



Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé

Rapport final

J.F. Vernoux, J.J. Seguin (BRGM)

Mars 2013

Document public

Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé

Rapport final

BRGM/RP-61807-FR
mars 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2012

J.F. Vernoux, J.J. Seguin

Vérificateur :

Nom : B. Mougin

Date : 03/07/2013

Signature :

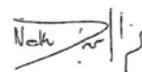


Approbateur :

Nom : N. Dörfliger

Date : 16/07/2013

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : changement climatique, réseau piézométrique, indicateur, index piézométrique standardisé, Standardized Precipitation Index

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Vernoux J.F., Seguin J.J. (2013) - Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé, rapport BRGM/RP-61807-FR, 110 pages, 66 illustrations, 4 annexes.

Les auteurs

Jean-François Vernoux
Hydrogéologue
jf.vernoux@brgm.fr

Jean-Jacques Seguin
Hydrogéologue
jj.seguin@brgm.fr

Les correspondants

Onema : *Bénédicte Augeard, DAST, benedicte.augeard@onema.fr*

Partenaire : *Jean-François Vernoux, BRGM, jf.vernoux@brgm.fr*

Droits d'usage :	<i>accès libre</i>
Couverture géographique :	<i>France métropolitaine</i>
Niveau géographique [un seul choix] :	<i>national</i>
Niveau de lecture [plusieurs choix possibles] :	<i>professionnels, experts</i>
Nature de la ressource [plusieurs choix possibles] :	<i>document</i>

Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé

Vernoux J.F., Seguin J.J.

RESUME

Le niveau des nappes d'eau souterraine dépend pour beaucoup d'entre d'elles de l'infiltration des eaux météoriques et sera donc nécessairement impacté par le changement climatique (CC) si celui-ci provoque des modifications du régime d'infiltration des pluies efficaces (intensité, période). Pour évaluer et suivre l'impact de ce changement, l'ONEMA a confié au BRGM une étude devant déboucher sur la mise en place d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines.

Le présent rapport rend compte du travail effectué en troisième et dernière année du projet. Il comporte deux volets :

- l'un est consacré à la définition du réseau piézométrique pour le suivi long terme du changement climatique,
- l'autre, à caractère exploratoire, décrit une démarche pouvant aboutir à un index piézométrique standardisé, applicable au suivi d'un ensemble de nappes libres, analogue à l'index standardisé des précipitations (SPI, "Standardized Precipitation Index"), défini il y a 20 ans par Mc Kee et al. (1993), très utilisé aux Etats-Unis comme indicateur de sécheresse.

La définition du réseau piézométrique dédié au changement climatique a été basée sur une analyse multi-critères combinant (i) des paramètres susceptibles de caractériser l'impact potentiel du changement climatique et (ii) des paramètres hydrogéologiques. Différentes approches ont été envisagées à la fois pour les paramètres climatiques (zones climatiques, hydro-écorégions, zones vulnérables vis-à-vis du CC, évolution de la recharge des nappes dans le futur) et pour les paramètres hydrogéologiques.

Pour ces derniers, le référentiel existant des systèmes aquifères français BDLISA, a été utilisé. Il s'est avéré que le traitement automatique sous SIG d'entités hydrogéologiques a priori pertinentes pour un réseau de suivi du changement climatique (BDLISA niveau 1) à partir de ce référentiel a été impossible en raison de son mode de structuration, et c'est finalement le découpage des masses d'eau souterraines de niveau 1 qui est apparu techniquement approprié pour un traitement à l'échelle nationale.

Concernant les paramètres de caractérisation de l'impact potentiel du changement climatique, les travaux précédents réalisés dans le cadre de ce projet n'ont pas montré de tendances nettes de l'évolution des niveaux de nappes d'eau souterraines sur les 30 dernières années en relation avec une évolution du climat. De même, les découpages de type zonage climatique actuel ou zones vulnérables définies à partir de critères tels que la capacité d'infiltration, l'épaisseur de la zone non-saturée et la recharge actuelle ne nous ont pas paru adaptés à notre problématique. Nous avons finalement opté pour des critères d'évolution de l'infiltration des nappes dans le futur à partir des modèles de simulation climatique existants, sachant que ces approches ont été mises en œuvre dans le cadre du projet Explore 2070 sur l'eau et le changement climatique. Les résultats de ce projet ne permettant pas d'obtenir une grille à l'échelle de la France d'évolution de la recharge entre la période de référence « temps présent » (1961-1991) et la période « temps futur » (2046-2065), nous avons généré une grille d'écart des pluies efficaces entre ces deux périodes. La pluie efficace a été calculée par différence entre les précipitations et l'évapotranspiration réelle à partir des données fournies par Météo-France dans le cadre du projet Explore 2070.

En combinant l'écart des pluies efficaces entre le « temps futur » et le « temps présent » et le découpage des masses d'eau souterraines de niveau 1, nous avons finalement retenu 237 entités considérées comme sensibles au changement climatique.

La seconde partie du travail a consisté à sélectionner à l'intérieur de chacune de ces entités un piézomètre susceptible de faire partie du réseau. Ces piézomètres ont été sélectionnés sur la base

des plusieurs critères : durée de la chronique, faible influence par des prélèvements d'eau, pérennité de l'ouvrage, appartenance à un réseau de suivi de la sécheresse, Le critère de durée de la chronique a été utilisé pour classer le piézomètre en termes de priorité de choix du point. Au final 105 ouvrages ont été présélectionnés avec 4 niveaux de priorité. Pour les entités considérées comme sensibles au changement climatique et pour lesquelles il n'a pas été possible de présélectionner un ouvrage, différentes approches ont été proposées.

A l'issue de ces travaux, il apparaît que le critère de sensibilité au changement climatique est peu pertinent car présentant de fortes incertitudes et il est préférable de ne prendre en compte que des critères hydrogéologiques.

Pour la définition d'un index piézométrique standardisé, les principes de calcul du SPI (index standardisé pour les précipitations) ont été retenus. Ces principes ont été étendus par Météo-France à l'humidité des sols pour définir aussi un index standardisé, le SSWI (Standardized, Soil Wetness Index). Dans ce deuxième volet du rapport, on rappelle le mode de calcul du SPI et du SSWI et l'on décrit les étapes du calcul de l'index piézométrique standardisé (SPLI, Standardized Piezometric Level Index), en adoptant aussi les principes à l'origine du SPI, mais avec des modalités de calcul différentes, compte tenu de la variété de comportements des nappes libres. Deux échelles temporelles ont été testées, l'échelle mensuelle et l'échelle annuelle. Ces valeurs de SPLI sont disponibles pour un piézomètre donné et, grâce à la standardisation, elles peuvent être agrégées à des échelles spatiales plus larges.

Comme le SPI et le SSWI, le SPLI varie entre -3 (forte sécheresse) et +3 (forte pluviométrie) et permettrait de ce fait de caractériser de façon homogène sur tout le territoire national l'état piézométrique des nappes libres, de suivre l'évolution dans le temps de cet état et de quantifier l'intensité des impacts climatiques subis par ces nappes. Le SPLI pourrait ainsi jouer le rôle d'un indicateur d'état des nappes.

Néanmoins, à ce stade de la recherche il reste de nombreux points à discuter : pertinence de l'index, échelle d'agrégation, mode de représentation, exploitation en association avec d'autres indicateurs, ...

Mots clés (thématique et géographique)

changement climatique, réseau piézométrique, indicateur, index piézométrique standardisé, Standardized Precipitation Index

A reference piezometric network for the monitoring of climate change impact on groundwater (third year) and test to determine standardized groundwater level index

Vernoux J.F., Seguin J.J.

ABSTRACT

Groundwater level depends for most of aquifers on meteoric water infiltration and will be obviously impacted by climate change, if it causes changes of infiltration scheme (intensity, period). In order to evaluate and track climate change impacts, a study was conducted by BRGM on behalf of ONEMA, which should lead to the creation of a reference network.

The present report covers the work achieved during the third and last year of the project. It has two main components :

- The first one is devoted to defining a piezometric network and long term monitoring climate change impact
- The second one, that was explanatory in nature, describes an approach that could result in a standardized groundwater level index such as SPI, standardized precipitation index, that was defined by Mc Kee et al. (1993) 20 years ago, widely used in the US

The definition of groundwater level monitoring network for climate change was based on multi-criteria analysis combining (i) parameters likely to characterize the potential impact of climate change and (ii) hydrogeological parameters. Different approaches were tested for climate parameters (climatic areas, hydro-ecoregions, climate change vulnerable zones, recharge evolution in the future) as well as hydrogeological parameters.

For hydrogeological parameters, we used existing French aquifer system framework (BDLISA). As it turns out that automatic processing from that framework was impossible because of its structure and we finally used groundwater bodies of level 1.

For the parameters likely to characterize the potential impact of climate change, previous works realized in the framework of this project did not show clear trends of groundwater level evolution on the last thirty years related to climate change. Likewise zoning like climatic area, vulnerable areas, unsaturated zone thickness, or current recharge did not seem to be adapted to our problem. We used finally criteria of future water infiltration from existing climate change simulation models applied in the framework of Explore 2070 project. As the result of the project did not provide a grid of recharge evolution at the scale of France between "present time" (1961-1991) and "future time" (2046-2065), we computed a grid of efficient rainfall evolution between these two periods. Efficient rainfall was computed by difference between rainfall and actual evapotranspiration from data provided by Meteo France for Explore 2070 project.

By combining efficient rainfall difference between "future time" and "present time" and groundwater bodies of level 1, we finally obtained 237 entities regarded as sensitive to climate change.

The second part of the work consisted in the selection, inside each entity, of a piezometer able to belong to the network. These piezometers were selected from many criteria : duration of measurement period, low influence by water withdrawals, durability of the piezometer, belonging to a drought monitoring network,... The criteria of duration of measurement period was used to classify the piezometer by priority order. Finally, 105 piezometers were pre-selected with four priority levels. For the entities considered as sensitive to climate change and for which it was not possible to pre-select a monitoring well, different approaches were proposed. Ultimately it appears that the sensitivity criteria to climate change is not relevant because showing high

uncertainties and it seems better to take into account only hydrological criteria.

For the definition of a standardized groundwater level index, the SPI (Standard Precipitation Index) calculation principles were followed. These principles were extended by Meteo France to the soil wetness to define another standardized index, the SSWI (Standardized, Soil Wetness Index). In this second part of the report, we remind the calculation method for SPI and SSWI and describe the steps for calculating the SPLI (Standardized Piezometric Level Index), by using the principles underlying SPI but with different calculation procedures, taking into account the wide range of unconfined groundwater behavior. Two time scale were tested monthly scale and annual scale. These SPLI values are available for a given piezometer and due to standardization they can be aggregated at larger spatial scales.

Like SPI and SSWI, SPLI varies between -3 (high drought) et +3 (high rainfall) and would be able to characterize homogeneously on the whole national territory the piezometric state of unconfined groundwater, to follow the temporal evolution of that state and to quantify the intensity of climatic impacts on groundwater levels. SPLI could be used as groundwater state indicator.

Nevertheless, at that state of research many points remain open to discussion: index relevance, aggregation scale, representation, exploitation in association with others indicators,...

Key words (thematic and geographical area)

Climate change, groundwater monitoring network, indicator, Standardized Piezometric Level Index, Standardized Precipitation Index

Etablissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé
Vernoux J.F., Seguin J.J.

Synthèse pour l'action opérationnelle

Le niveau des nappes d'eau souterraine dépend pour beaucoup d'entre d'elles de l'infiltration des eaux météoriques et sera donc nécessairement impacté par le changement climatique (CC) si celui-ci provoque des modifications du régime d'infiltration (intensité, période). Pour évaluer et suivre l'impact de ce changement, l'ONEMA a confié au BRGM une étude sur 3 ans devant déboucher sur la mise en place d'un réseau de référence piézométrique.

L'étude a débuté par une synthèse bibliographique des travaux réalisés sur l'impact du changement climatique sur le niveau des nappes d'eau souterraine et une analyse statistique des données piézométriques existantes (en France) visant à détecter une non stationnarité dans les séries étudiées (tendances, ruptures), non stationnarité dont les causes seront à rechercher.

La synthèse bibliographique distingue les travaux de détection de tendance sur des données existantes, des travaux de prévision d'évolution de la recharge des nappes d'eau souterraine sur la base des modèles climatiques et des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. On trouve dans la littérature des travaux sur les données qui influencent le niveau des nappes d'eau souterraine, à savoir les précipitations et les températures, cependant concernant la tendance d'évolution des niveaux piézométriques, on constate qu'en raison du manque de données, aucune tendance ne peut être déterminée pour le 20^{ième} siècle et que les baisses observées de niveau piézométrique sont essentiellement liés aux prélèvements dans les nappes d'eau souterraine. A l'échelle de la France les tendances pour les variables climatiques sur la période 1959-2000 montrent une augmentation de la température sur l'ensemble du territoire et une tendance à l'augmentation des précipitations sur les deux tiers nord de la France et une tendance à la baisse sur le tiers sud. A noter que les tendances calculées pour les précipitations sont souvent non significatives. Les travaux sur les changements climatiques futurs à l'échelle de la France confirment l'augmentation des températures de l'air. Pour les précipitations, les changements apparaissent incertains pour l'hiver et l'automne, et avec une tendance à la diminution au printemps et en été. Pour les eaux souterraines, les simulations réalisées dans le cadre du projet RExHySS sur les bassins de la Seine et de la Somme montrent que, d'ici une cinquantaine d'années, le déficit de recharge serait de 30% (Ducharne et al., 2009).

Afin de détecter d'éventuelles tendances liées au changement climatique sur les niveaux d'eau souterraine en France, nous avons réalisé une analyse statistique des données de suivi piézométrique sur un certain nombre d'ouvrages sélectionnés en fonction des critères suivants : piézomètre en nappe libre, non influencé avec plus de 30 ans de données. Nous avons ainsi sélectionné 375 piézomètres sur les 3344 disponibles dans la banque ADES. Ces piézomètres sont inégalement répartis, pour l'essentiel sur les bassins Artois-Picardie, Rhin-Meuse et Seine-Normandie. Une première analyse de tendance a été réalisée sur les piézomètres sélectionnés afin de voir si des tendances régionales se dégagent. Une analyse statistique plus poussée a été réalisée dans un deuxième temps afin de rechercher des changements (tendance et

rupture) dans les séries piézométriques et surtout leur significativité (au sens statistique). La recherche de tendance a été réalisée par régression linéaire et test de Mann-Kendall en tenant compte d'une autocorrélation éventuelle dans les séries. La recherche de rupture a été réalisée par le test de Pettitt. Pour la recherche de tendances les tests ont porté sur 6 variables annuelles : les moyennes annuelles, les maximums annuels, les minimums annuels, la moyenne annuelle des maxima mensuels, la moyenne annuelle des minima mensuels et les moyennes d'un mois particulier (décembre).

Les premiers calculs de tendance sur les 375 piézomètres sélectionnés (données brutes) montrent une tendance à la baisse pour 54%, à la hausse pour 29% et à la stabilité pour 17%. La répartition géographique de ces tendances montre une forte hétérogénéité : seule la nappe de la craie montre une tendance marquée à la baisse en Champagne et Bourgogne tandis que cette même nappe montre une tendance marquée à la hausse dans le bassin Artois-Picardie.

Les calculs de tendance par régression linéaire ("modifiée" ou non suivant la présence d'autocorrélation) et la méthode de Mann-Kendall ("modifiée" ou non suivant la présence d'autocorrélation) ont été effectués sur 325 piézomètres. Les piézomètres montrant une très forte autocorrélation (nappes à très forte inertie, type nappe de Beauce) n'ont pas été pris en compte. Dans les résultats finaux présentés, 5 variables sont prises en compte (les valeurs de décembre, n'étant pas vraiment contributives, sont exclues). Une note de 1 est attribuée à une variable lorsque la tendance est significative (0 sinon). Le "score" maximum caractérisant un piézomètre est donc de 10 (5 variables, 2 méthodes). A ce stade de l'étude, la tendance est jugée significative pour au moins une méthode et une variable (score minimum de 1). Les résultats obtenus sont les suivants :

- pour 109 piézomètres en nappes à cycle annuel, 33 montrent une tendance à la baisse significative et 21 une tendance à la hausse significative ;
- Pour 126 piézomètres en nappes à cycles mixtes avec un cycle annuel plus marqué, 9 montrent une tendance à la baisse significative et 10 une tendance à la hausse significative ;
- Pour 52 piézomètres en nappes à cycles mixtes, aucun ne montre une tendance ;
- Pour 38 piézomètres en nappes à cycles mixtes avec un cycle pluriannuel plus marqué, un seul montre une tendance à la baisse significative et 3 une tendance à la hausse significative ;

Pour les piézomètres en nappes à cycle pluriannuel, les tests ne peuvent être appliqués sur des chroniques de 30 à 50 ans, en raison d'une forte inertie des systèmes, induisant une forte autocorrélation des données ; il faudrait disposer de chroniques beaucoup plus longues, supérieures à 100 ans.

Les tendances significatives à la baisse des niveaux concernent essentiellement la nappe de la plaine alluviale d'Alsace, la nappe plio-quadernaire du Roussillon, certaines nappes des Calcaires du Jurassique et la nappe de la craie en Champagne et Bourgogne.

Les piézomètres avec hausse significative des niveaux se répartissent pour la plupart sur les nappes de la Craie dans le bassin Artois-Picardie (quelques-uns dans le bassin Seine-Normandie), la nappe de la plaine alluviale d'Alsace et 4 nappes dans des formations calcaires (2 dans le bassin Seine-Normandie et 2 dans le bassin Loire-Bretagne). On note que la nappe alluviale d'Alsace montre à la fois des tendances à la baisse et à la hausse.

La deuxième année du projet a vu la finalisation des tests statistiques de détection de tendance, une comparaison des tendances observées sur les données piézométriques et sur les données climatiques (précipitations, température, évapo-transpiration potentielle), la prise en compte des résultats du projet Explore 2070 sur l'évolution de la recharge et la définition de

zones homogènes en terme de suivi du changement climatique pour l'implantation d'un réseau piézométrique dédié.

Les tests de détection de tendance ont été réalisés sur 377 piézomètres pour lesquels on disposait d'une chronique d'au moins 25 ans. Au final, 70 présentent une tendance significative, dont 44 à la baisse et 26 à la hausse. Les piézomètres montrant une tendance significative concernent pour la plupart les nappes à cycle annuel prédominant. Une esquisse de structuration spatiale des tendances a été identifiée, avec une hausse des niveaux concernant les masses d'eau de la craie du bassin Artois-Picardie et du centre du bassin Seine-Normandie et une baisse des niveaux pour les nappes de la craie et des calcaires du Jurassique de l'Est du bassin Seine-Normandie. Les tendances à la hausse ou la baisse peuvent dans certains cas être influencés par des prélèvements à proximité du pompage sans pour autant que l'on puisse le démontrer. Les années de ruptures (changement de comportement) correspondent à des années dont les hauteurs d'eau sont nettement supérieures ou inférieures à la moyenne ou qui suivent ou précèdent ces épisodes. Enfin, un outil de modélisation globale (GARDENIA © brgm) a été utilisé pour tester la sensibilité du niveau piézométrique aux variations d'évapotranspiration potentielle (ETP) observée. Les résultats montrent que ces variations ont un impact assez faible sur le niveau piézométrique, notamment par rapport aux incertitudes du calage.

Les tendances observées ont été comparées aux projections du changement climatique réalisées dans le cadre du projet Explore 2070 (période 2046-2065). L'examen des évolutions futures de la recharge indique, pour la valeur moyenne, une baisse quasi générale de la recharge comprise entre 10 et 25% avec globalement deux zones plus sévèrement touchées : le bassin de la Loire avec une baisse, sur la moitié de la superficie de son bassin versant, comprise entre 25 et 30% et surtout, le Sud-Ouest avec des baisses comprises entre 30 et 50%. Les zones de tendances à la hausse observée actuellement ne se retrouvent pas dans les scénarios testés.

Au final, il ressort qu'on ne peut actuellement pas mettre en évidence un impact d'une tendance climatique significative sur le niveau des nappes.

Le travail effectué en troisième et dernière année du projet comportait deux volets :

- l'un est consacré à la définition du réseau piézométrique, pour le suivi long terme du changement climatique ;
- l'autre, à caractère exploratoire, décrit une démarche pouvant aboutir à un index piézométrique standardisé, applicable aux nappes libres, analogue à l'index standardisé des précipitations (SPI, "*Standardized Piézometric Index*"), défini il y a 20 ans par Mc Kee et al. (1993), très utilisé aux Etats-Unis comme indicateur de sécheresse.

La définition du réseau piézométrique dédié au changement climatique a été basée sur une analyse multi-critères combinant des paramètres susceptibles de caractériser le changement climatique et des paramètres hydrogéologiques. Différentes approches ont été envisagées à la fois pour les paramètres climatiques (zones climatiques, hydro-écorégions, zones vulnérables vis-à-vis du changement climatique, évolution de la recharge des nappes dans le futur) et pour les paramètres hydrogéologiques.

Les travaux précédents réalisés dans le cadre de ce projet n'ont pas montré de tendances nettes de l'évolution des niveaux de nappes d'eau souterraines sur les 30 dernières années en relation avec une évolution du climat. De même, les découpages de type zonage climatique actuel ou zones vulnérables définies à partir de critères tels que la capacité d'infiltration, l'épaisseur de la zone non-saturée et la recharge actuelle ne nous ont pas paru adaptés à notre

problématique. Nous avons finalement opté pour des critères d'évolution de l'infiltration des nappes dans le futur à partir des modèles de simulation climatique existants, sachant que ces approches ont été mises en œuvre dans le cadre du projet Explore 2070. Les résultats de ce projet ne permettant pas d'obtenir une grille à l'échelle de la France d'évolution de la recharge entre la période de référence « temps présent » (1961-1991) et la période « temps futur » (2046-2065), nous avons généré une grille d'écart des pluies efficaces entre ces deux périodes. La pluie efficace a été calculée par différence entre les précipitations et l'évapotranspiration réelle à partir des données fournies par Météo-France dans le cadre du projet Explore 2070. Pour l'affectation des valeurs à des entités hydrogéologiques, il apparaissait normal d'utiliser le référentiel existant, à savoir BDLISA, le nouveau référentiel des systèmes aquifères français. Il s'est avéré que le traitement automatique sous SIG d'entités hydrogéologiques pertinentes pour un réseau de suivi du changement climatique à partir de ce référentiel a été impossible en raison de son mode de structuration, et c'est finalement le découpage des masses d'eau souterraines de niveau 1 qui est apparu le plus pertinent pour un traitement à l'échelle nationale.

En combinant l'écart des pluies efficaces entre « temps futur » et « temps présent » et le découpage des masses d'eau souterraines de niveau 1, nous avons finalement retenu 237 entités considérées comme sensibles au changement climatique.

La seconde partie du travail a consisté à sélectionner à l'intérieur de chacune de ces entités un piézomètre susceptible de faire partie du réseau. Ces piézomètres ont été sélectionnés sur la base des plusieurs critères : durée de la chronique, faible influence par des prélèvements d'eau, pérennité de l'ouvrage, appartenance à un réseau de suivi de la sécheresse, Le critère de durée de la chronique a été utilisé pour classer le piézomètre en terme de priorité. Au final 105 ouvrages ont été présélectionnés avec 4 niveaux de priorité. Pour les entités considérées comme sensibles au changement climatique et pour lesquelles il n'a pas été possible de présélectionner un ouvrage, différentes approches ont été proposées.

A l'issue de ces travaux, il apparaît que le critère de sensibilité au changement climatique est peu pertinent car présentant de fortes incertitudes et il est préférable de ne prendre en compte que des critères hydrogéologiques.

Pour la définition d'un index piézométrique standardisé, les principes de calcul du SPI (index standardisé pour les précipitations) ont été retenus. Ces principes ont été étendus par Météo-France à l'humidité des sols pour définir aussi un index standardisé, le SSWI (*Standardized, Soil Wetness Index*). Dans ce deuxième volet du rapport, on rappelle le mode de calcul du SPI et du SSWI et l'on décrit les étapes du calcul de l'index piézométrique standardisé (SPLI, *Standardized Piezometric Level Index*), en adoptant aussi les principes à l'origine du SPI, mais avec des modalités de calcul différentes, compte tenu de la variété de comportements des nappes libres.

Comme le SPI et le SSWI, le SPLI varie entre -3 (forte sécheresse) et +3 (forte pluviométrie) et permettrait de ce fait de caractériser de façon homogène sur tout le territoire national l'état piézométrique des nappes libres, de suivre l'évolution dans le temps de cet état et de quantifier l'intensité des impacts climatiques subis par ces nappes. Le SPLI pourrait ainsi jouer le rôle d'un indicateur d'état des nappes.

Néanmoins, à ce stade de la recherche il reste de nombreux points à discuter : pertinence de l'index, échelle d'agrégation, mode de représentation, exploitation en association avec d'autres indicateurs, ...

Sommaire

1. Introduction.....	21
2. Définition d'un réseau piézométrique dédié au changement climatique	23
2.1. ZONES HOMOGENES.....	23
2.1.1. Zones climatiques.....	23
2.1.2. Hydro-écorégions (HER).....	25
2.1.3. Masses d'eau souterraines.....	26
2.1.4. Référentiel hydrogéologique français (RHF).....	26
2.1.5. Bassins versants de surface.....	29
2.1.6. Zones vulnérables vis-à-vis du CC.....	29
2.2. CRITERES DE SELECTION DES POINTS EXISTANTS.....	30
2.3. TESTS DE SELECTION DE POINTS.....	33
2.3.1. Procédure.....	33
2.3.2. Test pour la MESO AG014.....	33
2.3.3. Test pour la MESO AG004.....	35
2.3.4. Test pour la MESO HG103.....	38
2.3.5. Test pour la MESO FG047.....	40
2.4. SELECTION FINALE DES ZONES DE SUIVI.....	43
2.4.1. Entités hydrogéologiques.....	44
2.4.2. Zones sensibles au changement climatique.....	46
2.5. OUVRAGES SELECTIONNES.....	52
2.5.1. Sélection en priorité 1.....	53
2.5.2. Sélection en priorité 2.....	55
2.5.3. Sélection en priorité 3.....	56
2.5.4. Sélection en priorité 4.....	57
2.5.5. Présélection de points susceptibles de faire partie du réseau de suivi du CC	58
2.6. POINTS A CREER.....	59

2.7.	SUITES A DONNER	61
3.	Essais de détermination d'un index standardisé du niveau des nappes	63
3.1.	LES INDICATEURS PIÉZOMÉTRIQUES DE GESTION DE LA RESSOURCE	63
3.1.1.	Les outils actuels de suivi de l'état des nappes en France	63
3.1.2.	Seuils piézométriques de gestion et modes de fixation	63
3.2.	LES INDICATEURS SÉCHERESSE : CLIMAT ET SOLS	66
3.2.1.	L'index standardisé des précipitations (<i>Standardized Precipitation Index</i> ou SPI). 67	
3.2.2.	Les index caractérisant l'humidité du sol	73
3.2.3.	L'index standardisé précipitation-évapotranspiration (SPEI)	75
3.3.	INDEX PIÉZOMÉTRIQUE STANDARDISÉ (SPLI)	76
3.3.1.	Sélection des piézomètres	76
3.3.2.	Calcul d'un SPLI mensuel	80
3.3.3.	Comparaison SPLI (index sur la piézométrie) et SPI (index sur la précipitation)	88
3.3.4.	Calcul d'un SPLI annuel, indicateur d'état des nappes	92
4.	Conclusion et perspectives	107
5.	Bibliographie	111

Liste des illustrations

<i>Illustration 1 – Réseau de suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines aux Etats-Unis (USGS, 2007)</i>	<i>24</i>
<i>Illustration 2 – Zones climatiques "Aurore" (source Météo France).....</i>	<i>24</i>
<i>Illustration 3 - Hydro-écorégions de premier niveau (Renard et al., 2008).....</i>	<i>25</i>
<i>Illustration 4 – Masses d'eau souterraine de niveau 1.....</i>	<i>26</i>
<i>Illustration 5 - BDLISA niveau 1 - Entité 121 : Grand système multicouche du Campanien au Turonien (Séno-Turonien)</i>	<i>28</i>

<i>Illustration 6 – Délimitation des bassins versants de surface pour le projet Explore 2070 (rapport d'étape n°2, Hydrologie de surface).....</i>	<i>29</i>
<i>Illustration 7 – Comparaison entre la recharge actuelle (1961-1990) et son évolution future (2046-2065)(MEDDTL (2012a).....</i>	<i>30</i>
<i>Illustration 8 - réseau de référence pour la surveillance des étiages (Giuntoli et Renard, 2010).....</i>	<i>32</i>
<i>Illustration 9 - Carte de situation des indicateurs ponctuels pour le BSH nappes (Vigouroux, 2011).....</i>	<i>32</i>
<i>Illustration 10 - Sélection de l'ouvrage 00035X0029/P1 pour le suivi de la masse d'eau souterraine des Sables du Landénien des Flandres</i>	<i>35</i>
<i>Illustration 11 - Sélection de l'ouvrage 00173X0083/PZ13A pour le suivi de la masse d'eau souterraine de la Craie de l'Artois et de la vallée de la Lys</i>	<i>37</i>
<i>Illustration 12 – Carte piézométrique de la nappe de la craie dans le Nord-Pas-de-Calais</i>	<i>38</i>
<i>Illustration 13 - Sélection de l'ouvrage 01871X0031/S1 pour le suivi de la masse d'eau souterraine du Tertiaire - Champigny - en Brie et Soissonnais</i>	<i>40</i>
<i>Illustration 14 - Sélection de l'ouvrage 08511X0036/F1 pour le suivi de la masse d'eau souterraine des Sables plio-quadernaires du bassin de la Garonne.....</i>	<i>43</i>
<i>Illustration 15 - Performances en validation du modèle GR4J avec module neige Cemaneige – Critère C2MQ (MEDDTL, 2011)</i>	<i>44</i>
<i>Illustration 16 – Exemple de deux formations de niveau 1 de BDLISA</i>	<i>45</i>
<i>Illustration 17 – Comparaison entre précipitations temps présent et temps futur.....</i>	<i>47</i>
<i>Illustration 18 – Comparaison entre ETP temps présent et temps futur.....</i>	<i>48</i>
<i>Illustration 19 – Comparaison entre ETR temps présent et temps futur.....</i>	<i>49</i>
<i>Illustration 20 – Comparaison entre pluies efficaces (calculées à partir de l'ETP) temps présent et temps futur</i>	<i>49</i>
<i>Illustration 21 – Comparaison entre pluies efficaces (calculées à partir de l'ETR) temps présent et temps futur</i>	<i>49</i>
<i>Illustration 22 – Ecart entre la pluie efficace (P - ETR) temps futur et temps présent par maille de 8 km et piézomètres montrant une tendance significative</i>	<i>50</i>
<i>Illustration 23 – Ecart entre la pluie efficace (P - ETR) temps futur et temps présent par masse d'eau souterraine.....</i>	<i>51</i>
<i>Illustration 24 – Liste des piézomètres susceptibles d'être utilisés pour le suivi du changement climatique sur la masse d'eau AG001 (Craie de l'Audomarois)</i>	<i>52</i>
<i>Illustration 25 – Chronique du piézomètre 00065X0011/P1 - Puits de la Maison forestière des Flaquettes (guines) – 62</i>	<i>53</i>
<i>Illustration 26 – Chronique du piézomètre 00117X0023/P1 - Puits communal du hameau d'Ecuires (Thiembronne) - 62.....</i>	<i>53</i>
<i>Illustration 27 – Piézomètres sélectionnés en priorité 1</i>	<i>55</i>
<i>Illustration 28 – Piézomètres sélectionnés en priorité 2</i>	<i>56</i>
<i>Illustration 29 – Piézomètres sélectionnés en priorité 3</i>	<i>57</i>

<i>Illustration 30 – Piézomètres sélectionnés en priorité 4</i>	58
<i>Illustration 31 - Présélection de points susceptibles de faire partie du réseau de suivi du CC</i>	59
<i>Illustration 32 - masses d'eau sensibles au CC sans piézomètre présélectionné</i>	60
<i>Illustration 33 - Seuils piézométriques définis au piézomètre de Montereau-sur-le-Jard (77)</i>	65
<i>Illustration 34 - Relation entre le débit d'étiage de l'Avre et le niveau de la nappe au piézomètre de Hangest à la date d'occurrence de ce débit</i>	65
<i>Illustration 35 - Corrélation entre débit décadaire de la Vesle à Puilsieux et niveau piézométrique aux Grandes Loges</i>	66
<i>Illustration 36 – Précipitations mensuelles à la station d'Abbeville sur la période 1960-2010 et cumul des précipitations sur 6 mois et 12 mois (mois glissants)</i>	68
<i>Illustration 37 – Diagrammes permettant de juger de l'ajustement de la loi gamma sur l'échantillon du mois de mars constitué par les pluies mensuelles cumulées sur 6 mois à la station d'Abbeville</i>	69
<i>Illustration 38 – Calcul du SPI-6mois à la station d'Abbeville pour le mois de mars : projection de la loi gamma ajustée sur la loi normale centrée-réduite</i>	70
<i>Illustration 39 – Evolution du SPI-6mois et du SPI-12mois à la station d'Abbeville de 1960 à 2010</i>	71
<i>Illustration 40 - Caractérisation d'un épisode de sécheresse par le SPI</i>	72
<i>Illustration 41 – Exemple de cartographie du SPI</i>	73
<i>Illustration 42 - Représentation de la sécheresse de 1976 avec le SSWI-1</i>	74
<i>Illustration 43 – Corrélation entre le SPI et le SPEI de 1 à 24 mois calculés à partir des données de 11 stations climatiques sur la période 1910-2007</i>	75
<i>Illustration 44 – Exemple de nappe à cycles annuels et de nappe à double cycles avec cycle annuel marqué</i>	78
<i>Illustration 45 - Exemple de nappe à double cycles avec cycles pluriannuels plus marqués que les annuels et de nappe à cycles pluriannuels dominant</i>	79
<i>Illustration 46 – Localisation des piézomètres utilisés pour le calcul du SPLI</i>	79
<i>Illustration 47 - Exemple d'élaboration du SPLI mensuel. Etape 1 : calcul d'un index piézométrique normé (IP, graphique du haut) puis moyenné sur 6 mois (IP6) et 12 mois glissants (IP12)</i>	81
<i>Illustration 48 – Exemples pour 3 piézomètres de distribution fréquentielle des index piézométriques cumulés sur 6 mois (IP6)</i>	83
<i>Illustration 49 – Autres exemples, pour 3 piézomètres, de distribution fréquentielle des index piézométriques cumulés sur 6 mois (IP6)</i>	84
<i>Illustration 50 - Exemple d'élaboration d'un SPLI mensuel 1 (ici, le SPLI_12mois du mois d'octobre) : ajustements sur la distribution empirique des fréquences cumulées (DCF) de l'IP12 du mois d'octobre d'un estimateur de la densité, d'une loi logistique et d'une loi de Pearson de type 1</i>	85

<i>Illustration 51 - Exemple d'élaboration du SPLI mensuel. Etape 3 : évolution du SPLI-12mois (calculé en utilisant un estimateur de la densité, la loi logistiqu, la loi de Pearson de type I).....</i>	<i>87</i>
<i>Illustration 52 – Comparaison des SPI-6 et SPI-12 avec les SPLI-6 et SPLI-12 d'un piézomètre situé non loin de la station climatologique de Dijon : graphiques d'évolution et de corrélation croisée SPLI/SPI.....</i>	<i>89</i>
<i>Illustration 53 – Comparaison des SPI-6 et SPI-12 avec les SPLI-6 et SPLI-12 d'un piézomètre situé non loin de la station climatologique de Reims : graphiques d'évolution et de corrélation croisée SPLI/SPI.....</i>	<i>90</i>
<i>Illustration 54 - Comparaison des SPI-6 et SPI-12 avec les SPLI-6 et SPLI-12 d'un piézomètre situé non loin de la station climatologique de Strasbourg.....</i>	<i>91</i>
<i>Illustration 55 – Lot 1 : évolution des SPLI (1an, 2 ans et 3 ans) des 101 piézomètres.....</i>	<i>95</i>
<i>Illustration 56 – Lot 1 : pourcentage de piézomètres sous le seuil du décennal sec.....</i>	<i>96</i>
<i>Illustration 57 – Lot 1 : pourcentage de piézomètres au-dessus du seuil décennal humide.....</i>	<i>97</i>
<i>Illustration 58 - Lot 2 : évolution du SPLI-1an, pourcentage de piézomètres (sur 65) sous le seuil décennal sec et au-dessus du seuil décennal humide</i>	<i>98</i>
<i>Illustration 59 - Lot 2 : évolution du SPLI-2ans, pourcentage de piézomètres (sur 65) sous le seuil décennal sec et au-dessus du seuil décennal humide</i>	<i>99</i>
<i>Illustration 60 – Lots 1 et 2 : évolution du SPLI-1an, pourcentage de piézomètres (sur 166) sous le seuil décennal sec et au-dessus du seuil décennal humide</i>	<i>100</i>
<i>Illustration 61 – Lots 1 et 2 : évolution du SPLI-2ans, pourcentage de piézomètres (sur 166) sous le seuil décennal sec et au-dessus du seuil décennal humide</i>	<i>101</i>
<i>Illustration 62 – Lot 3 : évolution du SPLI-1an, pourcentage de piézomètres sous le seuil décennal sec et au-dessus du seuil décennal humide.....</i>	<i>102</i>
<i>Illustration 63- Lot 3 : évolution du SPLI-2ans, pourcentage de piézomètres sous le seuil décennal sec et au-dessus du seuil décennal humide.....</i>	<i>103</i>
<i>Illustration 64 – Lot 4 : évolution du SPLI-1an, pourcentage de piézomètres sous le seuil décennal sec et au-dessus du seuil décennal humide.....</i>	<i>104</i>
<i>Illustration 65 - Lot 4 : évolution du SPLI-2ans, pourcentage de piézomètres sous le seuil décennal sec et au-dessus du seuil décennal humide.....</i>	<i>105</i>
<i>Illustration 66 - Relation entre surface moyenne, durée moyenne et magnitude totale pour tous les événements de sécheresse en France caractérisés par le SPI et le SSWI avec des échelles de temps de 3, 6 et 12 mois et un seuil de 20% (quinquennal sec).</i>	<i>109</i>

Liste des annexes

Annexe 1 - Masses d'eau souterraine classées selon leur sensibilité au CC

Annexe 2 - Masses d'eau souterraines sélectionnées pour le suivi du CC avec les piézomètres associés

Annexe 3 - Lois de probabilité utilisées

Annexe 4 – Estimateurs à noyaux

...

1. Introduction

Le changement climatique (CC) a un impact direct sur les précipitations et l'évapotranspiration et par voie de conséquence sur l'infiltration de l'eau météorique et donc le niveau des nappes d'eau souterraine. Les conséquences peuvent être importantes à la fois en terme de ressource mais aussi de transformation des écosystèmes associés. L'objectif du travail présenté dans ce rapport est d'établir un réseau de suivi dédié à l'impact quantitatif du CC sur les nappes d'eau souterraine en France métropolitaine et de proposer des indicateurs de suivi des niveaux des nappes.

L'action a débuté en 2010 (Vernoux et Seguin, 2011 et 2012) avec :

- une synthèse bibliographique des travaux réalisés sur l'impact du changement climatique sur le niveau des nappes d'eau souterraine ;
- une première sélection de piézomètres en éliminant les séries non utilisables ou à optimiser pour le futur avec une typologie des piézomètres tenant compte de l'état libre ou captif des nappes, de leur dynamique, de la recharge, de leur degré de liaison avec les cours d'eau ;
- des tests statistiques sur les séries piézométriques retenues.

L'action 2012 s'inscrit dans la continuité des actions 2010 et 2011 : elle comporte deux parties :

- la première est consacrée à la définition d'un réseau piézométrique dédié au changement climatique et à la faisabilité de sa mise en œuvre (stations existantes et à créer) ;
- la seconde, à caractère exploratoire, expose la démarche de calcul d'un index piézométrique standardisé, analogue par le mode de calcul à l'index standardisé des précipitations (SPI) et à l'index standardisé d'humidité des sols (SSWI), deux index calculés par Météo-France. Ce troisième index, permettrait de suivre l'état des nappes libres au cours du temps et d'en avoir une vision homogène sur tout le territoire national.

2. Définition d'un réseau piézométrique dédié au changement climatique

La définition d'un réseau piézométrique dédié au changement climatique est basée sur un découpage du territoire en zones de taille raisonnable à l'intérieur desquelles sera sélectionné ou créé un piézomètre dédié au suivi du changement climatique. Ce découpage peut être réalisé par analyse multi-critères.

Nous avons regardé dans un premier temps les zonages existants, puis défini des critères de sélection des points existants et enfin réalisé un certain nombre de tests.

2.1. ZONES HOMOGENES

Nous avons recherché des zonages existants basés sur les critères qui nous intéressent, à savoir des critères hydrogéologiques et/ou climatiques. Si certains de ces zonages s'avèrent pertinents par rapport à notre objectif de réseau piézométrique dédié au suivi du CC, une combinaison pourra être envisagée.

2.1.1. Zones climatiques

L'USGS, service géologique des Etats-Unis, a mis en œuvre sur le territoire des Etats-Unis un réseau de mesures dédié au changement climatique, le « Groundwater Climate Response Network »¹ (USGS, 2007). Ce réseau a été conçu pour le suivi des niveaux d'eau souterraine reflétant uniquement la variabilité climatique, en l'absence d'influence anthropique. Il s'intéresse aux variations climatiques qui vont affecter la recharge à une échelle mensuelle ou à plus long terme. Le réseau a été constitué à partir du découpage du territoire en 366 unités climatiques avec une sélection de points existants et les points qu'il faudrait mettre en place pour compléter le réseau actuel (*Illustration 1*).

En France un découpage du territoire en unités climatiques a été proposé par Météo-France. La carte AURORE, qui a été créée il y a une dizaine d'années, est basée sur une climatologie de référence (trentenaire). Elle découpe la France en zones aux caractéristiques pluviométriques proches et climatiquement homogènes en regard des précipitations. Cela explique que la taille des zones soit très variable, notamment dans les régions montagneuses.

Il y a 198 zones et chacune est caractérisée par la hauteur de précipitations annuelles normales médiane sur la zone (carte de l'*Illustration 2*, construite avec les données fournies par Météo-France).

¹ <http://groundwaterwatch.usgs.gov/Net/OGWNetwork.asp?ncd=cm>

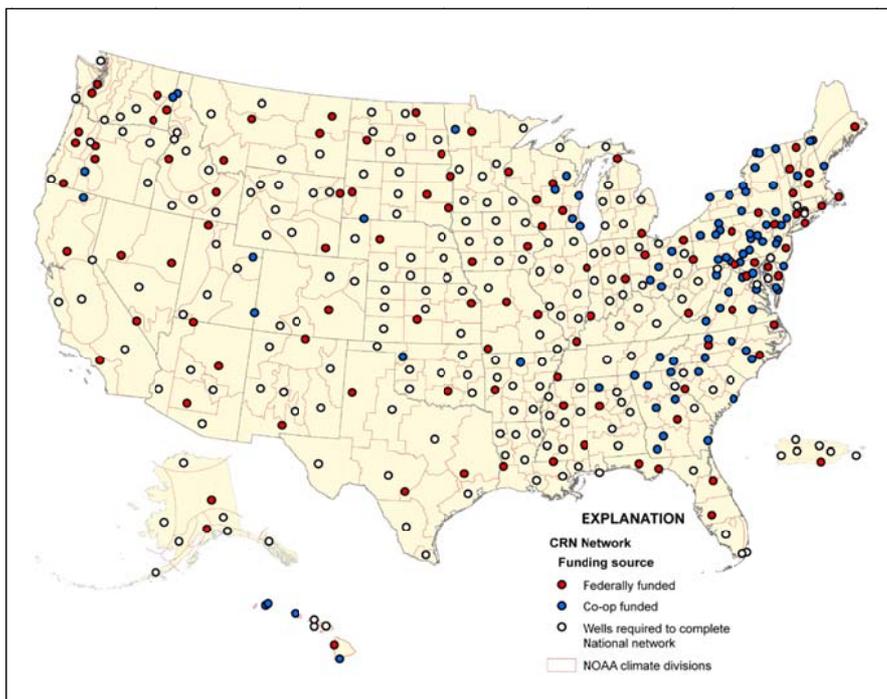


Illustration 1 – Réseau de suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines aux Etats-Unis (USGS, 2007)

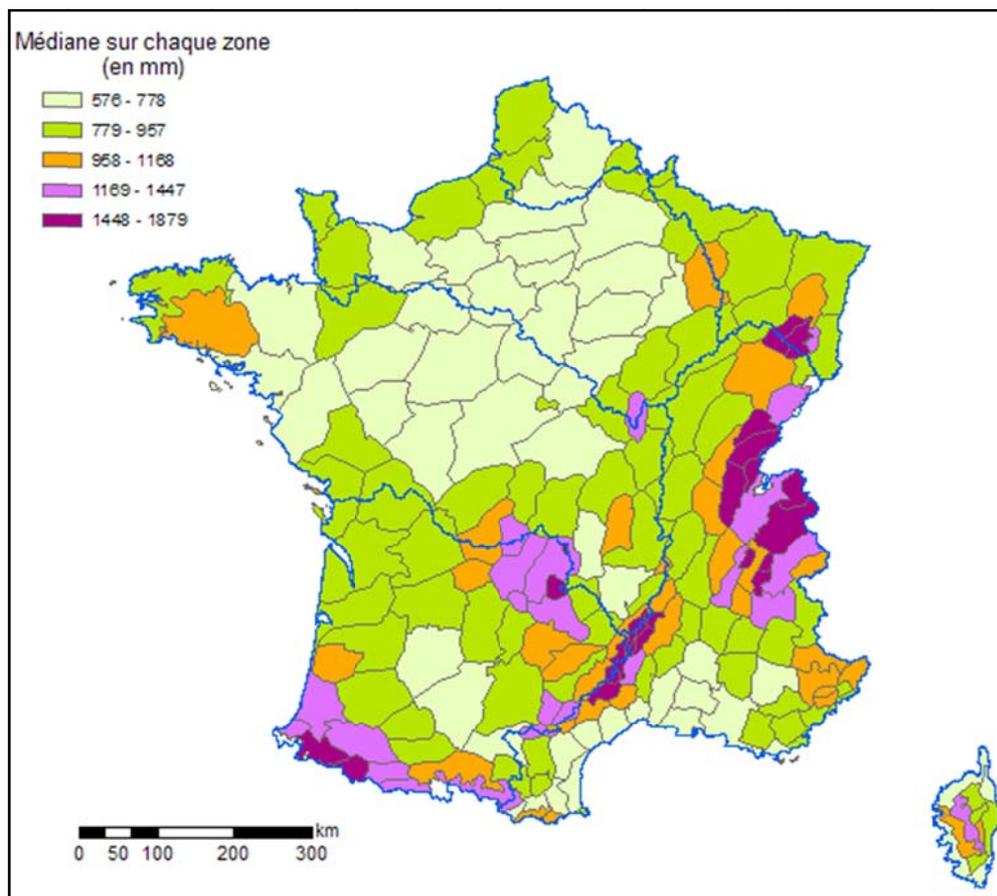


Illustration 2 – Zones climatiques "Aurore" (source Météo France)

2.1.2. Hydro-écorégions (HER)

Les hydro-écorégions de niveau 1 (HER1) ont été utilisées par Irstea pour la constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages (Renard et al., 2008). Ces HER1 ont été croisées avec les bassins versants envisagés pour un suivi des étiages.

Ce découpage, n'étant pas basé sur des critères véritablement hydrogéologiques ni climatiques, n'a pas été testé,

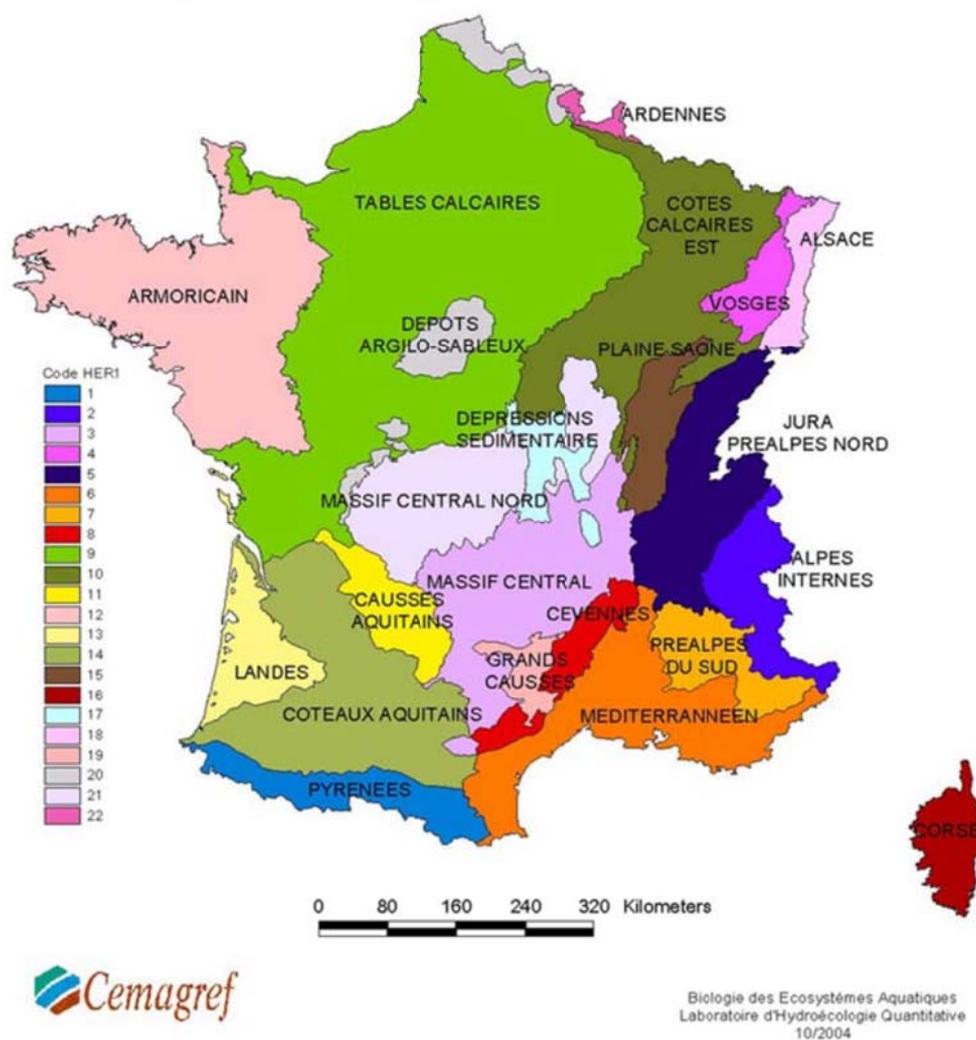


Illustration 3 - Hydro-écorégions de premier niveau (Renard et al., 2008)

2.1.3. Masses d'eau souterraines

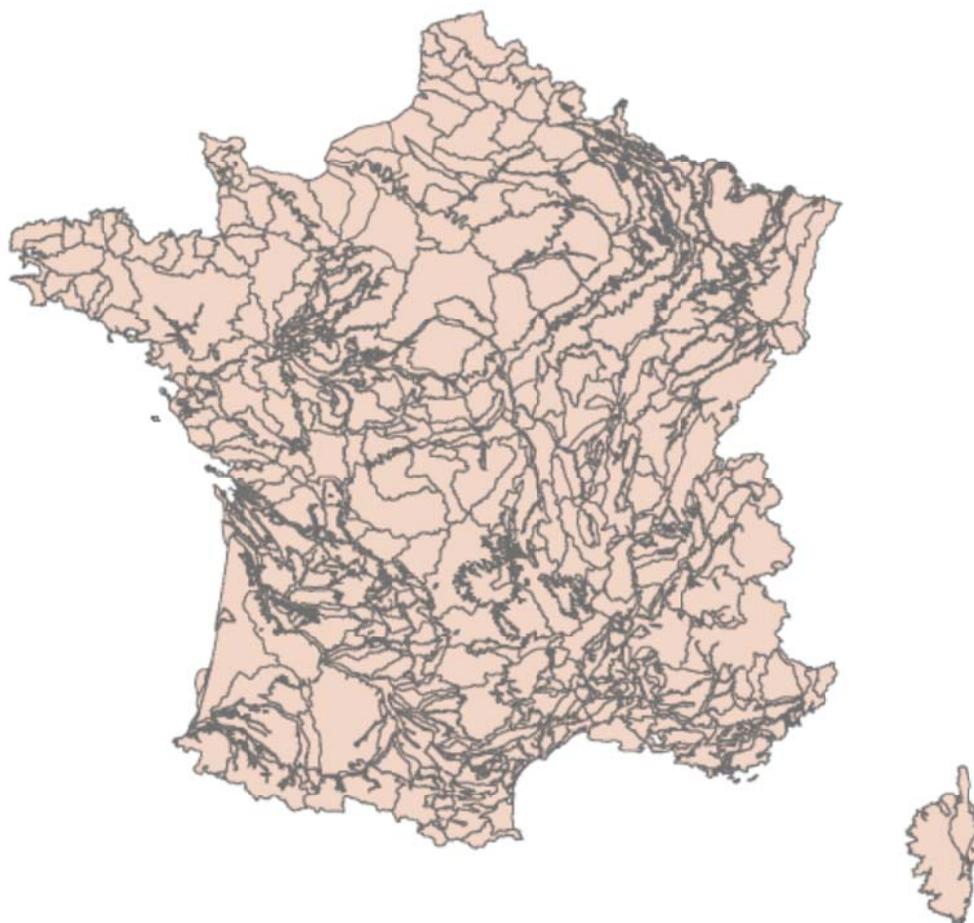


Illustration 4 – Masses d'eau souterraine de niveau 1

Dans le cadre de la DCE, le territoire métropolitain a été découpé en 534 masses d'eau souterraines (MESO) dont 498 de niveau 1 (niveau le plus superficiel).

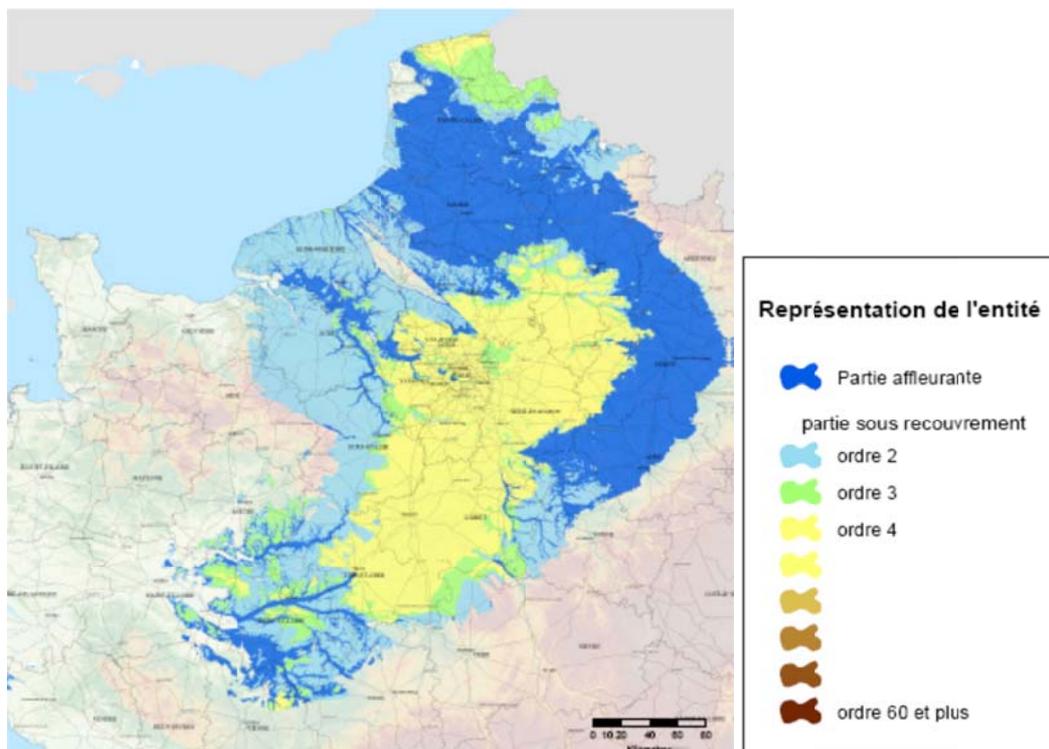
2.1.4. Référentiel hydrogéologique français (RHF)

Le nouveau référentiel hydrogéologique français est le référentiel BDLISA (Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères) qui propose un découpage du territoire national en entités hydrogéologiques (formations géologiques aquifères ou non) de façon plus détaillée que le référentiel des masses d'eau souterraine. Le cadre spatial est traduit suivant 3 échelles géographiques :

- une échelle nationale (niveau 1), utilisable pour des études débouchant par exemple sur des cartes d'orientation et portant sur les ressources en eau et leur évolution dans le temps, l'évaluation de la résistance à la sécheresse des aquifères, la vulnérabilité aux pollutions, les risques de remontée de nappes,...
- une échelle régionale (niveau 2), pour la réalisation d'atlas hydrogéologiques, l'évaluation des ressources en eau, ...

- une échelle locale (niveau 3), pour aider à la réalisation des cartes piézométriques, la modélisation d'un aquifère, ...

Le niveau 1 qui comporte 144 entités pourrait constituer un zonage adapté mais il s'avère que nombres de ces entités recouvrent des surfaces très importantes et regroupent des formations homogènes sur un plan géologique mais pas nécessairement en terme hydraulique comme le montre l'*Illustration 5* avec un système très étendu contenant plusieurs nappes d'eau souterraine distinctes. Le niveau 2 constitué de 703 entités apparait mieux adapté, mais avec un nombre d'entités très important.



National NV1		Régional NV2		Local NV3	
Code	Dénomination	Code	Dénomination	Code	Dénomination
121	Grand système multicouche du Campanien au Turonien (Séno-Turonien)	121AU	Craie marneuse du Cénomannien-Turonien du Bassin Parisien	121AU001	NV3 absent, nom de l'entité NV2 : Craie marneuse du Cénomannien-Turonien du Bassin Parisien
				121AU002	Craie marnieuses et Marnes de teinte bleue ("Dièves bleues") dans le bassin Artois-Picardie
				121AU003	Craie marneuse du Cénomannien-Turonien dans le bassin Loire-Bretagne
		121AW	Dièves du Turonien (Thierache-Vermendois-Noyonnais) dans le bassin Artois-Picardie et au nord du bassin Seine-Normandie	121AW001	NV3 absent, nom de l'entité NV2 : Dièves du Turonien (Thierache-Vermendois-Noyonnais) dans le bassin Artois-Picardie et au nord du bassin Seine-Normandie
				121AW02	Dièves du Turonien (Thierache-Vermendois-Noyonnais) dans le bassin Artois-Picardie (Dièves vertes)
121AY	Craie marneuse aquifère du Turonien en région Centre (majoritairement bassin Loire-Bretagne)	121AY01	Craie marneuse aquifère du Turonien, bassin de la Saultre, de la petite Saultre au Cher (bassin Loire-Bretagne)		
				121AY03	Craie marneuse aquifère du Turonien, bassin de la Grande Saultre (bassin Loire-Bretagne)
				121AY05	Craie marneuse aquifère du Turonien, bassin de la Loire au Cher (bassin Loire-Bretagne)

Illustration 5 - BDLISA niveau 1 - Entité 121 : Grand système multicouche du Campanien au Turonien (Séno-Turonien)

2.1.5. Bassins versants de surface

Le référentiel pour les bassins versants de surface est la BD Carthage ; c'est l'unité cartographique qui a été utilisée dans le projet Explore 2070 pour caractériser la vulnérabilité vis-à-vis du changement climatique.

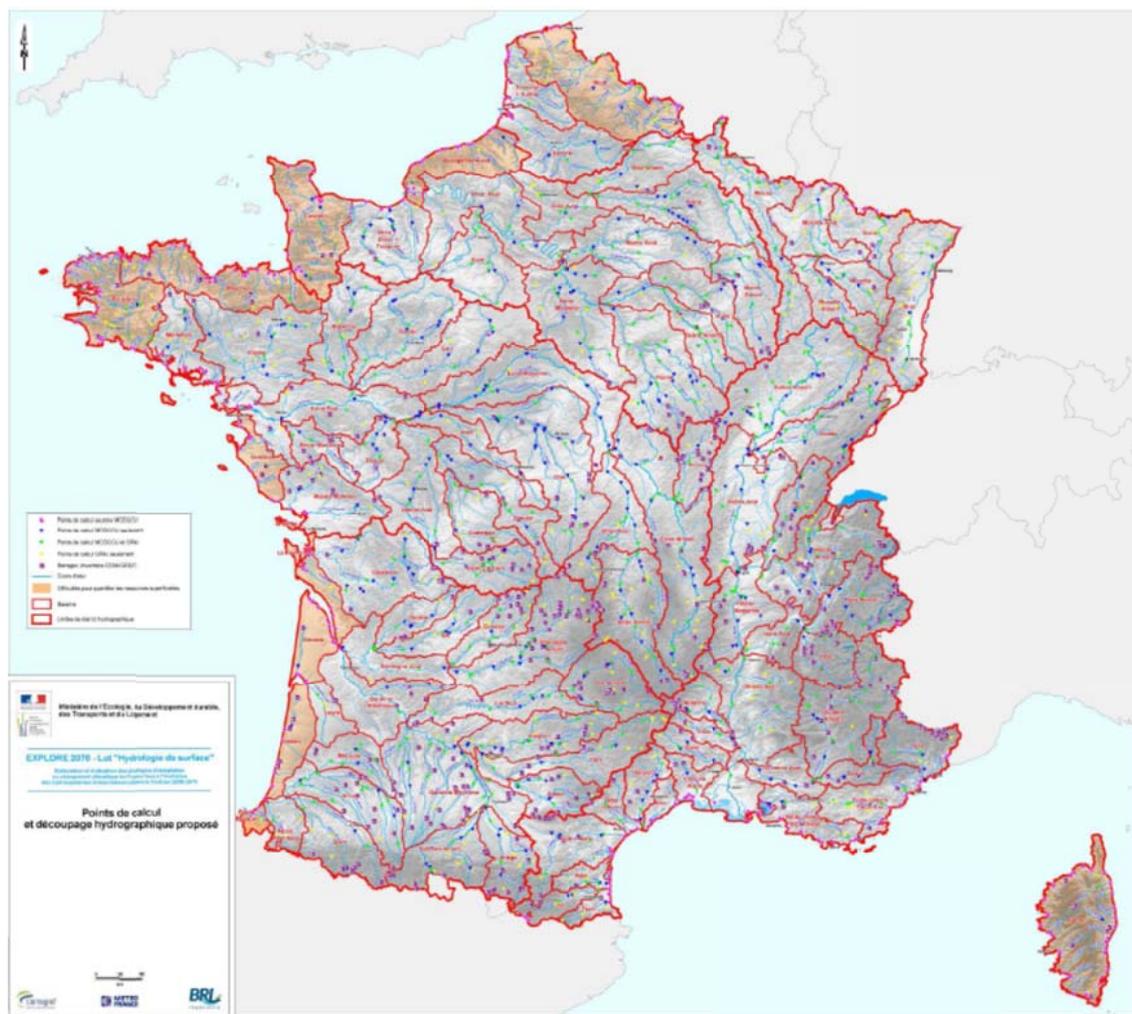


Illustration 6 – Délimitation des bassins versants de surface pour le projet Explore 2070 (rapport d'étape n°2, Hydrologie de surface)

2.1.6. Zones vulnérables vis-à-vis du CC

L'analyse de détection de tendances sur les chroniques piézométriques, réalisée en années 1 et 2 du projet, permet de définir quelques MESO qui apparaissent plus sensibles que d'autres au CC, mais cela ne concerne qu'une faible partie du territoire

Un critère qui apparaît pertinent est l'évolution de la recharge sous l'influence du CC. Dans le cadre du projet Explore 2070, des simulations d'évolution de la recharge ont été réalisées à partir de différents scénarios climatiques (MEDDTL, 2012). Elles permettent de comparer la recharge temps présent et la recharge temps futur (Illustration 7). Il s'agit d'une recharge moyenne par bassins versants « Explore »

calculée par différentes méthodes : modélisations hydrodynamiques quand le modèle est disponible, complétées pour les bassins non modélisés par la recharge obtenue à l'aide de la lame ruisselée au moyen des résultats GR4 (lot 3) et de l'IDPR² et, enfin, pour les points manquants ou douteux restants (Rhône moyen, Rhône aval, Loire moyenne, Garonne moyenne), par la recharge obtenue à l'aide de la pluie efficace Météo France (lot 3) et de l'IDPR.

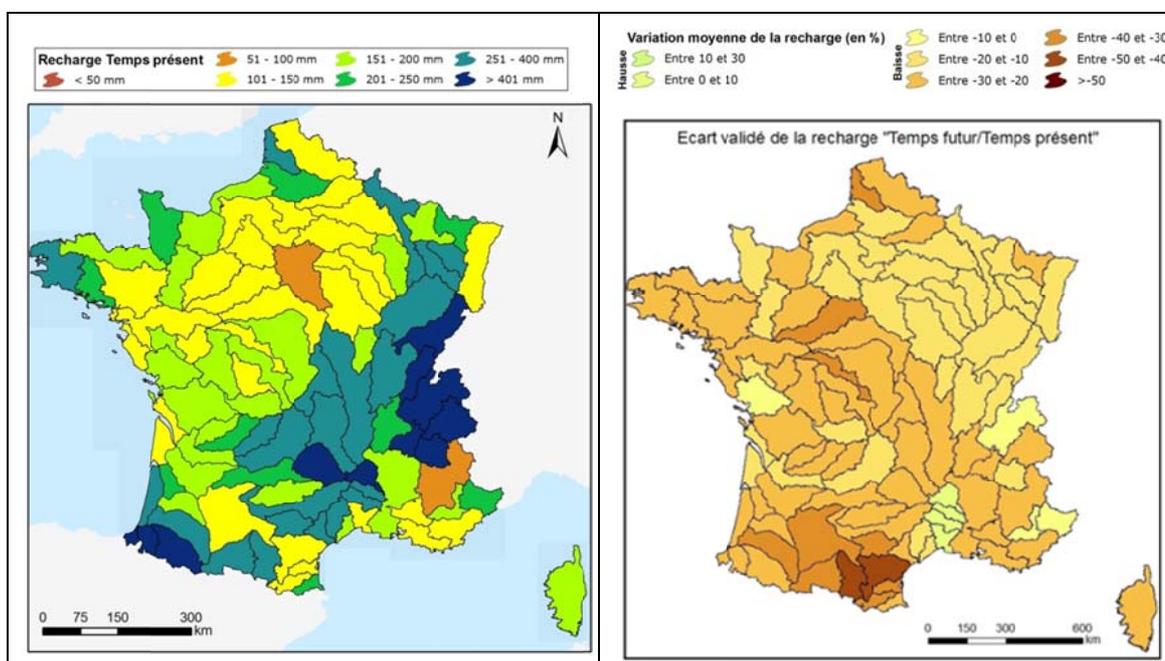


Illustration 7 – Comparaison entre la recharge actuelle (1961-1990) et son évolution future (2046-2065)(MEDDTL (2012a)

2.2. CRITERES DE SELECTION DES POINTS EXISTANTS

Une fois le zonage réalisé, il faudra sélectionner un point à l'intérieur de chaque zone. Il s'agit en fait à la fois de faire une sélection mais également une hiérarchisation dans la mesure où les critères initiaux sont très restrictifs ce qui entrainerait de nombreux secteurs sans point de suivi existant

- Chronique piézométrique > 25 ans (priorité p1), entre 15 et 25 ans (p2), entre 10 et 15 ans (p3), moins de 10 ans (p4)
- Faible influence anthropique
- Qualité des données / absence de trous de données
- Capturer une seule nappe, un aquifère libre qui réponde aux fluctuations climatiques
- Disposer des informations pertinentes sur l'ouvrage
- Piézomètre pas ou peu influencé par des pompages (et le rester sur le long terme)
- Piézomètre non influencé par l'irrigation, les canaux, ou toute source potentielle de recharge artificielle

² Indice De Persistence des Réseaux : Créé par le BRGM, il traduit l'aptitude des formations du sous-sol à laisser ruisseler ou s'infiltrer les eaux de surface. Il se fonde sur l'analyse du modèle numérique de terrain et des réseaux hydrographiques naturels, conditionnés par la géologie

- Avoir l'assurance de la pérennité du point d'eau
- Absence d'assec de l'ouvrage
- Cohérence avec le réseau de référence pour la surveillance des étiages proposé par Irstea³ (*Illustration 8*)
- Cohérence avec le réseau des 257 piézomètres (appelés indicateurs ponctuels) du BSH nappes (*Illustration 9*)

La source d'information pour ces critères est l'état des lieux (pour le réseau BRGM) réalisé dans le cadre de la gestion du réseau de suivi quantitatif des MESO avec en particulier les informations suivantes :

- Influence des mesures par pompages
- Type d'influence (Annuelle / Saisonnière)
- Appartenance au Réseau DCE
- Appartenance au Réseau BSH National
- Appartenance au Réseau BSH Bassin
- Appartenance au Réseau BSH Régional
- Appartenance au Réseau sécheresse
- Etat de l'ouvrage
- Etat et protection de la tête de l'ouvrage/Protection du matériel
- Risque d'assec
- Contexte environnemental
- Risque de détérioration ou de vandalisme
- Accessibilité

Ces informations ne sont pour le moment pas exhaustives, il manque en particulier les piézomètres gérés par d'autres organismes que le BRGM

Nous avons également pris en compte les informations issues des travaux réalisés en années 1 et 2 du projet, mais qui là encore ne concernent pas l'ensemble des piézomètres existants.

³ Dans la mesure où Irstea a mis en place un réseau hydrométrique de référence pour la surveillance des étiages, il nous paraissait utile d'avoir des points de suivi des eaux souterraines sur les mêmes bassins. Nous verrons plus loin que les modes de sélection des points étant très différents, ce critère n'a finalement pas été pris en compte.

Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé

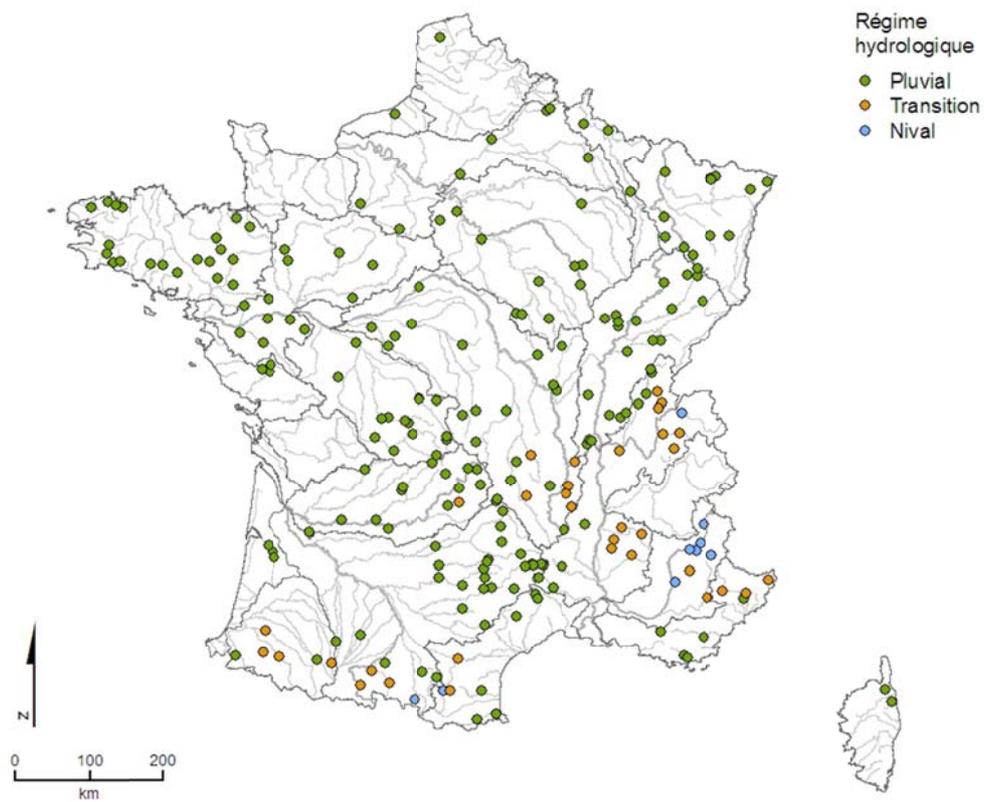


Illustration 8 - réseau de référence pour la surveillance des étiages (Giuntoli et Renard, 2010)

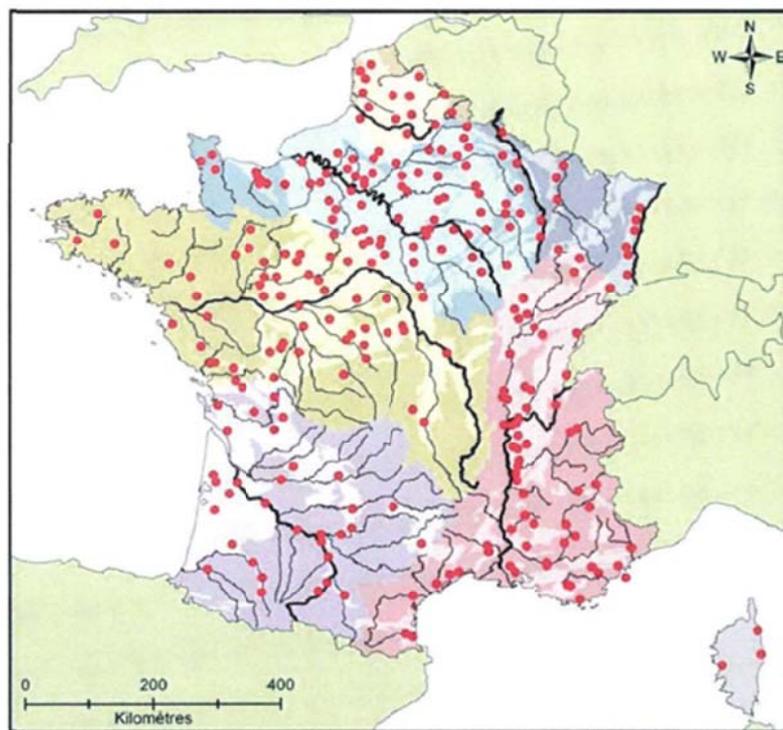


Illustration 9 - Carte de situation des indicateurs ponctuels pour le BSH nappes (Vigouroux, 2011)

2.3. TESTS DE SELECTION DE POINTS

2.3.1. Procédure

- ❖ A partir du réseau existant, faire un classement en fonction de la durée de la chronique :
 - Sélection des points avec plus de 25 ans de données
 - Sélection des points avec 15 à 25 ans de données
 - Sélection des points avec 10 à 15 ans de données
- ❖ A partir du zonage Aurore, sélectionner la/les MESO appartenant à la zone ; si le découpage est homogène, on choisira un point sur la zone ; si découpage hétérogène, possibilité de découpage en sous-zones.
- ❖ Appliquer les critères de sélection des points (cf. 2.2) ; Pour chaque station sélectionnée, les informations suivantes seront renseignées :
 - indice national
 - nom de la masse d'eau
 - priorité de la masse d'eau (estimée à partir des résultats des calculs de tendance et d'évolution de la recharge EXPLORE 2070)
 - code de la masse d'eau (MS-CD)
 - chronique (nombre d'années)
 - comportement
 - influence anthropique
 - qualité des données
 - tendance
 - tendance significative
 - pérennité du point
 - distance à la station du réseau Irstea (km)
 - code de la station du réseau Irstea
 - secteur hydro BD Carthage
 - réseau BSH nappes
 - zone Aurore
 - écart moyen de la recharge temps futur / temps présent (Explore 2070)

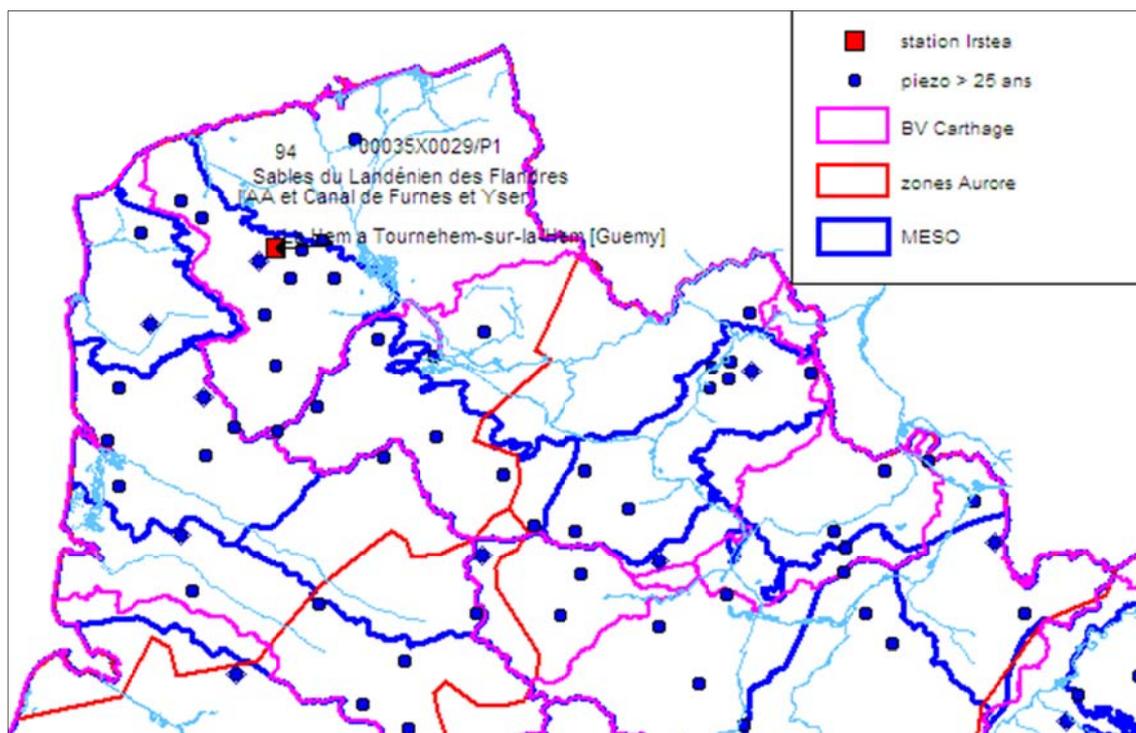
Nous avons appliqué cette procédure, à titre de test, sur 4 masses d'eau souterraine : AG014, AG004, HG103, FG047.

2.3.2. Test pour la MESO AG014

Il s'agit de la masse d'eau souterraine des **Sables du Landénien des Flandres** (2663 km², 100% affleurante) qui montre une tendance à la baisse.

- ❖ Zones Aurores : la MESO recoupe au nord la zone Aurore 94 (pour les 3/4) et au sud la zone 196 (pour 1/4)
- ❖ BV Carthage : la MESO recoupe au nord le bassin de l'Aa au sud le bassin de la Lys
- ❖ Critères relatifs au piézomètre sélectionné

<i>indice national</i>	<i>00035X0029/P1</i>	Seulement 2 ouvrages avec plus de 25 ans de chronique mais l'un d'eux a été abandonné en 2006 ; ce piezo montre une tendance significative à la baisse
<i>Masse d'eau</i>	<i>Sables du Landénien des Flandres</i>	
<i>Priorité MESO</i>	<i>1</i>	MESO qui montre une tendance significative à la baisse et devrait voir sa recharge diminuer de manière assez importante (20 à 30%)
<i>MS_CD</i>	<i>AG014</i>	
<i>chronique (années)</i>	<i>43</i>	Chronique quasiment complète ; il manque seulement janvier 2002 à juin 2003
<i>comportement</i>	<i>c</i>	Nappe libre à cycles annuels avec un battement de l'ordre du mètre ; HE en décembre-janvier ; BE en juillet-août
<i>influence anthropique</i>	<i>très faible</i>	2 captages situés à proximité mais qui captent des eaux de surface; quelques captages agricoles d'eau souterraine dont le plus proche est à 7 km ; une vingtaine de forages dans un rayon de 20 km et qui ne pompent chacun que quelques milliers de m ³ par an
<i>qualité données</i>	<i>bonne</i>	D'après examen visuel de la chronique
<i>tendance</i>	<i>B</i>	Baisse (-2 cm/an)
<i>tendance significative</i>	<i>B</i>	Masse d'eau avec piézométrie en baisse
<i>pérennité du point</i>	<i>forte</i>	Des actions sont néanmoins envisagées dans les années à venir
<i>distance station réseau Irstea (km)</i>	<i>22</i>	une seule station pour tout le bassin AP et qui est située sur un petit cours d'eau (la Hem)
<i>Code station Irstea</i>	<i>E4306010</i>	
<i>secteur hydro Carthage</i>	<i>E4</i>	l'AA et Canal de Furnes et Yser
<i>réseau BSH</i>	<i>NON</i>	
<i>zone Aurore</i>	<i>94</i>	Médiane = 794 mm La zone qui recoupe la MESO au sud (196) à une médiane à 684 mm
<i>Evolution recharge</i>	<i>Entre -30 et -20 %</i>	écart moyen de la recharge temps futur / temps présent (Explore 2070)



Graphique du piézomètre
00035X0029/P1 - Puits de Bourbourg - 59

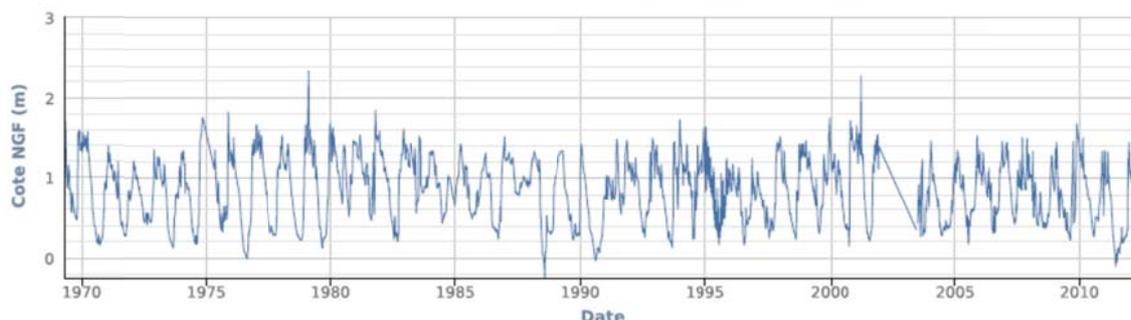


Illustration 10 - Sélection de l'ouvrage 00035X0029/P1 pour le suivi de la masse d'eau souterraine des Sables du Landénien des Flandres

2.3.3. Test pour la MESO AG004

Il s'agit de la masse d'eau souterraine de la **Craie de l'Artois et de la vallée de la Lys** (1120 km², dont 751 affleurante) ; c'est l'une des 13 masses d'eau de l'aquifère de la craie du bassin Artois-Picardie ; on peut se demander s'il est nécessaire de mettre une station de suivi du CC sur chacune de ces masses d'eau. 6 de ces masses d'eau, dont l'AG004, montrent une tendance significative à la hausse.

- ❖ Zones Aurores : la MESO recoupe la zone Aurore 94 (pour 90 %) et au sud la zone 196 (pour 10%)
- ❖ BV Carthage : la MESO correspond à la partie orientale du bassin de la Lys (limites communes)

❖ Critères relatifs au piézomètre sélectionné

<i>indice national</i>	00173X0083/PZ13A	7 ouvrages avec plus de 25 ans de chronique, dont 2 en nappe captive et 4 influencés. Choix d'un ouvrage avec tendance significative à la hausse Situé à la limite des masses d'eau AG004 et AG001, il pourrait être utilisé pour le suivi des 2 masses d'eau
<i>Masse d'eau</i>	Craie de l'Artois et de la vallée de la Lys	
<i>Priorité MESO</i>	1	MESO qui montre une tendance significative à la hausse et qui pourtant devrait voir sa recharge diminuer de manière très importante (-30 à -40%)
<i>MS_CD</i>	AG004	
<i>chronique (années)</i>	39	Chronique quasiment complète ; il manque seulement septembre 2001 à août 2003
<i>comportement</i>	c	Nappe libre à cycles annuels avec un battement très important (de 20 à 40 m selon les années*); HE en janvier-février (plus parfois un second pic au printemps ; BE en septembre-octobre avec courbe de vidange caractéristique * Le fait que le battement soit très important est intéressant en terme de tendance future, il permettra de voir plus facilement l'effet d'une baisse de la recharge ; par contre il ne semble pas représentatif du battement de la nappe dans le secteur qui est plutôt d'une dizaine de m.
<i>influence anthropique</i>	moyenne	Un captage situé à 3 km avec 380 000 m ³ de prélèvements pour l'AEP en 2008 induisant un rabattement théorique de 28 cm au niveau du piézomètre.
<i>qualité données</i>	bonne	avec néanmoins quelques données qui paraissent douteuses en 1996
<i>tendance</i>	hausse	7 cm/an
<i>tendance significative</i>	hausse	
<i>pérennité du point</i>	forte	
<i>distance station réseau Irstea (km)</i>	30	une seule station pour tout le bassin AP et qui est située sur un petit cours d'eau (la Hem)
<i>Code station Irstea</i>	E4306010	
<i>secteur hydro Carthage</i>	E3	La Lys de son origine à la frontière belge et Deûle de son origine au confluent avec la Lys canalisée La MESO et le BV Carthage ont une limite commune sur la moitié de la MESO
<i>réseau BSH</i>	non	
<i>zone Aurore</i>	94	Médiane = 794 mm
<i>Evolution recharge</i>	Entre -40 et -30 %	écart moyen de la recharge temps futur / temps présent (Explore 2070)

En conclusion, pour cette masse d'eau, il n'existe pas de piézomètre avec au moins 25 ans de données et non influencé. Dans ce cas, plusieurs solutions sont possibles. On peut néanmoins conserver le piézomètre sélectionné en considérant que l'influence des prélèvements reste peu importante. On peut également rechercher un piézomètre avec un historique inférieur à 25 ans. On peut aussi considérer qu'un point dans cette masse d'eau n'est pas indispensable et qu'il faut en sélectionner un dans une ou plusieurs masses d'eau environnantes, sachant qu'on est toujours dans la nappe de la craie (illustration 12). On pourrait par exemple sélectionner le piézomètre 00067X0183/PZ1, dans la masse d'eau de la Craie de l'Audomarois, avec 38 ans de chronique, utilisé pour le BSH et situé à proximité de la station Irstea ; il est également légèrement influencé (un captage AEP à 200.000 m³ par an situé à 3.8 km et un captage AEP à 150.000 m³ par an situé à 5 km).

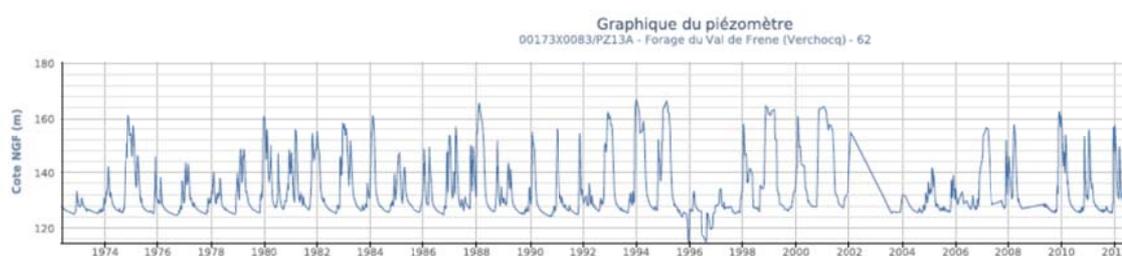
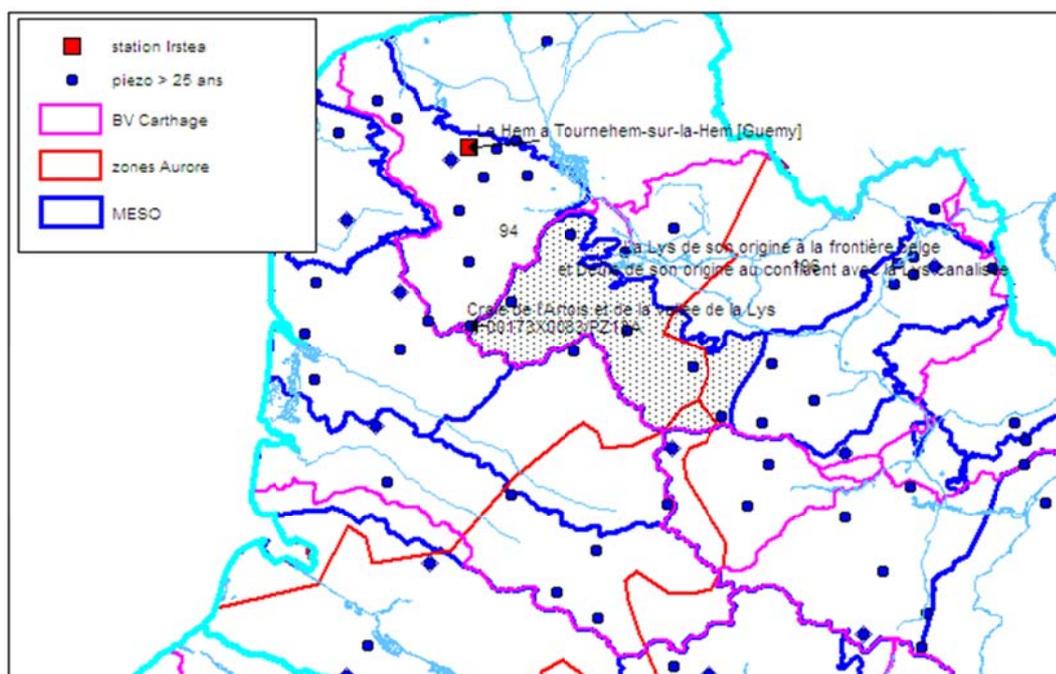


Illustration 11 - Sélection de l'ouvrage 00173X0083/PZ13A pour le suivi de la masse d'eau souterraine de la Craie de l'Artois et de la vallée de la Lys

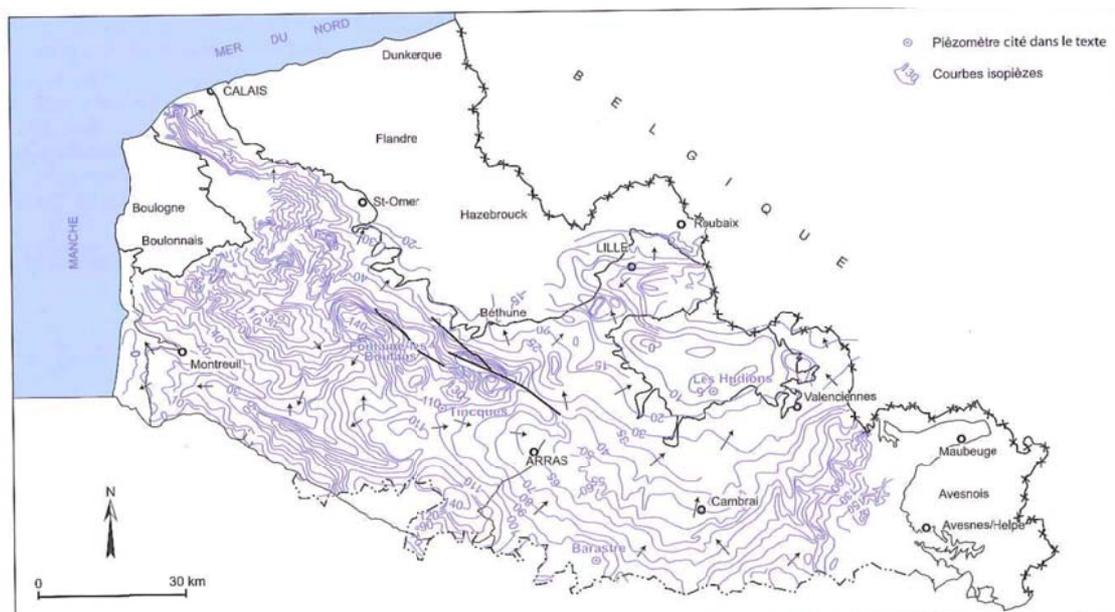


Illustration 12 – Carte piézométrique de la nappe de la craie dans le Nord-Pas-de-Calais

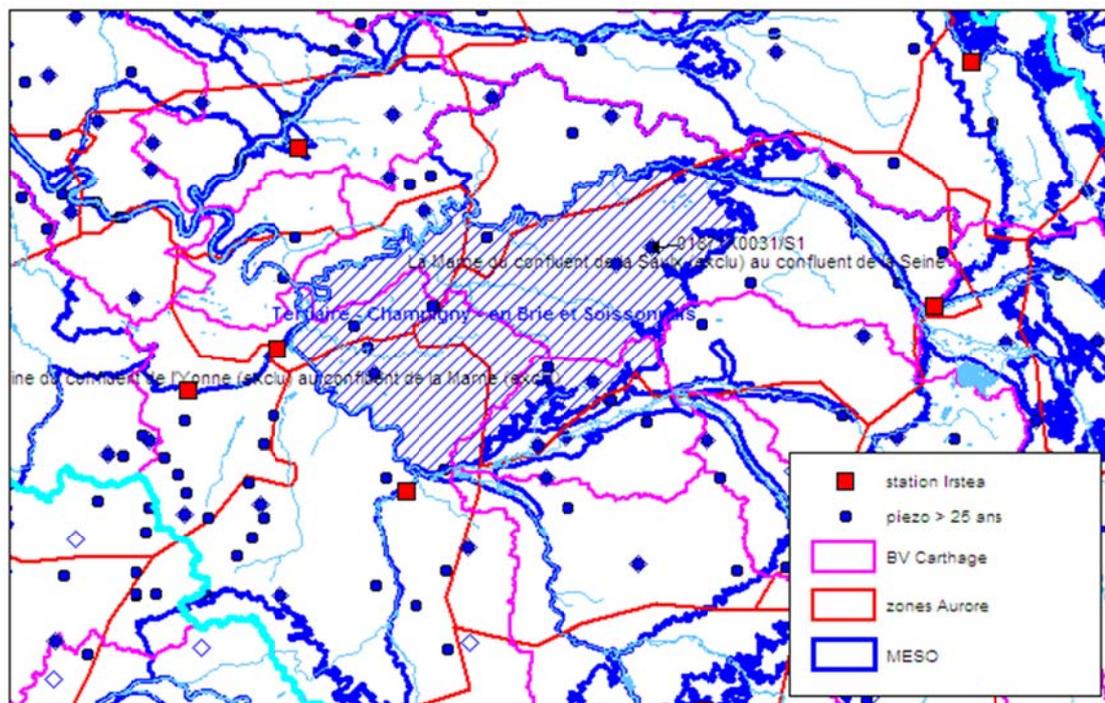
2.3.4. Test pour la MESO HG103

Il s'agit de la masse d'eau souterraine du **Tertiaire - Champigny- en Brie et Soissonnais** ; elle correspond à l'aquifère des Calcaires de Champigny entre la Marne et la Seine.

- ❖ Zones Aurores : la MESO recoupe 4 zones Aurore, mais essentiellement la zone 171. Pour l'ensemble des zones, la pluviométrie reste du même ordre (médiane respectivement de 710, 670, 665 et 698 mm)
- ❖ BV Carthage : la MESO correspond à des sous-bassins de la Seine et de la Marne
- ❖ Critères relatifs au piézomètre sélectionné

<i>indice national</i>	<i>01871X0031/S1</i>	<p>9 ouvrages avec plus de 25 ans de chronique, dont 5 avec plus de 40 ans étudiés en détail en phase 1 ; ces 5 piézomètres montrent une tendance globale à la baisse non significative et l'un d'eux (01853X0002) montre une tendance significative à la hausse pour les maximum annuels ; il est par ailleurs vraisemblablement influencés par des pompages.</p> <p>En terme de comportement, les 5 piézomètres sont plutôt de type annuel ou mixte, dont l'un (02603X0009) qui montre une prédominance marquée des cycles pluriannuels.</p> <p>Choix d'un ouvrage avec tendance non significative à la baisse et comportement de type mixte (b1)</p>
------------------------	----------------------	---

<i>Masse d'eau</i>	Tertiaire - Champigny - en Brie et Soissonnais	
<i>Priorité MESO</i>	1	MESO qui montre une tendance significative à la hausse (mais seulement pour un piézomètre et uniquement pour les maxima) et qui pourtant devrait voir sa recharge diminuer de manière très modérée (-10 à -20%)
<i>MS_CD</i>	HG103	
<i>chronique (années)</i>	44	Chronique quasiment complète
<i>comportement</i>	b1	Nappe libre à double cycles avec cycle annuel le plus marqué et un battement annuel maximum de 5 m
<i>influence anthropique</i>	faible	Un captage situé à 4.3 km avec 30 000 m ³ de prélèvements pour l'AEP en 2003
<i>qualité données</i>	bonne	
<i>tendance</i>	baisse	4 cm/an
<i>tendance significative</i>		
<i>pérennité du point</i>	forte	
<i>distance station réseau Irstea (km)</i>		aucune station située sur la masse d'eau
<i>Code station Irstea</i>		
<i>secteurs hydro Carthage</i>	F6 F4 F2	La Marne du confluent de la Saulx (exclu) au confluent de la Seine La Seine du confluent de l'Yonne (exclu) au confluent de la Marne (exclu) La Seine du confluent de l'Aube (exclu) au confluent de l'Yonne (exclu)
<i>réseau BSH</i>	oui	
<i>zone Aurore</i>	147 190 171 161	Médiane = 710, 670, 665 et 698 mm
<i>Evolution recharge</i>	Entre -10 et -20%	écart moyen de la recharge temps futur / temps présent (Explore 2070)



Graphique du piézomètre
01871X0031/S1 - JANVILLIERS

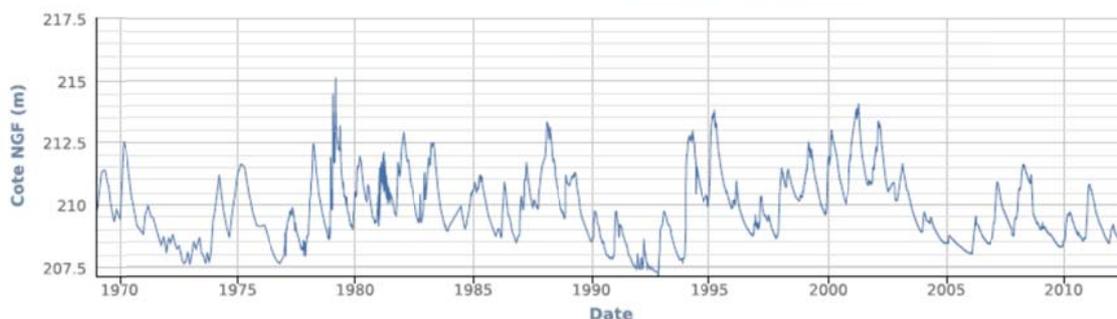


Illustration 13 - Sélection de l'ouvrage 01871X0031/S1 pour le suivi de la masse d'eau souterraine du Tertiaire - Champagne - en Brie et Soissonnais

Pour cette masse d'eau comportant 9 ouvrages avec plus de 25 ans de chronique, dont 5 avec plus de 40 ans, le choix s'est porté sur un ouvrage montrant une tendance non significative à la baisse et un comportement de type mixte (b1).

2.3.5. Test pour la MESO FG047

Il s'agit de la masse d'eau souterraine des **Sables plio-quaternaires du bassin de la Garonne région hydro et terrasses anciennes de la Garonne** (3820 km², 100% affleurante)

- ❖ Zones Aurores : la MESO recoupe 2 zones Aurore, la 50 et la 100. Pour l'ensemble des zones, la pluviométrie reste du même ordre (médiane respectivement de 853 et 860 mm)

- ❖ BV Carthage : la MESO correspond à la partie rive gauche du bassin de La Garonne, du confluent du Lot au confluent de la Dordogne

- ❖ Critères relatifs au piézomètre sélectionné

		Un seul ouvrage avec plus de 25 ans de chronique ; les 7 autres piézomètres existants pour le suivi de cette masse d'eau ont moins de 8 ans de chronique le piézomètre sélectionné montre une tendance à la baisse significative. comportement, de type annuel
<i>indice national</i>	08511X0036/F1	
<i>Masse d'eau</i>	Sables plio- quaternaires du bassin de la Garonne région hydro et terrasses anciennes de la Garonne	
<i>Priorité MESO</i>	1	Première nappe du système multi-couches des aquifères de la Gironde, c'est vraisemblablement la plus sensible au CC. Recharge actuelle comprise entre 150 et 200 mm/an, qui devrait diminuer de -20 à -30%
<i>MS_CD</i>	FG047	
<i>chronique (années)</i>	43	Chronique complète
<i>comportement</i>	c	Nappe libre cycles annuels battement annuel de 1 m dans les années 70-80 et qui maintenant est plutôt de 2 m
<i>influence anthropique</i>	possible	On compte 44 captages d'irrigation sur la commune totalisant 2.6 Mm ³ de prélèvements dans la « nappe phréatique » en 2008
<i>qualité données</i>	bonne	
<i>tendance</i>	baisse	4 cm/an
<i>tendance significative</i>	baisse	Pour les max, min, moy
<i>pérennité du point</i>	inconnue	
<i>distance station réseau Irstea (km)</i>		aucune station située sur la masse d'eau, ni sur le BV associé
<i>Code station Irstea</i>		
<i>secteurs hydro Carthage</i>	O9	La Garonne du confluent du Lot au confluent de la Dordogne
<i>réseau BSH</i>	oui	Ce qui paraît surprenant si le piézomètre est fortement influencé
<i>zone Aurore</i>	50 100	Médiane = 853 et 860 mm
<i>Evolution recharge</i>	Entre -20 et -30%	écart moyen de la recharge temps futur / temps présent (Explore 2070)

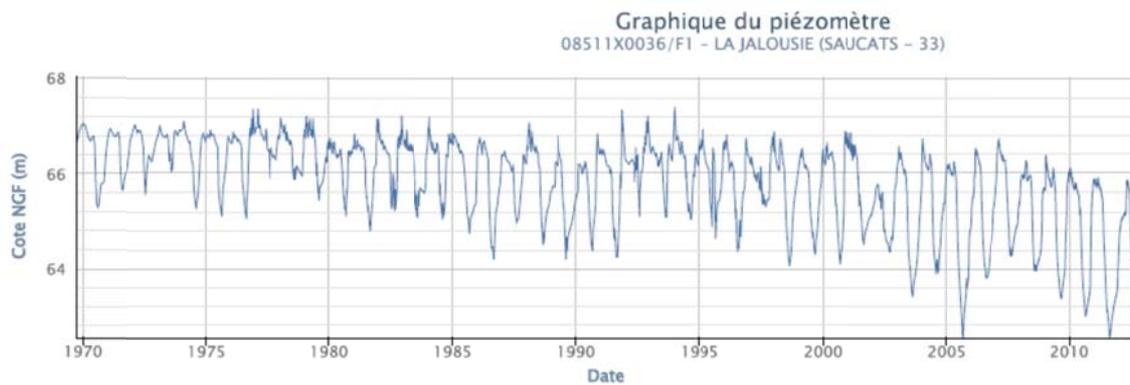
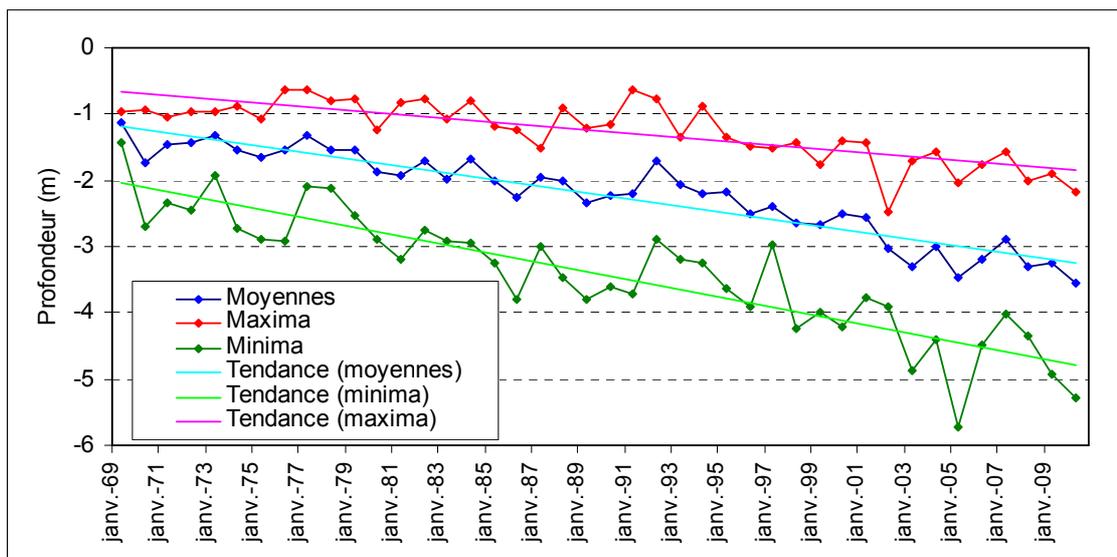
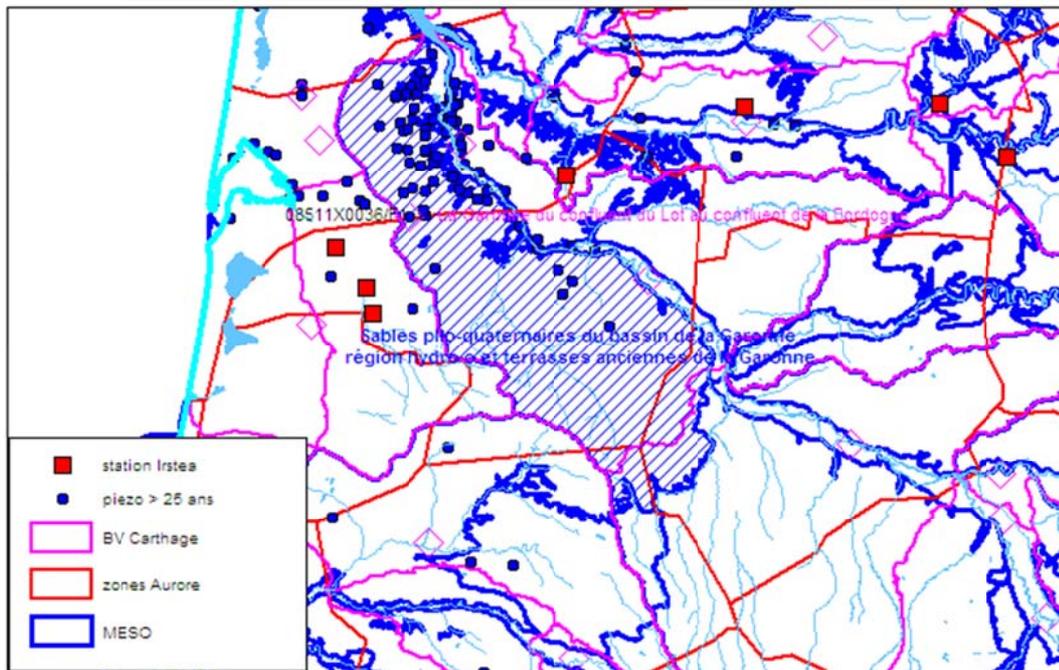


Illustration 14 - Sélection de l'ouvrage 08511X0036/F1 pour le suivi de la masse d'eau souterraine des Sables plio-quaternaires du bassin de la Garonne

L'ouvrage retenu est le seul avec plus de 25 ans de chronique ; il montre une tendance à la baisse significative avec un comportement, de type annuel

2.4. SELECTION FINALE DES ZONES DE SUIVI

Les différentes possibilités de sélection des zones sur lesquelles implanter des piézomètres de suivi du changement climatique, exposées dans les paragraphes précédents ont été discutées en comité de pilotage. Il en ressort que l'addition de critères tels que le zonage Aurore, la sectorisation hydro Carthage, les hydro-écorégions, complexifient le zonage sans apporter de véritable plus-value. Au final, il a été décidé que la sectorisation serait basée sur le croisement de deux critères, un critère purement hydrogéologique et un critère de sensibilité au changement climatique.

Pour le critère hydrogéologique, il a été initialement convenu d'utiliser le découpage BDLISA niveau 2 auquel on retire les aquifères captifs et les entités non-aquifères.

Pour le critère climatologique, il apparaît pertinent de prendre en compte une variable représentative de la sensibilité au CC. Il avait été initialement proposé de prendre en compte le pourcentage de variation de la recharge entre temps futur et temps présent issue d'Explore 2070 à la maille de travail de 8 km x 8 km. Il s'avère que les calculs de recharge n'ont pas été réalisés à la maille de travail de 8 km x 8 km mais directement agrégé par BV hydro (*Illustration 7*) et en prenant selon les secteurs soit des résultats de modélisation (modèles maillés) soit une combinaison de l'IDPR et de la pluie efficace (calculée avec GR4 sur 850 BV).

Un autre critère possible est le pourcentage de variation de la pluie efficace entre temps futur et temps présent. Ce calcul a été fait avec 2 méthodes différentes :

1. Modélisation GR4 sur 850 BV par Irstea (*Illustration 15* ; plus on est proche de 1, meilleur est le calage) ;
2. Calcul de pluie efficace par Météo-France à la maille 8 km x 8 km pour différents scénarios.

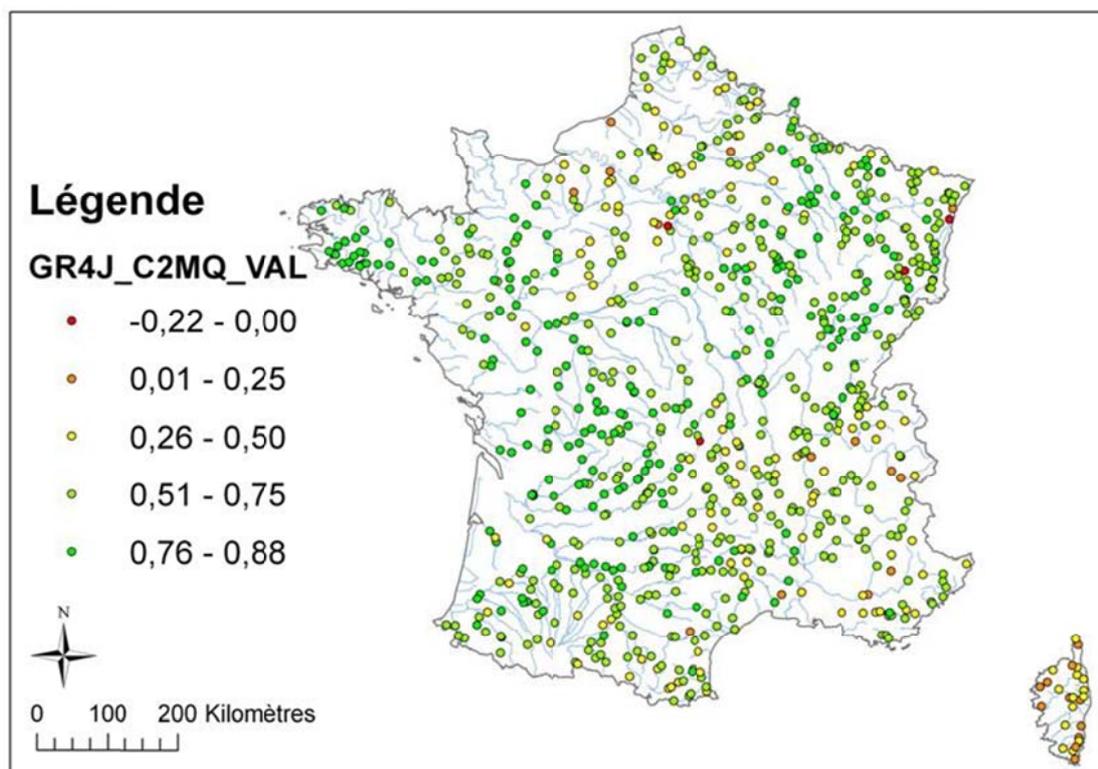


Illustration 15 - Performances en validation du modèle GR4J avec module neige Cemaneige – Critère C2MQ (MEDDTL, 2011)

Renseignement pris auprès de Irstea, il s'avère que les pluies efficaces calculées avec GR4 constituaient des résultats intermédiaires et n'ont pas été conservés. Par contre les données fournies par Météo-France au BRGM dans le cadre d'Explore 2070 sont disponibles et permettent de calculer des pluies efficaces « temps présent » et « temps futur ».

2.4.1. Entités hydrogéologiques

Pour la sélection des entités hydrogéologiques, on est parti de la version Béta du référentiel BDLISA disponible sur le site Eaufrance.

Le traitement a été réalisé en prenant les critères suivants :

RHF_ENTITE : France métropolitaine (dans la mesure où le critère climatique ne concerne que la France métropolitaine, les entités situées dans les DOM-TOM ont été supprimées)

RHF_NIVEAU = 2 (NV2, régional)

RHF_RELATIF = 1 ; il s'agit de l'ordre relatif des couches (équivalent du niveau pour les MESO) ; nous avons pris en compte uniquement le premier niveau.

RHF_NATURE = 3 (SA, système aquifère) ou 4 (DH, domaine hydrogéologique) ; pour RHF_NATURE = 4, on peut avoir des DH globalement peu aquifères au sein de systèmes aquifères (exemple, les Marnes à Huitres du Stampien) et des DH constituant les seules ressources aquifères d'une région (exemple, le socle du Massif

Armoricain). Nous avons donc supprimé les entités constituées de formation peu ou pas aquifères à base d'argiles et de marnes. Par contre nous avons conservé les entités correspondant aux bassins versants en domaine de socle.

Le problème s'est rapidement posé du critère RHF_RELATIF. Il s'agit effectivement du premier niveau rencontré, mais selon les secteurs, ce premier niveau ne correspond pas nécessairement à la première nappe d'eau souterraine d'intérêt régional. Dans l'exemple de *Illustration 16*, la première entité hydrogéologique en Artois-Picardie est le système aquifère de la craie ce qui correspond effectivement à la première nappe d'eau souterraine d'intérêt régional alors qu'en Normandie, la première entité hydrogéologique correspond au domaine hydrogéologique des sables et argiles à silex constituant la couverture de la première nappe d'eau souterraine qui est également la craie. Pour pouvoir sélectionner les entités hydrogéologiques de la craie en Normandie, il aurait fallu prendre également RHF_RELATIF = 2. (Niveau 2 = niveau régional).

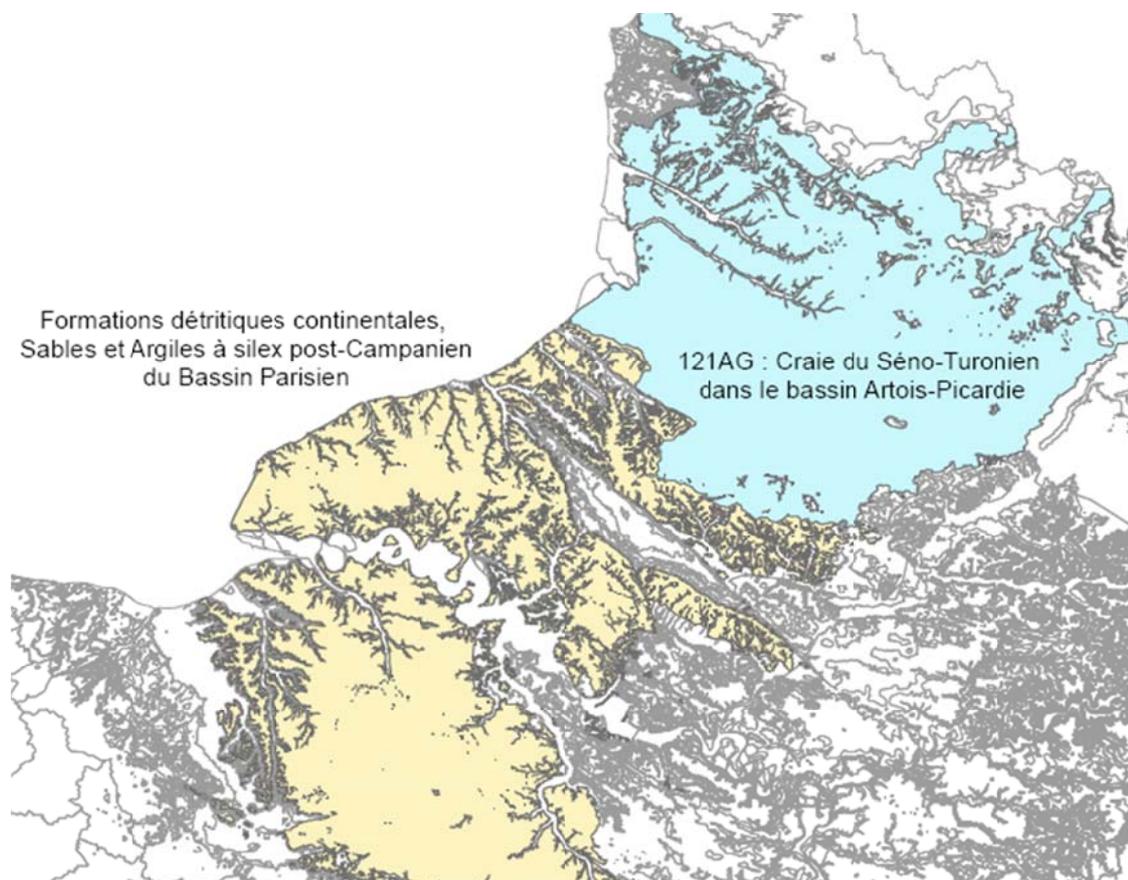


Illustration 16 – Exemple de deux formations d'ordre 1 de BDLISA

Du coup la sélection par traitement automatique sous SIG d'entités hydrogéologiques pertinentes pour un réseau de suivi du changement climatique à partir du référentiel BDLISA niveau 2 s'avère impossible à une échelle nationale (à un niveau local un traitement non automatisé est envisageable). On est donc revenu au découpage des MESO⁴ de niveau 1 qui apparaît le plus pertinent pour un traitement à l'échelle nationale.

⁴ Référentiel des masses d'eau souterraine défini pour la DCE (indépendant du référentiel hydrogéologique BDLISA)

On est ainsi parti des 498 MESO de niveau 1 de Métropole avec suppression de certaines MESO qui ne sont à priori pas ou peu impactées par les effets du changement climatique :

- 15 MESO entièrement captives (CAPTIF = 'Y')
- 6 MESO constituées de formations peu aquifères (*), essentiellement argileuses ou marneuses ;
- MESO FG082 (sables, calcaires et dolomies de l'éocène-paléocène captif sud Adour Garonne)
- MESO FG072 (calcaires du sommet du crétacé supérieur captif nord-aquitain)
- MESO FG091 (Calcaires de la base du crétacé supérieur captif du sud du bassin aquitain)

(*) Les formations peu aquifères supprimées sont les formations argileuses du Mésozoïque du nord-est de la France : Argiles du Callovo-Oxfordien de Bassigny, de la Woëvre et des Ardennes, du Kimméridgien, du Lias des Ardennes, du Muschelkalk.

Il reste ainsi 474 MESO présélectionnées.

2.4.2. Zones sensibles au changement climatique

Les zones sensibles au changement climatique ont été déterminées à partir des données fournies par Météo-France dans le cadre d'Explore 2070 (MEDDTL, 2010). Il s'agit des données issues des simulations climatiques « AR4 désagrégées par méthode CERFACS dsclim » pour lesquelles on dispose du forçage désagrégé sur la grille SAFRAN (maille 8 km x 8 km).

Les données sont issues des fichiers suivants, où A1_A2 est l'année hydrologique :

- Fichiers S_quot_sim_nomsimul_A1_A2 (pour les précipitations)
- Fichiers I_quot_sim_nomsimul_A1_A2, (pour l'ETR)
- Fichiers S_ETP_quot_sim_nomsimul_A1_A2 (pour l'ETP)

Le modèle sélectionné est ECHAM5 qui est représentatif d'une situation moyenne d'évolution climatique comme le montrent les résultats des simulations réalisées pour l'hydrologie souterraine dans le cadre du projet Explore 2070 (lot 4).

Les simulations temps présent couvrent la période (en années hydrologiques) 1961-62/1990-91 (climat « relativement » stable), les simulations climat futur la période 2046-47/2064-65.

Les données fournies par Météo-France (précipitations, ETP et ETR) dans le cadre d'Explore 2070 sont des données journalières. L'ETR est calculée par ISBA, en fonction du forçage atmosphérique, des caractéristiques de la végétation (ecoclimap2) et de la texture du sol (base INRA 1 km²).

A partir des données de Météo-France, nous avons calculé les précipitations, l'ETP et l'ETR pour chaque année des deux périodes de références puis moyennées sur la période (temps présent et temps futur). Les pluies efficaces ne sont pas fournies par Météo-France ; nous les avons calculées au pas de temps journalier à partir de l'ETR et de l'ETP puis sommées sur l'année puis moyennées sur la période (temps présent et temps futur).

Nous avons calculé la pluie efficace par différence entre précipitations et évapotranspiration ; si l'évapotranspiration est supérieure aux précipitations, la pluie efficace est nulle.

Les différents paramètres pris en compte sont les suivants :

PL_FUTUR	précipitations (solides et liquides) moyennes temps futur (2046-2065)
ETR_FUTUR	évapotranspiration réelle moyenne temps futur (2046-2065)
ETP_FUTUR	évapotranspiration potentielle moyenne temps futur (2046-2065)
PEF1_FUTUR	précipitations efficaces moyennes temps futur (2046-2065) calculées à partir de l'ETR
PEF2_FUTUR	précipitations efficaces moyennes temps futur (2046-2065) calculées à partir de l'ETP
PL_PRES	précipitations (solides et liquides) moyennes temps présent (1961-1991)
ETR_PRES	évapotranspiration réelle moyenne temps présent (1961-1991)
ETP_PRES	évapotranspiration potentielle moyenne temps présent (1961-1991)
PEF1_PRES	précipitations efficaces moyennes temps présent (1961-1991) calculées à partir de l'ETR
PEF2_PRES	précipitations efficaces moyennes temps présent (1961-1991) calculées à partir de l'ETP
ECR_PEF1	Ecart en % entre Peff temps futur et temps présent calculées à partir de l'ETR
ECR_PEF2	Ecart en % entre Peff temps futur et temps présent calculées à partir de l'ETP

Les figures suivantes comparent les différents paramètres sur les périodes temps présent et temps futur.

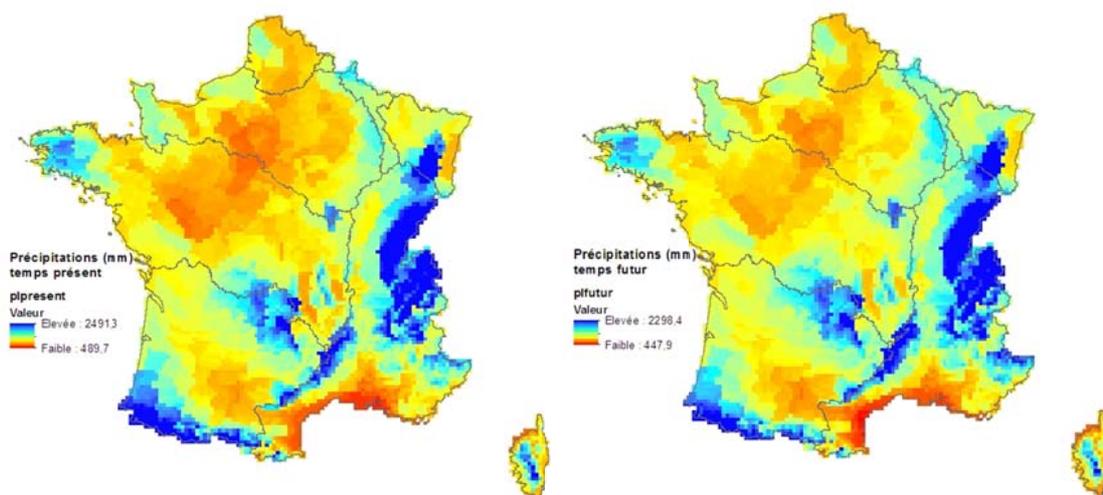


Illustration 17 – Comparaison entre précipitations temps présent et temps futur

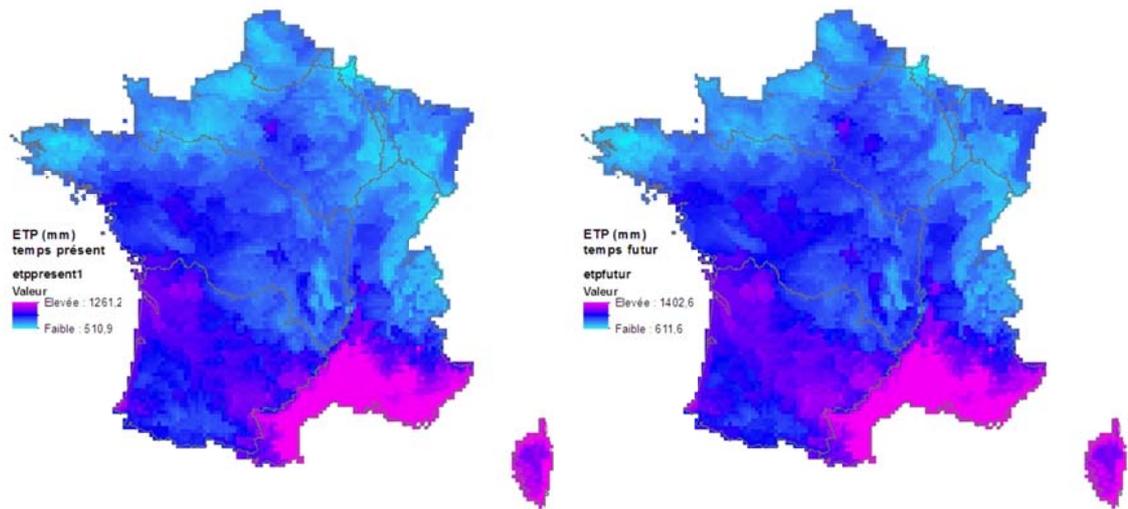


Illustration 18 – Comparaison entre ETP temps présent et temps futur

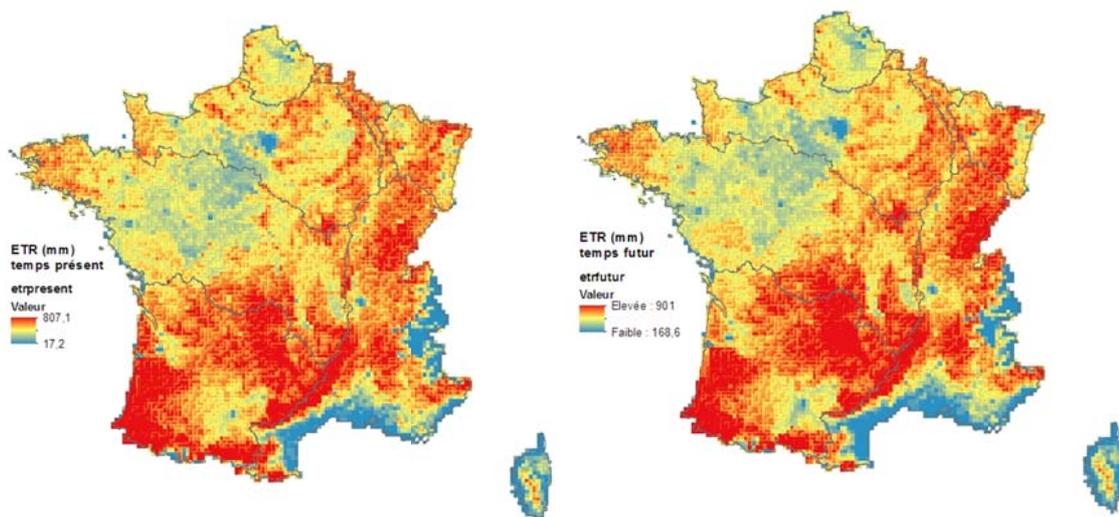


Illustration 19 – Comparaison entre ETR temps présent et temps futur

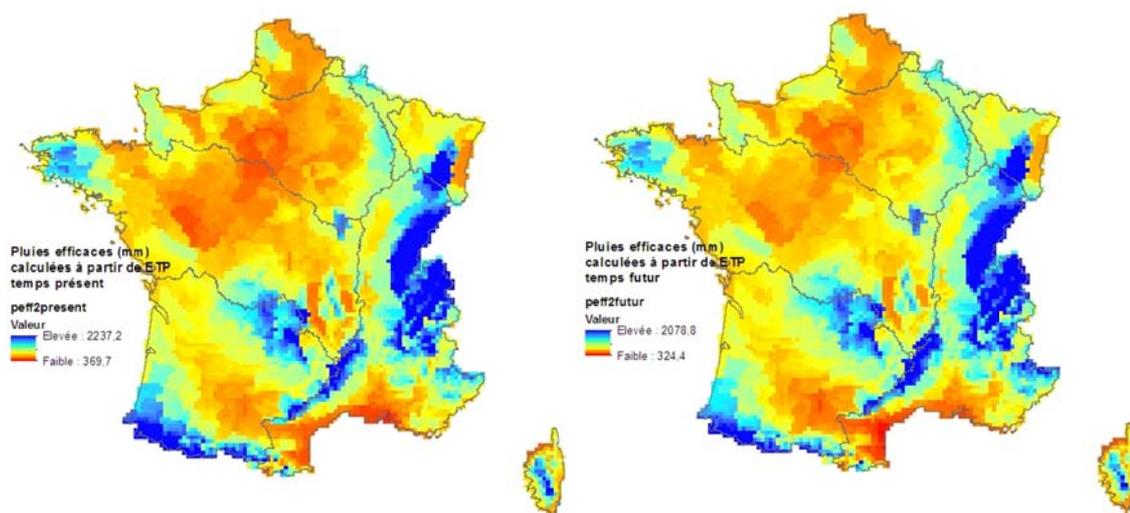


Illustration 20 – Comparaison entre pluies efficaces (calculées à partir de l'ETP) temps présent et temps futur

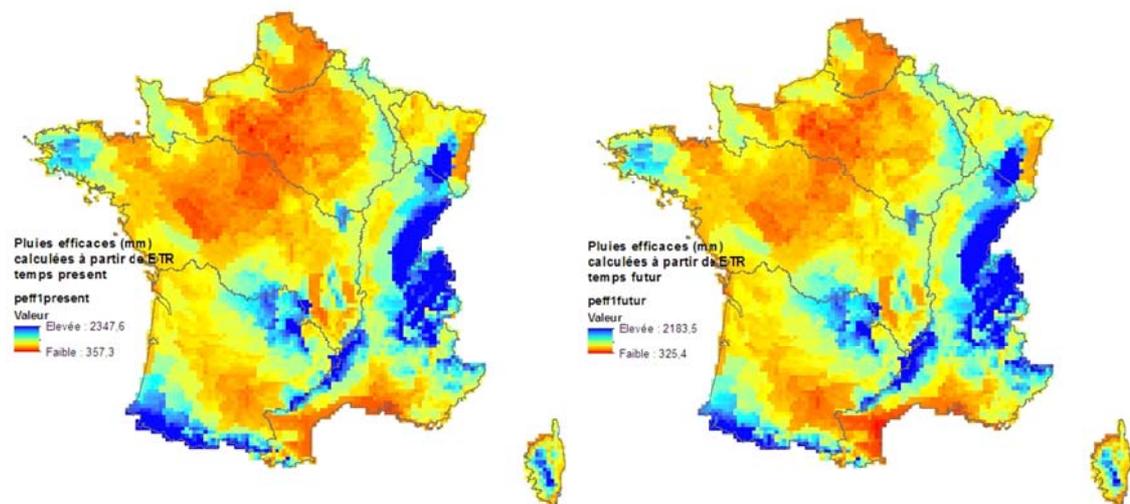


Illustration 21 – Comparaison entre pluies efficaces (calculées à partir de l'ETR) temps présent et temps futur

Les pluies efficaces annuelles calculées à partir de l'ETR ou de l'ETP ne montrent pas de différences majeures, ce qui peut paraître à première vue surprenant. Dans un bilan hydrologique, l'ETR est calculée à partir de l'ETP et du stock d'eau disponible. Dans le cas présent, l'ETR est calculée par ISBA, en fonction du forçage atmosphérique, des caractéristiques de la végétation et de la texture du sol. A l'échelle journalière et même mensuelle on peut avoir une pluie efficace qui ne correspond pas à la différence entre la pluie moins l'ETR. Par contre sur une année, cette relation est souvent vérifiée.

Nous avons donc finalement pris pour le calcul de la pluie efficace la différence $P - ETR$ pour chaque année de la période considérée puis fait la moyenne sur les périodes temps présent et temps futur et enfin le ratio $(Peff_futur - Peff_présent) / Peff_présent * 100$. Ces calculs ont été réalisés sur chacune des 9891 mailles de la grille ISBA, de maille 8 km (*Illustration 22*). L'écart de pluie efficace entre temps futur et temps présent est compris majoritairement entre -10 et +8 %. On trouve des écarts plus conséquents dans l'ouest (Bretagne et Normandie), et surtout dans la partie sud du bassin Adour-Garonne, en Languedoc-Roussillon et en Corse. A noter qu'on n'observe pas de corrélation nette entre les piézomètres montrant une tendance significative à la baisse (cf. rapport de l'année 2 : Vernoux et Seguin, 2012) et l'écart de pluie efficace entre temps futur et temps présent.

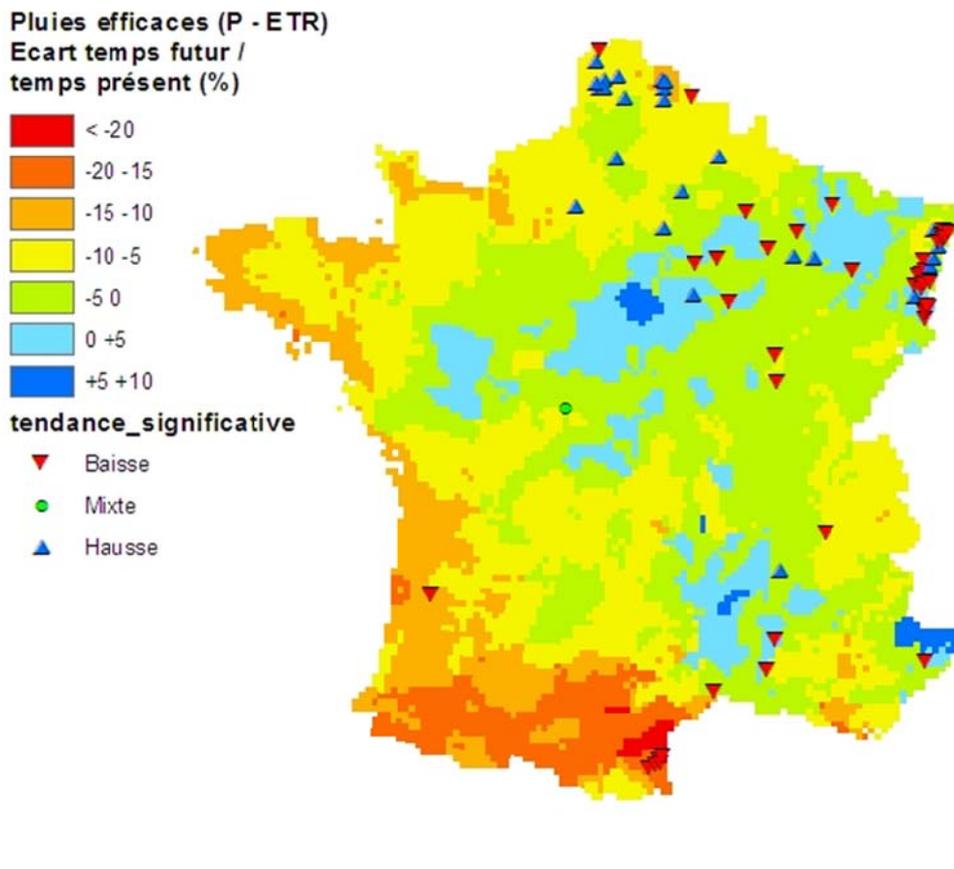


Illustration 22 – Ecart entre la pluie efficace (P - ETR) temps futur et temps présent par maille de 8 km et piézomètres montrant une tendance significative

La grille d'écart entre la pluie efficace temps futur et temps présent a été utilisée pour calculer un écart moyen par masse d'eau souterraine (*Illustration 23*). On peut ainsi prioriser les masses d'eau souterraine pour la mise en place d'un réseau

piézométrique dédié au suivi du changement climatique (cf. en annexe 1 la liste des masses classée selon l'écart entre la pluie efficace temps futur et temps présent) :

- 3 masses d'eau avec un écart inférieur à -20%
- 27 masses d'eau avec un écart compris entre -20 et -15%
- 52 masses d'eau avec un écart compris entre -15 et -10%
- 157 masses d'eau avec un écart compris entre -10 et -5%
- 199 masses d'eau avec un écart compris entre -5 et 0%
- 63 masses d'eau avec un écart compris entre 0 et 5%
- 1 masse d'eau avec un écart compris entre 5 et 10%

Il faut noter que cette carte montre des différences assez significatives avec les cartes d'écart de la recharge « temps futur / temps présent (illustration 7). Si on prend l'exemple de la masse d'eau Beauce, nos calculs montrent une augmentation de la pluie efficace alors que les écarts obtenus par modélisation hydrodynamique montre un écart moyen de la recharge entre -20 et -10 % et un écart minimum entre -10 et 0 %.. Ces écarts peuvent s'expliquer par le fait que notre carte de pluie efficace ne prend en compte qu'un seul modèle climatique alors que la carte de recharge Explore 2070 est obtenue à partir de sept modèles climatiques.

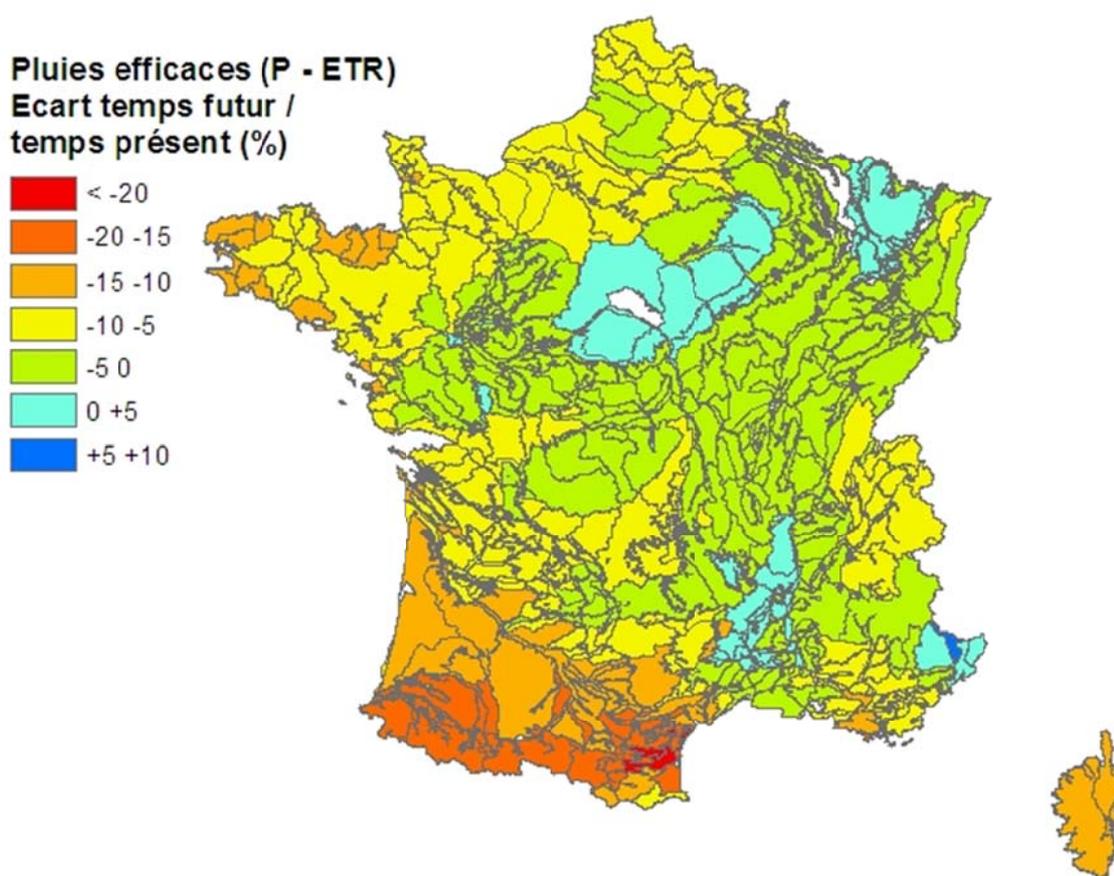


Illustration 23 – Ecart entre la pluie efficace (P - ETR) temps futur et temps présent par masse d'eau souterraine

On a considéré que les masses d'eau prioritaires sont celles qui présentent un écart inférieur à -5%, ce qui représente 237 masses d'eau sur 474 MESO présélectionnées. Ces masses d'eau seraient à suivre en priorité sachant qu'on ne peut pas exclure pour

autant des masses d'eau comme la Beauce pour laquelle les simulations Explore 2070 montre une baisse des niveaux piézométrique qui peut atteindre plusieurs mètres.

2.5. OUVRAGES SELECTIONNES

L'objectif est ici de sélectionner un piézomètre sur chacune des 237 masses d'eau prioritaires définies précédemment. Ce travail a été réalisé à partir de requêtes dans la base Access des piézomètres extraits d'ADES. Cette sélection devra ensuite être validée par les directions régionales du BRGM et les DREAL.

On a d'abord sélectionné les piézomètres avec plus de 25 ans de données ; cela représente 326 piézomètres couvrant seulement 51 masses d'eau. Le choix d'un piézomètre pour chaque masse d'eau a été fait à partir des critères définis au paragraphe 2.2. Pour la masse d'eau AG001 par exemple, on a 10 piézomètres avec plus de 25 ans de mesure (*Illustration 24*). Deux piézomètres respectent bien les critères (non influencé, tendance significative, appartenance à un réseau de suivi de la sécheresse, pérennité de l'ouvrage) : 00117X0023/P1 et 00065X0011/P1. Le choix final peut porter sur le comportement et l'examen de la chronique piézométrique (*Illustration 25* et *Illustration 26*); dans le cas présent, en l'occurrence, on n'observe pas de différence majeure, à l'exception d'une absence de données pour le 00065X0011/P1 en 2008-2009. C'est finalement le 00117X0023/P1 qui a été sélectionné.

CODE_BSS	NB_ANNEES_DATA_MAJ20 12	influence_anthropique	tendance_significative	comportement	Influence des mesures par pompages	Réseau BSH National	Réseau sécheresse	pérennité de l'ouvrage
00117X0023/P1	42,68	1	H	c	Faible		oui	Forte
00113X0002/P1	42,69	1		c	Faible		non	Forte
00068X0147/PZ5	39,57	1		b1	Moyenne		non	Forte
00121X0001/P1	42,69	1		b1				
00113X0001/P1	40,17	1		c				
00172X0037/P1	42,01	1	H	c				
00065X0011/P1	41,36	1	H	b1	Faible		oui	Forte
00061X0117/PZ1	42,64	1		b1	Faible		non	Forte
00067X0183/PZ1	38,00	1		b1				
00068X0010/F295	55,46	1		b1	Faible		oui	Moyenne

Illustration 24 – Liste des piézomètres susceptibles d'être utilisés pour le suivi du changement climatique sur la masse d'eau AG001 (Craie de l'Audomarois)

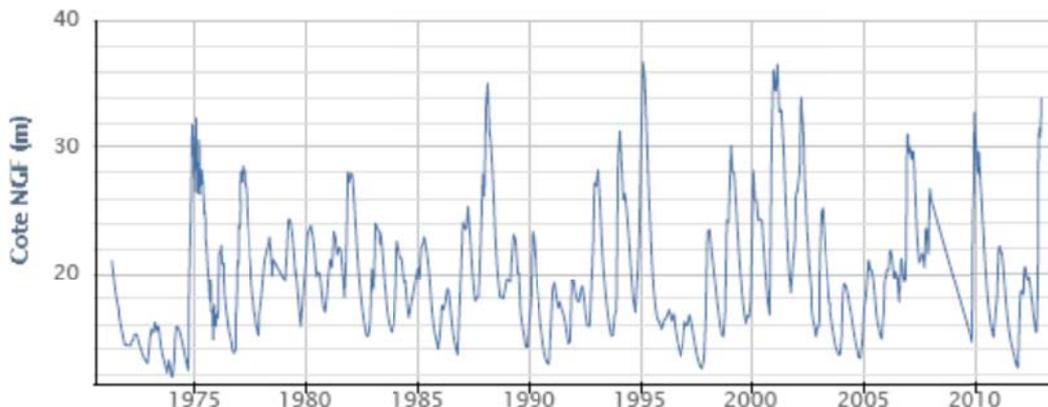


Illustration 25 – Chronique du piézomètre 00065X0011/P1 - Puits de la Maison forestière des Flaquettes (guines) – 62

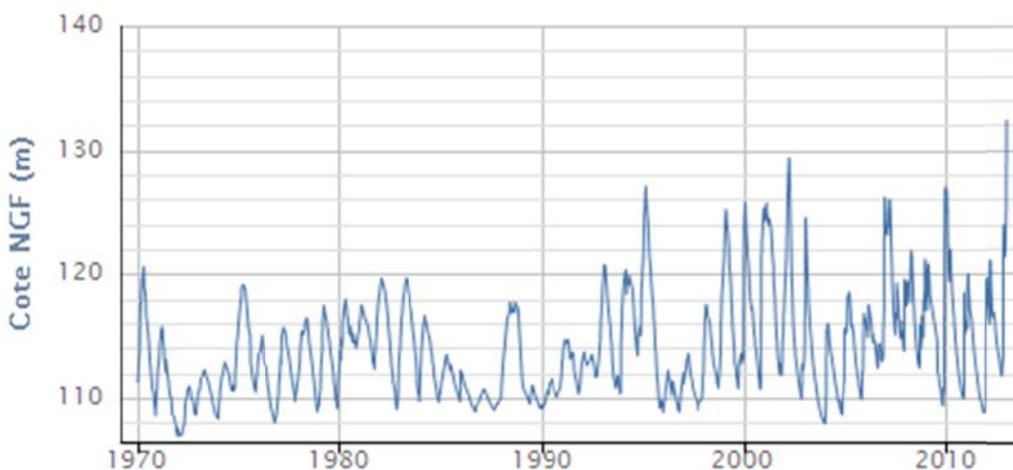


Illustration 26 – Chronique du piézomètre 00117X0023/P1 - Puits communal du hameau d'Ecuires (Thiembronne) - 62

Cet exemple est un cas très favorable qui malheureusement se présente rarement ; dans la pratique il est rare de disposer d'un piézomètre respectant l'ensemble des critères. La sélection a donc été étendue sur les piézomètres avec des chroniques plus courtes :

- Entre 15 et 25 ans de données
- Entre 10 et 15 ans de données
- Moins de 10 ans de données

2.5.1. Sélection en priorité 1

Les piézomètres sélectionnés en priorité 1 répondent aux critères suivants :

- durée de la chronique supérieure à 25 ans
- ouvrage peu influencé,
- pérennité forte

Si plusieurs ouvrages répondent à ces critères pour une même masse d'eau, nous avons choisi en priorité les ouvrages montrant une tendance à la baisse et/ou ceux appartenant à un réseau de suivi de la sécheresse.

Le nombre d'ouvrages sélectionnés pour les 237 masses d'eau prioritaires est faible, 33 ouvrages, soit 14% (*Illustration 27*). Et sur ces ouvrages un doute subsiste pour certains d'entre eux :

- le 00058X0068/P1 pour lequel l'absence d'influence est à confirmer
- le 01473X0087/S1 pour lequel la pérennité ne semble pas assurée
- le 01205X0229/S1 pour lequel la pérennité ne semble pas assurée
- des piézomètres en Languedoc-Roussillon sont considérés comme peu influencés mais avec une influence de type saisonnière (irrigation).

Pour quelques masses d'eau, il existe au moins un ouvrage avec une durée de la chronique supérieure à 25 ans mais pour lequel on n'a pas d'information sur la pérennité et le degré d'influence. Ils n'ont pour le moment pas été retenus.

MS_CD	NAME	SELECTED_PIEZO
AG001	Craie de l'Audomarois	00117X0023/P1
AG002	Calcaires du Boulonnais	00058X0068/P1
AG003	Craie de la vallée de la Deule	00263X0006/P1
AG004	Craie de l'Artois et de la vallée de la Lys	00173X0083/PZ13A
AG006	Craie des vallées de la Scarpe et de la Sensée	00271X0002/P2
AG007	Craie du Valenciennois	00225X0077/FC2
AG008	Craie de la vallée de la Canche amont	00182X0010/P1
AG010	Craie du Cambrésis	00491X0013/P
AG013	Craie de la vallée de la Somme amont	00821X0035/S1
AG014	Sables du Landénien des Flandres	00035X0029/P1
DG124	Calcaires jurassiques pli ouest de Montpellier, extension sous couverture et formations tertiaires Montbazin-Gigean	10162X0226/V
DG221	Multicouche pliocène et alluvions IVaires du Roussillon	10908X0263/FIGUER
DG318	Alluvions des fleuves cotiers Gisclé et Mole, Argens et Siagne	09995X0028/F
DG311	Alluvions de l'Hérault	10157X0104/1777
EG214	Formations miocènes d'Aléria	11156X0009/BRAVON
EG336	Aquifères alluviaux secondaires des basses plaines littorales de Corse (Tavignano, Alesani, Petrignani, Tarco, Solenzara, Travo, Aliso-Poggio, Fium Orbo - Abatesco, Ostriconi, Regino, Fium Secco-Figarella, Fango, Chiuni, Liamone, Gravone-Prunelli, Taravo	11195X0114/SP1
EG605	Formations métamorphiques Corse Est	11024X0102/MARINE
GG006	Laïta	03128X0011/F
GG099	Chaîne des Puys	06696X0024/FORAGE
HG001	Alluvions de la Seine moyenne et avale	01518X0139/FE2
HG102	Tertiaire du Mantois à l'Hurepoix	01516X0004/S1
HG104	Eocène du Valois	01551X1013/S1
HG106	Lutétien - Yprésien du Soissonnais-Laonnois	01066X0133/S1
HG107	Eocène et craie du Vexin français	01258X0020/S1
HG201	Craie du Vexin normand et picard	01261X0044/S1
HG202	Craie altérée de l'estuaire de la Seine	01003X0008/S1
HG203	Craie altérée du littoral cauchois	00753X0030/S1
HG204	Craie des bassins versants de l'Eaulne, Béthune, Varenne, Bresle et Yerres	00773X0002/S1
HG206	Craie de Thiérache-Laonnois-Porcien	00675X0019/S1
HG211	Craie altérée du Neubourg-Iton-plaine de Saint-André	01508X0133/S1
HG212	Craie du Lieuvin-Ouche - bassin versant de la Risle	01491X0009/S1
HG213	Craie et marnes du Lieuvin-Ouche - Pays d'Auge - bassin versant de la Touques	01473X0087/S1
HG308	Bathonien-bajocien de la plaine de Caen et du Bessin	01205X0229/S1

Illustration 27 – Piézomètres sélectionnés en priorité 1

2.5.2. Sélection en priorité 2

Les piézomètres sélectionnés en priorité 2 répondent aux critères suivants :

- durée de la chronique comprise entre 15 et 25 ans
- ouvrage peu influencé,
- pérennité forte

Si plusieurs ouvrages répondent à ces critères pour une même masse d'eau, nous avons choisi en priorité les ouvrages avec les plus longues chroniques et/ou ceux appartenant à un réseau de suivi de la sécheresse.

Le nombre d'ouvrage respectant ces critères pour les masses d'eau prioritaires est faible, 29 ouvrages (Illustration 28). Pour quelques masses d'eau, il existe au moins un

ouvrage avec une durée de la chronique comprise entre 15 et 25 ans, mais pour lequel on n'a pas d'information sur la pérennité et le degré d'influence.

MS_CD	NAME	SELECTED_PIEZO
AG005	Craie de la vallée de la Canche aval	00178X0003/S1
DG109	Calcaires de la Clape	10613X0036/INRA
DG216	Graviers et grès d'Issel et extension sous couverture - secteur de Castelnaudary	10116X0237/TREVIL
DG306	Alluvions de la vallée du Doubs	05025X0138/F
DG310	Alluvions de l'Aude	10396X0162/F5
DG314	Alluvions de l'Isère Combe de Savoie et Grésivaudan + Breda	07494X0026/CRUET
DG330	Alluvions marais de Chautagne et Lavours	06775X0010/BOURSI
DG408	Domaine plissé du Chablais et Faucigny - BV Arve et Dranse	06306X0042/BIOGE
DG520	Domaine marno-calcaire et gréseux de Provence est - BV Cotiers est	10453X0295/P4795
EG335	Aquifères alluviaux majeurs corses (Fium Alto, Golo, Plaine de Mormorana, Bevinco)	11076X0086/CANONI
FG019	Alluvions de l'Ariège et affluents	10357X0021/F
FG020	Alluvions de la Garonne moyenne et du Tarn aval, la Save, l'Hers mort et le Girou	10097X0224/F
FG021	Alluvions du Tarn, du Dadou et de l'Agout secteurs hydro o3-o4	09574X0030/F
FG022	Alluvions de l'Aveyron et de la Lère	09312X0063/F
FG028	Alluvions de l'Adour et de l'Echez, l'Arros, la Bidouze et la Nive	09793X0011/F
FG030	Alluvions du gave de Pau	10031X0017/F
FG043	Molasses du bassin de la Garonne et alluvions anciennes de Piémont	09845C1426/F
FG045	Sables plio-quadernaires des bassins cotiers région hydro s et terrasses anciennes de la Gironde	08988X0014/D5
FG046	Sables et calcaires plio-quadernaires du bassin Midouze-Adour région hydro q	09007X0047/PZ
FG087	Basse et moyenne terrasse de la Garonne rive gauche en amont du Tarn	10092X0166/F
GG003	Baie d'Audierne	03454X0070/F
GG004	Odet	03107X0008/F
GG007	Aulne	03114X0023/F
GG008	Baie de Morlaix	02761X0032/PZ
GG010	Blavet	03493X0013/F
GG011	Scorff	03486X0022/PZ
GG012	Golfe du Morbihan	03851X0021/S2
GG015	Vilaine	03871X0016/F
HG309	Calcaires dogger entre le Thon et limite de district	00516X0059/S1

Illustration 28 – Piézomètres sélectionnés en priorité 2

2.5.3. Sélection en priorité 3

Les piézomètres sélectionnés en priorité 3 répondent aux critères suivants :

- durée de la chronique comprise entre 10 et 15 ans
- ouvrage peu influencé,
- pérennité forte

Si plusieurs ouvrages répondent à ces critères pour une même masse d'eau, nous avons choisi en priorité les ouvrages avec la plus longue chronique et/ou ceux appartenant à un réseau de suivi de la sécheresse.

Le nombre d'ouvrage respectant ces critères pour les masses d'eau prioritaires est très faible, 6 ouvrages (*Illustration 29* *Illustration 28*). Pour quelques masses d'eau, il existe au moins un ouvrage avec une durée de la chronique comprise entre 10 et 15 ans, mais pour lequel on n'a pas d'information sur la pérennité et le degré d'influence.

MS_CD	NAME	SELECTED_PIEZO
B2G017	Bordure du Hainaut	00502X0003/S1
DG210	Formations bassin d'Aix	10212X0029/P1
DG302	Alluvions de la Durance aval et moyenne et de ses affluents	09433X0162/PIEZ
EG211	Formations éocènes de Solenzara	11188X0116/NOCE
FG031	Alluvions du gave d'Oloron et du Saison	10035X0009/F2
FG091	Calcaires de la base du crétacé supérieur captif du sud du bassin aquitain	09768X0040/F2

Illustration 29 – Piézomètres sélectionnés en priorité 3

2.5.4. Sélection en priorité 4

Les piézomètres sélectionnés en priorité 4 répondent aux critères suivants :

- durée de la chronique inférieure à 10 ans
- ouvrage peu influencé,
- pérennité forte

Si plusieurs ouvrages répondent à ces critères pour une même masse d'eau, nous avons choisi en priorité les ouvrages avec la plus longue chronique.

Le nombre d'ouvrage respectant ces critères pour les masses d'eau prioritaires est de 37 (*Illustration 30*). Pour quelques masses d'eau, il existe au moins un ouvrage avec une durée de la chronique comprise entre 10 et 15 ans, mais pour lequel on n'a pas d'information sur la pérennité et le degré d'influence.

MS_CD	NAME	SELECTED_PIEZO
DG137	Massifs calcaires de Ste Baume, Agnis, Ste Victoire, Mont Aurélien, Calanques et Bassin du Beausset interne	10446X0239/F
DG138	Massifs calcaires du Trias au Crétacé dans le BV de l'Argens	09988X0069/F1
DG207	Calcaires éocènes du Cabardès	10364X0001/S
DG222	Pélites permianes et calcaires cambriens du lodévois	09892X0679/EXH70
DG509	Formations tertiaires BV Aude et alluvions de la Berre	10616X0029/PRADE
DG614	Domaine plissé Pyrénées axiales dans le BV de l'Aude	10944X0012/ALCAMP
DG615	Domaine plissé Pyrénées axiales dans le BV de la Têt et de l'Agly	10897X0010/F3
DG617	Domaine plissé Pyrénées axiales dans le BV du Tech, du Réart et de la cote Vermeille	10976X0058/RIMBAU
FG005	Socle BV Vézère secteurs hydro p3-p4	07143X0017/P1
FG006	Socle BV Dordogne secteurs hydro p0-p1-p2	08353X0052/F
FG011	Volcanisme cantalien - BV Adour-Garonne	07638X0017/MAIRIE
FG024	Alluvions de la Dordogne	08101X0227/P1
FG033	Grès du bassin de Brive	07844X0076/P1
FG049	Terrains plissés du BV Garonne secteur hydro o0	10734X0010/HY
FG057	Calcaires des grands Causses BV Tarn	08866X0047/BURLE
FG058	Calcaires des grands Causses BV Lot	08626X0014/BERNAD
FG089	Molasses du bassin du Tarn	09307X0136/F
FG099	Alluvions de la Vézère et de la Corrèze	07852X0072/P1
GG001	Le Léon	02385X0046/PZ
GG002	Baie de Douarnenez	03101X0023/PZ
GG005	Baie de Concarneau - Aven	03822X0021/F
GG009	Golfe de Saint-Brieuc	02431X0106/F
GG013	Arguenon	02803X0036/PZ
GG014	Rance - Frémur	02451X0023/F
GG016	Couesnon	02835X0055/PZ
GG039	Trioux-Leff	02782X0047/PZ
GG040	Guindy-Jaudy-Bizien	02034X0082/PZ
GG050	Massif Central BV Sioule	06455X0041/PUITS
GG058	Baie de Lannion	02413X0065/PZ
GG096	Massif du Cantal BV Loire	07657X0018/P1
GG098	Massif du Mont Dore BV Loire	07164X0043/ROC
GG112	Elorn	02396X0030/PZ
GG115	Alluvions Vilaine	03535X0043/PZ
GG116	Alluvions Oust	03862X0057/PZ
GG123	Marais de Dol	02465X0061/F
HG301	Pays de Bray	01022X0073/P
HG508	Socle ardennais du bassin versant de l'Oise	00512X0206/P

Illustration 30 – Piézomètres sélectionnés en priorité 4

2.5.5. Présélection de points susceptibles de faire partie du réseau de suivi du CC

L'illustration 31 montre les 105 ouvrages présélectionnés selon les niveaux de priorité définis précédemment :

- 33 ouvrages en P1 (plus de 25 ans de données)
- 29 ouvrages en P2 (15 à 25 ans de données)
- 6 ouvrages en P3 (10 à 15 ans de données)
- 37 ouvrages en P4 (moins de 10 ans de données)

Comme cela a été dit précédemment, il s'agit d'une liste de points à suivre en priorité, mais qui ne saurait suffire à constituer le réseau en raison des incertitudes sur les

critères de sensibilité au CC. Cette première sélection basée sur un traitement multicritère devra être validée par les directions régionales du BRGM et les DREAL.

La liste de ces points figure en annexe 2 avec les paramètres pris en compte dans la sélection.

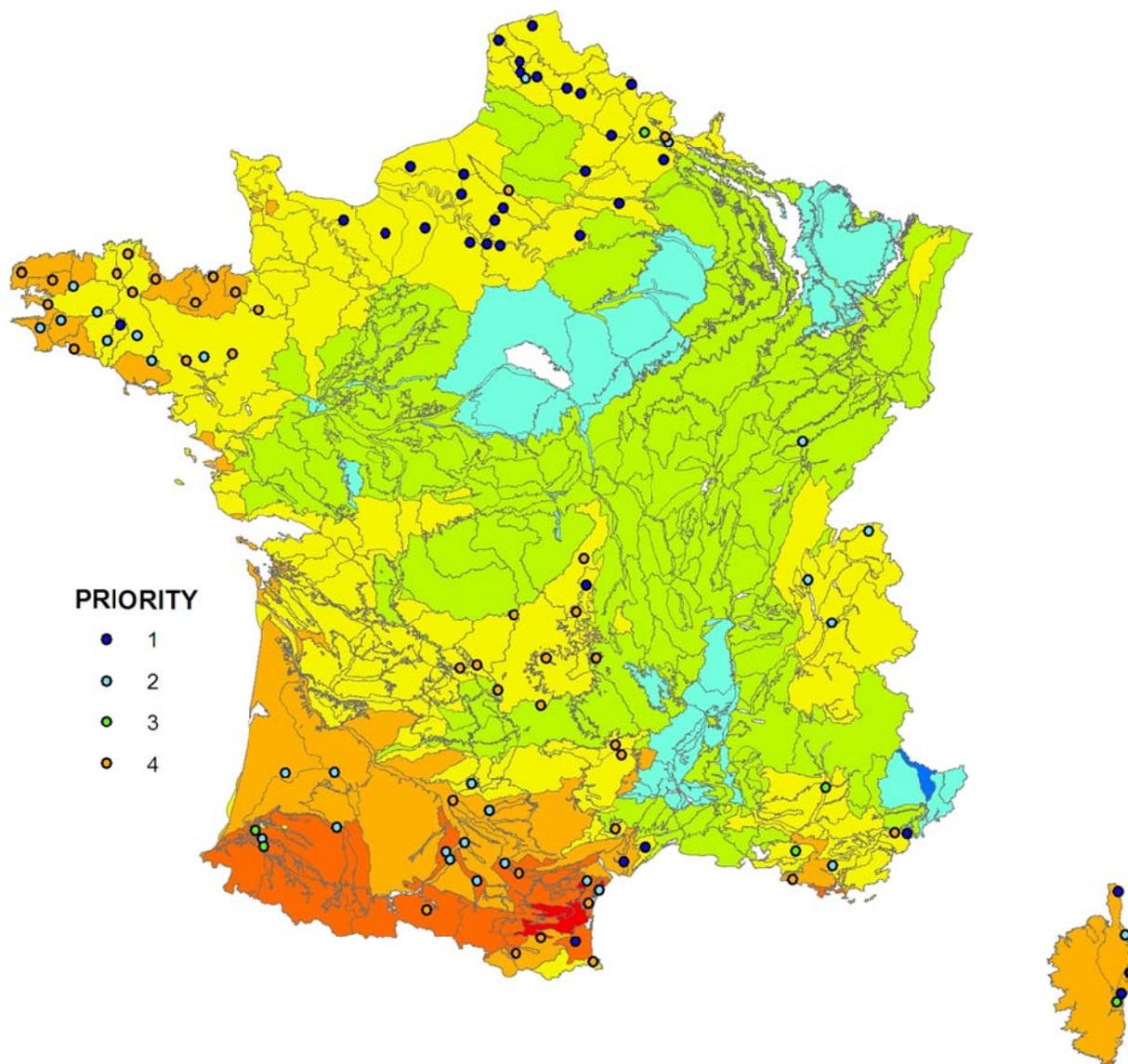


Illustration 31 - Présélection de points susceptibles de faire partie du réseau de suivi du CC

2.6. POINTS A CREER

Le traitement précédent a permis d'affecter à 105 masses d'eau souterraine, un piézomètre pour le suivi du changement climatique. Il en reste néanmoins encore 131 pour lesquelles nous n'avons pas pu présélectionner de piézomètre.

Pour ces masses d'eau nous avons 4 cas de figure :

1. Aucun piézomètre sur la masse d'eau (code X0) ; cela concerne 59 masses d'eau ;
2. Il existe un ou plusieurs piézomètres pour lesquels on n'a pas d'information sur la pérennité et le degré d'influence (code X1) ; cela concerne 58 masses d'eau ;
3. Il existe un ou plusieurs piézomètres influencés (code X2) ; cela concerne 10 masses d'eau ;
4. Il existe un ou plusieurs piézomètres influencés et un ou plusieurs piézomètres pour lesquels on n'a pas d'information (X1+X2) ; cela concerne 4 masses d'eau ;

L' *Illustration 32* montre les masses d'eau sensibles au CC pour lesquelles il n'a pas été possible de présélectionner un piézomètre, selon ces différents cas de figure.

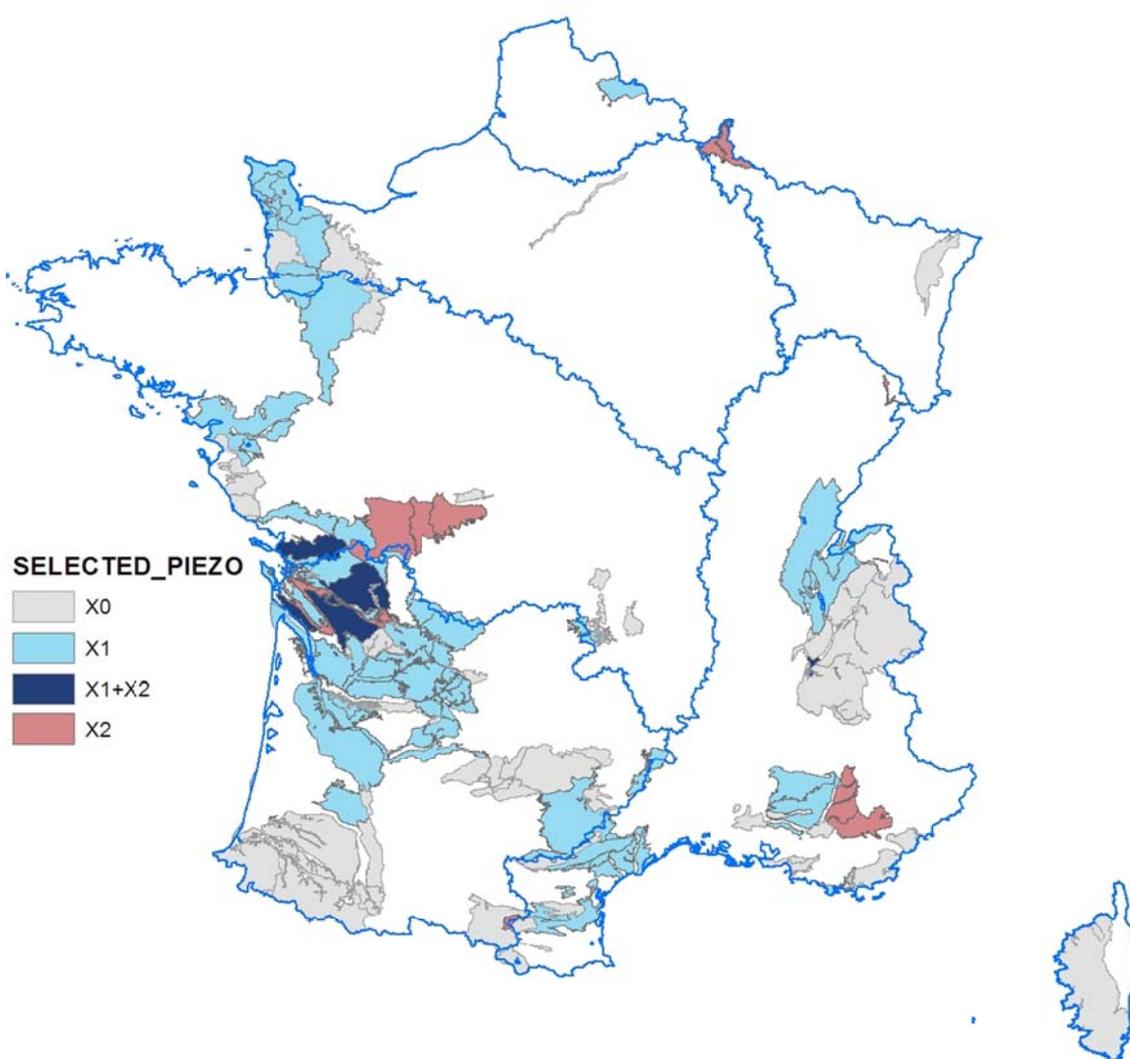


Illustration 32 - Masses d'eau souterraine sensibles au CC sans piézomètre présélectionné

Pour les masses d'eau sans piézomètre, on peut supposer qu'il s'agit de masses d'eau présentant peu d'intérêt en terme de ressource en eau et pour lesquelles il n'a pas été

jugé utile de mettre en place un suivi quantitatif. Doit-on garder la même règle pour le réseau de suivi du CC ou considère-t-on qu'il s'agit d'un réseau de connaissance indépendant de la gestion actuelle de la ressource ? La question reste posée. En tout état de cause, si l'on veut suivre ces masses d'eau, il faudra impérativement créer de nouveaux points.

Pour les masses d'eau avec des piézomètres existants, mais qui sont tous influencés, il faudra également créer de nouveaux points dans les secteurs non influencés, si tant est qu'ils existent.

Enfin pour les masses d'eau avec un ou plusieurs piézomètres pour lesquels on n'a pas d'information sur la pérennité et le degré d'influence, il convient de rechercher ces informations auprès des gestionnaires des ouvrages ou de faire des investigations complémentaires pour les obtenir.

2.7. SUITES A DONNER

Dans l'état actuel des connaissances sur l'impact du CC sur le niveau piézométrique des nappes d'eau souterraine, lié en particulier à l'incertitude des données, il ne semble pas pertinent de prendre en compte un critère de sensibilité au CC pour la constitution du réseau. Il semble préférable de privilégier une couverture nationale avec au moins un point par masse d'eau.

Il serait par ailleurs utile de compléter le réseau de suivi du CC par des points de suivi des aquifères côtiers sensibles au risque d'intrusion saline.

3. Essais de détermination d'un index standardisé du niveau des nappes

3.1. LES INDICATEURS PIÉZOMÉTRIQUES DE GESTION DE LA RESSOURCE

3.1.1. Les outils actuels de suivi de l'état des nappes en France

Le suivi de l'état des nappes en France est assuré par de nombreux réseaux piézométriques. La banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines, ADES, permet de rassembler et de mettre à disposition des données quantitatives (et qualitatives), régulièrement actualisées, provenant de ces réseaux.

Le *bulletin national de situation hydrologique (BSH)* complète cet outil de suivi en synthétisant sous forme de cartes et de commentaires l'évolution mensuelle des ressources en eau. Il renseigne sur les pluies efficaces, les débits des cours d'eau, les niveaux des nappes d'eau souterraine et fournit une information synthétique sur les arrêtés préfectoraux pris pour limiter les usages de l'eau durant la période d'étiage. Des *bulletins de situation hydrologique et hydrogéologique*, régionaux ou de bassins, font aussi le point sur l'état des ressources en eau.

A l'échelle plus locale, des indicateurs piézométriques complètent ces dispositifs de suivi de l'état des nappes en définissant des seuils de gestion qui sont des niveaux piézométriques particuliers permettant de déclencher des alertes puis des mesures de restriction d'usage en cas d'amorce d'une situation critique pouvant générer des conflits d'usage ou bien menacer l'équilibre de l'hydrosystème considéré.

Les SDAGE établis pour la période 2010-2015 définissent les objectifs de gestion quantitative de la ressource en eau souterraine ; ces objectifs sont exprimés en termes d'indicateurs et/ou de volumes prélevables.

3.1.2. Seuils piézométriques de gestion et modes de fixation

Un indicateur piézométrique de gestion de la ressource peut être défini (rapport BRGM RP-58139/FR) comme *"une variable de contrôle de l'état d'une ressource en eau souterraine soumise à des règles de gestion et associée à un piézomètre (ou plusieurs) de suivi de l'évolution de cette ressource. L'indicateur est caractérisé par une gamme de valeurs particulières, ou **seuils de gestion**, qui correspondent à :*

- *un objectif de gestion : par exemple une piézométrie objectif d'étiage,*
- *un (ou plusieurs) niveaux d'alerte, destinés à anticiper une situation de crise,*
- *un seuil de crise. »*

La circulaire du 18 mai 2011, relative aux mesures exceptionnelles de limitation ou de suspension des usages de l'eau en période de sécheresse, préconise *"de tendre vers des seuils homogènes et en nombre limité sur tout le territoire national."* Elle recommande *"que les dénominations des niveaux de restriction doivent être cohérentes avec la terminologie utilisée dans les SDAGE pour la définition des objectifs quantitatifs en période d'étiage. Si cette terminologie n'est pas précisée dans le SDAGE, les départements se limiteront, à compter de 2012, à trois niveaux de restriction et adopteront la terminologie suivante : un seuil d'alerte, un seuil d'alerte renforcé et un seuil de crise. Tous les bassins adopteront cette terminologie à*

l'occasion des prochains SDAGE 2016-2021. Propluvia⁵ se limitera également à ces trois seuils."

Ces indicateurs permettent de gérer annuellement la ressource disponible (par exemple affectation de quota d'irrigation) dans un secteur donné (en général un bassin versant).

Pour fixer les différents seuils, il n'existe pas de règle générale. Ainsi, les seuils d'alerte et de crise peuvent être :

- des **seuils historiques** : le seuil de crise sera par exemple le niveau le plus bas atteint sur la période de mesures, ou bien le niveau atteint lors d'un épisode de sécheresse sévère (par exemple sécheresse de 1992-1993, illustration 33) ;
- fixés à partir d'une **analyse fréquentielle** (fréquences empiriques) : le seuil d'alerte sera par exemple le niveau de période de retour 5 ans ("quinquennal sec") ;
- déterminés en fonction de **contraintes à respecter**, en particulier sur les débits des cours d'eau dont le soutien d'étiage est assuré par la nappe.
On recherche alors graphiquement et par une succession d'essais une relation qui soit la meilleure possible entre niveaux de la nappe et débits des cours d'eau (illustrations 34 et 35). Les seuils piézométriques se déduisant alors de la contrainte à respecter sur le débit (par exemple le QMNA5). Une modélisation globale (pluies-débits-niveaux) est parfois mise en œuvre.

De tels indicateurs piézométriques ont un rôle important dans une gestion locale de la ressource. Mais la diversité de leur mode de détermination ne permet pas d'avoir une vision homogène de l'impact d'un déficit pluviométrique sur l'état des nappes libres à l'échelle nationale, contrairement aux indicateurs sécheresse utilisés désormais par Météo-France ("sécheresse climatique" et "sécheresse des sols").

C'est la raison pour laquelle un indicateur piézométrique standardisé, analogue aux indicateurs utilisés par Météo-France et reflétant l'état des nappes à l'échelle nationale, pourrait être intéressant.

⁵ Propluvia est un outil informatique qui " doit permettre aux services de l'État et au grand public d'accéder à l'information concernant les mesures de restriction décidées dans tous les bassins versants de métropole".

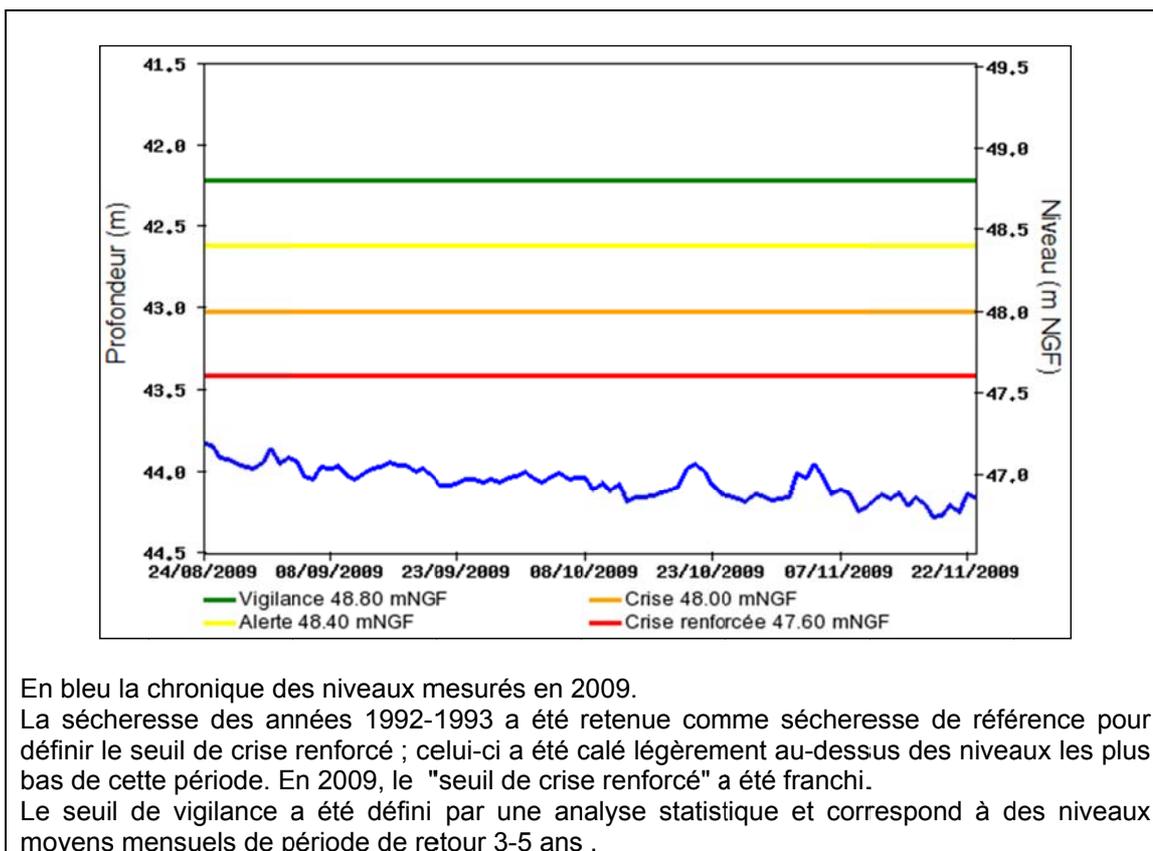


Illustration 33 - Seuils piézométriques définis au piézomètre de Montereau-sur-le-Jard (77).
 Nappe des Calcaires de Champigny –
 Source: <http://seine-normandie.brgm.fr>

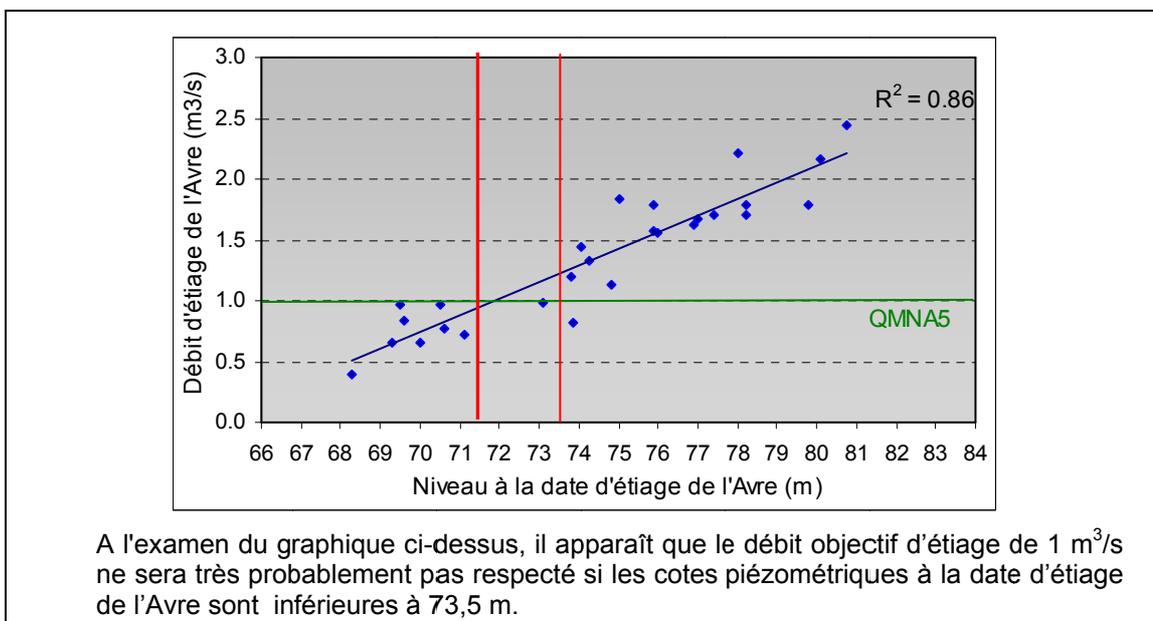


Illustration 34 - Relation entre le débit d'étiage de l'Avre et le niveau de la nappe au piézomètre de Hangest à la date d'occurrence de ce débit.
 Source : rapport BRGM RP-58139-FR

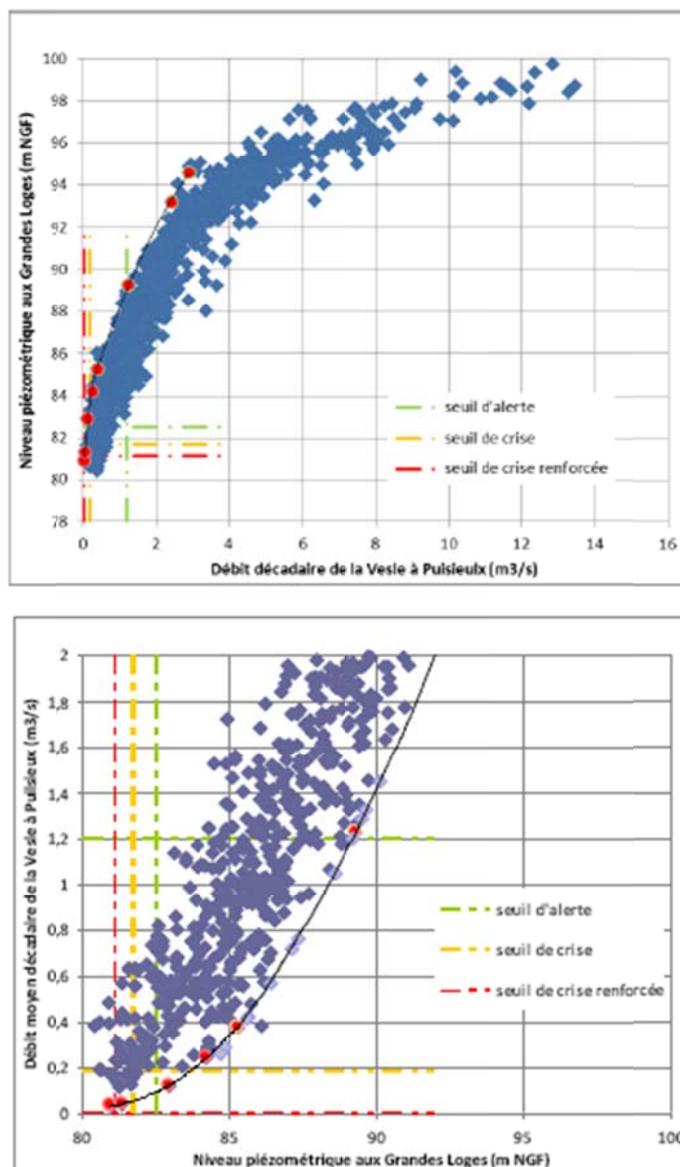


Illustration 35 - Corrélation entre débit décadaire de la Vesle à Puisieux et niveau piézométrique aux Grandes Loges

Source : rapport BRGM/RP-61371-FR

3.2. LES INDICATEURS SÉCHERESSE : CLIMAT ET SOLS

Suivant les problématiques, différentes définitions de la sécheresse ont été données. On retiendra ici la définition donnée par J.J. Collin et al (1994), la sécheresse étant caractérisée comme "défiance conjoncturelle significative des disponibilités naturelles en eau, pendant une durée assez longue (saisonnière, annuelle voire pluriannuelle) par rapport aux moyennes (au moins décennales) et sur une étendue assez vaste".

Suivant les parties de l'hydrosystème qui auront été affectées, on parlera de "sécheresse des sols" (épuiement des réserves utilisables par les plantes), de "sécheresse hydrologique" (diminution des débits, assecs), de "sécheresse

hydrogéologique" (baisse importante des niveaux avec emprunt aux réserves, tarissement des sources). Sous une forme aggravée la sécheresse affectera l'ensemble de l'hydrosystème, avec rupture des liaisons hydrauliques entre les différents composants du système : les nappes ne sont plus alimentées par les flux d'eau transitant dans la zone non saturée à partir du sol et elles-mêmes n'assurent plus le soutien d'étiage des cours d'eau.

Il existe une abondante littérature consacrée à la sécheresse et aux indicateurs (cf. quelques références en bibliographie, voir aussi le site du *National Drought Mitigation Center* (USA) : <http://drought.unl.edu/>).

3.2.1. L'index standardisé des précipitations (*Standardized Precipitation Index* ou *SPI*).

- Origine du SPI et étapes d'élaboration

Le SPI a été défini en 1993 par McKee, Doesken et Kleist ("*The relationship of drought frequency and duration to time scales*", cf. réf. bibliographiques).

L'objectif des auteurs était de proposer un indicateur qui puisse être utilisé pour analyser, de façon homogène sur tout un territoire, des épisodes de sécheresse à différentes échelles de temps en ne faisant intervenir qu'une seule variable.

Les étapes de calcul du SPI sont les suivantes :

- étape 1 : construction d'une série de précipitations mensuelles sur une période de N années (McKee recommande une période continue d'au moins 30 ans).
Puis calcul d'un cumul des précipitations sur n mois glissants (le mois courant + les n-1 mois précédents) avec n = 3, 6, 9, 12 mois ou plus. Ces n mois représentent différentes échelles de temps pouvant correspondre à des périodes déficitaires en précipitations conduisant à un impact sur les différents compartiments du cycle de l'eau.
- étape 2 : pour chaque valeur de n, constitution de 12 séries mensuelles (Janvier à Décembre) de valeurs cumulées sur la période de N années et ajustement d'une loi gamma (cf. annexe 3) sur chaque série mensuelle de N valeurs.
- étape 3 : pour chaque mois de Janvier à Décembre, la loi gamma ajustée est "projetée" sur la loi normale centrée-réduite à partir des N valeurs de cumulés considérés (projection quantile-quantile).

On obtient donc en définitive une courbe continue de SPI-n-mois sur l'ensemble de la période des N années.

- Exemple de calcul

Pour illustrer la méthode d'élaboration du SPI, un calcul a été réalisé à partir des données journalières de pluies enregistrées à la station d'Abbeville de 1960 à 2010 (données que nous avons à disposition via d'autres études).

Les calculs et les graphiques ont été réalisés avec le logiciel R.

Étape 1 - Les données journalières ont été d'abord cumulées au pas de temps mensuel (illustration 36). Dans cet exemple, le calcul du SPI a été fait avec des cumulés de pluies effectués sur 6 mois et sur 12 mois (illustration 36).

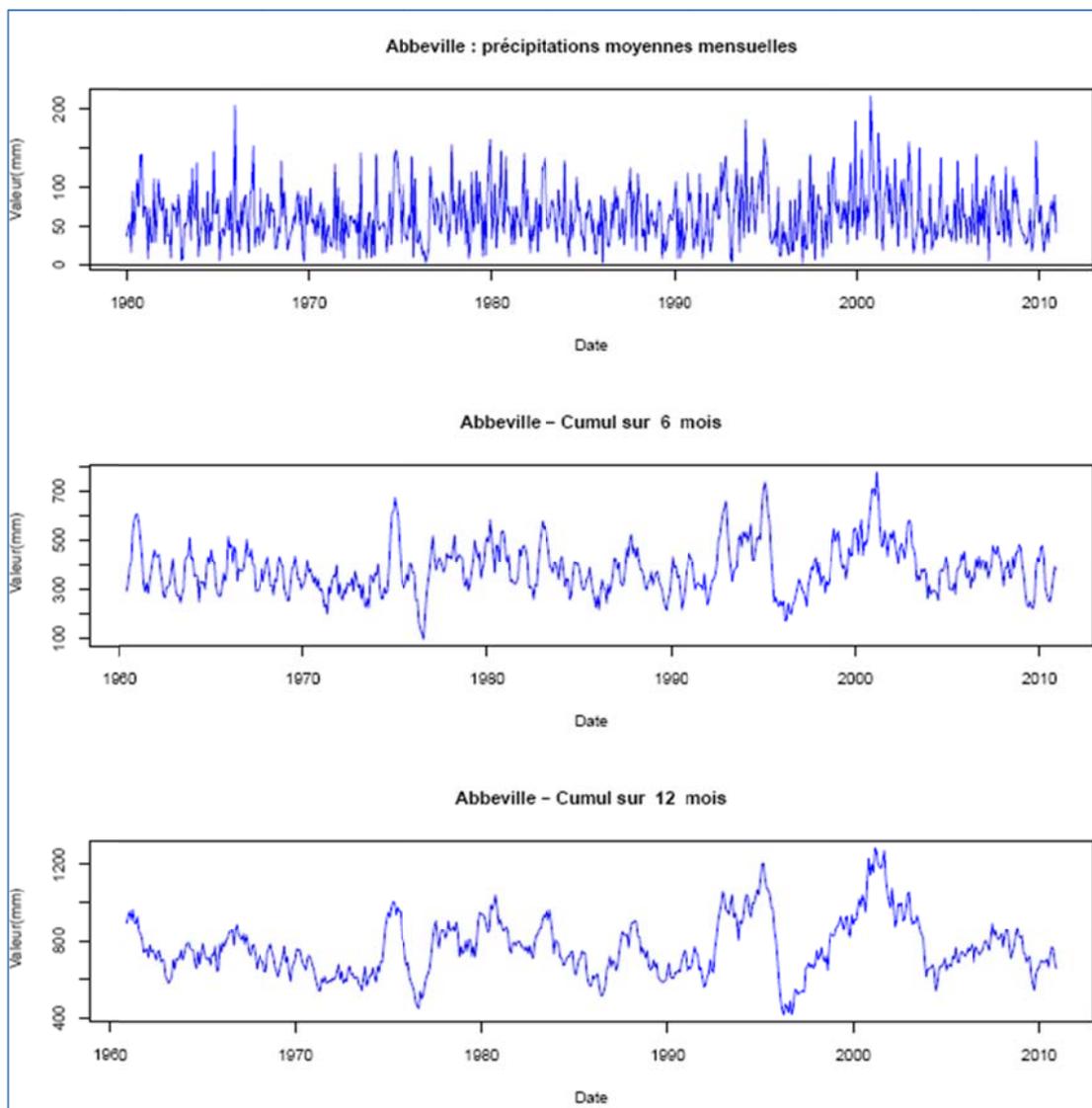


Illustration 36 – Précipitations mensuelles à la station d'Abbeville sur la période 1960-2010 et cumul des précipitations sur 6 mois et 12 mois (mois glissants)

Étape 2 - L'illustration 37 présente les graphiques permettant d'évaluer visuellement l'ajustement d'une loi gamma sur l'échantillon constitué par les valeurs cumulées sur 6 mois et pour le mois de mars (pour $n=6$ mois glissants et $N=51$ valeurs de 1960 à 2010).

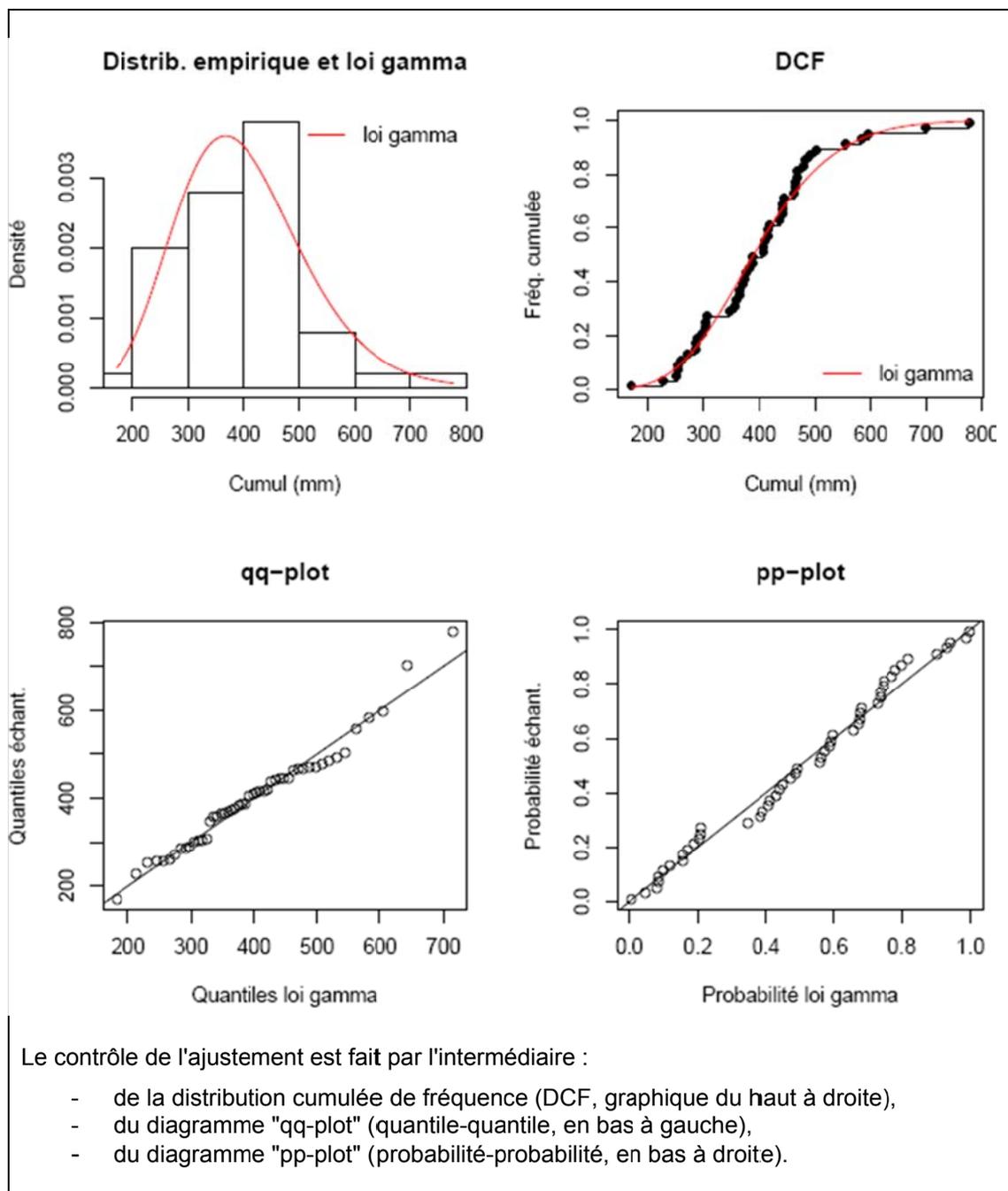


Illustration 37 – Diagrammes permettant de juger de l'ajustement de la loi gamma sur l'échantillon du mois de mars constitué par les pluies mensuelles cumulées sur 6 mois à la station d'Abbeville

Étape 3 - Pour illustrer cette étape, deux modalités de calcul du SPI ont été testés :

- l'une en utilisant la loi gamma ajustée (étape 3 ci-dessus), comme préconisé dans l'article de McKee
- l'autre en utilisant un estimateur de densité (cf annexe 4) ajusté sur l'histogramme de l'échantillon traité, ce qui permet de s'affranchir d'une loi de probabilité qui ne s'ajuste pas toujours correctement aux données.

L'illustration 38 résume graphiquement le calcul du SPI-6 mois pour le mois de mars.

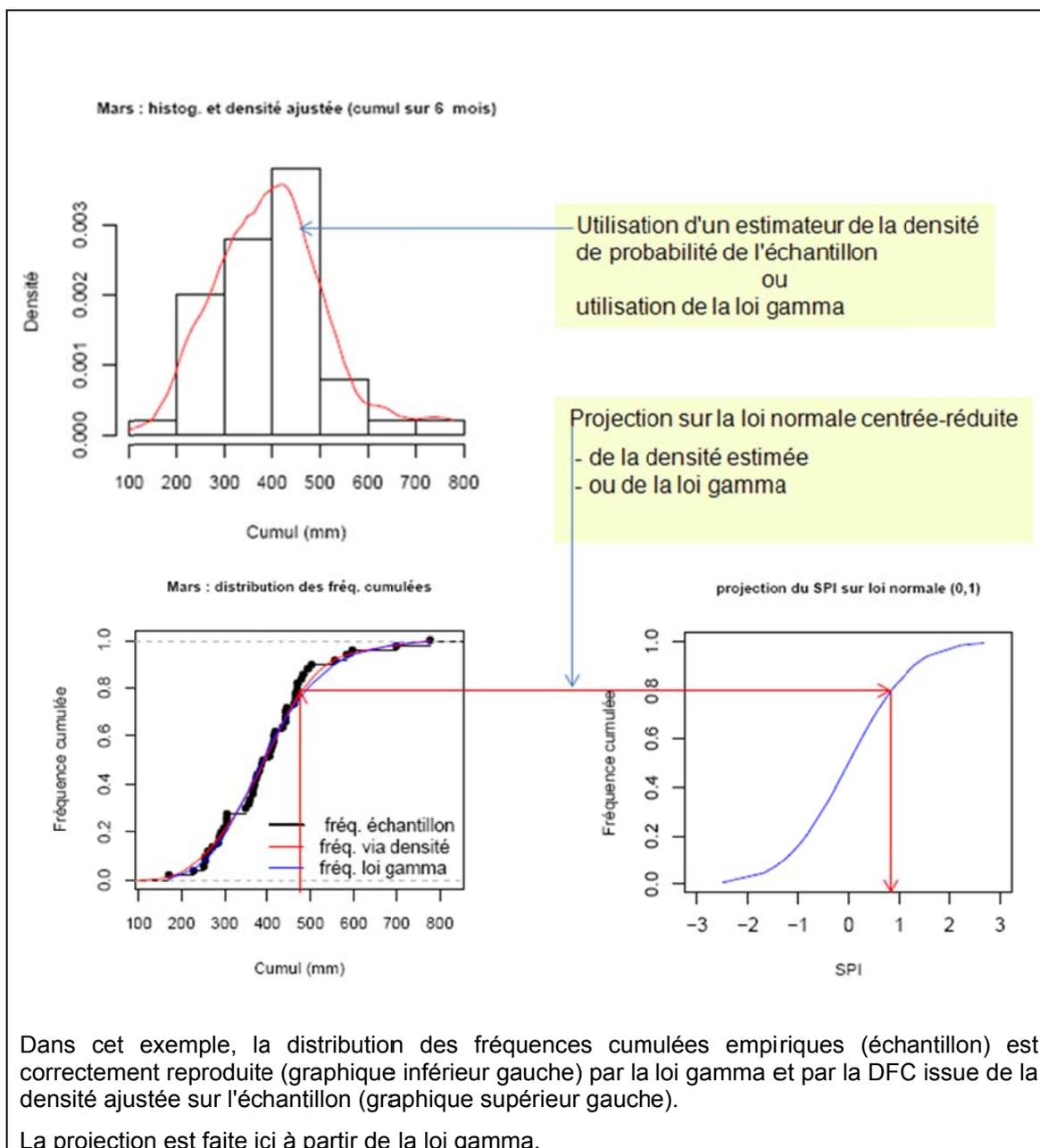


Illustration 38 – Calcul du SPI-6mois à la station d'Abbeville pour le mois de mars : projection de la loi gamma ajustée sur la loi normale centrée-réduite.

L'illustration 39 présente les résultats obtenus à l'issue de l'étape3 : le graphique d'évolution du SPI (SPI-6mois et SPI-12mois) sur l'ensemble de la période 1960-2010.

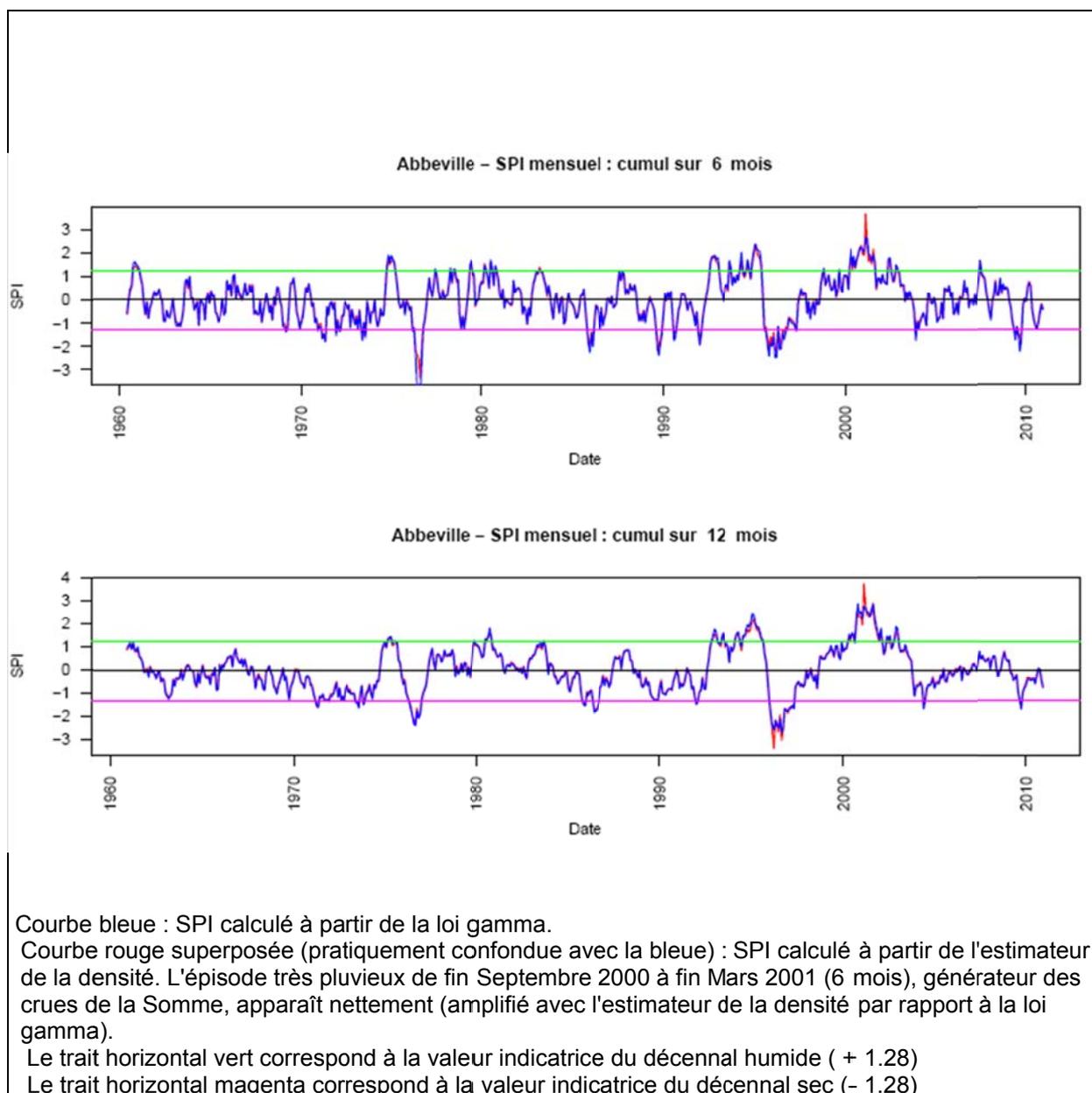


Illustration 39 – Evolution du SPI-6mois et du SPI-12mois à la station d'Abbeville de 1960 à 2010

- Caractérisation d'un épisode de sécheresse à l'aide du SPI

Un épisode de sécheresse peut alors être caractérisé par (illustration 40) :

- une durée : l'épisode sec commence lorsque le SPI devient négatif. Différents seuils du SPI peuvent être définis pour qualifier sa sévérité ; par exemple la valeur de -1,28 correspondant à du "décennal sec", -1,64 à du "vingtennal sec" (reporté en trait pointillé sur l'illustration ci-dessous),
- une intensité,
- une magnitude.

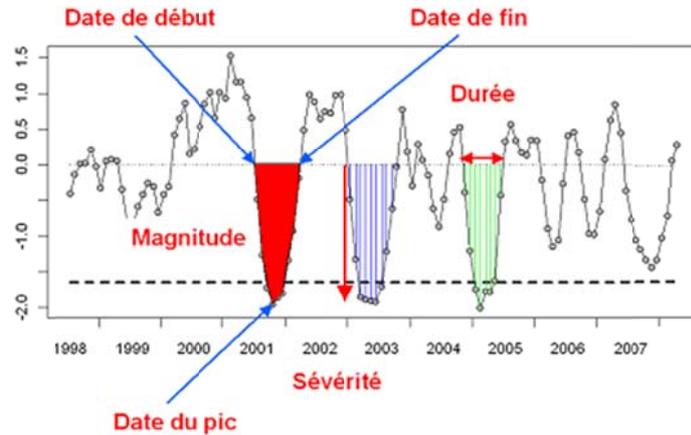


Illustration 40 - Caractérisation d'un épisode de sécheresse par le SPI

Source : Rapport Climsec. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. Rapport final du projet (2011)

La magnitude (Drought Magnitude) est définie par (McKee et al., 1993) comme la somme des valeurs du SPI sur la durée de la sécheresse :

$$DM = - \sum_{j=1}^m SPI_{ij}$$

$j = 1$ est l'indice du premier mois de sécheresse (SPI devient négatif) et $j = m$ l'indice du dernier mois de sécheresse (SPI redevient positif).

L'indice i correspond à l'échelle de temps de calcul du SPI (3 mois, 6 mois, ...).

La magnitude est exprimée en mois et serait numériquement égale à la durée de la sécheresse si chacun des mois avait un SPI de -1.

McKee et al. décrivent ainsi les avantages du SPI :

- il a une définition probabiliste,
- il est distribué suivant une loi normale centrée-réduite et peut donc s'appliquer aussi bien à des épisodes de sécheresse qu'à des épisodes très pluvieux,
- il permet de caractériser un déficit de précipitations sur la période en cours,
- il peut être associé à d'autres variables du cycle de l'eau : humidité du sol, débit des cours d'eau, niveau des nappes.

- Utilisation du SPI en France

En France, le SPI est calculé par Météo-France et intégré dans des bulletins de situation hydrologique régionaux. Un exemple en est donné, pour le bassin Loire-Bretagne par l'illustration 41.

Dans cet exemple, le SPI a été divisé en 7 classes dont les coupures correspondent aux 6 périodes de retour suivantes :

25 ans sec, 10 ans sec, 5 ans sec, 5 ans humide, 10 ans humide et 25 ans humide.

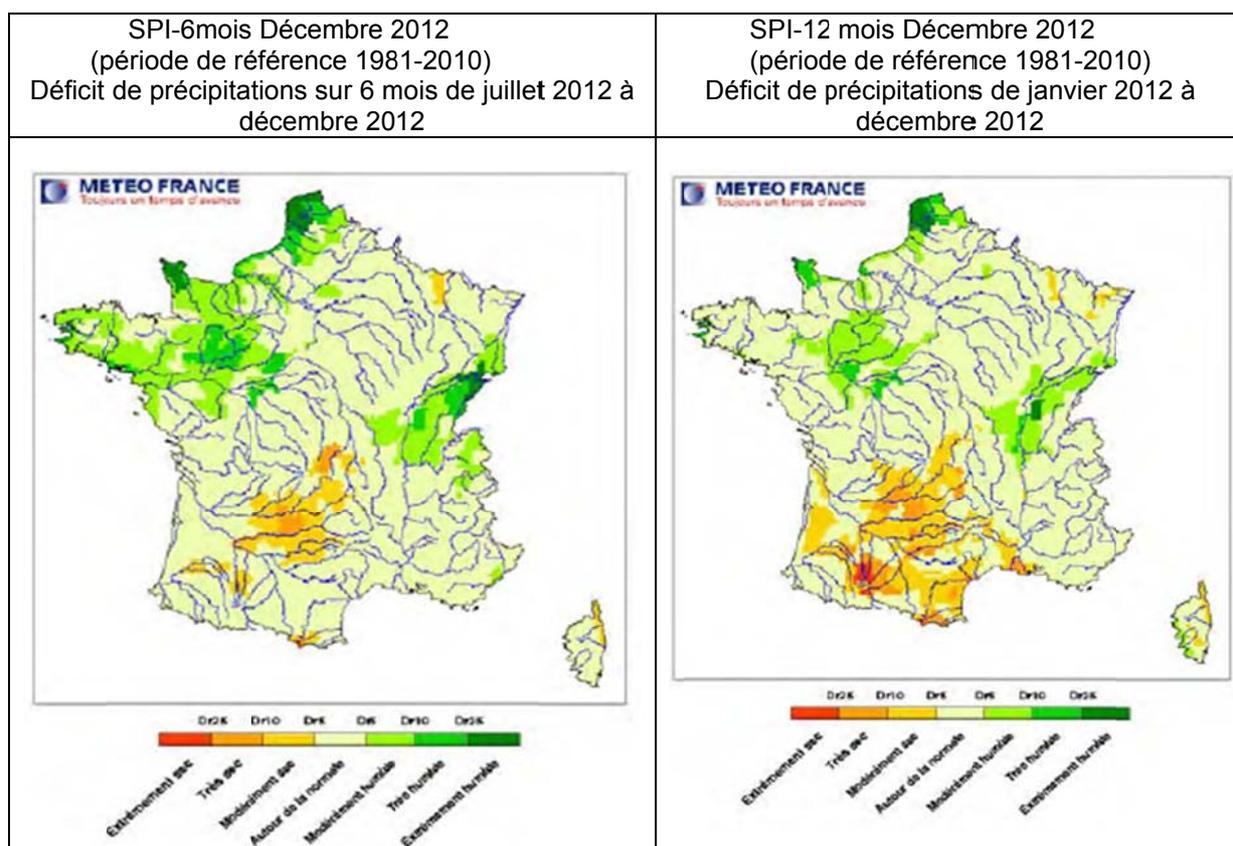


Illustration 41 – Exemple de cartographie du SPI

<http://www.donnees.centre.developpement-durable.gouv.fr/EditEau/BSH-LB-janv2013.pdf>

3.2.2. Les index caractérisant l'humidité du sol

Le "Soil Moisture Index" (SMI)

Cet index a été proposé par V. Shridar et al (2008). Il est calculé comme suit :

$$SMI = \left[\frac{5(SM - WP)}{(FC - WP)} - 5 \right]$$

SM est la teneur en eau du sol (*Soil Moisture*)

WP est la teneur en eau au point de flétrissement (*Wilting Point*)

FC est la teneur en eau à la capacité au champ (*Field Capacity*)

Le SMI varie entre 0 et -5. Une valeur de 0 indique que le sol est à saturation, une valeur de -1 indique un début de sécheresse et une valeur de -5 correspond à une sécheresse sévère.

L'index standardisé d'humidité du sol (Standardized Soil Wetness Index ou SSWI)

Le SSWI, utilisé par Météo-France et calculé par le module ISBA de la chaîne SAFRAN-ISBA-MODCOU, est obtenu à partir de l'index d'humidité des sols (*Soil Wetness Index*, SWI). Par rapport au SPI, il apporte une information supplémentaire sur la sévérité d'un déficit pluviométrique, susceptible de se propager au réservoir sol.

- Le SWI

Comme le SMI, le SWI fait intervenir les caractéristiques des sols par l'intermédiaire des taux d'humidité au point de flétrissement et à la capacité au champ.

$$SWI = \frac{w - w_f}{w_{cc} - w_f}$$

w est la teneur en eau du sol

w_f est la teneur en eau au point de flétrissement

w_{cc} est la teneur en eau à la capacité au champ

Les teneurs en eau au point de flétrissement et à la capacité au champ sont fonction des types de sol, caractérisés dans chacune des mailles du module ISBA par un pourcentage en argile et en sable.

- Le SSWI

Le calcul du SSWI s'inspire de celui du SPI, avec deux différences :

- 1) sur les différentes échelles de temps (3, 6, 9, 12 mois) le SWI est moyenné et non cumulé,
- 2) la projection sur la loi normale réduite s'effectue non pas à partir d'une loi gamma, mais à partir d'un estimateur à noyau gaussien de la densité de probabilité empirique (cf. annexe 4), ceci compte tenu de la grande diversité de forme des histogrammes.

L'illustration 42 présente un exemple de cartographie du SSWI-1mois pour l'année 1976.

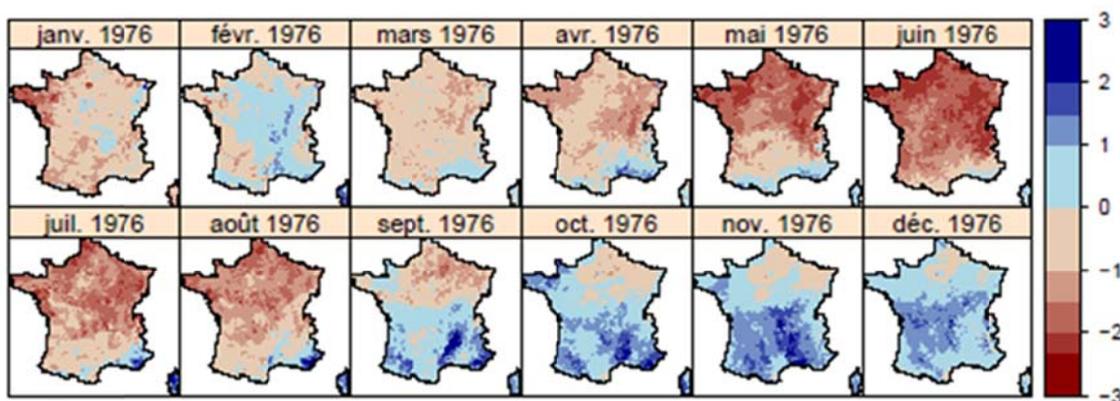


Illustration 42 - Représentation de la sécheresse de 1976 avec le SSWI-1.

L'échelle de couleur est dérivée de la classification traditionnelle du SPI ; Source : *Rapport Climsec. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol.* Rapport final du projet (2011)

3.2.3. L'index standardisé précipitation-évapotranspiration (SPEI)

Le SPEI, "Standardized Precipitation Evapotranspiration Index" (S.M. Vicente-Serrano et al., 2009) se calcule comme le SPI mais à partir de la différence D entre la pluie et l'évapotranspiration potentielle, calculée mois par mois. Pour le mois i :

$$D_i = P_i - ETP_i$$

L'évapotranspiration potentielle est calculée à l'aide d'une formule (analogue à celle de Thornthwaite) qui ne fait intervenir que la température comme variable et des paramètres fonction de la latitude du lieu.

Comme pour le SPI, la valeur calculée D_i est alors agrégée à différentes échelles de temps (3 mois, 6 mois, ...).

Après avoir testé plusieurs lois de probabilité, les auteurs ont choisi la loi log-logistique (cf. annexe 3) qui était celle qui s'ajustait le mieux aux fréquences cumulées empiriques des données traitées. Plusieurs séries de données ont été traitées issues de 11 stations situées dans des zones climatiques différentes : Valence (Espagne), Helsinki (Finlande), Vienne (Autriche), Albuquerque (Mexique), São-Paulo (Brésil), ...

Pour ces 11 stations, sur la période 1910-2007, l'illustration 43 montre la corrélation entre le SPI et le SPEI pour des échelles de temps allant de 1 à 24 mois.

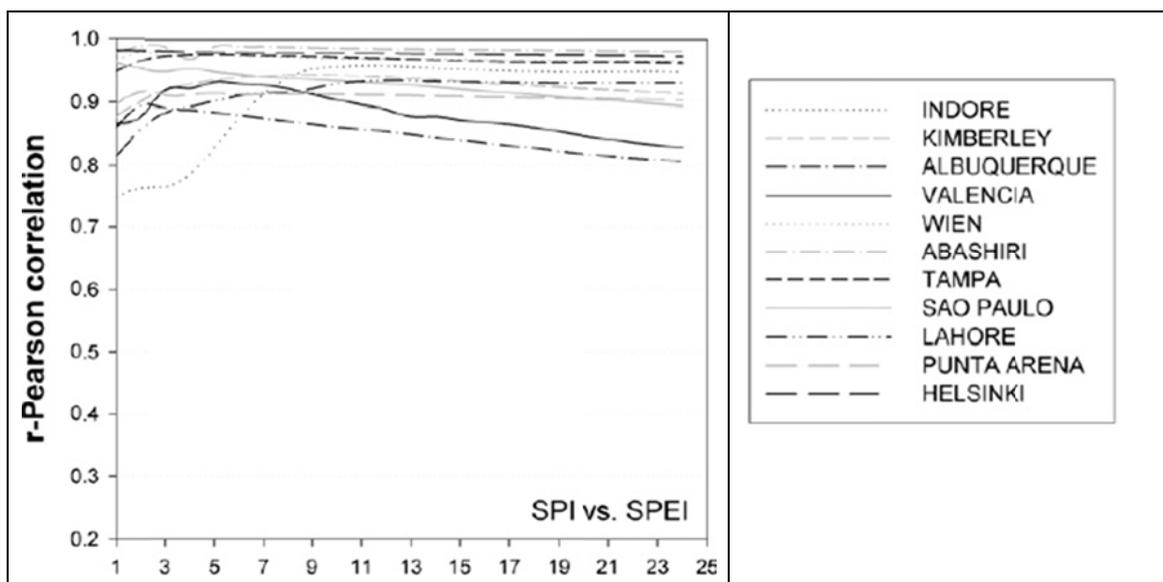


Illustration 43 – Corrélation entre le SPI et le SPEI de 1 à 24 mois calculés à partir des données de 11 stations climatiques sur la période 1910-2007.

Source : Vicente-Serrano S.M., Begueria S., Lopez-Moreno, J.I. (2009)

Sur la base de cette analyse corrélatoire, qui montre une excellente corrélation entre SPI et SPEI (sauf pour 2 stations : Valence et Albuquerque), les auteurs concluent que le SPEI n'apporte pas d'information supplémentaire sur la sécheresse climatologique par rapport au SPI sous des conditions climatiques "normales", en particulier lorsque la température est stationnaire sur la période de calcul.

Mais lorsque la température augmente sur la période considérée, cas de Valence et d'Albuquerque et plus généralement dans un contexte global de réchauffement climatique, le SPEI, intégrant "l'effet température", serait alors un indicateur préférable au SPI pour caractériser les épisodes de sécheresse sous des climats très différents.

3.3. INDEX PIÉZOMÉTRIQUE STANDARDISÉ (SPLI)

Par similitude avec le SPI, le SSWI et le SPEI, l'index piézométrique que l'on tente de mettre au point a été appelé SPLI (*Standardized Piezometric Level Index*).

3.3.1. Sélection des piézomètres

Lors des phases 1 et 2 du présent projet (rapports BRGM/RP-59286-FR – 2011 - et rapport BRGM/RP-61020-FR – 2012), une base de données a été constituée avec des piézomètres faisant l'objet de mesures depuis au moins 25 ans (mais il ne s'agit pas nécessairement de séries complètes, une année ou deux pouvant manquer).

Les piézomètres retenus (au nombre de 377) ont été classés en fonction de la dynamique de la nappe captée. Il y a ainsi les piézomètres :

- à cycles annuels (type c)
- à double cycles, en distinguant :
 - ceux où le cycle annuel est le plus marqué (type b1)
 - ceux à cycles mixtes (type b2)
 - ceux où le cycle pluriannuel est le plus marqué (type b3)
- à grands cycles pluriannuels (type a, par exemple piézomètres captant la nappe des Calcaires de Beauce).

La répartition est la suivante :

Type c	Type b1	Type b2	Type b3	Type a
119	132	55	43	28

Les illustrations 44 et 45 présentent les différents types de cycle (c, b1, b2, b3) différenciés à l'aide :

- de corrélogrammes, montrant l'évolution de l'autocorrélation en fonction du décalage entre valeurs successives de la série,
- de spectrogrammes, montrant l'évolution de la densité spectrale de puissance (dsp) en fonction de la fréquence : dans l'espace des fréquences, la dsp représente la part de variance de la série expliquée par les différentes "bandes" de fréquence ; elle fait donc ressortir la ou les fréquences dominantes.

Parmi ces 377 piézomètres, pour les calculs du SPLI, ont été éliminés des traitements :

- ceux présentant un manque de données sur une année entière,
- ceux qui présentent une tendance significative (baisse ou hausse), donc non stationnaires (cf. rapports BRGM/RP-59286-FR – 2011 et BRGM/RP-61020-FR – 2012),
- ceux à grands cycles pluriannuels (type a), car ils montrent 2 à 3 cycles seulement sur des périodes de 30-40 ans.

Au total, 229 piézomètres ont été retenus ; pour la plupart, ils sont localisés dans les bassins Seine-Normandie, Artois-Picardie et Rhin-Meuse (illustration 46).

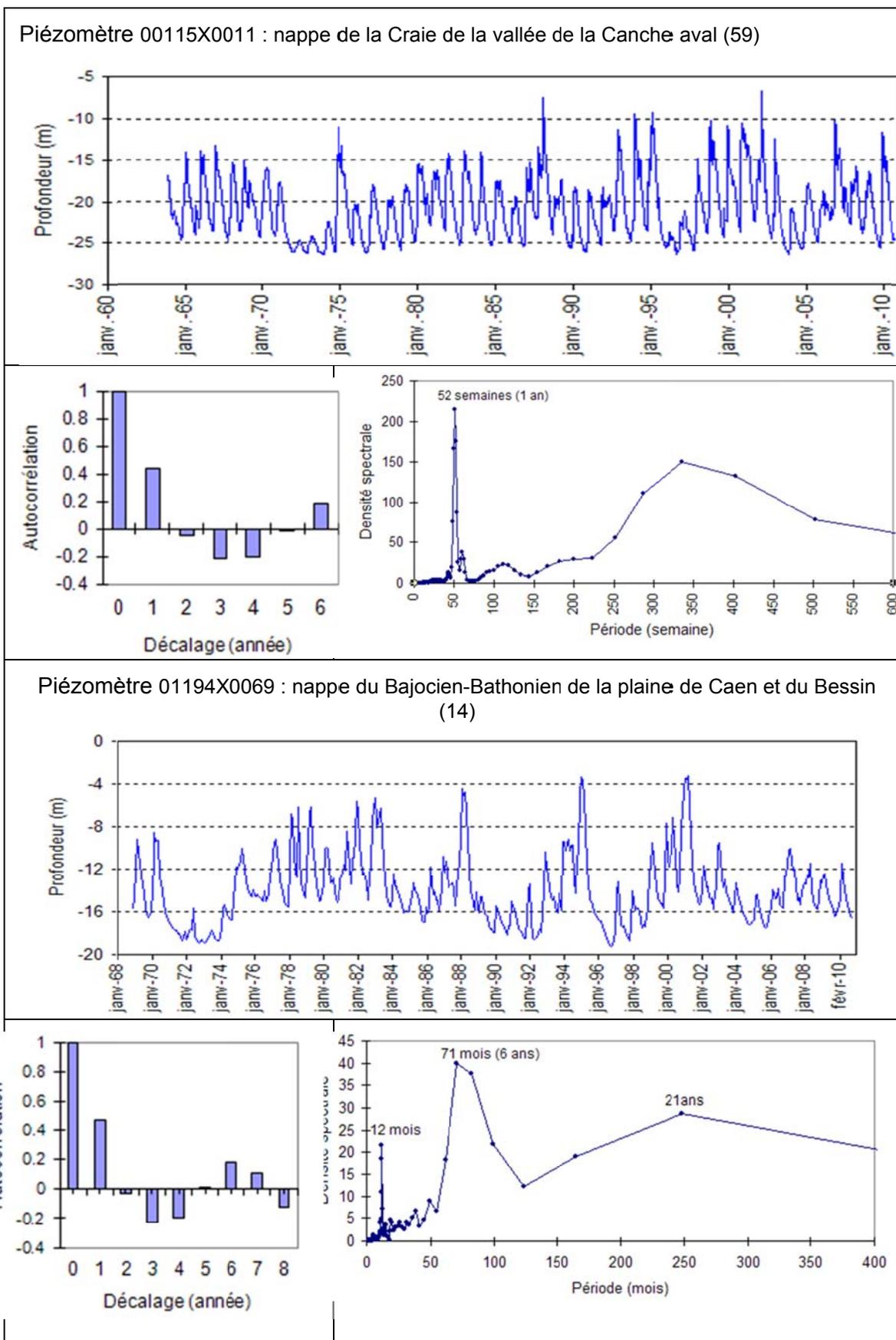
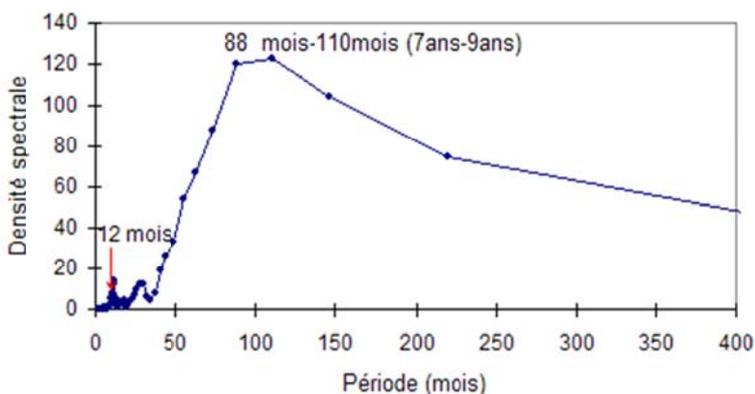
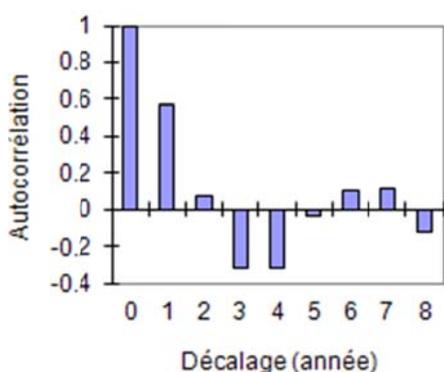
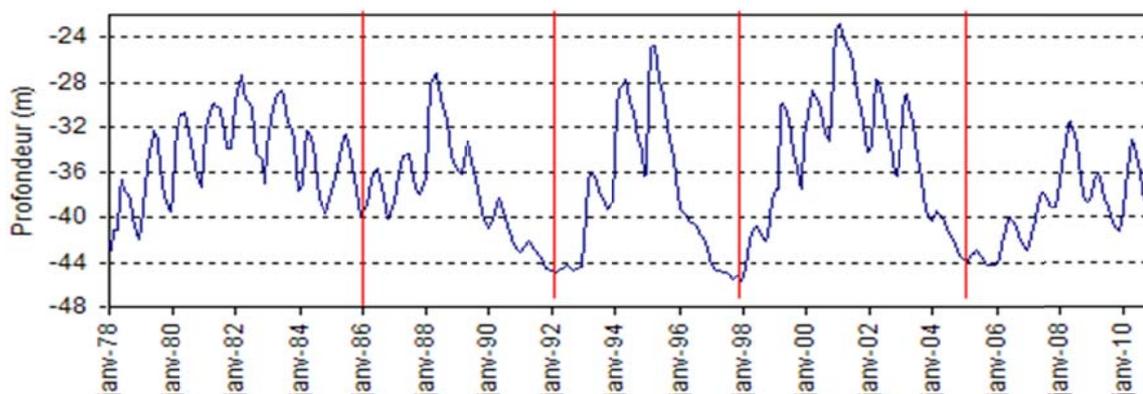


Illustration 44 – Exemple de nappe à cycles annuels et de nappe à double cycles avec cycle annuel marqué

Piézomètre 00777X0008 : nappe de la Craie du Vexin normand et picard (76)



Piézomètre 03276X0009 : nappe des Calcaires tertiaires de Beauce (45)

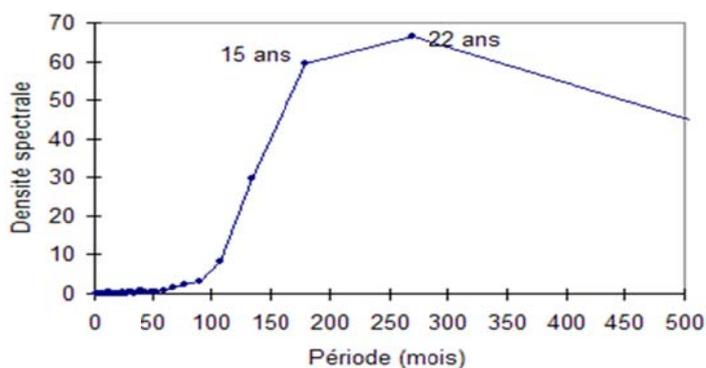
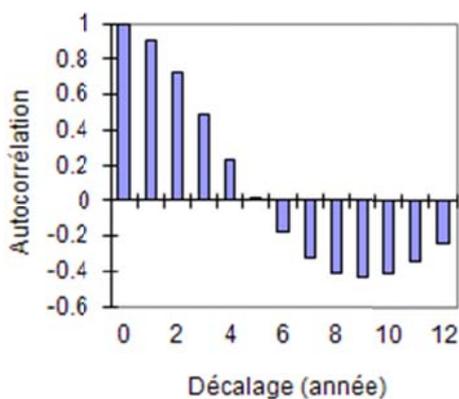
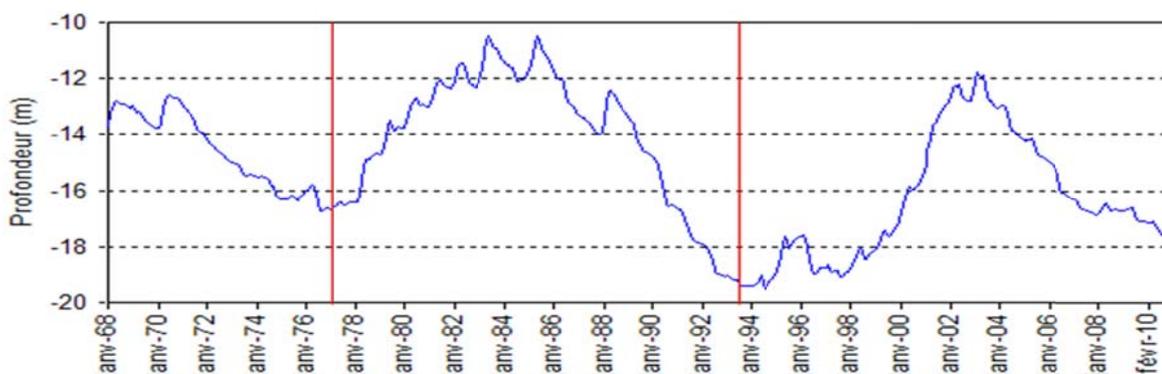


Illustration 45 - Exemple de nappe à double cycles avec cycles pluriannuels plus marqués que les annuels et de nappe à cycles pluriannuels dominant

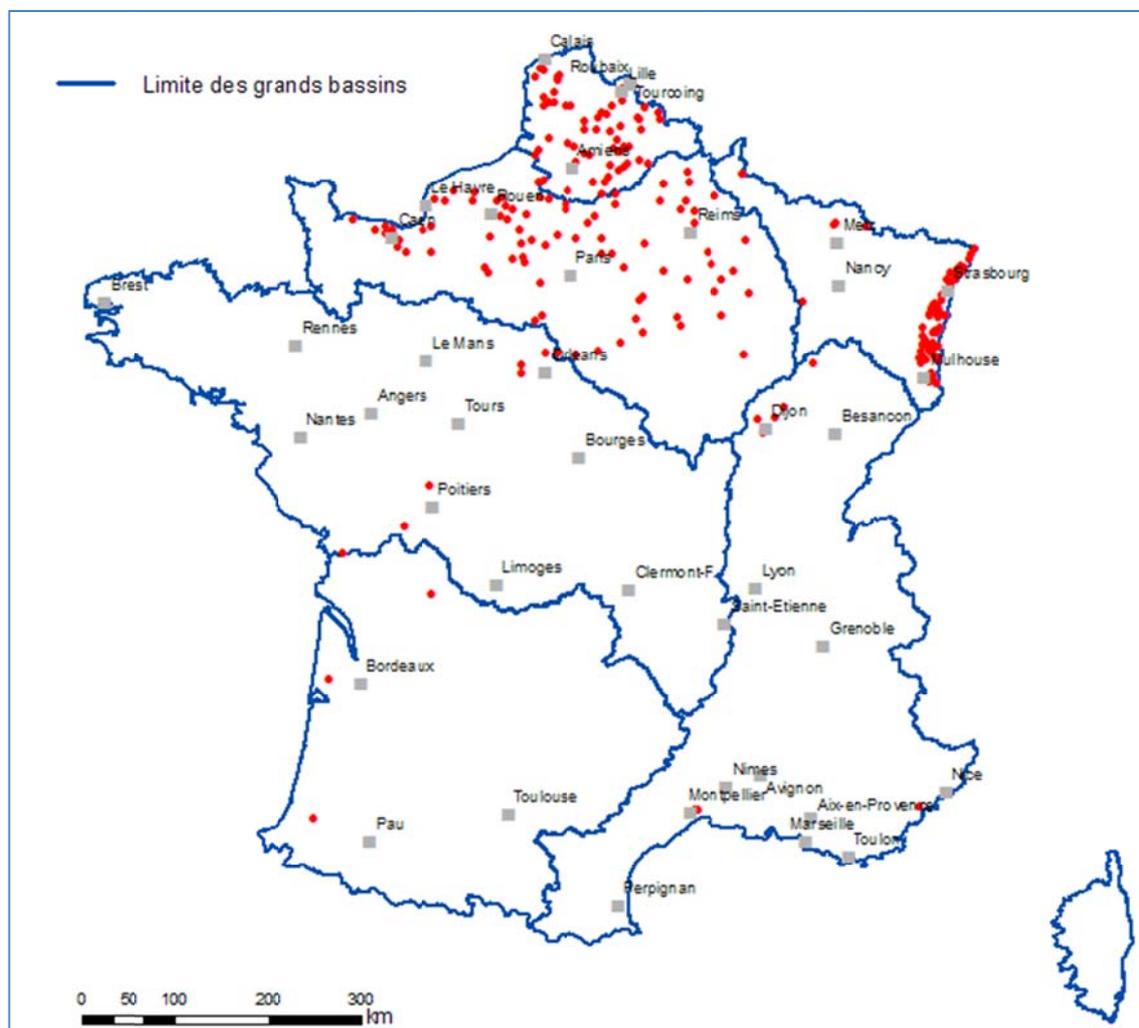


Illustration 46 – Localisation des piézomètres utilisés pour le calcul du SPLI

Pour le calcul de l'index piézométrique, les piézomètres restants ont été classés en différents groupes en fonction du degré d'autocorrélation dans les séries des moyennes annuelles :

- piézomètres de type c, b1 et b2 non autocorrélés, ou faiblement : 101 piézomètres (en majorité de type c, puis de type b1)
- piézomètres de type c et b1, autocorrélés (majoritairement de type b1) : 65
- piézomètres de type b2, autocorrélés, au nombre de 33
- piézomètres de type b3, autocorrélés, au nombre de 30.

Pour chaque série piézométrique, sur la période de mesures, une valeur moyenne mensuelle a été calculée ainsi qu'une valeur moyenne annuelle.

Comme pour le SPI, le SPLI peut être calculé à des échelles de temps mensuelles (3 mois, 6 mois, ...). Mais, compte tenu de l'inertie des nappes, dont les niveaux évoluent peu en général d'un mois à l'autre, un SPLI agrégé à des échelles de temps annuelles (1 an, 2 ans, 3 ans) serait plus à même de décrire une "sécheresse hydrogéologique".

Néanmoins, les 2 possibilités ont été examinées, l'objectif du calcul du SPLI mensuel étant plutôt une comparaison avec le SPI.

Remarque : une analyse probabiliste implique l'absence d'autocorrélation dans les données étudiées (cas des pluies par exemple). Lorsque cette autocorrélation existe (cas de nombreuses séries piézométriques), il est toujours possible de faire quelques calculs de statistique descriptive, en particulier établir une courbe de fréquences cumulées et tenter d'ajuster sur cette courbe une fonction utilisée en analyse probabiliste (fonction qui n'a plus alors le statut de "loi de probabilité"). De même, on peut aussi projeter cette fonction (loi gamma par exemple) sur une autre fonction (gaussienne par exemple). Le calcul d'un index standardisé par la méthode du SPI reste donc possible lorsqu'il y a autocorrélation, mais on perd le caractère probabiliste.

3.3.2. Calcul d'un SPLI mensuel

Pour la comparaison avec le SPI, les calculs du SPLI mensuel ont été faits uniquement sur les séries piézométriques dont les valeurs inter-annuelles ne sont pas autocorrélées (ou peu), soit 101 piézomètres.

Comme pour le SPI, l'objectif est d'obtenir, via la loi normale centrée réduite, une échelle de valeurs standardisée, comprise entre - 3 (déficit de recharge de la nappe, niveaux très bas) et +3 (niveaux très hauts, suite à forte recharge).

Remarque : la probabilité de non dépassement de +3 est de 0.99865, soit une période de retour de 741 ans).

Etape 1 (illustration 47)

A partir des moyennes mensuelles, un index piézométrique a été préalablement calculé de la façon suivante :

$$IP = \frac{H - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}}$$

- H est le niveau piézométrique (ou la profondeur, en valeur négative par rapport au repère),
- H_{\max} est le niveau maximum de la chronique sur toute la période,
- H_{\min} est le niveau minimum. .

Remarque : Il aurait été aussi possible de prendre le minimum et le maximum sur une période définie, considérée comme période de référence.

L'index IP a été ensuite agrégé (en valeur moyenne comme le SSWI) à deux échelles de temps : 6 mois (IP6) et 12 mois (IP12). L'agrégation à l'échelle m mois est faite par mois glissants : le mois considéré et les m-1 mois qui le précèdent.

Cette étape est retracée par l'illustration 47 : exemple du piézomètre 00115X0011/P1, captant la nappe de la Craie dans le bassin Artois-Picardie (masse d'eau : *Craie de la vallée de la Canche aval*) et faisant l'objet de mesures depuis 1965.

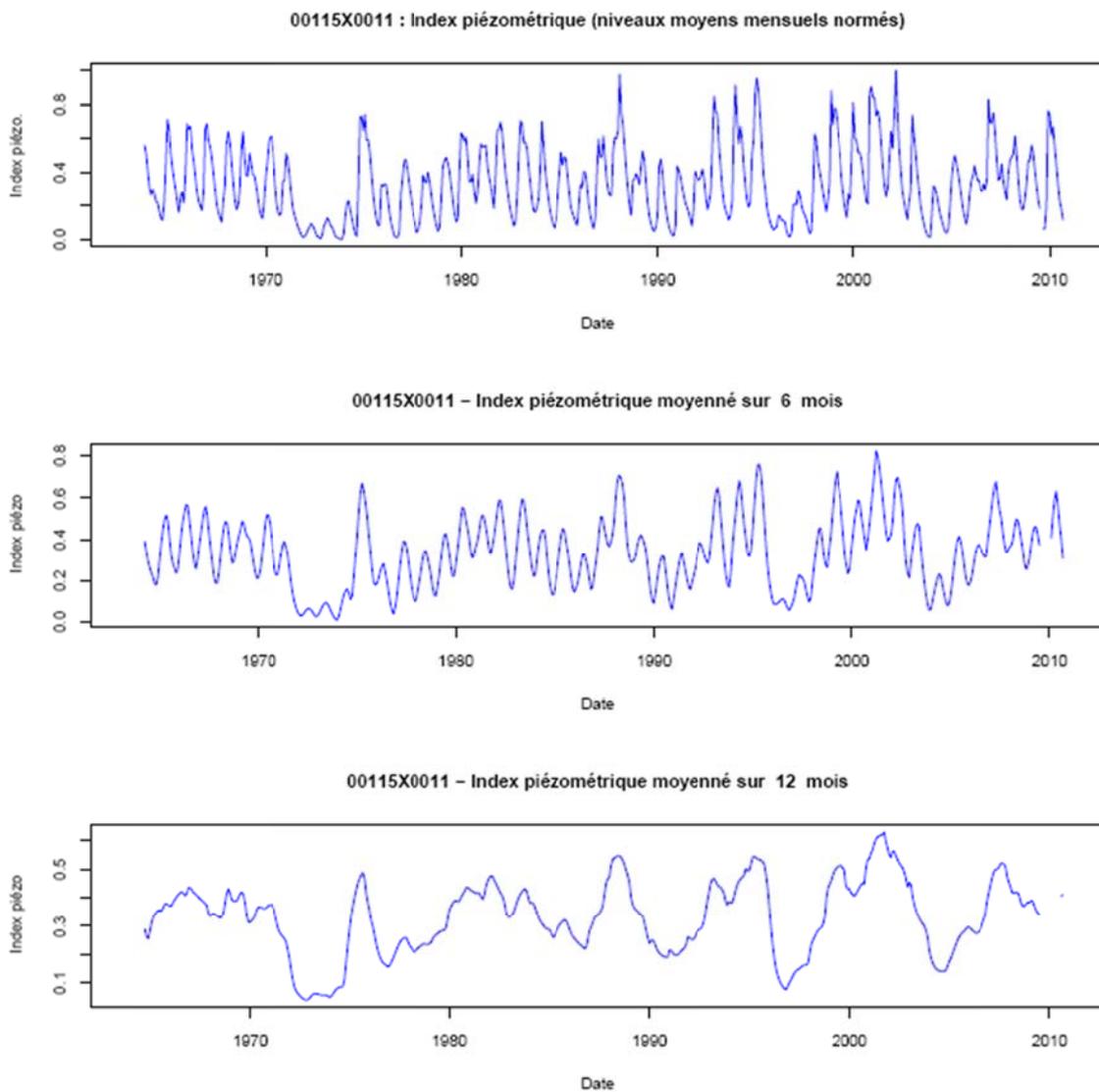


Illustration 47 - Exemple d'élaboration du SPLI mensuel. Etape 1 : calcul d'un index piézométrique normé (IP, graphique du haut) puis moyenné sur 6 mois (IP6) et 12 mois glissants (IP12).

Etape 2

A partir des variables IP6 et IP12, les SPLI-6 et SPLI-12 ont été calculés. Pour cela on extrait des deux séries constituées des valeurs mensuelles IP6 et IP12 chacun des mois calendaires, de janvier à décembre.

Pour chaque indice, on obtient ainsi 12 séries de n valeurs (sur les n années) dont on calcule les distributions cumulées de fréquences sur lesquelles des ajustements de lois de probabilité vont être opérés pour obtenir les index SPLI_6 et SPLI_12.

Deux voies ont été suivies :

- l'une utilise un estimateur de la densité de probabilité (annexe 4), comme pour le SSWI, compte tenu là aussi de la grande diversité de forme des histogrammes (illustrations 48 et 49, montrant cette diversité sur 6 piézomètres) ;
- l'autre méthode utilise des lois de probabilité : loi logistique et lois de Pearson (cf. annexe 3).
 - La loi logistique est une loi à 2 paramètres : un paramètre de position et un paramètre d'échelle.
 - La loi de Pearson de type III est une loi à 3 paramètres : outre les paramètres de position et d'échelle, elle comprend un paramètre de forme.
 - La loi de Pearson de type I est une loi à 4 paramètres : les paramètres de position et d'échelle et deux paramètres de forme.

Les lois à plus de 2 paramètres sont intéressantes dans le cadre du calcul de ces indicateurs en raison de leur "souplesse" d'ajustement, ce qui est effectivement un avantage compte tenu de la diversité de forme des distributions mentionnées ci-avant.

Un autre intérêt de ces lois est la possibilité de traiter des séries avec des valeurs négatives (ce qui serait le cas de l'index piézométrique si le minimum était choisi non pas sur la totalité de la période mais sur une période de référence).

L'illustration 50 présente un exemple d'ajustement sur la distribution empirique des fréquences cumulées du mois d'octobre de l'indice IP12 :

- d'un estimateur de la densité empirique ;
- de la loi logistique à 2 paramètres ;
- d'une loi de la famille des lois de Pearson (la plupart du temps, c'est la loi de Pearson de type 1 qui est retenue par le logiciel R).

Il s'agit du piézomètre 00115X0011, captant la nappe de la Craie dans le bassin Artois-Picardie (masse d'eau : *Craie de la vallée de la Canche aval*) et faisant l'objet de mesures depuis 1965.

Pour chaque mois, de janvier à décembre, et pour les 2 indices IP6 et IP12, on obtient ainsi une loi de probabilité (ou une estimation via un estimateur) à partir de laquelle il sera possible de calculer les SPLI_6 et SPLI_12 (étape 3 ci-après).

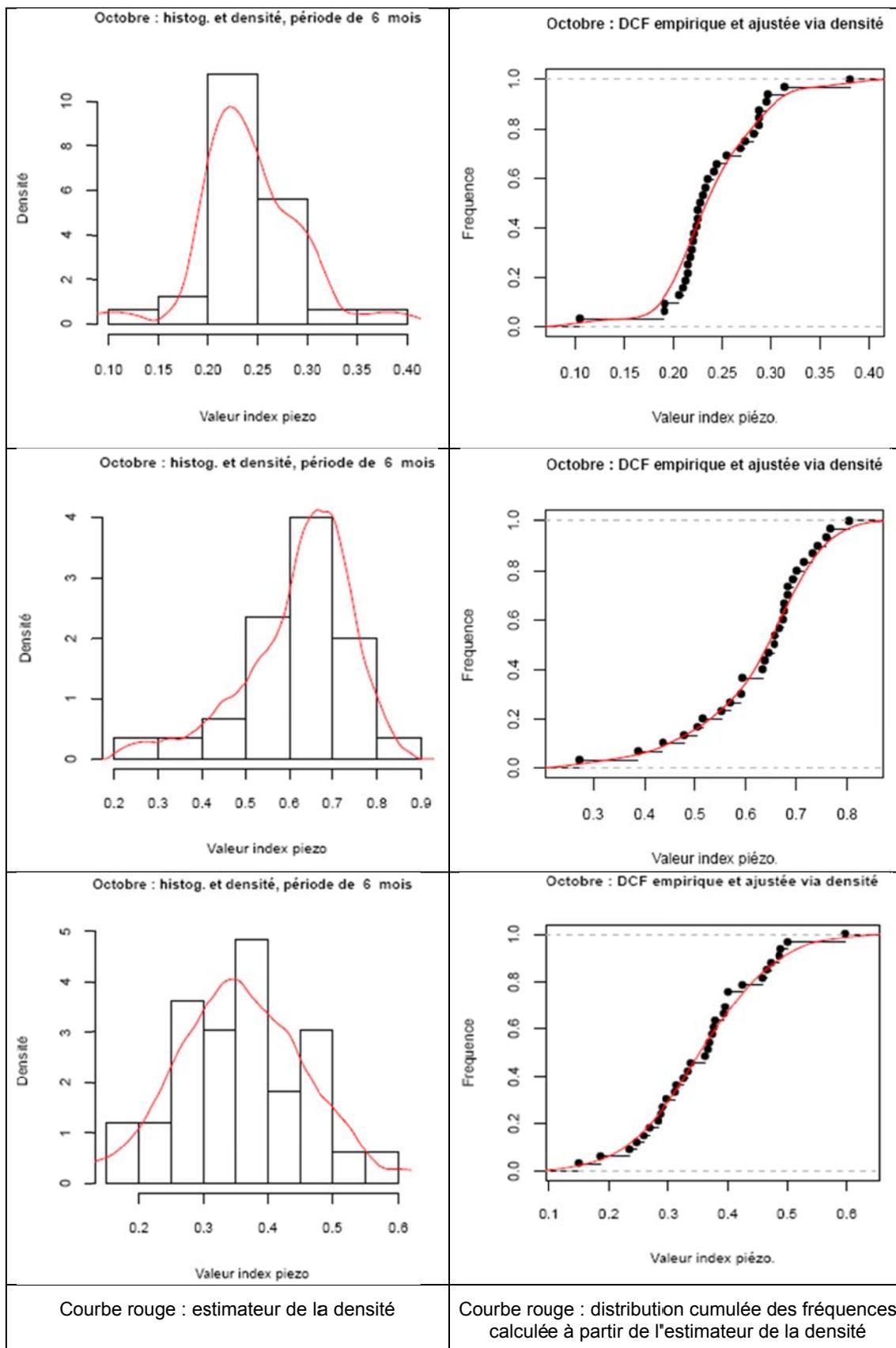


Illustration 48 – Exemples pour 3 piézomètres de distribution fréquentielle des index piézométriques cumulés sur 6 mois (IP6).

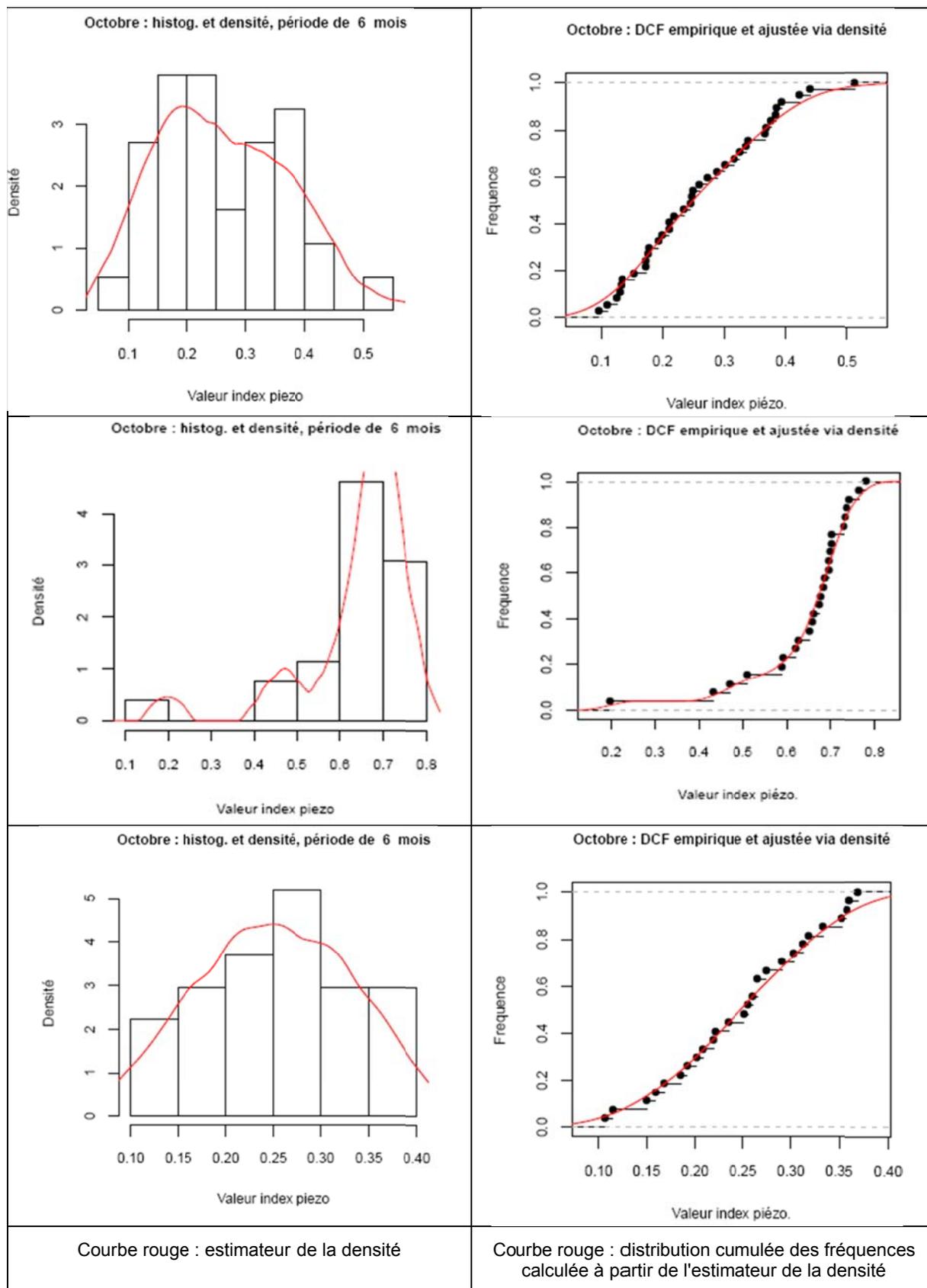


Illustration 49 – Autres exemples, pour 3 piézomètres, de distribution fréquentielle des index piézométriques cumulés sur 6 mois (IP6).

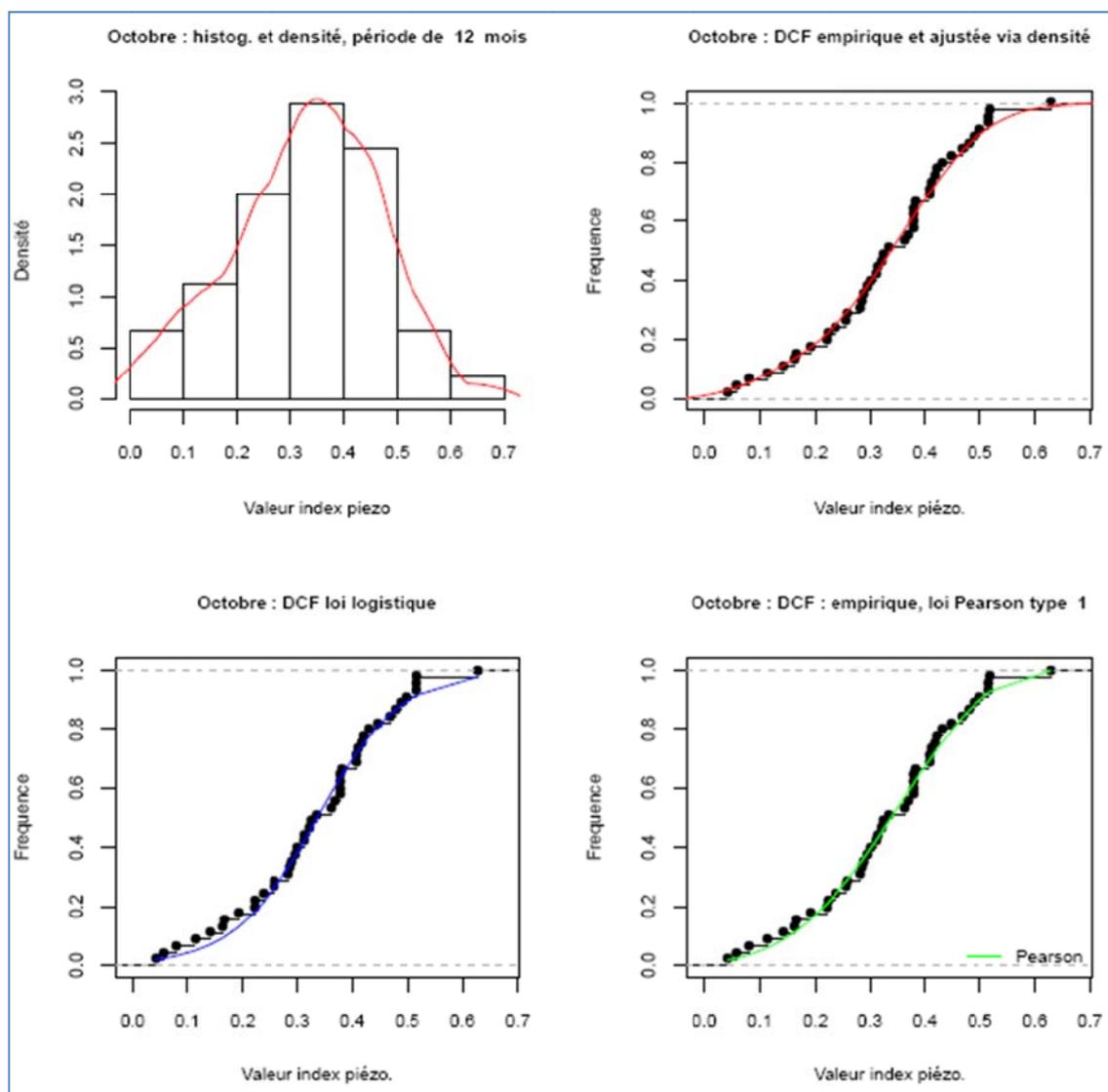
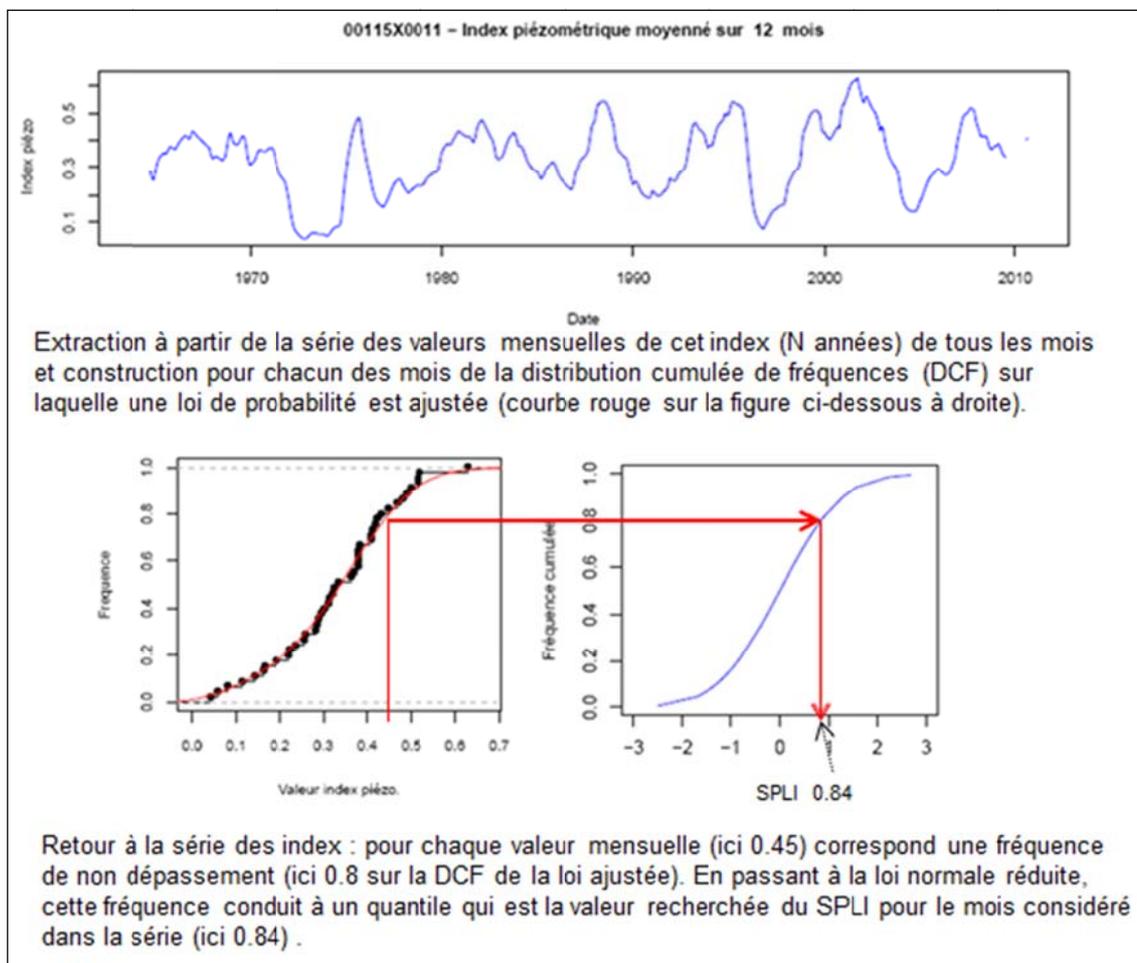


Illustration 50 - Exemple d'élaboration d'un SPLI mensuel 1 (ici, le SPLI_12mois du mois d'octobre) : ajustements sur la distribution empirique des fréquences cumulées (DCF) de l'IP12 du mois d'octobre d'un estimateur de la densité, d'une loi logistique et d'une loi de Pearson de type 1.

Étape 3

Pour chaque valeur mensuelle de la série pluri-annuelle des IP, il est donc possible de réaliser une projection « quantile-quantile » de la loi de probabilité ajustée (ou de l'estimateur) sur la loi normale centrée-réduite (exemple ci-dessous).



Résultats

On obtient donc en définitive une courbe continue de SPLI sur l'ensemble de la période des N années.

Un exemple de résultats est présenté par l'illustration 51 (piézomètre 00115X0011, captant la nappe de la Craie dans le bassin Artois-Picardie - masse d'eau nommée *Craie de la vallée de la Canche aval*).

Le graphique du haut de la figure représente l'évolution mensuelle du SPLI_12mois sur la période considérée. Le graphique du bas représente, à titre d'exemple, le SPLI_12 mois du mois d'Octobre.

Les courbes d'évolution du SPLI-12mois tracées à partir des valeurs du SPLI calculées en utilisant : 1) un estimateur de la densité, 2) la loi logistique et 3) la loi de Pearson de type 1, sont confondues sur presque toute la période considérée (mais la loi de Pearson amplifie beaucoup l'événement pluvieux d'Octobre 2000 à fin Mars 2001).

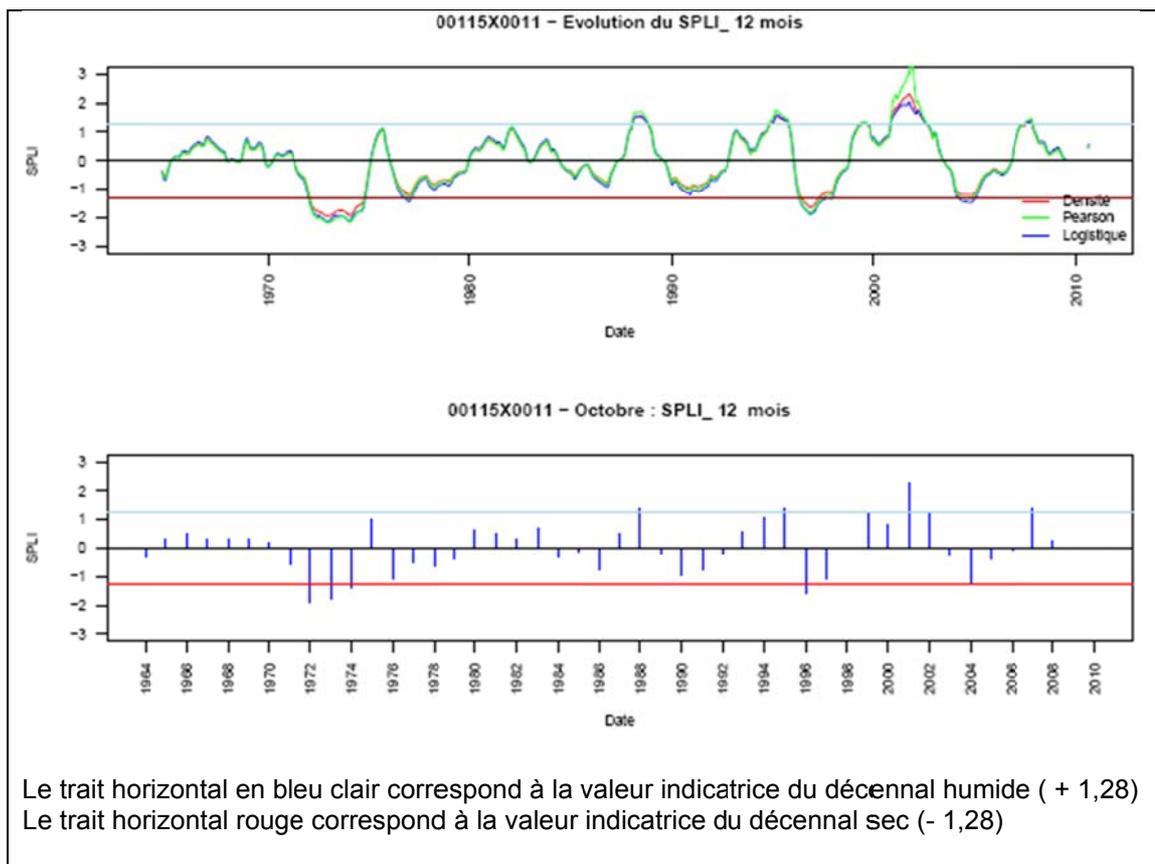


Illustration 51 - Exemple d'élaboration du SPLI mensuel. Etape 3 : évolution du SPLI-12mois (calculé en utilisant un estimateur de la densité, la loi logistique, la loi de Pearson de type I)

Ces courbes montrent que le piézomètre est impacté par les épisodes de sécheresse de 1972-1974, 1996-1997 et, dans une moindre mesure, 1976, 1990-1991, 2004.

Remarque

Les calculs et les graphiques ont été réalisés avec le logiciel R. Pour chaque série piézométrique, pour chaque échelle d'agrégation, et pour chaque mois de Janvier à Décembre, plusieurs types de graphiques permettent de suivre les étapes du calcul et de contrôler les ajustements réalisés.

3.3.3. Comparaison SPLI (index sur la piézométrie) et SPI (index sur la précipitation)

Cette comparaison SPLI/SPI a été faite pour 3 piézomètres situés non loin de 3 stations climatologiques : Dijon, Reims et Strasbourg.

Dijon

Le piézomètre 04702X0019/SONDAG capte la masse d'eau 6119 des "*Calcaires jurassiques du seuil et des Côtes et arrières-côtes de Bourgogne dans le BV de la Saône en rive droite*".

Comme le montre l'illustration 52, la correspondance entre les évolutions des deux types d'index (SPI-6 et SPLI-6 d'une part, SPI-12 et SPLI-12 d'autre part) est étroite ; il y a toujours coïncidence entre déficit de précipitation (SPI <0) et baisse des niveaux (SPLI <0) mais avec un temps retard.

Les 2 corrélogrammes croisés précisent l'examen visuel : la corrélation est maximale, proche de 0.8, pour un décalage de 3 mois entre les 2 séries de SPI et SPLI (6 mois et 12 mois).

Reims

Le piézomètre 01086X0011/LS4 capte la masse d'eau 3207, "*Craie de Champagne Nord*".

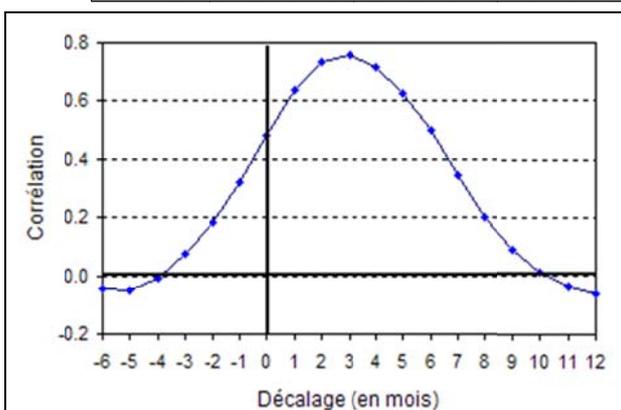
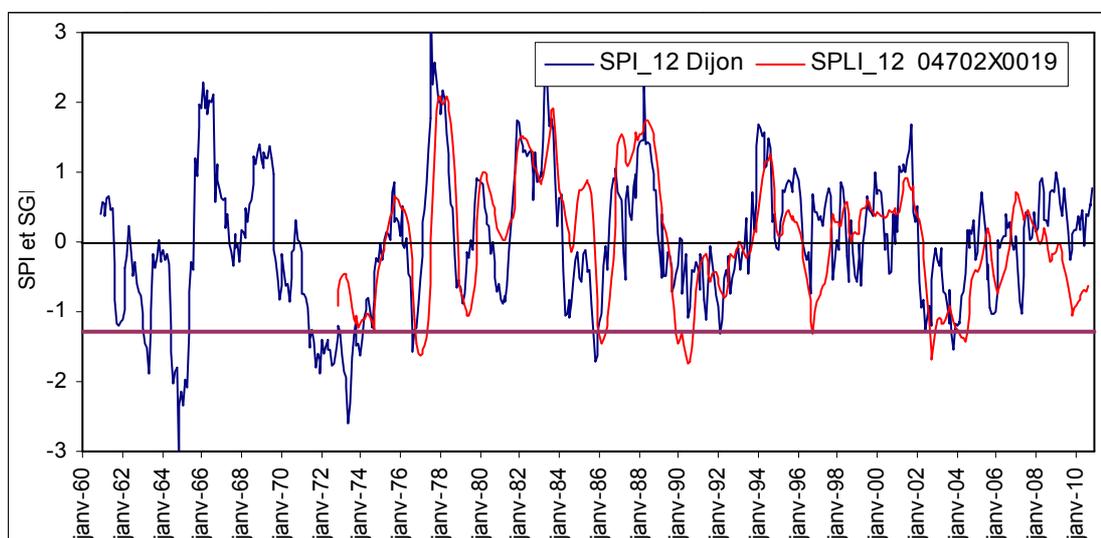
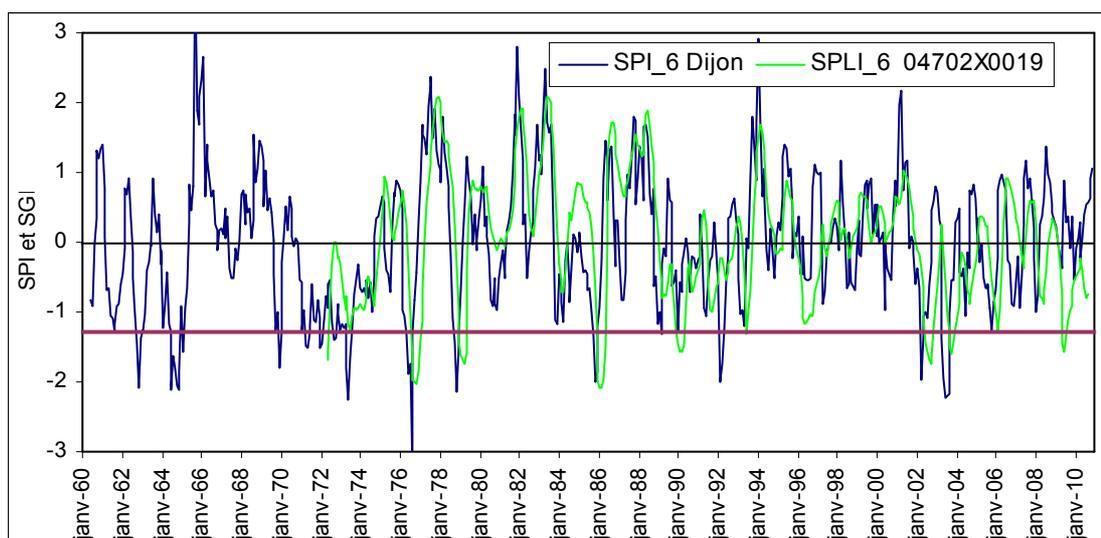
Comme dans le cas précédent, l'illustration 53 montre que la correspondance entre les évolutions des deux types d'index (SPI-6 et SPLI-6 d'une part, SPI-12 et SPLI-12 d'autre part) est étroite ; il y a toujours coïncidence entre déficit de précipitation (SPI <0) et baisse des niveaux (SPLI <0) mais avec un temps retard.

Les 2 corrélogrammes croisés montrent que la corrélation croisée est maximale (0.76 et 0.83) pour un décalage de 3 mois entre les 2 séries de SPI et SPLI (6 mois et 12 mois).

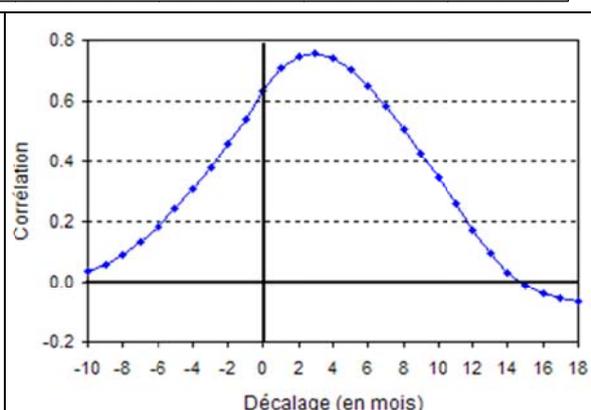
Strasbourg

Le piézomètre 02726X0029/238 capte la masse d'eau 2001, "*Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace*".

Comme pour les 2 piézomètres précédents, l'illustration 54 montre que la correspondance entre les évolutions des deux types d'index (SPI-6 et SPLI-6 d'une part, SPI-12 et SPLI-12 d'autre part) est étroite. Pour ce piézomètre, les coefficients de corrélation croisée sont maxima (supérieurs à 0.8) pour un décalage temporel de 1 à 2 mois (nappe très réactive).

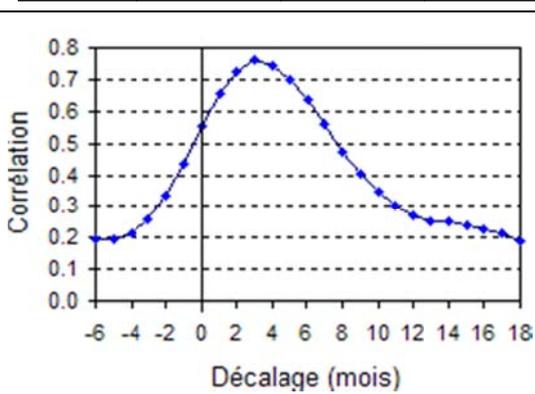
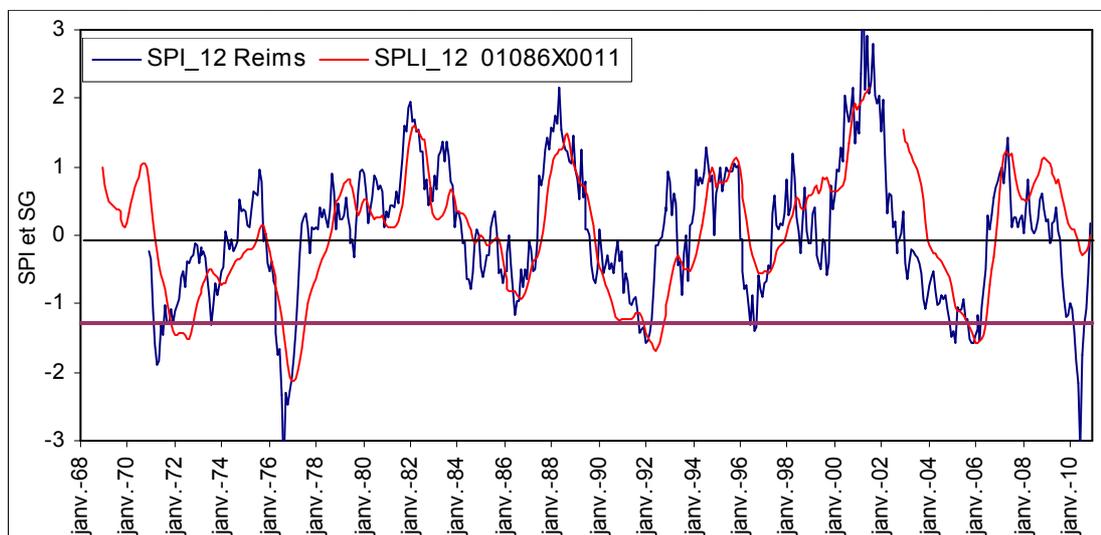
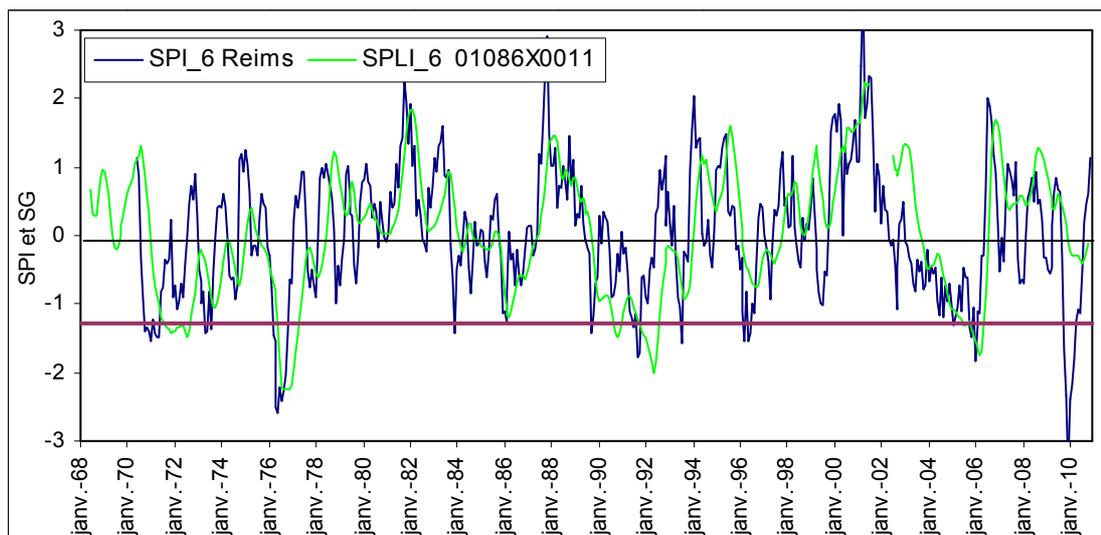


Corrélation croisée : SPLI-6 par rapport au SPI-6 (partie droite du graphique)

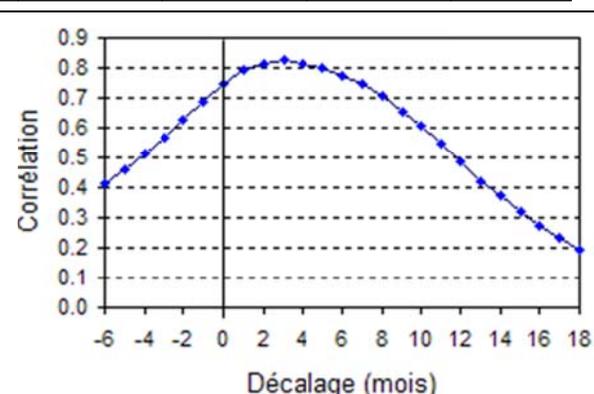


Corrélation croisée : SPLI-12 par rapport au SPI-12 (partie droite du graphique)

Illustration 52 – Comparaison des SPI-6 et SPI-12 avec les SPLI-6 et SPLI-12 d'un piézomètre situé non loin de la station climatologique de Dijon : graphiques d'évolution et de corrélation croisée SPLI/SPI



Corrélation croisée : SPLI-6 par rapport au SPI-6 (partie droite du graphique)



Corrélation croisée : SPLI-12 par rapport au SPI-12 (partie droite du graphique)

Illustration 53 – Comparaison des SPI-6 et SPI-12 avec les SPLI-6 et SPLI-12 d'un piézomètre situé non loin de la station climatologique de Reims : graphiques d'évolution et de corrélation croisée SPLI/SPI

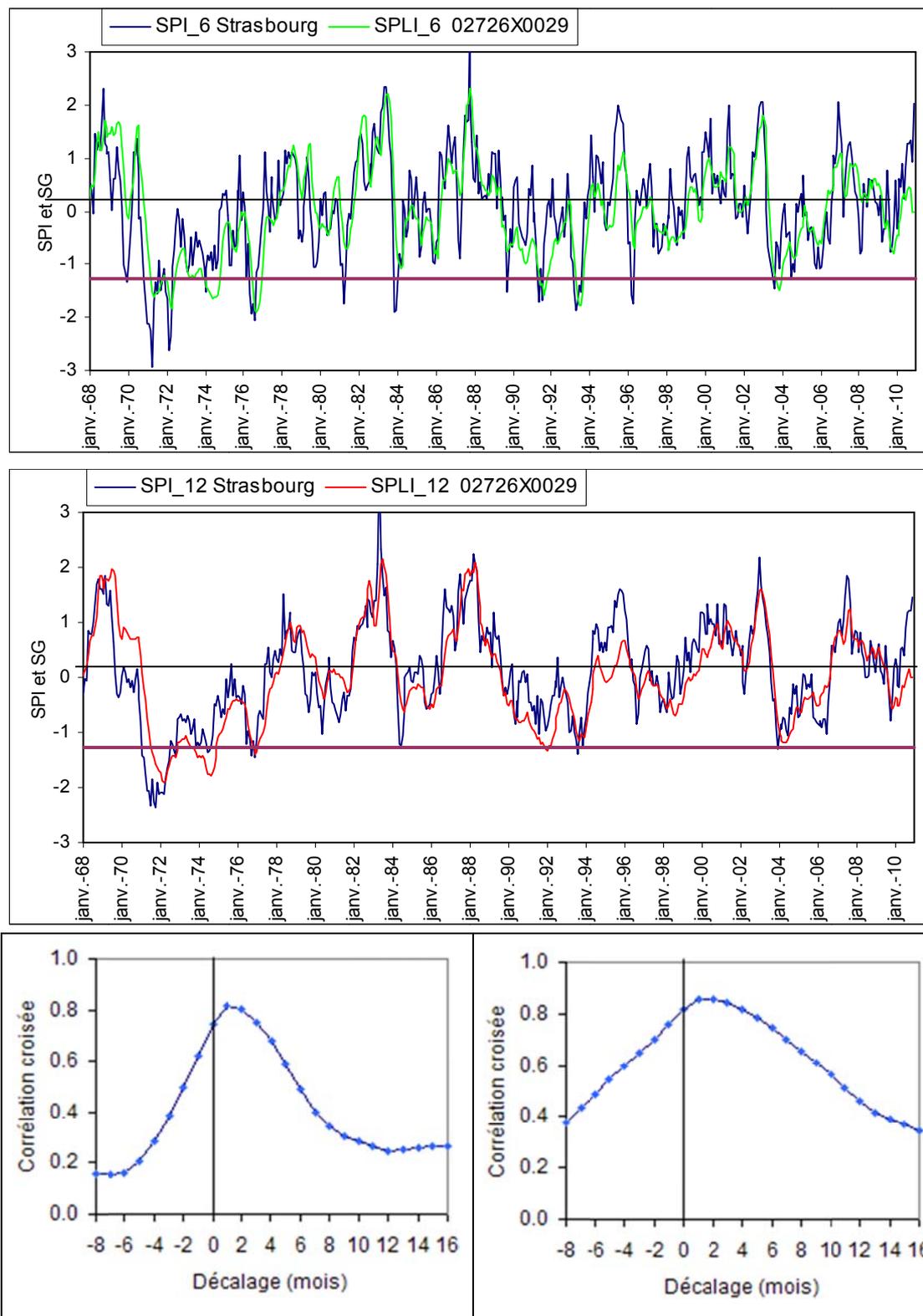


Illustration 54 - Comparaison des SPI-6 et SPI-12 avec les SPLI-6 et SPLI-12 d'un piézomètre situé non loin de la station climatologique de Strasbourg

3.3.4. Calcul d'un SPLI annuel, indicateur d'état des nappes

Calculs

Le SPLI annuel pourrait être utilisé comme un indicateur de suivi de l'état d'une nappe. En le calculant sur plusieurs piézomètres d'une même nappe (ou sur un piézomètre représentatif) il serait alors possible d'obtenir une "suite d'états" de cette nappe et de la situer parmi d'autres, l'échelle de valeurs étant la même.

Les calculs du SPLI annuel ont été faits sur les 229 piézomètres retenus, mais les traitements ont été faits par lot, afin de bien identifier dans le SPLI les différentes dynamiques de nappes. Sont donc distingués :

- les piézomètres de type c, b1 et b2 non autocorrélés, ou faiblement : 101 piézomètres (en majorité de type c, puis de type b1)
- les piézomètres de type c et b1, autocorrélés (majoritairement de type b1) : 65
- les piézomètres de type b2, autocorrélés, au nombre de 33
- les piézomètres de type b3, autocorrélés, au nombre de 30.

Pour les séries avec autocorrélation, voir la remarque de la fin du § 2.4.1.

A partir des moyennes annuelles, et comme pour le SPLI mensuel, un index piézométrique normé a été préalablement calculé :

$$IP_i = \frac{H_i - H_{\max}}{H_{\max} - H_{\min}}$$

- H_i est le niveau piézométrique de l'année i dans la chronique de valeurs annuelles annuelle constituée (ou la profondeur, en valeur négative par rapport au repère),
- H_{\max} est le niveau maximum de la chronique annuelle,
- H_{\min} est le niveau minimum de la chronique annuelle.

Il aurait été aussi possible de prendre le minimum et le maximum sur une période définie, considérée comme période de référence.

Comme pour les SPLI mensuels, les SPLI annuels ont été calculés :

- en utilisant un estimateur de la densité de probabilité (annexe 4), compte tenu là aussi de la grande diversité de forme des histogrammes,
- en utilisant des lois de probabilité : la loi logistique généralisée, à 3 paramètres et les lois de Pearson (cf. annexe 3).

Résultats

Dans ce qui suit, on ne présente que les graphiques d'évolution des SPLI pour chacun des lots traités.

- Nappes à cycles annuels dominants (type c, non autocorrélés) et quelques séries piézométriques avec peu d'autocorrélation des types b1 et b2.

Ce groupe est appelé lot 1 dans les illustrations qui suivent et comprend 101 piézomètres.

L'illustration 55 montre la grande homogénéité de comportement de ce groupe de piézomètres (à l'exception d'un seul, nettement visible sur l'illustration en raison de son déphasage par rapport aux autres, qui sera à reclasser).

L'illustration 56 indique le pourcentage de piézomètres situés sous le seuil du décennal sec de 1960 à 2010. Les différents épisodes de sécheresse qui se sont succédés durant cette période ressortent très nettement au niveau du SPLI_1 an :

- 1972-1973,
- 1976 : l'année hydrologique 1976 se caractérise par une longue période sèche de décembre 1975 à août 1976. L'absence de précipitations efficaces en hiver a fortement affecté les nappes, surtout pour la moitié nord de la France. Ce que conforme le SPLI-1an de ce groupe de piézomètres où plus de 40 % d'entre eux franchissent le seuil décennal sec.
- 1990-1991-1992 : longue période de déficit de précipitations : en 1991 plus de 30 % des piézomètres étaient impactés (= sous le seuil), 25 % en 1992.
- 1996-1997 : en 1996, 26 % des piézomètres passent sous le seuil du décennal sec.
- 2003 : la période de mars à août 2003 se présente comme une longue sécheresse de printemps et d'été qui affecte les nappes superficielles mais dans une moindre mesure que lors des épisodes précédents (15 % des piézomètres sous le seuil).
- 2005 : le déficit des précipitations débute dès l'automne 2004. En 2005, 25 % des piézomètres sont sous le seuil du décennal sec.

Le SPLI-2ans et le SPLI_3ans, qui intègrent respectivement une et deux années précédant l'année courante, caractérisent l'importance de la baisse des niveaux dans le temps, à partir du déclenchement de l'épisode sec. Ainsi, l'année 1976 apparaît comme une année isolée, non précédée sur 2 ans par des années sèches et peu suivie d'effets dans les années postérieures 1977,1978,1979. Il en est de même pour 1996. Par contre l'épisode 1991-1993 a beaucoup plus d'impact : en 1992, avec le SPLI-1an, 28% des piézomètres sont sous le seuil ; avec le SPLI-2ans, ils sont 41 % ; avec le SPLI-3ans, ils sont 52 %.

L'illustration 57 indique quant à elle indique le pourcentage de piézomètres situés au-dessus du seuil du décennal humide. L'impact de l'épisode pluvieux de l'automne 2000-hiver 2001 apparaît très nettement tant avec le SPLI-1an qu'avec les SPLI-2ans et 3 ans.

- Nappes à cycles pluriannuels avec annuels dominants (type b1 autocorrélés) et quelques séries piézométriques avec autocorrélation de type c.

Les piézomètres de ce groupe (appelé lot 2 dans les illustrations qui suivent) ont le même comportement que ceux du lot 1 (graphiques d'évolution des illustrations 58 et 59). A l'exception de la sécheresse de 1972-1973 (50 % des piézomètres impactés) les autres épisodes secs sont moins marqués que dans le cas du lot 1 (les nappes captées ont en effet une inertie plus prononcée que celles captées par les piézomètres du lot 1).

- Lot 1 et lot 2 rassemblés (illustrations 60 et 61). Comme le montre le graphique d'évolution de l'illustration 60, toutes les évolutions des SPLI sont en phase (hormis pour un piézomètre du lot 1, déjà signalé ci-dessus). A l'exception de la sécheresse 1972-1973, dont l'impact est plus marqué que dans le lot 1 (38 % des piézomètres

impactés en 1973 contre 30 % pour le lot 1 seul, SPLI-1an), il y a peu de modifications dans les pourcentages lors des autres épisodes secs.

- Nappes à cycles pluriannuels avec cycles annuels moins marqués (type b2, autocorrélés). Ce groupe est appelé lot 3 dans les illustrations qui suivent et comprend 34 piézomètres.

Il y a moins de piézomètres que dans les lots 1 et 2, ce qui rend la comparaison biaisée. Néanmoins, des différences notables apparaissent, liées à la dynamique "lente" de ces nappes : les impacts sont décalés dans le temps (illustrations 62 et 63). Ainsi, la sécheresse 1976 est peu marquée en 1976, son impact est surtout reporté en 1977. En 1991, peu d'impact, il est reporté en 1992 où 75 % des piézomètres sont sous le seuil (SPLI-1an).

L'impact observé en 1996 avec les lots 1 et 2 disparaît, reporté sur l'année 1997 (50 % des piézomètres). L'impact observé en 2003 disparaît aussi, ainsi que celui de 2004, le report se faisant sur les années 2005 et 2006 (51 % des piézomètres).

- Nappes à cycles pluriannuels avec cycles annuels très peu marqués (type b3, autocorrélés). Ce groupe est appelé lot 4 dans les illustrations qui suivent et comprend 30 piézomètres.

Comme dans le lot 3, il y a peu de piézomètres. Les observations faites pour le lot 3 peuvent être reconduites, mais avec un décalage temporel de l'impact du déficit des précipitations encore plus marqué. Ainsi, l'impact des épisodes secs de 2004-2005 se retrouve en 2009-2010 (illustrations 64 et 65).

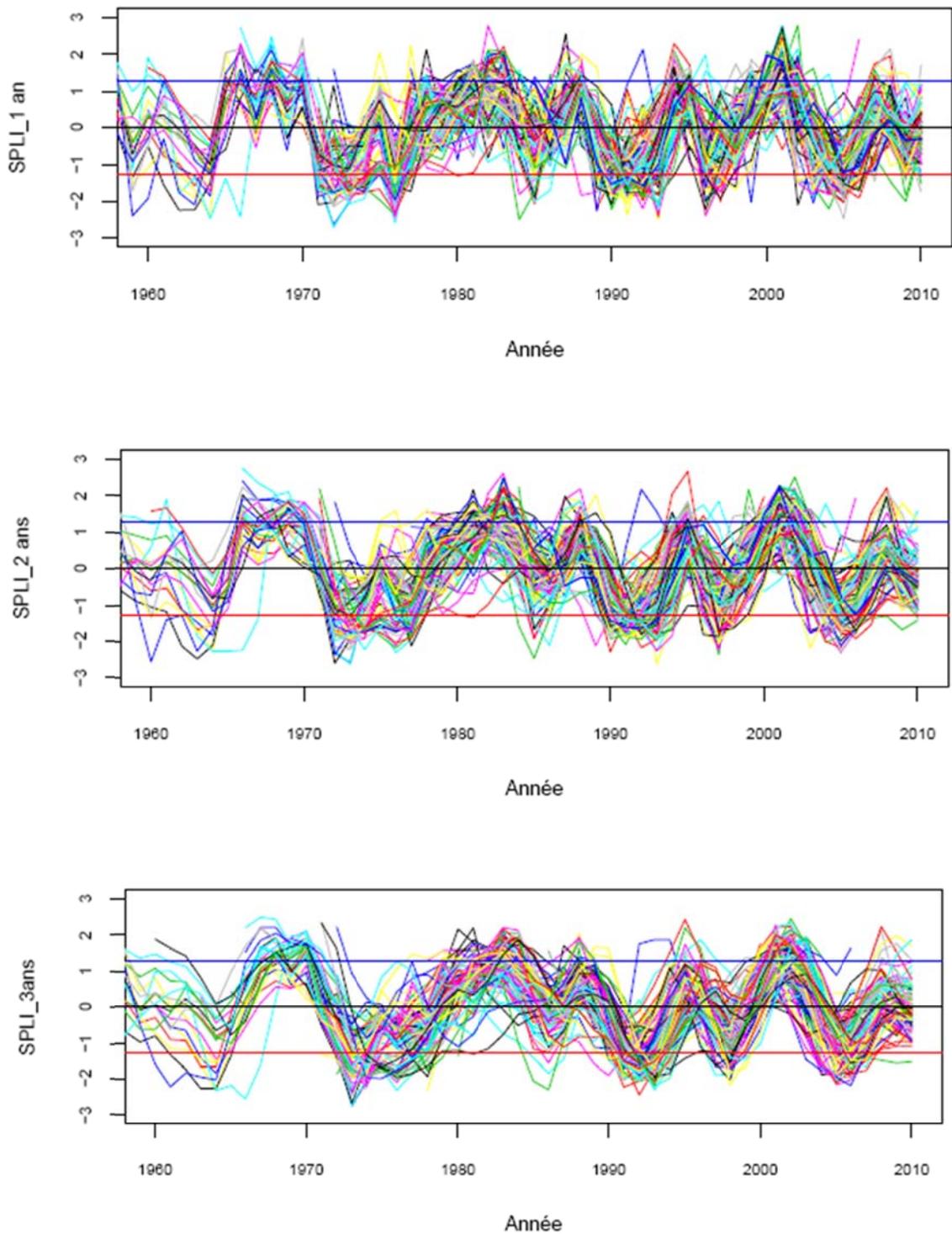
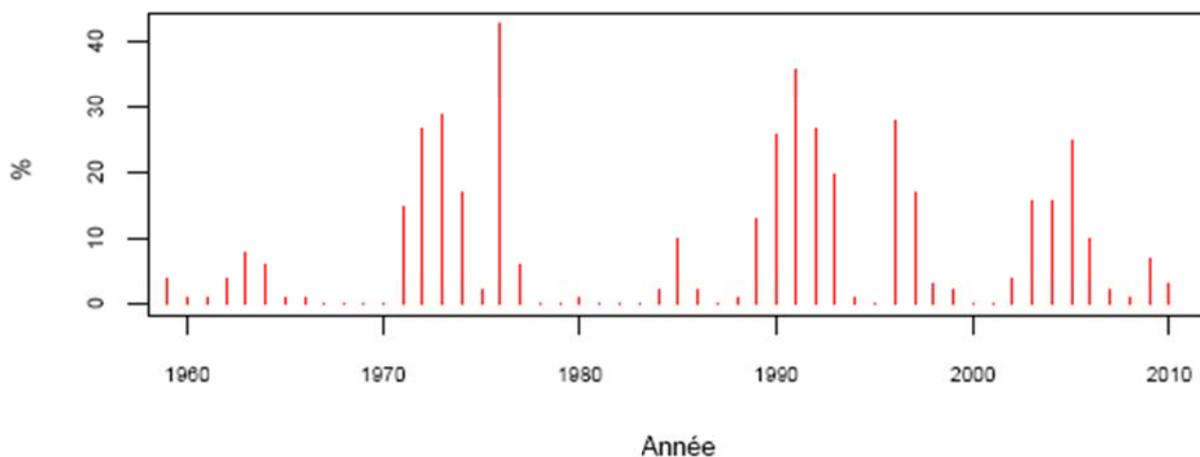
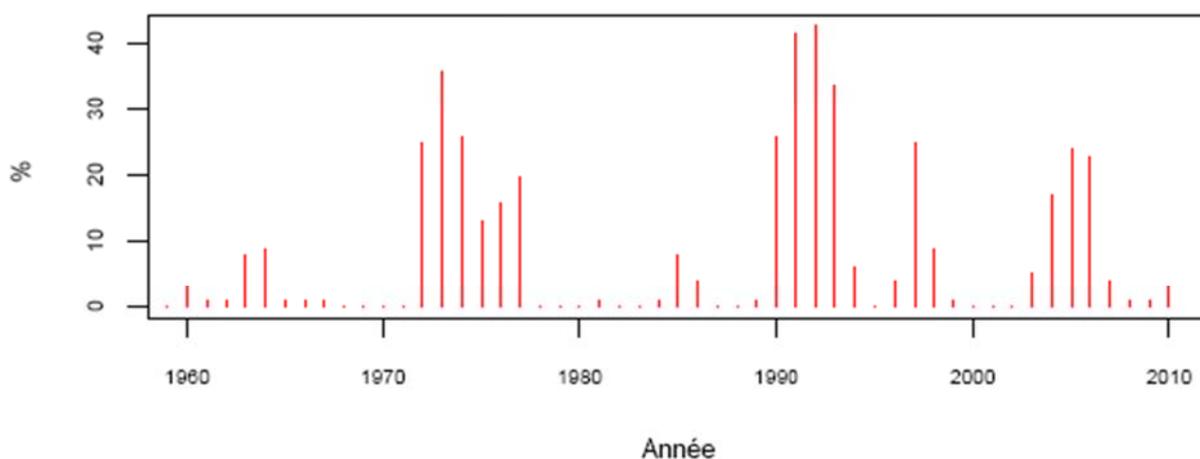


Illustration 55 – Lot 1 : évolution des SPLI (1an, 2 ans et 3 ans) des 101 piézomètres

SPLI_1an : % de piézomètres sous le seuil décennal sec



SPLI_2ans : % de piézomètres sous le seuil décennal sec



SPLI_3ans : % de piézomètres sous le seuil décennal sec

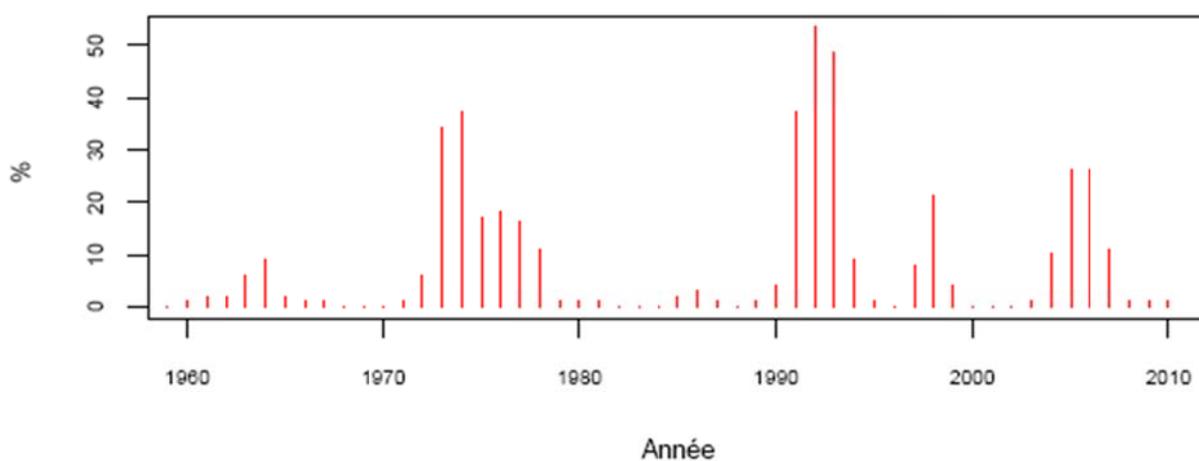
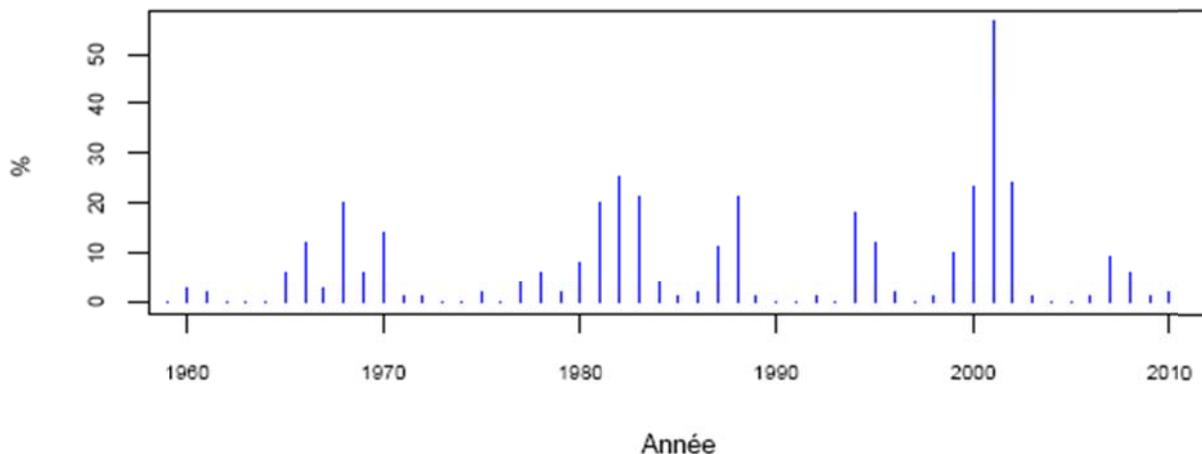
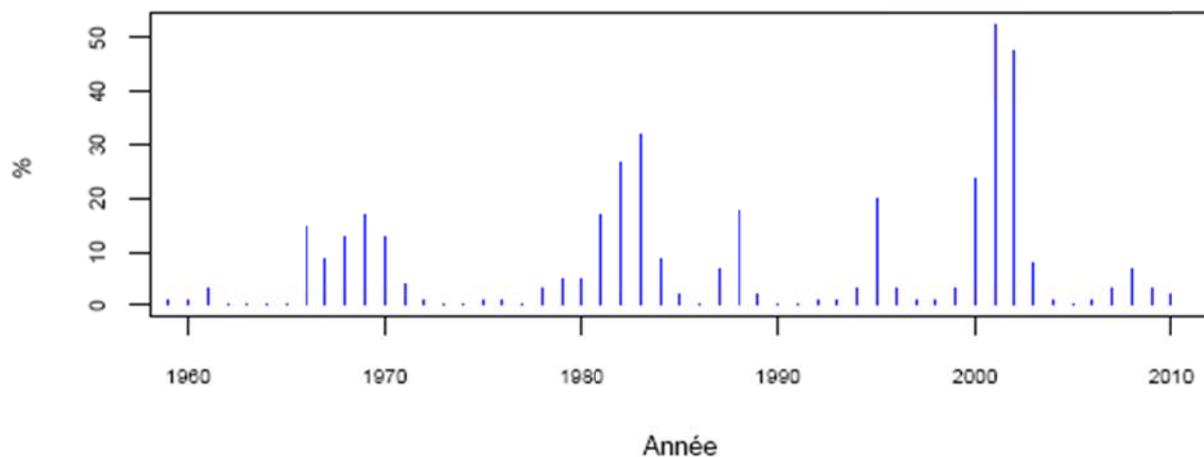


Illustration 56 – Lot 1 : pourcentage de piézomètres sous le seuil du décennal sec

SPLI_1an : % de piézomètres au dessus du seuil décennal humide



SPLI_2ans : % de piézomètres au dessus du seuil décennal humide



SPLI_3ans : % de piézomètres au dessus du seuil décennal humide

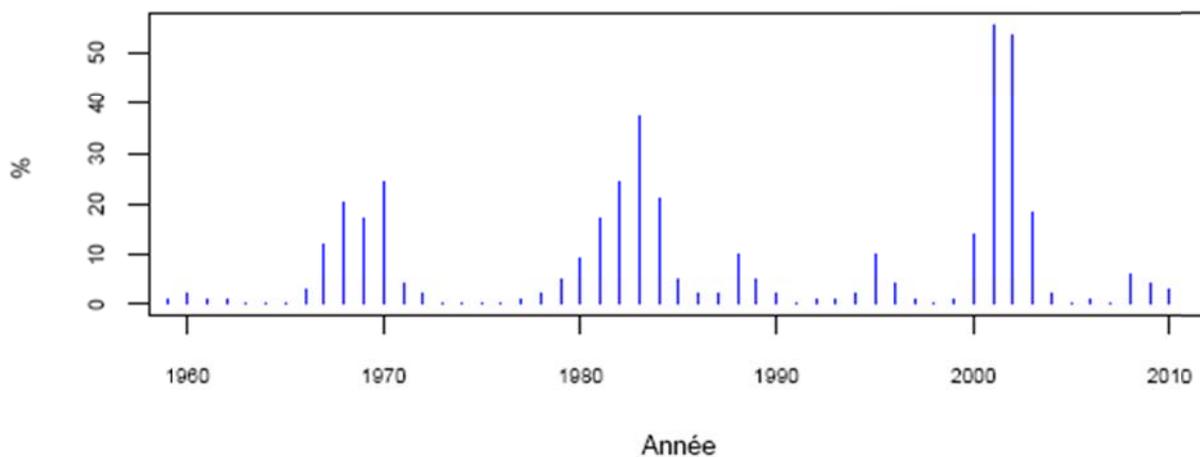
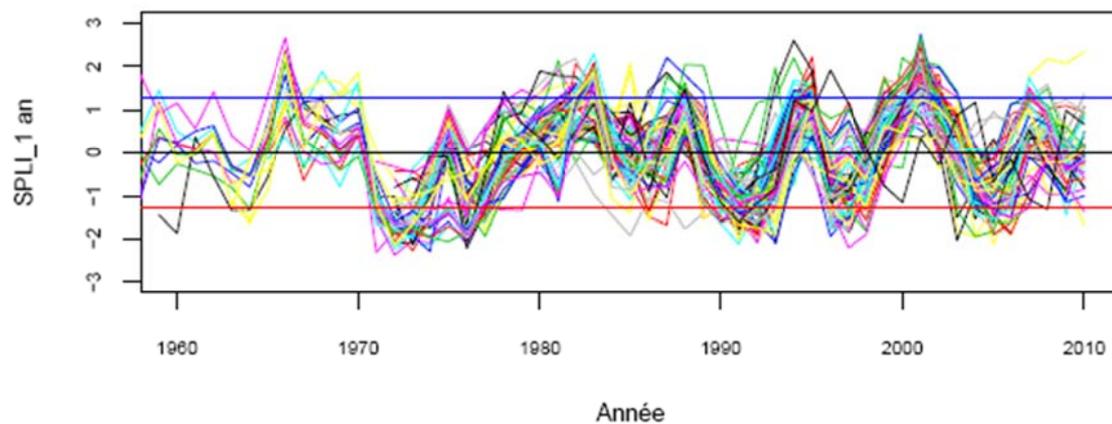
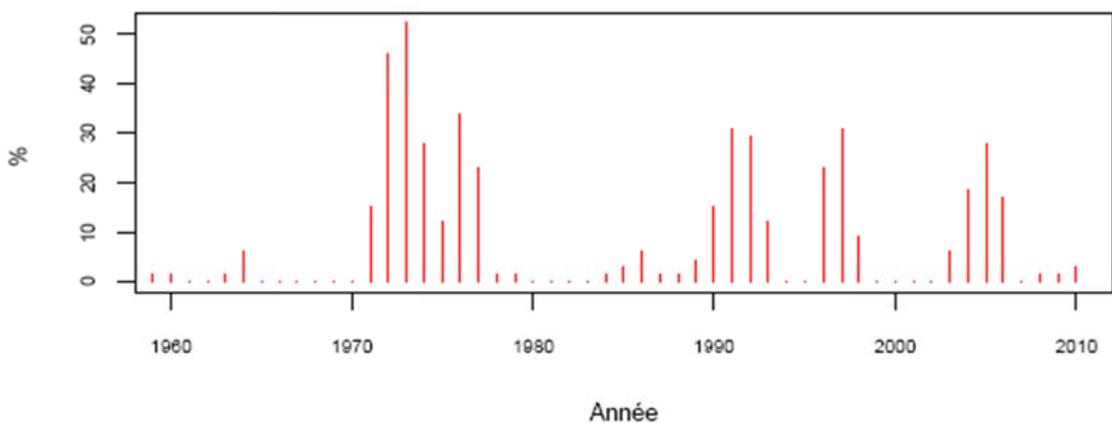


Illustration 57 – Lot 1 : pourcentage de piézomètres au-dessus du seuil décennal humide

Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé



SPLI_1an : % de piézomètres sous le seuil décennal sec



SPLI_1an : % de piézomètres au dessus du seuil décennal humide

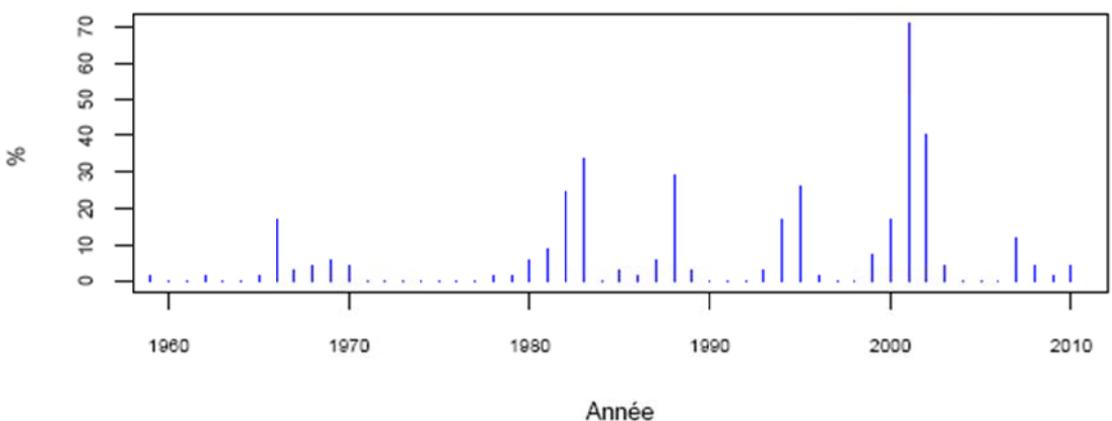
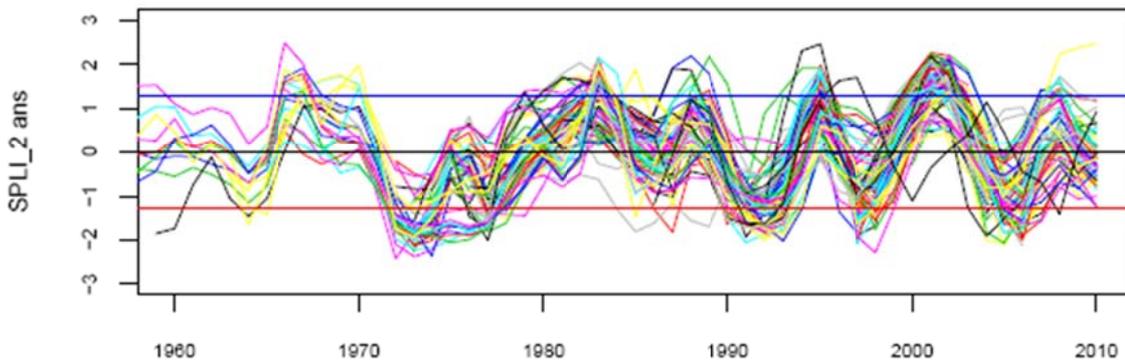


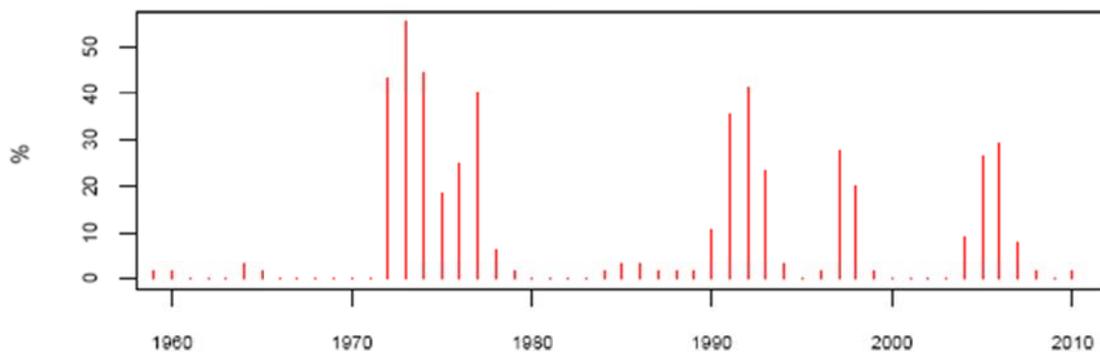
Illustration 58 - Lot 2 : évolution du SPLI-1an, pourcentage de piézomètres (sur 65) sous le seuil décennal sec et au-dessus du seuil décennal humide

Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé



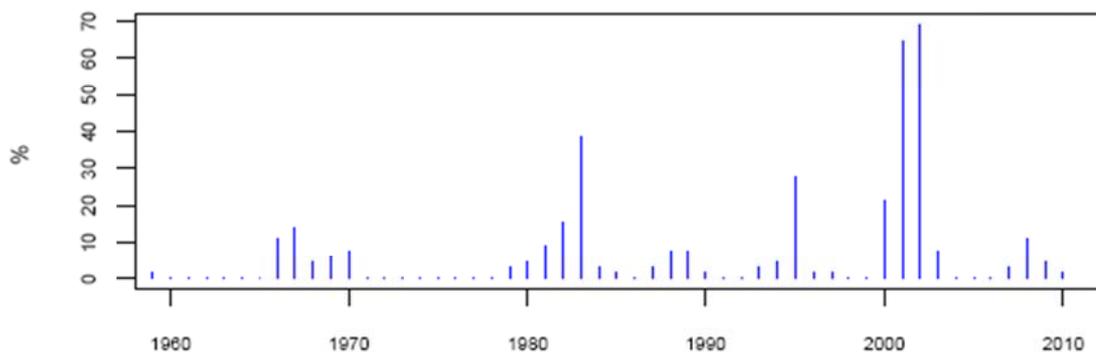
Année

SPLI_2ans : % de piézomètres sous le seuil décennal sec



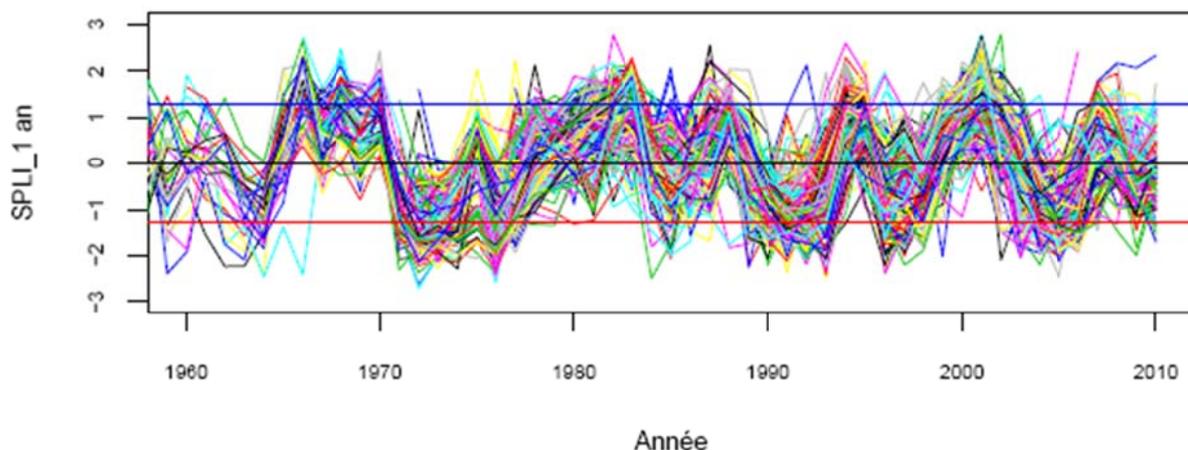
Année

SPLI_2ans : % de piézomètres au dessus du seuil décennal humide

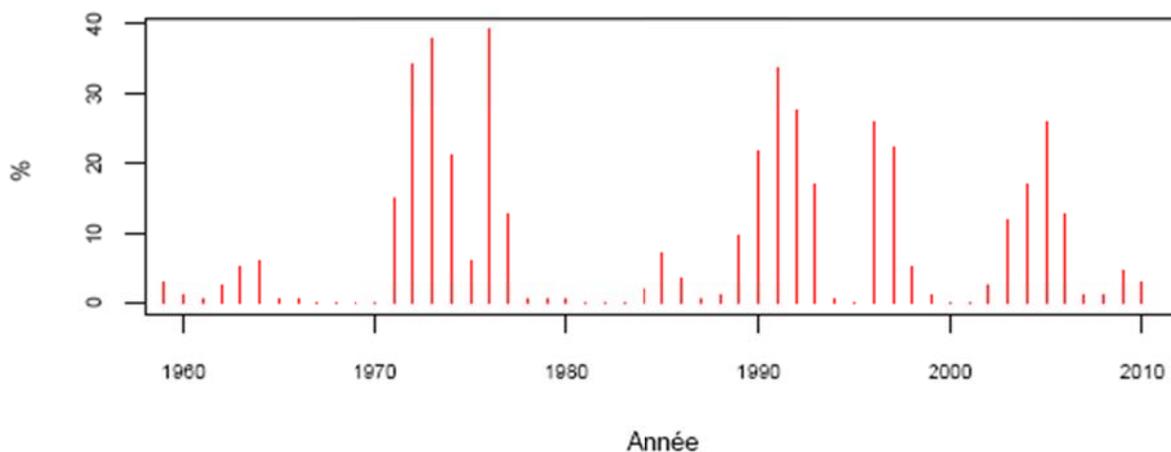


Année

Illustration 59 - Lot 2 : évolution du SPLI-2ans, pourcentage de piézomètres (sur 65) sous le seuil décennal sec et au-dessus du seuil décennal humide



SPLI_1an : % de piézomètres sous le seuil décennal sec



SPLI_1an : % de piézomètres au dessus du seuil décennal humide

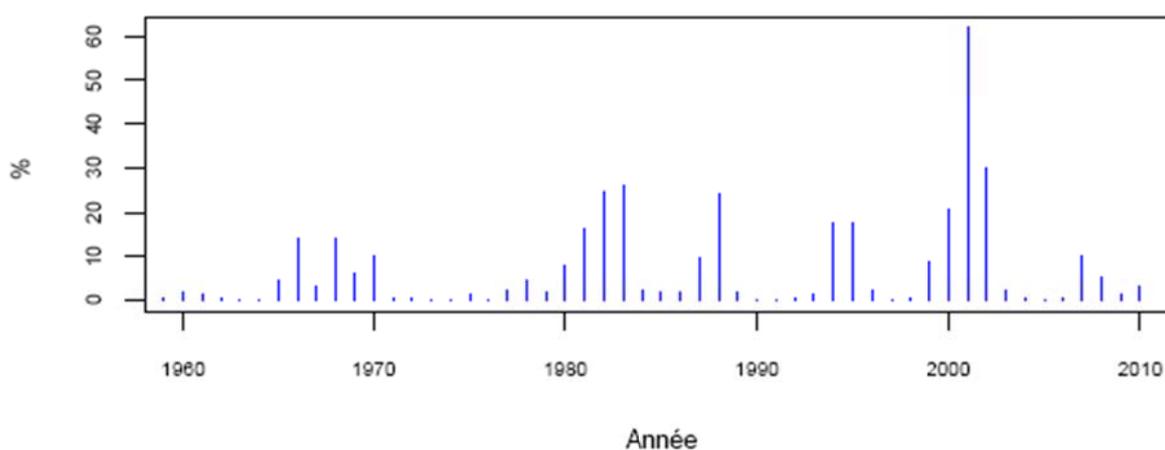
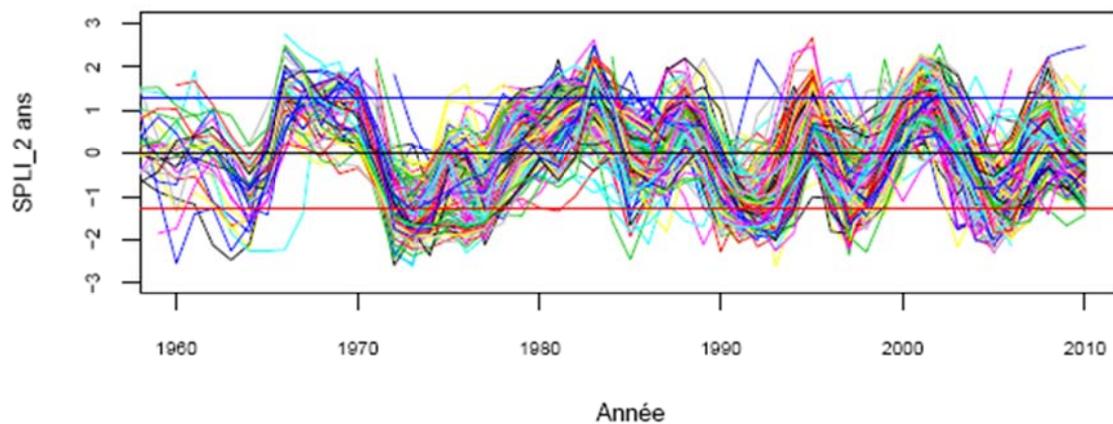
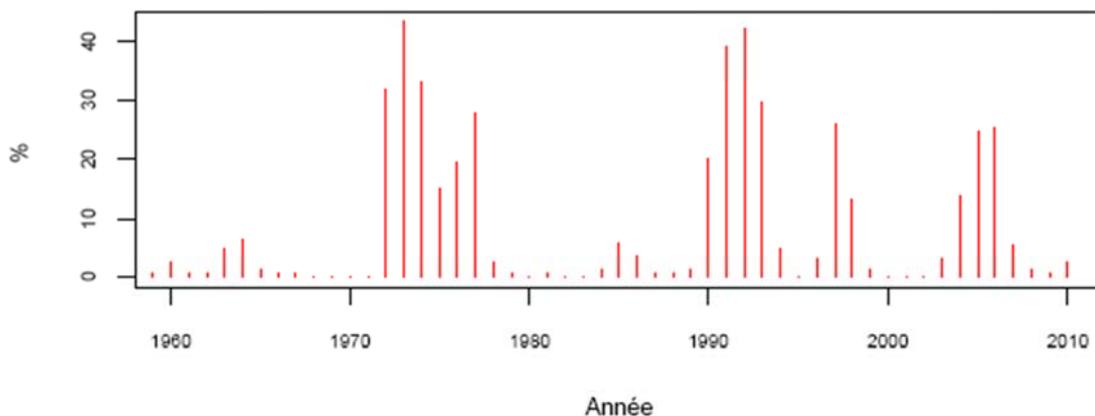


Illustration 60 – Lots 1 et 2 : évolution du SPLI-1an, pourcentage de piézomètres (sur 166) sous le seuil décennal sec et au-dessus du seuil décennal humide

Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé



SPLI_2ans : % de piézomètres sous le seuil décennal sec



SPLI_2ans : % de piézomètres au dessus du seuil décennal humide

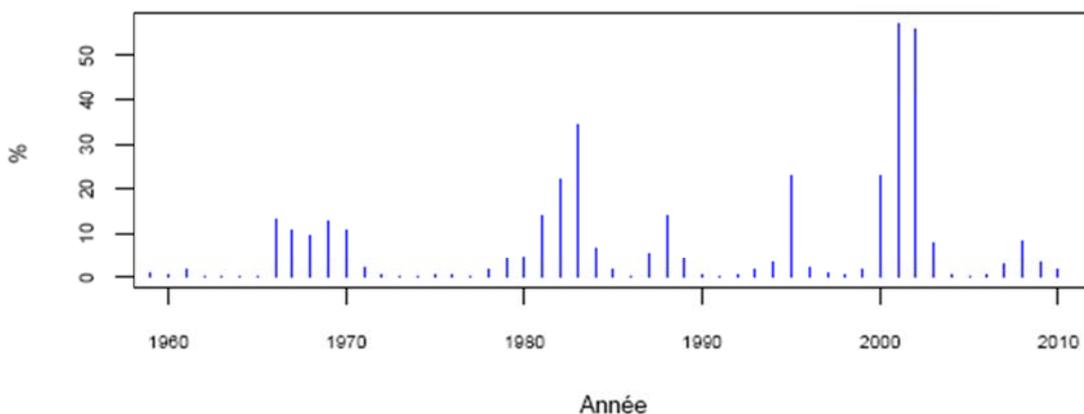
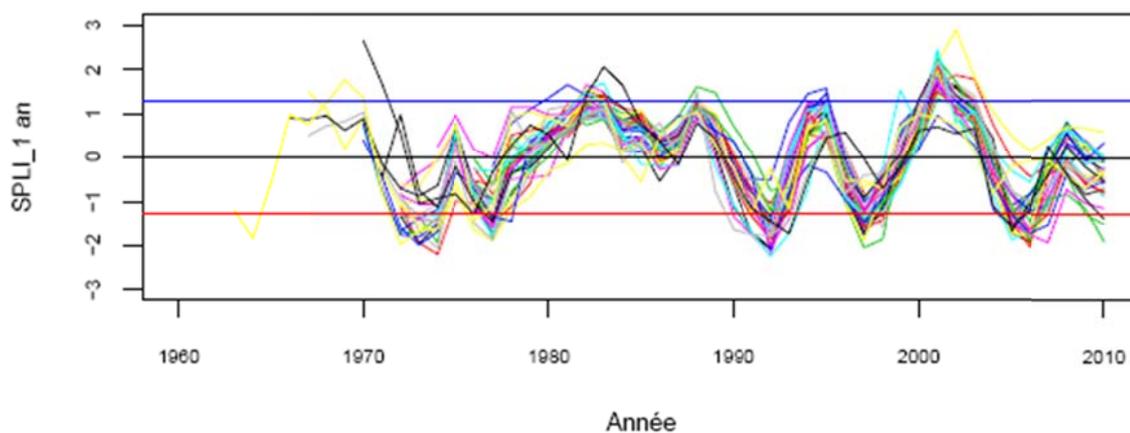


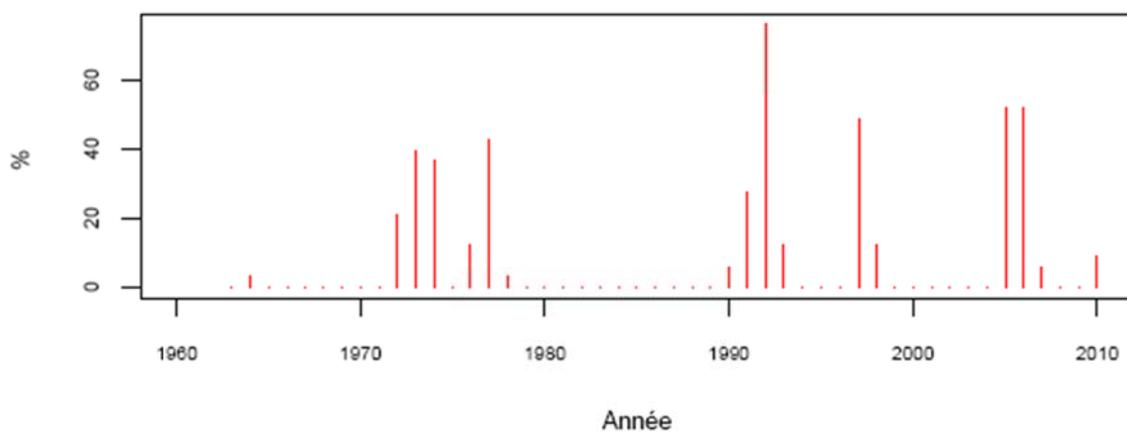
Illustration 61 – Lots 1 et 2 : évolution du SPLI-2ans, pourcentage de piézomètres (sur 166) sous le seuil décennal sec et au-dessus du seuil décennal humide

Nappes de type b2

Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé



SPLI_1an : % de piézomètres sous le seuil décennal sec



SPLI_1an : % de piézomètres au dessus du seuil décennal humide

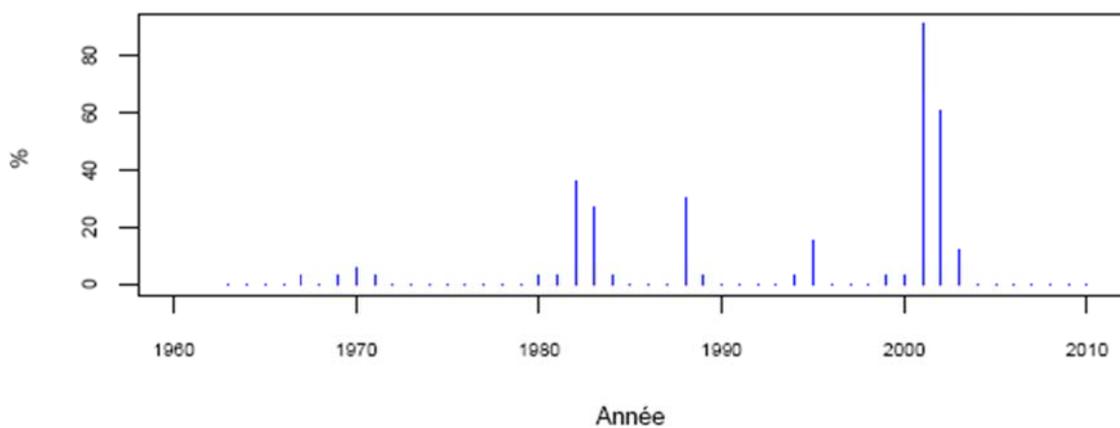
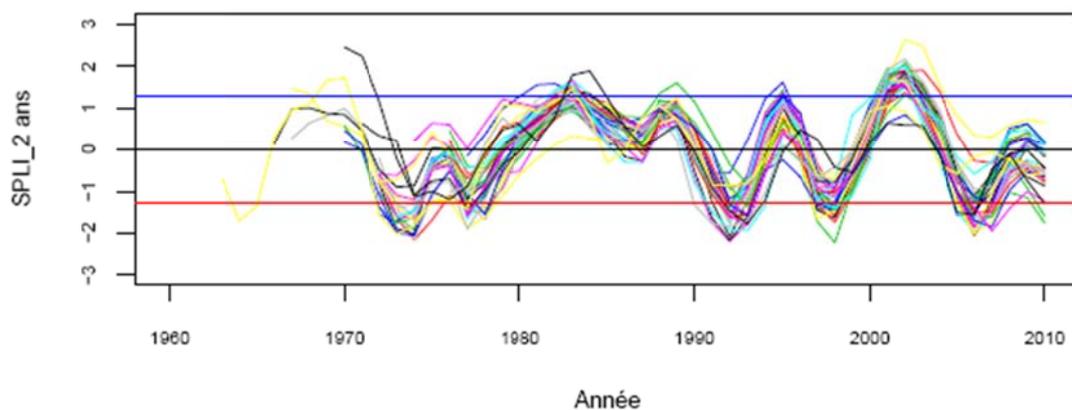
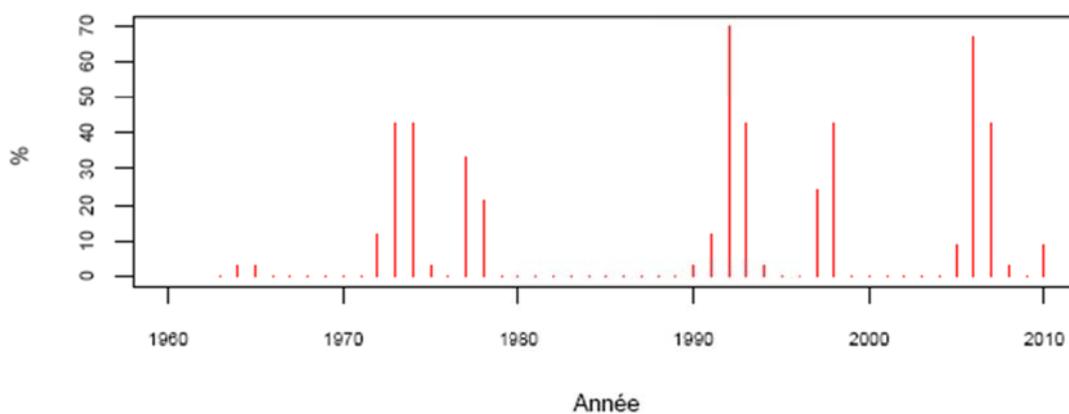


Illustration 62 – Lot 3 : évolution du SPLI-1an, pourcentage de piézomètres sous le seuil décennal sec et au-dessus du seuil décennal humide

Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé



SPLI_2 ans : % de piézomètres sous le seuil décennal sec



SPLI_2 ans : % de piézomètres au dessus du seuil décennal humide

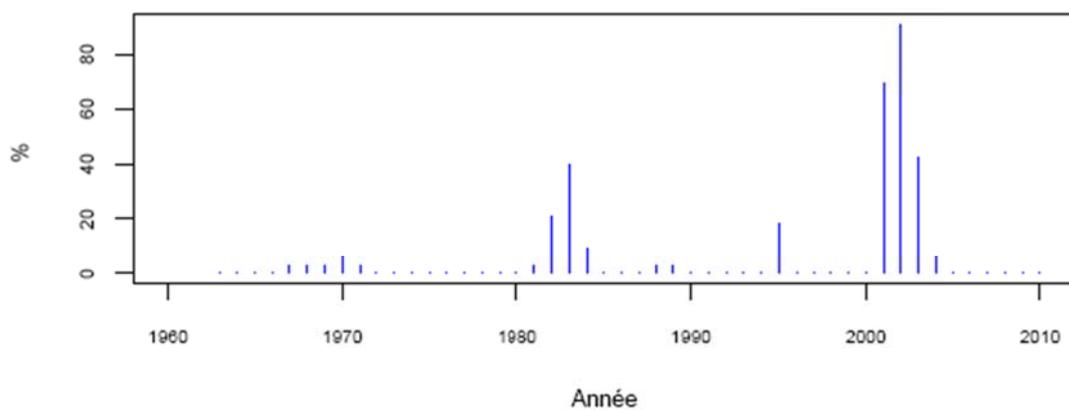
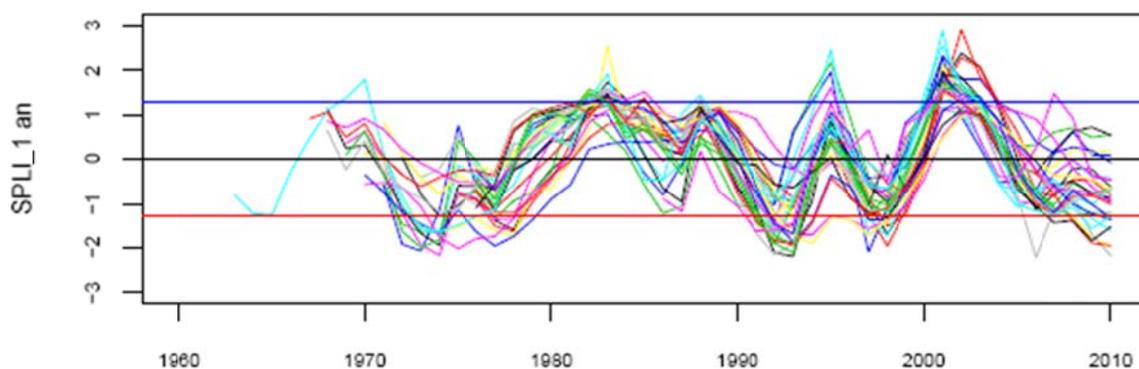
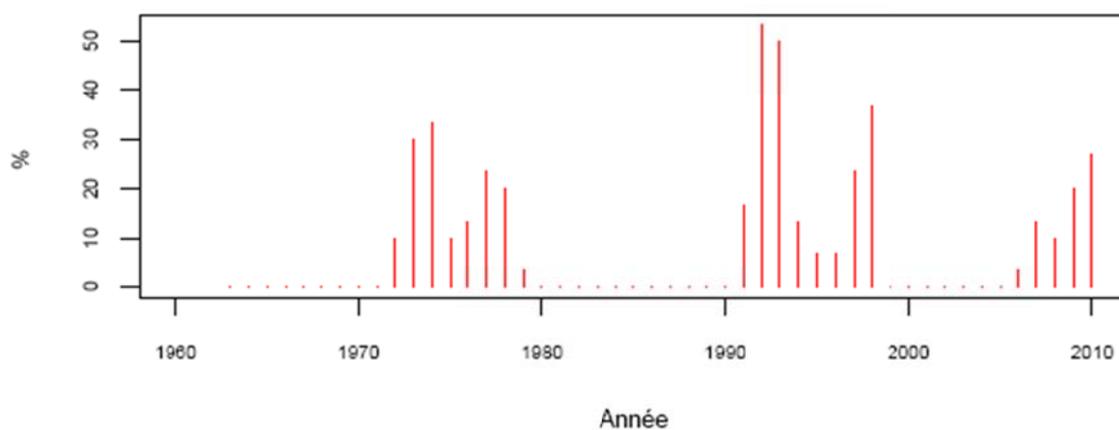


Illustration 63- Lot 3 : évolution du SPLI-2ans, pourcentage de piézomètres sous le seuil décennal sec et au-dessus du seuil décennal humide

Nappes type b3



SPLI_1an : % de piézomètres sous le seuil décennal sec



SPLI_1an : % de piézomètres au dessus du seuil décennal humide

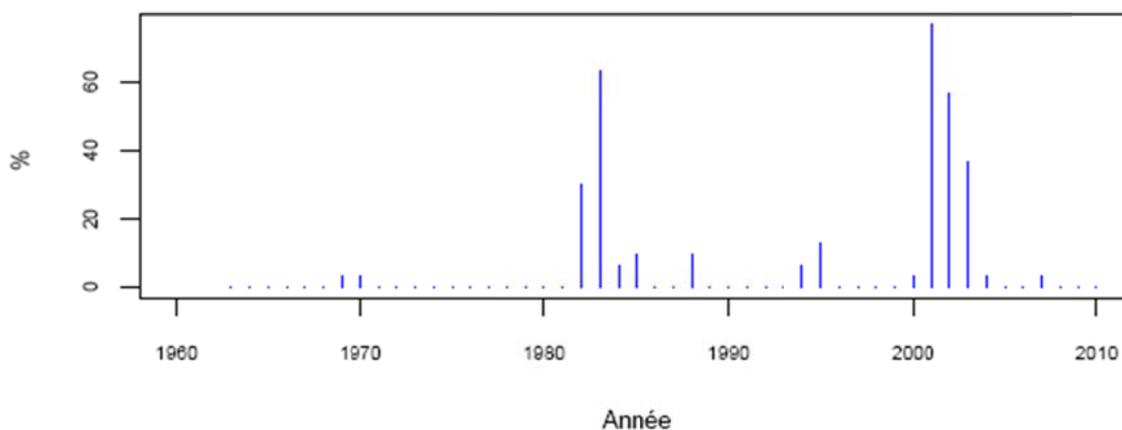
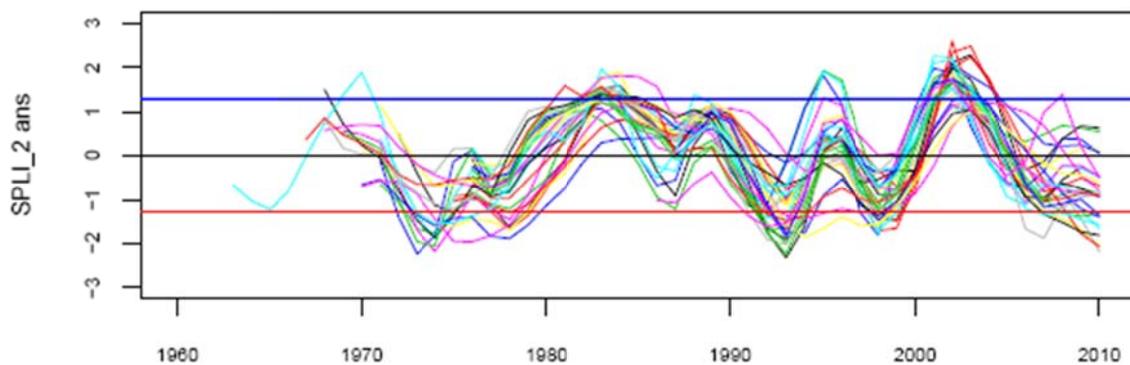
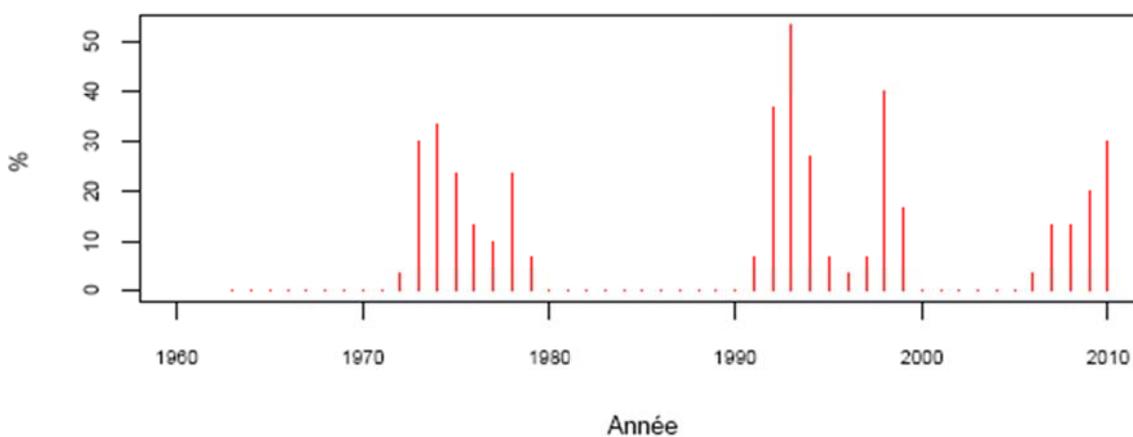


Illustration 64 – Lot 4 : évolution du SPLI-1an, pourcentage de piézomètres sous le seuil décennal sec et au-dessus du seuil décennal humide



SPLI_2ans : % de piézomètres sous le seuil décennal sec



SPLI_2ans : % de piézomètres au dessus du seuil décennal humide

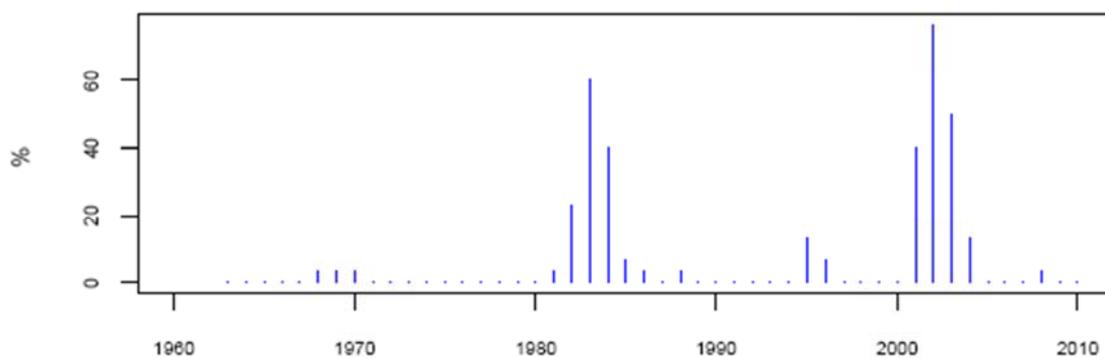


Illustration 65 - Lot 4 : évolution du SPLI-2ans, pourcentage de piézomètres sous le seuil décennal sec et au-dessus du seuil décennal humide

4. Conclusion et perspectives

Au terme de 3 années d'études relatives au suivi de l'impact du changement climatique sur le niveau des nappes d'eau souterraine, différentes approches ont été testées pour rechercher des tendances d'évolution du niveau des nappes souterraines sur les 30 dernières années (cf. rapports des deux années précédentes), définir des critères de sélection d'un futur réseau piézométrique dédié au changement climatique, présélectionner des points susceptibles de faire partie de ce réseau et réfléchir à la définition d'un index piézométrique standardisé (SPLI) pour caractériser de façon homogène l'état des nappes d'eau souterraine en France métropolitaine, tout au moins certaines d'entre elles.

Concernant le réseau piézométrique dédié au changement climatique, le découpage d'entités hydrogéologiques sensibles au changement climatique a finalement été réalisé à partir du référentiel des masses d'eau souterraines et d'une estimation de l'évolution de la pluie efficace à l'horizon 2046-2065. Cette estimation a été faite à partir de données issues du projet Explore 2070 mais dans la mesure où elle présente de nombreuses incertitudes, son utilisation s'est limitée à définir des masses d'eau prioritaires, l'objectif étant que le réseau couvre l'ensemble des masses d'eau sélectionnées selon des critères purement hydrogéologiques. Cette approche est susceptible d'être revue dans l'avenir sur la base de nouvelles données de simulation du CC.

Sur les 236 masses d'eau prioritaires ainsi définies, nous avons pu présélectionner 105 ouvrages (un ouvrage par entité) selon les critères définis dans le cadre de l'étude :

- 33 ouvrages en priorité 1 (plus de 25 ans de données)
- 29 ouvrages en priorité 2 (15 à 25 ans de données)
- 6 ouvrages en priorité 3 (10 à 15 ans de données)
- 37 ouvrages en priorité 4 (moins de 10 ans de données)

Cette présélection devra être validée par les gestionnaires des ouvrages, afin d'assurer un suivi pérenne notamment. Pour les autres entités (131), il n'a pas été possible de présélectionner de piézomètre, et ce pour différentes raisons :

- aucun piézomètre existant ;
- il existe un ou plusieurs piézomètres pour lesquels on n'a pas d'information sur la pérennité et le degré d'influence ;
- il existe un ou plusieurs piézomètres influencés ;
- il existe un ou plusieurs piézomètres influencés et un ou plusieurs piézomètres pour lesquels on n'a pas d'information ;

Pour ces entités, un travail complémentaire doit être réalisé avec les gestionnaires des réseaux piézométriques actuels pour obtenir des informations sur ces ouvrages et pouvoir le cas échéant en trouver certains qui répondent aux critères. Pour les entités où il sera avéré qu'il n'existe aucun piézomètre susceptible de faire partie du réseau de suivi du CC, il conviendra de décider si ces entités doivent être suivies ou non et si tel est le cas, de créer de nouveaux points de suivi. Il reste également à statuer sur les autres masses d'eau souterraine : suivi ou non de la masse d'eau pour l'impact du CC et si oui, choix d'un piézomètre, à partir des critères définis dans le cadre de l'étude

Concernant la recherche d'un index piézométrique standardisé (SPLI) pour caractériser de façon homogène **les nappes libres**, une première proposition est détaillée dans le rapport, mais il reste de nombreux points à discuter : pertinence de l'index, échelle temporelle d'agrégation, spatialisation, choix de la période de référence, mode de représentation, exploitation en association avec d'autres indicateurs, ...

Des travaux supplémentaires sont à entreprendre pour finaliser cet index : analyse de piézomètres supplémentaires afin de mieux couvrir le territoire national, application ensuite aux piézomètres utilisés pour le Bulletin de Situation Hydrologique.

Il resta aussi à traiter le cas des chroniques « non stationnaires » des nappes libres (avec des tendances à la baisse parfois bien marquées) qui ne peuvent pas être traitées de la même façon, la notion de période de retour n'ayant plus de sens. Néanmoins le calcul du SPLI reste a priori toujours possible et la tendance à la baisse se manifestera par une dérive dans le temps de l'index.

A partir des calculs réalisés, différents diagrammes peuvent être construits pour analyser l'évolution de l'état des nappes, par exemple les diagrammes présentés dans cette étude avec le % de piézomètres franchissant un seuil critique (décennal sec et décennal humide).

D'autres modes de représentation sont aussi envisageables à partir d'une quantification des épisodes de sécheresse, par exemple la durée des épisodes et leur magnitude (telle que définie par McKee et al. dans leur article de 1993).

Ainsi, dans le projet Climsec (J.-M. Soubeyrou et al., 2011) une analyse spatio-temporelle du SPI (précipitations) et du SSWI (humidité des sols) a été effectuée afin de comprendre l'évolution des différents événements climatiques passés.

Pour cette analyse, la surface moyenne affectée par les épisodes de sécheresse, la durée moyenne et la magnitude totale (déficit cumulé dans l'espace et le temps) de ces épisodes ont été calculées et reportées sur des diagrammes à différentes échelles de temps du SPI et du SSWI (illustration 66).

La mise en relation de ces 3 grandeurs, surface, durée et magnitude, à la fois pour le SPI et le SSWI et à différentes échelles de temps permet de mieux comprendre les épisodes de sécheresse. On peut ainsi voir sur l'illustration 66 que la sécheresse de 1976 (en rouge) était exceptionnelle à des échelles de temps courtes en termes de déficits de précipitations, mais bien moins exceptionnelle du point de vue des déficits d'humidité du sol et/ou à des échelles de temps plus importantes.

Un tel mode de représentation pourrait être aussi envisagé pour les nappes libres (en substituant à la surface une autre variable, par exemple le pourcentage de nappes affectées).

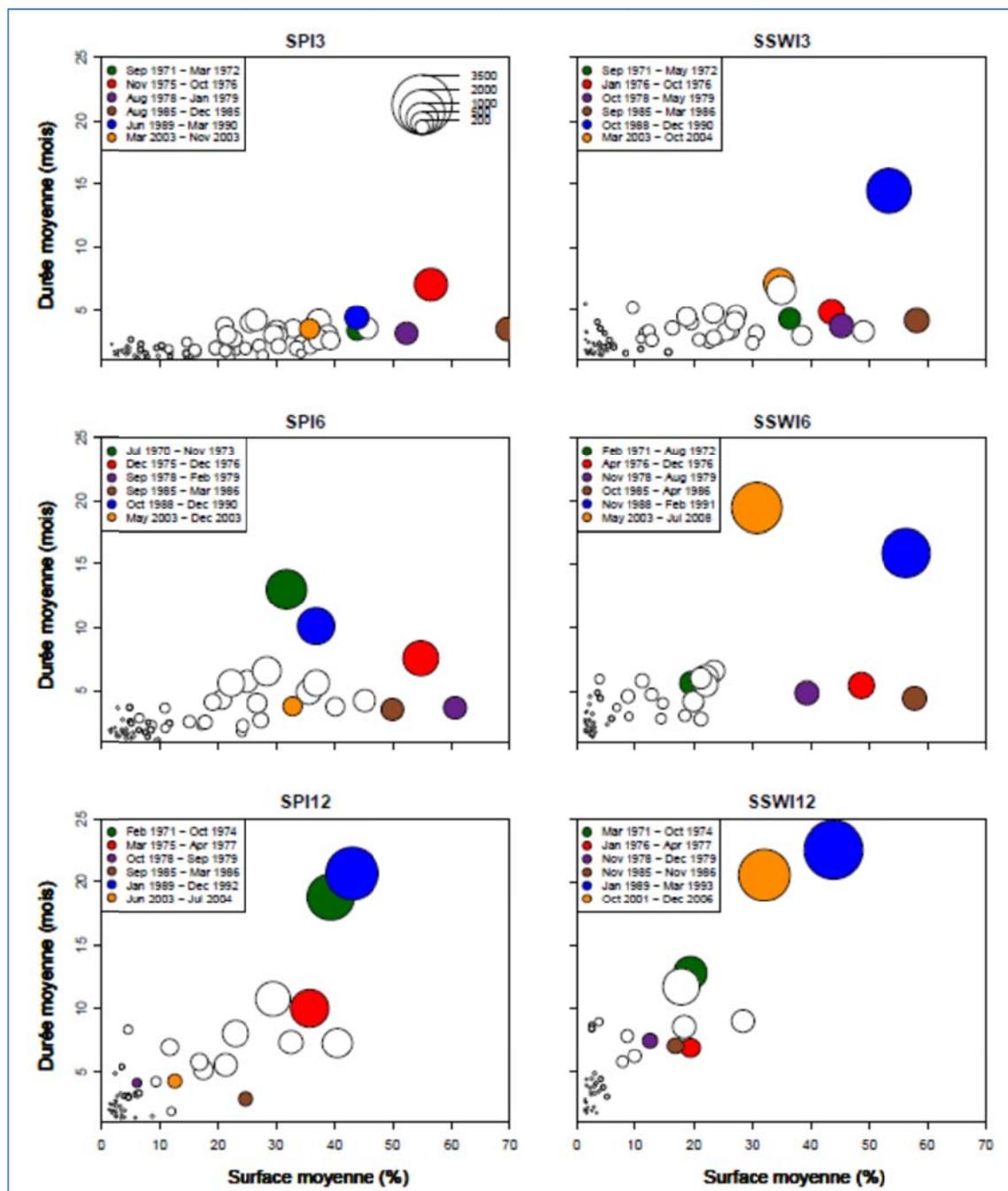


Illustration 66 - Relation entre surface moyenne, durée moyenne et magnitude totale pour tous les événements de sécheresse en France caractérisés par le SPI et le SSWI avec des échelles de temps de 3, 6 et 12 mois et un seuil de 20% (quinquennal sec).

"L'aire des disques est proportionnelle à la magnitude totale. L'échelle pour la magnitude, en mois par % de la France, est donnée dans le graphe situé en haut à gauche. Six événements majeurs sont identifiés à l'aide de couleurs identiques sur chacun des graphes".

Source : Soubeyrou, et al. (2011).

5. Bibliographie

Collectif (1978) - Sécheresse 1976 : aspects climatique, hydrologique et hydrogéologique – Bulletin du BRGM Hydrogéologie Géologie de l'Ingénieur: section III, n°3, 1978.

Collin J.J., Gennai A., Margat J., Landreau A. (1994) – Cartographie de la résistance à la sécheresse des principaux systèmes aquifères régionaux à nappe libre. Rapport BRGM/R37734

Ducharne A, Habets F, Déqué M, Evaux L, Hachour A, Lepaillier A, Lepelletier T, Martin E, Oudin L, Pagé C, Ribstein P, Sauquet E, Thiéry D, Terray L, Viennot P, Boé J, Bourqui M, Crespi O, Gascoïn S, Rieu J (2009) - Projet RExHySS, Impact du changement climatique sur les Ressources en Eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme, rapport final, 62 p.

Hayes M. J. - What is Drought ? Drought Indices - National Drought Mitigation Center. <http://drought.unl.edu/>

Hoffman J., Domber S. – 2003 - New Jersey Water-Supply Drought Indicators. New Jersey Geological Survey.

Giuntoli I., Renard B. (2010) - Identification des impacts hydrologiques du changement climatique : constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages. Rapport Cemagref 2010

Keyantash, J., J. A. Dracup, (2002) - The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1167–1180.

McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J. (1993) - The relationship of drought frequency and duration to time scales, Eighth Conf. on Applied Climatology. Anaheim, CA, Amer. Meteor. So.

MEDDTL (2010) – Explore 2070 - Description des données météorologiques fournies au projet Explore 2070.

MEDDTL (2011) – Explore 2070 – B2a - rapport détaillé Hydrologie Métropole.

MEDDTL (2012) – Explore 2070, Hydrologie souterraine – Synthèse, 184 p.

Mendicino G., Senatore A., Versace P. (2008) - A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a mediterranean climate. *Journal of Hydrology* (2008) 357, 282– 302

Peters E., Van Lanen H.A.J., Forfs P.J.J.F., Bier G. – 2005 - Drought in groundwater. Drought distribution and performance indicators. *Journal of Hydrology*, 306 (2005).

Pinson S., Mardhel V. (2011) - Cartographie de la vulnérabilité des masses d'eau souterraine vis-à-vis du changement climatique – 1^{ère} approche. Rapport final- BRGM RP-59558- FR, 57 pages.

Renard B., Lang M., Sauquet E. (2008) - Identification des impacts hydrologiques du changement climatique, convention de partenariat 2008 ONEMA-Cemagref.

Seguin J.J., Wuilleumier A., 2006. Exploitabilité des ressources en eaux souterraines en France. Résistance à la sécheresse des principaux aquifères à nappe libre. BRGM/RP-55188-FR

Seguin J.J., avec la collaboration de Gomez E., Wuilleumier A. – 2009 - Les indicateurs piézométriques. Un outil dans la gestion des hydrosystèmes. Orientations méthodologiques. BRGM/RP-58139-FR

Soubeyroux J.-M., J.-P. Vidal, J. Najac, N. Kitova, M. Blanchard, P Dandin, E. Martin, C. Pagé, F. Habets. Projet ClimSec. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. Rapport final du projet. Mai 2011

Sridhar V. ,Kenneth G., Hubbard, You J., Eric D. (2008) - Development of the Soil Moisture Index to Quantify Agricultural Drought and its "User Friendliness" in Severity-Area-Duration Assessment. Journal of hydrometeorology, vol 9. 2008

Steinemann A. C. – 2006 - Developing Multiple Indicators and Triggers for Drought Plans. Journal of Water Resources Planning and Management. Vol. 132, No. 3, May/June 2006.

Svoboda M. - 2009 - Sharpening the Global Focus on Drought. An NDMC Overview Monitoring Program Area Leader National Drought Mitigation Center. University of Nebraska-Lincoln. International Seminar on Drought and Climate Risk Management Conference, La Serena, Chile, May 27-28, 2009.

USGS (2007) - Fact Sheet <http://pubs.usgs.gov/fs/2007/3003/> - Ground-Water Climate Response Network

Vernoux J.F., Seguin J.J. (2011) - Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines – année 1, rapport BRGM/RP-59286-FR

Vernoux J.F., Seguin J.J. (2012) - Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines – année 2, rapport BRGM/RP-61020-FR

Vicente-Serrano S.M., Begueria S., Lopez-Moreno, J.I. (2009) - A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. Journal of Climate, Vol 23.

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

Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Habets, F., Soubeyroux, J.-M., Blanchard, M. et Baillon, M. (2010b), Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. Hydrology and Earth System Sciences, 14(3), 459-478. DOI : [10.5194/hess-14-459-2010](https://doi.org/10.5194/hess-14-459-2010)

Vigouroux P. (2011) - Bulletin de situation hydrologique des nappes (BSH nappes) - Nouveau cadrage 2012. Rapport final

Warren County Drought Response Plan –2008 - Warren County, Virginia
<http://www.docstoc.com/docs/24783030/DROUGHT-RESPONSE-PLAN>

Annexe 1

Masses d'eau souterraine classées selon leur sensibilité au CC

Nom de Masse d'eau souterraine	MS_CD	Ecart_Peff
Calcaires de la Clape	DG109	-24.45
Calcaires, marno-calcaires et schistes du massif de Mouthoumet	DG502	-20.93
Calcaires et marnes essentiellement jurassiques des Corbières orientales	DG122	-20.54
Alluvions de l'Aude	DG310	-19.99
Formations de socle zone axiale de la Montagne Noire dans le BV de l'Aude	DG603	-19.76
Formations tertiaires BV Aude et alluvions de la Berre	DG509	-19.56
Calcaires éocènes du massif de l'Alaric	DG110	-19.02
Graviers et grès d'Issel et extension sous couverture - secteur de Castelnaudary	DG216	-18.62
Calcaires et marnes chainon Plantaurel - Pech de Foix - Synclinal Rennes-les-bains BV Aude	DG405	-18.54
Calcaires éocènes du Cabardès	DG207	-18.17
Calcaires et marnes du Plateau de Sault BV Aude	DG412	-17.87
Calcaires du plateau de Sault BV Ariège	FG053	-17.12
Terrains plissés du BV Adour secteur hydro q0	FG050	-16.85
Terrains plissés BV Ariège secteur hydro o1	FG048	-16.59
Terrains plissés du BV du Rio Irati	FG055	-16.59
Formations plissées calcaires et marnes Arc de St Chinian	DG411	-16.50
Alluvions de l'Ariège et affluents	FG019	-16.49
Alluvions du gave d'Oloron et du Saison	FG031	-16.30
Alluvions du gave de Pau	FG030	-16.17
Multicouche pliocène et alluvions IVaires du Roussillon	DG221	-15.97
Domaine marno-calcaires région de Toulon	DG514	-15.81
Terrains plissés du BV Garonne secteur hydro o0	FG049	-15.81
Domaine plissé Pyrénées axiales dans le BV de l'Aude	DG614	-15.67
Calcarénites miocènes de Bonifacio	EG131	-15.51
Terrains plissés BV Nive, Nivelle, Bidouze secteurs hydro q8, q9, s5 (+q3 et s4 marginal)	FG052	-15.39
Terrains plissés du BV des gaves secteurs hydro q4, q5, q6, q7	FG051	-15.39
Molasses du bassin de l'Adour et alluvions anciennes de Piémont	FG044	-15.30
Calcaires éocènes du Minervois (Pouzols)	DG203	-15.05
Basse et moyenne terrasse de la Garonne rive gauche en amont du Tarn	FG087	-15.05
Alluvions de l'Adour et de l'Echez, l'Arros, la Bidouze et la Nive	FG028	-15.02
Formations tertiaires et crétacées du bassin de Béziers-Pézenas (y compris all. Du Libron)	DG510	-14.90
Aquifères alluviaux secondaires des basses plaines littorales de Corse (Tavignano, Alesani, Petriagnani, Tarco, Solenzara, Travo, Aliso-Poggio, Fium Orbo - Abatesco, Ostriconi, Regino, Fium Secco-Figarella, Fango, Chiuni, Liamone, Gravone-Prunelli, Taravo	EG336	-14.82
Alluvions des Luys	FG029	-14.54
Sables fauves BV Garonne région hydro o	FG085	-14.44
Socle Corse ancienne granitique + formations volcaniques Cintu, Bastelica et Bavella	EG608	-13.98
Calcaires et marnes du Jurassique de l'Ile de Ré	GG107	-13.63
Molasses du bassin du Tarn	FG089	-13.49
Baie de Douarnenez	GG002	-13.49
Calcaires primaires du Synclinal de Villefranche et Fontrabieuse	DG126	-13.49
Formations métamorphiques allochtones et éocène détritique de Balagne	EG606	-13.40
Calcaires et sables de l'oligocène à l'ouest de la Garonne	FG083	-13.34
Terrains plissés du bassin de la Bidassoa secteur hydro s6	FG054	-13.25
Baie d'Audierne	GG003	-13.20
Aquifère dunaire de la presqu'île d'Arvert	FG069	-13.03
Formations métamorphiques Corse Est	EG605	-12.99
Molasses du bassin de la Garonne et alluvions anciennes de Piémont	FG043	-12.76

Calcaires, sables et alluvions des îles d'Oléron et d'Aix	FG063	-12.71
Baie de Concarneau - Aven	GG005	-12.65
Alluvions récentes de la Gironde	FG026	-12.53
Alluvions du Tarn, du Dadou et de l'Agout secteurs hydro o3-o4	FG021	-12.49
Formations miocènes d'Aléria	EG214	-12.25
Formations plissées du Haut Minervois, Monts de Faugères, St Ponais et Pardailhan	DG409	-12.22
Formations éocènes de Solenzara	EG211	-12.10
Aquifères alluviaux majeurs corses (Fium Alto, Golo, Plaine de Mormorana, Bevinco)	EG335	-12.03
Sables fauves BV Adour région hydro q	FG066	-11.95
Sables plio-quadernaires des bassins cotiers région hydro s et terrasses anciennes de la Gironde	FG045	-11.70
Sables plio-quadernaires du bassin de la Garonne région hydro o et terrasses anciennes de la Garonne	FG047	-11.68
Domaine plissé Pyrénées axiales dans le BV de la Têt et de l'Agly	DG615	-11.49
Le Léon	GG001	-11.37
Calcaires du sommet du crétacé supérieur captif nord-aquitain	FG072	-11.35
Alluvions fluvio-marines des marais de Rochefort, de Brouage et Seudre aval	FG027	-11.34
Odet	GG004	-11.27
Sables et calcaires plio-quadernaires du bassin Midouze-Adour région hydro q	FG046	-11.17
Alluvions de la Garonne moyenne et du Tarn aval, la Save, l'Hers mort et le Girou	FG020	-10.95
Alluvions de l'Hérault	DG311	-10.94
Baie de Bourgneuf - Marais Breton	GG025	-10.93
Domaine plissé Pyrénées axiales et alluvions IVaires dans le BV du Sègre (district Ebre)	DG414	-10.93
Massifs calcaires de Ste Baume, Agnis, Ste Victoire, Mont Aurélien, Calanques et Bassin du Beausset interne	DG137	-10.91
Golfe du Morbihan	GG012	-10.78
Elorn	GG112	-10.76
Arguenon	GG013	-10.67
Socle BV Tarn secteurs hydro o3-o4	FG009	-10.66
Calcaires de la base du crétacé supérieur captif du sud du bassin aquitain	FG091	-10.64
Alluvions de la Garonne aval	FG062	-10.62
Alluvions du Gapeau	DG343	-10.60
Baie de Morlaix	GG008	-10.59
Alluvions Oust	GG116	-10.48
Calcaires et marnes du Lias et Dogger Talmondais	GG041	-10.46
Isthme du Cotentin	HG101	-10.39
Rance - Frémur	GG014	-10.37
Marais de Dol	GG123	-10.28
Golfe de Saint-Brieuc	GG009	-10.09
Calcaires, grès et sables de l'infra-cénomannien/cénomannien libre	FG076	-9.95
Sables, graviers, galets et calcaires de l'éocène nord AG	FG071	-9.92
Scorff	GG011	-9.92
Domaine plissé Pyrénées axiales dans le BV du Tech, du Réart et de la cote Vermeille	DG617	-9.91
Calcaires et calcaires marneux du santonnien-campanien BV Charente-Gironde	FG094	-9.86
Calcaires du jurassique sup des BV de la Devise et des cotiers charentais	FG064	-9.65
Calcaires de l'Entre 2 Mers du BV de la Garonne	FG068	-9.52
Calcaires du jurassique moyen du BV de la Boutonne secteur hydro r6	FG042	-9.45
Calcaires, grès et sables du turonnien-coniacien libre BV Charente-Gironde	FG093	-9.39
sables, calcaires et dolomies de l'éocène-paléocène captif sud AG	FG082	-9.39

Ile de Noiremoutier	GG036	-9.37
Trias du Cotentin est et Bessin	HG402	-9.34
La 'ta	GG006	-9.34
Ile d'Yeu	GG035	-9.33
Calcaires de l'Avesnois	B1G016	-9.30
Aulne	GG007	-9.28
Formations oligocènes région de Marseille	DG215	-9.26
Calcaires et marnes du massif des Bornes et des Aravis	DG112	-9.24
Calcaires de l'Entre 2 Mers du BV de la Dordogne	FG041	-9.22
Volcanisme du Cézallier - BV Adour-Garonne	FG060	-9.22
Alluvions de l'Arve et du Giffre	DG309	-9.20
Dolomies et calcaires jurassiques du fossé de Bédarieux	DG132	-9.16
Domaine plissé du Chablais et Faucigny - BV Arve et Dranse	DG408	-9.10
Baie de Lannion	GG058	-9.01
Sables du Landénien des Flandres	AG014	-8.97
Calcaires et dolomies du lias du BV du Tarn secteur hydro o3	FG056	-8.96
Craie et marnes du Lieuvin-Ouche - Pays d'Auge - bassin versant de la Touques	HG213	-8.95
Guindy-Jaudy-Bizien	GG040	-8.92
Sable et calcaire libre du bassin tertiaire libre de Jaunay	GG033	-8.91
Socle du bassin versant de la Douve et de la Vire	HG503	-8.90
Formations de socle de la Montagne Noire dans le BV de l'Orb	DG604	-8.83
Craie de la vallée de la De'le	AG003	-8.80
Calcaires jurassiques pli ouest de Montpellier, extension sous couverture et formations tertiaires Montbazin-Gigean	DG124	-8.79
Trioux-Leff	GG039	-8.75
Socle du bassin versant de la Sée	HG505	-8.73
Alluvions de la Charente	FG017	-8.72
Molasses du bassin de la Dordogne	FG077	-8.69
Socle du bassin versant de la Sienne	HG506	-8.65
Calcaires et marnes libres du Jurassique supérieur de l'Aunis	GG106	-8.58
Blavet	GG010	-8.56
Conglomérats du plateau de Valensole	DG209	-8.53
Massif du Cézallier BV Loire	GG097	-8.41
Socle du bassin versant des cours d'eau cotiers	HG507	-8.40
Sables du Landénien d'Orchies	AG018	-8.32
Alluvions de l'Oise	HG002	-8.30
Alluvions Vilaine	GG115	-8.26
Socle ardennais	B1G019	-8.23
Alluvions de la Seine moyenne et avale	HG001	-8.22
Couesnon	GG016	-8.21
Estuaire - Loire	GG022	-8.20
Socle du bassin versant de la Sélune	HG504	-8.17
Calcaires du jurassique supérieur du BV Boutonne secteur hydro r6	FG015	-8.17
Domaine plissé BV Isère et Arc	DG406	-8.11
Craie du Lieuvin-Ouche - bassin versant de la Risle	HG212	-8.04
Craie altérée de l'estuaire de la Seine	HG202	-8.01
Domaine plissé et socle BV Arve amont	DG403	-7.97
Calcaires jurassiques BV Isle-Dronne secteurs hydro p6-p7	FG003	-7.97
Vilaine	GG015	-7.92
Massifs calcaires du Trias au Crétacé dans le BV de l'Argens	DG138	-7.74
Plateaux calcaires des Plans de Canjuers et de Fayence	DG139	-7.74
Calcaires du jurassique supérieur du BV Charente secteurs hydro r0, r1, r2, r3, r5	FG016	-7.72
Massif du Mont Dore BV Loire	GG098	-7.68
Calcaires et marnes du massif des Bauges	DG144	-7.68

Pélites permienes et calcaires cambriens du lodévois	DG222	-7.54
Alluvions de la Durance aval et moyenne et de ses affluents	DG302	-7.46
Alluvions de la Dordogne	FG024	-7.44
Calcaires et marnes du Lias_Dogger du bassin amont de la Sèvre-Niortaise	GG062	-7.44
Alluvions de l' Isle et de la Dronne	FG025	-7.35
Alluvions des fleuves cotiers Giscle et Mole, Argens et Siagne	DG318	-7.33
Formations gréseuses et marno-calcaires tertiaires dans BV Basse Durance	DG213	-7.26
Socle ardennais du bassin versant de l'Oise	HG508	-7.21
Socle BV Aveyron secteur hydro o5	FG008	-7.20
Bathonien-bajocien de la plaine de Caen et du Bessin	HG308	-7.19
Craie altérée du littoral cauchois	HG203	-7.16
Socle BV Vézère secteurs hydro p3-p4	FG005	-7.15
Calcaires du Boulonnais	AG002	-7.14
Craie de la vallée de la Canche aval	AG005	-7.13
Craie de l'Audomarois	AG001	-7.10
Craie de Thiérache-Laonnois-Porcien	HG206	-7.08
Bordure du Hainaut	B2G017	-7.07
Formations plissées Haute vallée de l'Orb	DG410	-7.01
Sable du bassin de Grand Lieu	GG037	-6.97
Alluvions de la Vézère et de la Corrèze	FG099	-6.95
Calcaires montagne du Lubéron	DG133	-6.94
Calcaires, grés et sables du créacé sup basal libre BV Garonne	FG098	-6.93
Tertiaire du Mantois à l'Hurepoix	HG102	-6.92
Formations glaciaires et fluvio-glaciaires Bas Chablais (P. Gavot, Delta Dranse, terrasses Thonon)	DG201	-6.87
Socle du bassin versant de la Seullles et de l'Orne	HG502	-6.85
Volcanisme du Mont-Dore - BV Adour-Garonne	FG061	-6.84
Craie des bassins versants de l'Eaulne, Béthune, Varenne, Bresle et Yerres	HG204	-6.82
Champ de fractures de Saverne	CG027	-6.81
Calcaires du sommet du créacé supérieur du Périgord	FG092	-6.79
Craie du Vexin normand et picard	HG201	-6.78
Calcaires des grands Causses BV Tarn	FG057	-6.76
Lutétien - Yprésien du Soissonnais-Laonnois	HG106	-6.75
Pays de Bray	HG301	-6.74
Calcaires créacés des chaines de l'Estaque, Nerthe et Etoile	DG107	-6.71
Molasses du bassin du Lot	FG088	-6.66
Massif du Cantal BV Loire	GG096	-6.63
Calcaires des grands Causses BV Aveyron	FG059	-6.62
Craie du Cambrésis	AG010	-6.55
Alluvions de l'Isère Combe de Savoie et Grésivaudan + Breda	DG314	-6.52
Grés du bassin de Brive	FG033	-6.51
Craie de l'Artois et de la vallée de la Lys	AG004	-6.50
Craie de la vallée de la Somme amont	AG013	-6.46
Craie des vallées de la Scarpe et de la Sensée	AG006	-6.44
Chaîne des Puys	GG099	-6.42
Calcaires et Calcaires marneux du santonien-campanien BV Isle-Dronne	FG096	-6.41
Craie altérée du Neubourg-Iton-plaine de Saint-André	HG211	-6.32
Alluvions de l'Y grenoblois Isère / Drac / Romanche	DG317	-6.30
Calcaires et marnes du Lias et Dogger libre du Sud-Vendée	GG042	-6.29
Alluvions de l'Aveyron et de la Lère	FG022	-6.28
Calcaires et marnes du massif de la Chartreuse	DG145	-6.27
Calcaires des Causses du Quercy BV Aveyron	FG037	-6.22
Calcaires et sables du bassin tertiaire de Campbon	GG038	-6.20
Craie du Valenciennois	AG007	-6.17
Calcaires du jurassique moyen en rive droite de la Charente amont	FG014	-6.14

Calcaires dogger entre le Thon et limite de district	HG309	-6.12
Calcaires, dolomies et grés du lias BV de l'Aveyron secteur hydro o5	FG036	-6.09
Domaine plissé BV Manche et Drac	DG407	-5.98
Calcaires des Causses du Quercy BV Corrèze-Vézère	FG040	-5.94
Calcaires, grés et sables du crétacé sup basal libre BV Lot	FG097	-5.90
Eocène et craie du Vexin français	HG107	-5.89
Domaine marno-calcaires Provence est - BV Durance	DG521	-5.88
Formations variées de l'Avant-Pays savoyard dans BV du Rhone	DG511	-5.87
Domaine marno-calcaire et gréseux de Provence est - BV Cotiers est	DG520	-5.85
Calcaires urgoniens du plateau de Vaucluse + Montagne de Lure	DG130	-5.82
BV socle Allier aval	GG134	-5.76
Alluvions de la vallée du Doubs	DG306	-5.75
Socle BV Isle-Dronne secteurs hydro p6-p7	FG004	-5.73
Craie de la vallée de la Canche amont	AG008	-5.72
Calcaires, grés et sables du crétacé sup basal libre en Périgord Sarladais Bouriane	FG065	-5.72
Massif Central BV Sioule	GG050	-5.71
Domaine plissé BV Cenise et Po	DG413	-5.70
Calcaires et marnes du Dogger du BV de la Vienne	GG066	-5.64
Alluvions marais de Chautagne et Lavours	DG330	-5.58
Socle BV Haut Bandiat et Tardoire secteur hydro r1	FG002	-5.56
Formations bassin d'Aix	DG210	-5.54
Sarthe Amont	GG019	-5.54
Volcanisme cantalien - BV Adour-Garonne	FG011	-5.53
Auzance - Vertonne - petits cotiers	GG029	-5.53
Calcaires et marnes du Dogger du BV du Clain	GG063	-5.53
Socle Massif de l'Estérel, des Maures et Iles d'Hyères	DG609	-5.52
Socle BV Dordogne secteurs hydro p0-p1-p2	FG006	-5.50
Alluvions du bassin de l'Allan (dont Savoureuse)	DG307	-5.48
Calcaires des grands Causses BV Lot	FG058	-5.44
Mayenne	GG018	-5.35
Sables et argiles éocènes de la Brenne	GG083	-5.30
Calcaires et marnes des Alpilles	DG204	-5.28
Eocène du Valois	HG104	-5.27
Alluvions de l'Isère aval de Grenoble	DG313	-5.24
Molasses du bassin de l'Aveyron	FG090	-5.21
Domaine sédimentaire du genevois (molasses et formations IVaires)	DG517	-5.19
Calcaires et marnes du Dogger en Creuse	GG068	-5.12
Vie - Jaunay	GG028	-5.04
Calcaires, grés et sables du turonien-coniacien-santonien libre BV Isle-Dronne	FG095	-5.02
Calcaires et marnes jurassiques chaîne du Jura et Bugéy - BV Ain et Rhone RD	DG114	-5.00
Domaine triasique et liasique du Vignoble jurassien	DG516	-4.95
Logne - Boulogne - Ognon - Grand Lieu	GG026	-4.91
Massif Central BV Vienne	GG057	-4.90
Calcaires, dolomies et grés du lias BV du Lot secteur hydro o8	FG035	-4.90
Calcaires du jurassique moyen entre Charente et Son	FG013	-4.86
Alluvions du Lot	FG023	-4.75
Calcaires et marnes du Jurassique supérieur et moyen de l'interfluve Indre - Cr	GG074	-4.75
Alluvions du Rhone entre le confluent du Guiers et de la Bourbre	DG326	-4.67
Cailloutis du Sundgau dans BV du Doubs	DG331	-4.56
Craie de la vallée de l'Authie	AG009	-4.38
Sables, argiles et calcaires du Tertiaire de la Plaine de la Limagne	GG051	-4.38
Craie picarde	HG205	-4.29

Cailloutis pliocènes de la Forêt de Chaux	DG332	-4.22
Calcaires jurassiques et moraines de l'Île Crémieu	DG105	-4.20
Domaine plissé BV Haute et moyenne Durance	DG402	-4.17
Volcanisme Aubrac	FG010	-4.16
Sables, grès, calcaires et dolomies de l'infra-toarcien	FG078	-4.11
Calcaires et marnes crétacés du massif du Vercors	DG111	-4.06
Alluvions de la Saone entre les confluents de l'Ognon et du Doubs - plaine Saone-Doubs et Basse vallée de la Loue	DG320	-4.04
Calcaires du karst de la Rochefoucauld BV Charente	FG018	-4.03
Calcaires jurassiques chaîne du Jura 1er plateau	DG140	-4.02
Calcaires jurassiques du seuil et des Cotes et arrières-cotes de Bourgogne dans BV Saone en RD	DG119	-4.01
Alluvions de la Meuse, de la Chiers, et de la Bar	B1G015	-4.01
Formations variées du Dijonnais entre Ouche et Vingeanne	DG523	-3.97
Madeleine BV Allier	GG143	-3.97
Grès du Lias inférieur d'Hettange Luxembourg	B1G018	-3.94
Calcaires kimmeridgien-oxfordien karstique nord-est du district (entre Ornain et limite de district)	HG305	-3.93
Alluvions du Drac amont et Séveraisse	DG321	-3.93
Alluvions de l'Arc de Berre et de l'Huveaune	DG312	-3.92
Alluvions de la Bourbre - Cattelan	DG340	-3.90
Domaine marneux de la Bresse	DG505	-3.89
Schistes, grès et arkoses du Carbonifère et du Permien du bassin de Blanzay	GG044	-3.86
Alluvions anciennes de la Vistrenque et des Costières	DG101	-3.85
Craie de la moyenne vallée de la Somme	AG012	-3.76
Formations variées bassin houiller stéphanois BV Rhone	DG512	-3.75
Socle BV Lot secteurs hydro o7-o8	FG007	-3.74
Formations variées en domaine complexe du Piémont du Vercors	DG515	-3.74
Alluvions de l'Aisne	HG003	-3.72
Formations gréseuses et marno-calcaires tertiaires dans BV Touloubre et Berre	DG513	-3.70
Calcaires et marnes du Jurassique du Beaujolais	GG045	-3.69
Alluvions plaine des Tilles, nappe de Dijon sud + nappes profondes	DG329	-3.67
Grès du Trias inférieur du bassin houiller	CG028	-3.67
Calcaires, dolomies et grès du lias BV de la Dordogne secteurs hydro p1-p2	FG034	-3.66
Formations fluvio-glaciaires du Pays de Gex	DG231	-3.66
Calcaires et marnes du Jurassique supérieur du Haut-Poitou	GG072	-3.65
Albien-néocomien libre entre Ornain et limite de district	HG214	-3.60
Eocène du bassin versant de l'Ourcq	HG105	-3.58
Alluvions de la Plaine de Bièvre-Valloire	DG303	-3.49
Alluvions Allier amont	GG052	-3.49
Alluvions Allier aval	GG128	-3.48
Calcaire jurassique de l'anticlinal Loudunais	GG082	-3.45
Socle Monts du Lyonnais, beaujolais, maconnais et chalonnais BV Saone	DG611	-3.45
Alluvions plaine de l'Ain	DG339	-3.44
Cailloutis de la Crau	DG104	-3.43
Oudon	GG021	-3.43
Molasses miocènes du Bas Dauphiné entre les vallées de l'Ozon et de la Drome + complexes morainiques glaciaires + pliocène	DG219	-3.40
Craie du Séno-Turonien du BV de l'Indre	GG086	-3.35
Alluvions anciennes entre Vidourle et Lez et littoral entre Montpellier et Sète	DG102	-3.32
Domaine formations sédimentaire des Cotes chalonnaises et maconnaises	DG503	-3.31
Alluvions fluvio-glaciaires Couloir de Certines	DG342	-3.30
Craie de la vallée de la Somme aval	AG011	-3.30
Calcaires, marnes et terrains de socle entre Doubs et Ognon	DG116	-3.29

Forez BV Loire	GG048	-3.28
Alluvions Loire Armoricaïne	GG114	-3.27
Calcaires jurassiques BV de la Jougnena et Orbe (district Rhin)	DG415	-3.21
Sèvre Nantaise	GG027	-3.17
Madeleine BV Loire	GG133	-3.16
Alluvions de la Saone entre le confluent du Doubs et les Monts d'Or + alluvions de la Grosnes	DG305	-3.15
Calcaires des Causses du Quercy BV Dordogne	FG039	-3.15
Calcaires jurassiques Chatillonnais et Plateau de Langres BV Saone	DG121	-3.14
Alluvions du Breuchin et de la Lanterne	DG345	-3.14
Formations plioquaternaires Dombes - nord	DG143	-3.11
Massif Central BV Gartempe	GG056	-3.11
Formations plioquaternaires Dombes - sud	DG135	-3.09
Calcaires et marnes du jurassique sup du BV de la Dordogne secteur hydro p2	FG012	-3.09
Calcaires des Causses du Quercy BV Lot	FG038	-3.09
Formations variées de la bordure primaire des Vosges	DG500	-3.07
Calcaires jurassiques chaîne du Jura - BV Doubs et Loue	DG120	-3.07
Socle du BV du marais poitevin	GG030	-3.06
Alluvions Loire du Massif Central	GG047	-3.05
Sables et calcaires lacustres des bassins tertiaires de Touraine	GG095	-2.99
Calcaires et marnes causses et avant-causses du Larzac sud, Campestre, Blandas, Séranne, Escandorgue, BV Hérault et Orb	DG125	-2.96
Socle BV Haute-Charente secteur hydro r0	FG001	-2.94
Calcaire jurassique du bassin de Chantonnay	GG034	-2.93
Calcaire libre de l' Oxfordien, Orne-Sarthe	GG124	-2.91
Domaine plissé BV Haut Verdon	DG401	-2.91
Calcaires crétacés du Dévoluy + Aiguilles de Lus	DG108	-2.90
Marnes du Callovien Sarthois	GG121	-2.85
Calcaires du Dogger des cotes de Meuse ardennaises	B1G009	-2.84
Craie du Séno-Turonien unité du Loir	GG090	-2.82
Plateau lorrain versant Meuse	B1G007	-2.81
Alluvions du Rhone du confluent de la Durance jusqu'à Arles et Beaucaire + alluvions du Bas Gardon	DG323	-2.74
Calcaires et sables du bassin tertiaire roannais	GG046	-2.72
Calcaires et marnes du Lias et Jurassique moyen de la bordure nord-est du massif	GG079	-2.70
Alluvions du Drugeon, nappe de l'Arlier	DG348	-2.66
Calcaires jurassiques des plateaux de Haute-Saone	DG123	-2.66
Alluvions de l'Ognon	DG315	-2.62
Domaine triasique et liasique de la bordure vosgienne sud-ouest BV Saone	DG506	-2.62
Craie du Séno-Turonien du BV de la Vienne	GG087	-2.61
Calcaires du crétacé supérieur des garrigues nimoises et extension sous couverture	DG117	-2.61
Calcaires tithonien karstique entre Ornain et limite du district	HG302	-2.58
Calcaires et marnes du jurassique sup du BV du Lot secteur hydro o8	FG067	-2.53
Socle vosgien BV Saone-Doubs	DG618	-2.49
Craie de Champagne nord	HG207	-2.48
Le Morvan BV Loire	GG043	-2.46
Alluvions Vienne	GG110	-2.43
Romme et Evre	GG023	-2.41
Sable et marnes du tertiaire de la Plaine du Forez	GG091	-2.31
Couloirs de l'Est lyonnais (Meyzieu, Décines, Mions)	DG334	-2.31
Schistes, grès et arkoses du bassin permien de l'Autunois	GG102	-2.26
Sarthe Aval	GG020	-2.23
Sables et grès du Cénomaniens sarthois	GG081	-2.19

Massif Central BV Indre	GG054	-2.16
Calcaires dogger entre Armanèon et limite de district	HG310	-2.15
Alluvions de la Saone en amont du confluent de l'Ognon	DG344	-2.15
Massif Central BV Cher	GG053	-2.07
Massifs calcaires Audibergue, St Vallier, St Cézaire, Calern, Caussols, Cheiron	DG136	-1.99
Molasses miocènes du Comtat	DG218	-1.97
Calcaires et marnes de l'avant-pli de Montpellier	DG239	-1.97
Domaine Lias et Trias Auxois BV Saone	DG522	-1.96
Alluvions des plaines du Comtat et des Sorgues	DG301	-1.77
Sables et grès du Cénomaniens unité du Loir	GG080	-1.76
Massif Central BV Creuse	GG055	-1.72
Alluvions anciennes de la Plaine de Valence et terrasses de l'Isère	DG103	-1.71
Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace	CG001	-1.64
Socle du Morvan	HG501	-1.63
Calcaires et marnes libres du Lias libre de la Marche nord du Bourbonnais	GG069	-1.60
Calcaires et marnes du Jurassique supérieur Berry Ouest	GG075	-1.59
Calcaires et marnes du Jurassique supérieur du BV de Yèvre/Auron	GG077	-1.51
Alluvions Loire moyenne après Blois	GG137	-1.51
Calcaires du muschelkalk moyen dans BV Saone	DG202	-1.48
Alluvions du Roubion et Jabron - plaine de la Valdaine	DG327	-1.47
Alluvions Sarthe	GG113	-1.44
Calcaires kimmeridgien-oxfordien karstique entre Yonne et Seine	HG307	-1.41
Marnes et calcaires de la bordure lias trias de l'est du Morvan	HG401	-1.40
Calcaires et marnes du Jurassique supérieur du BV du Cher	GG076	-1.39
Calcaires et marnes jurassiques des garrigues nord-montpellieraines (W faille de Corconne)	DG115	-1.39
Tertiaire - Champigny - en Brie et Soissonnais	HG103	-1.39
Craie du Séno-Turonien du BV du Cher	GG085	-1.32
Craie du Séno-Turonien Tourraine Nord	GG088	-1.29
Calcaires urgoniens des garrigues du Gard et du Bas-Vivarais dans les BV de la Cèze et de l'Ardèche	DG129	-1.26
Sables et grès libres du Cénomaniens unité de la Loire	GG122	-1.24
La Loire de sa source à Bas en Basset	GG103	-1.20
Socle vosgien	CG003	-1.18
Sundgau versant Rhin et Jura alsacien	CG002	-1.17
Calcaires et marnes jurassiques des garrigues nord-montpellieraines - système du Lez	DG113	-1.17
Lignon du Velay	GG104	-1.11
Grès Trias inférieur BV Saone	DG217	-1.09
Calcaires du Dogger du plateau de Haye	B1G011	-1.07
Calcaires et marnes du Dogger-Jurassique supérieur du Nivernais nord	GG061	-1.04
Calcaires oxfordiens	B1G013	-1.01
Calcaires, marnes et molasses oligo-miocènes du bassin de Castrie-Sommières	DG223	-0.98
Calcaires kimmeridgien-oxfordien karstique entre Seine et Ornain	HG306	-0.94
Calcaires et marnes du Lias et Dogger du Nivernais sud	GG129	-0.89
Calcaires tithonien karstique entre Seine et Ornain	HG303	-0.88
Calcaires et marnes libres du Dogger au Sud du Berry	GG071	-0.87
Alluvions de la Bassée	HG006	-0.82
Alluvions du Rhone entre le confluent de la Saone et de l'Isère + alluvions du Garon	DG325	-0.80
Calcaires, argiles et marnes du Trias et Lias du Bec d'Allier	GG059	-0.73
Formations volcaniques du plateau des Coirons	DG700	-0.73
Formations marno-calcaires et gréseuses dans BV Drome Roubion, Eygues, Ouvèze	DG508	-0.66

Albien-néocomien libre entre Seine et Orain	HG215	-0.60
Margeride BV Allier	GG049	-0.51
Grès vosgien en partie libre	CG004	-0.45
Domaine limons et alluvions IVaires du Bas Rhone et Camargue	DG504	-0.39
Calcaires et marnes du Jurassique supérieur Berry Est	GG078	-0.38
Formations tertiaires cotes du Rhone	DG518	-0.35
Le Thoué	GG032	-0.24
Alluvions de la Meurthe et de la Moselle en amont de la confluence avec la Meurthe	CG017	-0.13
Massif du Velay BV Loire	GG101	-0.11
Alluvions du Perthois	HG005	-0.08
Grès, argiles et marnes du Trias et Lias du Bazois	GG060	-0.06
Layon - Aubance	GG024	-0.04
Grès et arkoses libres du Trias de la Marche nord du Bourbonnais	GG070	-0.04
Alluvions de la Seine amont	HG007	0.01
Calcaires tertiaires libres de Beauce	GG092	0.01
Calcaires du Muschelkalk	CG006	0.05
Calcaires urgoniens des garrigues du Gard BV du Gardon	DG128	0.11
Molasses miocènes du bassin d'Uzès	DG220	0.13
Craie de Champagne sud et centre	HG208	0.16
Calcaires tithonien karstique entre Yonne et Seine	HG304	0.23
Albien-néocomien libre entre Yonne et Seine	HG216	0.29
Calcaires tertiaires libres de Beauce sous Sologne	GG093	0.30
Alluvions de la Marne	HG004	0.31
Craie du Senonais et Pays d'Othe	HG209	0.32
Socle Monts du Lyonnais sud, Pilat et Monts du Vivarais BV Rhone, Gier, Cance, Doux	DG613	0.33
Alluvions Loir	GG111	0.34
Albien-néocomien libre entre Loire et Yonne	HG217	0.36
Alluvions du Rhone du confluent de l'Isère à la Durance + alluvions basses vallée Ardèche, Cèze	DG324	0.62
Calcaires jurassiques de la bordure des Cévennes	DG118	0.72
Calcaires et marnes de l'infra-Toarcien au nord du seuil du Poitou	GG064	0.76
Formations liasiques et triasiques de la bordure cévenole (Ardèche, Gard) et alluvions de la Cèze à St Ambroix	DG507	0.76
Craie du Séno-Turonien du Sancerrois	GG084	0.78
Calcaires du Dogger des cotes de Moselle	CG010	0.79
Alluvions de la Moselle en aval de la confluence avec la Meurthe	CG016	1.27
Alluvions de l'Aube	HG008	1.28
Plateau lorrain versant Rhin	CG008	1.35
Alluvions Cher	GG109	1.44
Monts du Devès	GG100	1.83
Socle cévenol BV des Gardons et du Vidourle	DG602	1.92
Calcaires et marnes du Dogger du BV du Thouet	GG065	1.98
Marnes, calcaires crétacés + calcaires jurassiques sous couverture du dome de Lédignan	DG519	1.99
Craie du Gatinais	HG210	1.99
Sables et argiles miocènes de Sologne	GG094	2.01
Domaine plissé BV Var, Paillons	DG404	2.02
Socle Monts du Vivarais BV Rhone, Eyrieux et Volcanisme du Mézenc	DG612	2.08
Socle cévenol dans le BV de l'Hérault	DG601	2.27
Calcaires cambriens de la région viganaise	DG106	2.30

Alluvions Loire moyenne avant Blois	GG108	2.32
Maine	GG105	2.91
Domaine plissé BV Roya, Bévéra	DG416	4.01
Socle cévenol BV de l'Ardèche et de la Cèze	DG607	4.41
Socle Massif du Mercantour	DG610	5.51

Annexe 2

Masses d'eau souterraines sélectionnées pour le suivi du CC avec les piézomètres associés

Champ SELECTED_PIEZO

00117X0023/P1 : piézomètre sélectionné pour la suivi de la masse d'eau

X0 : Aucun piézomètre sur la masse d'eau

X1 : Il existe un ou plusieurs piézomètres pour lesquels on n'a pas d'information sur la pérennité et le degré d'influence

X2 : Il existe un ou plusieurs piézomètres influencés

R_selected_piezo								
MS_CD	SELECTED_PIEZO	PRIORITY	NB ANNEES DATA	Tendance significative	Influence des mesures	Réseau sécheresse	pérennité de l'ouvrage	remarque
AG001	00117X0023/P1	1	42,68	H	Faible	oui	Forte	
AG002	00058X0068/P1	1	39,46					faible influence à confirmer
AG003	00263X0006/P1	1	42,68		Faible	oui	Forte	
AG004	00173X0083/PZ13A	1	39,00	H	Faible	non	Forte	
AG005	00178X0003/S1	2	20,00		Faible	oui	Forte	1 pt +25 ans mais influencé selon état des lieux
AG006	00271X0002/P2	1	42,69		Faible	oui	Forte	
AG007	00225X0077/FC2	1	42,69	B	Faible	non	Forte	
AG008	00182X0010/P1	1	42,68		Faible	non	Forte	
AG010	00491X0013/P	1	33,41		Faible	non	Forte	
AG013	00821X0035/S1	1	38,49		Faible	non	Forte	
AG014	00035X0029/P1	1	43,35		Faible	non	Forte	
AG018	X1							piezo+15ans sans info
B1G019	X2							piezo+25 ans influencé
B2G017	00502X0003/S1	3	15,00		Faible	non	Moyenne	
CG027	X0							
DG107	X0							
DG109	10613X0036/INRA	2	18,00		Faible	non		
DG110	X1							piezo-10ans sans info
DG112	X0							
DG114	X1							piezo-10ans sans info
DG122	X1							piezo+10ans sans info
DG124	10162X0226/V	1	43,02		Faible	oui		
DG126	X0							
DG130	X1							piezo-10ans sans info
DG132	X1							piezo-10ans sans info
DG133	X0							
DG137	10446X0239/F	4	7,00		Faible	non	Moyenne	piezo+10ans sans info

R_selected_piezo								
MS_CD	SELECTED_PIEZO	PRIORITY	NB ANNEES DATA	Tendance significative	Influence des mesures	Réseau sécheresse	pérennité de l'ouvrage	remarque
DG137	10446X0239/F	4	7,00		Faible	non	Moyenne	piezo+10ans sans info
DG138	09988X0069/F1	4	7,51		Faible	non	Forte	piezo+15ans influencé
DG139	X2							piezo+10ans influencé
DG144	X0							
DG145	X0							
DG201	X1							piezo-10ans sans info
DG203	X1							piezo+10ans sans info
DG204	X0							
DG207	10364X0001/S	4	6,62		Faible	non		
DG209	X2							piezo-10ans influencé
DG210	10212X0029/P1	3	14,16		Faible	non	Forte	
DG213	X1							piezo+15ans sans info
DG215	X0							
DG216	10116X0237/TREVIL	2	15,60		Faible	non		
DG221	10908X0263/FIGUER	1	38,58	B	Faible	oui		
DG222	09892X0679/EXH70	4	8,59		Faible	non		
DG302	09433X0162/PIEZ	3	11,44		Faible	non	Forte	
DG306	05025X0138/F	2	15,88			non	Forte	vérifier absence d'influence
DG307	X2							piezo-10ans influencé
DG309	X1							piezo-10ans sans info
DG310	10396X0162/F5	2	19,41		Faible	non		vérifier absence d'influence
DG311	10157X0104/1777	1	39,49		Faible	oui		
DG313	X0							
DG314	07494X0026/CRUET	2	21,13			non	Forte	
DG317	X1+X2							piezo-10ans influencé ou sans info
DG318	09995X0028/F	1	35,03		Faible	non	Forte	
DG330	06775X0010/BOURSI	2	21,42			non	Forte	vérifier absence d'influence
DG343	X1							piezo-10ans sans info
DG403	X0							
DG405	X1							piezo+10ans sans info
DG406	X0							

R_selected_piezo								
MS_CD	SELECTED_PIEZO	PRIORITY	NB ANNEES DATA	Tendance significative	Influence des mesures	Réseau sécheresse	pérennité de l'ouvrage	remarque
DG407	X0							
DG408	06306X0042/BIOGE	2	16,00			non	Forte	vérifier absence d'influence
DG409	X1							piezo-10ans sans info
DG410	X1							piezo-10ans sans info
DG411	X1							piezo-10ans sans info
DG412	X0							
DG413	X0							
DG414	X0							
DG502	X0							
DG509	10616X0029/PRADE	4	8,73		Faible	non		piezo+10ans sans info
DG510	X1							piezo-10ans sans info
DG511	X1							piezo-10ans sans info
DG514	X1							piezo+15ans sans info
DG517	X1							piezo-10ans sans info
DG520	10453X0295/P4795	2	24,03		Faible	non	Forte	
DG521	X0							
DG603	X0							
DG604	X0							
DG609	X0							
DG614	10944X0012/ALCAMP	4	4,79		Faible	non		
DG614	10944X0012/ALCAMP	4	4,79		Faible	non		
DG615	10897X0010/F3	4	7,83		Faible	non		
DG617	10976X0058/RIMBAU	4	7,83		Faible	non		
EG131	X0							
EG211	11188X0116/NOCE	3	10,27		Faible	non	Forte	
EG214	11156X0009/BRAVON	1	28,68		Faible	oui	Forte	
EG335	11076X0086/CANONI	2	15,16		Faible	oui	Forte	1 pt +25 ans mais influencé
EG336	11195X0114/SP1	1	27,79		Faible	oui	Forte	
EG605	11024X0102/MARINE	1	36,15					
EG606	X0							
EG608	X0							

R_selected_piezo								
MS_CD	SELECTED_PIEZO	PRIORITY	NB ANNEES DATA	Tendance significative	Influence des mesures	Réseau sécheresse	pérennité de l'ouvrage	remarque
FG002	X1							piezo-10ans sans info
FG003	X1							piezo+10ans sans info
FG004	X1							piezo-10ans sans info
FG005	07143X0017/P1	4	5,67		Faible	non	Forte	
FG006	08353X0052/F	4	6,12		Faible		Forte	
FG008	X0							
FG009	X1							piezo-10ans sans info
FG011	07638X0017/MAIRIE	4	4,73		Faible		Forte	
FG014	X1							piezo+15ans sans info
FG015	X1							piezo+15ans sans info
FG016	X1+X2							piezo+15ans dont 6 avec influence moyenne et autres sans info
FG017	X0							
FG019	10357X0021/F	2	16,39		Faible		Forte	
FG020	10097X0224/F	2	17,31		Faible		Forte	
FG021	09574X0030/F	2	17,31		Faible		Forte	
FG022	09312X0063/F	2	16,38		Faible		Forte	
FG024	08101X0227/P1	4	7,35		Faible	non	Forte	piezo+15ans sans info
FG025	X1							piezo+10ans sans info
FG026	X1							piezo+25ans sans info
FG027	X0							
FG028	09793X0011/F	2	15,71		Faible		Forte	
FG029	X0							
FG030	10031X0017/F	2	21,68		Faible			
FG031	10035X0009/F2	3	10,30		Faible	non		
FG033	07844X0076/P1	4	4,67		Faible	non	Forte	
FG036	X0							
FG037	X0							
FG040	X0							
FG041	X1							piezo-10ans sans info
FG042	X2							piezo+15ans influencé

R_selected_piezo								
MS_CD	SELECTED_PIEZO	PRIORITY	NB ANNEES DATA	Tendance significative	Influence des mesures	Réseau sécheresse	pérennité de l'ouvrage	remarque
FG043	09845C1426/F	2	16,21		Faible		Forte	
FG043	09845C1426/F	2	16,21		Faible		Forte	
FG043	09845C1426/F	2	16,21		Faible		Forte	
FG043	09845C1426/F	2	16,21		Faible		Forte	
FG044	X0							
FG045	08988X0014/D5	2	21,88		Faible			
FG046	09007X0047/PZ	2	19,93		Faible			
FG047	X1							piezo+25ans sans info
FG048	X0							
FG049	10734X0010/HY	4	3,00		Faible		Forte	vérifier que le point n'est pas influencé
FG050	X0							
FG051	X0							
FG052	X0							
FG053	X2							piezo-10ans influencé
FG054	X0							
FG055	X0							
FG056	X0							
FG057	08866X0047/BURLE	4	7,56		Faible	non		
FG058	08626X0014/BERNAD	4	7,56		Faible	non		
FG059	X0							
FG060	X1							piezo-10ans sans info
FG061	X1							piezo-10ans sans info
FG062	X1							piezo+25ans sans info
FG063	X1							piezo+15ans sans info
FG064	X1							piezo+15ans sans info
FG065	X1							piezo+10ans sans info
FG066	X1							piezo+25ans sans info
FG068	X1							piezo+25ans sans info
FG069	X0							
FG071	X1							piezo+25ans sans info
FG076	X1							piezo+15ans sans info

R_selected_piezo								
MS_CD	SELECTED_PIEZO	PRIORITY	NB ANNEES DATA	Tendance significative	Influence des mesures	Réseau sécheresse	pérennité de l'ouvrage	remarque
FG077	X0							
FG083	X1							piezo+25ans sans info
FG085	X0							
FG087	10092X0166/F	2	16,21		Faible		Forte	
FG088	X1							piezo-10ans sans info
FG089	09307X0136/F	4	9,67		Faible		Forte	
FG090	X0							
FG091	09768X0040/F2	3	13,68		Faible			
FG092	X1							piezo+15ans sans info
FG093	X2							piezo+15ans influencés
FG094	X1+X2							piezo+15ans sans info ou influences
FG095	X1							piezo+15ans sans info
FG096	X0							
FG097	X1							piezo+10ans sans info
FG098	X0							
FG099	07852X0072/P1	4	4,67		Faible	non	Forte	piezo+15ans sans info
GG001	02385X0046/PZ	4	8,00		Faible	non	Forte	
GG002	03101X0023/PZ	4	6,70		Faible	non	Forte	
GG003	03454X0070/F	2	19,09		Faible	non	Forte	
GG004	03107X0008/F	2	20,00		Faible	non	Forte	
GG005	03822X0021/F	4	7,54		Faible	non	Forte	
GG006	03128X0011/F	1	32,00		Faible	non	Forte	
GG007	03114X0023/F	2	20,00		Faible	non	Forte	
GG008	02761X0032/PZ	2	19,10		Faible	non	Forte	
GG009	02431X0106/F	4	7,54		Faible	non	Forte	
GG010	03493X0013/F	2	22,68		Faible	non	Forte	
GG011	03486X0022/PZ	2	19,10		Faible	non	Forte	
GG012	03851X0021/S2	2	23,68		Faible	non	Forte	
GG013	02803X0036/PZ	4	8,75		Faible	non	Forte	
GG014	02451X0023/F	4	7,54		Faible	non	Forte	
GG015	03871X0016/F	2	23,66		Faible	non	Forte	

R_selected_piezo								
MS_CD	SELECTED_PIEZO	PRIORITY	NB ANNEES DATA	Tendance significative	Influence des mesures	Réseau sécheresse	pérennité de l'ouvrage	remarque
GG016	02835X0055/PZ	4	7,60		Faible	non	Forte	
GG018	X1							piezo+15ans sans info
GG019	X0							
GG022	X1							piezo+10ans sans info
GG025	X0							
GG028	X0							
GG029	X0							
GG033	X0							
GG035	X0							
GG036	X1							piezo+10ans sans info
GG037	X1							piezo-10ans sans info
GG038	X0							
GG039	02782X0047/PZ	4	8,75		Faible	non	Forte	
GG040	02034X0082/PZ	4	8,75		Faible	non	Forte	
GG041	X0							
GG042	X1							piezos +25 ans sans info
GG050	06455X0041/PUITS	4	6,06		faible	non	forte	
GG058	02413X0065/PZ	4	8,75		Faible	non	Forte	
GG062	X1							piezos +25 ans sans info
GG063	X2							piezos+15ans influencés
GG066	X2							piezo-10ans influencé
GG068	X2							piezo+15ans influencé
GG083	X0							
GG096	07657X0018/P1	4	2,96		faible		Forte	
GG097	X1							piezo -10ans sans info
GG098	07164X0043/ROC	4	4,52		faible	non	Forte	
GG099	06696X0024/FORAGE	1	27,12		faible	non	forte	
GG106	X1+X2							piezo+25 ans influencé + autres sans info
GG107	X1							piezo+15ans sans info
GG112	02396X0030/PZ	4	6,70		Faible	non	Forte	
GG115	03535X0043/PZ	4	6,70		Faible	non	Forte	piezo+10ans sans info

R_selected_piezo								
MS_CD	SELECTED_PIEZO	PRIORITY	NB ANNEES DATA	Tendance significative	Influence des mesures	Réseau sécheresse	pérennité de l'ouvrage	remarque
GG116	03862X0057/PZ	4	6,58		Faible	non	Forte	
GG123	02465X0061/F	4	7,54		Faible	non	Forte	
GG134	X0							
HG001	01518X0139/FE2	1	30,69		Faible	non	Forte	
HG002	X0							
HG101	X1							piezo+10ans sans info
HG102	01516X0004/S1	1	43,51		Faible	oui	Forte	
HG104	01551X1013/S1	1	39,30		Faible	non	Forte	
HG106	01066X0133/S1	1	38,50	H	Faible	non	Forte	
HG107	01258X0020/S1	1	43,51		Faible	oui	Forte	
HG201	01261X0044/S1	1	38,51		Faible	non	Forte	
HG202	01003X0008/S1	1	44,62			non	Forte	
HG203	00753X0030/S1	1	42,79			non	Forte	
HG204	00773X0002/S1	1	44,63			oui	Forte	
HG206	00675X0019/S1	1	42,10	H	Faible	non	Forte	
HG211	01508X0133/S1	1	27,37		faible	non	Forte	
HG212	01491X0009/S1	1	39,84		faible (d'après tempo)	non	Forte	
HG213	01473X0087/S1	1	38,61			non	Faible	pérennité faible
HG301	01022X0073/P	4	5,53		Faible	non	Forte	
HG308	01205X0229/S1	1	45,43		faible	non	Moyenne	pérennité moyenne
HG309	00516X0059/S1	2	21,00		Faible	non	Forte	
HG402	X1							piezo+10ans sans info
HG502	X0							
HG503	X1							piezo+10ans sans info
HG504	X1							piezo-10ans sans info
HG505	X1							piezo-10ans sans info
HG506	X0							
HG507	X1							piezo-10ans sans info
HG508	00512X0206/P	4	5,81		Faible	non	Moyenne	

Annexe 3

Lois de probabilité utilisées

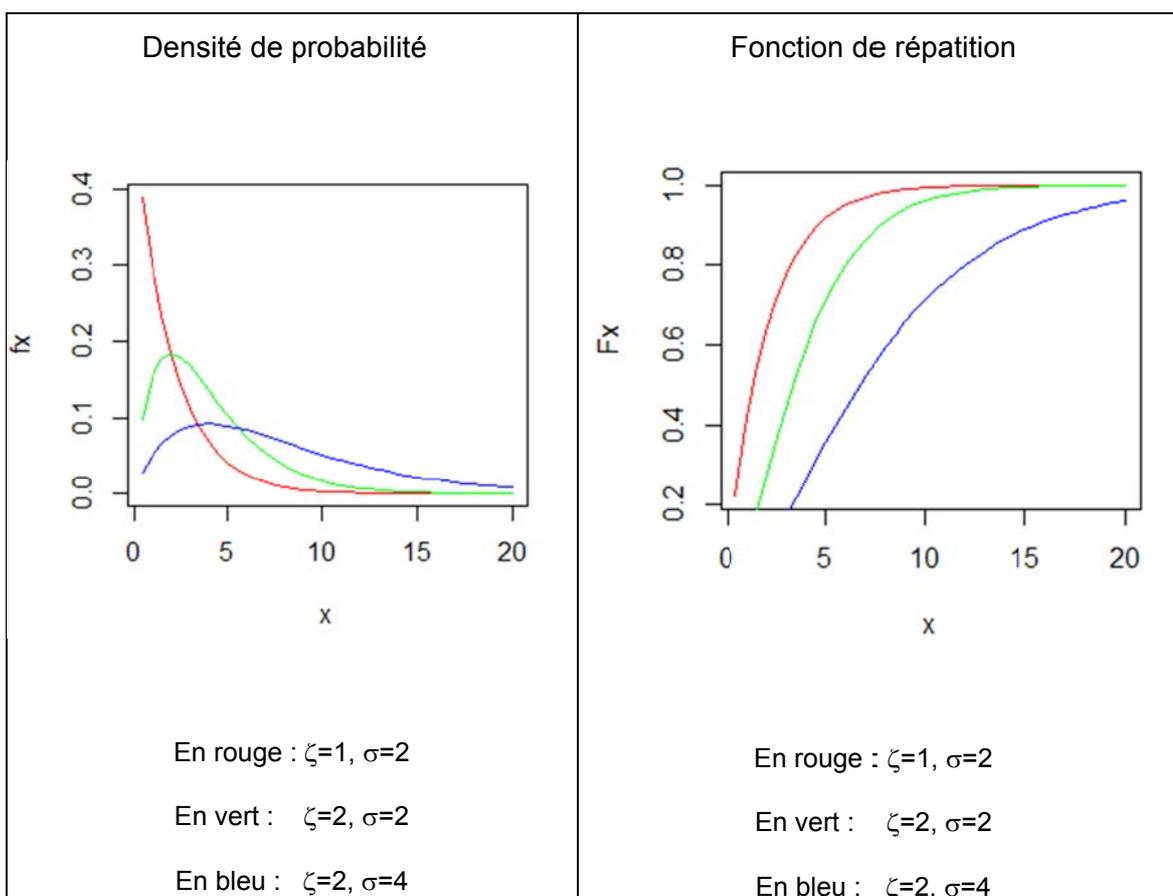
1. LOI GAMMA

C'est une loi à deux paramètres : un paramètre d'échelle σ et un paramètre de forme ζ .
La densité de probabilité est :

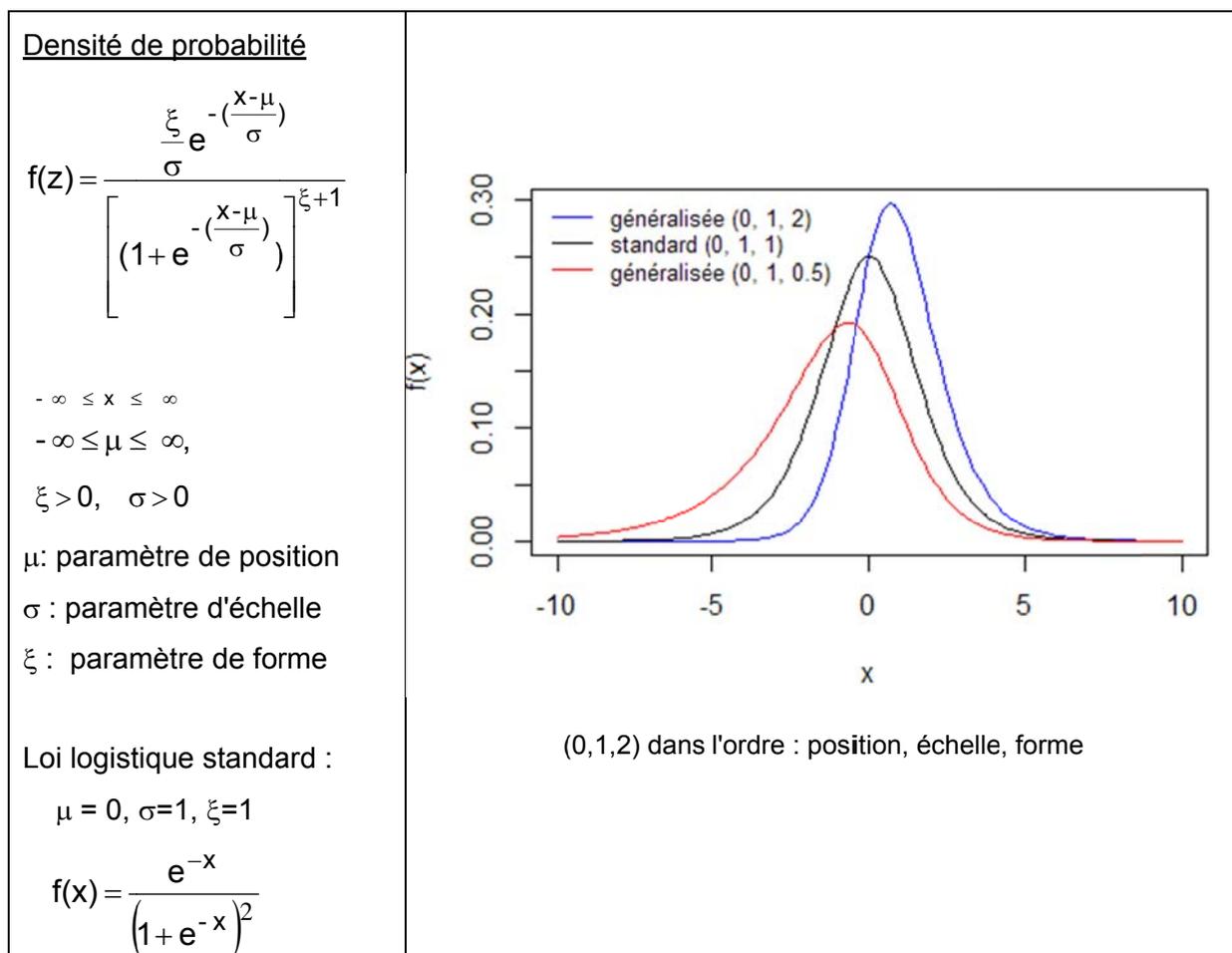
$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(\zeta)} e^{-\frac{x}{\sigma}} \frac{x^{\zeta-1}}{\sigma^{\zeta}} \quad x \geq 0$$

Il n'y a pas d'expression analytique pour la fonction de répartition.

Exemple :



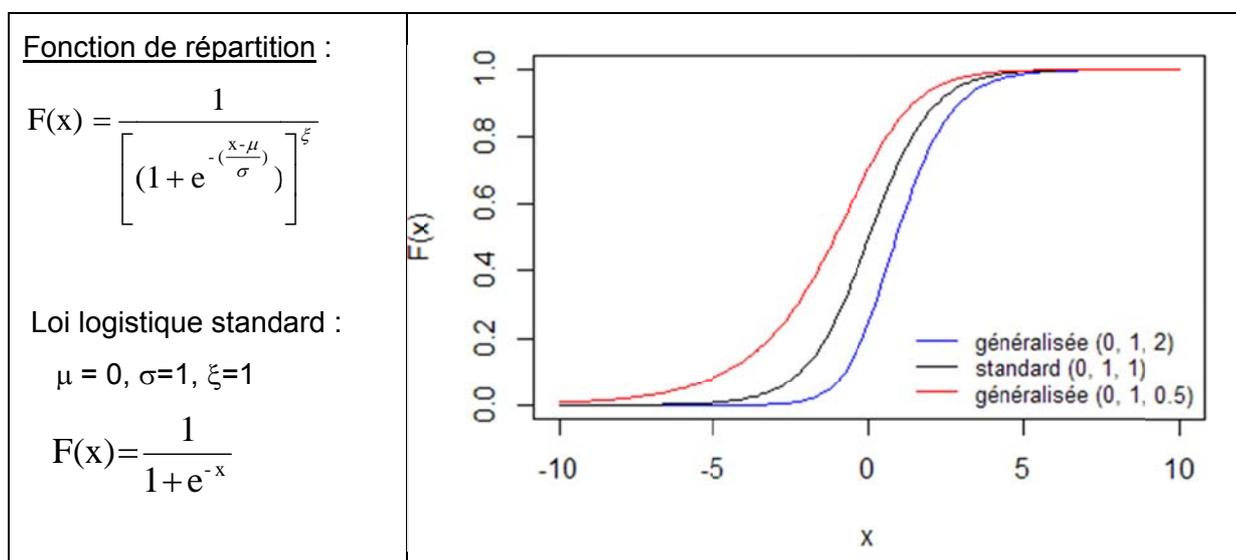
2. LOI LOGISTIQUE GÉNÉRALISÉE (A 3 PARAMÈTRES)



Si $\xi=1$, la distribution est symétrique : c'est la loi logistique à 2 paramètres

Si $\xi > 1$, elle est dissymétrique vers la droite

Si $\xi < 1$, elle est dissymétrique vers la gauche



3. LOIS DE PEARSON

Loi de Pearson de type 1

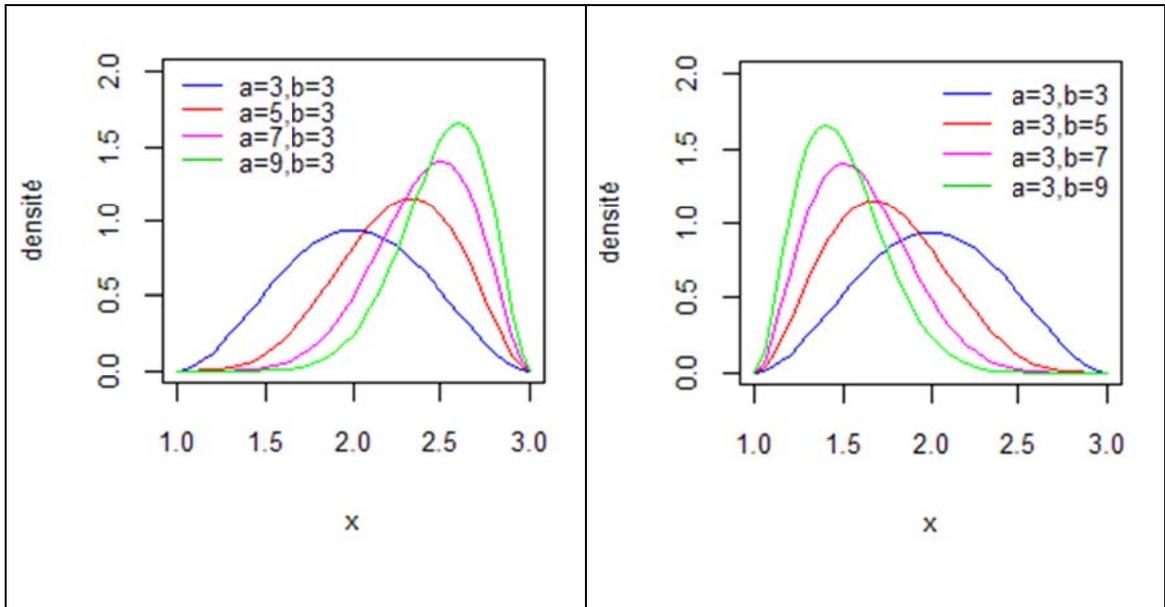
Elle comporte un paramètre de position μ , un paramètre d'échelle σ et deux paramètres de forme, a et b. La densité de probabilité est :

$$f(x) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{a-1} \left(1 - \frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{b-1}$$

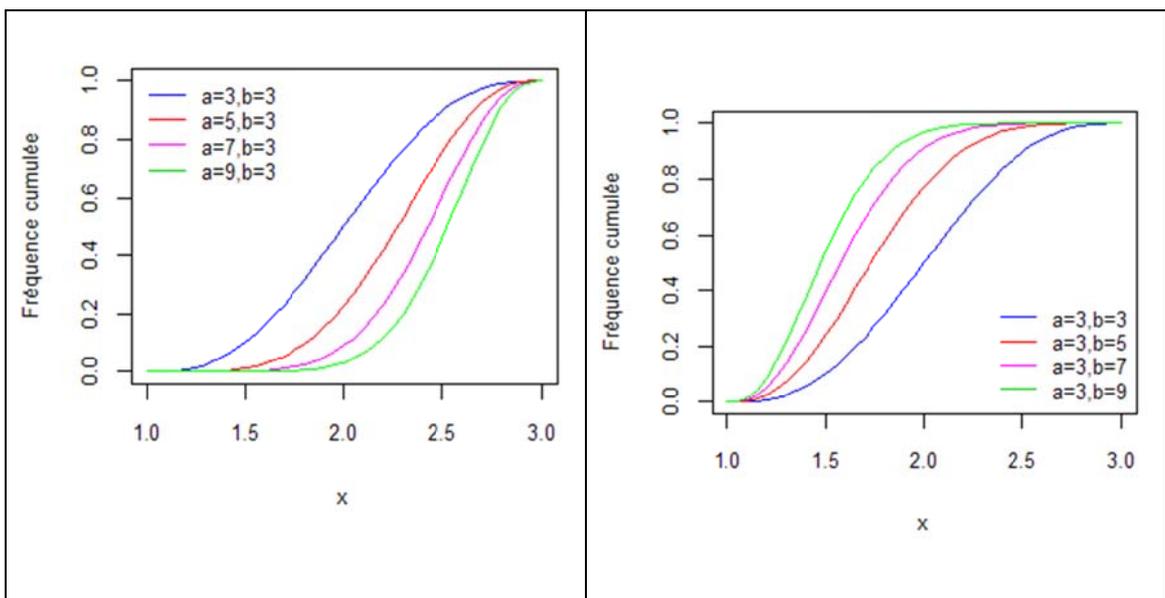
$$a > 0, b > 0, \sigma \neq 0, 0 < \frac{x-\mu}{\sigma} < 1$$

Exemple : pour $\mu = 1$, $\sigma = 2$ et différentes valeurs de a et b :

Fonction densité



Fonction de répartition



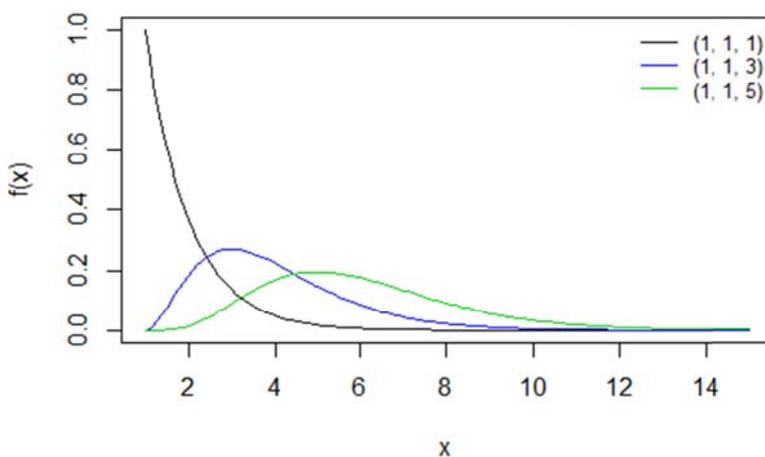
Loi de Pearson de type 3

Elle comporte un paramètre de position μ , un paramètre d'échelle σ et un paramètre de forme ξ . La densité de probabilité est :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \Gamma(\xi)} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{\xi-1} \quad \xi > 0 \quad \sigma \neq 0 \quad \frac{x-\mu}{\sigma} \geq 0$$

Exemple :

- 1) $\mu = 1, \sigma = 1, \xi = 1$
- 2) $\mu = 1, \sigma = 1, \xi = 3$
- 3) $\mu = 1, \sigma = 1, \xi = 5$



Si $\mu=0$, on retrouve la loi gamma à 2 paramètres.

◆◆◆

Annexe 4

Estimateurs à noyaux

L'estimation par noyau (ou encore méthode de Parzen-Rozenblatt) est une méthode non-paramétrique d'estimation de la densité de probabilité d'une variable aléatoire.

Alors que l'histogramme représente une approximation discontinue, sous forme de rectangles, de la densité de probabilité d'une variable aléatoire, la méthode du noyau consiste à retrouver la continuité : pour cela, on remplace le rectangle centré en X et de largeur h par une courbe (le noyau) centrée en x . Plus une observation est proche du point de support x , plus le poids affecté au noyau sera important. Inversement, pour les observations trop éloignées de x , le poids sera faible. L'estimateur est construit par convolution des noyaux. On remplace en quelque sorte une "fenêtre" rectangulaire par une "fenêtre" lissée :

$$f_h(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{x-x_i}{h}\right)$$

N est le nombre de points

h est la largeur de bande (paramètre de lissage)

K est le noyau

La fonction density de R propose plusieurs noyaux dont :

- le noyau gaussien :

$$K(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}u^2}$$

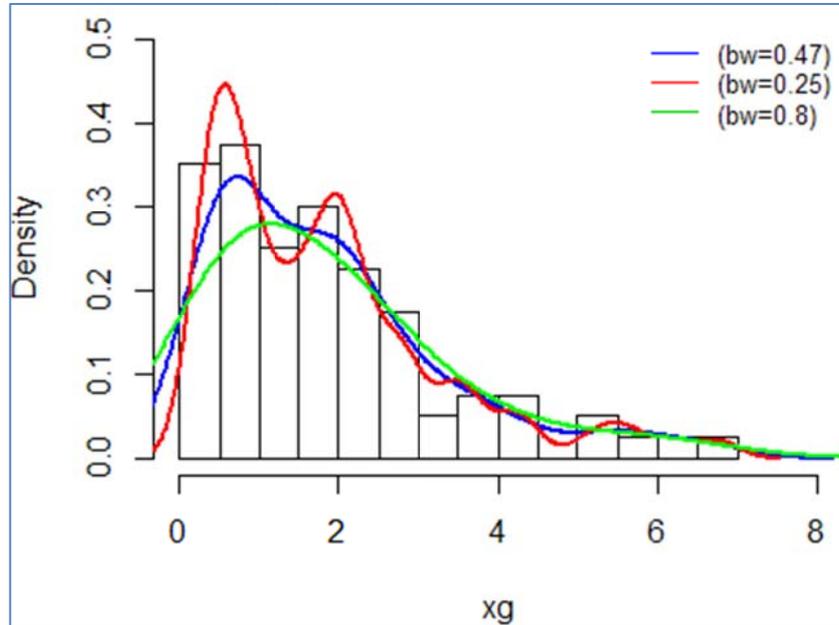
- le noyau d'epanechnikov :

$$K(u) = \frac{3}{4}(1-u^2)$$

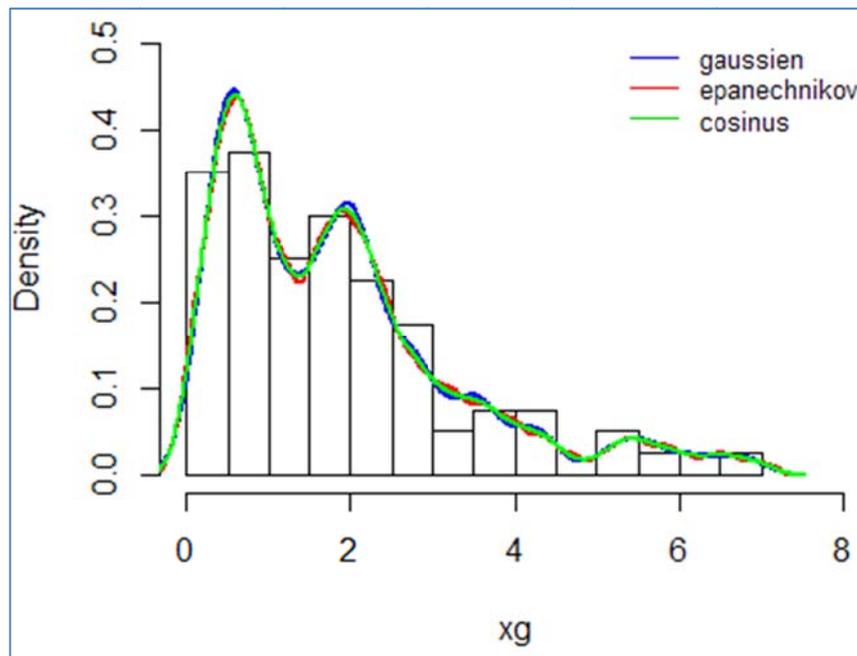
- le noyau cosinus

$$K(u) = \frac{\pi}{4} \cos\left(\frac{\pi}{2}u\right)$$

Exemple d'un noyau gaussien avec différentes valeurs du paramètre de lissage (largeur de bande bw)



Exemple de 3 noyaux (gaussien, epanechnikov, cosinus) avec même largeur de bande



Onema

**Hall C – Le Nadar
5 square Félix Nadar
94300 Vincennes
01 45 14 36 00
www.onema.fr**

BRGM
Direction Eau,
Environnement &
Ecotechnologies
**3 avenue Claude Guillemin
45060 Orléans Cedex 2
02 38 64 34 34**

www.brgm.fr