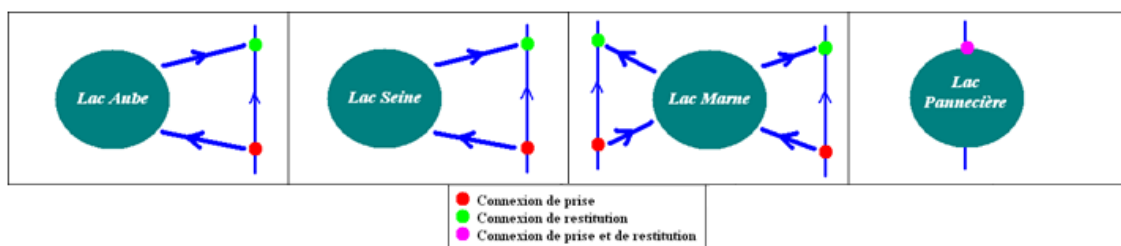


Figure 14 : Schéma de résumé des connexions des Lacs

En annexe 4, la carte des lacs et de leurs connexions est disponible.

2.2 Règles de gestion

Une fois cette simplification effectuée, j'ai pu établir différents cas de figure, selon le type de lac, en dérivation ou directement sur la rivière, et selon le type de connexion, prise, restitution ou les

deux. J'ai alors programmé des fonctions Scilab chargées de calculer les débits prélevé et restitué à partir de la courbe de gestion, des volumes réels, maximum et minimum du lac, et des débits amont, réservé, de référence et maximum admissibles dans les canaux d'amenée et de rejet. Une fois ces débits déterminés, il est alors possible de calculer le débit aval et le volume du lac.

Le calcul se fait jour par jour.

2.2.1 Les lacs en dérivation : Aube, Seine et Marne

Ces lacs, placés en dérivation de leur rivière respective, sont divisés en deux types de connexions : en amont, la connexion de prise, et en aval, la connexion de restitution. Certaines règles ont été appliquées en ces points en fonction du type de connexion, afin de calculer le volume d'eau dans les lacs, ainsi que les débits prélevés, restitués et aval à la connexion. Deux fonctions ont donc été créées, l'une de prise et l'autre de connexion, regroupant certaines règles communes et d'autres spécifiques au type de connexion.

Le débit amont au niveau de la connexion est calculé à l'aide du modèle TGR.

2.2.1.1 Connexion de prise : fonction de prise

Cette fonction de prise permet le calcul du volume dans le lac après la prise, ainsi que le débit aval dans la rivière, selon le débit amont et les paramètres hydrologiques et hydrauliques du bassin versant intermédiaire.

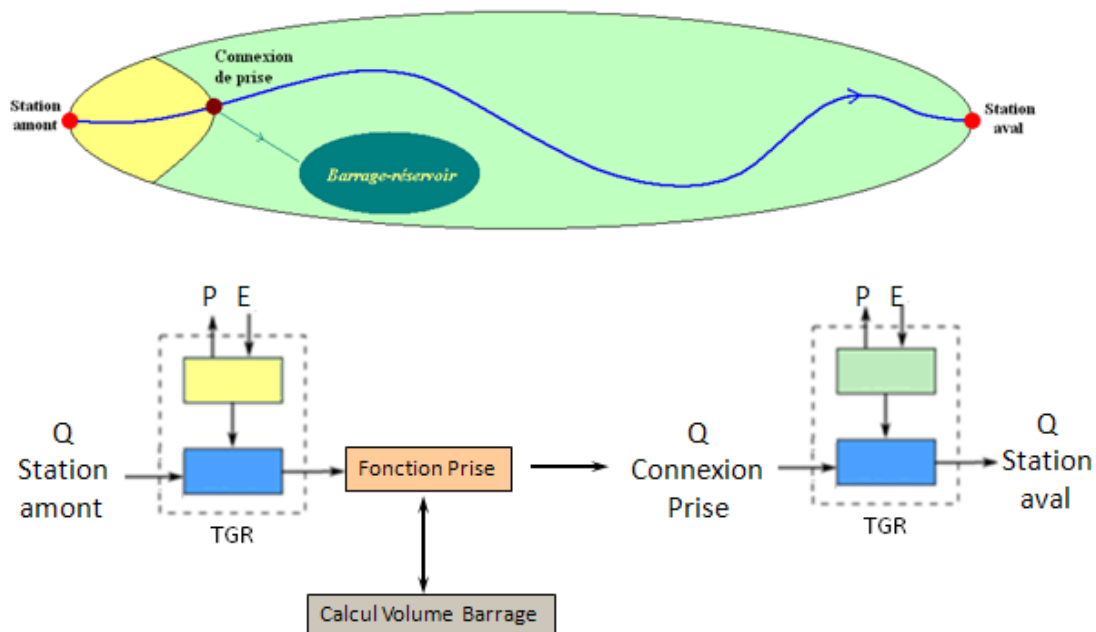


Figure 15 : Schéma de la connexion de prise

Tout d'abord, la règle première est de suivre la courbe de gestion des lacs. Une première estimation du volume à prélever (ou à restituer, selon que le lac soit en phase de remplissage ou de vidange) est effectuée en faisant la différence entre le volume donné par la courbe théorique et le volume calculé le jour précédent. Ce volume est alors transformé en débit, passant de millions de m³

journaliers à des m/s.

Dans cette fonction, un débit restitué théorique doit être calculé afin d'évaluer le volume du lac pour le jour suivant. Il est en effet impossible d'utiliser le volume calculé plus tard avec la fonction de restitution, comme la simulation est effectuée station (ou connexion) après station (ou connexion) et non jour après jour. La période entière est donc calculée pour une station avant que le calcul ne soit effectué pour une autre.

| Phase | Débit prélevé | Débit restitué |
|--------------------|---|---|
| Remplissage | $Q_{\text{prélèvement}}(t) = \frac{(V_{\text{courbe}}(t) - V_{l1}(t-1)) * 10^6}{86400}$ | $Q_{\text{thr}}(t) = 0$ |
| Vidange | $Q_{\text{prélèvement}} = 0$ | $Q_{\text{thr}}(t) = \frac{(V_{l1}(t-1) - V_{\text{courbe}}(t)) * 10^6}{86400}$ |

Tableau 2 : Calcul du débit initial en prise

Ensuite, il faut que ce débit prélevé (ou restitué) respecte certaines règles, et doit donc subir quelques tests :

- Les débits réservés et de référence ne doivent pas être dépassés, si possible,
- Le débit maximal autorisé dans le canal d'aménée (ou de restitution) ne peut pas être dépassé,
- Les prélèvements lors des étiages ont lieu uniquement si le débit de la rivière est supérieur au débit de référence,
- Le volume maximum du lac ne peut pas être dépassé.

Le volume $V_{l1}(t)$ utilisé est calculé à l'aide la formule (1) en page suivante.

| Cas | Débit |
|--|--|
| Si $Q_{\text{amont}}(t) < Q_{\text{réservé}}(t)$ | $Q_{\text{prélèvement}}(t) = 0$ $Q_{\text{thr}}(t) = Q_{\text{réservé}}(t) - Q_{\text{amont}}(t)$ |
| Si $Q_{\text{aval}}(t) < Q_{\text{réservé}}(t)$ | $Q_{\text{prélèvement}}(t) = Q_{\text{amont}}(t) - Q_{\text{réservé}}(t)$ $Q_{\text{thr}}(t) = 0$ |
| Si $Q_{\text{amont}}(t) > Q_{\text{réf}}(t)$ et $Q_{\text{prélèvement}}(t) < Q_{\text{amont}}(t) - Q_{\text{réf}}(t)$ | $Q_{\text{prélèvement}}(t) = Q_{\text{amont}}(t) - Q_{\text{réf}}(t)$ $Q_{\text{thr}}(t) = 0$ |
| Si $Q_{\text{prélèvement}}(t) > Q_{\text{canalin}}$ | $Q_{\text{prélèvement}}(t) = Q_{\text{canalin}}$ |
| Si $Q_{\text{thr}}(t) > Q_{\text{canalout}}$ | $Q_{\text{thr}}(t) = Q_{\text{canalout}}$ |
| Si $Q_{\text{amont}}(t) > Q_{\text{réf}}(t)$ | $Q_{\text{prélèvement}}(t) = Q_{\text{amont}}(t) - Q_{\text{réf}}(t)$ |
| Si $V_{l1}(t) > V_{\text{lacmax}}$ | $Q_{\text{prélèvement}}(t) = \frac{(V_{\text{lacmax}} - V_{l1}(t-1)) * 10^6}{86400}$ |
| Si $V_{l1}(t) < V_{\text{lacmin}}$ | $Q_{\text{thr}}(t) = \frac{(V_{l1}(t-1) - V_{\text{lacmin}}) * 10^6}{86400}$ |

Tableau 3 : Ajustement du débit prélevé

Une fois que ce débit prélevé est calculé, il est alors possible d'en déduire un volume estimé dans le lac, volume qui sera utilisé par la suite pour le calcul des jours suivants au niveau de la connexion de prise :

$$Vl1(t) = Vl1(t - 1) + \frac{(Q_{\text{prélèvement}}(t) - Q_{\text{thr}}(t)) * 86400}{10^6} \quad (1)$$

Ensuite, il est possible de calculer le débit aval définitif dans la rivière ainsi que le volume du lac.

$$V_{\text{lac}_{\text{prise}}}(t) = Vl1(t - 1) + \frac{Q_{\text{prélèvement}}(t) * 86400}{10^6}$$

$$Q_{\text{aval}}(t) = Q_{\text{amont}}(t) - Q_{\text{prélèvement}}(t)$$

Ces valeurs seront ensuite utilisées au niveau de la connexion de restitution, où sera calculé le volume final du lac pour la journée.

2.2.1.2 Connexion de restitution : fonction de restitution

Cette fonction de restitution permet le calcul du volume journalier dans le lac ainsi que le débit aval dans la rivière, selon le débit amont et les paramètres hydrologiques et hydrauliques du bassin versant intermédiaire.

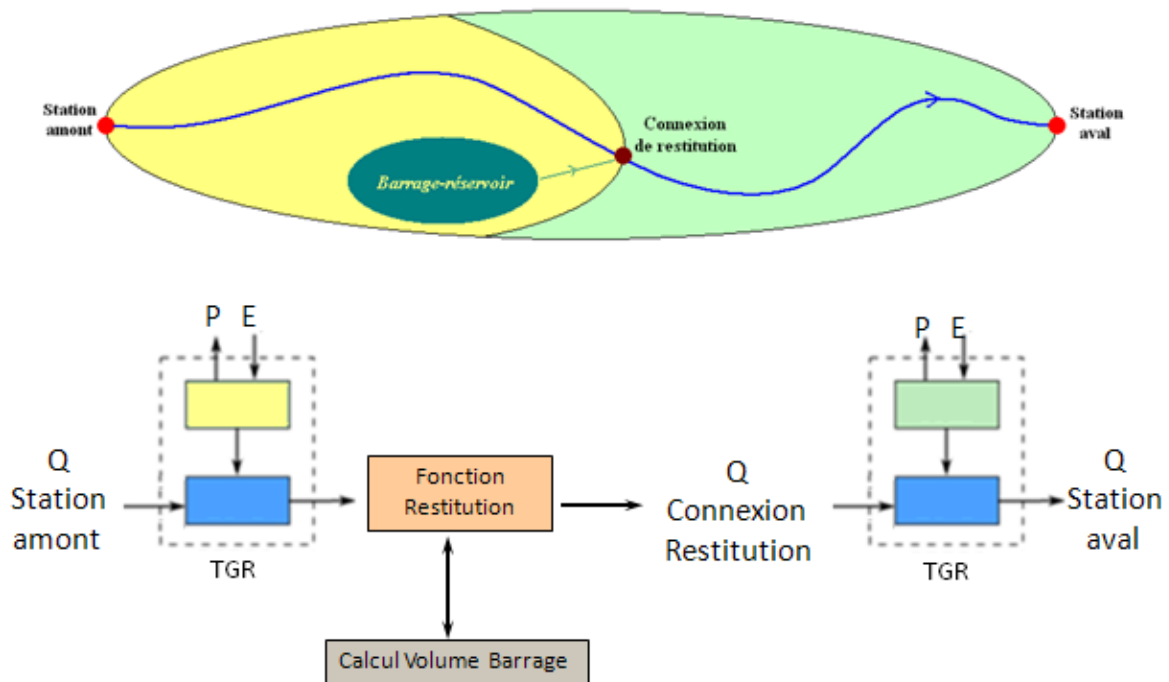


Figure 16 : Schéma de la connexion de restitution

Comme pour la connexion de prise, la règle première est de suivre la courbe de gestion des lacs. Une première estimation du volume à restituer est effectuée en faisant la différence entre le volume donné par la courbe théorique et le volume calculé le jour précédent au niveau de la fonction de

restitution du lac. Ce volume est alors transformé en débit, passant de millions de m³ journaliers à des m/s.

Le volume du lac avant changement est calculé avec la formule suivante :

$$Vlth(t) = Vlth(t - 1) + Q_{\text{prélèvement}}(t) * \frac{86400}{10^6}$$

Puis selon la valeur de ce volume, un premier débit de restitution est calculé à partir de la courbe de gestion.

| Condition | Returned flow |
|--|---|
| Si $Vlth(t) < V_{\text{courbe}}(t)$ | $Q_{\text{restitution}}(t) = 0$ |
| Si $Vlth(t) \geq V_{\text{courbe}}(t)$ | $Q_{\text{restitution}}(t) = \frac{(Vlth(t) - V_{\text{courbe}}(t)) * 10^6}{86400}$ |

Tableau 4 : Calcul du débit initial de restitution

Ensuite, il faut que ce débit restitué respecte certaines règles, et doit donc subir quelques tests :

- Le débit de référence ne doit pas être dépassé, si possible,

En revanche, il n'y a pas d'obligation en ce qui concerne le débit réservé. Il n'a pas à être soutenu lors des étiages.

- Le débit maximal autorisé dans le canal de restitution ne peut pas être dépassé,
- Les volumes maximum et minimum des lacs ne peuvent pas être dépassés

| Cas | Débit |
|--|--|
| Si $Q_{\text{amont}}(t) > Q_{\text{référence}}(t)$ | $Q_{\text{restitution}}(t) = 0$ |
| Si $Q_{\text{aval}}(t) > Q_{\text{référence}}(t)$ | $Q_{\text{restitution}}(t) = Q_{\text{référence}}(t) - Q_{\text{amont}}(t)$ |
| Si $Q_{\text{restitution}}(t) > Q_{\text{canalout}}$ | $Q_{\text{restitution}}(t) = Q_{\text{canalout}}$ |
| Si $V_{\text{lac}}(t) < V_{\text{lacmin}}$ | $Q_{\text{restitution}}(t) = 0$ |
| Si $V_{\text{lac}}(t) > V_{\text{lacmax}}$ | $Q_{\text{restitution}}(t) = \frac{(V_{\text{lac}}(t) - V_{\text{lacmax}}) * 10^6}{86400}$ |

Tableau 5 : Ajustement du débit restitué

Une fois que ce débit restitué est calculé, il est alors possible d'en déduire le débit aval définitif dans la rivière ainsi que le volume définitif du lac.

$$V_{\text{lac}}(t) = Vlth(t) + \frac{Q_{\text{restitution}}(t) * 86400}{10^6}$$

$$Q_{\text{aval}}(t) = Q_{\text{amont}}(t) + Q_{\text{restitution}}(t)$$

2.2.2 Le lac Pannecière

Cette retenue, placée directement sur la rivière Yonne, se situe à l'exutoire d'un bassin versant amont. De ce fait, elle a été simplifiée en une seule connexion, se trouvant à l'exutoire du bassin versant, au niveau de la station des débits naturalisés de Chaumard, et sa modélisation est légèrement différente de celle des autres lacs-réservoirs.

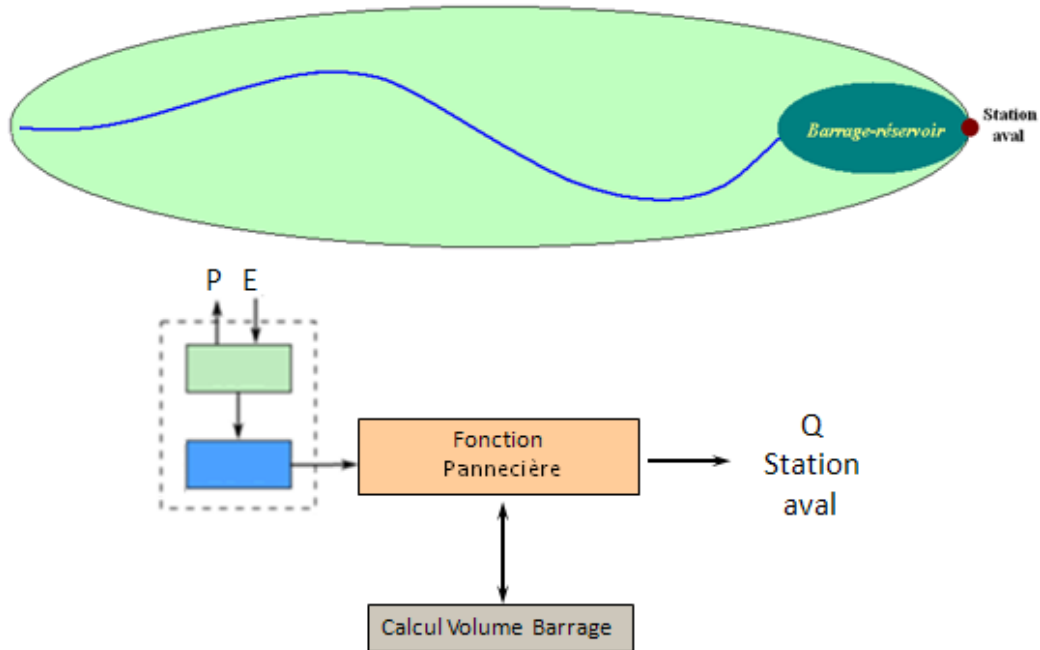


Figure 17 : Schéma du lac Pannecière

Comme pour les autres lacs, le volume à rejeter du lac est d'abord estimé en faisant la différence entre le volume théorique du jour de la courbe et le volume calculé du jour précédent. Ce volume est alors transformé en débit, passant de millions de m³ journaliers à des m/s. Par la suite, on notera ce débit restitué à la rivière Q_{rest} .

Le lac étant situé directement sur l'Yonne, tout le débit du bassin versant rejoint le lac. Pour uniformiser avec les autres lacs, ce débit sera considéré comme prélevé.

| Phase | Débit prélevé | Débit restitué |
|-------------|-------------------------------------|---|
| Remplissage | $Q_{prélèvement}(t) = Q_{amont}(t)$ | $Q_{rest}(t) = \frac{(V_{courbe}(t) - V_{lac}(t-1)) * 10^6}{86400}$ |
| Vidange | $Q_{prélèvement}(t) = Q_{amont}(t)$ | $Q_{rest}(t) = \frac{(V_{lac}(t-1) - V_{courbe}(t)) * 10^6}{86400}$ |

Tableau 6 : Calcul du débit théorique restitué

Ensuite, il faut que ce débit restitué respecte certaines règles, et doit donc subir quelques tests :

- Le débit réservé et le débit de référence dans la rivière ne doivent pas être dépassés, si possible,

| Débit de référence (m ³ /s) | Débit réservé (m ³ /s) |
|--|-----------------------------------|
| 14 de novembre à mars | 0.6 |
| 12 d'avril à octobre | 0.6 |

Tableau 7 : Valeurs des débits réservés et de référence du lac Pannecière

Contrairement aux trois autres lacs, ce lac reçoit tout le débit amont, calculé avec le modèle TGR. Par conséquent, un débit réservé minimal doit toujours être assuré.

- Le débit maximal de restitution ne devrait pas être dépassé : 16 m³/s,

C'est le débit maximal pouvant passer par les vannes du lac Pannecière. Ce débit peut être obtenu si le lac est totalement rempli et une inondation vient avec un débit plus élevé que 14 ou 12m³/s, selon le mois. Il faut alors rejeter plus que le débit de référence.

Cependant, en cas de dépassement du volume du lac, le débit de restitution devient alors plus important, passant au-delà de 16 m³/s. Dans ce cas, comme le test du débit maximal du canal de restitution est effectué avant celui de dépassement du volume du lac, ce débit rejeté reste supérieur à la capacité maximale du canal. Le trop plein se déverse malgré tout dans l'Yonne. Des dépassements de ce débit de restitution en temps observé réel sont visibles en figure 18, sur la page 34, il existe donc un ouvrage adapter pour gérer ces trop-plein au niveau du lac..

- Le débit aval ne peut pas varier de plus de 2 m³/s en 24h,
- Les volumes maximum et minimum du lac ne doivent pas être dépassés,

| Volume maximal (en M de m ³) | Volume minimal (en M de m ³) |
|--|--|
| 82.5 | 8.5 |

Tableau 8 : Volumes limites du lac Pannecière

- Le débit moyen alloué au canal du Rivernais doit être assuré et « sort » du modèle,

| Débit moyen (m ³ /s) |
|---------------------------------|
| 0 de décembre à février |
| 0.6 en mars et novembre |
| 1.1 en avril et octobre |
| 1.2 en mai |
| 1.3 en juin et septembre |
| 1.4 en juillet et août |

Tableau 9 : Débit du canal du Rivernais

Une fois que ce débit restitué est calculé, il est alors possible d'en déduire le débit aval définitif dans la rivière ainsi que le volume définitif du lac.

$$Vlac(t) = Vlac(t - 1) + \frac{(Q_{prélèvement}(t) - Q_{restitution}(t)) * 86400}{10^6}$$

$$Q_{aval}(t) = Q_{restitution}(t)$$

2.2.3 Résumé

Il y a donc quatre cas différents de calcul du débit aval, selon qu'il s'agisse d'une station, d'une connexion de prise, d'une connexion de restitution ou de la connexion de Pannecièrre, et s'il y a lieu du volume du lac selon le type de station ou de connexion :

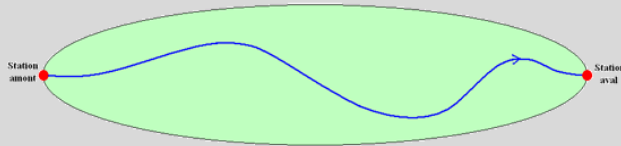
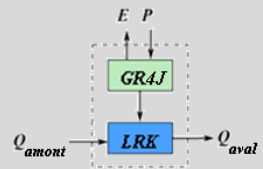
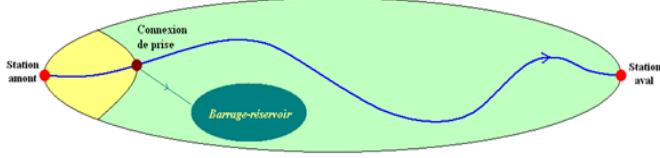
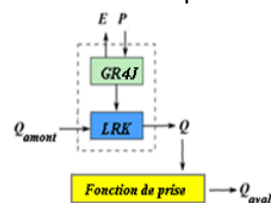
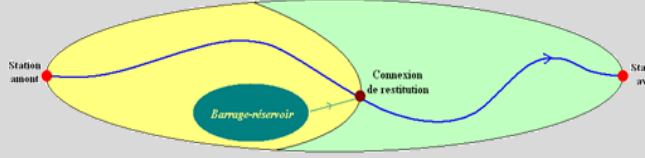
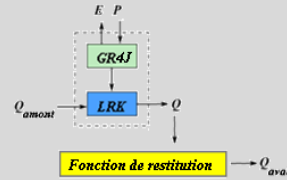
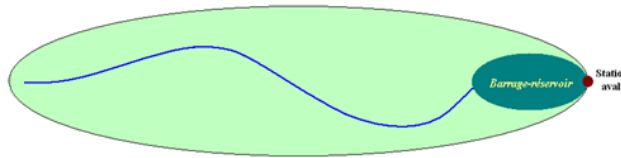
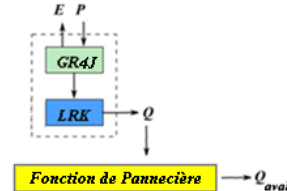
| Cas | Schéma | Fonctions appliquées |
|--|--|---|
| Cas 1 : Station normale (qui n'est pas une connexion) |  | Aucun changement : 1. TGR  |
| Cas 2 : Connexion de prise |  | 1. TGR 2. Fonction de prise  |
| Cas 3 : Connexion de restitution |  | 1. TGR 2. Fonction de restitution  |
| Cas 4 : Connexion de Pannecièrre |  | 1. TGR 2. Fonction Pannecièrre  |

Tableau 10 : Résumé des différents cas

La liste des 33 stations et connexions dans leur ordre de simulation est disponible en annexe 5.

2.3 Climat observé : débits aux connexions

Tout d'abord, afin de voir si le modèle est globalement correct et non complètement aberrant, il a fallu commencer par tracer les courbes de volume des lacs. De cette manière, il a été possible de déterminer qualitativement si les courbes de gestion étaient suivies, s'il n'y avait pas trop de différences avec la réalité, et s'il y avait éventuellement des règles supplémentaires dont nous n'avions pas connaissance.

Sur les courbes du lac Pannecière, visibles sur la figure 19 ci-dessous, la courbe simulée (bleue) suit globalement la courbe de gestion (rouge), et prend en compte les événements, crues et étiages sévères. Ce n'est cependant pas toujours identique à la courbe réelle (verte).

Les débits amont semblent être très semblables, avec un peu de sous-estimation des crues dans la simulation comme vu dans le 1.5. Au contraire, les débits aval sont très différents. Le rejet dans l'Yonne n'est pas le même dans la simulation et dans la réalité, entraînant une différence de volume.

De plus, tous les dix ans, le lac subit une vidange totale, comme les trois autres. C'est ainsi qu'en 1981, la retenue est vidée totalement. Cependant, cette vidange décennale n'est pas indiquée sur la courbe de gestion. Elle n'est donc pas prise en compte dans la simulation.

Les courbes des autres lacs sont disponibles en annexe 7.

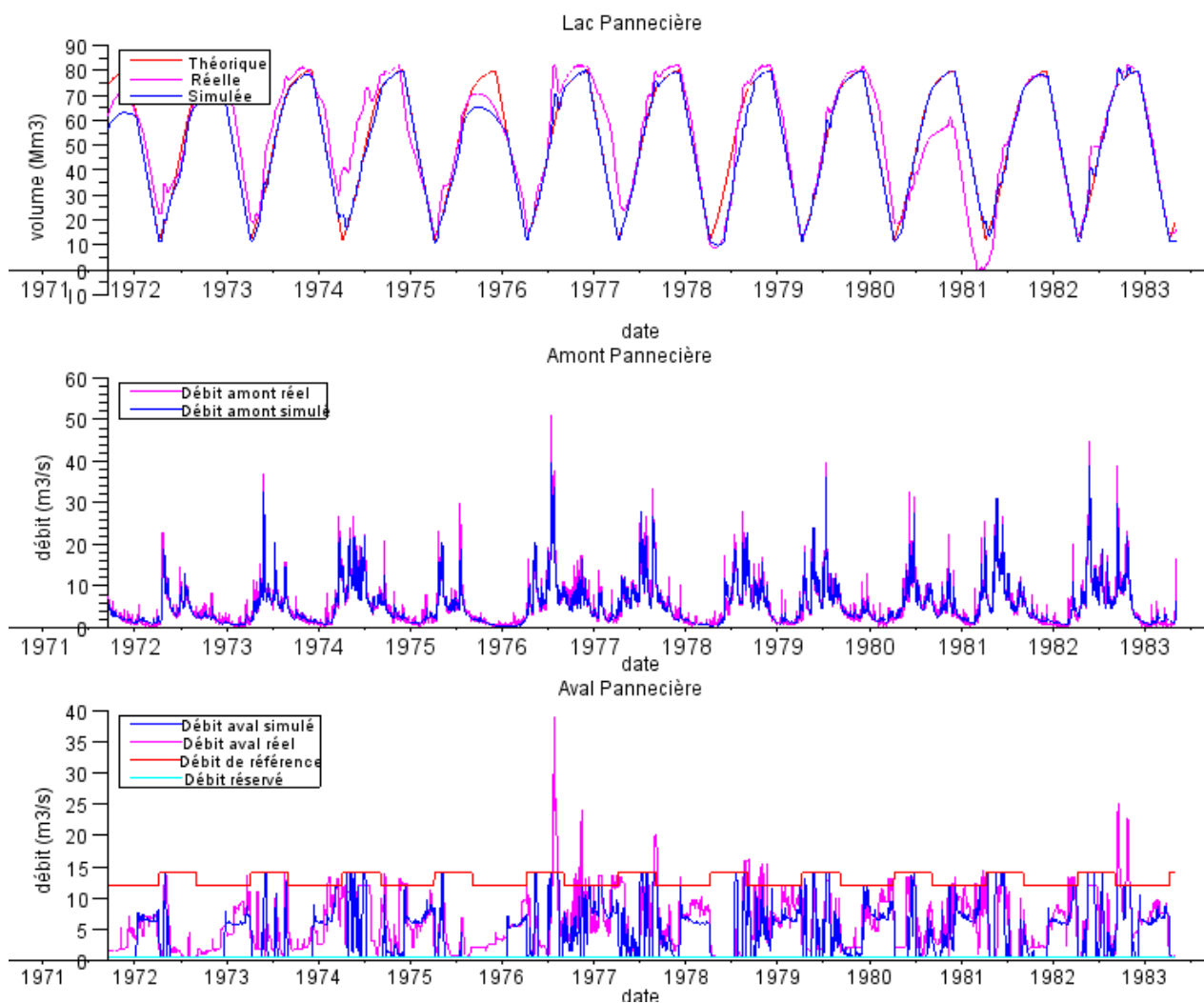


Figure 18 : Courbes du lac Pannecièr entre 1972 et 1983

La liste des stations et connexions est disponible en annexe 5.

On remarque que le débit aval est systématiquement inférieur au débit de référence. Les volumes limites des lacs étant testés en dernier, entraînant une nouvelle estimation du débit de restitution, ce dernier peut donc être supérieur au débit maximal du canal.

Dans le graphique ci-dessous, le calcul du Nash se fait avec le débit simulé aval à la restitution et le débit observé réel à la station de mesure de débit située à l'aval du lac. Ces stations de mesure des débits sont différentes des stations des débits naturalisés. Il s'agit de la station de Blaincourt pour l'Aube, Troyes pour la Seine, Chassy pour Pannecièr, et Frignicourt pour la Marne.

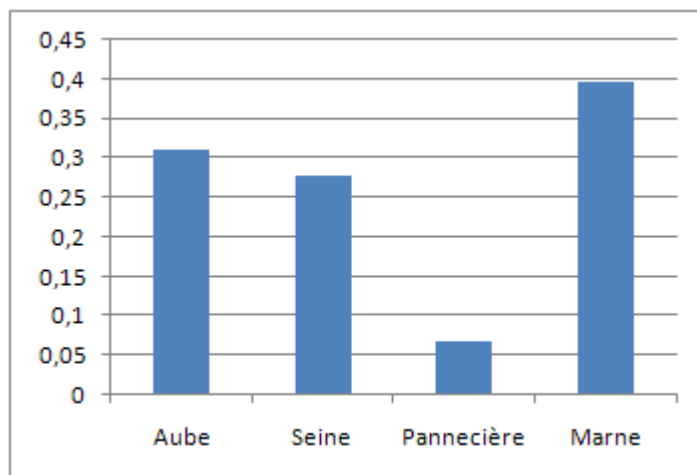


Figure 19 : Nash à l'aval des lacs

La connexion du lac Pannecièrre, donne un Nash très bas. On observe pour cette connexion sur la figure 18 que les débits aval simulés sont différents des débits aval réels, à cause d'une gestion plus proche de la courbe théorique que la gestion réelle. De plus, les débits amont sont souvent sous-estimés, entraînant des écarts supplémentaires.

Les débits amont issus de TGR présentent quelques différences avec les débits réels (par exemple, sous-estimation d'une crue fin 1976 à Pannecièrre sur la figure 18). On obtient donc une réponse un peu différente du lac simulé par rapport au lac réel. De plus, dans la simulation, le facteur humain n'intervient pas, et il n'y a donc pas d'estimation arbitraire de débit de prise ou de rejet.

Malgré ces différences, les lacs réservoirs sont bien représentés. Ici aussi, la courbe de gestion est suivie, les crues sont écrêtées et les étiages soutenus.

3 Etude de la performance des lacs

Une fois que les lacs-réservoirs ont été intégrés avec succès dans le modèle TGR, il devient possible d'effectuer différentes simulations avec les chroniques de climat du GIEC et d'analyser les résultats obtenus pour en déduire la performance des lacs en temps présent et futur.

3.1 Objectifs

Afin d'étudier la réaction des lacs aux différents temps proposés, trois types de simulations seront effectuées. La première se fera en « temps observé », utilisant la courbe de gestion réelle des lacs ainsi que les données climatiques de la base Safran.

Les autres simulations seront effectuées avec une courbe théorique de gestion des lacs. Contrairement à la courbe réelle, qui est parfois adaptée à l'année (voir la courbe ci-dessous, aux années 1991, 1997 et 2001), la courbe utilisée sera la même tous les ans. Ces 14 simulations seront effectuées avec les forçages climatiques du GIEC, présentés en 1.6, 7 en temps présent et 7 en temps futur.

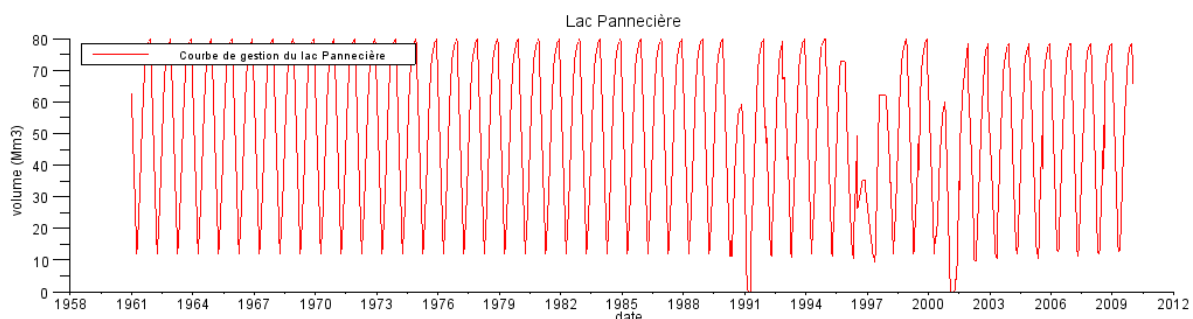


Figure 20 : Courbe de gestion du lac Pannecière

Dans ces simulations, plusieurs objectifs devront être atteints au niveau des connexions des lacs. Le premier est le suivi de la règle de gestion des lacs. En effet, dans les conditions idéales, cette courbe doit être suivie parfaitement, les écarts étant dû aux crues et aux étiages prolongés.

Le second objectif est l'écrêtage des crues, afin de protéger les habitations et les industries à l'aval du bassin versant. Le débit maximum dans la rivière au-delà duquel celle-ci est considérée en crue est le débit de référence. Le troisième est le soutien d'étiage, afin d'assurer un débit réservé à l'aval pour la navigation et l'alimentation en eau potable.

Plusieurs indicateurs seront utilisés afin de vérifier que ces objectifs sont remplis. Le premier est la fiabilité, présenté dans le paragraphe suivant 3.2. Il est suivi de deux autres indicateurs, le nombre

de jours de défaillance en étiage puis en crue, présentés respectivement aux paragraphes 3.4 et 3.5. Enfin, le taux de remplissage du lac est présenté au paragraphe 3.3, pour un usage plus touristique.

Les neuf connexions seront numérotées selon le tableau ci-dessous.

| Connexion | Numéro de la connexion |
|--------------------|------------------------|
| Prise Aube | 1 |
| Restitution Aube | 2 |
| Prise Seine | 3 |
| Restitution Seine | 4 |
| Pannecièrè | 5 |
| Prise Marne | 6 |
| Restitution Marne | 7 |
| Prise Blaise | 8 |
| Restitution Blaise | 9 |

Tableau 11 : Liste des connexions

Les résultats des simulations en temps présent et en temps futur sont très différents les uns des autres, comme il est possible de le voir sur les deux figures ci-dessous.

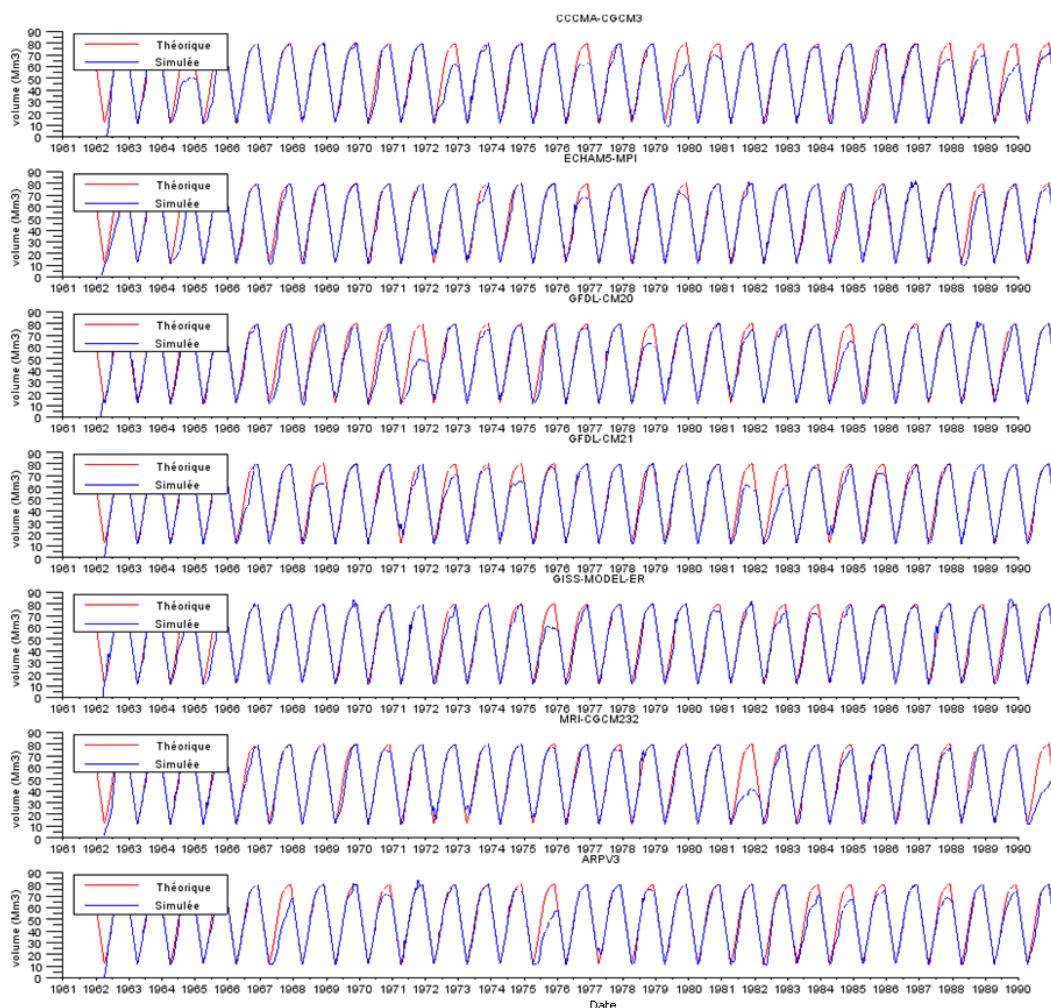


Figure 21 : Simulation TP (1961-1990) du volume du lac de Pannecièrè pour les 7 modèles de forçage climatique

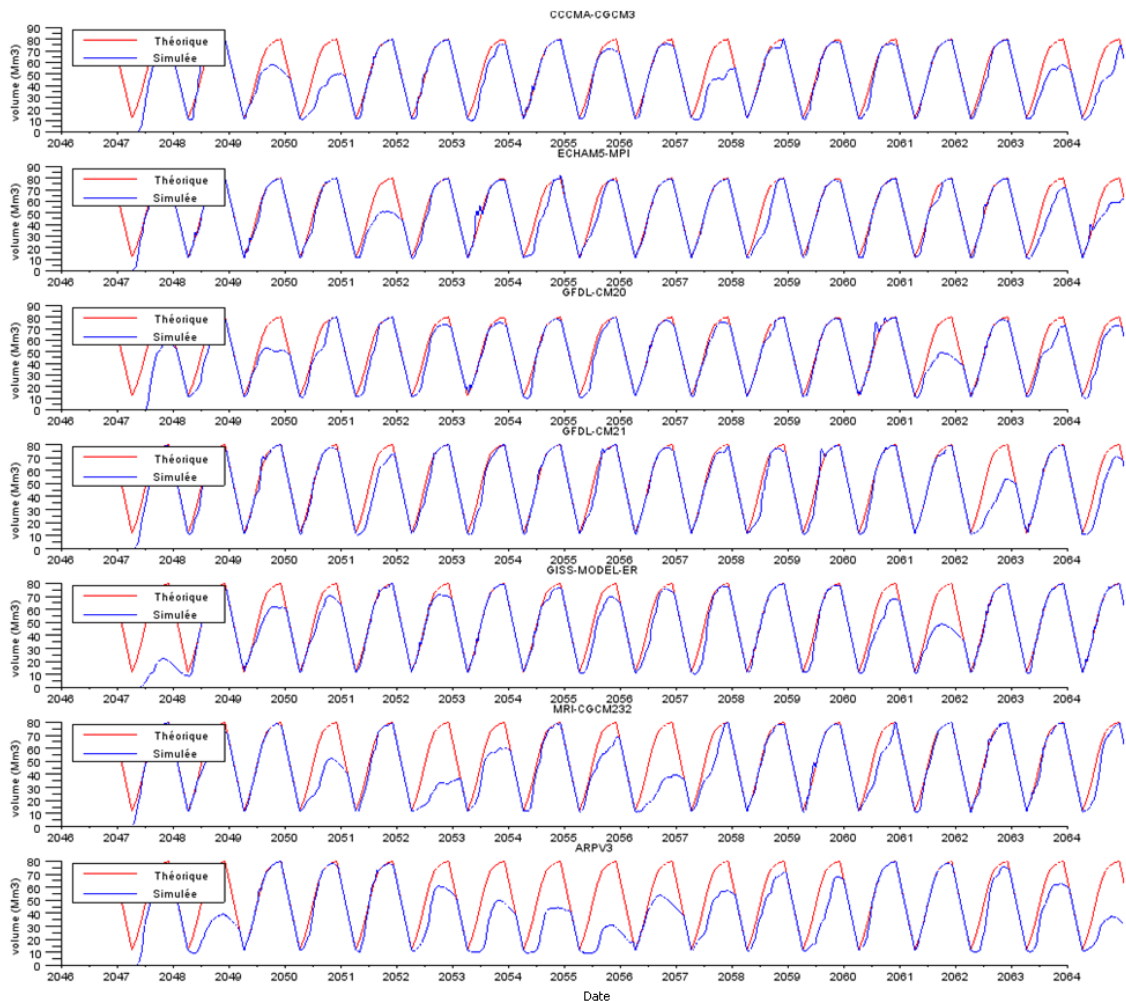


Figure 22 : Simulation TF (1946-1965) du volume du lac de Pannecière pour les 7 modèles de forçage climatique

3.2 Fiabilité, vulnérabilité

Les deux premiers indicateurs pouvant être considérés sont la fiabilité et la vulnérabilité. Ils ont été développés par Kjeldsen et Rosbjerg dans CHOICE OF RELIABILITY, RESILIENCE AND VULNERABILITY ESTIMATORS FOR RISK ASSESSMENTS OF WATER RESOURCES SYSTEMS/CHOIX D'ESTIMATEURS DE FIABILITE, DE RESILIENCE ET DE VULNERABILITE POUR LES ANALYSES DE RISQUE DE SYSTEMES DE RESSOURCES EN EAU en 2004 [10], à partir des travaux de Hashimoto, Stedinger et Loucks RELIABILITY, RESILIENCY, AND VULNERABILITY CRITERIA FOR WATER RESOURCE SYSTEM PERFORMANCE EVALUATION en 1982 [11].

3.2.1 Présentation

La fiabilité est la fréquence ou probabilité que le système soit dans un état satisfaisant. Elle est calculée par la formule suivante [10], avec $d(j)$ la durée de l'échec j , M le nombre d'échecs et T le nombre total d'intervalles de temps :

$$Rel = Prob(S \in Sy) = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M d(j)}{T}$$

La vulnérabilité est la mesure des probables conséquences d'un échec. Elle est calculée sur un volume, et prend en compte la somme sur l'échec j des différences entre le volume objectif et le volume simulé en un point de contrôle, v(j) :

$$v(j) = 86400 * \sum_{\text{jours de la période } j} (Q_{obj} - Q_{sim})$$

On obtient le volume déficitaire pour l'événement j de non satisfaction de l'objectif (en étiage ou en crue).

On peut alors calculer la vulnérabilité égale à la moyenne des volumes déficitaires de l'échec v(j) avec la formule suivante :

$$Vul1 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M v(j)$$

Seulement, de nombreux petits dépassements peuvent faire baisser la moyenne, aussi est-il aussi possible de calculer la vulnérabilité à partir de l'échec maximal, avec v(j) le volume déficitaire de l'échec j :

$$Vul2 = \max_j \{v(j)\}$$

Un troisième calcul de vulnérabilité alternatif au maximum, Vul3, prend en compte le 9^{ème} quantile (décile) des v(j).

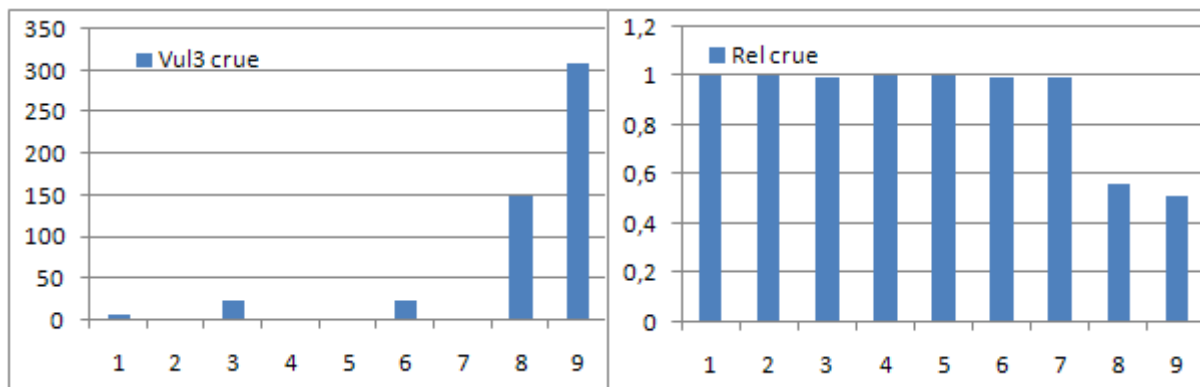


Figure 23 : Vulnérabilité (à gauche) et fiabilité (à droite) par rapport aux crues pour les 9 connexion temps observés

Sur les graphiques précédents, on peut voir que la fiabilité et la vulnérabilité sont opposées : si la valeur de la fiabilité est forte, celle de la vulnérabilité sera faible, et vice versa.

3.2.2 Résultats

Dans les graphiques suivants seront représentés la moyenne, le maximum et le minimum des fiabilités en temps observé réel (TR), observé simulé (TO), présent (TP) et futur (TF). Comme la Blaise se jette dans la Marne 500m après la restitution, il n'y a pas d'observation de débit au niveau de cette connexion.

➤ Lors des crues

On observe sur le graphique suivant en figure 24 que les lacs Seine et Aube (numéros 1 à 4) une fiabilité proche de 1, que ce soit en temps observé, présent ou futur. Il en est de même pour les connexions de la rivière Marne (6 et 7), mais pas celle de la Blaise (8 et 9), ni pour Pannecière (numéro 5).

On remarque que la fiabilité en temps présent est généralement inférieure à celle en temps futur, elle-même inférieure à celle en temps observé.

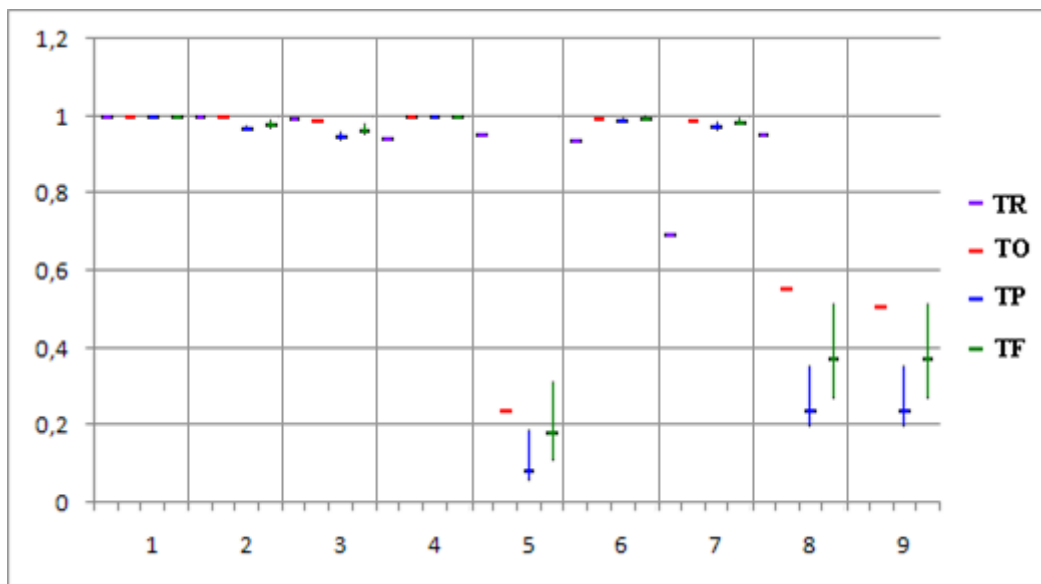


Figure 24 : Graphique de la fiabilité des connexions en crue

➤ Lors des étiages

On observe sur le graphique suivant, en figure 25, que toutes les connexions de prise, ainsi que les connexions de restitution Aube et Blaise et la connexion de Pannecière ont une fiabilité moyenne supérieure à 0.6, mis à part la connexion de restitution Seine en TF. Aucune fiabilité n'est inférieure à 0.4.

On remarque que les moyennes des fiabilités en temps futur sont inférieures à celles en temps présent et observé.

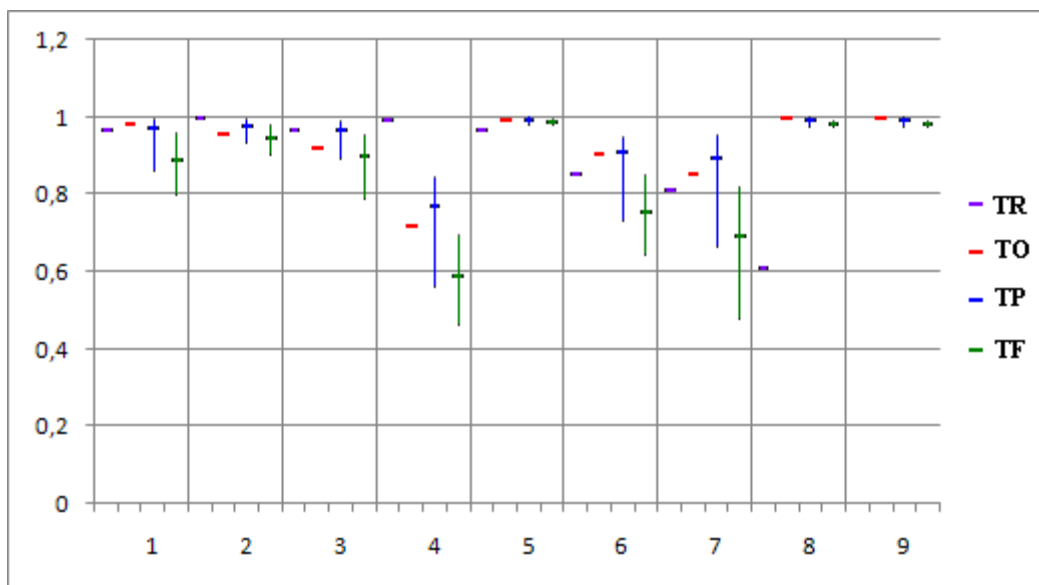


Figure 25 : Graphique de la fiabilité des connexions lors des étiages

3.3 Ecrêtage des crues

En crue, le premier critère concerne la saturation du lac, lorsqu'il ne parvient plus à écrêter les crues.

3.3.1 Présentation

Ce critère revient à regarder le nombre de jours où le débit aval dans la rivière dépasse le débit de référence, calculé en 3.2, et à en étudier les causes. Celles-ci peuvent être une saturation du lac, qui ne peut plus accueillir de volume supplémentaire, ou une saturation du canal d'amenée.

Le débit de référence est principalement dépassé à l'aval des restitutions. En effet, des apports de débits ont pu être effectués entre la prise et la restitution, grâce aux pluies et à l'évapotranspiration sur le BVI amont à la restitution.

Ce calcul reprend celui de la vulnérabilité et de la fiabilité en prenant pour débit objectif le seuil étudié. Il sera effectué en temps observé mesuré (TR), en temps observé simulé (TO), en temps présent (TP) et en temps futur (TF).

3.3.2 Résultats

En temps observés TR et TO, le pourcentage de dépassement du débit de référence est toujours inférieur à celui en temps présent pour le lac Aube. Mis à part pour une simulation cette proportion est plus élevée en temps présent qu'en temps futur.

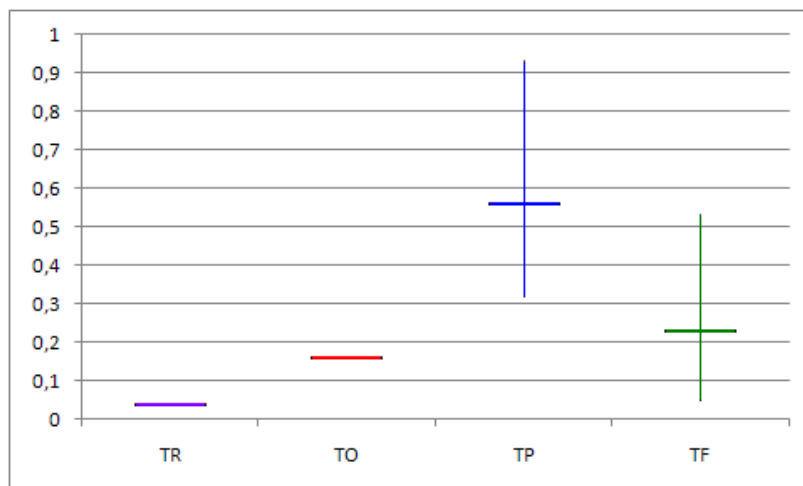


Figure 26 : Pourcentage de dépassement du débit de référence à l'aval du lac Aube

La proportion de dépassement du débit de référence en temps observé mesuré est proche de 6% pour le lac Seine sur le graphique ci-dessous, et de 1,5% en temps observé simulé. Pour la plupart des simulations, le pourcentage est plus élevé en TP qu'en TF.

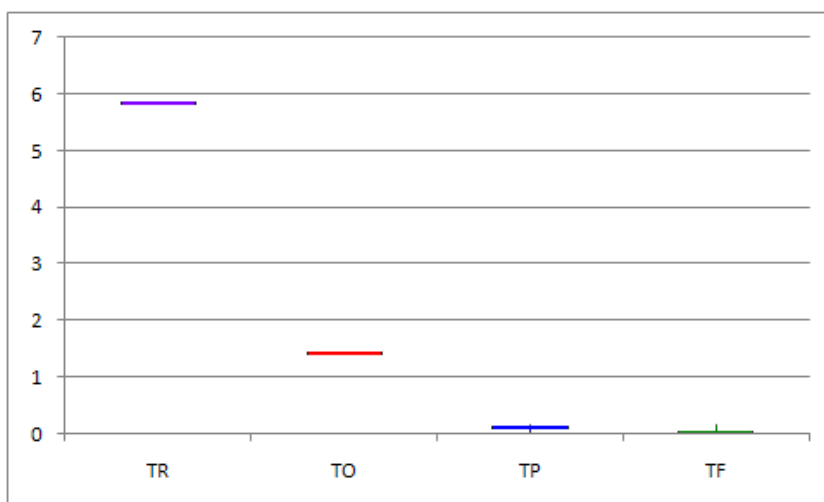


Figure 27 : Pourcentage de dépassement du débit de référence à l'aval du lac Seine

Le pourcentage de dépassement du débit de référence est systématiquement proche ou égal à zéro en temps observé simulé, présent et futur pour le lac Pannecière.

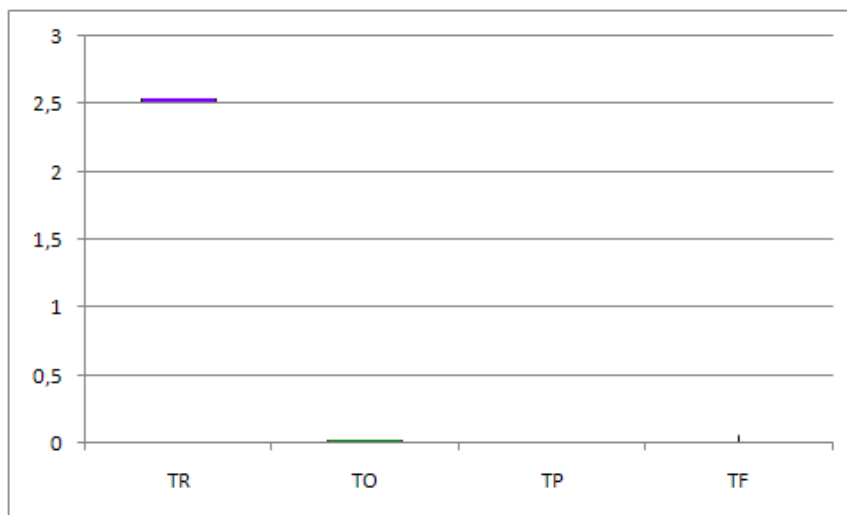


Figure 28 : Pourcentage de dépassement du débit de référence à l'aval du lac Pannecièrre

Pour le lac Marne, si ce pourcentage est quasiment nul en TO, il est en revanche très élevé en TP, au alentour de 20%, alors qu'il est de 6,5% en TR. En TF, il a diminué par rapport au TP, rejoignant des valeurs voisines du TR.

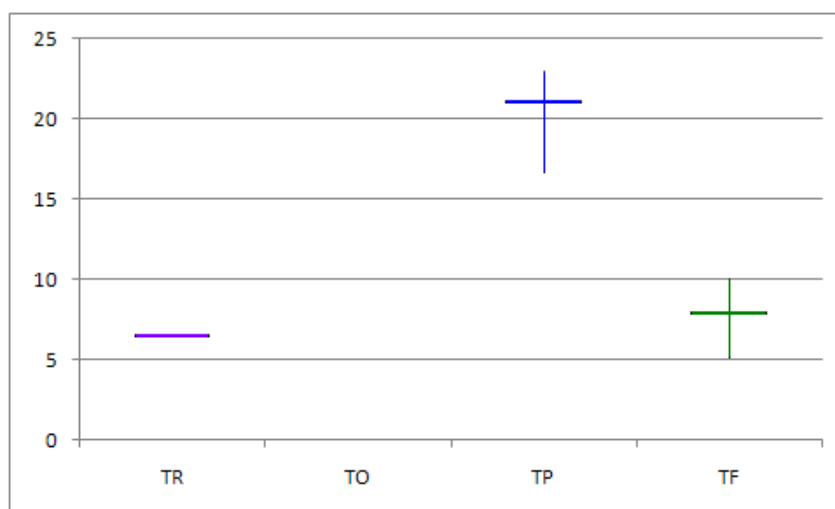


Figure 29 : Pourcentage de dépassement du débit de référence à l'aval du lac Marne

Une tendance apparait sur les lacs Aube et Marne, une diminution des dépassements du débit de référence. En revanche, rien ne peut être dit sur les deux autres lacs.

Ces dépassements peuvent être dus à trois raisons, voire quatre pour le lac Marne :

- Une capacité de stockage du lac insuffisante,
- Des apports intermédiaires entre l'amont et l'aval incontrôlés ; actuellement, le lac Seine rencontre ce genre de problème,
- Une capacité du canal d'amenée insuffisante,
- Une capacité du canal d'amenée de la prise Blaise insuffisante dans le cas du lac Marne. Ce dernier est une condition supplémentaire, qui n'influe pas sur les trois autres, la Blaise rejoignant la Marne à l'aval du lac.

Les pourcentages de chacune de ces raisons sont résumés dans le tableau en page suivante et seront notés selon la légende ci dessous.

Légende :

- **Lac : Capacité de stockage insuffisante dans le lac**
- **BVI : Apports intermédiaires non contrôlés**
- **Canal : Capacité insuffisante du canal de prise**
- **Canal Blaise : Capacité insuffisante du canal de prise de la Blaise**

Ces raisons peuvent être combinées. Cependant, la légende verte BVI correspond aux jours où les dépassements sont dus aux apports intermédiaires seuls.

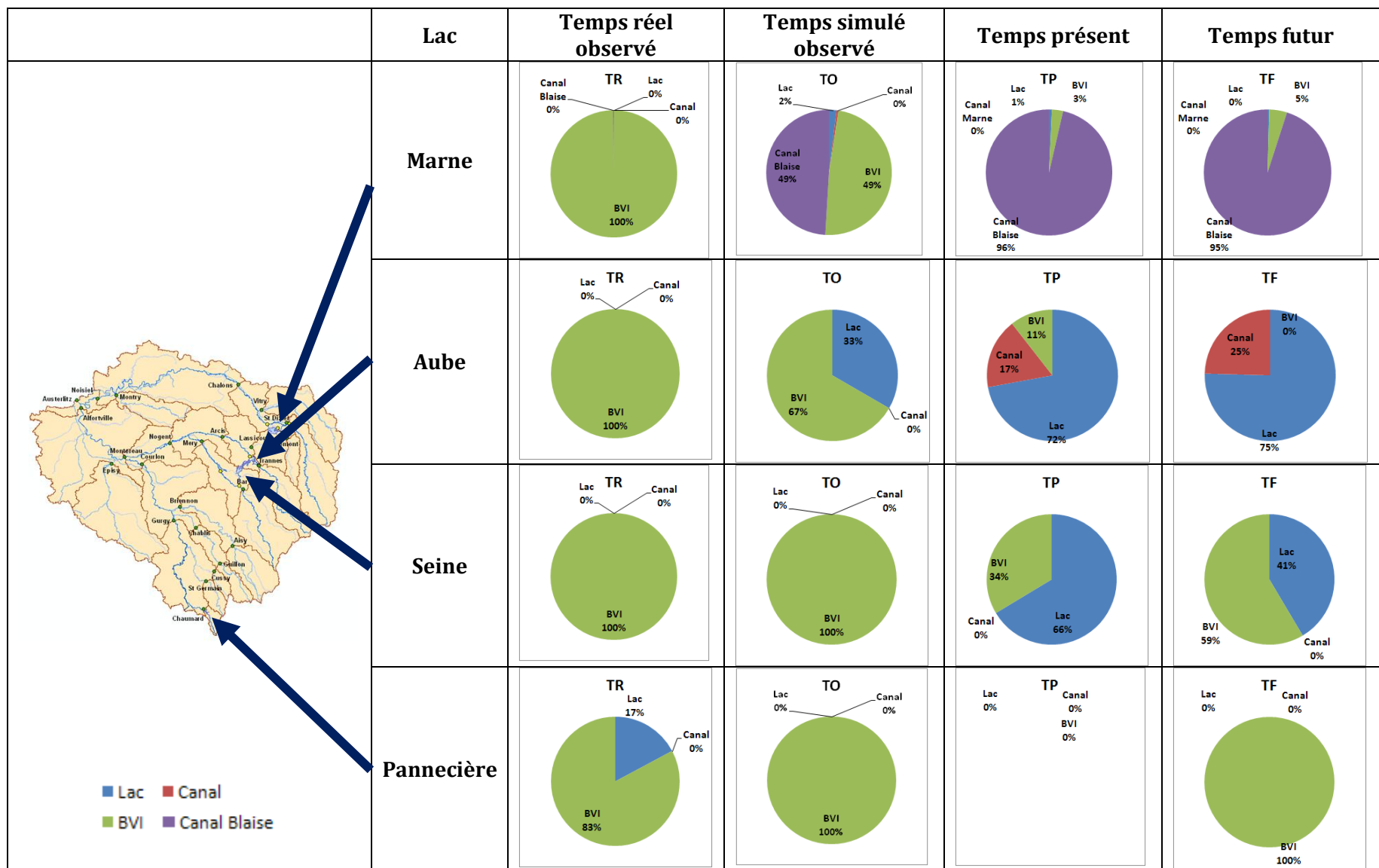


Figure 30 : Résumé des raisons des dépassement du débit de référence, moyenné sur les 7 simulations en TP et en TF

On constate qu'il y a des différences entre le temps observé mesuré et le temps observé simulé. Pour l'Aube, le lac devient parfois un facteur limitant en TO, ce qu'il n'était pas en TR. En revanche, c'est l'inverse pour Pannecière. Des problèmes avec le canal de prise sur la Blaise apparaissent en TO par rapport à la TR. Cela est dû au fait que la connexion de prise de la Blaise est située dans le calcul après la restitution en Marne. Le débit à prélever est alors surestimé.

Pour le lac Marne, les proportions entre la capacité du canal de la Blaise et les apports intermédiaires entre la prise et la restitution sur la Marne restent du même ordre en moyenne. Sur l'Aube, les apports intermédiaires disparaissent en temps futur, alors que les dépassements de capacité du canal de prise augmentent.

Pour la Seine, la tendance un tiers-deux tiers en faveur des apports latéraux en TP s'inverse, privilégiant les apports du BVI. Le lac Pannecière n'a que très peu de dépassements, dont aucun n'est dû au volume du lac. De plus, aucun dépassement n'est observé en TP, d'où le graphique vide.

3.4 Jours de défaillance sous les seuils d'étiage

Le second critère pour les étiages est le nombre de jours de défaillance, lorsque le débit dans la rivière est inférieur à un débit seuil préalablement déterminé lors des étiages.

3.4.1 Présentation

Ce critère regarde le nombre de jours où le débit de la rivière est inférieur aux seuils d'alerte et d'alerte renforcée notamment. Il existe en effet quatre seuils de vigilance, d'alerte, d'alerte renforcée et de crise en plusieurs stations de débits naturalisées situées à l'aval des lacs. Ces seuils sont entièrement définis dans l'arrêté cadre sécheresse N° 2012 094-0001 [12].

Il est ainsi possible de définir le nombre de jours où la gestion du lac amont entraîne une défaillance sous l'un des seuils.

Cependant, les fichiers de données observées réelles regroupent des stations très proches des lacs, et non les stations des débits naturalisés. De ce fait, il n'y avait aucune donnée de débit au niveau des stations susnommées, et n'a donc pas été possible d'y calculer le nombre de jours de défaillance en temps réels observés, contrairement aux autres indicateurs situés soit au niveau des connexions, soit au niveau des lacs.

| Rivière | Station | Seuil de vigilance | Seuil d'alerte | Seuil d'alerte renforcée | Seuil de crise |
|--------------|-------------|--------------------|----------------|--------------------------|----------------|
| Aube | Arcis | 6.3 | 5 | 4 | 3.5 |
| Marne | Châlons | 12 | 11 | 9 | 8 |
| Seine | Méry | 7.3 | 5 | 4 | 3.5 |
| | Alfortville | 64 | 48 | 41 | 36 |
| | Austerlitz | 81 | 60 | 51 | 45 |
| Yonne | Courlon | 23 | 16 | 13 | 11 |

Tableau 12 : Seuils lors des étiages

Ce calcul reprend celui de la vulnérabilité et de la fiabilité en prenant pour débit objectif le seuil étudié.

3.4.2 Résultats

Les seuils utilisés seront ceux d'alerte et d'alerte renforcée aux stations d'Arcis, Châlons, Méry et Courlon, ces stations étant celles directement à l'aval des lacs. Le seuil d'alerte correspond à une réduction d'au moins 30% des prélèvements en eaux de surface et souterraines, hors AEP, réduction augmentée à 50 % pour le seuil d'alerte renforcée [12].

3.4.2.1 Seuil d'alerte

Le premier seuil est l'alerte. Pour le lac Aube, le pourcentage de jours au débit inférieur à ce seuil est très bas en temps présent, contrairement au temps observé simulé. Il y a donc une grande différence en les étiages en TO et en TP. En temps futur, ce pourcentage augmente tout en restant pour presque chaque simulation inférieur à celui en TO.

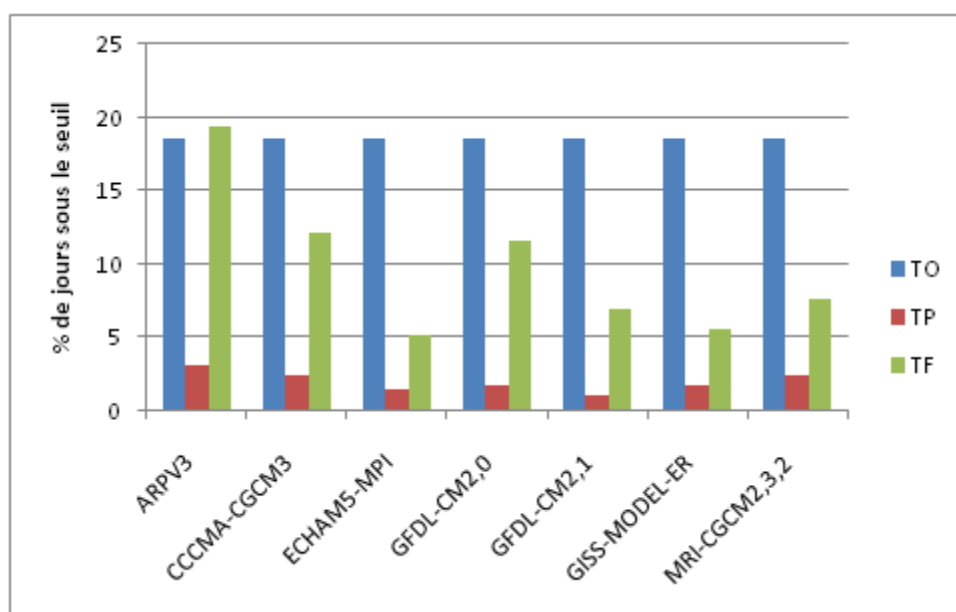


Figure 31 : Pourcentage de dépassement du seuil d'alerte pour le lac Aube

Comme pour le lac Aube, le lac Seine sur la figure 33 a en proportion moins de jours en dépassement du seuil d'alerte en temps présent qu'en temps observé simulé. De plus, le pourcentage en temps futur augmente tout en restant plus bas que celui en TO pour toutes les simulations sauf deux.

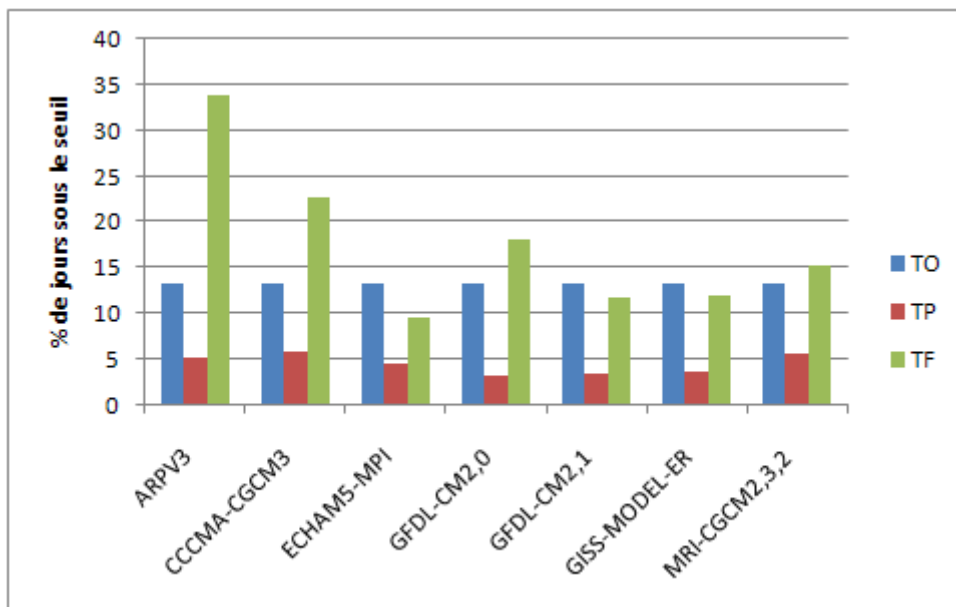


Figure 32 : Pourcentage de dépassement du seuil d'alerte pour le lac Seine

La proportion de jours dépassant le seuil d'alerte sur le lac Pannecière est très importante en TO, bien plus qu'en TP qui est systématiquement inférieure à 1%. On observe toutefois une augmentation de ce pourcentage en TF.

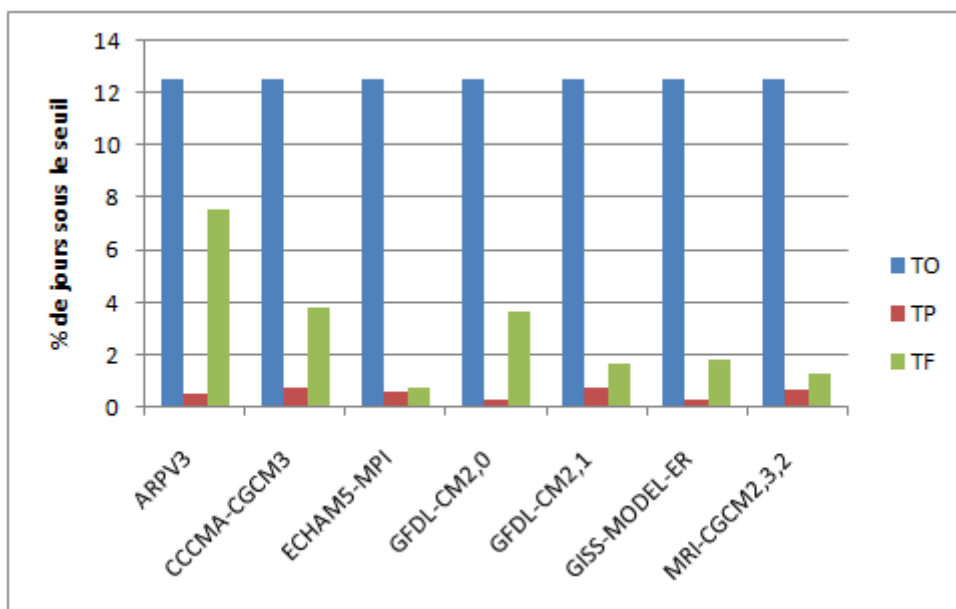


Figure 33 : Pourcentage de dépassement du seuil d'alerte pour le lac Pannecière

Contrairement aux autres lacs, le pourcentage de jours au débit inférieur au seuil semble surestimé en TP par rapport au TO, passant de 2.5 à 12 en moyenne. Mais comme pour les autres lacs, il y a plus de jours en proportion sous le seuil en TF qu'en TP.

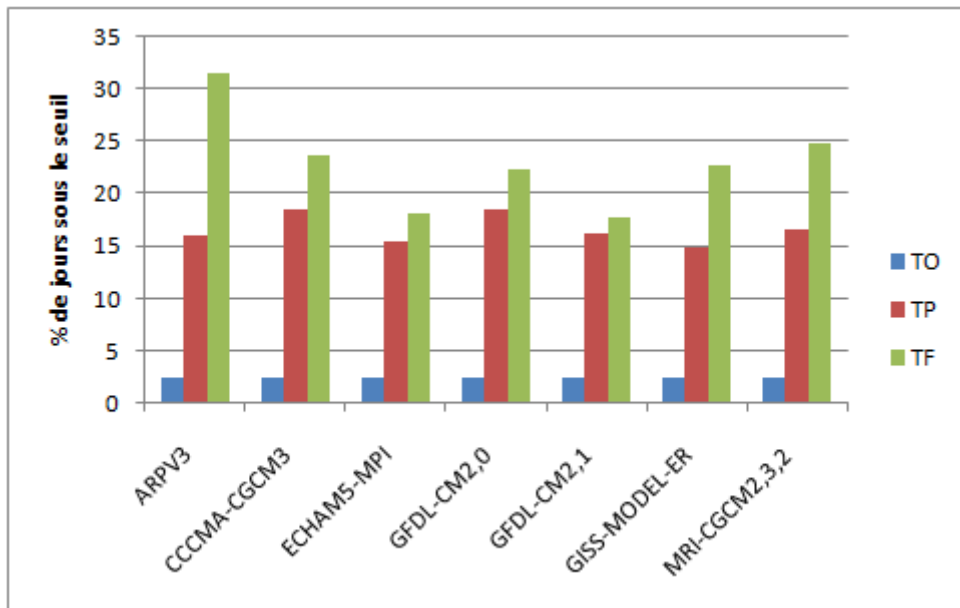


Figure 34 : Pourcentage de dépassement du seuil d'alerte pour le lac Marne

3.4.2.2 Seuil d'alerte renforcée

En alerte renforcée, la forme des graphiques est globalement la même que celle de l'alerte, avec malgré tout quelques petites différences, comme pour le lac Seine où la proportion de dépassement en TF est plus importante que pour l'alerte.

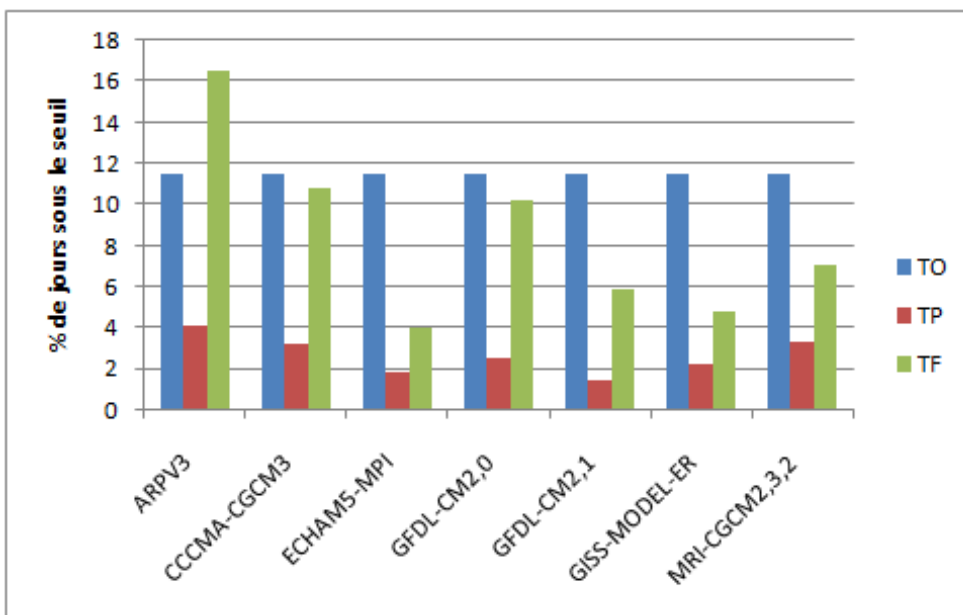


Figure 35 : Pourcentage de dépassement du seuil d'alerte renforcée pour le lac Aube

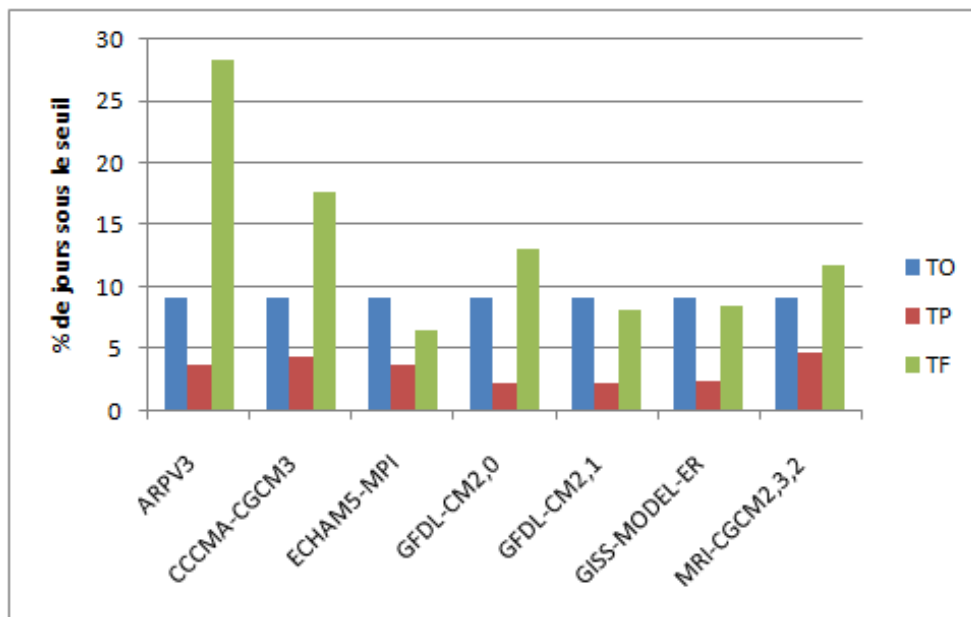


Figure 36 : Pourcentage de dépassement du seuil d'alerte renforcée pour le lac Seine

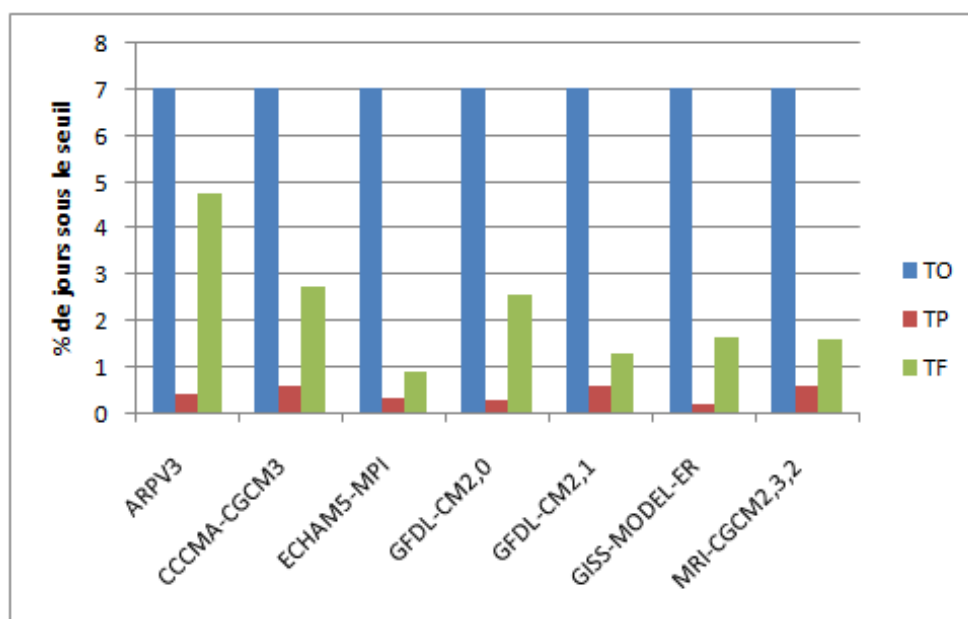


Figure 37 : Pourcentage de dépassement du seuil d'alerte renforcée pour le lac Pannecière

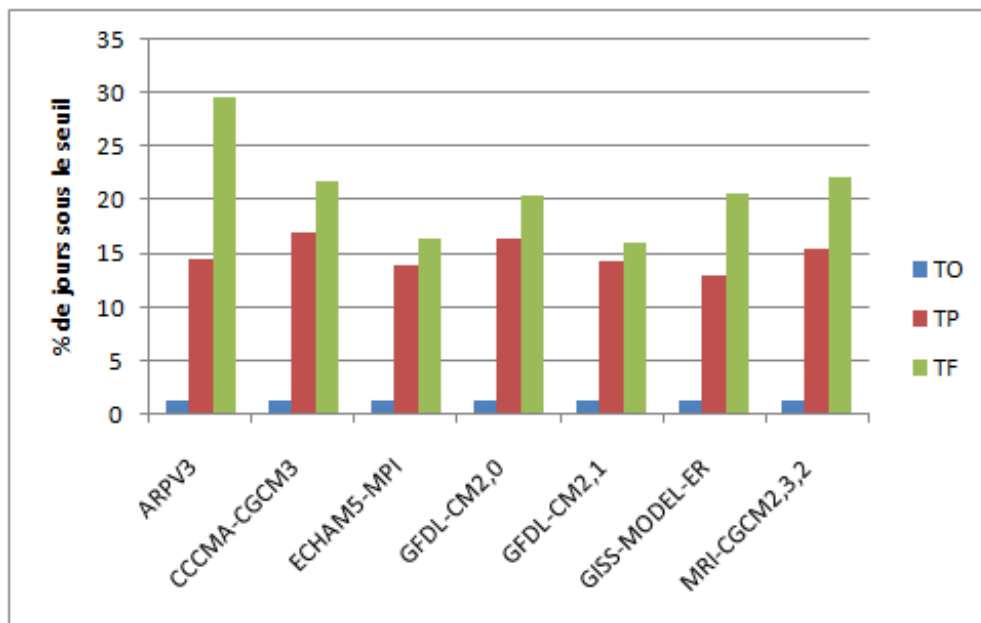


Figure 38 : Pourcentage de dépassement du seuil d'alerte renforcée pour le lac Marne

A partir des graphiques précédents ainsi que de celui ci-dessous résumant les dépassements en seuils d'alerte et alerte renforcée, on peut voir que la proportion de jours sous ces seuils est plus important en TF qu'en TP. Cependant, il y a des différences entre les lacs pour la TO et la TP. En effet, pour les lacs Aube, Seine et Pannecière, ce pourcentage est supérieur en TO par rapport à la TP, mais ce n'est pas le cas du lac Marne.

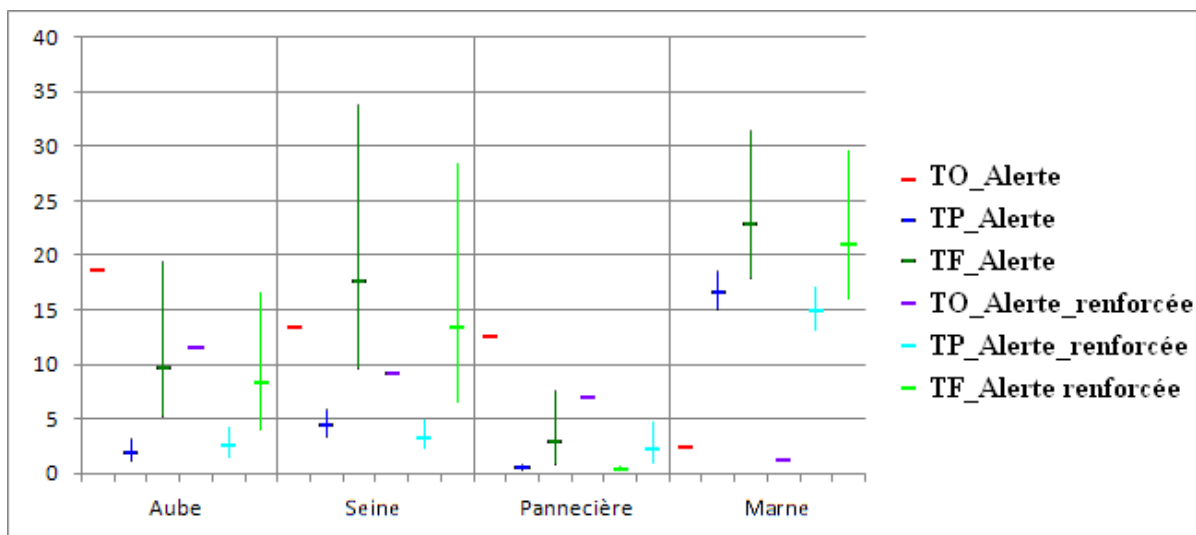


Figure 39 : Résumé des dépassements des seuils d'alerte et d'alerte renforcée

3.5 Taux de remplissage du lac

Pour les étiages, un second critère est le taux de remplissage du lac.

3.5.1 Présentation

Il s'agit de regarder l'état du volume d'eau dans les lacs, afin de voir notamment si la demande pour un usage touristique est respectée.

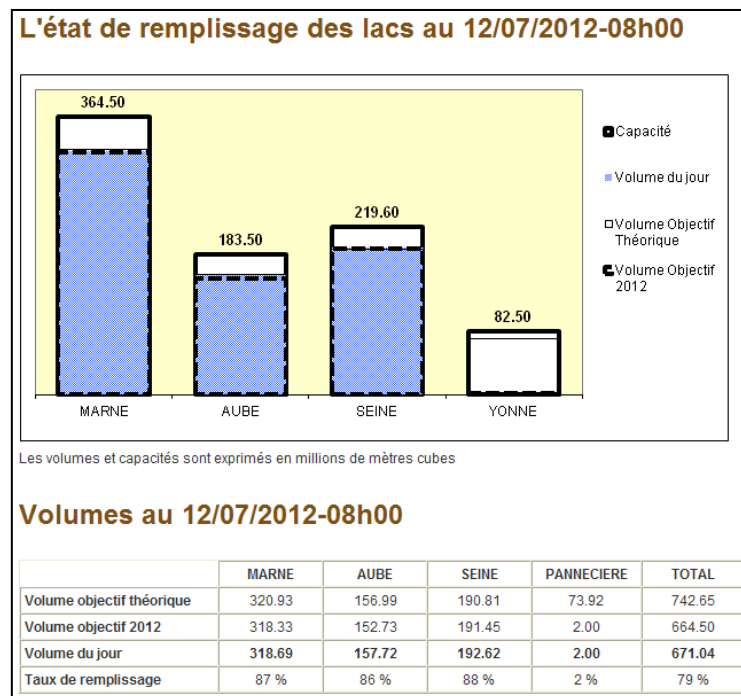


Figure 40 : Exemple de remplissage des lacs au 12/07/2012 (source : site de Seine Grands Lacs [4])

Ce taux de remplissage est calculé à partir du volume objectif théorique et du volume réel présent dans le lac, ici le volume simulé. $\tau(t)$ est le taux de remplissage au jour t , $V_{lac}(t)$ le volume simulé dans le lac et $V_{obj}(t)$ le volume objectif (déterminé grâce à la courbe de gestion).

$$\tau(t) = \frac{V_{lac}(t)}{V_{obj}(t)} * 100$$

Le minimum de ce taux de remplissage advient lorsqu'il y a un manque d'eau important en fin de phase de remplissage et en début de celle de vidange. En effet, il y a alors le risque de ne pas pouvoir soutenir l'étiage.

En revanche le maximum de ce taux de remplissage advient lorsqu'en début de phase de remplissage, une crue passe et remplit complètement le lac. Il y a alors risque de ne pouvoir écriéter la crue suivante.

Comme ce taux est plus difficile à interpréter pour les crues, seul celui des étiages sera considéré ici. De plus, c'est celui qui est le plus intéressant, permettant d'anticiper un étiage difficile à soutenir.

3.5.2 Résultats

On observe sur le graphique suivant que le taux de remplissage minimum du lac Aube est généralement plus important en temps présent et en temps futur (mis à part pour une simulation) qu'en temps observé.

Pour les cinq premières simulations, ce taux en temps futur est inférieur à celui en temps présent. Il n'y a que pour les deux dernières simulations où la situation s'améliore par rapport au temps présent.

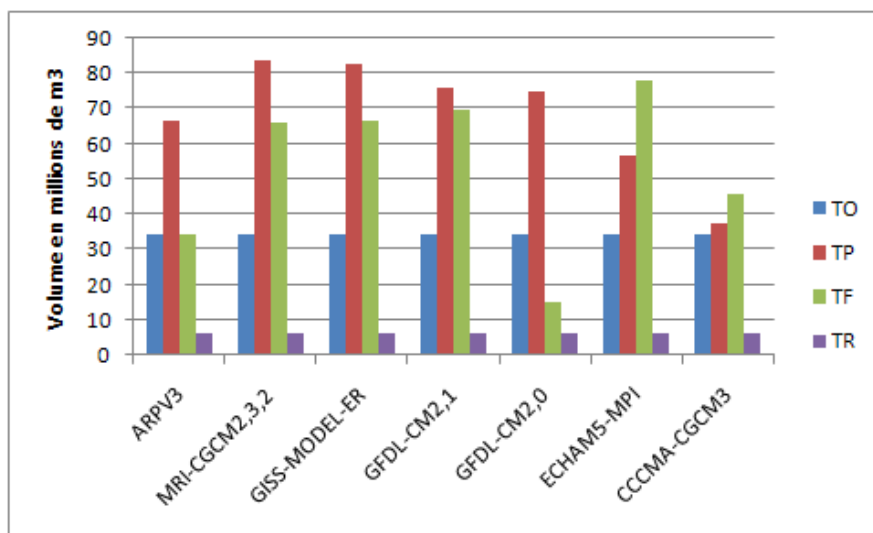


Figure 41 : Taux de remplissage minimaux du lac Aube en temps observé simulé, temps présent et temps futur

Le lac Seine, sur la figure ci-dessous, n'offre pas de résultats clairs. Cependant, en moyenne, le taux de remplissage en temps présent est supérieur à celui en temps futur, lui-même supérieur à celui en temps observé, comme le montre la figure 29.

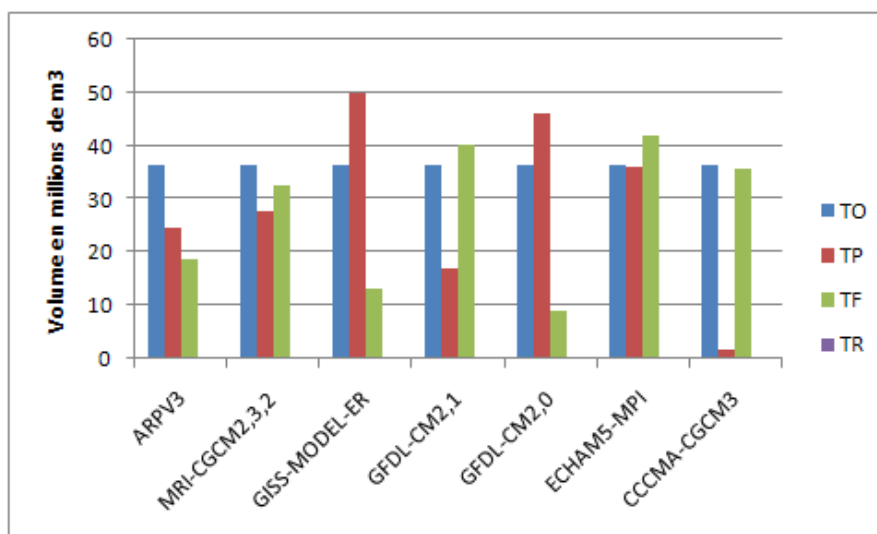


Figure 42 : Taux de remplissage minimaux du lac Seine en temps observé simulé, temps présent et temps futur

Sur le graphique ci-dessous du lac Pannecièrre, on observe que le taux de remplissage minimum en temps présent est inférieur à celui en temps observé pour 5 des simulations. Il est difficile de déduire quoique ce soit en temps futur.

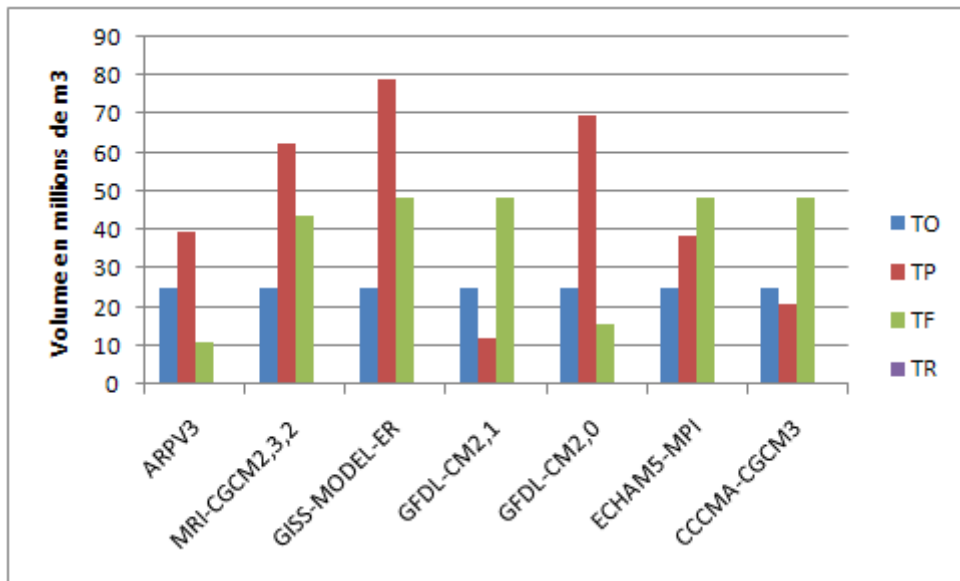


Figure 43 : Taux de remplissage minimaux du lac Pannecièrre en temps observé simulé, temps présent et temps futur

Pour le lac Marne, sur le graphique suivant, seule une simulation a un taux de remplissage minimum inférieur en temps présent à celui en temps observé. En temps futur, la majorité des taux de remplissage minimum sont inférieurs à ceux en temps présent.

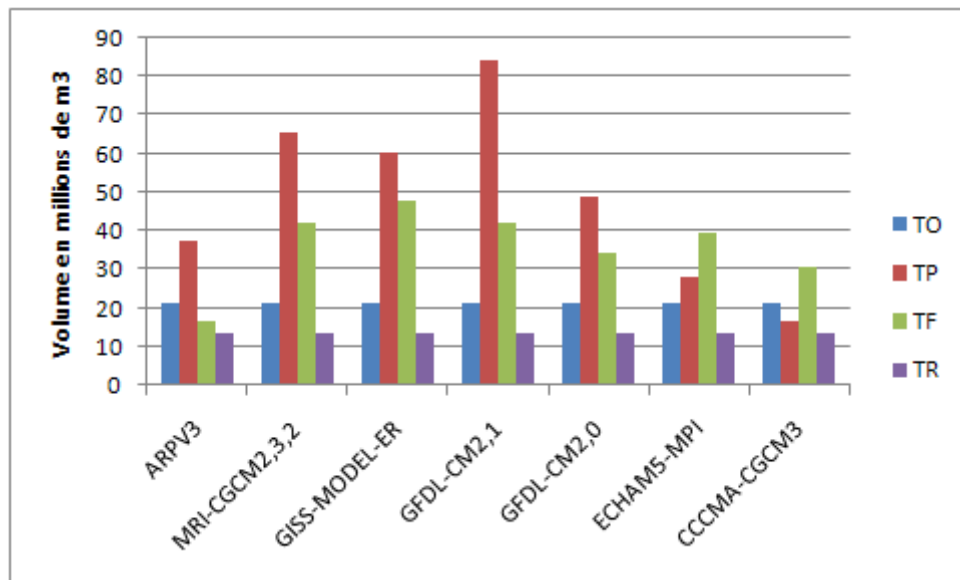


Figure 44 : Taux de remplissage minimaux du lac Marne en temps observé simulé, temps présent et temps futur

En général, comme le montre le graphique ci-dessous, le taux de remplissage minimum moyen en temps présent est supérieur à celui du temps futur et à celui du temps observé, sauf pour

Pannecièrre. Il semble que les étiages seront soutenus plus difficilement en temps futur qu'en temps présent. Mais il y a moins de manque de volume qu'en temps observé.

Les taux de remplissage minimum en temps observé réel sont très bas, surtout pour les lacs Pannecièrre et Seine où ils sont inférieurs à 1.

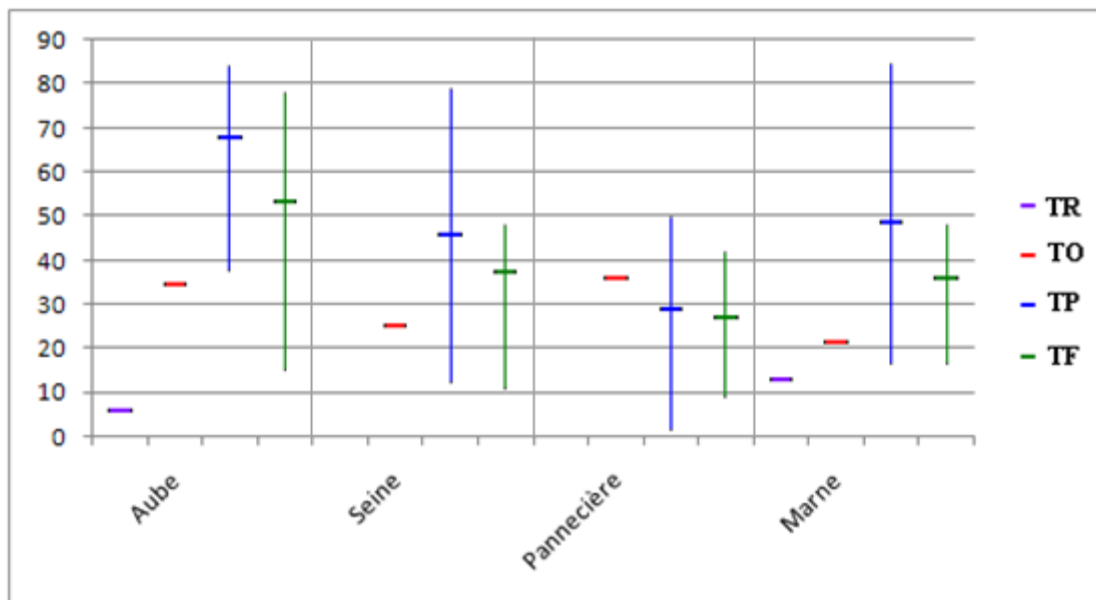


Figure 45 : Taux de remplissage minimum pour les quatre lacs

Conclusion

Afin de répondre aux attentes du projet Climaware et notamment sa partie française sur l'évolution de la gestion des lacs réservoirs de la Seine, il a donc fallu modifier le modèle TGR, préalablement développé par David Dorchies, afin d'y inclure les quatre lacs.

Pour ce faire, trois fonctions définissant des règles strictes de gestion ont été écrites en langage Scilab, puis 15 simulations ont été effectuées avec ce modèle modifié. La première a été faite en temps observé, et les autres avec les forçages climatiques du GIEC, 7 en temps présent et 7 en temps futur.

Comme semblaient l'indiquer les chroniques de pluie et d'ETP du GIEC, le futur apparaît plus sec que le présent. Les crues sont mieux absorbées, mais les étiages sont plus sévères. En outre, le nombre de dépassements du débit de référence diminuent sur les rivières Aube et Marne. Et si leurs causes restent inchangées pour la Marne, elles évoluent pour les autres lacs.

Des incertitudes sur le modèle demeurent, comme pour la surestimation du débit à prélever au niveau de la prise Blaise, bien que les effets des lacs soient bien représentés. Plusieurs pistes seraient à envisager pour améliorer encore la précision du modèle.

Une refonte complète du modèle serait à envisager, passant d'un calcul station par station à un calcul pas de temps par pas de temps. En effet, pour le moment, le calcul se fait sur toute la période pour une station avant de passer à la station suivante. Cependant, cela rend impossible les effets de l'aval vers l'amont, tel le calcul du volume du lac à la prise avec le débit de restitution.

Aussi faudrait-il organiser un calcul sur les 33 stations et connexions à un pas de temps avant de passer au pas suivant. Cependant, afin que la durée de calcul ne soit pas trop longue, il faudrait le coder en langage C. Cela permettrait non seulement de résoudre les incertitudes liées aux volumes de lac théoriques calculés aux connexions de prises, mais aussi de réduire les problèmes de surestimation de débit prélevé au niveau de la prise Blaise observés dans le modèle.

Une autre piste, en plus de calculer les prélèvements des lacs, serait la prise en compte des consommations d'eau (AEP, irrigation...). Dans ce cas, il faudrait tout d'abord récupérer des données ou évaluer les consommations d'eau actuelles, les intégrer dans le modèle de la même façon que les prises des barrages ont été intégrées, puis caler le modèle complet, comprenant les prélèvements et les barrages, avec les débits réels mesurés (et non naturalisés). Après évaluation des évolutions futures des consommations d'eau, il serait alors possible d'avoir une vision complète du lieu d'étude, prenant en compte les principaux prélèvements.

Mais le modèle lui-même n'est pas la seule partie du projet pouvant être amélioré. Les modèles climatiques du GIEC présentent des incertitudes et des biais temps observé/temps présent et temps présent/temps futur. Les membres de l'équipe de l'Irstea à Antony sont actuellement en train de réfléchir à compenser ce biais. Une solution pourrait être de trouver la loi de transformation entre la

distribution des résultats de calcul des volumes de pluies ou de débits en temps observés et de ceux simulés en temps présent, et d'appliquer ensuite cette transformation à ceux simulés en temps futur.

Une fois que les améliorations sur le modèle et les données de climat en temps présent et futur auront été effectuées, les règles de gestion des lacs pourront être optimisées à l'aide des simulations en temps présent et en temps futur. Pour cela, il faudrait des chroniques de pluies et d'ETP plus longues, afin de prendre en compte les événements à grande période de retour, comme une crue centennale. De plus, est prévu un système de commande prédictive permettant de prévoir l'évolution du système sur un horizon de temps et le calcul d'une trajectoire optimale de cette commande pour maintenir une consigne sur cet horizon.

Bibliographie

➤ Sites internet

[2] www.developpement-durable.gouv.fr

[3] www.uni-kassel.de/fb14/wasserbau/CLIMAWARE/home/home.html

[4] www.seinegrandslacs.fr

[8] www.ipcc.ch

➤ Rapports

Munier S., Litrico X., Perrin C., Lacaze Y. (Juin 2010). **Recalage temps réel du modèle de prévision sur les mesures de débit aux stations du bassin**. Rapport final du Schapi.

Bader J.C. (2011). **Projet Climaware concernant les réservoirs Seine, Détermination des objectifs de remplissage des réservoirs**. Contribution prévue de l'IRD.

➤ Thèses

[1] Munier S. (2009). **Modélisation intégrée des écoulements pour la gestion en temps réel d'un bassin versant anthropisé**. Thèse de Doctorat, AgroParisTech (Paris), Cemagref (Montpellier).

➤ Livres

Schleiss A. J., Pougatsch H. (2010). **Les Lacs, Du projet à la mise en service. Traité de Génie Civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne**, Volume 17. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

➤ Articles scientifiques

Perrin, C. (2002). **Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative**. La Houille Blanche, n°6/7 : 84-91,

Perrin, C., Michel, C. and Andréassian V. (2003). **Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation**. Journal of Hydrology, 279 : 275-289,.

[5] Nelder, J.A., Mead, R., (1965). **A simplex method for function minimization**. The computer journal 7, 308–313.

[7] Vidal, J.P., Martin, E., Franchisteguy, L., Baillon, M. and Soubeyroux, J.M. (2010). **A 50-year highresolution atmospheric reanalysis over France with the SAFRAN system**. International Journal of Climatology: DOI: 10.1002/ioc2003, in press.

[10] Kjeldsen, T.R. & Rosbjerg, D. (2004). **Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems/Choix d'estimateurs de fiabilité, de**

résilience et de vulnérabilité pour les analyses de risque de systèmes de ressources en eau. Hydrological sciences journal, 49(5).

[11] Hashimoto, T., Stedinger, J.R., Loucks, D.P. (1982). **Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation.** Water resources research 18, 14–20.

➤ **Autres documents**

Munier S (2011). **Documentation pour l'utilisation du modèle TGR programmé sous Scilab.**

Annexe 3 : Carte de situation des lacs-réservoirs. DREAL Champagne-Ardennes/ I.I.B.R.B.S.. – **Convention d'échanges d'informations relatives au risque d'inondation**

[6] Hydratec (July 2011). **Actualisation de la base de données des débits journaliers naturalisés.** Les Grands Lacs de Seine

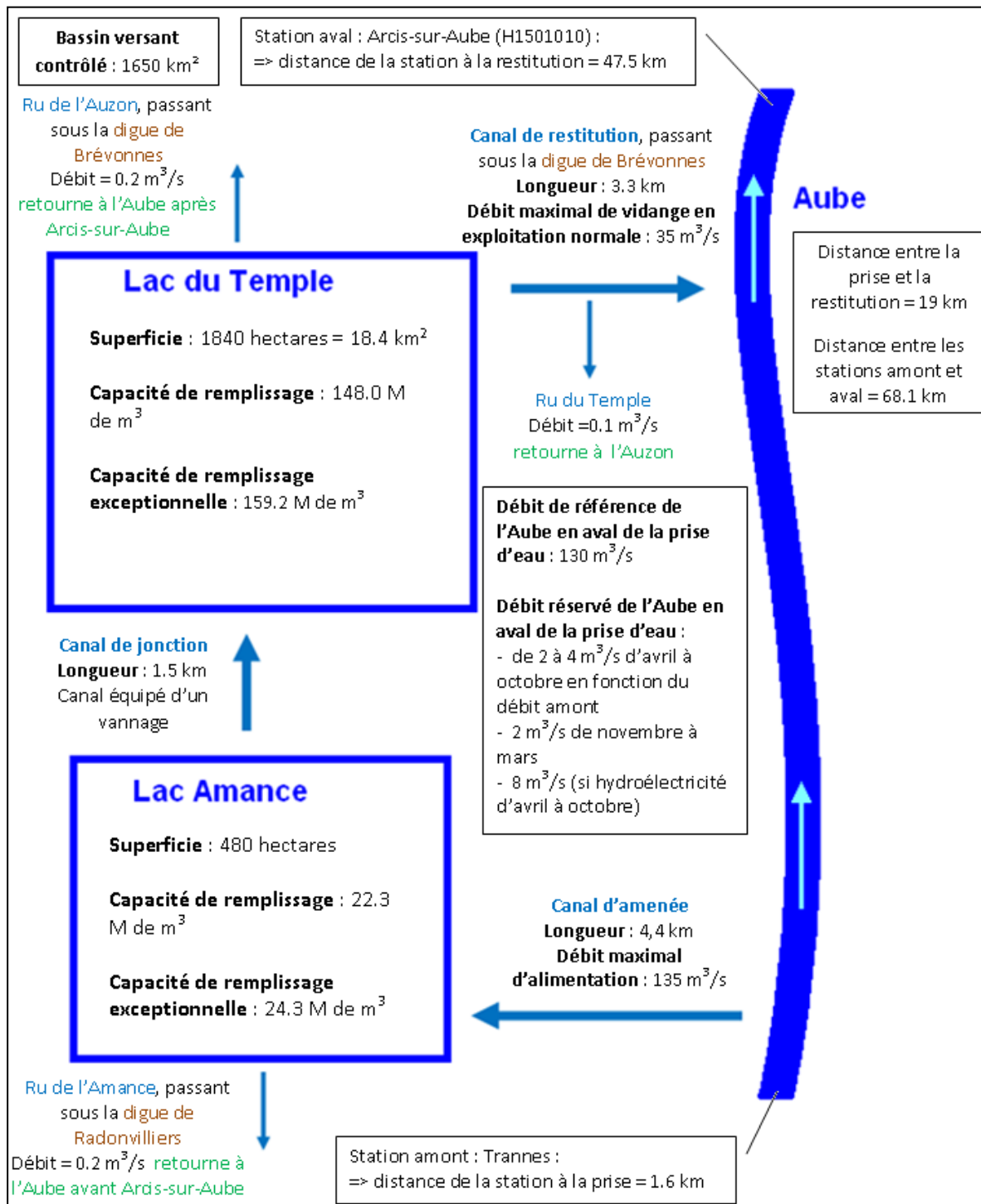
[9] Pagé, C., Terray L. et Boé J. (2008). **Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08.** Climate Modelling and Global, CERFACS Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique. 23pp.

[12] **Arrêté cadre sécheresse N° 2012 094-0001**

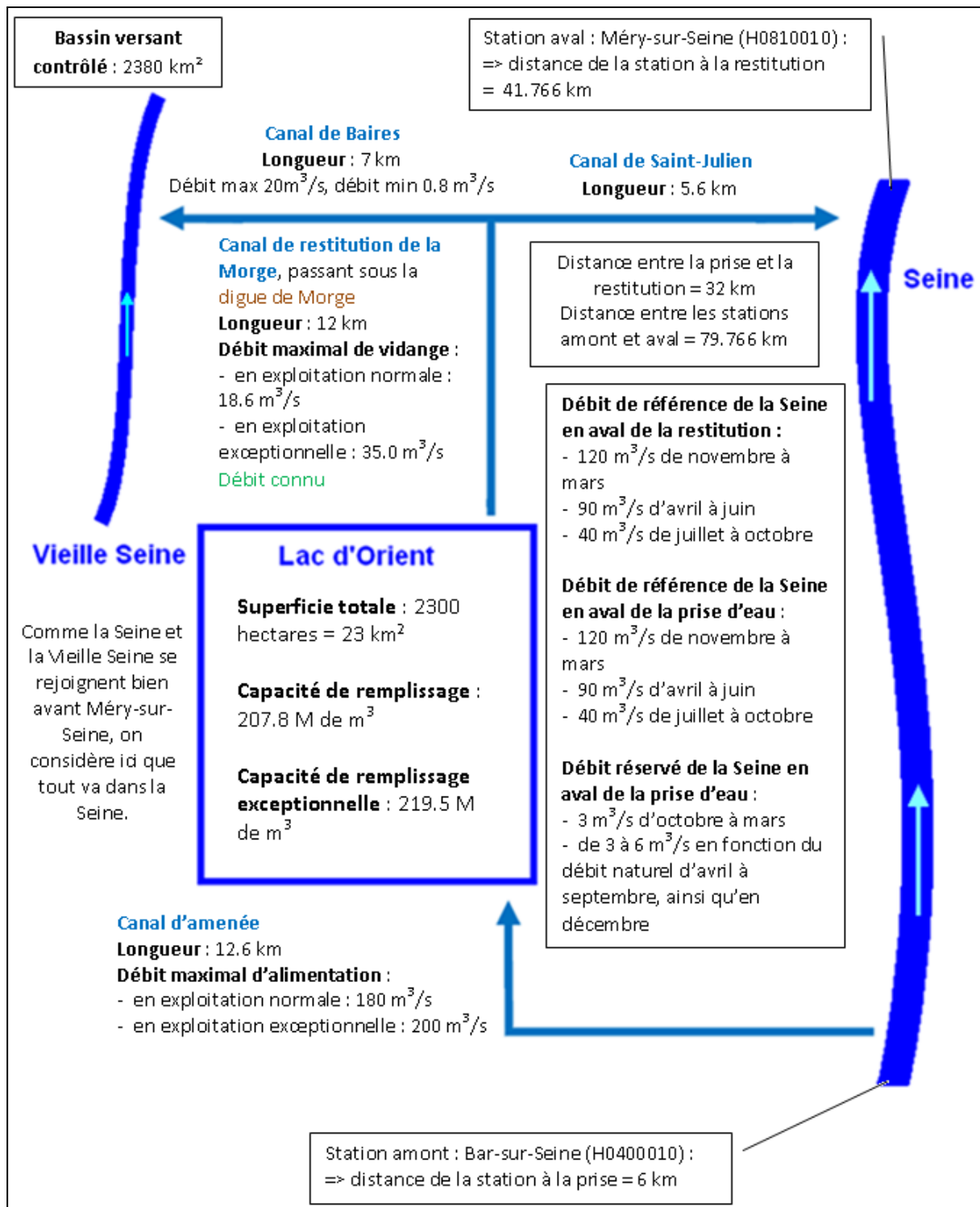
Annexes

1. Synoptiques des lacs

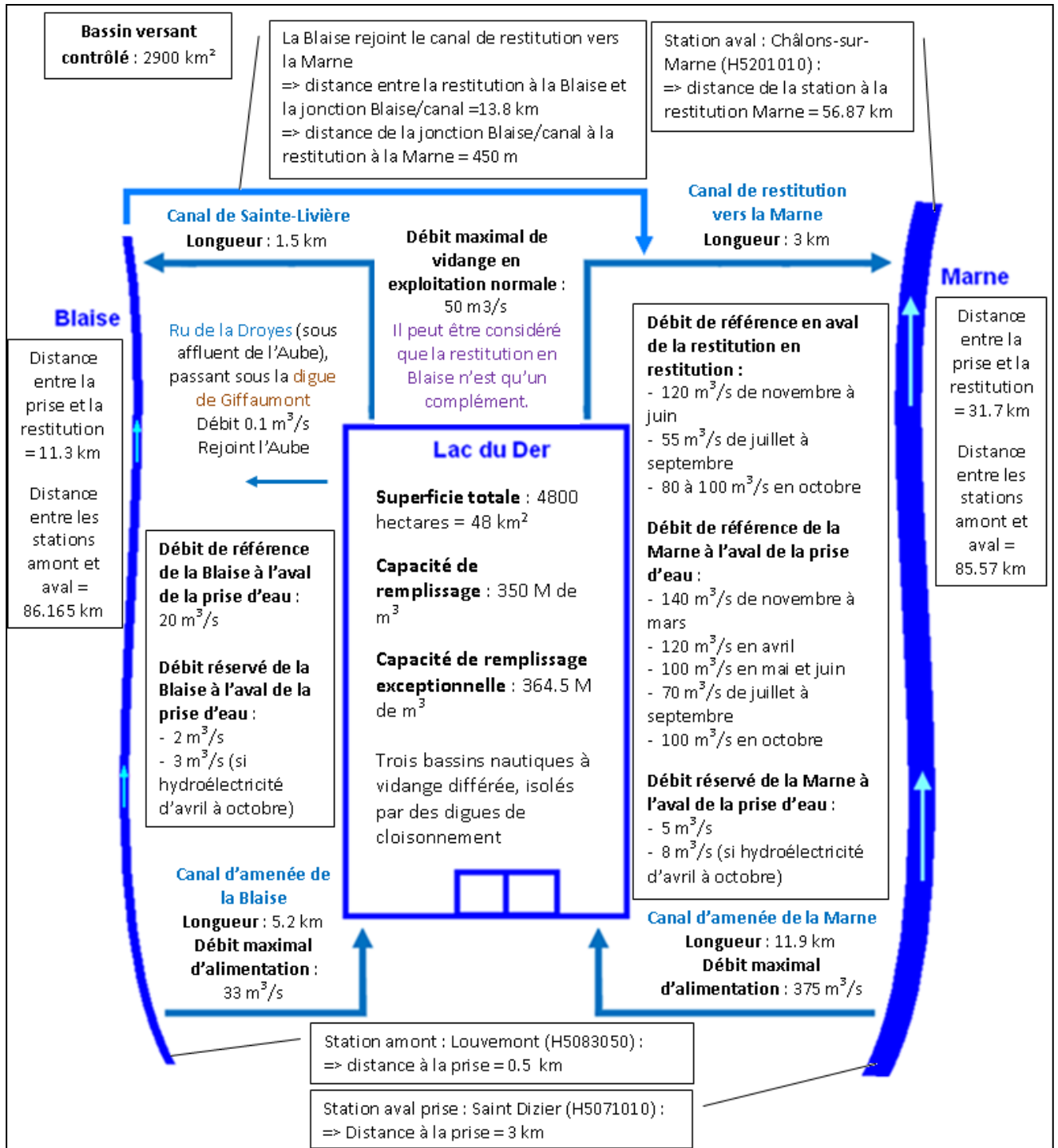
➤ Aube



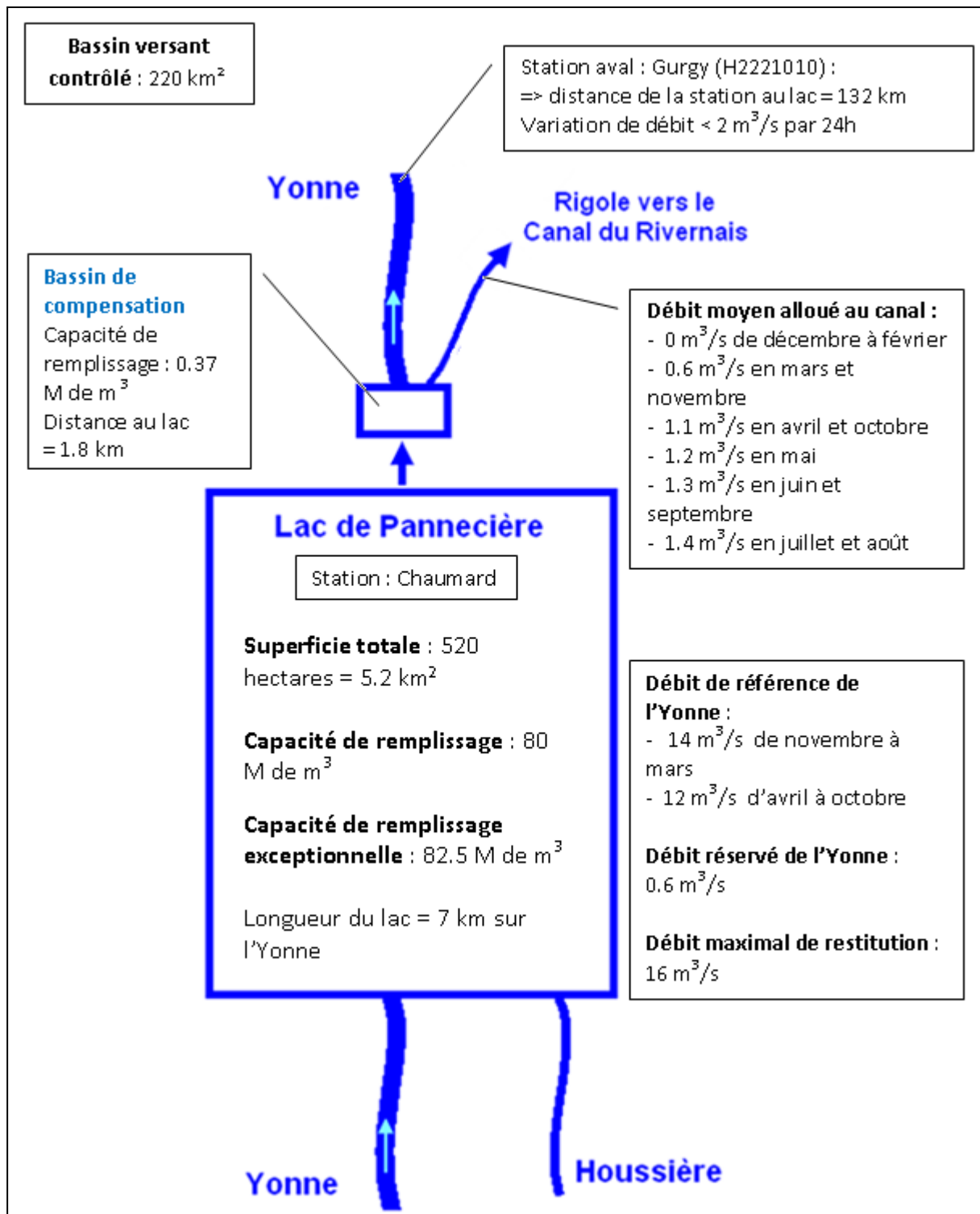
➤ Seine



➤ Marne



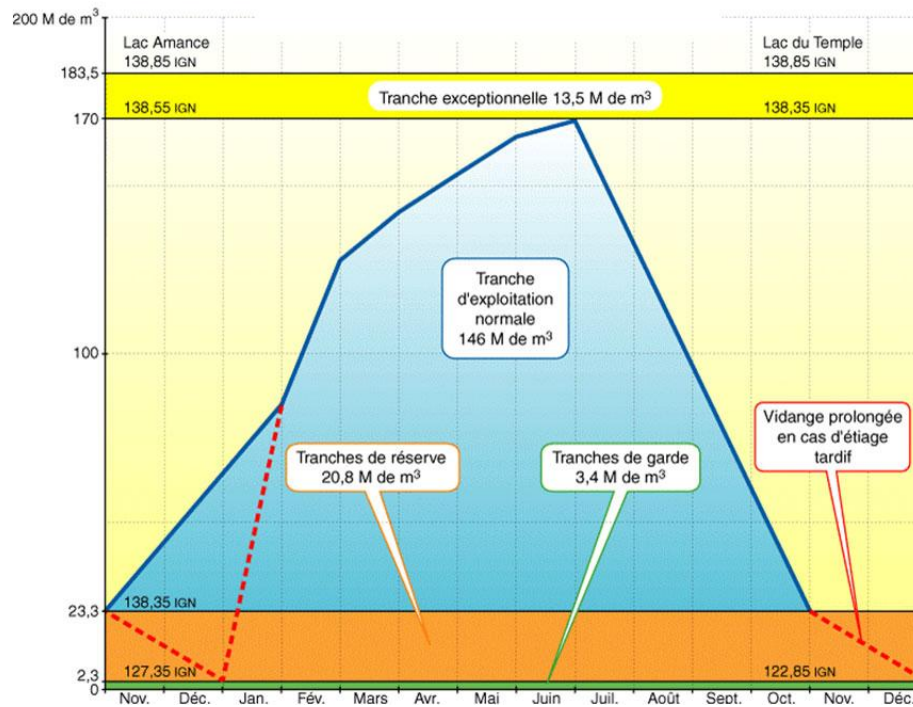
➤ Pannecièrre



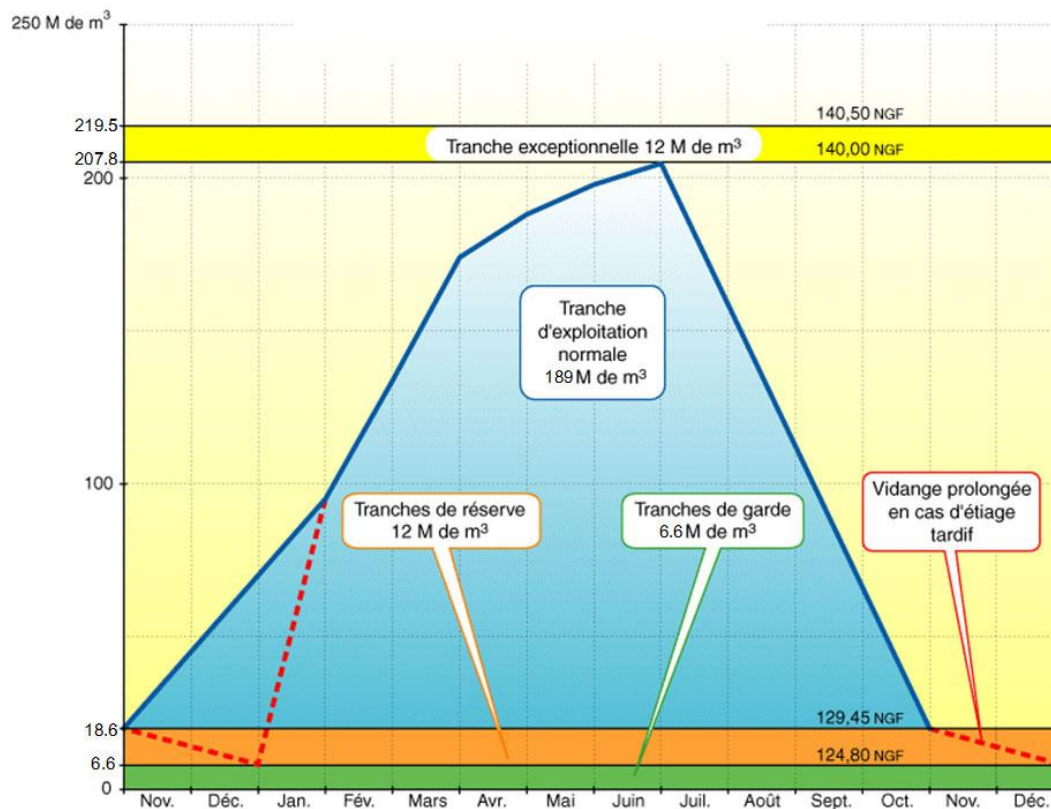
2. Courbe de gestion des lacs

Ces courbes représentent les volumes théoriques des lacs au cours de l'année, en millions de m³.

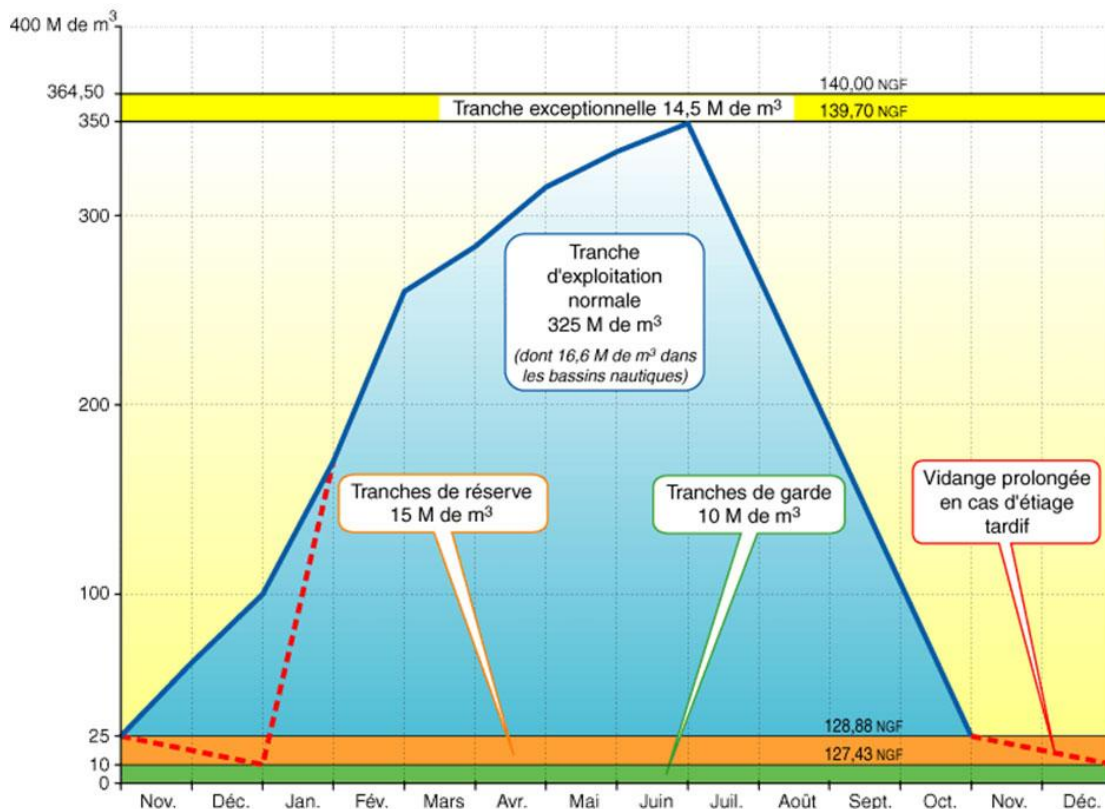
➤ Aube [4]



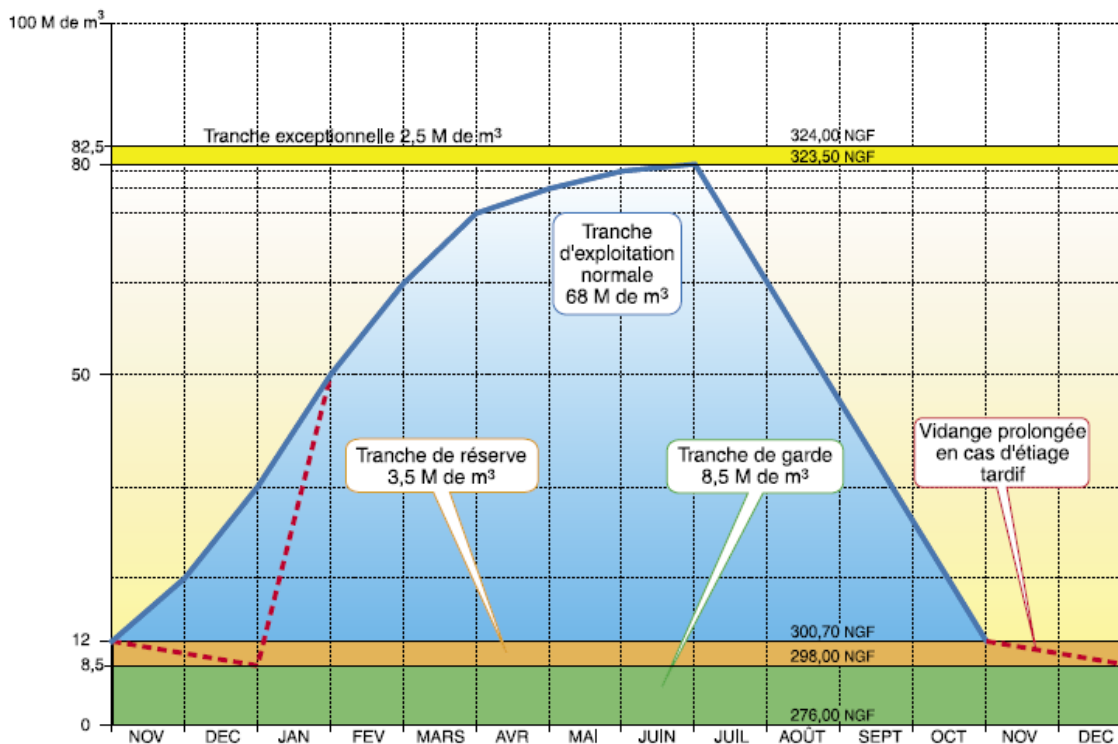
➤ Seine [4]



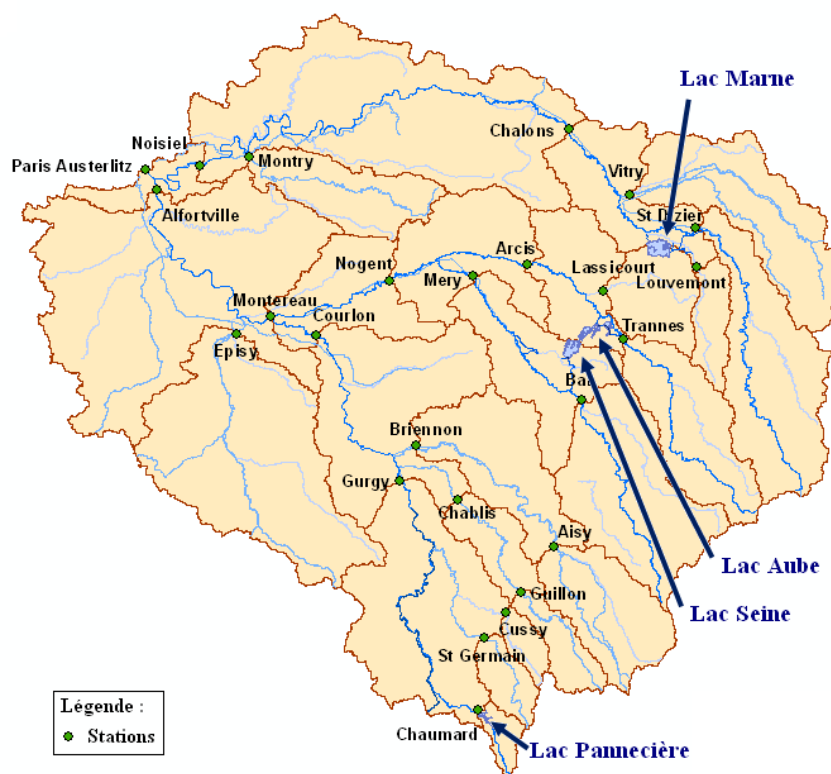
➤ **Marne [4]**



➤ **Pannecière [4]**



3. Carte des stations et des BVI, et liste des stations







➤ Liste des stations :

| Code_station | Code_HYDRO | Aire (km ²) | Location |
|--------------|------------|-------------------------|------------------------------------|
| TRANN_01 | N/A | 1557 | L'Aube à Trannes |
| GURGY_02 | H2221010 | 3819 | L'Yonne à Gurgy |
| BRIEN_03 | H2482010 | 2979 | L'Armançon à Briennon-sur-Armançon |
| STDIZ_04 | H5071010 | 2347 | La Marne à Saint-Dizier |
| PARIS_05 | H5920010 | 43824 | La Seine à Paris |
| BAR-S_06 | H0400010 | 2340 | La Seine à Bar-sur-Seine |
| CHAUM_07 | N/A | 216 | L'Yonne à Chaumard |
| CUSSY_08 | H2172310 | 247 | Le Cousin à Cussy-les-Forges |
| STGER_09 | N/A | 402 | La Cure à St-Germain |
| GUILL_10 | H2322020 | 488 | Le Serein à Guillon |
| AISY-_11 | H2452020 | 1349 | L'Armançon à Aisy-sur-Armançon |
| CHABL_12 | H2342010 | 1116 | Le Serein à Chablis |
| NOGEN_13 | N/A | 9182 | La Seine à Nogent-sur-Seine |
| EPISY_14 | H3621010 | 3916 | Le Loing à Épisy |
| MONTE_15 | N/A | 21199 | La Seine à Montereau |
| ALFOR_16 | H4340020 | 30784 | La Seine à Alfortville |
| NOISI_17 | H5841010 | 12547 | La Marne à Noisiel |
| MONTR_18 | H5752020 | 1184 | Le Grand Morin à Montry |
| LOUVE_19 | H5083050 | 461 | La Blaise à Louvemont |
| LASSI_20 | H1362010 | 876 | La Voire à Lassieourt |
| HALO_21 | H5201010 | 6291 | La Marne à Châlons-sur-Marne |
| MERY-_22 | H0810010 | 3899 | La Seine à Méry-sur-Seine |
| COURL_23 | H2721010 | 10687 | L'Yonne à Courlon-sur-Yonne |
| ARCIS_24 | H1501010 | 3594 | L'Aube à Arcis-sur-Aube |
| VITRY_25 | H5172010 | 2109 | La Saulx à Vitry-en-Perthois |

4. Annexe : Les connexions des lacs

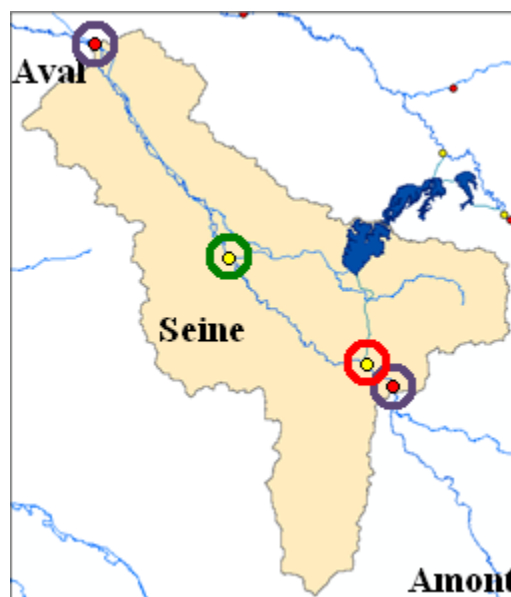
Légende :

-  Station des débits naturalisés et connexion
-  Station des débits naturalisés
-  Connexion de prise
-  Connexion de restitution

Lac Pannecière :



Lac Seine :



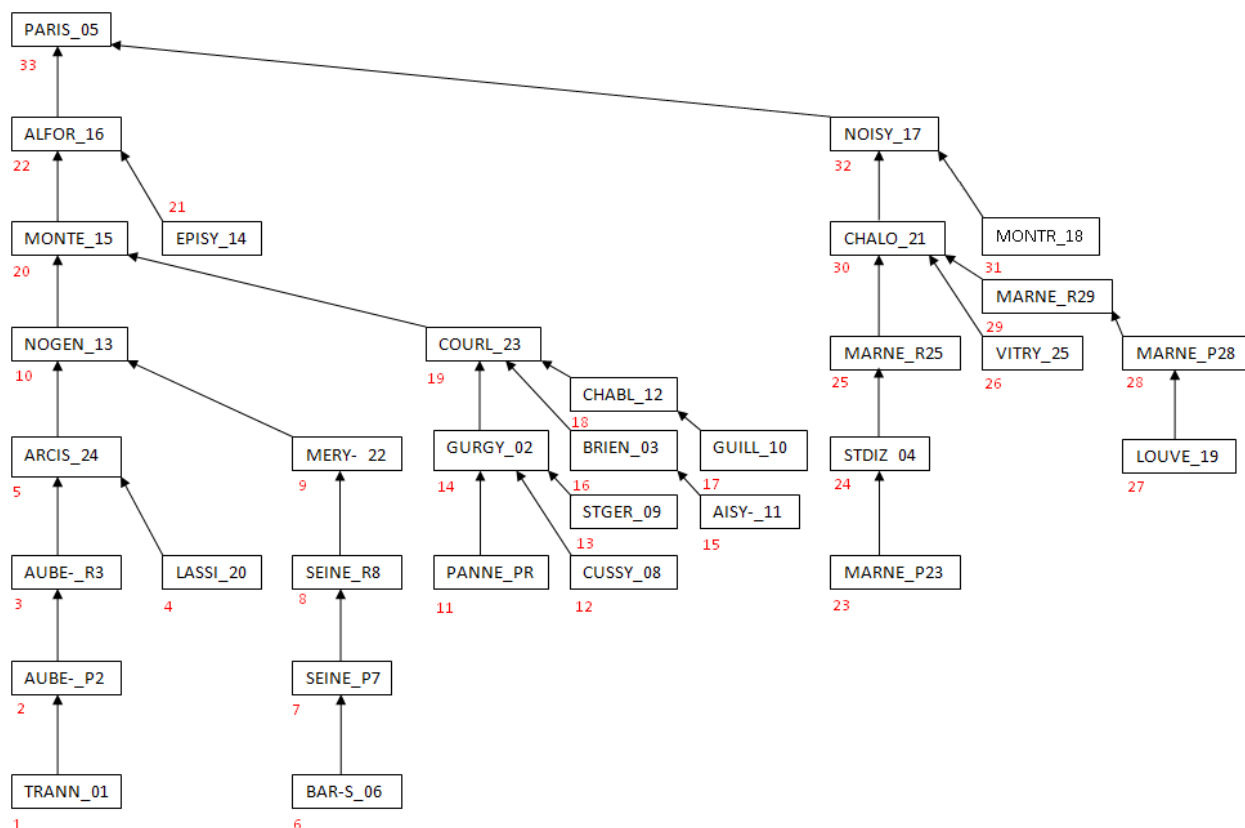
Lac Marne :



Lac Aube :



5. Annexe : Schéma de l'ordre de simulation des stations et des connexions



➤ Liste des stations et connexions

| Station et connexion | Numéro de la station | Station et connexion | Numéro de la station | Station et connexion | Numéro de la station |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| TRANN_01 | 1 | CUSSY_08 | 12 | MARNE_P23 | 23 |
| AUBE_P2 | 2 | STGER_09 | 13 | STDIZ_04 | 24 |
| AUBE_R3 | 3 | GURGY_02 | 14 | MARNE_R25 | 25 |
| LASSI_20 | 4 | AISY_11 | 15 | VITRY_25 | 26 |
| ARCIS_24 | 5 | BRIEN_03 | 16 | LOUVE_19 | 27 |
| BAR-S_06 | 6 | GUILL_10 | 17 | MARNE_P28 | 28 |
| SEINE_P7 | 7 | CHABL_12 | 18 | MARNE_R29 | 29 |
| SEINE_R8 | 8 | COURL_23 | 19 | CHALO_21 | 30 |
| MERY_-22 | 9 | MONTE_15 | 20 | MONTR_18 | 31 |
| NOGEN_13 | 10 | EPISY_14 | 21 | NOISI_17 | 32 |
| PANNE_PR | 11 | ALFOR_16 | 22 | PARIS_05 | 33 |

6. Valeurs pour les lacs Aube, Marne et Seine

Ci-dessous sont présentés les valeurs de débits réservés et de référence dans les rivières, les volumes maximaux et minimaux des lacs, ainsi que les débits maximaux des canaux, utilisés dans la simulation.

➤ Valeurs des débits réservés et de référence

| Rivière (lac, connexion) | Débit réservé (m ³ /s) | Débit de référence (m ³ /s) |
|---|---|--|
| Aube (Aube, prise et restitution) | - d'avril à octobre | 130 |
| | - 2 si Qamont(t) > 8 | |
| | - 3 si 8 > Qamont(t) > 6 | |
| | - 4 si 6 > Qamont(t) > 4 | |
| Seine (Seine, prise et restitution) | - Qamont(t) si Qamont(t) < 4 | - 120 de novembre à mars - 90 d'avril à juin - 40 de juillet à octobre |
| | - 2 de novembre à mars | |
| | - 3 d'octobre à mars | |
| | - d'avril à septembre, ainsi qu'en décembre : | |
| | - 3 si Qamont(t) > 10 | |
| | - 4 si 10 > Qamont(t) > 8 | |
| Marne (Marne, prise) | - 5 | - 140 de novembre à mars |
| | - 8 (si hydroélectricité d'avril à octobre) | - 120 en avril |
| | | - 100 en mai et juin |
| | | - 70 de juillet à septembre |
| Marne (Marne, restitution) | - 5 | - 100 en octobre |
| | - 8 (si hydroélectricité d'avril à octobre) | - 120 de novembre à juin |
| | | - 55 de juillet à septembre |
| | | - 80 du 1 au 15 octobre |
| Blaise (Marne, prise et restitution) | 2 | - 100 du 16 au 31 octobre |
| | | 20 |

➤ Valeurs des volumes minimaux et maximaux des lacs

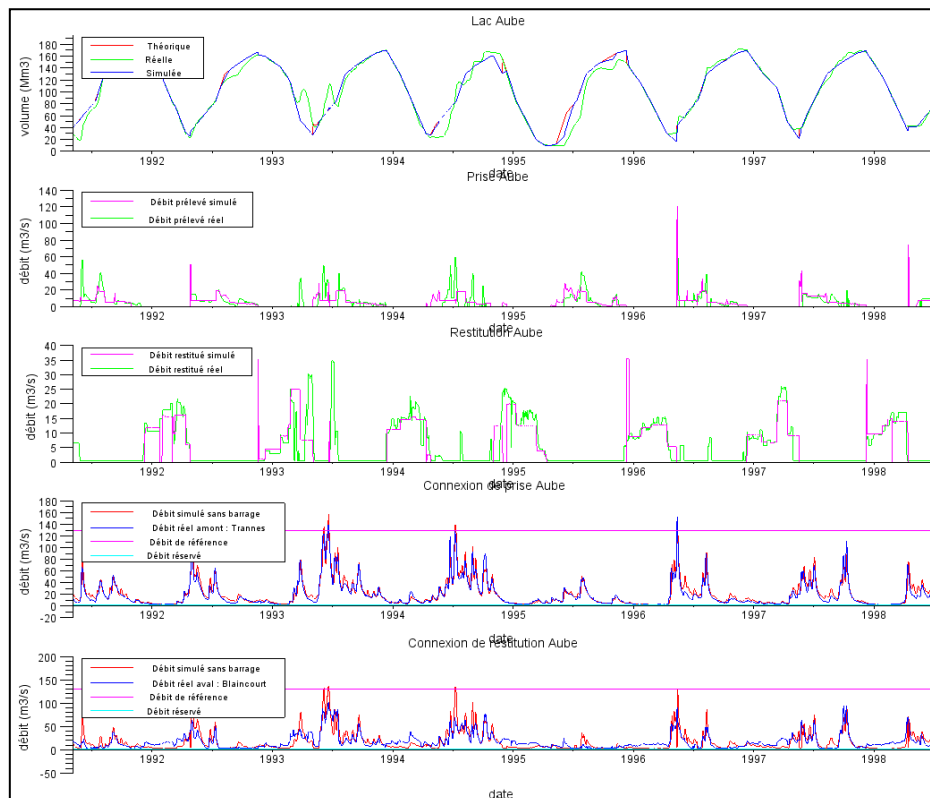
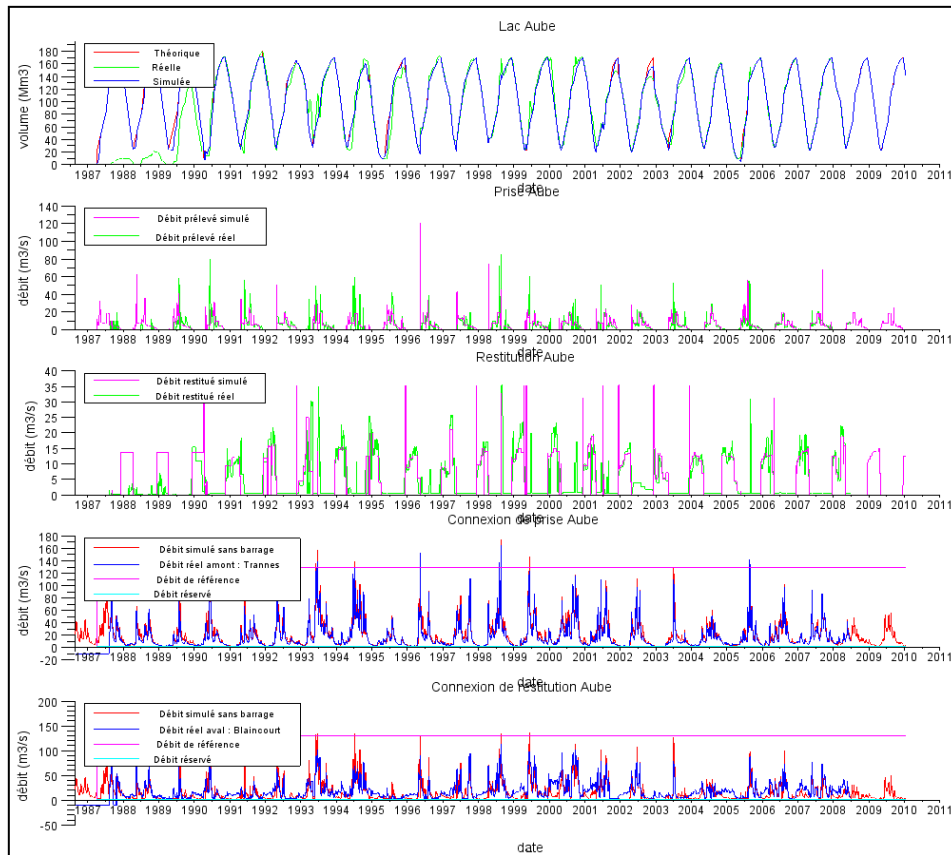
| Lac | Volume maximal (en M de m ³) | Volume minimal (en M de m ³) |
|--------------|--|--|
| Aube | 170.3 | 2.3 |
| Seine | 219.5 | 6.6 |
| Marne | 364.5 | 10 |

➤ Valeurs des débits maximaux dans les canaux d'amenée et de restitution

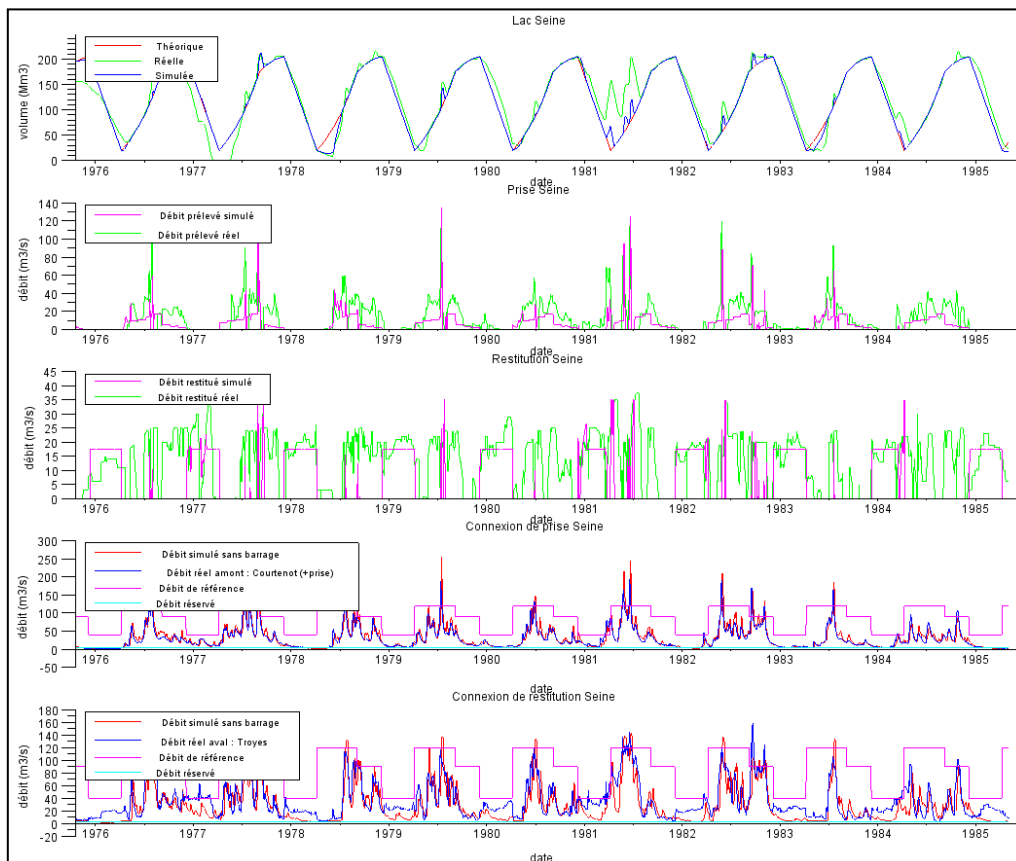
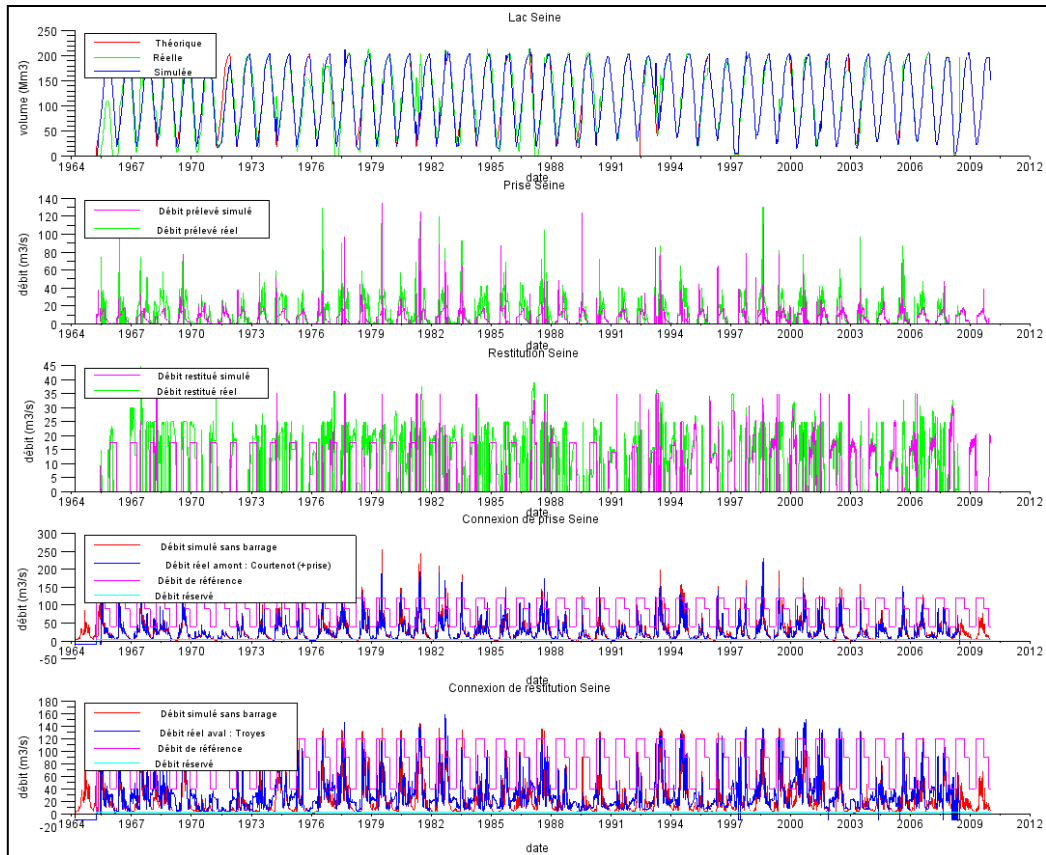
| Rivière (lac) | Débit maximal du canal d'amenée (en m ³ /s) | Débit maximal du canal de restitution (en m ³ /s) |
|-----------------------|--|--|
| Aube (Aube) | 135 | 35 |
| Seine (Seine) | 180 (en exploitation normale) | 18.6 (en exploitation normale) |
| | 200 (en exploitation exceptionnelle) | 35 (en exploitation exceptionnelle) |
| Marne (Marne) | 375 | 50 |
| Blaise (Marne) | 33 | |

7. Courbes de résultats des lacs en débits naturalisés

➤ Lac Aube



➤ Lac Seine



➤ Lac Marne

