

**Gestion intégrée des hydrosystèmes
par l'utilisation d'un système d'informations avancé :
optimisation de systèmes complexes de ressources en eau
grâce au modèle Hydronomeas,
utilisant une approche de simulation stochastique.**



Rapport du Stage Pratique d'Ingénierie

Effectué du 4 Mai au 31 Juillet 2009 à Athènes (Grèce)

Guénel ROBIDOU

PROMOTION SOMME

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon maître de stage, Dr. Demetris Koustoyiannis, qui m'a donné l'opportunité de découvrir le domaine de la gestion de la ressource en eau à travers un projet dans son intégralité.

Je remercie également Pr. Andreas Efstratiadis pour l'aide et les conseils concernant ce projet, qu'il m'a apportés lors des différentes phases de mon travail.

Enfin, j'aimerais remercier l'ensemble du personnel du laboratoire pour l'accueil qu'il m'a réservé.

Sommaire

| | |
|--|----|
| Table des annexes..... | 3 |
| Table des figures..... | 3 |
| 1. Introduction..... | 4 |
| 2. Présentation de l'organisme d'accueil..... | 4 |
| 3. Présentation du projet dans lequel s'est inscrit le stage..... | 5 |
| 3.1. Description du logiciel..... | 5 |
| 3.2. Cas d'Athenes..... | 7 |
| 4. Description du projet d'ingénierie..... | 10 |
| 4.1. Présentation de mon cas d'étude..... | 10 |
| 4.2. Phase de recherche et de traitement de données..... | 12 |
| 4.3. Représentation de l'hydrosystème sous Hydronomeas..... | 13 |
| 4.4. Simulations, optimisations et résultats..... | 14 |
| 4.4.1. Situation actuelle..... | 14 |
| 4.4.2. Réactions de l'hydrosystème à des conditions particulières..... | 16 |
| 4.5. Conclusion..... | 19 |
| 5. Analyse critique..... | 21 |
| 6. Conclusion..... | 24 |
| Bibliographie..... | 25 |

Table des annexes

| | |
|--|----|
| Annexe 1 : Théorie du logiciel Hydronomeas..... | 27 |
| Annexe 2 : Débits des cours d'eau à l'amont des zones de prélèvement | 33 |
| Annexe 3 : Caractéristiques des réservoirs | 34 |
| Annexe 4 : Moyennes météorologiques de Rennes | 34 |
| Annexe 5 : Prélèvements dans les ressources..... | 34 |
| Annexe 6 : Débits générés par le logiciel Hydrognomon | 35 |
| Annexe 7 : Consommations électriques | 36 |
| Annexe 8 : Exemples de simulation..... | 37 |

Table des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Carte de l'hydrosystème d'Athènes | 7 |
| Figure 2 : Représentation de l'hydrosystème d'Athènes dans le logiciel Hydronomeas..... | 9 |
| Figure 3 : Carte de l'hydrosystème du bassin rennais | 10 |
| Figure 4 : Les ressources en eau potable du bassin rennais..... | 11 |
| Figure 5 : Débits historiques (station : Le Canut Nord à Maxent)..... | 12 |
| Figure 6 : Débits générés (station : Le Canut Nord à Maxent) | 12 |
| Figure 7 : Représentation de l'hydrosystème du bassin rennais dans le logiciel Hydronomeas | 13 |
| Figure 8 : Situation actuelle en terme de probabilité d'erreur | 15 |
| Figure 9 : Estimation de la demande maximale supportable..... | 15 |
| Figure 10 : Evolution de la probabilité d'erreur "satisfaction de la demande" en fonction de la demande en eau..... | 16 |
| Figure 11 : Résultats en probabilité d'erreur sans le barrage de Rophemel | 16 |
| Figure 12 : Résultats en probabilité d'erreur sans Le Meu..... | 17 |
| Figure 13 : Résultats en probabilité d'erreur sans le barrage du Canut..... | 17 |
| Figure 14 : Résultats en probabilité d'erreur sans les barrages du Canut et de la Cheze..... | 18 |
| Figure 15 : Résultats en probabilité d'erreur sans Le Couesnon | 18 |
| Figure 16 : Résultats en probabilité d'erreur sans les captages des vallées de la Minette et de Loisançe | 19 |
| Figure 17 : Résultats en probabilité d'erreur sans les capatges et sans le Couesnon..... | 19 |

1. Introduction

Dans le cadre de mon Stage Pratique de l'Ingénierie, j'ai choisi de réaliser un stage dans le domaine de la ressource en eau et de sa gestion. C'est un thème étroitement lié à mon objectif professionnel futur qui est de travailler dans l'adduction en eau potable. Je souhaite ainsi par ce SPI acquérir des notions complémentaires sur l'eau potable qui me permettront peut-être, je l'espère, d'ajouter à ma formation des outils, des connaissances sur la gestion de la ressource. De plus, la Grèce se révèle comme un lieu très adapté à ce thème de SPI, puisqu'il y a de nombreux problèmes liés à la ressource en eau durant la sécheresse estivale, notamment, et d'autant plus du fait de l'afflux touristique.

Je vais ainsi décrire ci-après mon projet de stage, en présentant tout d'abord mon organisme d'accueil et ensuite le projet dans lequel s'est inscrit mon stage. Enfin je ferai une analyse critique.

2. Présentation de l'organisme d'accueil

La « *National Technical University of Athens* » se compose de plusieurs écoles, et notamment la « *School of Civil Engineering* » dans laquelle je fais mon stage. Cette école regroupe quant à elle plusieurs départements dont le « *Department of Water Resources and Environmental Engineering* » qui contient quatre laboratoires de recherche :

- *Applied Hydraulics Laboratory*
- *Harbour Works Laboratory*
- *Sanitary Engineering Laboratory*
- *Hydrology and Water Resources Utilization Laboratory*

J'effectue mon stage pratique de l'ingénierie dans ce dernier. Le professeur D. Koutsoyannis est à la tête de ce laboratoire.

Leurs activités de recherche sont donc axées vers la ressource en eau et plus particulièrement vers sa gestion. Ils ont notamment réalisé des recherches sur les ressources en eau et l'environnement / le changement climatique, la simulation d'hydrosystèmes, des méthodes stochastiques dans les hydrosystèmes, des bases de données de l'eau et des systèmes environnementaux.

3. Présentation du projet dans lequel s'est inscrit le stage

L'objet du projet est le développement d'un outil de gestion des différentes ressources en eau. Ceci permettra de soutenir la décision quant à la gestion des différentes ressources. Cet outil est en l'occurrence le logiciel *Hydronomeas*. Il permet la représentation d'un réseau d'eau et la simulation de son fonctionnement. *Hydronomeas* permet d'étudier l'utilisation des ressources pour satisfaire une certaine demande de consommation, de diagnostiquer et de suivre le fonctionnement du réseau, d'identifier les prélèvements et les différentes sources sollicitées et de modifier les objectifs de fonctionnement des réservoirs, des forages par la modification des paramètres des lois de fonctionnement de ces réservoirs ou des stations de pompage.

3.1. Description du logiciel

Explication générale du fonctionnement d'Hydronomeas :
(Cf. Annexe 1)

- Schématisme du réseau

Le réseau est représenté de manière très schématique. Les éléments du réseau (rivières, aqueducs, forages, réservoirs) y figurent de façon très sommaire. Par ailleurs, chaque élément du réseau contient dans un menu propre ses caractéristiques techniques. Le logiciel ne requiert pas le linéaire des tronçons de rivière ou d'aqueduc ou la capacité hydraulique fine de ces tronçons pour fonctionner. En effet, l'objectif du logiciel n'est pas de reconstituer sur informatique le réseau réel mais d'être un outil de gestion de la ressource.

Dans les menus des réservoirs et des forages, on précise respectivement les lois de fonctionnement et le coût énergétique du pompage. Les lois de fonctionnement des réservoirs comportent deux paramètres. En ce qui concerne les pompes, leur utilisation est fonction de la disponibilité de la ressource de surface et du coût énergétique de leur utilisation. Il est également nécessaire de rentrer dans le modèle la demande en eau. Ainsi, lors de la simulation, le modèle analyse la demande totale et répartit les apports entre les différentes sources disponibles. Le modèle utilise en priorité les réservoirs qui présentent le coût énergétique le plus faible. Toutefois, lorsque le stock d'eau contenu dans les réservoirs est inférieur aux besoins, la différence est apportée par pompage.

Enfin, l'opérateur doit définir des cibles à atteindre par le modèle. Ces cibles sont choisies selon la nécessité de respecter un certain niveau dans un réservoir, un débit minimum dans une rivière ou encore la demande de telle ville plutôt qu'une autre. L'opérateur établit ensuite une hiérarchisation des cibles par ordre de priorité ; la priorité étant souvent donnée

à la satisfaction de la demande en eau des villes. Les cibles de même priorité sont traitées par le système dans un ordre aléatoire.

- Simulation

Lors de la simulation, le modèle tente alors d'atteindre le coût global minimum de fonctionnement du réseau en respectant dans l'ordre :

- a) les volumes morts des réservoirs,
- b) les cibles définies en fonction des priorités,
- c) la mobilisation de la ressource en fonction de la disponibilité,
- d) la nécessité de satisfaire les cibles même si le coût global est alors plus important.

L'opérateur choisit le nombre de simulations voulues ; à chaque simulation, un nouveau scénario est testé par le logiciel en faisant varier des paramètres. Un exemple de résultats de différentes simulations est donné en annexe pour comprendre comment l'opérateur analyse le fonctionnement du réseau. (Cf. *Annexe 8*)

- Optimisation

Après un certain nombre de simulations et donc de résultats, l'opérateur peut choisir de modifier certains paramètres afin d'améliorer les résultats obtenus par les simulations.

3.2. Cas d'Athènes

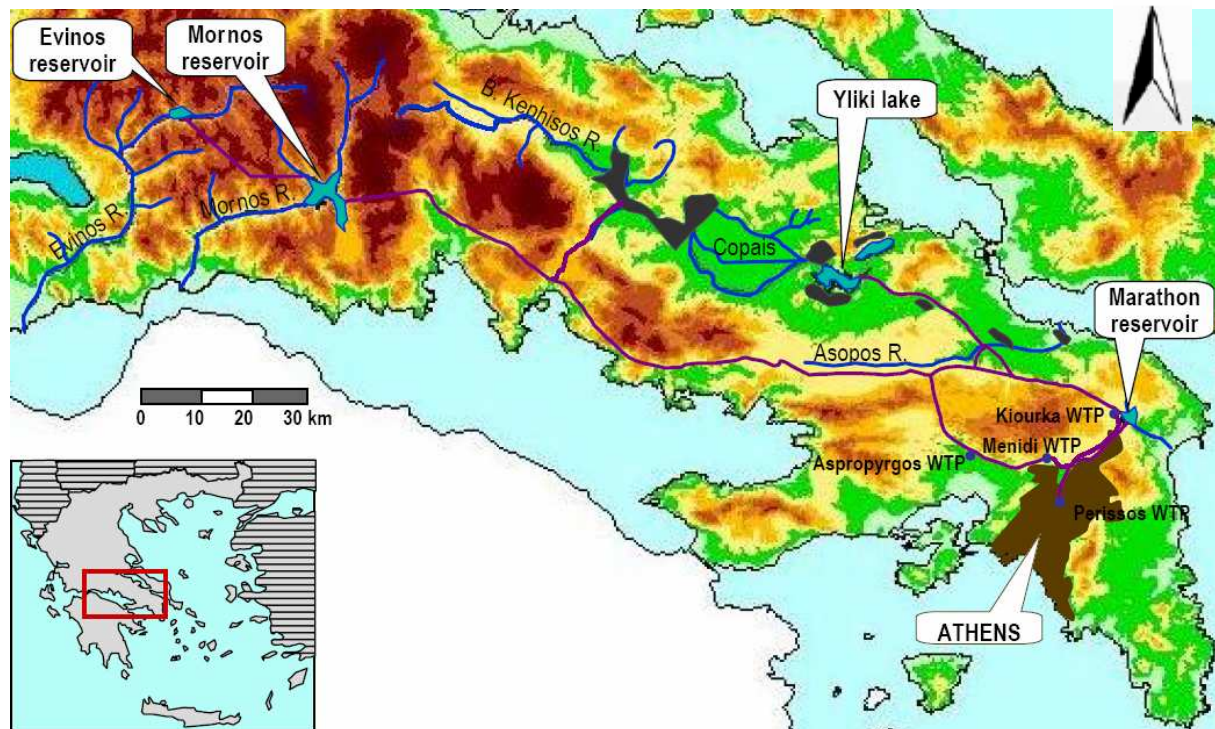


Figure 1 : Carte de l'hydrosystème d'Athènes

Le système de ressource en eau de la région d'Athènes est très vaste. Il s'étend sur une zone de plus de 4000 km² de superficie et comprend des ressources en eau de surface et de nappe. Comme le montre la figure ci-dessus, ce système comporte 4 réservoirs : le réservoir d'Evinos, le réservoir de Mornos, le lac Yliki et le réservoir de Marathon. Il compte également 350 km d'aqueducs, 15 stations de pompage, pas moins de 100 puits de forage et 4 stations de traitement des eaux. Le réseau est géré par la compagnie d'Athènes de distribution des eaux et des eaux usées (EYDAP). Le réservoir de Mornos et le lac naturel Yliki représentent à eux deux 88.5% de la capacité de stockage du système avec 1400 millions de m³. Malgré la faible capacité de stockage du récent réservoir d'Evinos, les débits qui en partent sont les plus importants. Le plus petit réservoir et le plus proche de la ville d'Athènes est celui de Marathon. Il est actuellement maintenu à un niveau élevé et sert en cas d'urgence, notamment en complément lors du pic de demande en eau pendant l'été. L'eau des nappes, situées principalement dans la partie nord de l'hydrosystème, est utilisée en tant que ressource de soutien.

Cet hydrosystème peut alors être schématisé dans le logiciel hydronomeas. Il nécessite de nombreuses informations pour pouvoir réaliser des simulations et des optimisations de l'hydrosystème.

- au niveau des retenues d'eau, il faut connaître la capacité de stockage, leur surface, la surface du bassin versant, le niveau de débordement et les débits mensuels d'alimentation depuis une quinzaine d'années,
- au niveau des rivières, il faut connaître leurs débits mensuels sur une quinzaine d'années en amont des points de pompage et le débit minimal à conserver dans ces cours d'eau,
- au niveau des captages souterrains, il faut connaître les débits que l'on peut y prélever,
- au niveau des aqueducs, il faut connaître le débit maximal pouvant circuler,
- au niveau des pompes, leurs débits de fonctionnement et l'énergie utilisée,
- et enfin les besoins mensuels en eau de la population.

Les chercheurs ont ainsi représenté l'hydrosystème d'Athènes par le schéma suivant (voir page 9).

Ils ont ensuite lancé de nombreuses simulations du réseau pour répondre à différentes questions. A chaque question correspond un scénario :

- quelle est la probabilité minimale d'erreur pour atteindre un état donné d'objectifs opérationnels et pour un régime hydrologique donné ?
- quel est le coût minimum pour atteindre un état donné d'objectifs opérationnels pour un régime hydrologique donné et pour un niveau de fiabilité donné ?
- quelles sont les conséquences de modifications de l'hydrosystème (par exemple la construction de nouveaux projets) et les impacts des différentes politiques de gestion et des scénarios hydro climatiques ?
- comment pourrait réagir le système face à des situations spéciales comme des dégradations des conduites ou encore une augmentation importante de la demande en eau pendant une période donnée (par exemple à l'occasion des Jeux Olympiques d'Athènes en 2004) ?
- quelle sera la disponibilité en eau à court terme ?

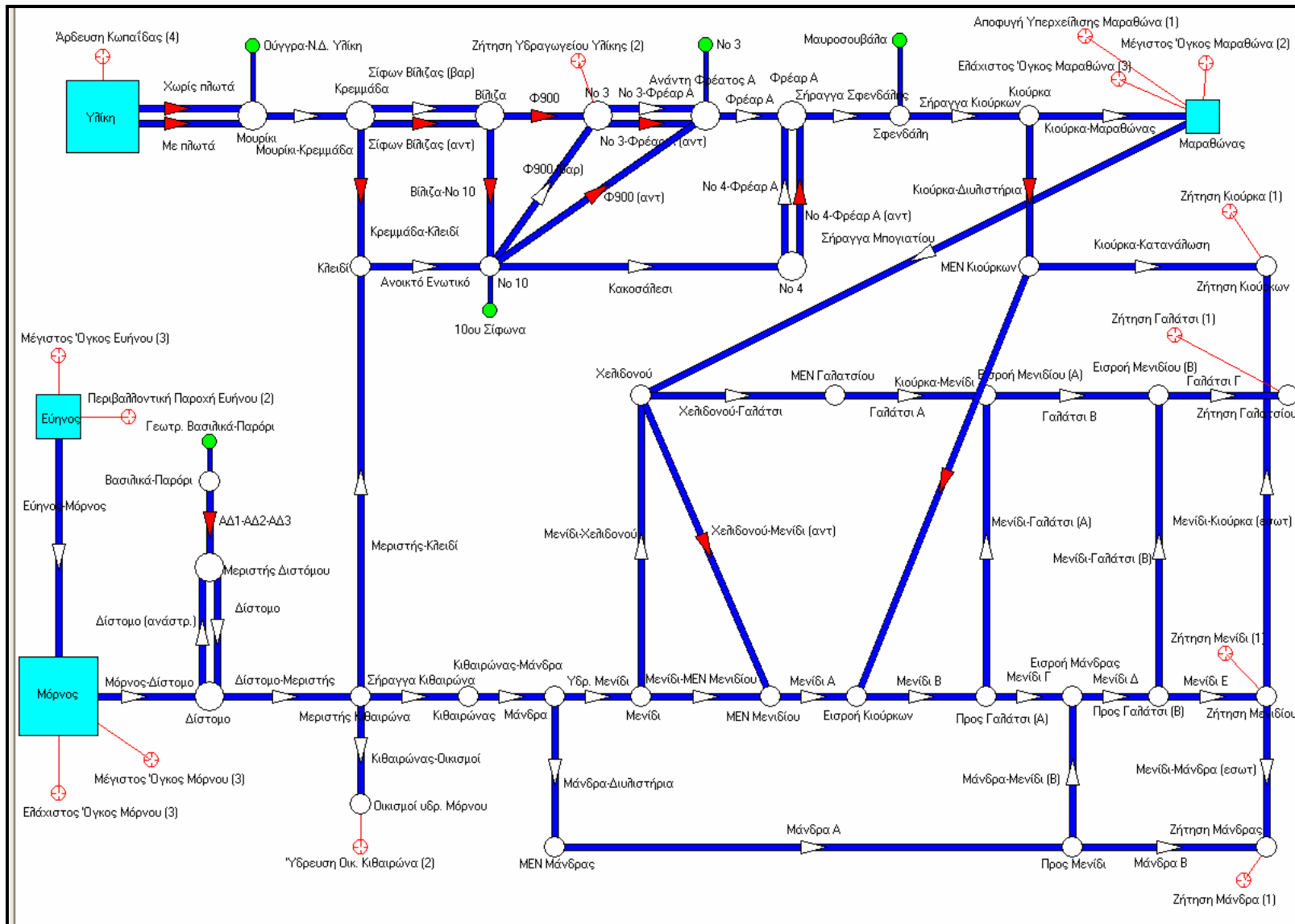


Figure 2 : Représentation de l'hydrosystème d'Athènes dans le logiciel Hydronomeas

4. Description du projet d'ingénierie

4.1. Présentation de mon cas d'étude

Pour commencer, l'équipe du laboratoire de l'université m'a demandé de chercher un hydrosystème français sur lequel je puisse faire une étude comparable à celle réalisée pour la ville d'Athènes. Après quelques recherches et validation des chercheurs de l'université, j'ai choisi l'hydrosystème du bassin rennais car celui-ci dispose de plusieurs ressources en eau sous forme de lac ; ce qui est le cas pour la ville d'Athènes.



Figure 3 : Carte de l'hydrosystème du bassin rennais

L'eau du bassin rennais provient de 4 ressources :

- RENNES I : les captages souterrains des vallées de la Minette et de la Loisanca,
- RENNES II : les prélèvements dans la rivière Le Couesnon à Mézières-sur-Couesnon,
- RENNES III : les prélèvements dans la retenue artificielle de Rophemel,
- RENNES IV : les prélèvements dans les retenues artificielles de la Cheze et du Canut et les prélèvements dans la rivière Le Meu à Monfort-sur-Meu.

L'eau est ensuite acheminée par 3 conduites (voir schéma ci-dessous) vers la ville de Rennes. La gestion des ressources est confiée au SMPBR (Syndicat Mixte de Production d'eau potable du Bassin Rennais). 37 communes dont Rennes en font partie. L'eau produite par la ville de Rennes n'est pas distribuée qu'aux habitants de Rennes et de ses environs. Elle est aussi vendue à de nombreux syndicats intercommunaux d'Ille-et-Vilaine. Au final, Rennes alimente près de la moitié de la population d'Ille-et-Vilaine.

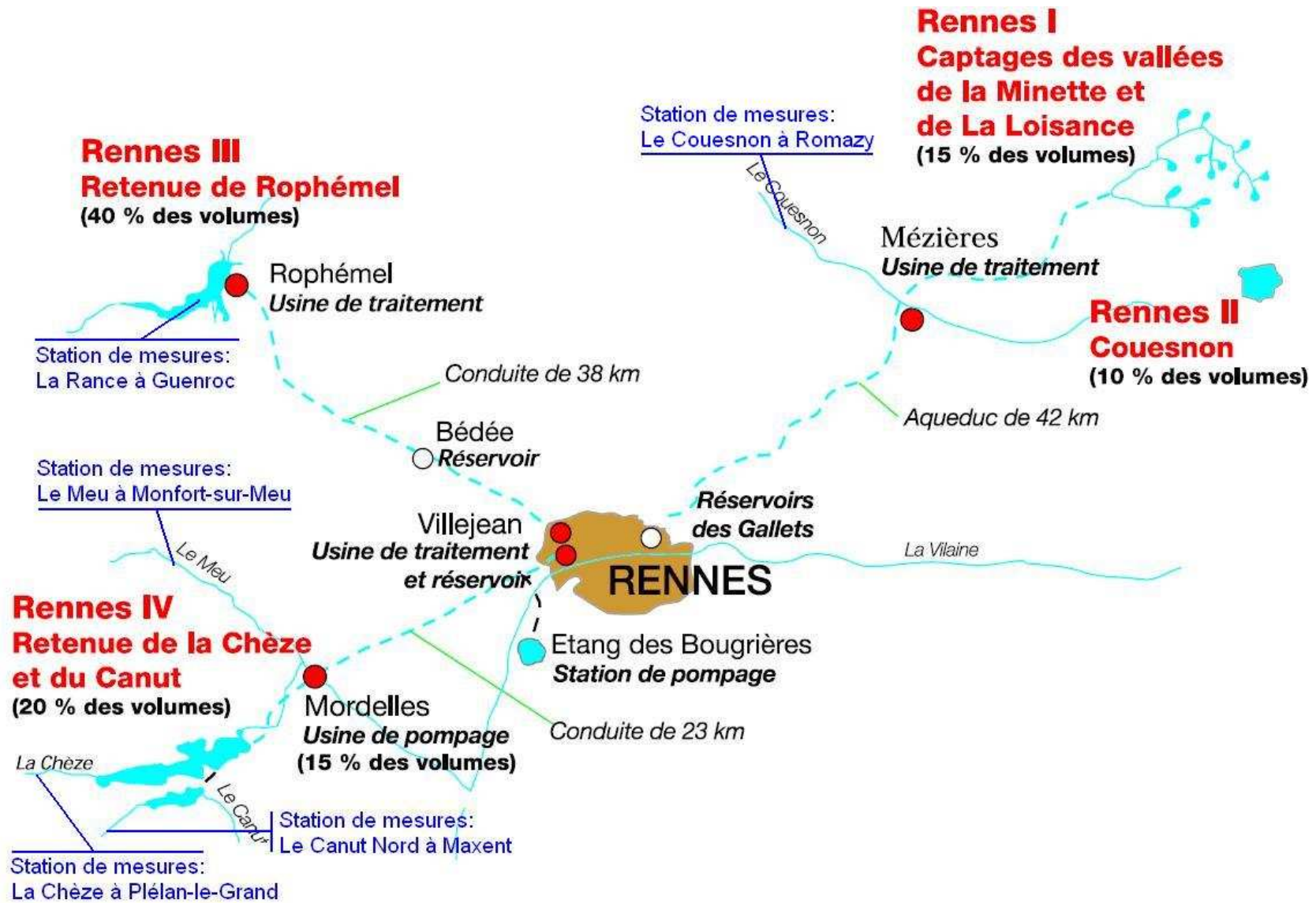


Figure 4 : Les ressources en eau potable du bassin rennais

4.2.Phase de recherche et de traitement de données

Pour réaliser mon étude, il a tout d'abord été nécessaire de trouver toutes les informations nécessaires (mêmes informations que pour le cas d'Athènes) sur l'hydrosystème. Le service des eaux de la ville de Rennes m'a permis d'obtenir les données que je ne pouvais pas trouver sur internet.

(Cf. Annexe 2 à 6)

Une fois la collecte de ces données terminée, il faut les traiter afin de pouvoir les utiliser dans le logiciel Hydronomeas. J'ai alors utilisé un autre logiciel Hydrognomon pour générer des séries de données sur 1000 ans à partir des données historiques que je possède. De telles séries de données ont été réalisées pour les débits d'alimentation des réservoirs et rivières, les précipitations et enfin les températures. Ces dernières permettent d'estimer par l'utilisation d'un outil mathématique la création de séries d'évaporation.

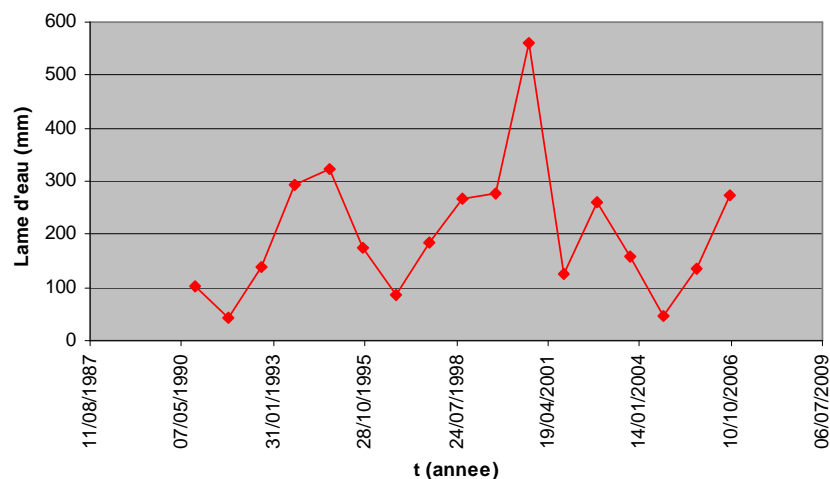


Figure 5 : Débits historiques (station : Le Canut Nord à Maxent)

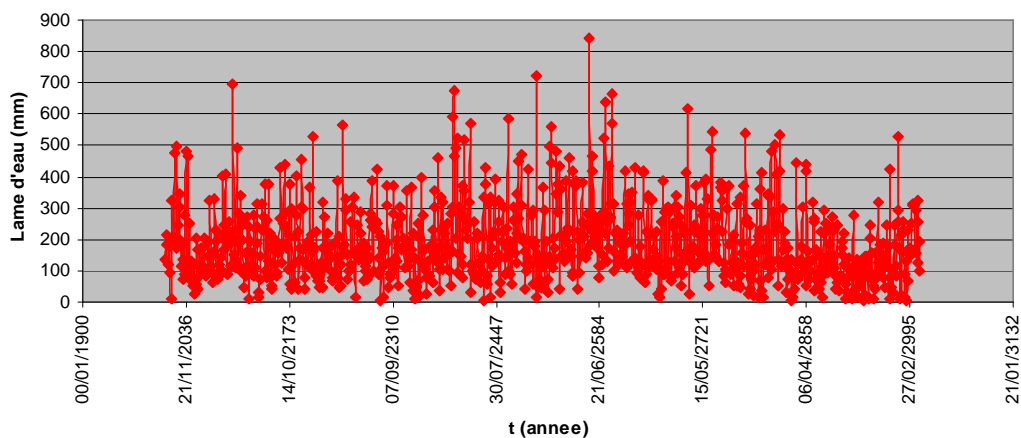


Figure 6 : Débits générés (station : Le Canut Nord à Maxent)

4.3. Représentation de l'hydrosystème sous Hydronomeas

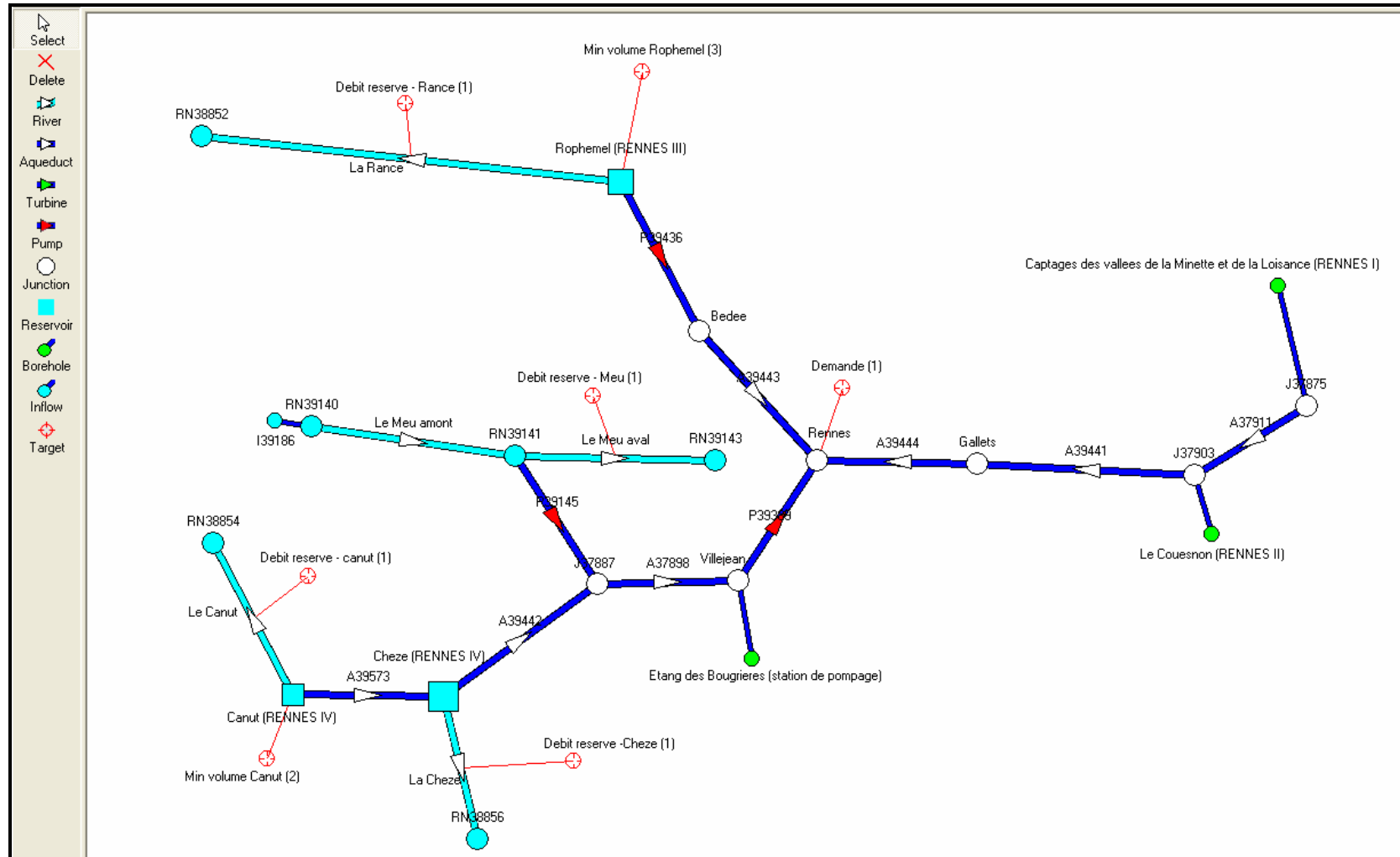


Figure 7 : Représentation de l'hydrosystème du bassin rennais dans le logiciel Hydronomeas

4.4. Simulations, optimisations et résultats

4.4.1. Situation actuelle

Pour réaliser cette situation, il faut créer des « targets » (des objectifs) que le logiciel doit tenter d'atteindre au cours de la simulation et optimisation. Ces objectifs sont dans ce cas :

- les besoins en eau du bassin rennais en 2008,
- à l'aval des prises d'eau, les débits de réserve. Ce sont des contraintes environnementales,
- des volumes minimums dans les réservoirs. Ces derniers sont créés lorsque la simulation n'atteint pas les objectifs demandés au niveau des débits réservés.

Je dois ensuite établir un ordre de priorité dans lequel ces objectifs doivent être respectés. L'alimentation en eau du bassin rennais est donc primordiale, suit les contraintes de débits réservés et enfin, les volumes minimums dans les réservoirs qui n'ont pas pour objet d'être à tout prix respectés mais qui permettent seulement d'améliorer les résultats au niveau des débits de réserve.

Une fois cela fait, je peux lancer une série de simulations et ainsi voir si les objectifs ont été respectés. Les résultats sont exprimés en probabilité annuelle d'échec, c'est-à-dire que si il y a un échec pendant un mois, cela correspond à une année d'échec. J'obtiens donc un résultat en nombre d'années d'échec pour 1000 années de simulations.

La limite d'acceptabilité a été fixée par les chercheurs de l'université à :

- 0.015 mean annual failure probability pour l'alimentation en eau potable (i.e. : 15 années sur 1000 présentent au moins un mois d'échec,
- 0.025 mean annual failure probability pour les débits réservés.

Une optimisation, qui détermine le meilleur couple a et b pour chaque réservoir pour un ensemble de données (voir partie théorique) et une série de simulations ne suffisent pas pour atteindre le meilleur résultat en terme de probabilité d'erreur. C'est à ce moment là que le rôle de l'opérateur intervient. Il doit chercher des solutions pour les améliorer sans modifier la réalité de l'hydrosystème. Il peut en effet créer de nouveaux objectifs comme des volumes minimums ou maximums dans les réservoirs à ne pas dépasser ou aussi changer l'ordre des priorités des objectifs.

Résultats en terme de probabilité d'échecs :

| Scenario : 2008 | |
|-------------------------|---------------------|
| Target | Mean annual failure |
| Le Canut - Min. flow | 0,153 |
| La Cheze - Min. flow | 0,005 |
| Rennes - Water supply | 0,003 |
| Le Meu aval - Min. flow | 0,917 |
| La Rance - Min. flow | 0,003 |
| Canut - Min. volume | 0,999 |
| Rophemel - Min. volume | 0,246 |

Figure 8 : Situation actuelle en terme de probabilité d'erreur

Explication des résultats :

Les valeurs obtenues pour les volumes minimums ne sont pas très bonnes, mais ils n'ont pas d'importance. Par contre, je peux observer que pour Le Meu aval et Le Canut, les débits de réserve ne sont pas acceptables du tout. Mais je ne peux pas obtenir de meilleurs résultats car sans prélèvement ces chiffres restent les mêmes. Cela signifie que les débits dans ces cours d'eau sont naturellement trop faibles pour respecter la limite environnementale qui a été fixée. (Cf. Annexe 5) J'ai donc obtenu ici la meilleure utilisation des ressources qui permet de respecter au mieux la demande en eau et les débits réservés dans les rivières et ceci tout en minimisant le coût de l'adduction en eau potable lié au pompage. Ainsi par mois, 680 MWh sont consommés (8 160 000 kWh/an), ce qui correspond à un coût de 36000 euros HT par mois à raison de 53 euros HT le MWh.

Ce coût estimé par le logiciel est inférieur au coût réel (9 198 606 kWh/an) mais je ne peux pas comparer ces deux chiffres car il ne sont pas obtenus de la même façon : le rapport d'activité (2006-2007) prend en compte les dépenses énergétiques liées aux châteaux d'eau.

(Cf. Annexe 7 : Consommations énergétiques)

- **Demande maximale supportable**

Je peux désormais chercher à déterminer la demande maximale que l'hydrosystème peut supporter. Je fixe à 15 années d'échec sur 1000 la limite maximale de probabilité d'erreur pour la demande en eau.

| Scenario : besoins futurs | | | | | | | | | |
|---------------------------|--------------------|-------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|
| | | | Mean annual failure | | | | | | |
| | Augmentation (en%) | Total (hm3) | Le Canut - Min. flow | La Cheze - Min. flow | Rennes - Water supply | Le Meu aval - Min. flow | La Rance - Min. flow | Canut - Min. volume | Rophemel - Min. volume |
| besoins actuels | 0 | 20,5 | 0,153 | 0,005 | 0,003 | 0,917 | 0,003 | 0,999 | 0,246 |
| besoins futurs | 10 | 22,5 | 0,154 | 0,011 | 0,005 | 0,917 | 0,007 | 0,999 | 0,259 |
| | 12 | 22,9 | 0,154 | 0,013 | 0,008 | 0,917 | 0,009 | 0,999 | 0,255 |
| | 14 | 23,4 | 0,154 | 0,015 | 0,009 | 0,917 | 0,009 | 0,999 | 0,262 |
| | 20 | 24,6 | 0,155 | 0,02 | 0,013 | 0,917 | 0,014 | 0,999 | 0,272 |

Figure 9 : Estimation de la demande maximale supportable

Je constate d'après les simulations et optimisations réalisées, qu'une augmentation de 20% des besoins en eau est supportable par l'hydrosystème. Ce qui équivaut à un prélèvement annuel de 24,6 millions de m³.

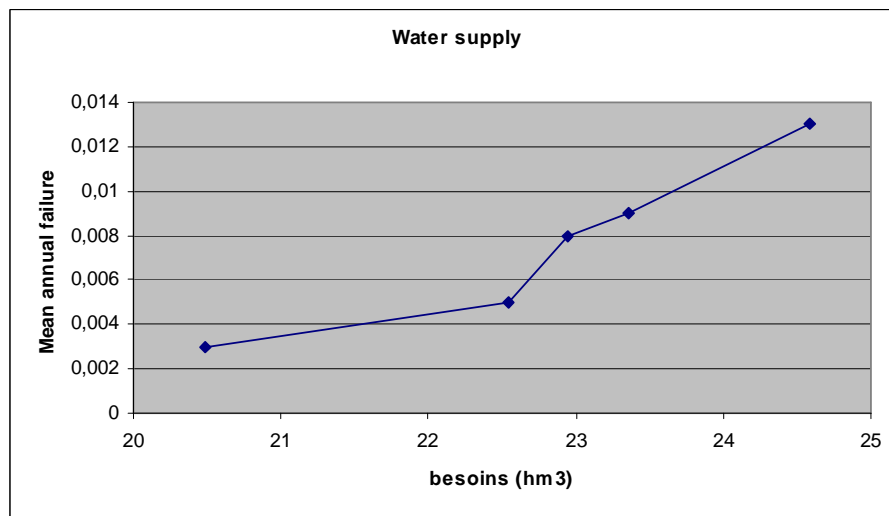


Figure 10 : Evolution de la probabilité d'erreur "satisfaction de la demande" en fonction de la demande en eau

4.4.2. Réactions de l'hydrosystème à des conditions particulières

Je peux étudier les réactions de l'hydrosystème face à des indisponibilités de certaines ressources qui peuvent être liées à une pollution ou à des travaux par exemple. Pour cela, j'ai lancé une série de simulations et optimisations en retirant à chaque fois une des ressources de l'hydrosystème. Pour chaque cas, je cherche à voir si les objectifs de demande en eau et de débits de réserve peuvent toujours être respectés, et si c'est le cas, je détermine alors la limite maximale de demande en eau supportable par l'hydrosystème.

- **Scénario : sans le barrage de Rophemel**

| Scenario : sans Rophemel | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------|-------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|
| | Augmentation (en%) | Total (hm3) | Mean annual failure | | | | |
| | | | Le Canut - Min. flow | La Cheze - Min. flow | Rennes - Water supply | Le Meu aval - Min. flow | Canut - Min. volume |
| besoins actuels | 0 | 20,49 | 0,156 | 0,017 | 0,014 | 0,917 | 0,999 |

Figure 11 : Résultats en probabilité d'erreur sans le barrage de Rophemel

J'observe que sans la ressource de Rophemel, la demande actuelle en eau est tout juste satisfaite. En effet une probabilité d'erreur de 14/1000 est la limite maximale à ne pas

dépasser. D'autre part, le débit de réserve dans La Cheze est respecté, mais la valeur de la probabilité d'erreur a aussi atteint sa limite maximale.

Au final, les besoins actuels et les normes environnementales restent respectés sans la ressource de Rophemel, mais on ne peut pas prélever d'avantage d'eau dans l'hydrosystème. On a atteint la limite de celui-ci.

- **Scénario : sans Le Meu**

| Scenario : sans Le Meu | | | | | | | | |
|------------------------|--------------------|-------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|------------------------|
| | Augmentation (en%) | Total (hm3) | Mean annual failure | | | | | Rophemel - Min. volume |
| | | | La Cheze - Min. flow | Rennes - Water supply | La Rance - Min. flow | Le Canut - Min. flow | Canut - Min. volume | |
| besoins actuels | 0 | 20,49 | 0,011 | 0,007 | 0,007 | 0,153 | 0,999 | 0,274 |
| besoins futurs | 5 | 21,51 | 0,021 | 0,009 | 0,009 | 0,154 | 0,999 | 0,081 |
| | 10 | 22,54 | 0,025 | 0,013 | 0,016 | 0,155 | 0,999 | 0,196 |

Figure 12 : Résultats en probabilité d'erreur sans Le Meu

Dans ce scénario, je simule un arrêt de prélèvements dans Le Meu. J'observe après simulation et optimisation de ce scénario que les besoins actuels sont toujours satisfaits ainsi que les débits de réserve dans les cours d'eau. Je peux alors chercher à déterminer la demande maximale en eau que peut supporter ce nouvel hydrosystème. J'en atteins la limite avec une augmentation de 10% de la demande en eau, ce qui correspond à 22,54 hm³ prélevés par an. En effet, la probabilité d'erreur en ce qui concerne la demande en eau atteint 13/1000 et les probabilités d'erreur pour les débits de réserve dans La Cheze et Le Meu sont respectivement de 25/1000 et de 16/1000.

- **Scénario : sans le Canut**

| Scenario : sans Le Canut | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------|-------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|
| | Augmentation (en%) | Total (hm3) | Mean annual failure | | | | Rophemel - Min. volume |
| | | | La Cheze - Min. flow | Rennes - Water supply | Le Meu aval - Min. flow | La Rance - Min. flow | |
| besoins actuels | 0 | 20,49 | 0,013 | 0,008 | 0,917 | 0,009 | 0,123 |
| besoins futurs | 5 | 21,51 | 0,015 | 0,009 | 0,917 | 0,011 | 0,203 |
| | 10 | 22,54 | 0,027 | 0,011 | 0,917 | 0,014 | 0,175 |

Figure 13 : Résultats en probabilité d'erreur sans le barrage du Canut

Pour ce scénario, j'observe encore que les besoins actuels et les débits de réserve sont bien respectés. J'ai alors déterminé que la demande en eau maximale pouvant être supportée par cet hydrosystème est de 22,54 hm³ (soit une augmentation de 10% des prélèvements en eau).

- **Scénario : sans La Cheze et sans Le Canut**

| Scenario : sans La Cheze et Le Canut | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|
| | | Mean annual failure | | | | |
| | Augmentation (en%) | Total (hm3) | Rennes - Water supply | Le Meu aval - Min. flow | La Rance - Min. flow | Rophemel - Min. volume |
| besoins actuels | 0 | 20,49 | 0,035 | 0,917 | 0,041 | 0,254 |

Figure 14 : Résultats en probabilité d'erreur sans les barrages du Canut et de la Cheze

Si je prive l'hydrosystème des prélèvements dans La Cheze et dans Le Canut, j'observe une probabilité d'erreur pour la demande en eau de 35/1000, ce qui n'est pas acceptable. Je ne peux donc pas cesser en même temps les prélèvements dans ces deux barrages, sauf si cela a lieu pour une période très courte.

- **Scénario : sans Le Couesnon**

| Scenario : sans Le Couesnon | | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|------------------------|
| | | Mean annual failure | | | | | | | |
| | Augmentation (en%) | Total (hm3) | La Cheze - Min. flow | Rennes - Water supply | Le Meu aval - Min. flow | La Rance - Min. flow | Le Canut - Min. flow | Canut - Min. volume | Rophemel - Min. volume |
| besoins actuels | 0 | 20,49 | 0,017 | 0,009 | 0,917 | 0,012 | 0,154 | 0,999 | 0,317 |
| besoins futurs | 5 | 21,51 | 0,026 | 0,018 | 0,917 | 0,018 | 0,156 | 0,999 | 0,117 |

Figure 15 : Résultats en probabilité d'erreur sans Le Couesnon

Je retire désormais à l'hydrosystème les prélèvements dans Le Couesnon. J'observe que l'hydrosystème supporte sans problème la demande en eau actuelle. Par ailleurs, une augmentation de 5% (soit 21,51 hm3 prélevés par an) de cette demande révèle une probabilité d'erreur trop élevée pour la demande en eau (18/1000).

- **Scénario : sans les captages des vallées de La Minette et de La Loisance**

| Scenario : sans les captages | | | | | | | | | |
|------------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|------------------------|
| | | Mean annual failure | | | | | | | |
| | Augmentation (en%) | Total (hm3) | La Cheze - Min. flow | Rennes - Water supply | Le Meu aval - Min. flow | La Rance - Min. flow | Le Canut - Min. flow | Canut - Min. volume | Rophemel - Min. volume |
| besoins actuels | 0 | 20,49 | 0,049 | 0,041 | 0,917 | 0,029 | 0,16 | 0,999 | 0,129 |

Figure 16 : Résultats en probabilité d'erreur sans les captages des vallées de la Minette et de Loisance

Après simulations et optimisation du nouveau scénario, j'observe que la demande actuelle en eau ne peut ainsi être satisfaite ; la probabilité d'erreur pour la demande en eau est notamment beaucoup trop élevée : 41/1000.

- **Scénario : sans les captages et sans Le Couesnon**

| Scenario : sans Le Couesnon et captages | | | | | | | | | |
|---|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|------------------------|
| | | Mean annual failure | | | | | | | |
| | Augmentation (en%) | Total (hm3) | La Cheze - Min. flow | Rennes - Water supply | Le Meu aval - Min. flow | La Rance - Min. flow | Le Canut - Min. flow | Canut - Min. volume | Rophemel - Min. volume |
| besoins actuels | 0 | 20,49 | 0,082 | 0,075 | 0,917 | 0,05 | 0,175 | 0,999 | 0,176 |

Figure 17 : Résultats en probabilité d'erreur sans les captages et sans le Couesnon

Pour ce dernier scénario, je retire de l'hydrosystème les prélèvements dans Le Couesnon et les captages. J'observe alors de façon très nette que l'hydrosystème ne peut subvenir aux besoins actuels (probabilité d'erreur pour la demande en eau de 75/1000).

4.5. Conclusion

Classement des ressources

Suite à la réalisation de ces scénarii, je peux établir un classement des ressources en fonction de leur niveau d'importance.

- Ressources indispensables :

Il ressort que le barrage de Rophemel, le barrage de La Cheze – Canut et les captages des vallées de la Minette et de la Loisance sont les trois ressources indispensables de l'hydrosystème. Si je prive celui-ci de l'une d'entre elles, la demande actuelle ne peut plus être satisfaite.

- Ressource importante :

Le Couesnon est une ressource très importante. Certes la demande actuelle peut toujours être satisfaite même si j'arrête les prélèvements dans Le Couesnon. En revanche, une faible augmentation de 5% de la demande en eau ne peut pas être supportée par l'hydrosystème. Sans cette ressource, l'hydrosystème atteint sa limite.

- Ressources non primordiales :

Le barrage du Canut et la ressource du Meu ne sont pas indispensables du point de vue de la ressource en eau. L'hydrosystème peut en effet supporter une augmentation de 10% de la demande en eau sans l'apport d'une de ces deux ressources.

Ce classement des ressources de l'hydrosystème en fonction de leur niveau d'importance permet d'avoir une connaissance assez précise de celui-ci face à de nombreuses situations. Voici quelques questions auxquelles le service des eaux en charge de l'exploitation de l'hydrosystème peut avoir les réponses grâce à l'utilisation de Hydronomeas :

- J'ai pu déterminer la gestion optimale de l'hydrosystème qui permet de satisfaire les objectifs actuels et qui présente le coût énergétique minimal : 680 MWh consommés par mois, soit 36000 euros HT par mois,
- Je connais maintenant la limite maximale de la demande en eau que l'hydrosystème peut supporter tout en respectant les restrictions environnementales : 24,6 millions de m³ soit une augmentation de 20% de la demande actuelle,
- En cas de pollution des ressources, nous pouvons savoir en fonction de la ressource rendue indisponible par la pollution, si celle-ci peut avoir un effet immédiat ou non sur la satisfaction de la demande en eau,
- Des travaux peuvent être maintenant envisagés sur certaines parties du réseau sans que la demande en eau et les restrictions environnementales ne soient perturbées. Et si des travaux mettent en arrêt provisoire l'utilisation des ressources indispensables, l'opérateur sait qu'il doit d'ores et déjà prévoir une solution alternative pour pouvoir satisfaire la demande en eau et les normes environnementales.

5. Analyse critique

Le projet que j'ai réalisé pendant ces trois mois à l'université d'Athènes a été très enrichissant sur plusieurs points.

Tout d'abord d'un point de vue technique, j'ai appris à me servir d'un logiciel professionnel Hydronomeas. C'est un outil vraiment très performant qui permet de déterminer la gestion optimale des ressources en eau d'un hydrosystème pour des conditions données.

Ensuite, le fait que les chercheurs m'aient confié la réalisation complète du projet sur une ville de mon choix a été très valorisant intellectuellement. Comme l'université avait déjà réalisé un projet similaire pour la ville d'Athènes, les chercheurs pouvaient m'aider dans l'utilisation du logiciel. J'ai ainsi eu la chance de pouvoir réaliser une étude complète qui comprend une recherche documentaire pour trouver les données qui me serviront à représenter l'hydrosystème sur le logiciel, une réflexion sur les enjeux des simulations, des choix sur l'utilisation du logiciel, une visualisation des résultats et enfin leurs interprétations.

Mais dans cette partie, je vais aborder en détail un autre aspect de la réalisation de mon projet : le choix de l'hydrosystème et la recherche de données.

- **Le choix de l'hydrosystème :**

Le choix de l'hydrosystème d'étude n'a pas été évident. Il fallait trouver un hydrosystème dont les ressources en eau seraient pour la grande majorité superficielle (sous forme de lac naturel ou artificiel). Les prélèvements dans les nappes doivent être secondaires. Ceci s'explique par le fonctionnement même du logiciel. En effet, les phases d'optimisation et de simulation ont pour but de déterminer le couple d'inconnues A et B pour chaque réservoir (un réservoir est un lac pour le logiciel). Les captages dans les rivières ou dans des nappes souterraines ne sont pas soumis à ce type de lois présentant deux inconnues. Ainsi, s'il n'y a pas de lac, le logiciel ne peut pas utiliser ces variables pour le calcul.

Les hydrosystèmes de Paris ou de Strasbourg que j'avais trouvés dans un premier temps ne pouvaient pas convenir pour cette raison. En revanche, celui de Rennes est parfaitement adapté à ce type d'étude.

- **La recherche de données**

La seconde phase de mon projet a été la recherche de données. J'ai alors été confronté à quelque chose de totalement nouveau pour moi. En effet, jusqu'à présent lors des projets à l'ENGEES, le problème des données ne s'était pas présenté. Elles nous étaient à chaque fois fournies et nous devions ensuite les organiser et les utiliser.

C'est le problème majeur auquel j'ai été confronté lors de mon projet.

Une fois l'hydrosystème choisi, j'ai commencé dans un premier temps par chercher des informations générales telles que le nombre de ressources, la nature de ces ressources, la demande en eau de la ville de Rennes... J'ai trouvé ces informations assez facilement sur le

site Internet de la ville de Rennes. Cela m'a permis d'acquérir une connaissance générale de l'organisation du réseau.

Dans un second temps, afin de pouvoir utiliser le logiciel, il fallait que je connaisse des informations beaucoup plus précises telles que les débits des cours d'eau alimentant les réservoirs, les débits des rivières dans lesquelles de l'eau est pompée, les capacités de transit des aqueducs, les caractéristiques des barrages, les débits de pompage, l'énergie nécessaire au pompage...

C'est la recherche de ces données précises sur l'hydrosystème qui n'a pas été facile. J'ai tout d'abord réalisé un grand nombre de recherches sur Internet. Le site de la Direction Générale de l'Energie et du Climat appartenant au Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer m'a permis de trouver des données techniques sur quelques barrages de l'hydrosystème, mais ces données étaient incomplètes. J'ai ensuite cherché sur le site de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne et sur celui du fermier Veolia eau qui est en charge du service de production et de distribution d'eau potable de la ville de Rennes. Mais je n'ai pas trouvé beaucoup d'informations, et encore moins de données chiffrées.

En revanche, j'ai pu trouver des données de débits des cours d'eau sur le site de la banque hydro. En utilisant conjointement les sites de Géoportail et de la Banque Hydro, j'ai pu localiser les stations de mesures de débits présentes dans la banque hydro et ainsi déterminer si elles convenaient à mes attentes : il me fallait en effet connaître les débits des cours d'eau, en amont des lacs de barrages qu'ils alimentent et les débits des cours d'eau en amont des stations de pompage. J'ai pu ainsi obtenir les données hydrologiques de l'hydrosystème sur la quinzaine d'années nécessaire à la génération de nouvelles séries de données hydrologiques qui seront ensuite utilisées par le logiciel Hydronomeas.

J'ai par ailleurs utilisé les sites de Eau Bretagne, de Google Maps et du BRGM pour identifier les noms de cours d'eau, calculer les superficies des lacs...

Après toutes ces recherches sur Internet, il me manquait encore de nombreuses données comme les capacités de pompage dans les ressources, les capacités de transit dans les aqueducs, les consommations énergétiques dues aux pompes, la répartition mensuelle des consommations en eau sur une année, les caractéristiques des barrages... Ne trouvant pas sur Internet ces données, j'ai alors contacté la DDAF d'Ille-et-Vilaine et les services des eaux de la ville de Rennes. Le responsable du service des eaux de la ville de Rennes m'a alors transmis leur rapport d'activité de 2006-2007 qui m'a permis d'obtenir l'ensemble des données qu'il me manquait.

Cette phase de recherche de données a été pour moi très formatrice. Après un certain temps passé à naviguer sur Internet pour trouver toutes les informations qui étaient disponibles, j'ai dû contacter certaines personnes. A ce moment là, l'avancement de mon projet ne dépendait plus entièrement de moi. Alors que dans la suite du projet, je n'avais besoin que du logiciel, donc si je rencontrais des difficultés, je pouvais les résoudre tout seul ou avec l'aide des chercheurs présents dans mon bureau. Lors de cette phase d'attente, je ne pouvais pas savoir si j'allais pouvoir rapidement recevoir ces données. Pendant une bonne quinzaine de jours, je ne recevais toujours pas de réponse des personnes que j'avais contactées. J'ai alors fait part de mon inquiétude dans le déroulement de mon projet à mon maître de stage. Nous avons envisagé ensemble de réaliser un autre projet si je ne recevais pas de réponse.

De plus, je trouve que ce genre de situation doit être vraiment plus courant lorsque l'on commence à travailler. Lorsqu'on a peu de relations professionnelles, comme c'est le cas pour un étudiant, il faut faire preuve d'encore plus d'ingéniosité et de patience.

En revanche, lorsque j'ai obtenu l'ensemble de mes informations, j'étais vraiment content d'avoir passé du temps à faire toutes ces recherches. Certes cela n'a pas été facile, mais c'est très valorisant de savoir que tout ce travail qui a été fait ne l'a pas été pour rien.

Cette phase de recherches de données qui est primordiale, sans laquelle l'étude ne peut pas être poursuivie, a permis de faire de ce projet un projet global. Je veux entendre par cela que j'ai pu réaliser pendant ces trois mois un projet du début jusqu'à la fin. Et pour en avoir discuter avec un certain nombre de mes camarades, ce n'est pas le cas pour tout le monde.

6. Conclusion

Durant ces trois mois de stage, j'ai tout d'abord été plongé dans l'univers professionnel par l'intermédiaire de ce laboratoire universitaire. Ensuite, un projet entier m'a été confié ; ce qui m'a permis d'être autonome dans mon travail et de pouvoir gérer mon temps moi-même. Ayant une véritable mission au sein du laboratoire et non pas, comme il arrive souvent en stage, des petits travaux sans grande finalité, j'ai davantage ressenti que mon travail était utile et pouvait aussi bien apporter quelque chose au laboratoire qu'à moi-même.

D'autre part, en réalisant ce stage dans une grande capitale européenne, j'ai pu être en contact avec des chercheurs étrangers qui ont une vision différente de la notre. Ceci en raison de la culture grecque et de la situation géographique de la ville d'Athènes.

Enfin, ce stage a été une source d'enrichissement culturel et linguistique importante ; en effet, les échanges que j'ai eu avec mes collègues se faisaient exclusivement en Anglais.

Bibliographie

LA CELLULE EAU POTABLE DE LA DSCIC. **Rapport d'activité 2006-2007 de la Cellule Eau Potable de la DSCIC.** P. 1-34

VILLE DE RENNES. **L'alimentation en eau potable.** [en ligne] – [mise à jour : 12/07/2007]
<<http://www.rennes.fr/index.php?id=691&id=691>>

OBSERVATOIRE DE L'EAU EN BRETAGNE. **Réseau hydrographique breton.** [en ligne] – [mise à jour : 11/04/2009]
<<http://www.eaubretagne.fr/Media/Atlas/Cartes/Reseau-hydrographique-breton>>

AGENCE DE L'EAU LOIRE BRETAGNE, DIREN BRETAGNE. **Eaux et milieux aquatiques.** [en ligne] – Carmen [mise à jour le 14/10/2008]
<http://carto.ecologie.gouv.fr/HTML_PUBLIC/Site%20de%20consultation/site.php?map=EAU.map&service_idx=10W>

BANQUE HYDRO. [en ligne] – [consulté le 04/06/2009]
<<http://www.hydro.eaufrance.fr/selection.php>>

GUILLAUME G. **Assurer un approvisionnement en eau de qualité à la ville de Rennes : un défi dans un environnement régional délicat ...** [en ligne] – [mise à jour le 28/05/2001]
<<http://pagesperso-orange.fr/stabarly/TPE-Ville/Eau/Eau.htm>>

GILBERT LEBRUN. **D'où vient l'eau du robinet?** [en ligne] – LE RENNAIS N°379, Décembre 2006 [consulté le 16/05/2009]
<http://www.rennes.fr/fileadmin/user_upload/Telechargements/rennais/rn379/mairie_eau.pdf>

DIRECTION GENERALE DE L'ENERGIE ET DU CLIMAT. **Barrage de Rophemel.** [en ligne] – MINISTERE DE L'ECONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE, 2001 [mise à jour le 15/10/2001] <<http://www.industrie.gouv.fr/energie/hydro/donnees/ropheme.htm>>

MSN METEO. **Moyennes météo Rennes.** [en ligne] – [consulté le 15/06/2009]
<http://meteo.msn.com/monthly_averages.aspx?wealocations=wc:FRXX0114&q=Rennes%2c+Ille-et-Vilaine+forecast:averagesm>

BRGM INFOTERRE. [en ligne] – [consulté le 21/05/2009] <<http://infoterre.brgm.fr/>>

SANDRE. **Stations pluviométriques.** [en ligne] – [consulté le 02/06/2009]
<http://sandre.eaufrance.fr/app/fd/searchstaapp.php?id_article=&act=STAPLU&stam_dep=35&stam_adm=&stam_code=&st=120#pager>

VILLE DE RENNES. **L'eau et l'assainissement**. [en ligne] – 2007 [consulté le 18/05/2009] <http://www.rennes.fr/uploads/tx_sqlirennestelechargement/Rapport_Eau_Assainissmt_2007.pdf>

NAMA CONSULTING ENGINEERS AND PLANNERS S.A., DEPARTMENT OF WATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT, SOGREAH CONSULTANTS. **Integrated management of hydrosystems in conjunction with an advanced information system : Odysseus Project**. Janvier 2007. p. 1-37 <http://www.itia.ntua.gr/getfile/862/1/documents/Sogreah_fr.pdf>

D. KOUTSOYIANNIS, G. KARAVOKIROS, A. EFSTRATIADIS, N. MAMASSIS, A. KOUKOUVINOS, A. CHRISTOFIDES. **Physics and Chemistry of the Earth 28 (2003)**. Pergamon. A decision support system for the management of the water resource system of Athens, p. 599–609

D. KOUTSOYIANNIS. **The management of the Athens water resource system: Methodology and implementation**. Atlanta, 6 Janvier 2006

D. KOUTSOYIANNIS, N. MAMASSIS. **A hydrometeorological telemetric network for the water resources monitoring of the Athens water resource system**. 2002. p. 157-163

D. KOUTSOYIANNIS, G. KARAVOKIROS, A. EFSTRATIADIS. **Determinig management scenarios for the water resource system of Athens**. 2002. p. 175-181

D. XENOS, I. PASSIOS, S. GEORGIADES, E. PARLIS, D. KOUSTOYIANNIS, EYDAP (ATHENS WATER SUPPLY AND SEWERAGE COMPANY). **Water demand management and the Athens water supply**. 2002. p. 44-50

D. XENOS, D. KOUSTOYIANNIS, A. EFSTRATIADIS. **Minimising water cost in water resource management of Athens**. *Urban Water Journal*, Vol. 1, N° 1, Mars 2004. p. 3-15

Annexe 1 : Théorie du logiciel Hydronomeas

(Voir références rédigées par D. KOUTSOYIANNIS)

Elle repose sur l'établissement d'une règle paramétrique.

- Description de la règle paramétrique

Supposons un hydrosystème comprenant N réservoirs. Dans cet hydrosystème, nous prenons en compte les consommations en eau domestique, industrielle et pour l'irrigation, mais pas les usages de l'eau pour la production d'électricité avec l'installation de centrale hydroélectrique, pour la navigation ou pour la détente.

On appellera D la demande totale en eau de cet hydrosystème.

Ainsi pour un réservoir i , nous pouvons écrire la relation déterminant le stock d'eau contenu dans celui-ci à l'instant $t+1$ connaissant son stock à l'instant t :

$$S_i = BS_i + Q_i - R_i - L_i - SP_i$$

Avec :

- S : le volume d'eau stocké dans le réservoir à l'instant $t+1$,
- BS : le volume d'eau stocké dans le réservoir à l'instant t ,
- Q : le volume entrant dans le réservoir,
- R : le volume sortant du réservoir,
- L : le volume perdu par évaporation et par infiltration,
- SP : le volume perdu par débordements du réservoir.

On appelle ensuite V le volume d'eau total stocké dans l'ensemble des réservoirs à la fin de la période d'intérêt. On peut ainsi écrire :

$$\sum_{i=1}^N S_i = V$$

Si l'on suppose maintenant que la demande en eau D est satisfaite, on peut alors dire :

$$\sum R_i = D$$

Ce qui implique :

$$V = \sum_{i=1}^N (BS_i + Q_i - L_i - SP_i) - D$$

L'enjeu est alors de déterminer les R_i tels que $\sum R_i = D$, c'est-à-dire de distribuer les volumes sortants de chaque réservoir. Il y a de nombreuses possibilités pour répartir ces volumes entre les réservoirs.

Des règles d'opération sont alors établies de manière à orienter la distribution de ces volumes.

- Règles d'opération

Ces règles traduisent les lois de fonctionnement des réservoirs.

Soit S_i^* : le volume stocké dans le réservoir i à atteindre à la fin de la période d'intérêt.
Les S_i^* sont souvent différents des S_i .

On se propose alors de distribuer le volume total V de la manière suivante :

$$S_i^* = K_i - a_i K + b_i V \quad (1)$$

Avec :

- K_i : la capacité de stockage du réservoir i ,
- K : la capacité totale de stockage de l'hydrosystème,
- Les a_i et b_i sont les deux paramètres inconnus qui définissent la loi de fonctionnement du réservoir i .

De façon évidente, on peut noter que :

$$\sum_{i=1}^N a_i = 1 \quad \sum_{i=1}^N b_i = 1 \quad \begin{array}{l} 0 \leq a_i \leq 1, \\ 0 \leq b_i \leq 1, \end{array}$$

Exemples de règles d'opération :

- Réduire les débordements des réservoirs

Si le souci premier est de réduire les débordements au niveau des réservoirs, alors il a été estimé que la valeur minimale de débordement total du système est obtenue quand la probabilité de débordement de chaque réservoir est identique. Ceci se traduit par l'expression mathématique suivante :

$$\text{prob}(CQ_i \geq K_i - S_i) = \text{const} \quad \forall i$$

Avec :

- CQ_i : le volume rentrant dans le réservoir i entre la fin de la période d'intérêt et la fin de la phase de recharge du réservoir,
- K_i : la capacité de stockage du réservoir i ,
- $(K_i - S_i)$: représente ainsi le volume vide dans le réservoir à la fin de la période d'intérêt.

Il a aussi été montré que si la distribution des rapports $CQ_i/E[CQ_i]$ (avec $E[]$ qui traduit l'objectif est la même pour chaque réservoir i , alors il en résulte la relation suivante :

$$\frac{K_i - S_i^*}{E[CO_i]} = \frac{\left(\sum_{j=1}^N K_j - V \right)}{\left(\sum_{j=1}^N E[CO_j] \right)}$$

Ainsi, on peut déterminer de nouvelles expressions de a_i et b_i :

$$a_i = K_i - b_i \sum_{j=1}^N K_j \quad b_i = \frac{E[CO_i]}{\sum_{j=1}^N E[CO_j]}$$

- Réduire les pertes

Supposons que la préoccupation première soit de réduire les pertes par évaporation et par infiltration. Il s'avère que très souvent les pertes au niveau des réservoirs ne sont pas négligeables, surtout lorsque ceux-ci reposent sur un sol karstique. Les pertes liées à l'infiltration sont généralement fonction de la hauteur d'eau contenue dans le réservoir et celles liées à l'évaporation sont fonction de la superficie de la surface du réservoir. Les pertes sont donc fonction du recevoir. Il résulte que si notre souci est de minimiser les pertes, alors il a été montré que la règle la plus efficace est celle pour laquelle toute l'eau V est contenue dans le réservoir m . On peut donc encore écrire cette règle sous une forme linéaire :

$$S_i^* = a_i + b_i V$$

Avec :

- $S_i^* = 0$ pour tout i
- $S_m^* = V$

- Assurer le transfert

Lorsqu'il y a des périodes avec des faibles stockages dans le système, le but n'est plus d'éviter les débordement mais de ne pas laisser un ou plusieurs réservoirs vides alors que la demande ne peut pas être satisfaite par les autres réservoirs en raison de la trop faible capacité de transfert du réseau. Dans ce cas la règle adoptée qui assure une distribution optimale est celle pour laquelle le stockage de chaque réservoir est proportionnel à la capacité de transfert de l'aqueduc qui en sort. Cela se traduit par la même forme linéaire avec les coefficients a_i et b_i qui prennent dans ce cas les valeurs suivantes :

$$a_i = 0, \quad b_i = \frac{C_i}{\sum_{j=1}^N C_j}$$

Avec C_i la capacité de transfert de l'aqueduc qui sort du réservoir i .

- *Prendre en compte les impacts de la topologie*

Prenons le cas de réservoirs en cascade sur une même rivière. Par souci d'économie, il s'avère plus avantageux de garder l'eau dans le réservoir le plus en amont de la rivière, plutôt que de devoir pomper l'eau dans le réservoir le plus en aval. Cette règle se traduit encore une fois par une forme linéaire du même type :

$$S_i^* = a_i + b_i V$$

Avec :

- $S_i^* = 0$ pour tout i
- $S_m^* = V$

- *Assurer la satisfaction des usages secondaires de l'eau*

Les usages secondaires de l'eau sont par exemple : l'irrigation, l'utilisation de l'eau pour des besoins récréatifs et de détente ou encore pour la satisfaction de besoins environnementaux... Dans de tels cas, nous voulons éviter que des réservoirs soient presque pleins alors que d'autres soient presque vides. On répartit alors la demande locale cumulée en eau (Cumulative Local Water Demand : CLD) entre les différents réservoirs. La meilleure règle qui traduit ceci est du type :

$$a_i = 0, \quad b_i = \frac{E[\text{CLD}_i]}{\sum_{j=1}^N E[\text{CLD}_j]} \quad \forall i$$

- *Autres contraintes*

Il y a également des contraintes physiques qui doivent évidemment être respectées. Le volume d'eau stocké dans un réservoir ne peut ni être négatif, ni dépasser la capacité de stockage du réservoir. Mathématiquement, cela s'écrit :

$$S_i^* = \begin{cases} 0 & a_i + b_i V < 0 \\ a_i + b_i V & 0 \leq a_i + b_i V \leq K_i \\ K_i & a_i + b_i V > K_i \end{cases}$$

- Modèle d'optimisation

La règle paramétrique traduit le volume stocké par un réservoir en fonction de a_i et b_i . Ce sont deux inconnues qu'il faut déterminer par optimisation. Leurs valeurs sont optimisées de la manière suivante :

- un modèle de simulation est tout d'abord construit sur la base d'un modèle stochastique de débits à multiples variables. Une longue série de débits est générée et passe dans le modèle de simulation pour évaluer la fonction objective du modèle d'optimisation décrit ci-après,
- Une méthode d'optimisation est utilisée pour déterminer a_i et b_i . A chaque évaluation de la fonction objectif, une ou plusieurs simulations du système sont fournies pour la période d'opération.

Pour formuler la fonction objective du modèle d'optimisation, nous devons considérer deux problèmes typiques.

Dans le premier problème, l'objectif est de maximiser la cible des débits sortants du système pour un niveau de performance donné. Mathématiquement, cela s'exprime par :

$$\max D = f_1(\mathbf{a}, \mathbf{b})$$

Avec :

$$\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_N)^T \quad \mathbf{b} = (b_1, \dots, b_N)^T.$$

La contrainte pour cette optimisation est liée à la mesure de la performance totale que le système doit avoir :

$$\text{prob} \left(\sum_{i=1}^N R_i = D \right) = \alpha$$

Avec α qui traduit le niveau de performance. Par exemple, si $\alpha = 0.95$, alors cela veut dire que sur 1000 années de simulation, 950 années vérifient $\sum R_i = D$. On peut aussi exprimer ce résultat en probabilité d'erreur α' ou $\alpha' = 1 - \alpha$.

Dans le second problème, le souci est le coût du transfert de l'eau. Nous pouvons alors formuler la fonction objective de la manière suivante :

$$\min E \left[\sum_{i=1}^N c_i(R_i) \right] = f_2(\mathbf{a}, \mathbf{b})$$

Où $C_i(R_i)$ est le coût de transfert de R_i jusqu'au lieu de consommation (ou le profit, dans le cas de production d'énergie).

- La simulation

Le modèle d'optimisation nécessite un certain nombre de simulations. Pour chaque simulation, des valeurs d'essai de a_i et b_i sont utilisées. Et à chaque période de la simulation, sont fournies les valeurs suivantes :

- le volume total V calculé par :

$$V = \sum_{i=1}^N (BS_i + Q_i - L_i - SP_i) - D$$

- les cibles de stockage S_i^* corrigées par la prise en compte des contraintes physiques,
- les débits sortants R_i de manière à satisfaire les S_i^* et tels que $0 < R_i < C_i$ (si R_i sont en dehors de ces limites alors ils prennent la valeurs de ces limites),
- la quantité d'eau débordée de chaque réservoir :

$$SP_i = \max \{0, (BS_i + Q_i - R_i - L_i - K_i)\}$$

La simulation peut aussi comprendre d'autres équations qui déterminent les fuites et les réserves de sécurité.

Supposons que les valeurs de a_i et b_i soient connues, les volumes stockés souhaités de chaque réservoir sont alors connus à chaque pas de temps grâce à l'équation (1). Cependant, leur connaissance ne peut pas être suffisante pour la spécification des valeurs exactes de toutes les variables d'état du système à cause d'au moins une des raisons suivantes :

- du fait des capacités d'écoulement des aqueducs, les volumes sortants désirés ne peuvent pas être amenés à leur aval,
- il existe de multiples moyens de transporter les volumes désirés à travers le réseau, chacun présentant des coûts de transport différents,
- des usages multiples et contradictoires de l'eau doivent être satisfaits simultanément,
- l'eau disponible est soit insuffisante pour satisfaire la demande totale, soit trop abondante pour être totalement stockée, et, donc l'hypothèse qui dépend de l'estimation du volume total V stocké dans le système est impossible.

A chaque pas de temps, après détermination des objectifs de volumes stockés dans chaque réservoir par l'équation (1), un problème d'optimisation est résolu pour spécifier les valeurs appropriées de toutes les variables d'état du système (stockage, volumes sortants, débordements et taux d'écoulement). Le problème est formulé de telle manière que la hiérarchie suivante de conditions soit satisfaite :

1. la stricte satisfaction de toutes les contraintes physiques,
2. la satisfaction, si possible, des objectifs opérationnels et des contraintes, préservant les priorités définies par l'opérateur,
3. la minimisation des écarts entre les volumes sortants réels et désirés, de manière à garantir que la politique de gestion imposée par les règles d'optimisation soit appliquée aussi bien que possible,
4. la minimisation des coûts opérationnels du système.

Annexe 2 : Débits des cours d'eau à l'amont des zones de prélèvement

| | | |
|---|---|-------------------------------------|
| Station : le Canut Nord à Maxent | Station : la Cheze à Plelan-le-grand | Station : la Rance à Guenroc |
|---|---|-------------------------------------|

| | | |
|--|---|---|
| Bassin versant du reservoir du Canut : 32,65 km ² | Bassin versant du reservoir de la Cheze : 29,84 km ² | Bassin versant du reservoir de Rophemel : 380 km ² |
|--|---|---|

| | nb jours | Q (m3/s) | H (mm) |
|------------|----------|----------|--------|
| 01/01/1990 | 31 | 0,235 | 19,28 |
| 01/02/1990 | 28,25 | 0,927 | 69,30 |
| 01/03/1990 | 31 | 0,074 | 6,07 |
| 01/04/1990 | 30 | 0,044 | 3,49 |
| 01/05/1990 | 31 | 0,019 | 1,56 |
| 01/06/1990 | 30 | 0,022 | 1,75 |
| 01/07/1990 | 31 | 0,008 | 0,66 |
| ... | ... | ... | ... |
| 01/10/2007 | 31 | 0,12 | 9,84 |
| 01/11/2007 | 30 | 0,085 | 6,75 |
| 01/12/2007 | 31 | 0,351 | 28,79 |

| | nb jours | Q (m3/s) | H (mm) |
|------------|----------|----------|--------|
| 01/01/1990 | 31 | 0,086 | 7,72 |
| 01/02/1990 | 28,25 | 0,387 | 31,66 |
| 01/03/1990 | 31 | 0,029 | 2,60 |
| 01/04/1990 | 30 | 0,013 | 1,13 |
| 01/05/1990 | 31 | 0,01 | 0,90 |
| 01/06/1990 | 30 | 0,005 | 0,43 |
| 01/07/1990 | 31 | 0,003 | 0,27 |
| ... | ... | ... | ... |
| 01/10/2007 | 31 | 0,036 | 3,23 |
| 01/11/2007 | 30 | 0,035 | 3,04 |
| 01/12/2007 | 31 | 0,156 | 14,00 |

| | nb jours | Q (m3/s) | H (mm) |
|------------|----------|----------|--------|
| 01/01/1990 | 31 | 2,480 | 17,48 |
| 01/02/1990 | 28,25 | 9,240 | 59,35 |
| 01/03/1990 | 31 | 1,470 | 10,36 |
| 01/04/1990 | 30 | 1,340 | 9,14 |
| 01/05/1990 | 31 | 0,572 | 4,03 |
| 01/06/1990 | 30 | 0,447 | 3,05 |
| 01/07/1990 | 31 | 0,218 | 1,54 |
| ... | ... | ... | ... |
| 01/10/2007 | 31 | 0,612 | 4,31 |
| 01/11/2007 | 30 | 0,733 | 5,00 |
| 01/12/2007 | 31 | 2,160 | 15,22 |

| |
|---|
| Station : Le Meu à Monfort-sur-Meu |
|---|

| | nb jours | Q (m3/s) |
|------------|----------|----------|
| 01/01/1990 | 31 | 2,47 |
| 01/02/1990 | 28,25 | 12,92 |
| 01/03/1990 | 31 | 1,96 |
| 01/04/1990 | 30 | 1,46 |
| 01/05/1990 | 31 | 0,83 |
| 01/06/1990 | 30 | 0,51 |
| 01/07/1990 | 31 | 0,33 |
| ... | ... | ... |
| 01/10/2007 | 31 | 0,59 |
| 01/11/2007 | 30 | 0,62 |
| 01/12/2007 | 31 | 2,52 |

| |
|---------------------------------------|
| Station : le Couesnon à Romazy |
|---------------------------------------|

| Moyennes interannuelles de 1968 à 2009 | |
|--|-------|
| Janvier | 9,96 |
| Fevrier | 9,88 |
| Mars | 7,7 |
| Avril | 5,66 |
| Mai | 4,78 |
| Juin | 3,1 |
| Juillet | 1,93 |
| Aout | 1,15 |
| Septembre | 1,16 |
| Octobre | 2,45 |
| Novembre | 4,22 |
| Decembre | 6,87 |
| Moy/total | 4,905 |

> Romazy est a l'aval de la prise d'eau située à Mézieres-sur-Couesnon

> Toutes ces valeurs sont très supérieures au débit de réserve de 0,3 m3/s

> On peut donc supposer qu l'on peut toujours pomper dans le Couesnon les 10000 m3/j (0,12 m3/s)

Annexe 3 : Caractéristiques des réservoirs

| Caractéristiques des réservoirs | | | |
|---|----------|----------|----------|
| | La Cheze | Le Canut | Rophemel |
| Volume maxi du barrage (hm ³) | 14,5 | 0,36 | 4,94 |
| Limite volume utilisable (hm ³) | 1,86 | 0,03 | 0,84 |
| Niveau de débordement (m) | 85 | 90 | 46,7 |
| Profondeur maxi (m) | 35 | 5 | 22,7 |

Annexe 4 : Moyennes météorologiques de Rennes

| Moyennes météorologiques Rennes | | | |
|---------------------------------|----------------|----------------|-------------------|
| Mois | Moy. Inf. (°C) | Moy. Sup. (°C) | Precip. Moy. (mm) |
| Janvier | 3 | 8 | 47,5 |
| Février | 3 | 9 | 33,5 |
| Mars | 5 | 13 | 31,5 |
| Avril | 6 | 15 | 35,9 |
| Mai | 9 | 19 | 40,7 |
| Juin | 12 | 22 | 32,6 |
| Juillet | 14 | 24 | 35 |
| Août | 14 | 24 | 24,9 |
| Septembre | 12 | 22 | 38,6 |
| Octobre | 9 | 17 | 54,2 |
| Novembre | 6 | 12 | 45,8 |
| Décembre | 4 | 9 | 50,7 |
| Moy. Ann. | 8,1 | 16,2 | 470,9 |

Annexe 5 : Prélèvements dans les ressources

| Prélèvements dans les ressources | | | | | | | | | |
|----------------------------------|------------|-----------------------------|-------------------|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Bilan 2006 | | Autorisation de prélèvement | | Capacité maximale théorique de production | | Débit réservé | | | |
| | | m ³ /j | m ³ /s | m ³ /j | m ³ /s | Déc à Mars | | autres mois | |
| | | | | | | m ³ /j | m ³ /s | m ³ /j | m ³ /s |
| RI | Captages | 20000 | 0,23 | 20000 | 0,23 | | | | |
| RII | Mézières | 10000 | 0,12 | 16000 | 0,19 | 25920 | 0,30 | 25920 | 0,30 |
| RIII | Rophemel | 30000 | 0,35 | 36000 | 0,42 | 8640 | 0,10 | 8640 | 0,10 |
| RIV | La Cheze | 75000 | 0,87 | 96000 | 1,11 | 700 | 0,01 | 1400 | 0,02 |
| | Le Canut | | | | | 1200 | 0,01 | 2400 | 0,03 |
| | Le Meu | 75000 | 0,87 | 96000 | 1,11 | 30000 | 0,35 | 30000 | 0,35 |
| (sécheresse | Bougrieres | 10000 | 0,12 | 10000 | 0,12 |) | | | |
| Total (m ³ /j) | | 135000 | | 168000 | | | | | |
| Total (m ³ /an) | | 49275000 | | 61320000 | | | | | |

Annexe 6 : Débits générés par le logiciel Hydrognomon

Station : le Canut Nord à Maxent

| | H (mm) |
|------------|--------|
| 01/10/2009 | 6,57 |
| 01/11/2009 | 7,2 |
| 01/12/2009 | 14,9 |
| 01/01/2010 | 0 |
| 01/02/2010 | 30,34 |
| 01/03/2010 | 26,37 |
| 01/04/2010 | 13,12 |
| 01/05/2010 | 0,24 |
| 01/06/2010 | 2,06 |
| 01/07/2010 | 0,3 |
| 01/08/2010 | 0 |
| 01/09/2010 | 0,58 |
| 01/10/2010 | 4,59 |
| 01/11/2010 | 0 |
| 01/12/2010 | 0 |
| ... | ... |
| 01/05/3009 | 7,79 |
| 01/06/3009 | 2,56 |
| 01/07/3009 | 0,19 |
| 01/08/3009 | 0 |
| 01/09/3009 | 1,99 |

Station : la Cheze à Plélan-le-grand

| | H (mm) |
|------------|--------|
| 01/10/2009 | 4,8 |
| 01/11/2009 | 7,25 |
| 01/12/2009 | 10,94 |
| 01/01/2010 | 3,51 |
| 01/02/2010 | 19,37 |
| 01/03/2010 | 15,06 |
| 01/04/2010 | 5,34 |
| 01/05/2010 | 0 |
| 01/06/2010 | 1,59 |
| 01/07/2010 | 0,3 |
| 01/08/2010 | 0,26 |
| 01/09/2010 | 0,92 |
| 01/10/2010 | 2,12 |
| 01/11/2010 | 0 |
| 01/12/2010 | 0 |
| ... | ... |
| 01/05/3009 | 2,13 |
| 01/06/3009 | 1,84 |
| 01/07/3009 | 0,05 |
| 01/08/3009 | 0,09 |
| 01/09/3009 | 3,44 |

Station : la Rance à Guenroc

| | H (mm) |
|------------|--------|
| 01/10/2009 | 8,41 |
| 01/11/2009 | 8,41 |
| 01/12/2009 | 12,05 |
| 01/01/2010 | 0 |
| 01/02/2010 | 29,57 |
| 01/03/2010 | 25,03 |
| 01/04/2010 | 16,98 |
| 01/05/2010 | 7,76 |
| 01/06/2010 | 4,08 |
| 01/07/2010 | 1,27 |
| 01/08/2010 | 0,64 |
| 01/09/2010 | 1,48 |
| 01/10/2010 | 5,72 |
| 01/11/2010 | 4,26 |
| 01/12/2010 | 0 |
| ... | ... |
| 01/05/3009 | 20,21 |
| 01/06/3009 | 7,14 |
| 01/07/3009 | 2,27 |
| 01/08/3009 | 1,26 |
| 01/09/3009 | 6,92 |

Station : Le Meu à Monfort-sur-Meu

| | Q (m3/s) |
|------------|----------|
| 01/10/2009 | 0,87 |
| 01/11/2009 | 1 |
| 01/12/2009 | 2,08 |
| 01/01/2010 | 0,38 |
| 01/02/2010 | 5,25 |
| 01/03/2010 | 4,08 |
| 01/04/2010 | 2,61 |
| 01/05/2010 | 0,71 |
| 01/06/2010 | 0,86 |
| 01/07/2010 | 0,24 |
| 01/08/2010 | 0,1 |
| 01/09/2010 | 0,24 |
| 01/10/2010 | 0,64 |
| 01/11/2010 | 0,63 |
| 01/12/2010 | 0 |
| ... | ... |
| 01/05/3009 | 2,16 |
| 01/06/3009 | 1,04 |
| 01/07/3009 | 0,27 |
| 01/08/3009 | 0,11 |
| 01/09/3009 | 1,04 |

Annexe 7 : Consommations électriques

Consommations électriques

| Annee | | Mézières S/ Couesnon | Rophémel | Villejean | Cheze | Mordelles | Bougrières | Bédée | Gallets | Total |
|---------|----------|----------------------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|
| 2002 | M3/an | 1 509 550 | 5 536 600 | 10 107 980 | - | - | - | - | - | - |
| 2003 | | 2 110 860 | 7 356 074 | 8 039 085 | - | - | - | - | - | - |
| 2004 | | 2 688 522 | 7 145 541 | 8 067 842 | 7 241 190 | 1 677 818 | - | 7 145 541 | 5 486 872 | - |
| 2005 | | 3 481 081 | 8 921 322 | 6 535 110 | 3 905 740 | 3 059 372 | 118 258 | 8 921 322 | 6 224 741 | - |
| 2006 | | 2 223 965 | 8 091 844 | 8 889 227 | 7 404 691 | 1 677 162 | 362 187 | 8 091 844 | 4 856 245 | - |
| 2007 | | 2 765 540 | 8 489 945 | 10 488 744 | 4 641 288 | 261 179 | 6 453 | 8 489 945 | 6 799 250 | - |
| 2008 | | 2 718 730 | 8 062 126 | 10 838 534 | - | - | 10 303 | 8 062 126 | - | - |
| 2002 | KW/H/an | 623 078 | 2 973 523 | 3 484 489 | - | - | - | - | - | - |
| 2003 | | 747 734 | 3 913 362 | 3 090 492 | - | - | - | - | - | - |
| 2004 | | 807 286 | 3 164 927 | 2 952 243 | 10 748 | 633 578 | 7 711 | 5 195 | 418 000 | 7 999 688 |
| 2005 | | 1 144 633 | 5 238 884 | 2 438 462 | 5 947 | 1 322 616 | 45 433 | 1 572 | 485 434 | 10 682 981 |
| 2006 | | 821 239 | 4 787 164 | 2 883 844 | 4 056 | 527 257 | 169 660 | 1 491 | 403 125 | 9 597 836 |
| 2007 | | 935 023 | 4 787 164 | 3 126 294 | 13 501 | 165 254 | 9 318 | 1 565 | 436 336 | 9 474 455 |
| 2008 | | 906 878 | 4 467 267 | 2 957 528 | - | - | 16 038 | 23 080 | - | - |
| Moyenne | KW/H/an | 855 124 | 4 190 327 | 2 990 479 | 8 563 | 662 176 | 49 632 | 6 581 | 435 724 | 9 198 606 |
| 2002 | KWh-1/M3 | 0,413 | 0,537 | 0,345 | - | - | - | - | - | - |
| 2003 | | 0,354 | 0,532 | 0,384 | - | - | - | - | - | - |
| 2004 | | 0,300 | 0,443 | 0,366 | 0,001 | 0,378 | - | 0,001 | 0,076 | - |
| 2005 | | 0,329 | 0,587 | 0,373 | 0,002 | 0,432 | 0,384 | 0,000 | 0,078 | - |
| 2006 | | 0,369 | 0,592 | 0,324 | 0,001 | 0,314 | 0,468 | 0,000 | 0,083 | - |
| 2007 | | 0,338 | 0,564 | 0,298 | 0,003 | 0,633 | 1,444 | 0,000 | 0,064 | - |
| 2008 | | 0,334 | 0,554 | 0,273 | - | - | 1,557 | 0,003 | - | - |
| Moyenne | KWh-1/M3 | 0,348 | 0,544 | 0,338 | 0,002 | 0,439 | 0,963 | 0,001 | 0,075 | - |

Annexe 8 : Exemples de simulation

| | | |
|----------------------|---|---|
| Simulation 1 | <p style="text-align: center;">Le Canut Canut (RENNES IV)</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Le débit réservé dans Le Canut est atteint, - Le niveau de remplissage du barrage du Canut est respecté, - De l'eau coule du barrage du Canut vers celui de La Cheze, <p>=> Il n'y a aucun problème sur cette partie là du réseau.</p> |
| Simulation 6 | <p style="text-align: center;">Le Canut Canut (RENNES IV)</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Le débit réservé dans Le Canut est atteint, - Le niveau de remplissage du barrage du Canut est respecté, - Il n'y a aucun écoulement entre le barrage du Canut et celui de La Cheze, <p>=> Nous pouvons observer ici l'effet de l'objectif « débit réserve dans Le Canut », puisque l'eau est en premier lieu acheminée vers le milieu naturel au lieu d'être prélevée.</p> |
| Simulation 33 | <p style="text-align: center;">Le Canut Canut (RENNES IV)</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Le débit réservé dans Le Canut est atteint, - La couleur rouge indique que le niveau minimum de remplissage du barrage n'est plus atteint, ce n'est pas primordial. - Il n'y a aucun écoulement entre le barrage du Canut et celui de La Cheze, <p>=> A ce moment de la simulation le débit du Canut à l'amont du barrage est trop faible pour permettre un remplissage de celui-ci et une utilisation de son eau.</p> |
| Simulation 64 | <p style="text-align: center;">Le Canut Canut (RENNES IV)</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Le débit réservé dans Le Canut n'est plus atteint (couleur rouge), - La couleur rouge indique que le niveau minimum de remplissage du barrage n'est plus atteint, ce n'est pas primordial. - Il n'y a aucun écoulement entre le barrage du Canut et celui de La Cheze, <p>=>La situation est critique : il n'y a même plus assez d'eau dans le Canut pour que le débit de réserve soit atteint.</p> |