

## PROJET REXHYSS

**IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE  
SUR LES RESSOURCES EN EAU  
ET LES EXTREMES HYDROLOGIQUES  
DANS LES BASSINS DE LA SEINE ET LA SOMME**

**Evaluation de l'impact du changement climatique  
sur les étiages du bassin versant de la Seine**



**hydratec**

Tour Gamma D  
58, quai de la Rapée  
75583 PARIS CEDEX 12  
tel : 01.40.04.61.02  
fax : 01.43.42.24.39

Réf : 23459 TL/ALP  
Date : juin 2009

## SOMMAIRE

|          |                                                                   |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUCTION</b>                                               | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>METHODOLOGIE DEVELOPPEE</b>                                    | <b>4</b>  |
| 2.1      | STATIONS D'APPORT DU MODELE                                       | 4         |
| 2.2      | METHODE D'EVALUATION DE LA RECHARGE DE LA NAPPE                   | 6         |
| 2.3      | METHODE D'EVALUATION DES CONSOMMATIONS ANTHROPIQUES               | 7         |
| 2.3.1    | <i>Prélèvements annuels AEP et industries</i>                     | 7         |
| 2.3.2    | <i>Prélèvements annuels agricoles</i>                             | 8         |
| 2.3.3    | <i>Des prélèvements aux consommations</i>                         | 9         |
| 2.3.4    | <i>Modulation annuelle des consommations</i>                      | 10        |
| 2.4      | HYPOTHESES RETENUES POUR LE CALCUL ET SIMULATIONS EFFECTUEES      | 10        |
| <b>3</b> | <b>ANALYSE DES DEFAILLANCES LIEES AU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE</b> | <b>12</b> |
| 3.1      | METHODE D'ANALYSE DES DEFAILLANCES                                | 12        |
| 3.1.1    | <i>Points de bilan</i>                                            | 12        |
| 3.1.2    | <i>Paramètres d'analyse</i>                                       | 13        |
| 3.2      | RESULTATS EN TEMPS PRESENT                                        | 14        |
| 3.3      | IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES DEFAILLANCES HYDRIQUES    | 15        |

## **LISTE DES FIGURES**

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 Stations d'apport du modèle HYDRA-BV .....                                                          | 4  |
| Figure 2 Nappes intensément exploitées du bassin versant de la Seine.....                                    | 6  |
| Figure 3 Coefficients de modulation interannuelle des prélèvements agricoles pour le secteur d'Auxerre ..... | 9  |
| Figure 4 Répartition mensuelle des consommations .....                                                       | 10 |
| Figure 5 Carte de localisation des points de bilan.....                                                      | 12 |
| Figure 6 Impact du changement climatique MS sur les défaillances avec l'hypothèse RC1 .....                  | 17 |
| Figure 7 Impact du changement climatique MS sur les défaillances avec l'hypothèse GM .....                   | 18 |

## **LISTE DES TABLEAUX**

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 Liste des stations d'apport du bassin versant de la Seine .....                 | 5  |
| Tableau 2 Liste des points de bilan.....                                                  | 13 |
| Tableau 3 Caractérisation des défaillances en Temps Présent avec l'hypothèse RC1 .....    | 14 |
| Tableau 4 Caractérisation des défaillances en Temps Présent avec l'hypothèse GM .....     | 14 |
| Tableau 5 Caractérisation des défaillances en Milieu de Siècle avec l'hypothèse RC1 ..... | 16 |
| Tableau 6 Caractérisation des défaillances en Milieu de Siècle avec l'hypothèse GM.....   | 16 |

# 1 INTRODUCTION

Hydratec a réalisé en 2007 une étude de bilan prospectif « besoins-ressources » pour le compte de l'Agence de l'eau Seine-Normandie. Ce bilan a été réalisé sur l'ensemble du bassin Seine-Normandie, à partir :

- de plusieurs scénarios tendanciels des besoins et des consommations,
- d'une série chronologique de débits naturels reconstitués sur la période 1975-2003.

Ce bilan a permis de dégager un diagnostic contrasté selon les bassins versants. Il a permis également de quantifier le rôle de soutien d'étiage joué par les Grands Lacs Réservoirs du bassin de la Seine et d'analyser la part des différentes usages consommateurs d'eau. Ce travail a fait l'objet d'un article publié dans le numéro 5-2008 du journal de la Houille Blanche.

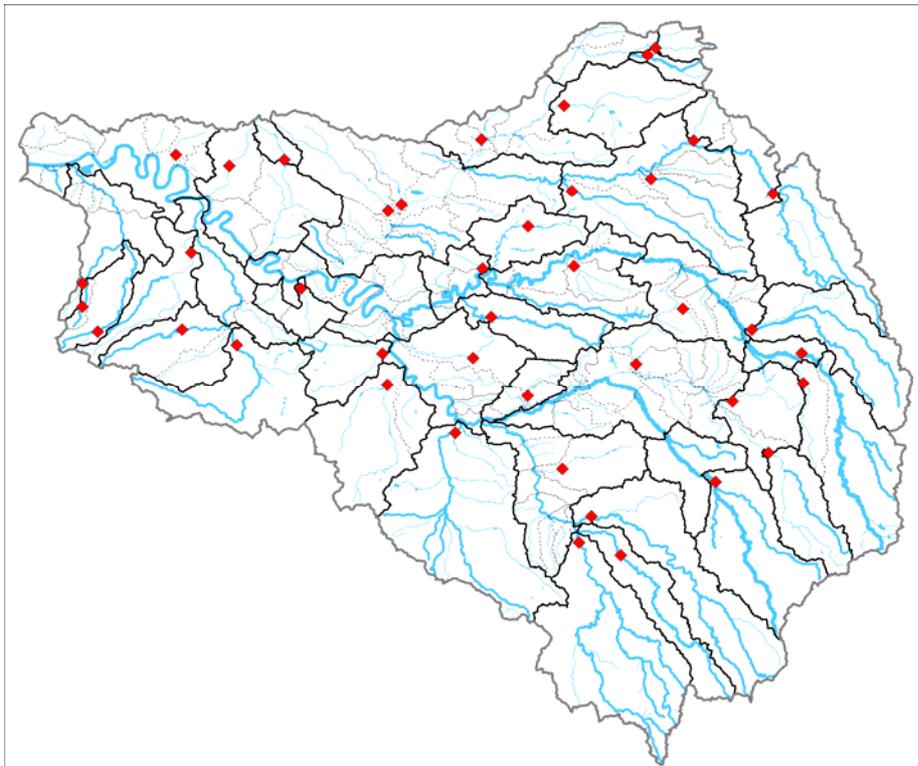
Il est proposé dans le cadre du projet RExHySS de mettre à profit le travail réalisé dans l'étude prospective en appliquant une modification de l'hydrologie naturelle induite par le changement climatique au modèle HYDRA-BV développé, de façon à en évaluer les conséquences sur la ressource en eaux superficielles. Cette hydrologie modifiée par le changement climatique est générée par le modèle MODCOU utilisé dans le volet 2 du projet.

## 2 METHODOLOGIE DEVELOPPEE

Le présent chapitre vise à apporter des compléments d'informations à l'équipe du projet sur quelques points particuliers de la mécanique de calculs retenue dans l'élaboration du modèle HYDRA-BV.

### 2.1 STATIONS D'APPORT DU MODELE

La liste des stations d'apport du modèle HYDRA-BV développé dans le cadre de l'étude de la ressource en eaux superficielles du bassin versant Seine-Normandie, réduite au bassin versant de la Seine, est présentée dans le tableau ci-après.



**Figure 1** Stations d'apport du modèle HYDRA-BV

Les hydrogrammes d'apport des autres sous-bassins versant de l'aire d'étude seront déduits des hydrogrammes aux stations d'apport via des corrélations débit / débit, calées lors de l'étude prospective AESN.

| Station               | Riviere     | Code_station | X         | Y          |
|-----------------------|-------------|--------------|-----------|------------|
| Mouron                | Aisne       | H6201010     | 778019.95 | 2481699.96 |
| Ecly                  | Vaux        | H6233020     | 741922.96 | 2506379.05 |
| Orainville            | La Suipe    | H6313020     | 722557.05 | 2488668.07 |
| Braine                | Vesle       | H6432010     | 686622.05 | 2482914.04 |
| Vascoeuil             | Andelle     | H8212010     | 530820.05 | 2494619.96 |
| Bri non-sur-Armançon  | Armançon    | H2482010     | 695309.01 | 2332575.99 |
| Bar-sur-Aube          | Aube        | H1201010     | 775964.04 | 2361715.07 |
| Saint-Saturnin        | Superbe     | H5841010     | 715670.05 | 2402865.98 |
| Lassicourt            | Voire       | H1362010     | 759527.05 | 2385546.02 |
| Acon                  | Avre        | H9202010     | 509400.06 | 2418800.03 |
| Jutigny               | La Voulzie  | H1932020     | 666434.00 | 2388052.98 |
| Nogent-sur-Oise       | La Br che   | H7602010     | 609069.96 | 2476661.97 |
| ND-de-Bondeville      | Cailly      | H9913020     | 506509.98 | 2499805.06 |
| Gournay-en-Bray       | Epte        | H8012010     | 555860.02 | 2497410.03 |
| Charpont              | Eure        | H9121010     | 534142.04 | 2411743.01 |
| Normanville           | Iton        | H9402030     | 513510.05 | 2454300.01 |
| Ballancourt           | Essonne     | H4042010     | 602712.04 | 2393314.04 |
|  pisy                 | Loing       | H3621010     | 633514.99 | 2371066.98 |
| Congis-sur-Thérouanne | Thérouanne  | H5613020     | 645936.97 | 2446995.99 |
| Louvemont             | Blaise      | H5083050     | 791672.04 | 2393952.98 |
| Saint-Dizier          | Marne       | H5071010     | 791057.96 | 2407903.06 |
| Soudron               | Soude       | H5213310     | 737009.96 | 2428350.02 |
| Saint-Eugène          | Surmelin    | H5302010     | 687444.98 | 2448088.05 |
| Aulnay-sur-Mauldre    | Mauldre     | H7913030     | 563378.05 | 2437809.97 |
| Hirson                | Oise        | H7021010     | 724574.01 | 2548793.07 |
| Origny-en-Thiérache   | Thon        | H7033010     | 721043.04 | 2545585.07 |
| Passel                | Divette     | H7413210     | 645427.03 | 2506707.06 |
| Morsang-sur-Orge      | Orge        | H4252010     | 600344.05 | 2407667.96 |
| Chouy                 | Ourcq       | H5522010     | 666568.96 | 2466654.97 |
| Pommeuse              | Grand Morin | H5732010     | 649820.00 | 2424700.02 |
| Bocquencé             | Charentonne | I0102010     | 463900.05 | 2429340.00 |
| Montreuil-l'Argill    | Guiel       | I0113010     | 464260.02 | 2440129.96 |
| Rai-sur-Risle         | Risle       | I0011010     | 471009.99 | 2417880.05 |
| Vitry-en-Perthois     | Saulx       | H5172010     | 768479.00 | 2418840.01 |
| Bar-sur-Seine         | Seine       | H0400010     | 751915.99 | 2348364.98 |
| Chablis               | Serein      | H2342010     | 708712.03 | 2314709.08 |
| Nouvion-et-Catillon   | la Serre    | H7162010     | 682898.95 | 2522311.03 |
| Maysel                | Th rain     | H7742020     | 603010.95 | 2473814.06 |
| Courtomer [Paradis]   | Yerres      | H4322030     | 641607.00 | 2405678.04 |
| Pont-sur-Vanne        | Vanne       | H2622010     | 682173.05 | 2354518.98 |
| Gurgy                 | Yonne       | H2221010     | 689685.01 | 2320564.96 |

**Tableau 1** Liste des stations d'apport du bassin versant de la Seine

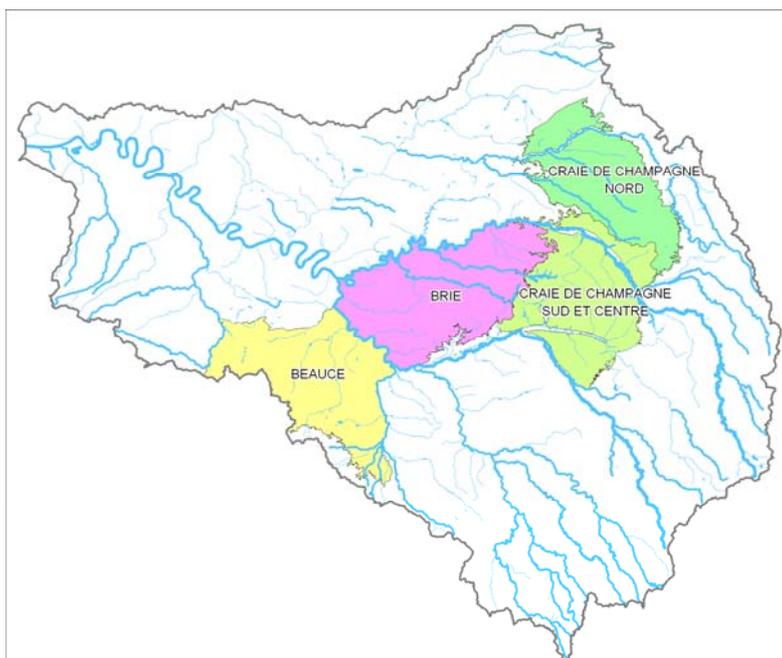
## 2.2 METHODE D'EVALUATION DE LA RECHARGE DE LA NAPPE

L'impact des prélèvements en nappes intensément exploitées du secteur d'étude (Beauce, Brie, Craie de Champagne Nord, Sud et Centre) est évalué à l'aide de la méthode de la ressource disponible.

La « ressource disponible » ou « réserve disponible » (RD) est la part de la ressource qui peut en première approximation être prélevée sans affecter l'étiage des cours d'eau exutoires. **Au-delà de ce volume, tout prélèvement est considéré comme directement imputable au débit des cours d'eau superficiels exutoires.**

La méthode de calcul est la suivante :

- 1) identification de la nappe dans laquelle est effectuée le prélèvement, et donc de la somme des prélèvements annuels sur la même nappe (V), tous usages confondus (AEP, industries, agriculture),
- 2) estimation de la ressource disponible RD (en volume annuel),
- 3) calcul de l'impact en volume annuel sur la ressource (Impact = V-RD),
- 4) traduction de cet impact en volume sur un impact en flux en temps d'étiage, au prorata de la surface du sous-bassin versant surplombant la masse d'eau, et moyennant un décalage temporel de 6 mois.



**Figure 2** Nappes intensément exploitées du bassin versant de la Seine

En l'absence d'outils pour quantifier la « ressource disponible » sur chacune des nappes intensément exploitées identifiées, il a été décidé, en concertation avec la DIREN Ile-de-France et l'équipe du PIREN-Seine travaillant sur les eaux souterraines, de **considérer que cette ressource disponible pouvait être prise égale à un certain pourcentage de la recharge moyenne interannuelle de l'aquifère** (aussi dite « pluie efficace ») en première approximation.

Ce pourcentage a été évalué pour la nappe de Beauce, la seule pour laquelle une modélisation a été effectuée dans ce but, à environ 20% de la recharge moyenne interannuelle (source : DIREN Ile de France). Il est par ailleurs estimé plus proche de 10% pour les nappes crayeuses de Haute-Normandie (même source).

**En l'absence d'évaluation de la ressource disponible sur l'ensemble des nappes étudiées, nous avons choisi de la considérer égale à :**

- **20 % de la recharge moyenne interannuelle pour les nappes de Beauce (4092) et de Brie (3103),**
- **10% de la recharge moyenne interannuelle pour les nappes de Champagne crayeuse (3207 et 3208).**

**Les recharges interannuelles de ces nappes nous ont été fournies sur la période modélisée (1975-2003) par le PIREN-Seine et constituent des résultats de modélisation du modèle couplé STICS-MODCOU.**

Afin d'établir l'impact sur les eaux superficielles, le volume total des prélèvements annuels dans les nappes intensément exploitées doit être établi pour l'ensemble de la période étudiée (1975-2003). La détermination de ces volumes totaux est détaillée au paragraphe suivant.

## **2.3 METHODE D'EVALUATION DES CONSOMMATIONS ANTHROPIQUES**

Les prélèvements anthropiques annuels de la période 1975-2003 sont reconstitués usage par usage (AEP, Industries, Agriculture) à partir des prélèvements de référence de l'année 2004 issus de la base de données « Redevance » de l'Agence de l'Eau. La reconstitution des volumes annuels prélevés est basée sur l'élaboration de coefficients de modulation annuels appliqués à l'année 2004, qui sont décrits dans les paragraphes ci-dessous.

Dans le cas particulier des barrages réservoirs, les chroniques de lâchers / retenues réels ont été obtenues auprès de l'IIBRBS entre 1975 et 2003. Le comportement théorique de ces ouvrages a par ailleurs été paramétré explicitement dans le modèle Hydra-BV, permettant de recourir à une gestion théorique des barrages dans certains scénarios modélisés (notamment les scénarios prospectifs).

### **2.3.1 Prélèvements annuels AEP et industries**

Pour les usages AEP et industrie, les niveaux de prélèvements annuels sont reconstitués :

- pour les prélèvements non individualisés, sur la base de données fournies par l'étude IFEN 2004<sup>1</sup> (indiquant des coefficients de modulation interannuels valables pour

---

<sup>1</sup> Les prélèvements d'eau en France en 2001, IFEN, mars 2004

l'ensemble de la France) et des données de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie sur la période 1999-2003 ;

- pour les prélèvements individualisés, sur la base des données recueillies dans le cadre de l'étude auprès des gestionnaires d'ouvrage (producteurs AEP et EDF essentiellement).

### 2.3.2 Prélèvements annuels agricoles

Pour l'usage agricole, une méthode spécifique a été développée dans l'étude prospective, puisqu'aucune donnée fiable n'est disponible sur la période d'étude, étant donné que l'installation des compteurs sous l'impulsion de l'Agence de l'Eau s'est faite progressivement.

**On considère que pour cet usage, deux paramètres déterminent le volume prélevé pour l'irrigation des terres cultivées :**

- **la surface irriguée**

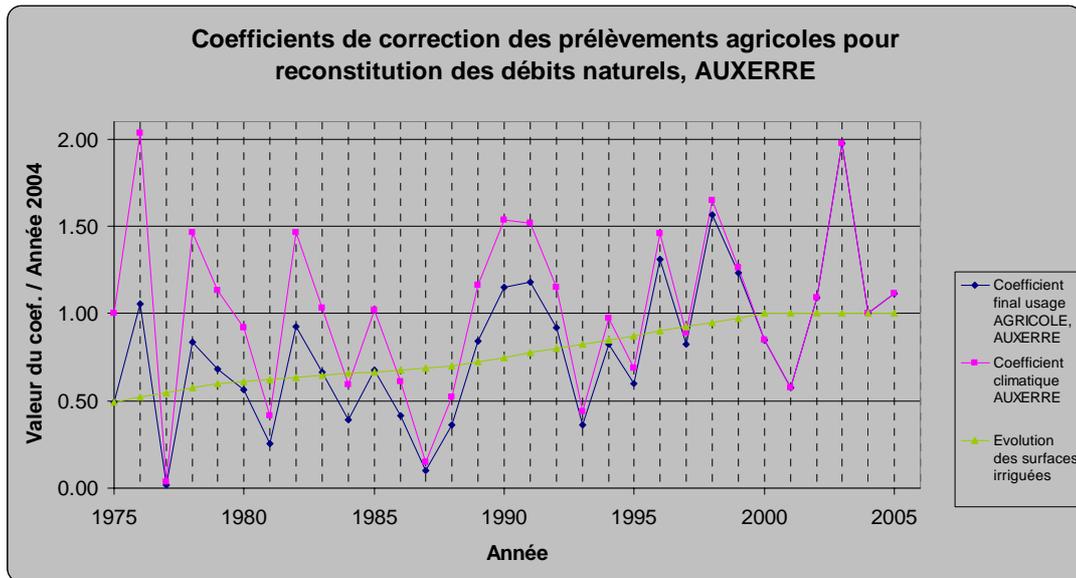
L'évolution des surfaces irriguées pendant la période d'étude (1975-2003) est issue des Renseignements Généraux Agricoles. L'interpolation linéaire entre ces recensements décennaux fournit un coefficient interannuel d'évolution des surfaces irriguées, que l'on considère valable pour l'ensemble du bassin.

- **le bilan hydrique**

On considère que les besoins en irrigation sont aussi proportionnels au déficit de pluie utile (ETP - pluie nette). On estime par ailleurs que l'agriculteur réagit de manière proportionnée à ce déficit selon la période : il comble la totalité ou presque des besoins des plantes en juillet-août, mais une partie seulement de ces besoins en mai-juin et septembre-octobre, ce qui traduit la modulation mensuelle de l'irrigation.

L'année de référence étant l'année 2004, pour laquelle on dispose de la base de données « Redevance agricole » de l'Agence de l'Eau, le coefficient climatique servant à déterminer les prélèvements agricoles annuels sur la période 1975-2003 est un coefficient multiplicateur annuel défini par le rapport entre le bilan hydrique de l'année considérée et celui de 2004.

→ Ainsi, pour chaque grand secteur hydro-climatique identifié (secteurs homogènes du point de vue des isohyètes annuels et du contexte géologique), **le coefficient de modulation interannuelle du volume annuel prélevé pour l'irrigation est égal au produit du coefficient interannuel représentant l'évolution des surfaces irriguées et du coefficient climatique interannuel fondé sur le bilan hydrique.**



**Figure 3** Coefficients de modulation interannuelle des prélèvements agricoles pour le secteur d'Auxerre

### 2.3.3 Des prélèvements aux consommations

Les consommations annuelles ont été déduites des prélèvements annuels selon les ratios fournis par l'étude IFEN de 2004 citée ci-dessus. Les ratios généraux sont les suivants :

- Eau potable : 24%
- Industrie : 7%
- Centrales thermiques à flamme : 0.7 % (information corroborée par les enquêtes menées lors de l'étude prospective des besoins)
- Irrigation : 100% pour l'irrigation non gravitaire, ce qui est le cas dans le bassin Seine-Normandie.

Les ratios utilisés pour certains prélèvements singuliers sont :

- Centrales EDF de Nogent-sur-Seine, Flamanville, Paluel, Penly : 30%
- Usines TIRU de Paris XIIIème et d'Issy-les-Moulineaux : 31.6 %

Sur le secteur de l'Île de France sur lequel les prélèvements des principales usines sont individualisés (canaux, usines de production d'eau potable, stations d'épuration et aqueducs de la région parisienne), le point de prélèvement et le point de rejet ne peuvent être confondus dans le modèle en raison de la présence de points de bilan intermédiaires (ex : Paris-Austerlitz, Alfortville...). Le modèle prend alors explicitement en compte 100% du prélèvement et intègre également les rejets de stations d'épuration (données recueillies auprès des gestionnaires pour toute la période d'étude et/ou éventuellement reconstituées selon des méthodes diverses en fonction du niveau d'information disponible).

### 2.3.4 Modulation annuelle des consommations

En accord avec le comité de pilotage de l'étude des besoins prospectifs du bassin Seine-Normandie, la répartition mensuelle des consommations suivante a été retenue pour l'ensemble du bassin :

| Mois      | AEP  | INDUSTRIES | AGRI-CULTURE |
|-----------|------|------------|--------------|
| Janvier   | 8.1% | 9.1%       | 0.0%         |
| Février   | 8.1% | 8.3%       | 0.0%         |
| Mars      | 8.3% | 9.1%       | 0.0%         |
| Avril     | 8.1% | 10.0%      | 7.5%         |
| Mai       | 8.6% | 9.1%       | 15.0%        |
| Juin      | 8.9% | 8.3%       | 20.0%        |
| Juillet   | 8.7% | 6.6%       | 25.0%        |
| Août      | 8.0% | 5.8%       | 25.0%        |
| Septembre | 8.8% | 6.6%       | 7.5%         |
| Octobre   | 8.5% | 9.1%       | 0.0%         |
| Novembre  | 8.4% | 9.1%       | 0.0%         |
| Décembre  | 7.6% | 9.1%       | 0.0%         |

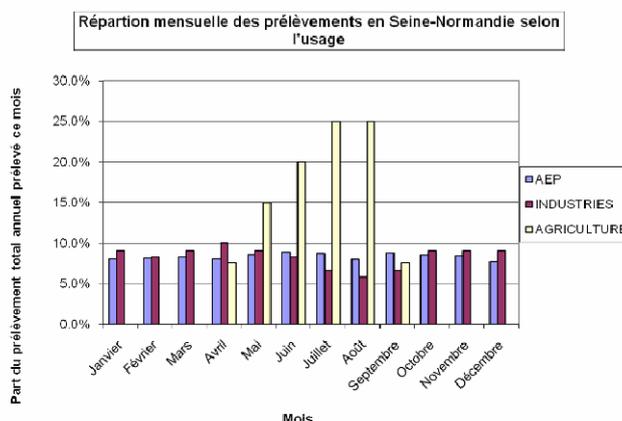


Figure 4 Répartition mensuelle des consommations

Les sources ayant contribué à ces répartitions sont :

- Pour l'AEP : « Etude prospective des besoins en eau dans le bassin amont de la Seine », Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne, 1995 (données SAGEP pour la ville de Paris)
- Industrie : « Etude de faisabilité d'un transfert d'eau par canalisation entre les barrages-réservoirs et la région parisienne », étude Hydratec-Setude-Safege, 1994
- Agriculture : données « à dire d'experts », Hydratec 2006

## 2.4 HYPOTHESES RETENUES POUR LE CALCUL ET SIMULATIONS EFFECTUEES

Deux scénarios d'évolution sont modélisés à l'aide d'Hydra-BV :

- Temps présent : entre le 01/01/1961 et le 31/12/2000 ;
- Milieu de Siècle : entre le 01/01/2046 et le 31/12/2065.

Pour chacune de ces deux périodes, il a été choisi en concertation avec le Sisyphe de générer les ruissellements issus des données climatiques RC1 et GM. Quatre simulations hydrologiques sont donc présentées dans le chapitre ci-après.

Les données d'entrée du modèle hydrologique Hydra-BV, issues des calculs du modèle hydrogéologique Modcou (Armines) à partir des données des deux modèles climatiques RC1 et GM pour les deux scénarios d'évolution, sont les suivantes :

- Hydrogrammes d'apport aux principales stations hydrométriques du bassin versant Seine-Normandie (cf. §2.1). Il a été considéré que ces hydrogrammes étaient naturels, c'est-à-dire exsangues de toute consommation anthropique ainsi que de l'action des barrages réservoirs ;

- Recharges annuelles des quatre nappes intensément exploitées du bassin versant (cf. §2.2) ;
- Pluies et ETP mensuelles nécessaires au calcul des consommations agricoles (cf. §2.3.2).

Enfin, dans le but de pouvoir analyser l'influence du changement climatique sur les stress en étiage, toute chose étant égale par ailleurs, il a été considéré que **les surfaces irriguées, les consommations en eau potable et les consommations industrielles sont constantes et identiques dans les quatre scénarios.**

### 3 ANALYSE DES DEFAILLANCES LIEES AU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE

#### 3.1 METHODE D'ANALYSE DES DEFAILLANCES

##### 3.1.1 Points de bilan

Les résultats fournis par le modèle pourront être analysés au niveau des « points de bilan » suivants :

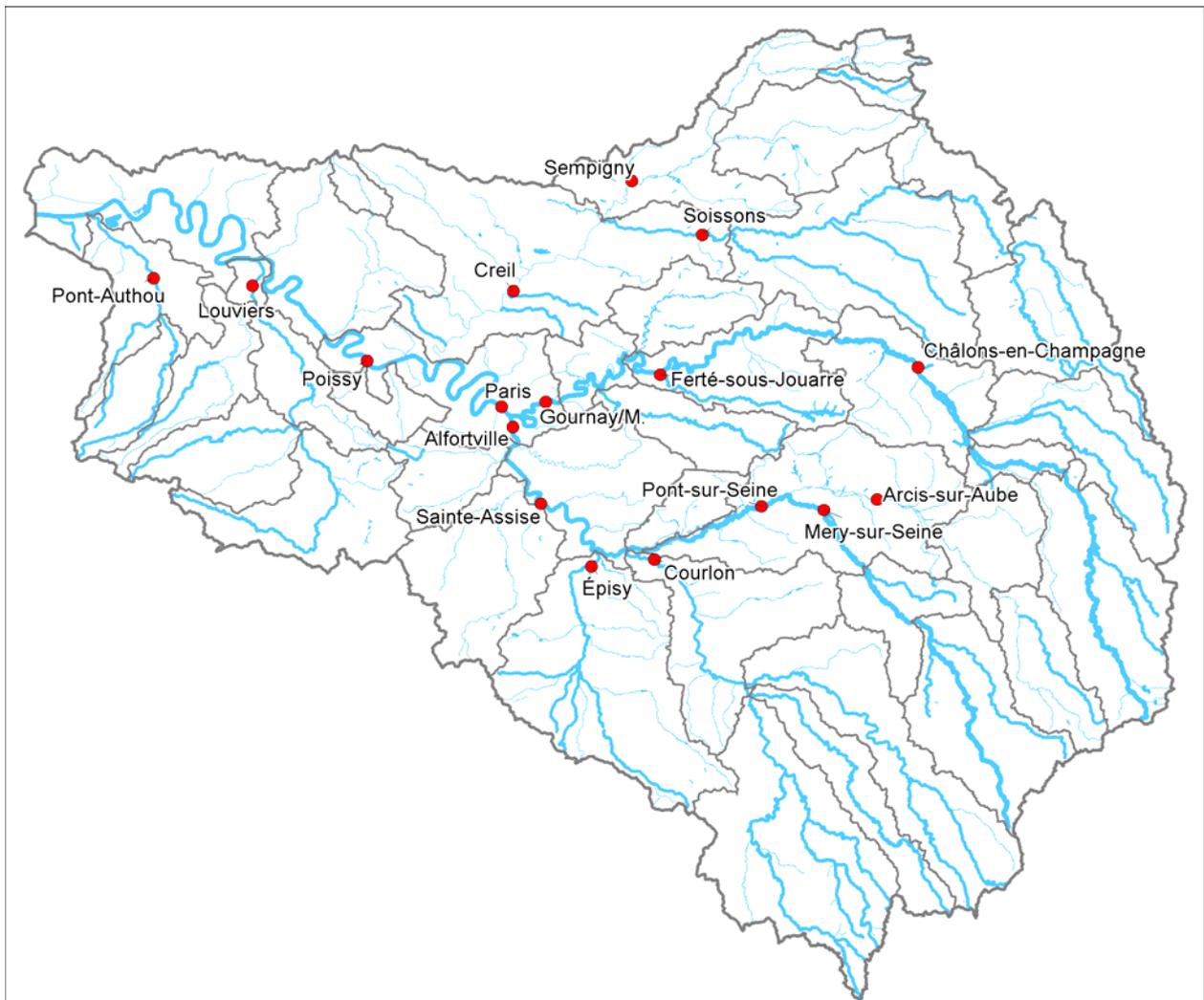


Figure 5 Carte de localisation des points de bilan

**Tableau 2** Liste des points de bilan

### 3.1.2 Paramètres d'analyse

A l'issue de l'étude prospective des besoins en eau superficielle du bassin versant Seine-Normandie, il est apparu que le paramètre le plus pertinent pour caractériser les défaillances hydrologiques en un point donné est le **nombre de jours moyens annuels passés sous un débit seuil caractéristique**.

Afin que ce débit seuil soit adapté à chaque point de bilan en fonction de ses caractéristiques hydrologiques propres, il a été pris égal au QMNA<sub>5</sub> observé reconstitué. Le QMNA<sub>5</sub> observé est le débit mensuel minimal ayant la probabilité 1/5 de ne pas être dépassé une année donnée en situation hydrologique réelle (avec consommations anthropiques et actions des barrages réservoirs). Le QMNA<sub>5</sub> observé a été reconstitué sur la période 1975 – 2003 à l'aide d'Hydra-BV à l'occasion de l'étude prospective de la ressource sur le bassin Seine Normandie, et ce, afin de palier aux lacunes de données affectant certaines stations hydrométriques. Pour les stations disposant d'une série de mesures suffisamment longues, la reconstitution offre de bons résultats. Cette méthode a par ailleurs permis de mettre en exergue la faible fiabilité de la station de Paris-Austerlitz à l'étiage. Dans la suite du rapport, le QMNA<sub>5</sub> observé reconstitué sera désigné « **débit seuil** ».

Par ailleurs, afin de caractériser respectivement la fréquence et la durée du stress hydrique, le **nombre moyen annuel de défaillances** (i.e le nombre de franchissements moyens annuels de ce débit seuil), ainsi que la **durée moyenne de la défaillance** (nbre jours sous Qseuil / nbre de franchissements) ont été calculés pour chacun des scénarios modélisés.

### 3.2 RESULTATS EN TEMPS PRESENT

Les tableaux suivants caractérisent les défaillances hydriques du Temps Présent (TP) pour les deux hypothèses climatiques considérées.

| BV            | Nom Station          | Cours d'eau | Code station | Surface BV station | Qseuil (m3/s) | Nb jours moy annuel sous Qseuil | Nb franchiss. moy annuel du Qseuil | Ratio Nbjours / Nbfranchiss |
|---------------|----------------------|-------------|--------------|--------------------|---------------|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| OISE AISNE    | Soissons             | Aisne       | H6501020     | 7 341              | 12.2          | 3                               | 1                                  | 3                           |
|               | Sempigny             | Oise        | H7401010     | 4 290              | 8.5           | 38                              | 2                                  | 19                          |
|               | Creil                | Oise        | H7611011     | 14 200             | 38.6          | 31                              | 2                                  | 16                          |
| MARNE         | Châlons-en-Champagne | Marne       | H5201010     | 6 280              | 16.0          | 37                              | 1                                  | 37                          |
|               | Ferté-sous-Jouarre   | Marne       | H5321010     | 8 480              | 21.1          | 37                              | 1                                  | 37                          |
|               | Gournay-sur-Marne    | Marne       | H5841020     | 12 600             | 27.7          | 42                              | 1                                  | 42                          |
| SEINE AMONT   | Arcis-sur-Aube       | Aube        | H1501010     | 3 590              | 4.9           | 2                               | 1                                  | 2                           |
|               | Mery-sur-Seine       | Seine       | H0810010     | 3 880              | 5.6           | 86                              | 2                                  | 43                          |
|               | Pont-sur-Seine       | Seine       | H1700010     | 8 760              | 18.3          | 56                              | 2                                  | 28                          |
|               | Courlon              | Yonne       | H2721010     | 10 700             | 25.7          | 119                             | 2                                  | 60                          |
| SEINE MOYENNE | Épisy                | Loing       | H3621010     | 3 900              | 4.8           | 0                               | 0                                  | 0                           |
|               | Sainte-Assise        | Seine       | H3930020     | 26 290             | 60.4          | 56                              | 3                                  | 19                          |
|               | Alfortville          | Seine       | H4340020     | 30 800             | 69.8          | 74                              | 4                                  | 19                          |
|               | Paris                | Seine       | H5920010     | 43 800             | 86.4          | 47                              | 2                                  | 24                          |
| SEINE AVAL    | Poissy               | Seine       | H7900010     | 64 200             | 167.6         | 46                              | 3                                  | 15                          |
|               | Louviers             | Eure        | H9501010     | 5 990              | 14.5          | 108                             | 7                                  | 15                          |
|               | Pont-Authou          | Risle       | I0211010     | 1 690              | 6.2           | 96                              | 11                                 | 9                           |

**Tableau 3** Caractérisation des défaillances en Temps Présent avec l'hypothèse RC1

| BV            | Nom Station          | Cours d'eau | Code station | Surface BV station | Qseuil (m3/s) | Nb jours moy annuel sous Qseuil | Nb franchiss. moy annuel du Qseuil | Ratio Nbjours / Nbfranchiss |
|---------------|----------------------|-------------|--------------|--------------------|---------------|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| OISE AISNE    | Soissons             | Aisne       | H6501020     | 7 341              | 12.2          | 1                               | 1                                  | 1                           |
|               | Sempigny             | Oise        | H7401010     | 4 290              | 8.5           | 33                              | 2                                  | 17                          |
|               | Creil                | Oise        | H7611011     | 14 200             | 38.6          | 26                              | 2                                  | 13                          |
| MARNE         | Châlons-en-Champagne | Marne       | H5201010     | 6 280              | 16.0          | 35                              | 1                                  | 35                          |
|               | Ferté-sous-Jouarre   | Marne       | H5321010     | 8 480              | 21.1          | 36                              | 1                                  | 36                          |
|               | Gournay-sur-Marne    | Marne       | H5841020     | 12 600             | 27.7          | 41                              | 1                                  | 41                          |
| SEINE AMONT   | Arcis-sur-Aube       | Aube        | H1501010     | 3 590              | 4.9           | 0                               | 0                                  | 0                           |
|               | Mery-sur-Seine       | Seine       | H0810010     | 3 880              | 5.6           | 68                              | 2                                  | 34                          |
|               | Pont-sur-Seine       | Seine       | H1700010     | 8 760              | 18.3          | 44                              | 2                                  | 22                          |
|               | Courlon              | Yonne       | H2721010     | 10 700             | 25.7          | 104                             | 3                                  | 35                          |
| SEINE MOYENNE | Épisy                | Loing       | H3621010     | 3 900              | 4.8           | 0                               | 0                                  | 0                           |
|               | Sainte-Assise        | Seine       | H3930020     | 26 290             | 60.4          | 40                              | 3                                  | 13                          |
|               | Alfortville          | Seine       | H4340020     | 30 800             | 69.8          | 54                              | 4                                  | 14                          |
|               | Paris                | Seine       | H5920010     | 43 800             | 86.4          | 35                              | 2                                  | 18                          |
| SEINE AVAL    | Poissy               | Seine       | H7900010     | 64 200             | 167.6         | 35                              | 3                                  | 12                          |
|               | Louviers             | Eure        | H9501010     | 5 990              | 14.5          | 101                             | 6                                  | 17                          |
|               | Pont-Authou          | Risle       | I0211010     | 1 690              | 6.2           | 89                              | 11                                 | 8                           |

**Tableau 4** Caractérisation des défaillances en Temps Présent avec l'hypothèse GM

Il apparait tout d'abord que le nombre de jours moyens annuels passés sous le débit seuil en TP est de l'ordre de 45 ou 50 jours selon les hypothèses climatiques. La défaillance moyenne globale est plus sévère avec l'hypothèse « RC1 » qu'avec l'hypothèse « GM ».

A titre de comparaison, il est apparu lors de l'étude des besoins prospectifs pour l'AESN que la moyenne est de 20 jours par an sous le QMNA5 naturel pour l'ensemble des 80 stations hydrométriques de Seine-Normandie. Le QMNA5 naturel étant en général inférieur au débit

seuil considéré pour les 17 points de bilan présentement analysés, cette moyenne globale ne paraît pas aberrante. Ajoutons de plus pour expliquer cet écart que les consommations prises en compte dans les simulations sont celles de 2004, et non les consommations historiques réelles, qui sont globalement inférieures. On peut donc légitimement considérer que le scénario Temps Présent est correctement calé du point de vue des défaillances globales à l'étiage.

On remarque toutefois quelques points singuliers, comme Courlon (Yonne), Louviers (Eure), Pont-Authou (Risle) ou Mery-sur-Seine, qui présentent un nombre de jours moyen annuel de défaillance très élevés. L'étude de la ressource en eaux superficielles pour l'AESN avait permis de mettre en avant la forte tendance à connaître des situations de tensions quantitatives à Louviers et Pont-Authou notamment, avec une trentaine de jours passés en moyenne sous le QMNA5 naturel. Il semble donc que les valeurs extrêmes de défaillances observées dans le cas présent sur les quatre stations précitées soient probablement dues au jeu de données pluviométriques, et donc climatiques.

En tout état de cause, l'objet de la présente étude étant l'analyse de l'impact du changement climatique sur les étiages, c'est une notion relative qui sera analysée dans le paragraphe suivant, en comparant deux situations générées sur les mêmes hypothèses climatiques.

Concernant la répartition géographique des défaillances en Temps Présent, nous avons vu que deux secteurs présentent un nombre de jours moyen annuel de défaillance très important : la Seine et l'Yonne amont (Méry/S., Courlon) et les affluents rive gauche de la Seine aval (Louviers, Pont-Authou). La répartition fréquentielle de ces situations de stress hydrique est par contre bien différente dans ces deux secteurs :

- sur l'Eure et la Risle, le stress est plus dû à la fréquence élevée des situations de défaillance qu'à leur durée (10 à 15 jours) ;
- sur la Seine et l'Yonne amont, les périodes de défaillance sont occasionnelles mais très longues : 1 mois à 2 mois (hypothèse RC1). La Marne (à Châlons, la Ferté-ss-J. et Gournay) présente également de longs stress hydriques de plus d'un mois en moyenne.

### **3.3 IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES DEFAILLANCES HYDRIQUES**

Les tableaux suivants caractérisent les défaillances hydriques du Milieu de Siècle (MS) pour les deux hypothèses climatiques considérées.

| BV            | Nom Station          | Cours d'eau | Nb jours moy annuel sous Qseuil | Nb franchiss. moy annuel du Qseuil | Ratio Nbjours / Nbfranchiss | Augmentation nb jours sous Qseuil | Augmentation ratio |
|---------------|----------------------|-------------|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| OISE AISNE    | Soissons             | Aisne       | 51                              | 2                                  | 26                          | 1600 %                            | 750 %              |
|               | Sempigny             | Oise        | 109                             | 5                                  | 22                          | 187 %                             | 15 %               |
|               | Creil                | Oise        | 137                             | 5                                  | 27                          | 342 %                             | 77 %               |
| MARNE         | Châlons-en-Champagne | Marne       | 84                              | 2                                  | 42                          | 127 %                             | 14 %               |
|               | Ferté-sous-Jouarre   | Marne       | 84                              | 2                                  | 42                          | 127 %                             | 14 %               |
|               | Gournay-sur-Marne    | Marne       | 88                              | 2                                  | 44                          | 110 %                             | 5 %                |
| SEINE AMONT   | Arcis-sur-Aube       | Aube        | 18                              | 1                                  | 18                          | 800 %                             | 800 %              |
|               | Méry-sur-Seine       | Seine       | 153                             | 3                                  | 51                          | 78 %                              | 19 %               |
|               | Pont-sur-Seine       | Seine       | 118                             | 4                                  | 30                          | 111 %                             | 5 %                |
|               | Courlon              | Yonne       | 186                             | 2                                  | 93                          | 56 %                              | 56 %               |
| SEINE MOYENNE | Épisy                | Loing       | 0                               | 0                                  | 0                           | 0 %                               | 0 %                |
|               | Sainte-Assise        | Seine       | 147                             | 6                                  | 25                          | 163 %                             | 31 %               |
|               | Alfortville          | Seine       | 155                             | 7                                  | 22                          | 109 %                             | 20 %               |
|               | Paris                | Seine       | 77                              | 4                                  | 19                          | 64 %                              | -18 %              |
| SEINE AVAL    | Poissy               | Seine       | 162                             | 6                                  | 27                          | 252 %                             | 76 %               |
|               | Louviers             | Eure        | 206                             | 8                                  | 26                          | 91 %                              | 67 %               |
|               | Pont-Authou          | Risle       | 184                             | 16                                 | 12                          | 92 %                              | 32 %               |

**Tableau 5** Caractérisation des défaillances en Milieu de Siècle avec l'hypothèse RC1

| BV            | Nom Station          | Cours d'eau | Nb jours moy annuel sous Qseuil | Nb franchiss. moy annuel du Qseuil | Ratio Nbjours / Nbfranchiss | Augmentation nb jours sous Qseuil | Augmentation ratio |
|---------------|----------------------|-------------|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| OISE AISNE    | Soissons             | Aisne       | 10                              | 1                                  | 10                          | 900 %                             | 900 %              |
|               | Sempigny             | Oise        | 49                              | 4                                  | 12                          | 48 %                              | -26 %              |
|               | Creil                | Oise        | 77                              | 4                                  | 19                          | 196 %                             | 48 %               |
| MARNE         | Châlons-en-Champagne | Marne       | 60                              | 1                                  | 60                          | 71 %                              | 71 %               |
|               | Ferté-sous-Jouarre   | Marne       | 57                              | 1                                  | 57                          | 58 %                              | 58 %               |
|               | Gournay-sur-Marne    | Marne       | 59                              | 1                                  | 59                          | 44 %                              | 44 %               |
| SEINE AMONT   | Arcis-sur-Aube       | Aube        | 4                               | 1                                  | 4                           | -                                 | -                  |
|               | Méry-sur-Seine       | Seine       | 113                             | 3                                  | 38                          | 66 %                              | 11 %               |
|               | Pont-sur-Seine       | Seine       | 79                              | 3                                  | 26                          | 80 %                              | 20 %               |
|               | Courlon              | Yonne       | 149                             | 2                                  | 75                          | 43 %                              | 115 %              |
| SEINE MOYENNE | Épisy                | Loing       | 0                               | 0                                  | 0                           | 0 %                               | 0 %                |
|               | Sainte-Assise        | Seine       | 88                              | 4                                  | 22                          | 120 %                             | 65 %               |
|               | Alfortville          | Seine       | 100                             | 6                                  | 17                          | 85 %                              | 23 %               |
|               | Paris                | Seine       | 50                              | 2                                  | 25                          | 43 %                              | 43 %               |
| SEINE AVAL    | Poissy               | Seine       | 110                             | 6                                  | 18                          | 214 %                             | 57 %               |
|               | Louviers             | Eure        | 160                             | 7                                  | 23                          | 58 %                              | 36 %               |
|               | Pont-Authou          | Risle       | 145                             | 17                                 | 9                           | 63 %                              | 5 %                |

**Tableau 6** Caractérisation des défaillances en Milieu de Siècle avec l'hypothèse GM

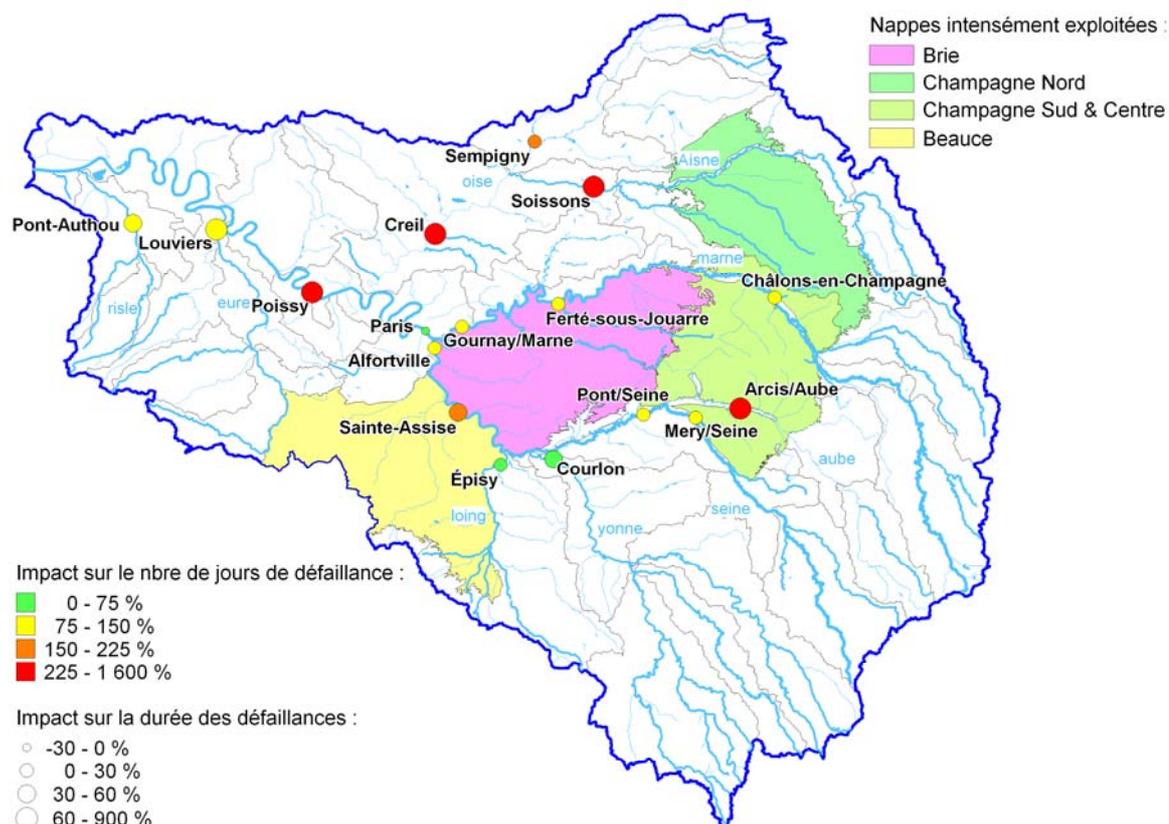
Dans les scénarios MS, le scénario climatique RC1 est à nouveau le plus sévère, avec 115 jours de défaillance en moyenne, contre 77 avec le scénario climatique GM. Il présente également toujours une durée moyenne des situations de crise plus importante. Par rapport au scénario TP, l'écart entre les deux hypothèses climatiques tend par ailleurs à :

- se creuser pour ce qui concerne le nombre de jours moyen de défaillance ;
- se résorber pour ce qui concerne la durée des situations de crise.

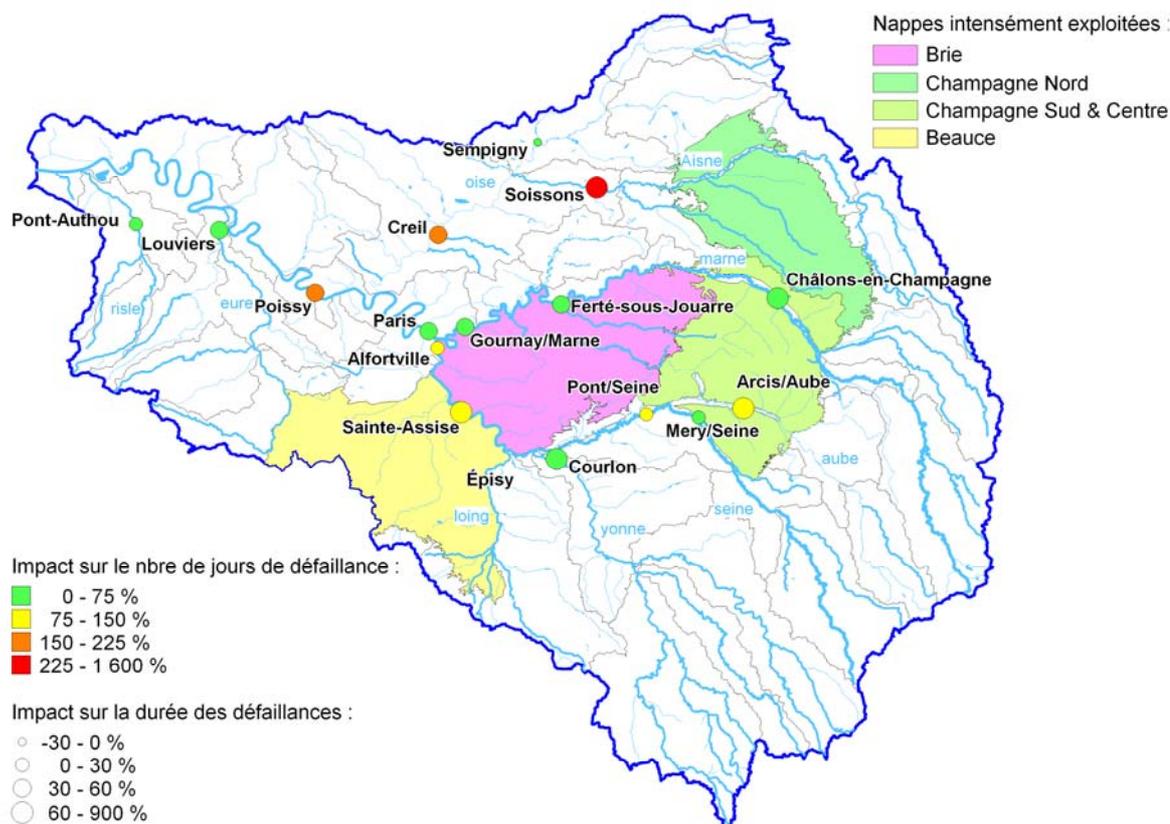
En situation MS, les points les plus sensibles du point de vue du nombre de jours moyen annuel de défaillance restent la Seine et l'Yonne amont (Méry/S., Courlon) et les affluents rive gauche de la Seine aval (Louviers, Pont-Authou), et ce pour les deux hypothèses testées.

La répartition fréquentielle en ces points critiques suit les mêmes observations que pour le TP : nombreux épisodes relativement courts pour les affluents de la Seine aval (9 à 26 jours) et très longues périodes occasionnelles de défaillance sur l'Yonne et la Marne (au moins 1,5 mois).

L'impact du changement climatique par rapport à la situation TP est figuré sur les cartes suivantes pour les deux hypothèses climatiques.



**Figure 6** Impact du changement climatique MS sur les défaillances avec l'hypothèse RC1



**Figure 7** Impact du changement climatique MS sur les défaillances avec l'hypothèse GM

Comme indiqué ci-dessus, l'évolution climatique prévue par RC1 est plus sévère que celle prévue par GM en ce qui concerne le nombre de jours moyens annuels passés sous les débits seuil : il est plus que doublé selon RC1 (+125%), mais moins que doublé selon GM (+75%). Par contre, en moyenne, la durée des épisodes de stress hydrique est plus impactée par le changement climatique selon GM (+50%) que selon RC1 (+35%).

**Ainsi, schématiquement et globalement, l'augmentation du stress hydrique prévu par RC1 se traduit plutôt par une augmentation de la fréquence des défaillances, alors que pour GM, c'est plus la durée des épisodes de crise qui est allongée.**

Dans les deux hypothèses climatiques, l'impact du changement climatique est excessivement fort sur l'Aisne à Soissons, tant au niveau du nombre de jours moyen de défaillances (+900% à +1600%), qu'au niveau de la durée moyenne des épisodes de crise (+900% à +750%). D'une manière générale, l'Oise et l'Aisne, et donc la Seine à Poissy à l'aval de la confluence sont les plus touchées par le changement climatique, comparativement à la situation Temps Présent.