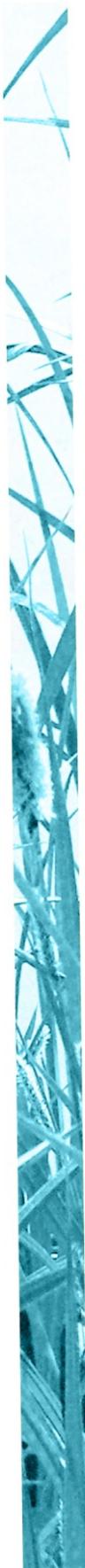


Partenariat 2011 – Savoirs – Action n°1



## Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines – Année 2

*Rapport final*

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

*avril 2012*

## Contexte de programmation et de réalisation

---

Les travaux présentés dans ce rapport ont été réalisés dans le cadre des activités de Service Public du BRGM avec le soutien de l'ONEMA (convention de partenariat – Année 2011).

## Les auteurs

---

*Jean-François Vernoux*  
Hydrogéologue  
[jf.vernoux@brgm.fr](mailto:jf.vernoux@brgm.fr)

*Jean-Jacques Seguin*  
Hydrogéologue  
[jj.seguin@brgm.fr](mailto:jj.seguin@brgm.fr)

## Les correspondants

---

Onema : *Pascal Maugis, DAST, [pascal.maugis@onema.fr](mailto:pascal.maugis@onema.fr)*  
*Bénédicte Augeard, DAST, [benedicte.augeard@onema.fr](mailto:benedicte.augeard@onema.fr)*

Partenaire : *Jean-François Vernoux, BRGM, Service EAU, [jf.vernoux@brgm.fr](mailto:jf.vernoux@brgm.fr)*

Référence du document : Rapport BRGM/RP-61020-FR

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : 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, 93 pages, 40 illustrations, 3 tableaux, 3 annexes.

<b>Droits d'usage :</b>	<i>Accès libre</i>
<b>Couverture géographique :</b>	<i>Nationale</i>
<b>Niveau géographique</b> [un seul choix] :	<i>National</i>
<b>Niveau de lecture</b> [plusieurs choix possibles] :	<i>Professionnels, experts</i>
<b>Nature de la ressource</b> [plusieurs choix possibles] :	<i>Document</i>

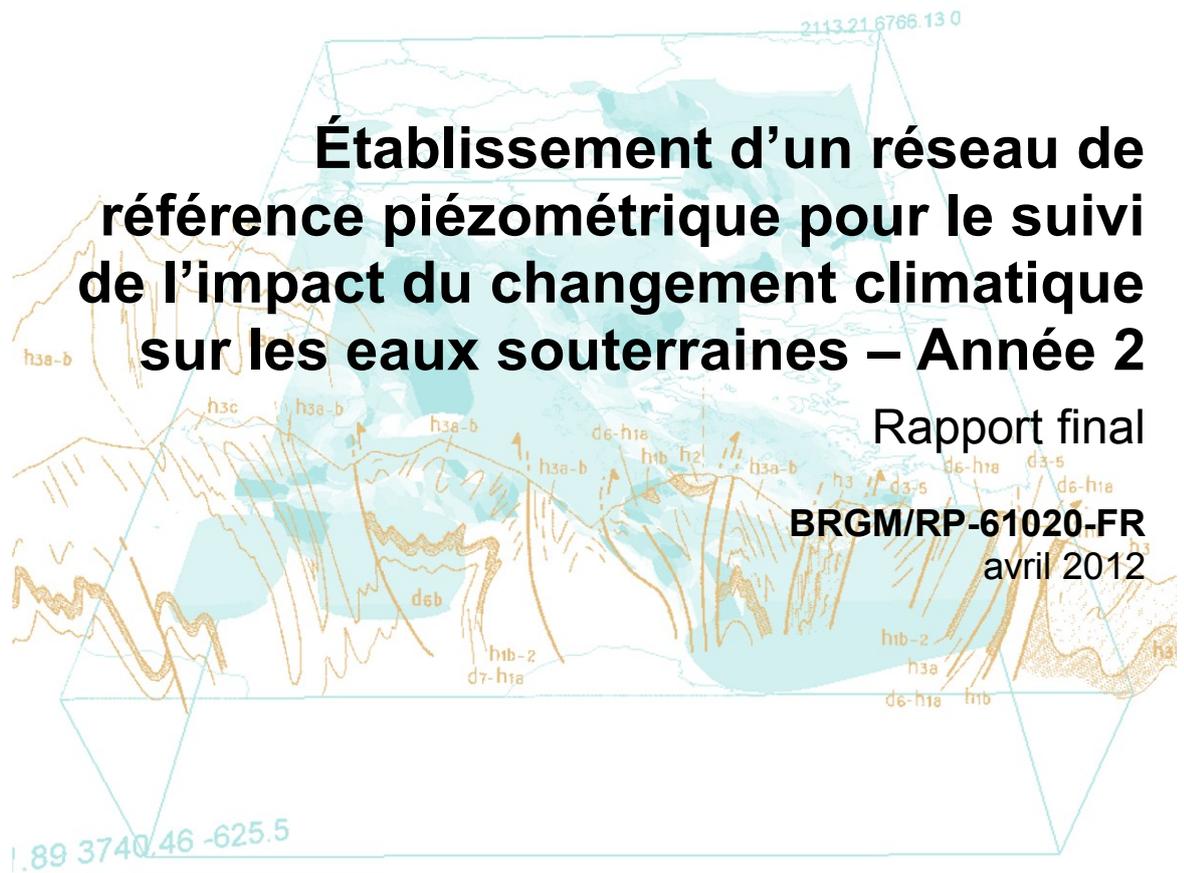


# Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines – Année 2

Rapport final

BRGM/RP-61020-FR

avril 2012





# Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines – Année 2

Rapport final

**BRGM/RP-61020-FR**  
avril 2012

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

**J.F. Vernoux, J.J. Seguin**

**Vérificateur :**

Nom : P. Stollsteiner

Date : 31/01/2013

Signature :

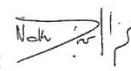


**Approbateur :**

Nom : N. Dorfliger

Date : 11/02/2013

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, niveau piézométrique, eau souterraine, test de Mann-Kendall, détection de tendance

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

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, 7 pages, 40 illustrations, 11 tableaux, 4 annexes.

## Synthèse

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 si celui-ci provoque un changement dans le régime d'infiltration (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. Cet impact étant actuellement mal connu, la mise en place de réseau de référence passe par une analyse des séries piézométriques existantes, issues des réseaux de suivi quantitatif des eaux souterraines.

Le présent rapport rend compte du travail effectué en année 2 du projet avec 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) 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 sous 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.

## Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Influence des prélèvements d'eau souterraine .....</b>	<b>15</b>
2.1. SOURCES DE DONNEES .....	15
2.2. METHODOLOGIE .....	17
2.3. RESULTATS .....	20
<b>3. Analyse statistique des chroniques piézométriques.....</b>	<b>23</b>
3.1. TRAITEMENTS .....	23
3.1.1. Piézomètres sélectionnés.....	23
3.1.2. Variables traitées .....	24
3.1.3. Automatisation .....	24
3.2. PIÉZOMÈTRES AVEC UNE TENDANCE SIGNIFICATIVE (BAISSE OU HAUSSE) .....	27
3.2.1. Tendance à la baisse .....	27
3.2.2. Tendance à la hausse .....	32
3.2.3. Pentas des tendances linéaires.....	33
3.3. DÉTECTION DE RUPTURES .....	36
3.3.1. Piézomètres en baisse .....	36
3.3.2. Piézomètres en hausse.....	36
3.4. CARTOGRAPHIE DES RÉSULTATS.....	39
3.4.1. Localisation des piézomètres avec une tendance significative .....	39
3.4.2. Masses d'eau captées.....	40
3.4.3. Piézomètres influencés par les prélèvements.....	49
<b>4. Essai de mise en relation avec les données climatiques .....</b>	<b>55</b>
4.1. COMPARAISON AVEC LES TENDANCES SUR LES PRECIPITATIONS .....	55
4.2. COMPARAISON AVEC LES TENDANCES SUR LES TEMPERATURES .....	57
4.3. RELATION ENTRE RUPTURES DÉTECTÉES DANS LES SÉRIES ET ÉPISODES CLIMATIQUES PARTICULIERS .....	58
4.4. EFFET DE L'ÉVAPO-TRANSPIRATION .....	62

<b>5. Evolution des niveaux piézométriques en fonction de scénarios de changement climatique.....</b>	<b>69</b>
5.1. EVOLUTION DE LA RECHARGE.....	71
5.2. COMPARAISON AVEC LES TENDANCES ACTUELLES SUR LES PIEZOMETRES.....	73
<b>6. Unités hydrogéologiques de référence pour la constitution du réseau .....</b>	<b>75</b>
6.1. ZONES CLIMATIQUES : LA CARTE AURORE DE METEO-FRANCE.....	75
6.2. INTERSECTION DE LA CARTE "AURORE" AVEC LES MASSES D'EAU ET CARACTÉRISATION DES INTERSECTIONS PAR L'IDPR .....	76
6.2.1. IDPR (Indice de Développement et de Persistance des Réseaux) .....	76
6.2.2. Caractérisation des intersections masses d'eau – zones climatiques et IDPR .....	77
6.3. ZONES DE RECHARGE .....	81
<b>7. Conclusion.....</b>	<b>83</b>
<b>8. Bibliographie .....</b>	<b>85</b>
1. TESTS STATISTIQUES APPLIQUÉS AUX SÉRIES .....	91
1.1. Tests retenus.....	91
1.2. Caractéristiques des tests "tendance/rupture" retenus.....	91
1.3. Rappel sur les tests d'hypothèses.....	92
1.4. Problème de l'autocorrélation .....	93
2. DESCRIPTION DES TESTS .....	95
2.1. Recherche d'une tendance par régression linéaire .....	95
2.2. Recherche d'une tendance par le test de Mann-Kendall.....	97
2.3. Recherche d'une rupture par le test de Pettitt.....	100

## Liste des illustrations

<i>Illustration 1 – Inventaire des points de prélèvements (☆) et des piézomètres (□) montrant une tendance significative .....</i>	<i>17</i>
<i>Illustration 2 - Exemple de zone d'influence d'un pompage .....</i>	<i>18</i>
<i>Illustration 3 – Exemple de recherche de pompages dans un rayon de 5 km autour du piézomètre .....</i>	<i>20</i>

<i>Illustration 4 – Tendances existantes dans certaines séries mais rejetées par les tests statistiques</i> .....	30
<i>Illustration 5 – Valeur des pentes des tendances linéaires à la baisse (piézomètres de type c,b1,b3)</i> .....	31
<i>Illustration 6 - Valeur des pentes des tendances linéaires à la baisse (piézomètres de type c,b1,b3)</i> .....	34
<i>Illustration 7 – Histogramme des pentes pour les piézomètres (c,b1,b2,b3)</i> .....	35
<i>Illustration 8 – Localisation des piézomètres à tendances significatives (baisse et hausse des niveaux), aux risques 1% et 5 % (70 piézomètres)</i> .....	39
<i>Illustration 9 – Localisation des piézomètres dont le niveau est en baisse significative (pour tout ou partie des variables étudiées) et masses d'eau concernées (en jaune clair)</i> .....	40
<i>Illustration 10 – Détail de la carte précédente : localisation des piézomètres dont le niveau est en baisse significative (pour tout ou partie des variables étudiées) et masses d'eau concernées</i> .....	41
<i>Illustration 11 – Localisation des piézomètres dont le niveau est en hausse significative (pour tout ou partie des variables étudiées) et masses d'eau concernées (en bleu clair)</i> .....	42
<i>Illustration 12 – Détail de la carte précédente : localisation des piézomètres dont le niveau est en hausse significative (pour tout ou partie des variables étudiées) et masses d'eau concernées</i> .....	43
<i>Illustration 13 - Masses d'eau captées par les piézomètres en baisse significative et en hausse significative</i> .....	50
<i>Illustration 14 - Piézomètres montrant une tendance à la baisse et influencés par des prélèvements</i> .....	51
<i>Illustration 15 - Piézomètres à la hausse influencés par des prélèvements</i> .....	52
<i>Illustration 16 - Piézomètres mixtes (hausse et baisse) influencés par des prélèvements</i> .....	53
<i>Illustration 17 – Exemple de baisse de niveaux (quasi-linéaire) sous l'effet de prélèvements sur une période de 25 ans</i> .....	54
<i>Illustration 18 – Comparaison entre les tendances détectées sur des séries de précipitations annuelles de 1959 à 2000 et les tendances calculées avec le système Safran</i> .....	55
<i>Illustration 19 – Séries piézométriques en baisse significative et séries de précipitations en baisse ou en hausse significatives</i> .....	56
<i>Illustration 20 - Tendances pour les températures maximum sur la période 1959-2000. upward : à la hausse ; downward : à la baisse. En noir : tendance significative à la fois dans les séries homogénéisées et Safran ; en gris : tendance significative uniquement dans les séries homogénéisées (source : Vidal et al., 2009).</i> .....	57
<i>Illustration 21 – Précipitations annuelles à Melun, Colmar et Reims (données Météo-France)</i> .....	60
<i>Illustration 22 – Précipitations annuelles à Dijon, St-Dizier et St-Quentin (données Météo-France)</i> .....	61
<i>Illustration 23 – Tendance calculée sur l'ETP à la station de Melun (77)</i> .....	62
<i>Illustration 24 - Tendance calculée sur les précipitations à la station de Melun (77)</i> .....	63

<i>Illustration 25 – Tendance (non significative) calculée sur le niveau piézométrique à la station de Saint-Martin Chenetron (77) .....</i>	<i>63</i>
<i>Illustration 26 – Comparaison graphique de la série observée (rouge) et de la série simulée (vert) .....</i>	<i>64</i>
<i>Illustration 27 – Extension de données sur la période 2001-2010 à partir des données d'ETP fournies par Météo-France (station de Melun) .....</i>	<i>65</i>
<i>Illustration 28 – Tendances mensuelles calculées sur l'ETP à la station de Melun (77) .....</i>	<i>66</i>
<i>Illustration 29 - ETP fournies par Météo-France pour la période 2000-2010 et recalculées sans tendance à la hausse.....</i>	<i>67</i>
<i>Illustration 30 – Extension de données sur la période 2001-2010 à partir des données d'ETP de Météo-France (simu1) et recalculées sans tendance (simu2) .....</i>	<i>67</i>
<i>Illustration 31 – Différence entre les niveaux piézométriques calculés par le modèle avec les deux séries d'ETP sur la période 2001-2010.....</i>	<i>68</i>
<i>Illustration 32 - Simulations « AR4 désagrégées par méthode CERFACS dsclim » fournies au projet Explore 2070.....</i>	<i>69</i>
<i>Illustration 33 - Ecart de moyenne annuelle de la température (en °C) quotidienne Safran simulé pour la France métropolitaine entre simulations 2046-2065 et référence 1961-1990 : intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour l'ensemble des 7 simulations climatiques-scénario A1B.....</i>	<i>70</i>
<i>Illustration 34 - Rapports moyens du cumul annuel pluviométrique Safran simulé pour la France métropolitaine, pour la période de référence 1961-1990 aux cumuls simulés sur la période 2046-2065 pour l'ensemble des 7 simulations climatiques-scénario A1B (en %/valeur de réf.) – (MEDDTL, 2012).....</i>	<i>70</i>
<i>illustration 35 : Carte de la recharge temps présent (rapport provisoire Explore 2012).....</i>	<i>72</i>
<i>Illustration 36 - Ecart minimal, moyen et maximal de la recharge temps futur/ temps présent.....</i>	<i>73</i>
<i>Illustration 37 – Comparaison de l'évolution prévue de la recharge dans le futur et des tendances actuelles sur les masses d'eau souterraines.....</i>	<i>74</i>
<i>Illustration 38 – Zones climatiques "Aurore" (source Météo France) .....</i>	<i>75</i>
<i>Illustration 39 – Cartographie de l'IDPR .....</i>	<i>77</i>
<i>Illustration 40 - Carte des masses d'eau affleurantes .....</i>	<i>78</i>
<i>Illustration 41 – Caractérisation par l'IDPR des intersections zones climatiques/masses d'eau et report des piézomètres ayant 25 ans au moins de mesures.....</i>	<i>79</i>
<i>Illustration 42 – Caractérisation par l'IDPR des intersections zones climatiques/masses d'eau et report des piézomètres ayant 15 ans au moins de mesures.....</i>	<i>80</i>
<i>Illustration 43 - Exemple de sélection d'unités hydrogéologiques (IDPR &lt;500, hauteur de précipitations annuelles normales médiane &lt; 700 mm) et masses d'eau correspondantes .....</i>	<i>81</i>

## Liste des tableaux

<i>Tableau 1 - Séquences de traitements des séries de données.....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau 2 - Résultats des tests de détection de tendance à la baisse significative.....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 3 – Résultats des tests de détection de tendance à la hausse significative.....</i>	<i>32</i>
<i>Tableau 4 - Résultats des tests de détection de rupture sur les piézomètres en baisse significative pour les nappes à cycle pluriannuels avec cycles annuels plus marqués et pour les valeurs moyennes, les maxima et minima. ....</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 5 - Résultats des tests de détection de rupture sur les piézomètres en baisse significative pour les nappes à cycle annuels et pour les valeurs moyennes, les maxima et minima annuels. ....</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 6 - Résultats des tests de détection de rupture sur les piézomètres en hausse significative pour les nappes de type c, b1 et b3 et pour les valeurs moyennes, les maxima et minima annuels. ....</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 7 – Masses d'eau captées par les piézomètres en baisse significative (44 piézomètres) .....</i>	<i>46</i>
<i>Tableau 8 – Masses d'eau captées par les piézomètres en hausse significative .....</i>	<i>47</i>
<i>Tableau 9 – Dates de rupture détectées par le test de Pettit et hauteurs de pluie de l'année correspondante.....</i>	<i>59</i>
<i>Tableau 10 – Partition des valeurs de l'IDPR .....</i>	<i>76</i>
<i>Tableau 11- Les 4 possibilités de décision dans la mise en œuvre d'un test.....</i>	<i>93</i>

## **Liste des annexes**

*Annexe 1 - Ouvrages de prélèvement à proximité des piézomètres*

*Annexe 2 - Rappel sur les méthodes de détection d'une non stationnarité dans les séries piézométriques*

*Annexe 3 - Graphiques des niveaux piézométriques en baisse significative*

*Annexe 4 - Graphiques des niveaux piézométriques en hausse significative*

...



# 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. Cet impact est actuellement encore mal connu et doit être évalué.

Le BRGM mène depuis 2010 une étude dont l'objectif est de caractériser l'évolution du niveau des nappes d'eau souterraines sur de longues durées afin d'appréhender le changement climatique et d'évaluer la part du CC dans l'évolution des ressources en eau souterraine. Cette étude permettra également de confirmer les études *a priori* de la vulnérabilité des masses d'eau souterraine continentales du fait des variations de recharge (Cf. fiche « Cartographie de la vulnérabilité des masses d'eau souterraine vis-à-vis du changement climatique »), et côtières, menacées par l'intrusion saline sous l'effet de l'augmentation du niveau de la mer (Cf. fiche « Aquifères côtiers et changement climatique »). Le choix des sites d'adaptation au CC pourra également être modulé en fonction des masses d'eau les plus exposées (Cf. fiche « Changement climatique et adaptation vis à vis de la ressource en eaux souterraines par recharge artificielle »).

Une étude similaire est menée sur les débits dans les rivières par Irstea (Fiche « Evolution des régimes hydrologiques »).

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

- une synthèse bibliographique des travaux réalisés sur l'impact du CC sur le niveau des nappes d'eau souterraines
- 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.

La sectorisation du territoire a été basée sur une cartographie multicritère intégrant entre autres, les masses d'eau souterraine, le référentiel hydrogéologique, les stations hydrométriques, l'occupation du sol, les régions hydroclimatiques, la capacité d'infiltration dans la zone non-saturée, les bassins versants de surface.

Les travaux réalisés en 2010 sur la recherche de tendances sont résumés ci-dessous.

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. 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, 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% d'entre eux, 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 a été 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 pas être mis en œuvre 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.

Les tendances significatives à la baisse des niveaux concernent essentiellement les nappes alluviales dont 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).

Ce travail a été poursuivi en 2011 avec :

- une évaluation de l'influence des prélèvements sur les piézomètres étudiés (partie 1) ;
- de nouveaux tests statistiques comprenant plus de piézomètres (partie 2) ;
- une analyse détaillée du contexte hydro-climatique et anthropique des points montrant une tendance et/ou une rupture pour chercher des facteurs explicatifs (partie 3) ;
- la comparaison des tendances entre niveaux d'eau souterraine et paramètres climatiques sous changement climatique (partie 4) ;
- la définition d'unités hydrogéologiques de référence pour la constitution d'un réseau piézométrique basée sur une sectorisation du territoire (partie 5).



## 2. Influence des prélèvements d'eau souterraine

Une tendance détectée sur une chronique piézométrique, qu'elle soit à la hausse ou à la baisse peut être liée à un effet anthropique. Dans la majorité des cas, cet effet anthropique concerne des prélèvements dans la nappe suivie par le piézomètre et à proximité de ce dernier. Un autre cas de figure concerne les ouvrages situés dans des nappes en relation avec un cours d'eau (nappe alluviale en particulier) susceptibles d'être influencés par des aménagements du cours d'eau (cas de la nappe d'Alsace par exemple).

L'objectif est d'identifier les piézomètres influencés parmi les piézomètres sélectionnés en 2010 pour détecter des évolutions de niveaux de nappes sur de longues durées. Nous nous sommes intéressés ici au cas des prélèvements dans la mesure où des données existent même si elles ne sont pas exhaustives.

### 2.1. SOURCES DE DONNEES

En l'attente d'une banque de données nationale des prélèvements d'eau (BNPE), les données de prélèvements sont disponibles auprès des agences de l'eau et du Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS) du ministère du développement durable qui rassemble les données issues des agences.

Le SOeS nous a transmis son fichier qui couvre la période 2002-2008 avec les informations suivantes :

ANNEE	année AP pour Artois Picardie, RM pour Rhin Meuse, SN pour Seine Normandie, LB pour Loire Bretagne, AG pour Adour Garonne et RMC pour Rhône Méditerranée Corse
CODE_AGENCE	Code INSEE Commune associée au point de prélèvement (consolidé selon référentiel communal le plus récent)
CODE_COMMUNE	nom de la commune
NOM_DE_LA_COMMUNE	Code du département
DEPARTEMENT	Information interne agence de l'eau
CODE_OUVRAGE	Information interne agence de l'eau
NOM_OUVRAGE	Information interne agence de l'eau
CODE_MAITRE_OUVRAGE	Information interne agence de l'eau
NOM_MAITRE_OUVRAGE	Information interne agence de l'eau
CODE_DU_POINT_DE_PRELEVEMENT	Information interne agence de l'eau
NOM_DU_POINT_DE_PRELEVEMENT	Information interne agence de l'eau
VOLUME_ANNUEL	Volume annuel prélevé en m3
VOLUME_ETIAGE	Volume sur la période d'étiage
PERIODE_ETIAGE	Précision sur la période d'étiage (différente selon les bassins)
CODE_SIMPLIFIE_MODE_OBTENTION	F pour forfait, M pour mesure (=compteur)
LIBELLE_MODE_OBTENTION_AGENCE	Libellé du mode d'obtention selon l'agence
ADRESSE	description du point
X	coordonnée X en lambert
Y	coordonnée Y en lambert
QUALITE_LOCALISATION	précision de la localisation AEP pour production d'eau potable, IND pour usage industriel, EDF pour production d'électricité (=refroidissement centrales nucléaires), IRR pour irrigation, HYDRO pour hydroélectricité (nouvel usage à partir de 2008) et ALIM pour alimentation de canaux ((nouvel usage à partir de 2008)
CODE_USAGE_SIMPLIFIE	libellé de l'usage selon agence de l'eau
LIBELLE_USAGE_AGENCE	type de ressource prélevée : ESO pour eau souterraine et ESU pour eau de surface
CODE_MILIEU_SIMPLIFIE	libellé du type de ressource selon agence de l'eau
LIBELLE_MILIEU_AGENCE	code de la zone hydro
ZH	

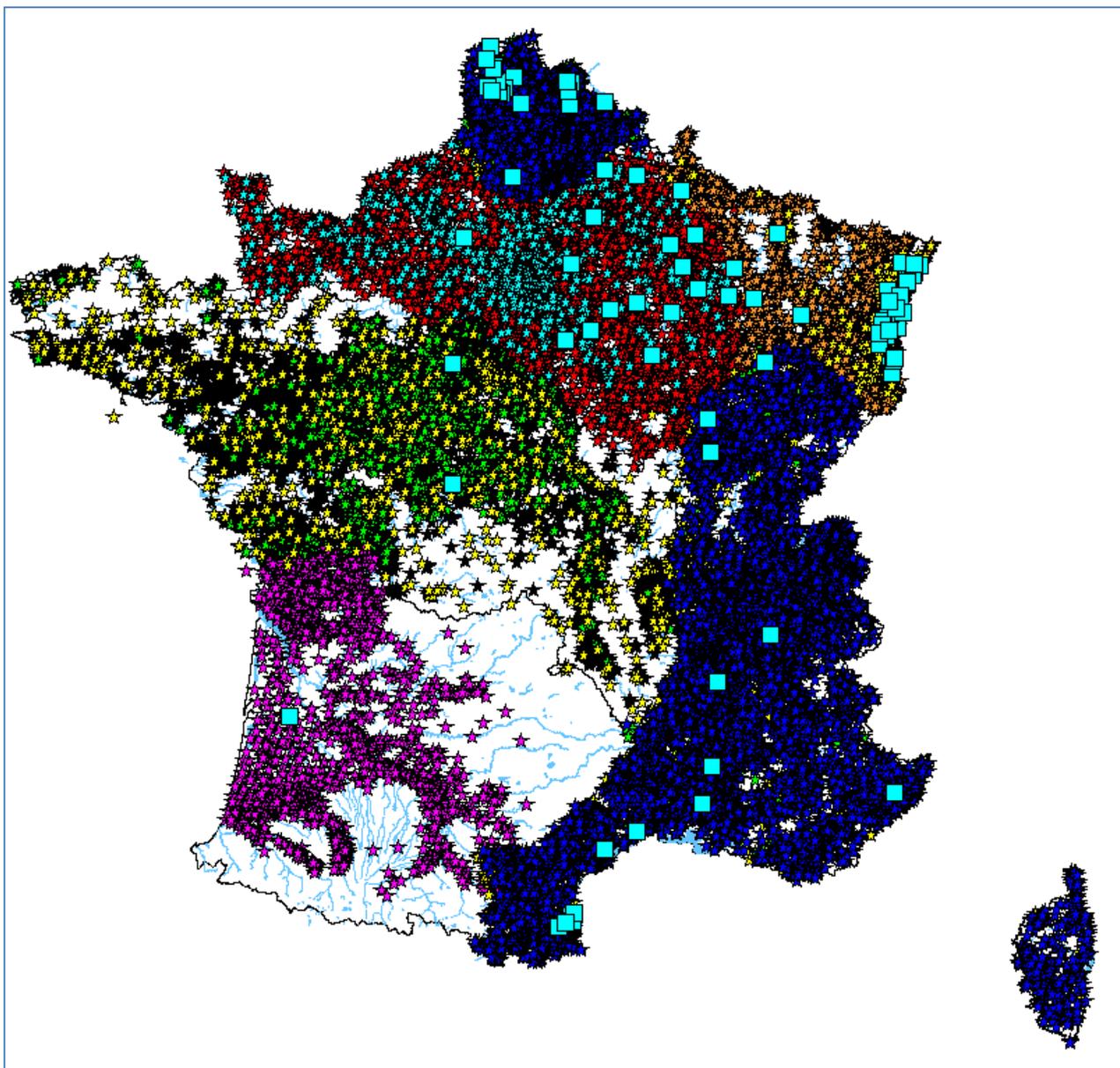
Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines – année 2

CODE_SYSTEME_AQUIFERE	code de l'aquifère selon bdrhf
SURFACE_IRRIGUEE	surface irriguée associée déclarée à l'agence de l'eau
CODE_APE	code ape associé
CODE_NAF	code naf associé à l'usage
LIBELLE_NAF	libellé naf
CODE_MASSE_EAU	code de la masse d'eau prélevée
NOM_MASSE_EAU	nom de la masse d'eau

Pour l'année 2008 par exemple, on compte 84265 points de prélèvements, mais seulement 57% dispose de coordonnées géographiques.

Nous avons donc également contacté chacune des agences pour obtenir un fichier de leurs prélèvements avec les coordonnées. L'ensemble des données recueillies a permis de compléter les informations relatives aux coordonnées géographiques. Il reste néanmoins certains points qui ne sont géolocalisés ou de manière imprécise via l'adresse postale ou au centroïde de la commune . C'est le cas du fichier transmis par l'agence de l'eau Rhin-Meuse qui a par ailleurs réalisé une analyse sur une liste de points que nous leur avons fait parvenir, basée sur leur connaissance de terrain et nous a fourni directement l'information sur le caractère influencé ou non des piézomètres.

L'illustration 1 montre l'ensemble des points de prélèvements pris en compte ainsi que les piézomètres pour lesquels des tendances significatives ont été observées (cf. rapport année 1 et chapitre 4 du présent rapport)



*Illustration 1 – Inventaire des points de prélèvements (☆) et des piézomètres (□) montrant une tendance significative*

## 2.2. METHODOLOGIE

L'impact de prélèvements sur le niveau d'eau dans le piézomètre dépend du temps, de la distance entre l'ouvrage de prélèvement et le piézomètre, du débit pompé et des paramètres hydrodynamiques ; il peut être calculé par la formule de Theis (Illustration 2).

$$s(r,t) = H_0 - H(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

$x$  : variable d'intégration (eq 1)

Avec  $u = Sr^2/4Tt$ , variable réduite et  $W(u)$  une fonction tabulée

Où  $Q$  représente le débit de pompage ( $m^3/s$ ),  $T$  représente la transmissivité de la nappe ( $m^2/s$ ),  $t$  le temps (s),  $s$  le rabattement de la nappe (m),  $H$  le niveau piézométrique dynamique (m),  $r$  la distance au forage (m) et  $S$  le coefficient d'emmagasinement (-).

Rappelons les hypothèses de base de la formule de Theis :

- milieu infini, homogène et isotrope
- transmissivité constante (nappe captive, ou avec approximation, nappe libre peu rabattue)
- charge constante dans la nappe sur une verticale
- forage captant la nappe sur toute son épaisseur, pompant à débit constant

Il est clair que l'hypothèse de pompage à débit constant est rarement respectée, du fait que les pompages ne sont en réalité pas effectués 24h/24 et 7j/7. C'est particulièrement le cas pour les forages agricoles et industriels mais c'est aussi souvent le cas pour les forages d'AEP. Pour limiter cet effet on prend en compte le volume prélevé sur une année et on le divise par la durée de la période de pompage (un an pour les forages industriels et AEP, 4 mois pour les forages agricoles). On peut considérer qu'il existe une certaine incertitude de calcul liée au fait que l'on ne considère pas les périodes exactes de pompage, mais sur le long terme (un an et plus), cet effet est sans doute de faible importance.

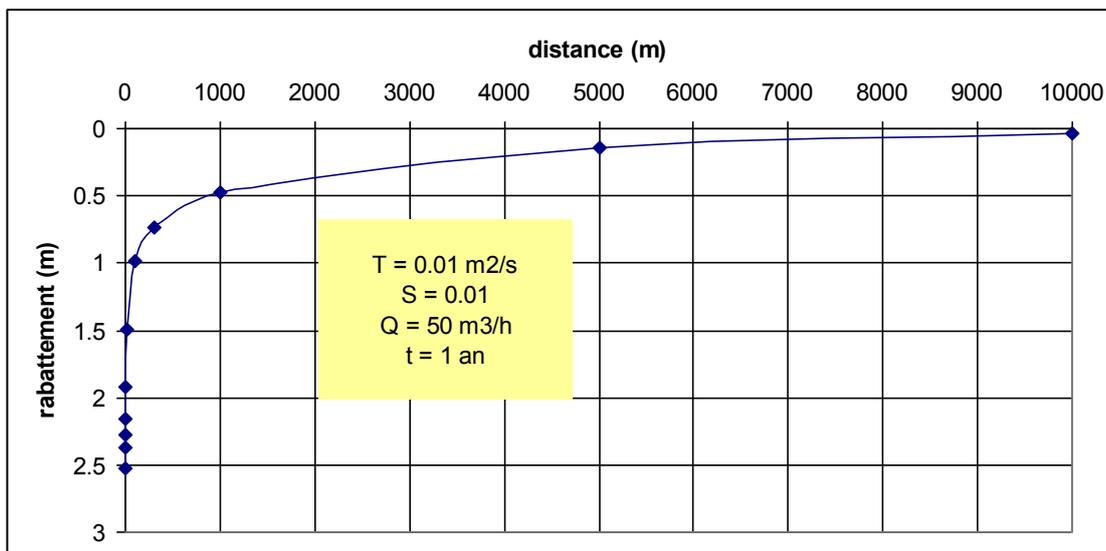


Illustration 2 - Exemple de zone d'influence d'un pompage

La distance d'influence du pompage  $D$  peut être approximée par la formule suivante :

$$D = 1.5 \sqrt{Tt/S} \quad (\text{eq. 2})$$

Où  $T$  représente la transmissivité de la nappe,  $t$  le temps et  $S$  le coefficient d'emmagasinement

Pour des valeurs de  $T$  variant entre 0.05 et 0.001  $\text{m}^2/\text{s}$ , des valeurs de  $S$  variant entre 0.01 et 0.001, et une durée de pompage d'un an, la distance d'influence varie entre 2.7 et 19 km. Dans l'exemple ci-dessus (Illustration 2), la distance d'influence calculée par l'équation 2 est de 8300 m, ce qui correspond à un rabattement de 6 cm. Sur un plan pratique, on peut considérer qu'un rabattement de moins de 10 cm est négligeable, ce qui correspond dans les cas le plus défavorables (forte transmissivité, faible coefficient d'emmagasinement) à une distance comprise entre 5 et 10 km. Cette valeur de 10 cm peut néanmoins s'avérer importante pour les piézomètres présentant de faibles fluctuations (moins d'un m).

L'analyse d'un impact éventuel des prélèvements a été menée de la manière suivante :

- Recherche de forages dans un rayon de 5 km autour du piézomètre (Illustration 3)
- Vérification de la nappe captée à partir des informations masse d'eau et/ou système aquifère
- Estimation des volumes annuels prélevés ramenés à un débit moyen en  $\text{m}^3/\text{h}$  pour l'ensemble des forages situés dans la zone (pour les forages industriels et AEP, on prend une période de 12 mois ; pour les forages agricoles, on prend une période de 4 mois)
- Estimation, pour chaque forage situé à l'intérieur de la zone, de la baisse piézométrique liée aux prélèvements à partir de la formule de Theis ; si les paramètres hydrodynamiques ne sont pas connus, ce qui est souvent le cas, nous avons pris des valeurs moyennes de  $T=0.005 \text{ m}^2/\text{s}$  et  $S=0.01$ . En cas de plusieurs forages, les rabattements sont cumulés.

Pour la plupart des points du bassin Rhin-Meuse, l'agence nous a transmis directement l'information sur le caractère influencé ou non des piézomètres.

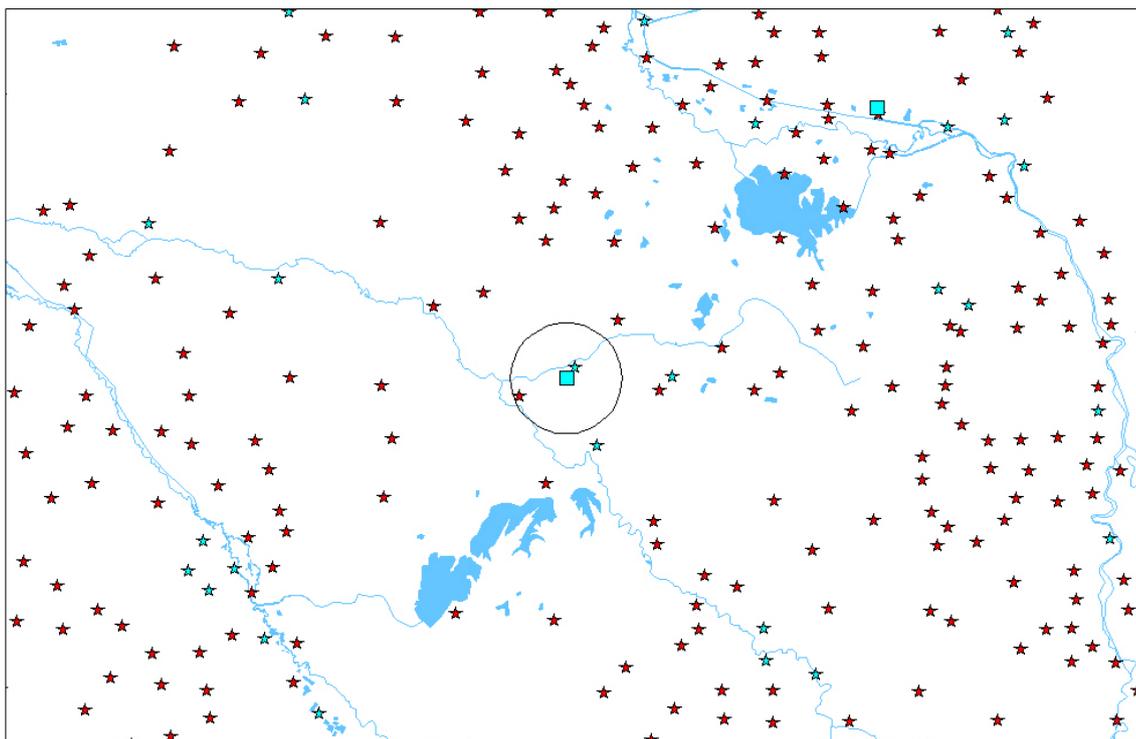


Illustration 3 – Exemple de recherche de pompages dans un rayon de 5 km autour du piézomètre

### 2.3. RESULTATS

Le détail des résultats figurent en annexe 1 avec la distance du pompage le plus influent au piézomètre et le volume annuel prélevé. Le champ « usage » fait référence au type d'usage de l'eau (AEP, irrigation, industrie) avec le code du système aquifère ou de la masse d'eau souterraine dans laquelle s'effectue le prélèvement. On ne prend en compte que les prélèvements dans la même nappe que celle suivie par le piézomètre.

L'objectif n'est pas d'évaluer précisément le degré d'influence des pompages sur le niveau d'eau du piézomètre<sup>1</sup> mais de savoir si le piézomètre est influencé de manière significative ou non. Trois classes d'influence ont été définies :

- 1 : négligeable (rabattement inférieur à 10 cm)
- 2 : faible (rabattement compris entre 10 et 50 cm)
- 3 : important (rabattement supérieur à 50 cm)

Nous avons par ailleurs quelques piézomètres situés à proximité du Rhin qui sont susceptibles d'être affectés par les ouvrages hydrauliques, ce qui complexifie encore l'évaluation de l'impact anthropique sur le niveau piézométrique. Pour les ouvrages sélectionnés en 2012 pour le réseau piézométrique dédié au changement climatique, une évaluation de ces impacts sera réalisée avant la sélection définitive. Cette

---

<sup>1</sup> Il faut noter qu'une évaluation précise de l'impact de prélèvements d'eau sur le niveau d'un piézomètre est actuellement impossible à réaliser en raison du manque de fiabilité des données relatives aux prélèvements.

évaluation sera faite à dire d'expert, auprès du BRGM local, de l'APRONA et de l'agence de l'eau Rhin-Meuse.

Pour les 70 piézomètres présentant une tendance significative à la hausse ou à la baisse, on a finalement (cf. détail dans le tableau ci-dessous) :

- 43 piézomètres très peu influencés
- 11 piézomètres moyennement influencés
- 16 piézomètres fortement influencés

influence	baisse	hausse	mixte	total
négligeable	27	15	1	<b>43</b>
faible	3	7	1	<b>11</b>
importante	13	3	0	<b>16</b>

Pour les piézomètres influencés, il faut garder à l'esprit que cette influence ne signifie pas nécessairement que la tendance à la baisse est due aux prélèvements. En effet on peut très bien avoir des prélèvements importants mais constants durant toute la période de suivi des niveaux piézométriques ; dans ce cas, le niveau mesuré est certes influencé par les prélèvements mais la **tendance** à la baisse est liée à une diminution de la recharge

A l'inverse, il est possible d'avoir des prélèvements combinés à une tendance à la hausse. Ce cas de figure peut s'expliquer par une diminution des prélèvements au cours de la période et donc une remontée du niveau de la nappe pour se rapprocher de son niveau d'équilibre naturel, cela même sans augmentation de la recharge. Ce cas de figure est possible mais difficile à démontrer car cela nécessite des données précises des volumes prélevés au cours du temps, ce dont nous ne disposons pas.

Ces éléments seront pris en compte et précisés pour la définition du réseau en 2012.



### 3. Analyse statistique des chroniques piézométriques

L'objectif est de réaliser des tests statistiques sur les séries piézométriques retenues pour détecter des modifications : tendances, ruptures, saisonnalités. Ces modifications sont recherchées via l'application de tests statistiques, l'hypothèse testée étant la stationnarité des chroniques. Ces tests ont été réalisés en année 1 du projet sur des piézomètres avec au moins 30 ans de données. Sur les 352 piézomètres sélectionnés, 77 ont montré une tendance significative. Pour augmenter le nombre de piézomètres, nous avons testé cette année ceux disposant de plus de 25 ans de chronique. Nous avons par ailleurs retraité l'ensemble des piézomètres avec les variables jugées les plus pertinentes.

On reprend dans l'annexe 2, pour éviter au lecteur de se reporter au rapport de l'année 1 du projet (BRGM/RP-59286-FR), une partie du chapitre 5.1 de ce rapport qui présentait les méthodes utilisées pour détecter une tendance statistiquement significative dans les séries piézométriques.

#### 3.1. TRAITEMENTS

##### 3.1.1. Piézomètres sélectionnés

Par rapport à l'année 1 de l'étude, où la longueur des chroniques piézométriques était de 30 ans au moins, les piézomètres sélectionnés dans la présente étude sont ceux pour lesquels on dispose d'au moins 25 années de mesures.

Comme en année 1, ils sont classés en fonction de leur dynamique :

- type c : annuel (exemples des aquifères alluviaux, des Calcaires du Jurassique)
- type b : double cycle (exemple de la Craie)
  - b1 cycle annuel le plus marqué ,
  - b2 mixte,
  - b3 : le cycle pluriannuel est plus marqué
- type a : pluriannuel (exemple du Calcaire de Beauce)

Au total, 377 piézomètres sont retenus pour les traitements (352 en année 1), se répartissant comme suit :

	Type c	Type b1	Type b2	Type b3	Type a
Année 2	119	132	55	43	28
Année 1	(109)	(125)	(52)	(38)	(28)

### 3.1.2. Variables traitées

Les méthodes décrites ci-dessus ont été appliquées aux **variables annuelles** suivantes calculées ou extraites des séries de données brutes (la plupart à pas de temps irrégulier, sauf les dernières années où le pas de temps est journalier) :

- valeurs moyennes annuelles,
- valeurs maximales relevées chaque année dans la série,
- valeurs minimales relevées chaque année dans la série.

Les valeurs moyennes annuelles correspondent à la moyenne des moyennes mensuelles ; dans le cas où on a une seule valeur par mois, la moyenne mensuelle sera égale à cette valeur. Le nombre de valeurs journalières prises en compte pour le calcul figure dans le listing de résultats (cf. rapport année 1).

Par rapport aux traitements effectués en année 1, les calculs sur les moyennes annuelles des maxima et minima mensuels n'ont pas été reconduits, ces 2 variables n'apportant pas d'information supplémentaire par rapport au maxima et minima de chaque année.

#### Remarque

Lorsqu'une tendance linéaire est supposée, le calcul d'un nombre effectif d'observations indépendantes ( $n^*$ ) se fait en principe avec le coefficient d'autocorrélation de la série des résidus, c'est-à-dire tendance ôtée (cf en particulier Yue et al, 2002, 2003). Oter ou non la tendance est un choix discuté en détail dans la thèse de B. Renard (2006) qui fait remarquer que "*dans la réalité, l'objet du test est justement de déterminer si une tendance est présente et le respect du risque de première espèce doit être évalué sous l'hypothèse  $H_0$ , c'est-à-dire sous l'hypothèse de stationnarité*". Il ne serait donc pas pertinent d'ôter a priori la tendance, ce qui, d'après les tests effectués par B. Renard, conduirait de plus à rejeter trop souvent l'hypothèse  $H_0$ .

En année 1 de l'étude, l'option "tendance ôtée" (option 2) a été utilisée par souci de confrontation avec l'option contraire (option 1). Les résultats de l'option 2 sont un peu différents de ceux de l'option 1 (sur le nombre de variables à la baisse), mais conduisent néanmoins à retenir les mêmes piézomètres que ceux de l'option 1 (à 1 ou 2 près suivant les variables). Dans la présente étude, l'option 2 n'a donc pas été reconduite.

### 3.1.3. Automatisation

Tous les traitements ont été automatisés (boucle sur les piézomètres), à l'exception des graphiques, réalisés avec Excel ou XLSTAT en important les fichiers de sortie du programme Fortran.

Pour le test de Shapiro-Wilk, la programmation utilise l'algorithme AS R94 (SWILK) publié dans la revue *Applied Statistics Journal* (1995) Vol.44, n°4. Tous les autres tests ont été "écrits" puis validés par utilisation des logiciels XLSTAT et R.

Les séquences de calcul sont résumées dans le tableau ci-après.

Remarque : lorsque test de rupture et test de tendance sont simultanément significatifs, rigoureusement, il faudrait refaire un calcul de tendance de part et d'autre

de la date de rupture. Mais le nombre de données sur chaque partie de la chronique devient alors un facteur limitant à l'application des tests.

On présente d'abord les résultats permettant d'identifier les piézomètres présentant une tendance à la baisse significative, puis ceux permettant d'identifier les piézomètres présentant une tendance à la hausse significative. Pour le détail des calculs et des tests se reporter au rapport de l'année 1.

<b>Calculs préalables</b>	Statistiques de base sur les données initiales (à pas de temps irrégulier) : - nombre d'années, nombre de valeurs par année, - moyenne, écart-type, coefficient de variation, - maximum annuel, minimum annuel	
	Construction des séries à traiter pour chaque piézomètre avec les variables suivantes : - valeurs moyennes annuelles (moyenne des moyennes mensuelles) - valeurs maximales observées chaque année (maximum journalier) - valeurs minimales observées chaque année (minimum journalier)	
<b>Calcul des coefficients d'autocorrélation</b>	Calcul de l'autocorrélation sur chacune des séries pour chaque variable	
<b>Recherche de tendance</b>	<b>Régression linéaire</b> ( $Y = at + b + E$ )	
	- calcul de la droite de régression $D = at + b$ - calcul des résidus $Y - D$ - calcul de la moyenne des résidus, - test de Shapiro-Wilk pour vérifier la "normalité" de la distribution, - test de Durbin-Watson pour vérifier l'absence d'autocorrélation des résidus.	
	Autocorrélation non significative dans la série	Autocorrélation significative dans la série (test de Ljung-Box)
	Test sur le coefficient de régression	Régression linéaire modifiée : calcul d'un nombre d'observations supposées indépendantes $n^* < n$ (Bayley et Hammersley, 1946)
	<b>Mann Kendall</b>	
	Autocorrélation non significative dans la série	Autocorrélation significative dans la série (test de Ljung-Box)
Test de Mann-Kendall et calcul de la pente par la méthode de Sen.	Test de Mann-Kendall modifié : calcul d'un nombre d'observations supposées indépendantes $n^* < n$ 1) Bayley et Hammersley, 1946 2) Hamed et Rao (1998)	

Tableau 1 - Séquences de traitements des séries de données

## 3.2. PIÉZOMÈTRES AVEC UNE TENDANCE SIGNIFICATIVE (BAISSE OU HAUSSE)

Sur l'ensemble des piézomètres traités, **70 présentent une tendance significative** (au seuil de risque de 5% et pour certains de 1%) : à la baisse pour 44 d'entre eux (Tableau 2), à la hausse pour 26 (Tableau 3). Les graphiques de l'évolution des niveaux pour ces piézomètres sont reportés en annexe.

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 6 (3 variables, 2 méthodes). La tendance est jugée significative pour au moins une méthode et une variable (score minimum de 1).

### 3.2.1. Tendance à la baisse

- Nappes à cycles annuels (type c)

119 piézomètres ont été traités, soit 10 de plus qu'en année 1 de l'étude.

37 présentent une tendance à la baisse significative (au seuil de 5% ou de 1%) pour au moins une méthode et une variable (tableau 3), soit 31 % des piézomètres traités.

16 ont un score supérieur ou égal à 4.

La tendance à la baisse sur les séries de valeurs moyennes est détectée sur :

- 22 séries par les tests de régression,
- 19 séries par les tests de Mann-Kendall.

La tendance à la baisse sur les séries de valeurs minimales est détectée sur 24 séries par les tests de régression et par les tests de Mann-Kendall

La tendance à la baisse sur les séries de valeurs maximales est détectée sur :

- 21 séries par les tests de régression,
- 18 séries par les tests de Mann-Kendall.

Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique  
sur les eaux souterraines – année 2

Piezomètres	Type	REGMOY	REGMAX	REGMIN	MKMOY	MKMAX	MKMIN	Score
00026X0040	c	1	1	1	1		1	5
01377X0205	c	1						1
01593X0014	c	1			1			2
01918X0006	c	1			1			2
01995X0007	c						1	1
02267X0030	c			1			1	2
02344X0055	c		1		1	1		3
02344X0062	c	1	1	1			1	4
02344X0070	c	1						1
02347X0014	c		1			1		2
02351X0013	c		1			1		2
02352X0002	c		1			1		2
02621X0085	c	1	1	1	1	1	1	6
02718X0017	c			1				1
03074X0013	c			1			1	2
03077X0238	c	1	1	1	1	1	1	6
03078X0014	c	1		1			1	3
03422X0029	c			1			1	2
03424X0029	c			1			1	2
03428X0067	c		1	1			1	3
03431X0027	c	1	1		1	1		4
03693X0017	c	1	1	1	1	1	1	6
03788X0039	c	1	1		1	1		4
03795X0037	c		1					1
03795X0093	c	1	1		1	1		4
04697X0004	c					1		1
05445X0081	c			1			1	2
07488X0011	c	1	1	1	1	1	1	6
08511X0036	c	1	1	1	1	1	1	6
09146X0074	c	1		1			1	3
09665X0073	c			1			1	2
09724X0023	c	1	1	1	1	1	1	6
09907X0321	c	1		1	1		1	4
10908X0263	c	1	1	1	1	1	1	6
10912X0024	c	1	1	1	1	1	1	6
10912X0061	c	1	1	1	1	1	1	6
10915X0255	c	1	1	1	1	1	1	6
10916X0061	c	1		1	1		1	4
00225X0077	b1		1			1		2
02615X0020	b1	1		1	1		1	4
03043X0056	b1	1		1	1		1	4
04134X0022	b1	1	1		1			3
04138X0019	b1	1	1			1		3
05264X0029	b1	1	1	1	1	1	1	6

*Tableau 2 - Résultats des tests de détection de tendance à la baisse significative*

- Nappes à doubles cycles avec l'annuel plus marqué (type b1)

132 piézomètres ont été traités, soit 6 de plus qu'en année 1 de l'étude.

6 présentent une tendance à la baisse significative (au seuil de 5% ou de 1%) pour au moins une méthode et une variable, soit 5 % des piézomètres traités.

3 ont un score supérieur ou égal à 4..

La tendance à la baisse sur les séries de valeurs moyennes est détectée sur :

- 5 séries par les tests de régression,
- 4 séries par les tests de Mann-Kendall.

La tendance à la baisse sur les séries de valeurs maximales est détectée sur :

- 4 séries par les tests de régression,
- 3 séries par les tests de Mann-Kendall.

La tendance à la baisse sur les séries de valeurs minimales est détectée sur :

- 3 séries par les tests de régression,
- 3 séries par les tests de Mann-Kendall.

- Nappes à cycles mixtes (type b2)

55 piézomètres ont été traités, soit 3 de plus qu'en année 1 de l'étude.

Aucune baisse significative n'est détectée

- Nappes à doubles cycles avec les cycles pluriannuels plus marqués (type b3)

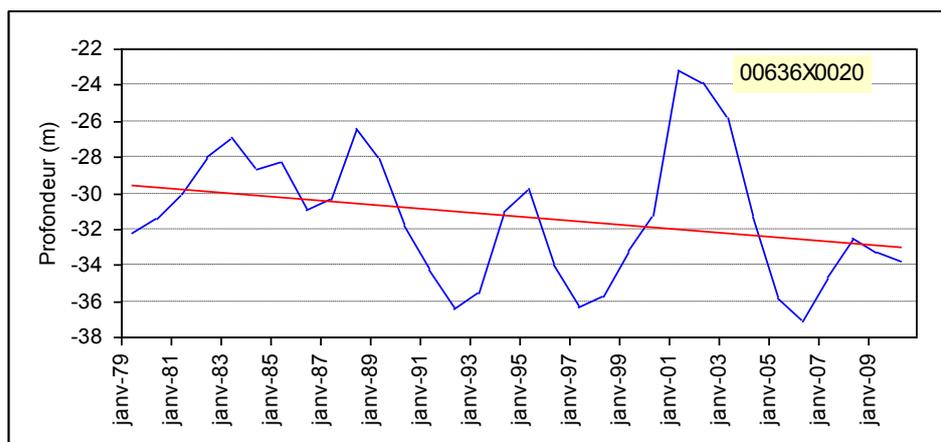
43 piézomètres ont été traités, soit 5 de plus qu'en année 1 de l'étude.

Aucune baisse significative n'est détectée

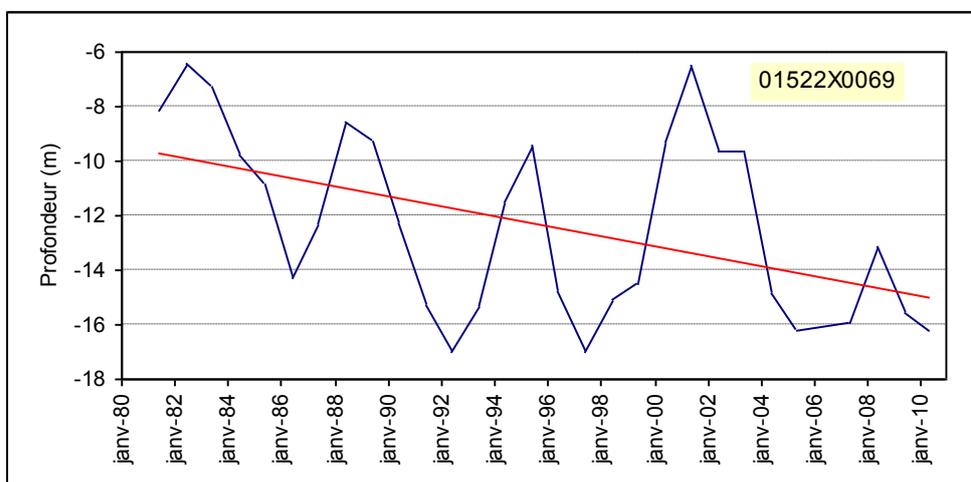
- Nappes à cycles pluriannuels (type a)

Ces nappes ne devraient théoriquement pas relever des traitements ci-dessus en raison de leur très forte inertie (fortes autocorrélations jusqu'à 5 ans pour les valeurs moyennes annuelles) et des grands cycles qui les caractérisent (cf. rapport de l'année 1).

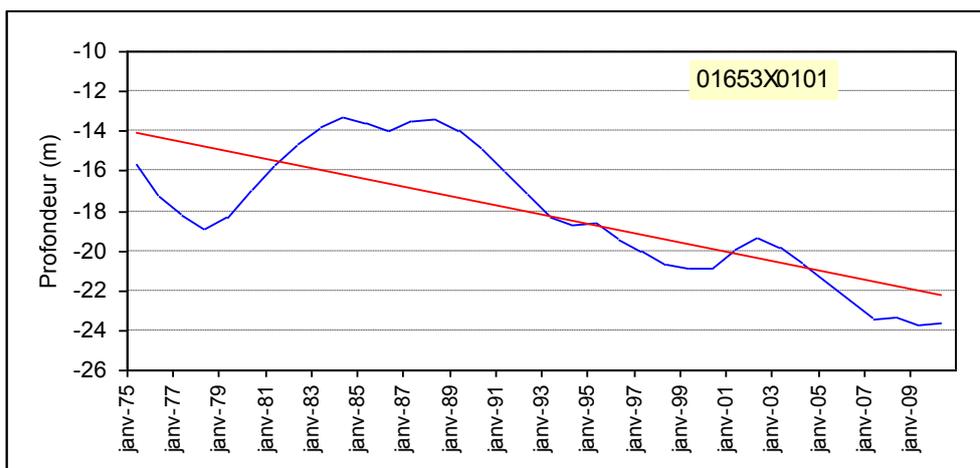
**Remarque** : qu'aucune baisse significative (ou très peu), n'ait été détectée sur les piézomètres de type b2 ou b3 n'implique pas l'absence d'une baisse sensible sur certains de ces piézomètres, comme le montrent les graphiques de l'illustration 4 ci-après. Il n'y a simplement pas eu de traitement statistique possible, en raison de la forte autocorrélation des valeurs et d'un faible nombre de cycles .



Hangest-en-Santerre - Masse d'eau 1012 : Craie de la moyenne vallée de la Somme



Piézomètre Théméricourt (95) - Masse d'eau 3107 : Éocène et craie du Vexin français



Piézomètre St-Avoid (57) - Masse d'eau 2028 : Grès du Trias inférieur du bassin houiller

Illustration 4 – Tendances existantes dans certaines séries mais rejetées par les tests statistiques

Les valeurs des pentes (calculées par la méthode de Sen) des tendances linéaires pour les séries piézométriques des moyennes annuelles statistiquement non rejetées sont reportées sur la carte ci-dessous (en négatif et en cm/an) (Illustration 5).

Hormis quelques points dans le bassin Rhône-Méditerranée, les pentes sont inférieures à 10 cm/an (soit une baisse inférieure à 3 m en 30 ans).

La valeur 0 est un code indiquant que la baisse concerne une série de valeurs minimales ou maximales.

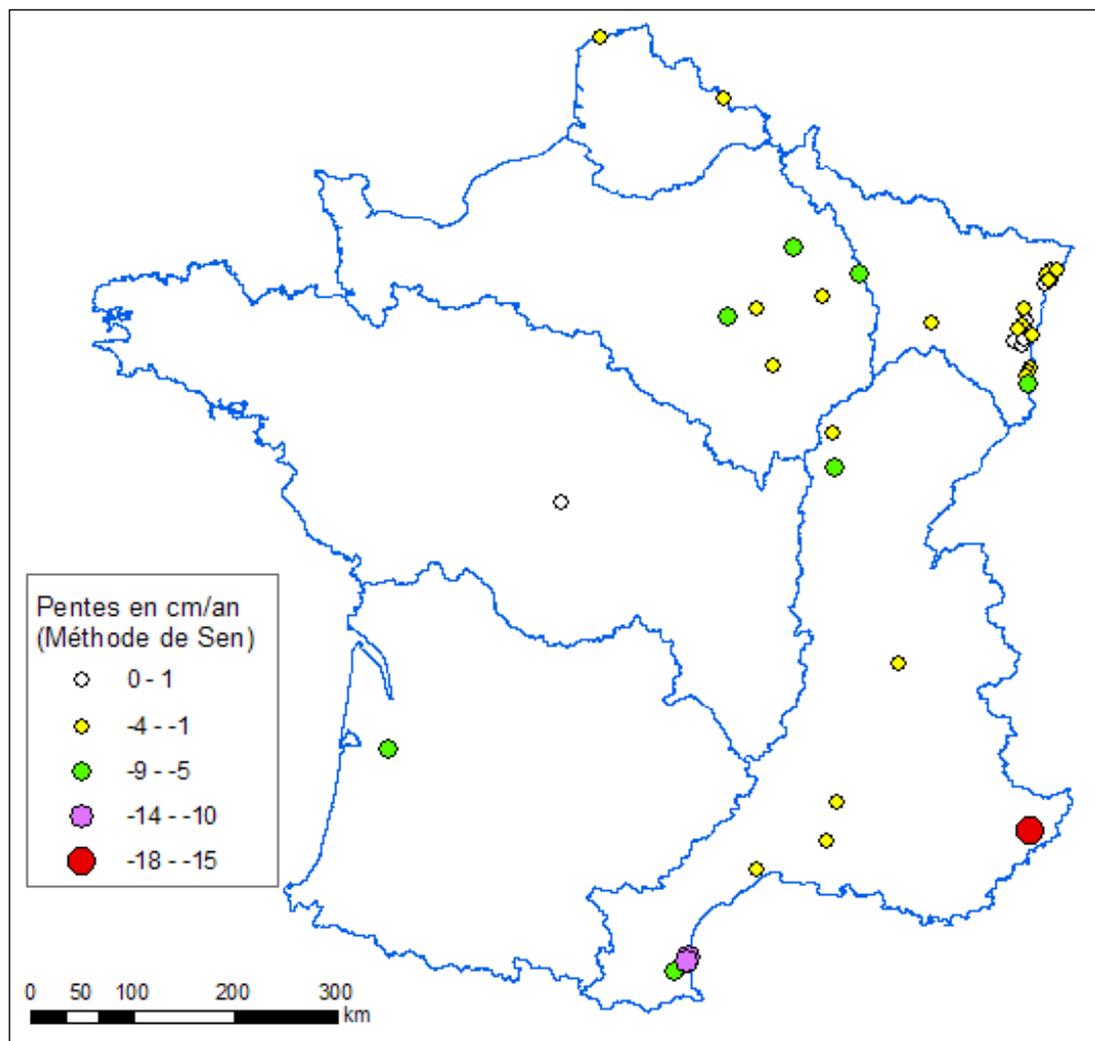


Illustration 5 – Valeur des pentes des tendances linéaires à la baisse (piézomètres de type c, b1, b3)

### 3.2.2. Tendance à la hausse

Sur l'ensemble des piézomètres traités, 26 présentent une tendance à la hausse significative. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 5.

Le "score" est calculé de la même façon que pour les piézomètres à la baisse ; en particulier, lorsque les conditions d'application de la régression ne sont pas satisfaites sur une variable, le calcul du "score" n'en tient pas compte.

Piézomètres	Type	REGMOY	REGMAX	REGMIN	MKMOY	MKMAX	MKMIN	Score
00115X0011	c		1			1		2
00117X0023	c		1			1		2
00146B0737	c			1				1
00172X0037	c		1					1
00173X0083	c						1	1
01853X0002	c		1			1		2
02347X0062	c			1			1	2
02653X0001	c	1		1	1		1	4
02663X0001	c		1			1		2
02726X0016	c	1		1	1		1	4
03081X0038	c					1		1
03082X0023	c			1			1	2
03782X0080	c	1			1			2
00065X0011	b1		1					1
00122X0064	b1		1					1
00147D0218	b1	1	1	1	1	1	1	6
00187X0005	b1	1	1		1	1		4
00203A0033	b1		1			1		2
00207X0133	b1	1	1	1	1	1	1	6
00625X0002	b1	1	1	1				3
00675X0019	b1			1				1
03314X1035	b1			1				1
08184X0084	b1	1		1	1			3
01066X0133	b3	1		1				2
01256X0002	b3		1			1		2
01987X0009	b3	1	1	1				3

Tableau 3 – Résultats des tests de détection de tendance à la hausse significative

- Nappes à cycles annuels (type c)

Sur les 119 piézomètres traités :

13 présentent une tendance à la hausse significative (au seuil de 5% ou de 1%) pour au moins une méthode et une variable, soit 12 % des piézomètres traités.

2 ont un score supérieur ou égal à 4.

La tendance à la hausse sur les séries de valeurs moyennes est détectée sur 3 séries par les tests de régression et de Mann-Kendall (les mêmes piézomètres).

La tendance à la hausse sur les séries de valeurs maximales est détectée sur 6 séries par les tests de régression et sur 5 séries par les tests de Mann-Kendall.

La tendance à la hausse sur les séries de valeurs minimales est détectée sur 5 séries par les tests de régression et sur 5 séries par les tests de Mann-Kendall.

- Nappes à double cycle avec l'annuel plus marqué (type b1)

Sur les 132 piézomètres traités, 10 présentent une tendance à la hausse significative (au seuil de 5% ou de 1%) pour au moins une méthode et une variable, soit 8% des piézomètres traités.

3 ont un score supérieur ou égal à 4..

La tendance à la hausse sur les séries de valeurs moyennes est détectée sur :

- 5 séries par les tests de régression,
- 4 séries par les tests de Mann-Kendall.

La tendance à la hausse sur les séries de valeurs maximales est détectée sur :

- 7 séries par les tests de régression,
- 4 séries par les tests de Mann-Kendall.

La tendance à la hausse sur les séries de valeurs minimales est détectée sur :

- 6 séries par les tests de régression,
- 2 séries par les tests de Mann-Kendall.

- Nappes à cycle mixte (type b2)

Sur les 55 piézomètres traités, aucune hausse significative n'est détectée.

- Nappes à double cycle avec les cycles pluriannuels plus marqués (type b3)

Sur les 43 piézomètres traités, 3 présentent une hausse significative des niveaux (tableau 5 ci-dessus).

### 3.2.3. Pentés des tendances linéaires

Les valeurs des pentes (calculées par la méthode de Sen) des tendances linéaires pour les séries piézométriques des moyennes annuelles statistiquement non rejetées sont reportées sur la carte de l'illustration 6 (en cm/an).

Une valeur de 0 indique que la hausse concerne une série de valeurs minimales ou maximales.

Les piézomètres à plus forte hausse se localisent essentiellement dans le bassin Artois-Picardie : pentes de 6 à 13 cm/an (soit sur 30 ans une hausse de 1.8 à 3.9 m).

Un histogramme des valeurs pour l'ensemble des piézomètres de type c, b1, b2, b3 est présenté par l'illustration 7 ( avec aussi, pour comparaison, l'histogramme des pentes calculées par régression).

Dans cet ensemble, 167 piézomètres (48 %) peuvent être considérés comme "stables", avec des pentes comprises entre -1 cm et +1 cm (méthode de Sen).

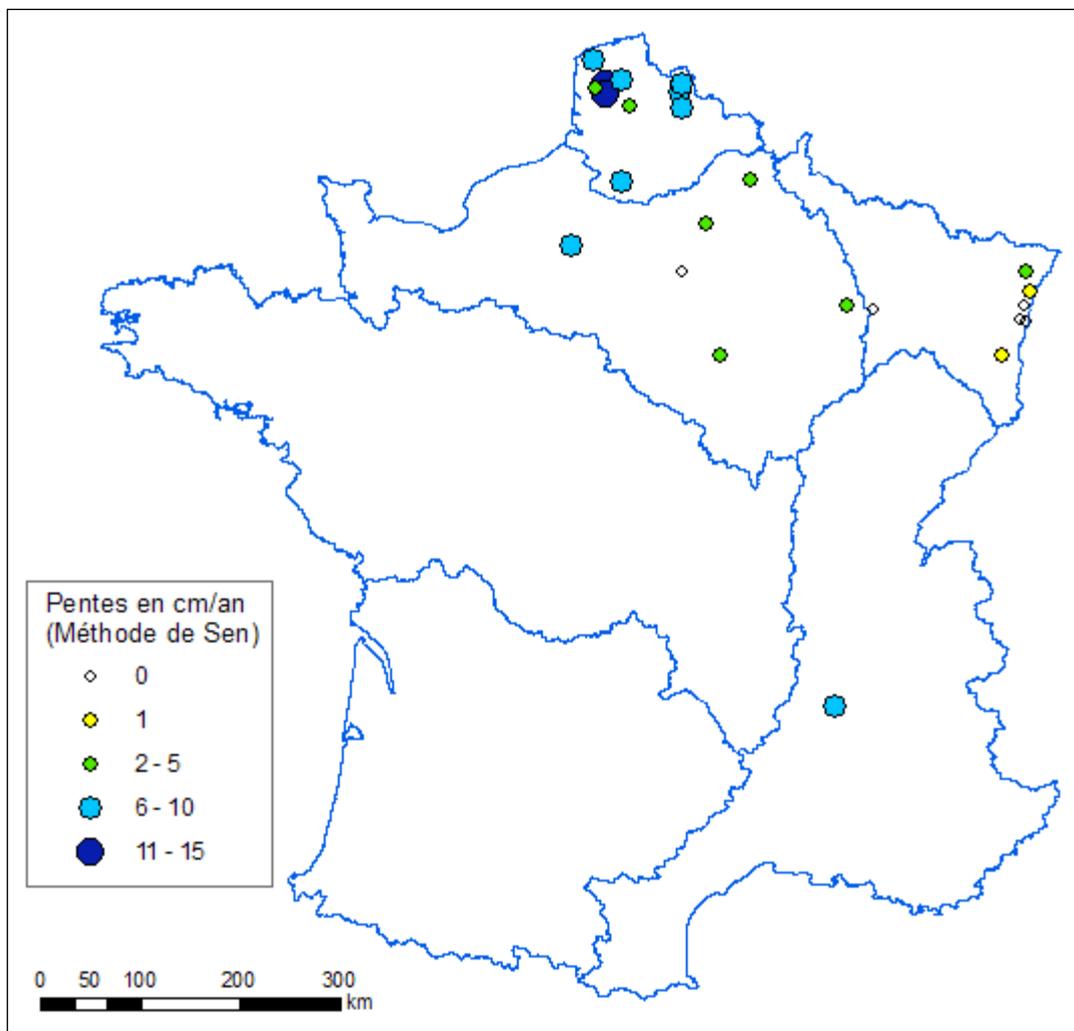


Illustration 6 - Valeur des pentes des tendances linéaires à la baisse (piézomètres de type c,b1,b3)

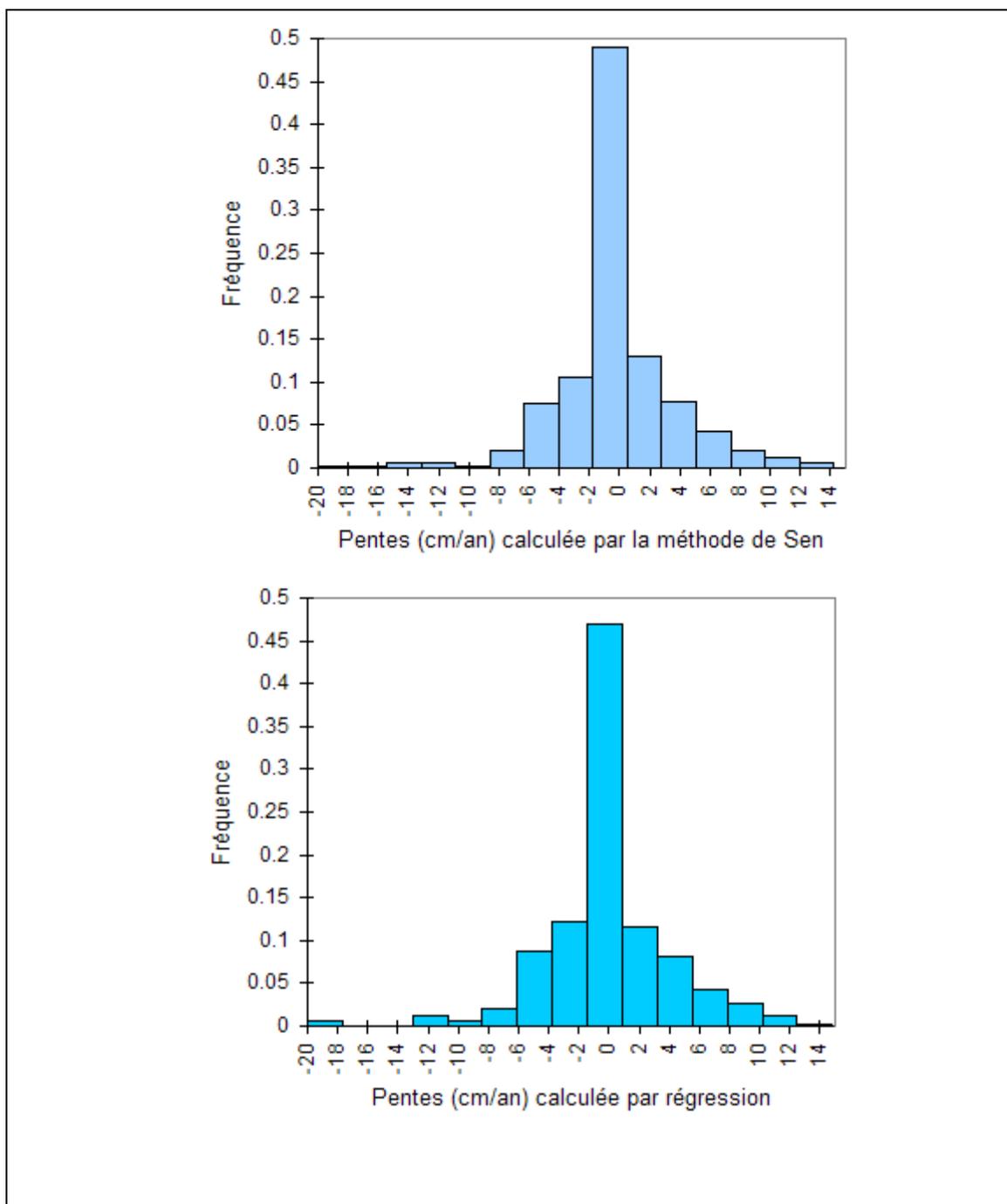


Illustration 7 – Histogramme des pentes pour les piézomètres (c,b1,b2,b3)

### 3.3. DÉTECTION DE RUPTURES

#### 3.3.1. Piézomètres en baisse

Sur les 37 piézomètres de type c en baisse significative, 28 présentent une rupture. Parmi les dates de rupture indiquées par le test de Pettit, reviennent très fréquemment les années **1984-1985**, **1989-1990**, **1998**, puis **1971** et **1986**. Les piézomètres concernés sont indiqués dans le Tableau 5 ci-après.

Les 6 piézomètres de type b1 détectées en baisse significative présentent une rupture. Comme dans le cas précédent, les années **1989-1990** sont fréquemment détectées comme dates de rupture significative (Tableau 4) ainsi que **1971**

	Date de rupture Moyennes annuelles	Date de rupture minima annuels	Date de rupture maxima annuels
00225X0077	1990	1990	1990
02615X0020	1989	1989	1989
03043X0056	1989	1989	1989
04134X0022	1971	1971	1971
04138X0019	1972	1972	1972
05264X0029	1996	1996	1996

*Tableau 4 - Résultats des tests de détection de rupture sur les piézomètres en baisse significative pour les nappes à cycle pluriannuels avec cycles annuels plus marqués et pour les valeurs moyennes, les maxima et minima.*

#### 3.3.2. Piézomètres en hausse

Sur les 26 piézomètres en hausse significative, 18 présentent une rupture dans les séries de valeurs (Tableau 6). Parmi les dates de rupture indiquées par le test de Pettit, reviennent très fréquemment les années **1993-1994**, **1999**, puis les années 1977 et 1982.

Ces ruptures peuvent être mises en relation avec des épisodes climatiques plus secs ou plus humides que la moyenne.

Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines – année 2

	Date de rupture moyennes annuelles	Date de rupture minima annuels	Date de rupture maxima annuels
00026X0040	1989	1989	1989
01593X0014		1990	
01918X0006	1989	1996	1989
02267X0030		1989	
02344X0055	1984	1989	1984
02344X0062	1985	1984	1985
02344X0070	Pas de rupture		
02347X0014	Pas de rupture		
02351X0013	Pas de rupture		
02352X0002	1990	1989	1989
02621X0085	1985	1985	1985
02718X0017	1971	1971	1971
03074X0013	Pas de rupture		
03077X0238	1996	1996	1996
03078X0014	1984	1984	1984
03422X0029	1978		1978
03424X0029	Pas de rupture		
03431X0027	1984	1984	1984
03693X0017	1989	1989	1989
03788X0039	1971	1971	1971
03795X0037	1971	1967	1971
03795X0093	1971	1971	1971
04697X0004	Pas de rupture		
05445X0081			1993
08511X0036	1989	1989	1995
09146X0074		2003	
09665X0073		1998	
09724X0023	1986	1986	1986
09907X0321	1989	1989	1989
10908X0263	1998	1998	1998
10912X0024	1992	1992	1992
10912X0061	1986	1986	1986
10915X0255	1998	1998	1998
10916X0061	1998	1998	1998
03428X0067	Pas de rupture		
07488X0011	Pas de rupture		
01995X0007	Pas de rupture		

Tableau 5 - Résultats des tests de détection de rupture sur les piézomètres en baisse significative pour les nappes à cycle annuels et pour les valeurs moyennes, les maxima et minima annuels.

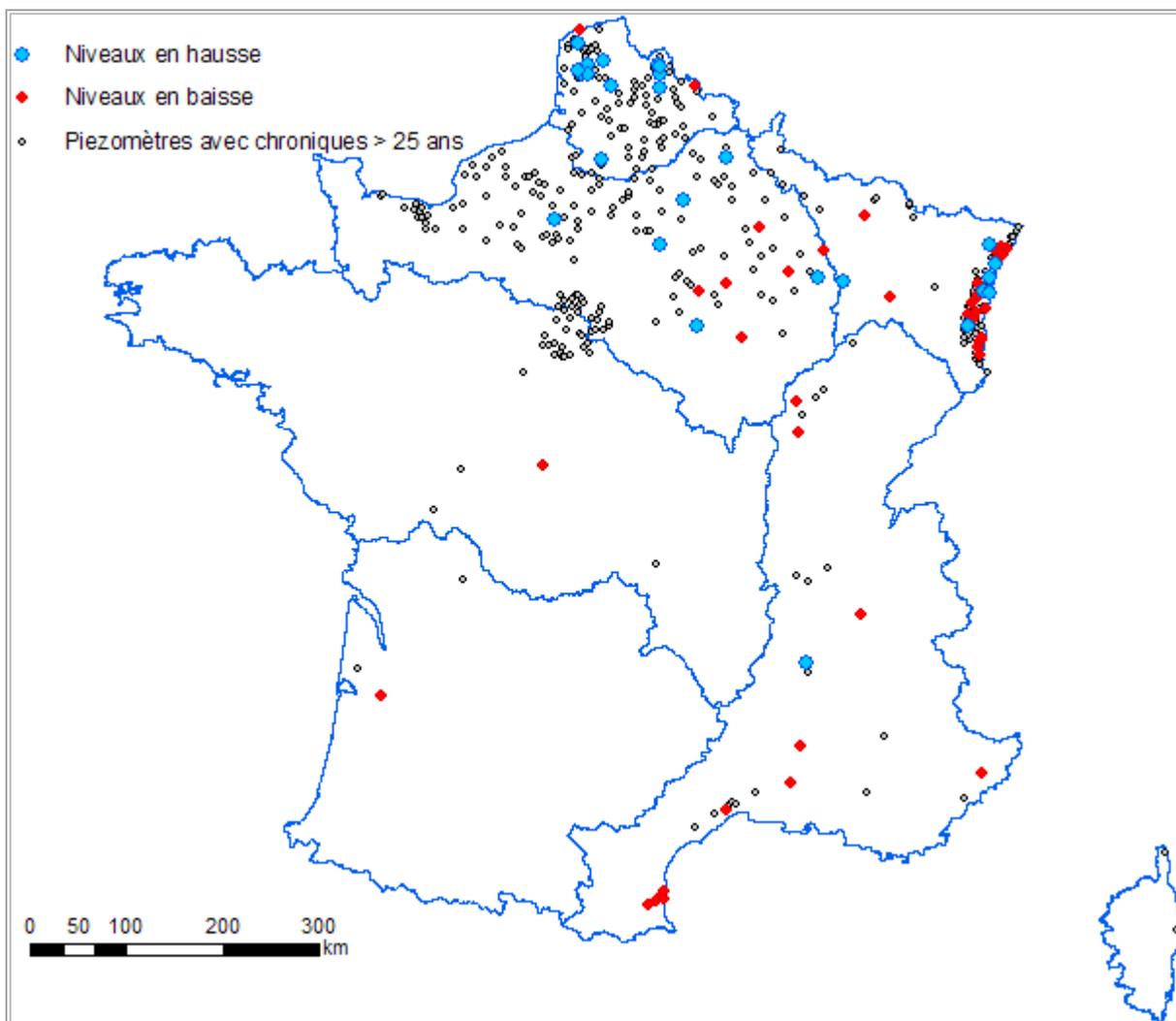
Piézomètre	Type	Date de rupture moyennes annuelles	Date de rupture minima annuels	Date de rupture maxima annuels
00115X0011	c	Pas de rupture		
00117X0023	c	1993	1993	1993
00146B0737	c	1999	1999	1999
00172X0037	c	Pas de rupture		
00173X0083	c	Pas de rupture		
01853X0002	c	Pas de rupture		
02347X0062	c	1993	1992	1997
02653X0001	c	1990	1987	1990
02663X0001	c		1996	1994
02726X0016	c	1994	1994	1994
03081X0038	c	Pas de rupture		
03082X0023	c		1990	
03782X0080	c	1994	1994	1994
00065X0011	b1	Pas de rupture		
00122X0064	b1	Pas de rupture		
00147D0218	b1	1977	1977	1977
00187X0005	b1	Pas de rupture		
00203A0033	b1	Pas de rupture		
00207X0133	b1	1993	1993	1993
00625X0002	b1	1986	1986	1993
00675X0019	b1	1980	1978	1980
03314X1035	b1	1977	1977	1977
08184X0084	b1	1999	1999	1999
01066X0133	b3	1991	1991	1991
01256X0002	b3	1982	1982	1982
01987X0009	b3	1982	1982	1982

Tableau 6 - Résultats des tests de détection de rupture sur les piézomètres en hausse significative pour les nappes de type c, b1 et b3 et pour les valeurs moyennes, les maxima et minima annuels.

### 3.4. CARTOGRAPHIE DES RÉSULTATS

#### 3.4.1. Localisation des piézomètres avec une tendance significative

La carte de l'illustration 8 précise la localisation des piézomètres en baisse significative et des piézomètres en hausse significative.



*Illustration 8 – Localisation des piézomètres à tendances significatives (baisse et hausse des niveaux), aux risques 1% et 5% (70 piézomètres)*

Les piézomètres sans tendance significative (= 377 - 70) sont reportés en grisé.

### 3.4.2. Masses d'eau captées

Les cartes de tendance à la baisse (Illustration 9 et Illustration 10) et celles de tendance à la hausse (Illustration 11 et Illustration 12) indiquent les masses d'eau captées par les piézomètres et les scores obtenus pour chaque piézomètre. Le nom des masses d'eau est mentionné dans le Tableau 7 baisse) et le Tableau 8 (hausse).

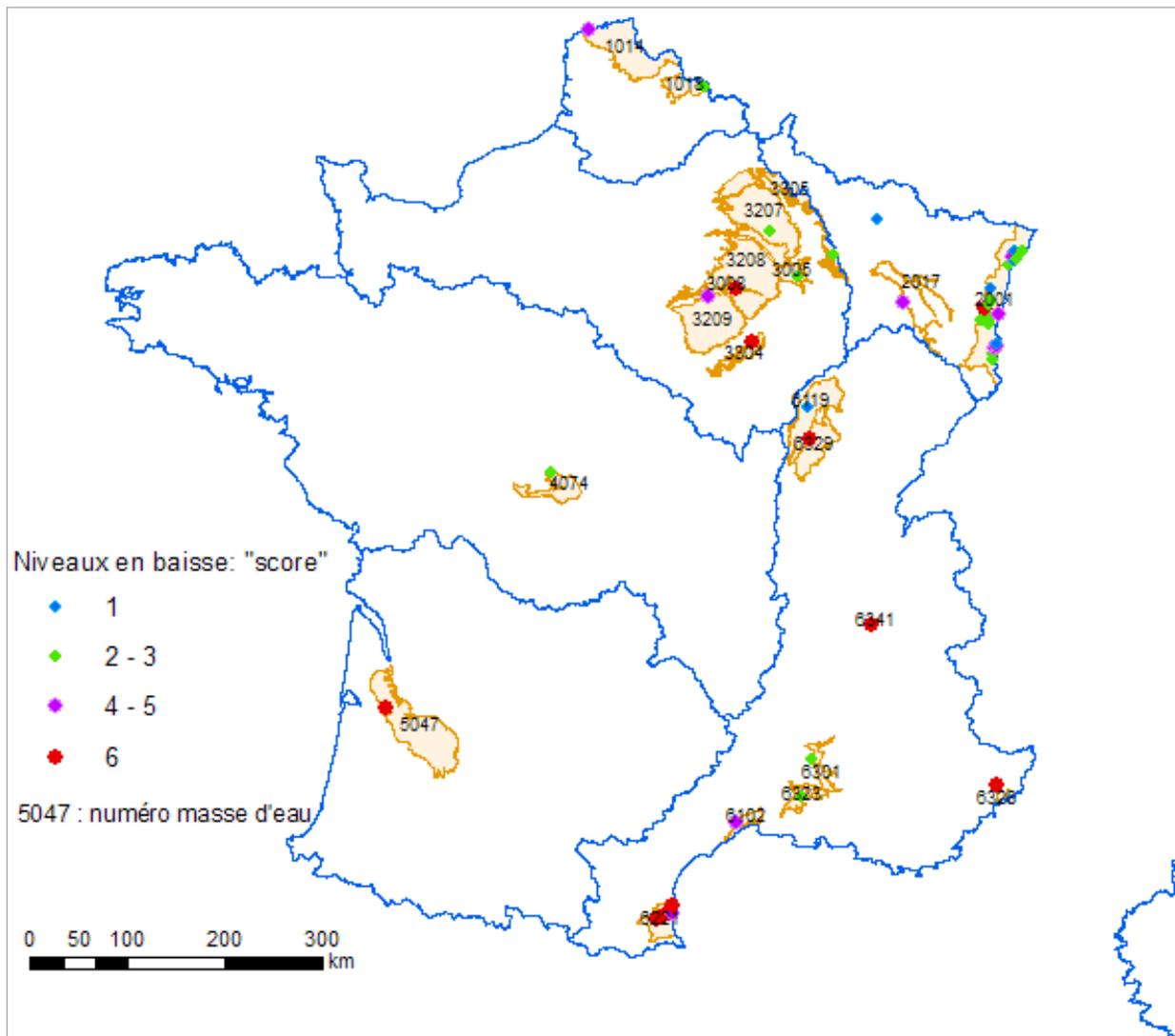


Illustration 9 – Localisation des piézomètres dont le niveau est en baisse significative (pour tout ou partie des variables étudiées) et masses d'eau concernées (en jaune clair)

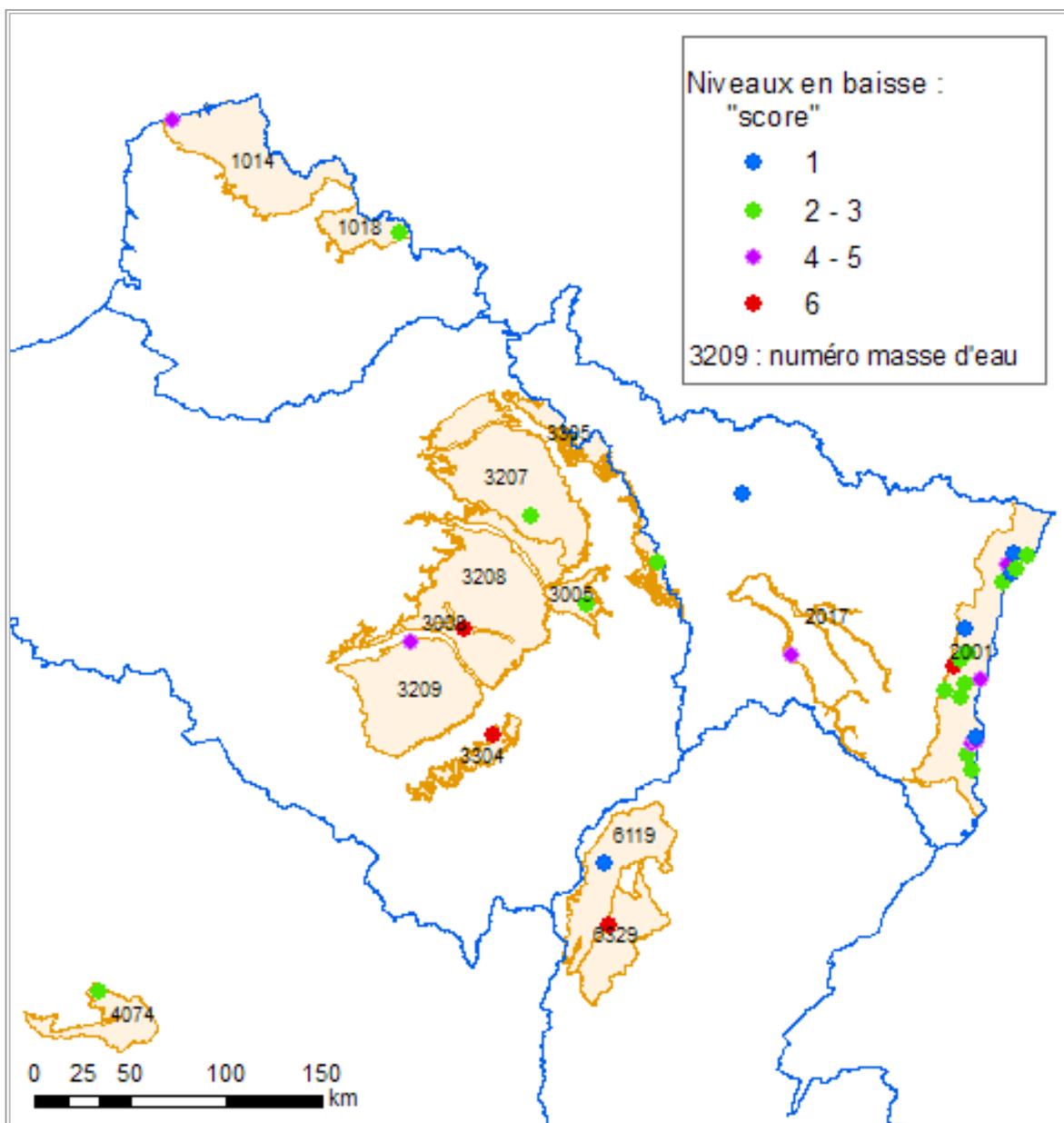


Illustration 10 – Détail de la carte précédente : localisation des piézomètres dont le niveau est en baisse significative (pour tout ou partie des variables étudiées) et masses d'eau concernées

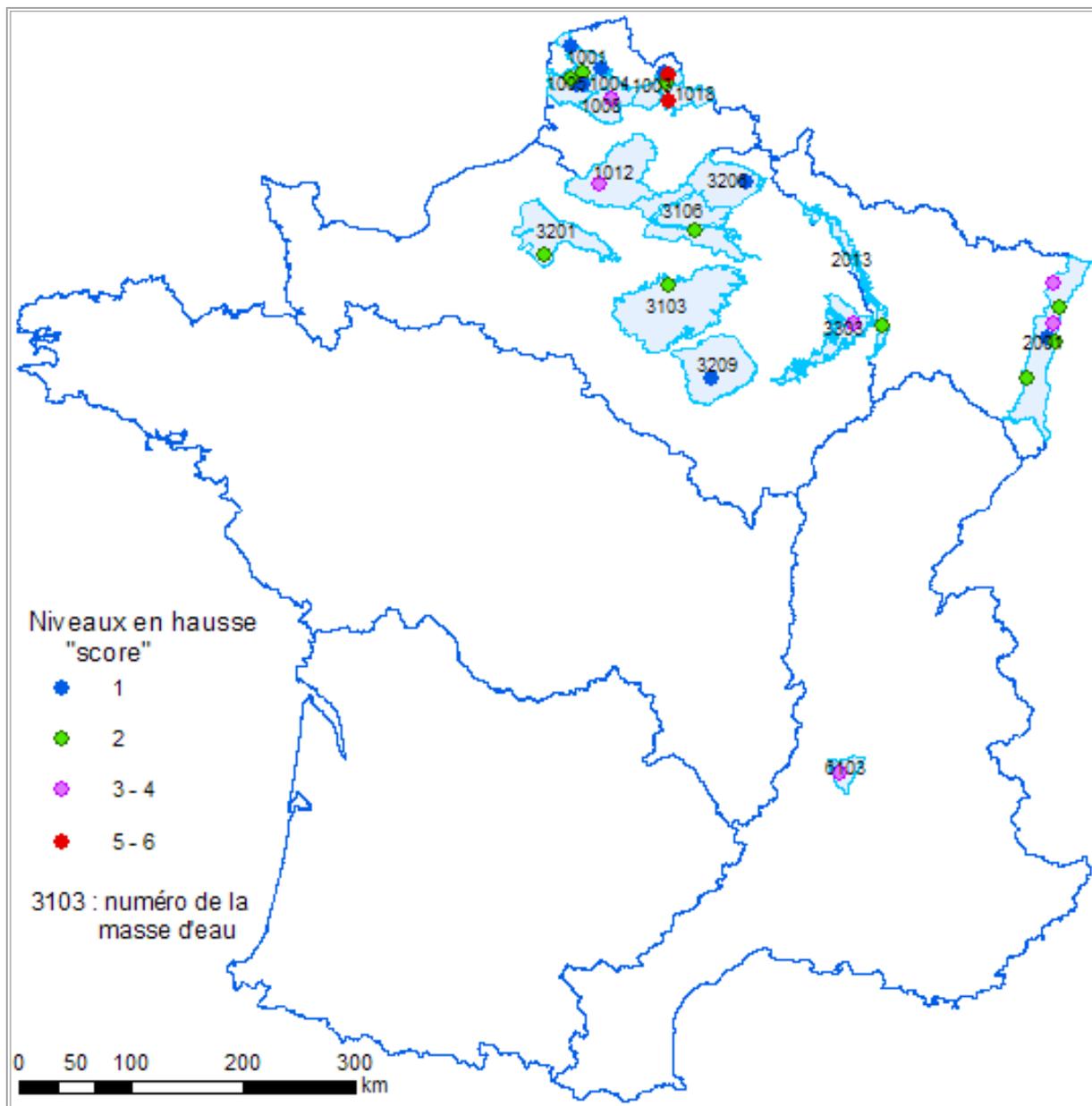


Illustration 11 – Localisation des piézomètres dont le niveau est en hausse significative (pour tout ou partie des variables étudiées) et masses d'eau concernées (en bleu clair)

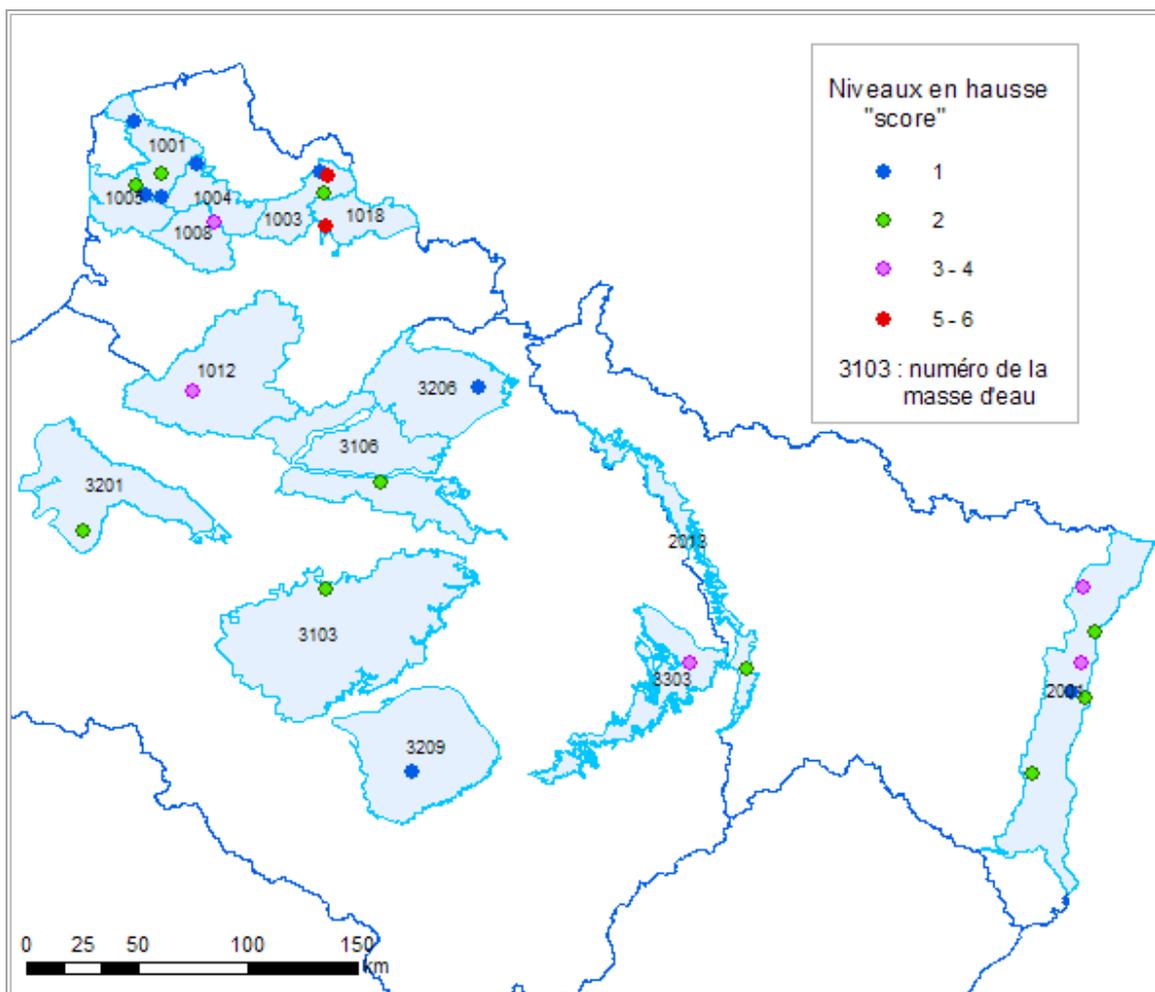


Illustration 12 – Détail de la carte précédente : localisation des piézomètres dont le niveau est en hausse significative (pour tout ou partie des variables étudiées) et masses d'eau concernées



Piézomètre	Type	Masse d'eau captée (nom et code)	Dpt
09907X0321	C	Alluvions anciennes entre Vidourle et Lez et littoral entre Montpellier et Sète - 6102 ;	34
02621X0085	C	Alluvions de l'Aube - 3008 ;	10
09146X0074	C	Alluvions des plaines du Comtat et des Sorgues - 6301 ;	84
07488X0011	C	Alluvions du Guiers - Herretang - 6341 ;	38
02267X0030	C	Alluvions du Perthois - 3005 ;	52
09665X0073	C	Alluvions du Rhône du confluent de la Durance jusqu'Ó Arles et Beaucaire + alluvions du Bas Gardon - 6323 ;	13
09724X0023	C	Alluvions du Var et Paillons - 6328 ;	6
05445X0081	C	Calcaires et marnes du Jurassique supérieur et moyen de l'interfluve Indre - Cr - 4074 ;	36
04697X0004	C	Calcaires jurassiques du seuil et des Côtes et arrières-côtes de Bourgogne dans BV Saône en RD - 6119 ;	21
01918X0006	C	Calcaires kimmeridgien-oxfordien karstique nord-est du district (entre Ornain et limite de district) - 3305 ;	55
03693X0017	C	Calcaires tithoniens karstiques entre Yonne et Seine - 3304 ;	10
01593X0014	C	Craie de Champagne nord - 3207 ;	51
10908X0263	C	Multicouche pliocène et alluvions IVaires du Roussillon - 6221 ;	66
10915X0255	C	Multicouche pliocène et alluvions IVaires du Roussillon - 6221 ;	66
10912X0061	C	Multicouche pliocène et alluvions IVaires du Roussillon - 6221 ;	66
10916X0061	C	Multicouche pliocène et alluvions IVaires du Roussillon - 6221 ;	66
10912X0024	C	Multicouche pliocène et alluvions IVaires du Roussillon - 6221 ;	66
03422X0029	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	68
03077X0238	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	67
03428X0067	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	68
03078X0014	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	67
03424X0029	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	67
02718X0017	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	67
03074X0013	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	67
03788X0039	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	68
03795X0093	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	68
03431X0027	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	67
03795X0037	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	68
02347X0014	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	67
02344X0062	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	67
02344X0055	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	67

02344X0070	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	67
01995X0007	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	67
02351X0013	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	67
02352X0002	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	67
00026X0040	C	Sables du Landénien des Flandres - 1014 ;	62
08511X0036	C	Sables plio-quaternaires du bassin de la Garonne région hydro o et terrasses anciennes de la Garonne -5047	33
03043X0056	b1	Alluvions de la Meurthe et de la Moselle en amont de la confluence avec la Meurthe - 2017 ;	88
05264X0029	b1	Alluvions plaine des Tilles, nappe de Dijon sud + nappes profondes - 6329 ;	21
02615X0020	b1	Craie du Senonais et Pays d'Othe - 3209 ;	10
00225X0077	b1	Craie du Valenciennois - 1007 ; Sables du Landénien d'Orchies - 1018 ;	59
04138X0019	b1	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	68
04134X0022	b1	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	68
01377X0205	A	Calcaires du Dogger des côtes de Moselle - 2010 ;	57

*Tableau 7 – Masses d'eau captées par les piézomètres en baisse significative (44 piézomètres)*

Piézomètre	Type	Masse d'eau captée (nom et code)	Dpt
02663X0001	C	Calcaires oxfordiens - 2013 ;	55
02653X0001	C	Calcaires tithonien karstique entre Seine et Orvain - 3303 ;	55
00115X0011	C	Craie de la vallée de la Canche aval - 1005 ;	62
00146B0737	C	Craie de la vallée de la Deule - 1003 ;	59
00173X0083	C	Craie de l'Artois et de la vallée de la Lys - 1004 ;	62
00172X0037	C	Craie de l'Audomarois - 1001 ;	62
00117X0023	C	Craie de l'Audomarois - 1001 ;	62
03782X0080	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	68
03081X0038	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	67
02726X0016	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	67
03082X0023	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	67
02347X0062	C	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	67
01853X0002	C	Tertiaire - Champigny - en Brie et Soissonnais - 3103 ;	77
01256X0002	b3	Craie du Vexin normand et picard - 3201 ;	27
01066X0133	b3	Lutétien - Yprésien du Soissonnais-Laonnois - 3106 ;	2
01987X0009	b3	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace - 2001 ;	67
08184X0084	b1	Alluvions anciennes de la Plaine de Valence et terrasses de l'Isère - 6103 ;	26
00625X0002	b1	Craie de la moyenne vallée de la Somme - 1012 ;	80
00187X0005	b1	Craie de la vallée de la Canche amont - 1008 ;	62
00203A0033	b1	Craie de la vallée de la Deule - 1003 ;	59
00147D0218	b1	Craie de la vallée de la Deule - 1003 ;	59
00122X0064	b1	Craie de l'Artois et de la vallée de la Lys - 1004 ;	62
00065X0011	b1	Craie de l'Audomarois - 1001 ;	62
00675X0019	b1	Craie de Thiérache-Laonnois-Porcien - 3206 ;	2
00207X0133	b1	Craie des vallées de la Scarpe et de la Sensée - 1006 ; Sables du Landénien d'Orchies - 1018 ;	59
03314X1035	b1	Craie du Senonais et Pays d'Othe - 3209 ;	89

Tableau 8 – Masses d'eau captées par les piézomètres en hausse significative



Sur la carte de l'illustration 13, en résumé, sont reportées toutes ces masses d'eau, à la fois pour les piézomètres en baisse et en hausse.

Les piézomètres en baisse (44) captent 21 masses d'eau différentes (tableau 4) :

- *Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace* (20 piézomètres),
- *Multicouche pliocène et alluvions quaternaires du Roussillon* (5 piézomètres),
- nappes de la Craie du bassin Seine Normandie (3 piézomètres),
- nappes des Calcaires du Jurassique (5 piézomètres),
- divers systèmes alluvionnaires (9 piézomètres),
- autres nappes (2 piézomètres).

Les piézomètres en hausse (26) captent 16 masses d'eau différentes (tableau 5), différentes de celles captées par les piézomètres en baisse, sauf pour l'Alsace, la "*Craie du Sénonais*" (3209) et les "*Sables du Landénien d'Orchies*" (1018) :

- les masses d'eau de la Craie (10 masses d'eau et 15 piézomètres),
- la masse d'eau du "*Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace*" (6 piézomètres),
- 2 masses d'eau dans les calcaires du Jurassique (2 piézomètres),
- 2 masses d'eau dans des formations du tertiaire (2 piézomètres),
- 1 masse d'eau dans les alluvions (*Alluvions anciennes de la Plaine de Valence et terrasses de l'Isère*).

Une esquisse de structuration se dessine, 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.

### 3.4.3. Piézomètres influencés par les prélèvements

L'analyse faite au chapitre 2 pour savoir dans quelle mesure les piézomètres sélectionnés pour la recherche de tendances pouvait être influencés par des pompes a conduit aux résultats suivants :

- piézomètres montrant une tendance à la baisse : 16 sur les 44 sont influencés à des degrés divers (Illustration 14).
- piézomètres montrant une tendance à la hausse : 9 sur les 25 sont influencés à des degrés divers (Illustration 15).
- piézomètres montrant une tendance mixte (à la hausse ou à la baisse selon les variables) : 1 sur les 2 est moyennement influencé (Illustration 16).

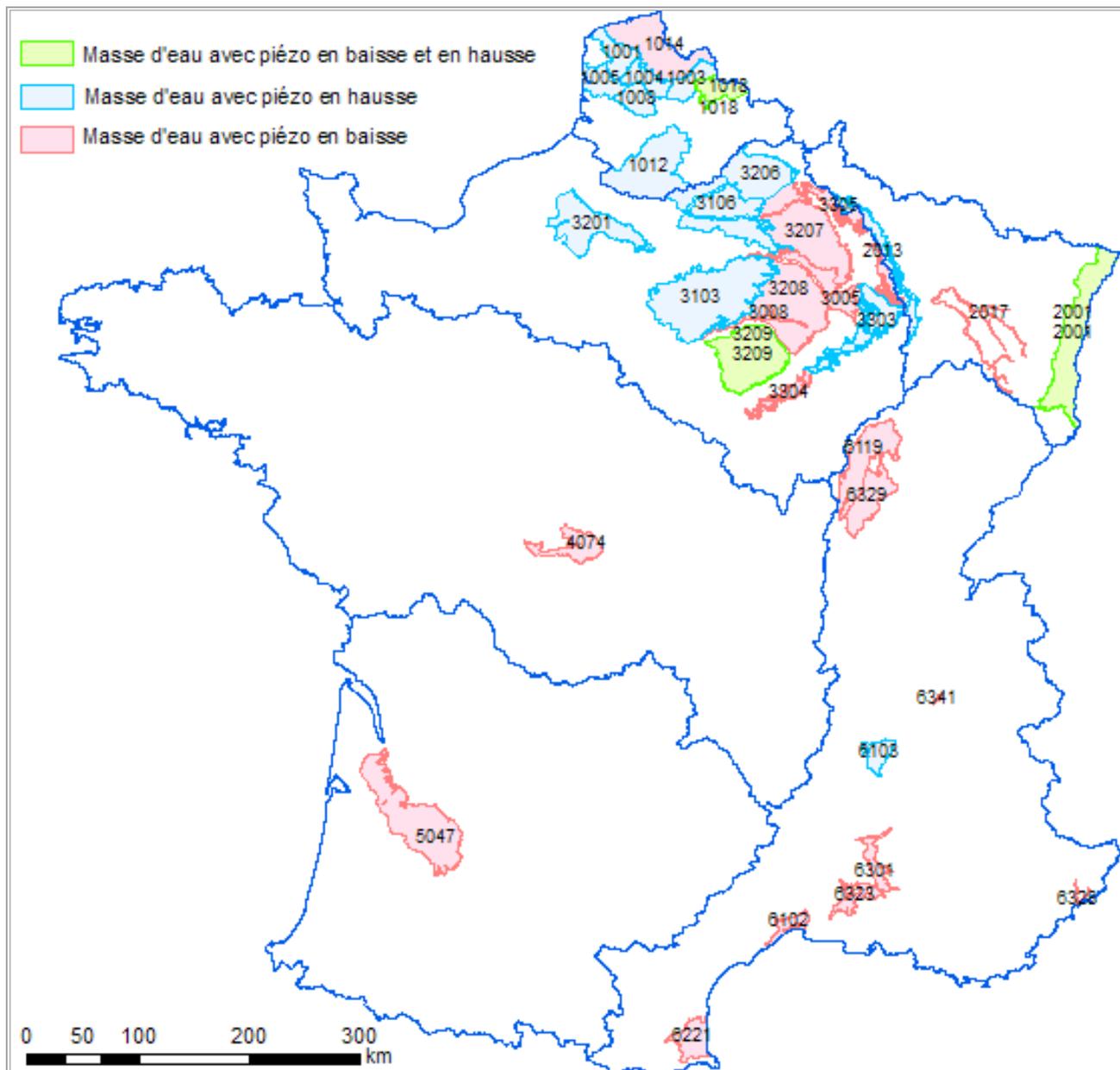
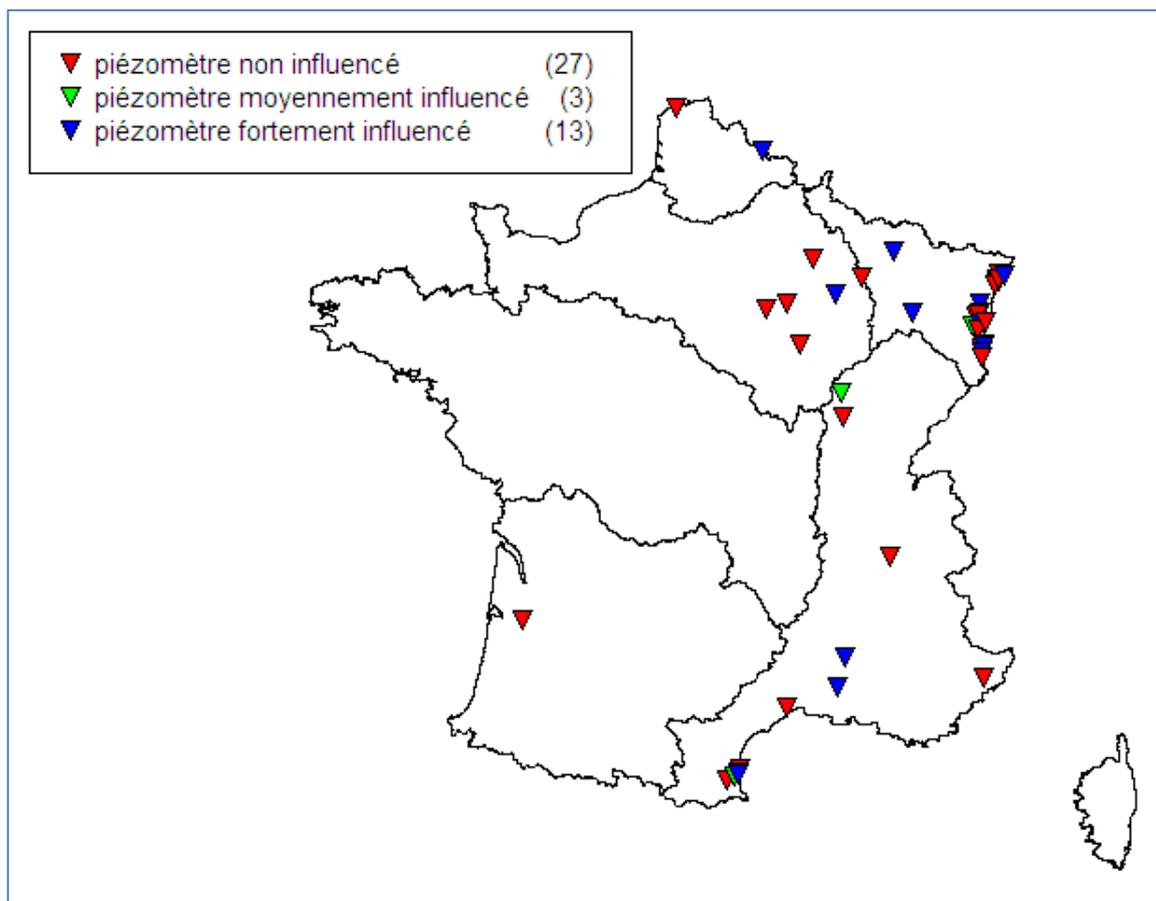


Illustration 13 - Masses d'eau captées par les piézomètres en baisse significative et en hausse significative



*Illustration 14 - Piézomètres montrant une tendance à la baisse et influencés par des prélèvements*

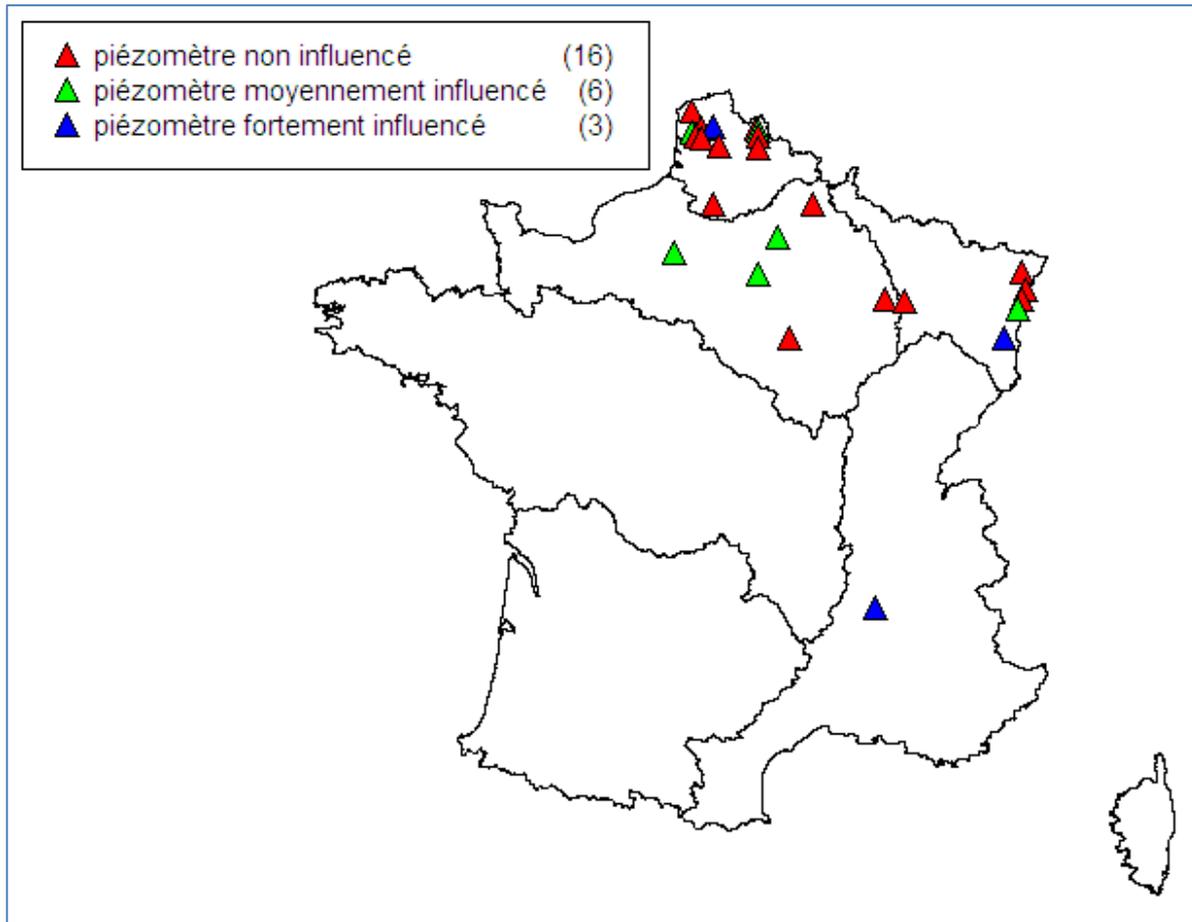


Illustration 15 - Piézomètres à la hausse influencés par des prélèvements

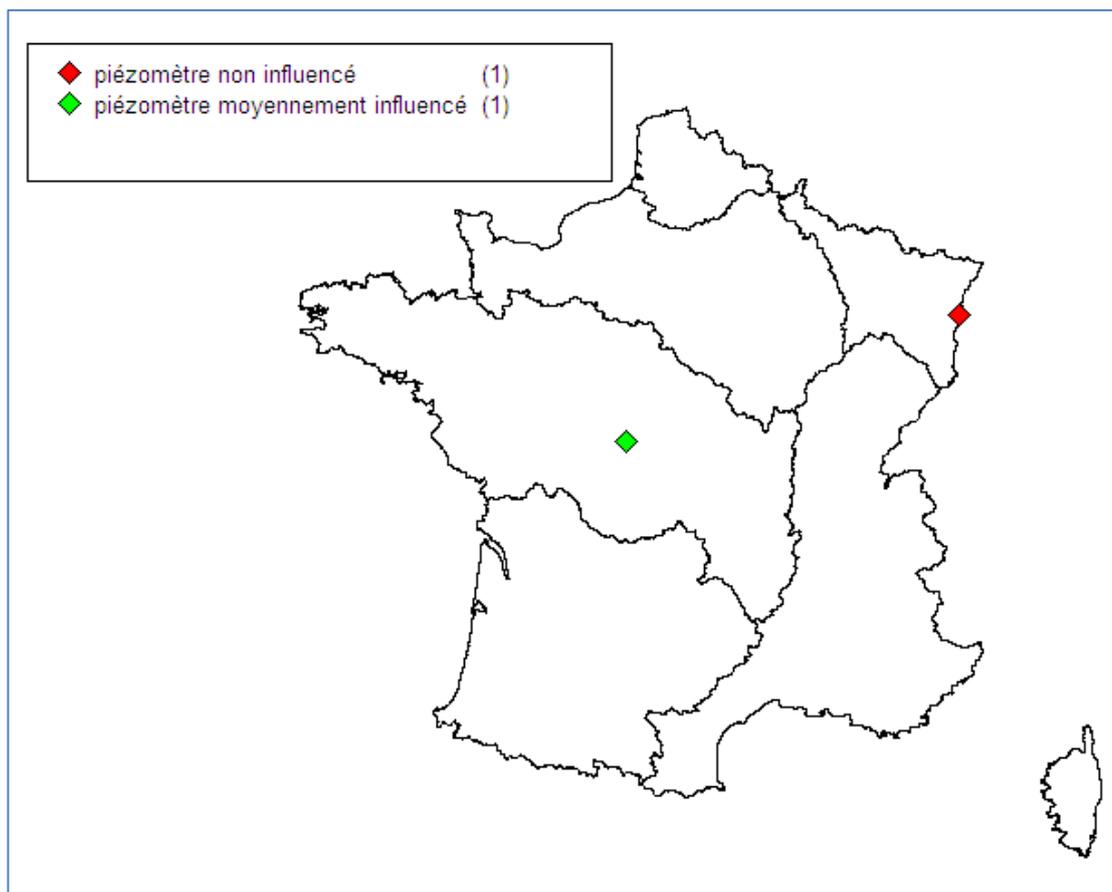


Illustration 16 - Piézomètres mixtes (hausse et baisse) influencés par des prélèvements

De multiples configurations de pompages et de nombreuses combinaisons de paramètres hydrodynamiques permettent de reproduire les tendances observées, comme le montre l'exemple (schématique) du graphique de l'illustration 17.

Ce graphique montre l'évolution des rabattements sur un piézomètre situé à 5 km d'une zone de prélèvements où les débits de pompage augmentent progressivement de 100 m<sup>3</sup>/h à 150m<sup>3</sup>/h sur une durée de 7 ans, se stabilisent à 150 m<sup>3</sup>/h pendant 13 ans, puis passent à 160 m<sup>3</sup>/h les 5 dernières années.

Les paramètres hydrodynamiques utilisés pour la simulation (méthode de Theis avec paliers de débits) sont :

- transmissivité de  $1.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
- emmagasinement de 5%

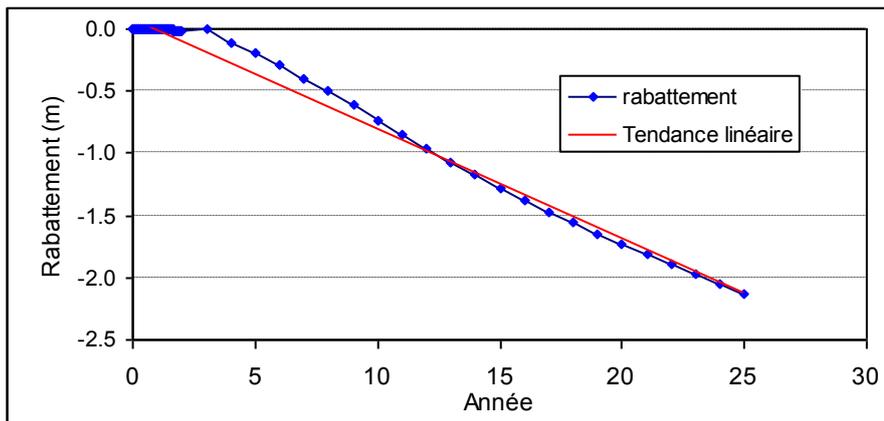


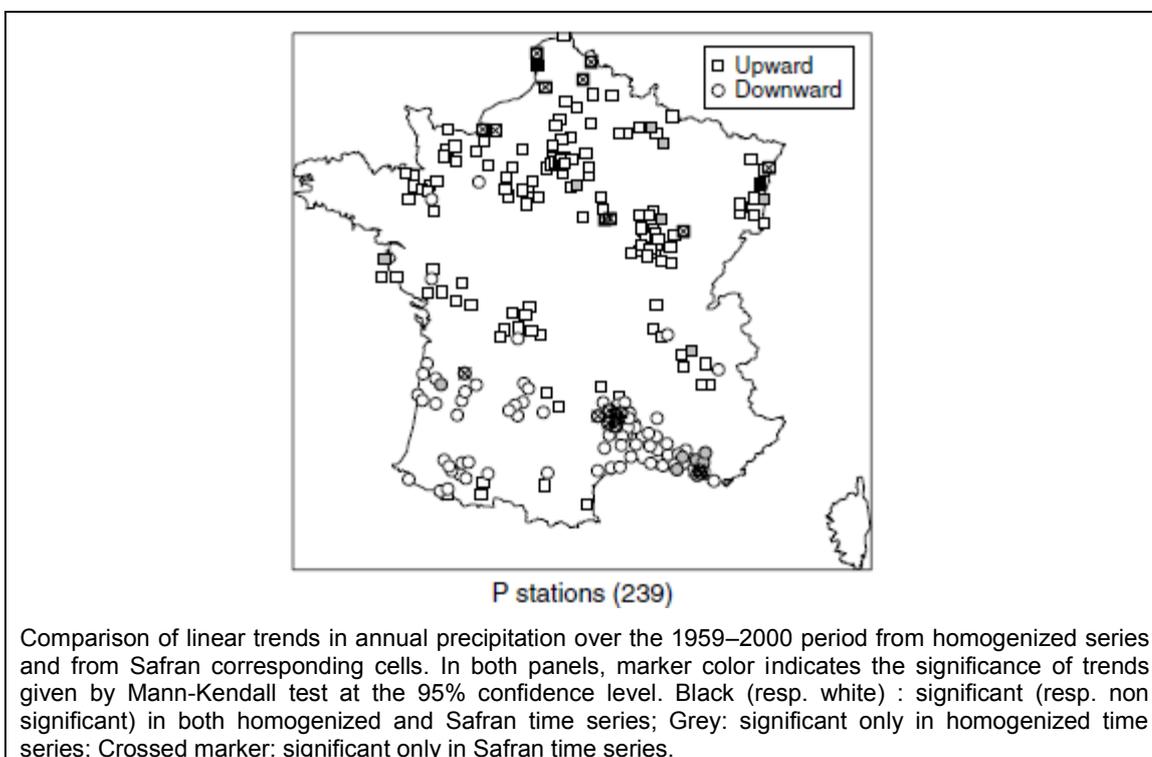
Illustration 17 – Exemple de baisse de niveaux (quasi-linéaire) sous l'effet de prélèvements sur une période de 25 ans

...

## 4. Essai de mise en relation avec les données climatiques

### 4.1. COMPARAISON AVEC LES TENDANCES SUR LES PRÉCIPITATIONS

Les tendances sur les précipitations nous ont été communiquées par Météo-France. Elles proviennent d'une analyse statistique faite sur 239 séries de précipitations mensuelles de 1959 à 2000 (Vidal et al., 2009). La recherche des tendances a été faite par la méthode de Mann-Kendall, avec un intervalle de confiance de 95%. L'article compare les séries de précipitations mesurées aux stations climatologiques avec les séries calculées à l'aide du système Safran (Illustration 18 extraite de l'article cité ci-dessus).



*Illustration 18 – Comparaison entre les tendances détectées sur des séries de précipitations annuelles de 1959 à 2000 et les tendances calculées avec le système Safran*

Sur la carte de l'illustration 19, les résultats des analyses des 239 séries ont été reportés (sans distinction de l'origine des séries : stations météo/Safran): séries avec hausse significative (au nombre de 9), séries avec baisse significative (au nombre de 7), séries sans tendance significative (223).

Pour comparaison, les piézomètres avec niveaux en baisse ou en hausse ont été reportés. A l'exception de la région de Marseille et d'un point en Aquitaine, il est difficile de dégager des tendances communes pluies-niveaux : dans un même secteur ces tendances parfois s'opposent (les niveaux baissent lorsque les pluies augmentent) parfois vont dans le même sens (niveaux en hausse quand les pluies sont en hausse), pour autant que l'on puisse en juger, compte tenu du faible nombre de points permettant une comparaison dans le même voisinage).

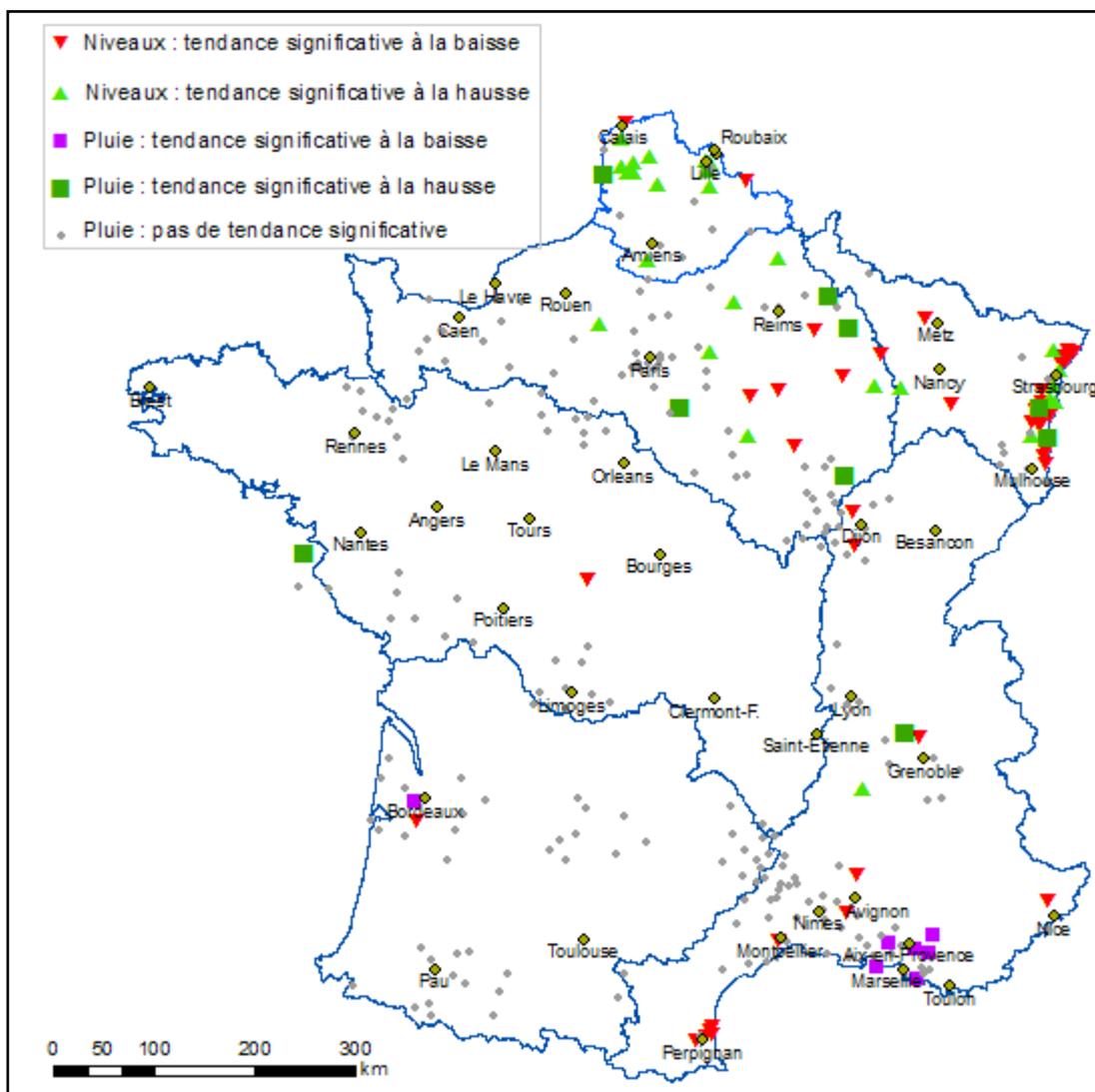
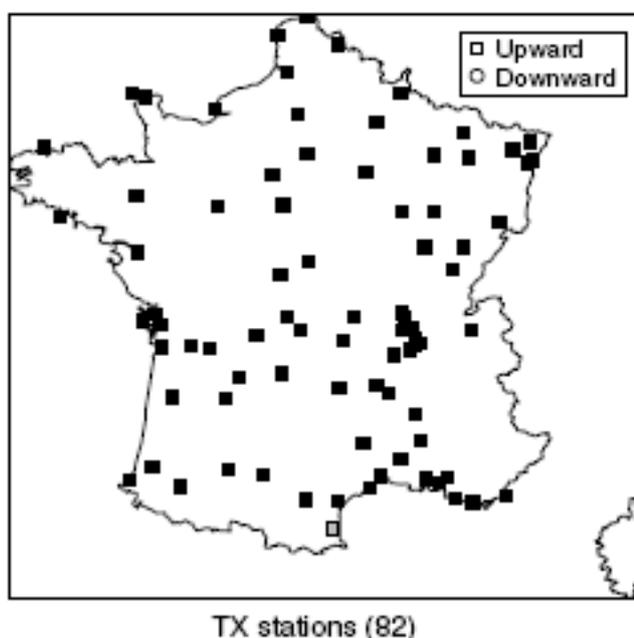


Illustration 19 – Séries piézométriques en baisse significative et séries de précipitations en baisse ou en hausse significatives.

#### 4.2. COMPARAISON AVEC LES TENDANCES SUR LES TEMPERATURES

Les tendances sur les températures proviennent également de Météo France et ont été calculées de la même manière que les précipitations. Elles proviennent d'une analyse statistique faite sur 82 séries de températures mensuelles de 1959 à 2000 (Vidal et al., 2009).

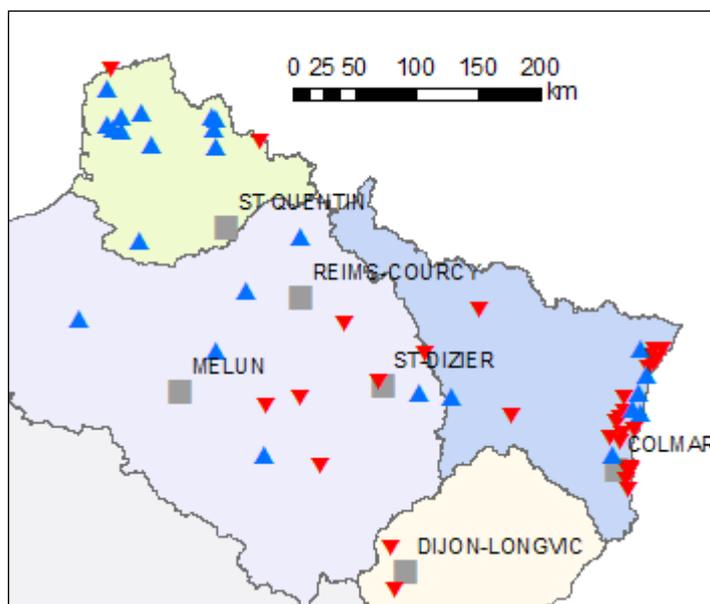
Les températures jouent un rôle important dans l'évapotranspiration et donc la pluie efficace. Le problème est qu'elles montrent une tendance systématique à l'augmentation (Illustration 20) contrairement aux piézomètres, ce qui ne permet donc pas d'en tirer de conclusions. On peut simplement dire que l'augmentation systématique des températures va augmenter l'évapotranspiration potentielle et diminuer la pluie efficace et donc la recharge des nappes.



*Illustration 20 - Tendances pour les températures maximum sur la période 1959-2000. upward : à la hausse ; downward : à la baisse. En noir : tendance significative à la fois dans les séries homogénéisées et Safran ; en gris : tendance significative uniquement dans les séries homogénéisées (source : Vidal et al., 2009).*

#### 4.3. RELATION ENTRE RUPTURES DÉTECTÉES DANS LES SÉRIES ET ÉPISODES CLIMATIQUES PARTICULIERS

Les ruptures détectées par le test de Pettit correspondent à des épisodes climatiques particuliers, comme le montrent les valeurs du Tableau 9 ci-après et les graphiques de l'illustration 21 et de l'illustration 22, qui retracent l'évolution des précipitations sur une période de 30 à 40 ans aux stations climatologiques de Melun, Colmar, Reims, Dijon, St-Dizier et St-Quentin (localisées sur la figure ci-dessous).



Ces 6 stations ne sont pas trop éloignées de la majorité des piézomètres dont les niveaux sont en baisse (triangles rouges sur la figure ci-dessus) ou en hausse (triangles bleus).

Les dates de rupture indiquées par le test de Pettit (Tableau 9) signalent :

- soit une hauteur de précipitations nettement inférieure ou supérieure à la moyenne,
- soit suivent ou bien précèdent une séquence climatique particulière, par exemple 1976 (la rupture est détectée en 1977), ou bien 1988 à Melun et St-Quentin (rupture détectée en 1989)

	<b>Melun</b> (1960-2010)	<b>Colmar</b> (1960-2010)	<b>Reims</b> (1970-2010)	<b>Dijon</b> (1960-2010)	<b>St Dizier</b> (1970-2010)	<b>St-Quentin</b> (1960-2010)
<b>Moyenne (mm)</b>	<b>666</b>	<b>600</b>	<b>611</b>	<b>740</b>	<b>837</b>	<b>698</b>
Dates de rupture sur les chroniques de niveaux en baisse et hauteur de pluie en mm						
1971	502	451	472	498	549	612
1984		489				
1985	528	457	544	506	728	565
1989	533		544		725	615
1990	506	512				578
1991		406	465	629	702	507
(1976)	394	495	354	610	571	422
Dates de rupture sur les chroniques de niveaux en hausse et hauteur de pluie en mm						
1977	720	616	623	1040	998	721
1982	732	682	676	864	972	765
1993	742			823		760
1994	793				1073	786
1999	879	785	677	885	975	769
(2000)	864		753		1094	801
(2001)	872		834		1063	885

Tableau 9 – Dates de rupture détectées par le test de Pettit et hauteurs de pluie de l'année correspondante

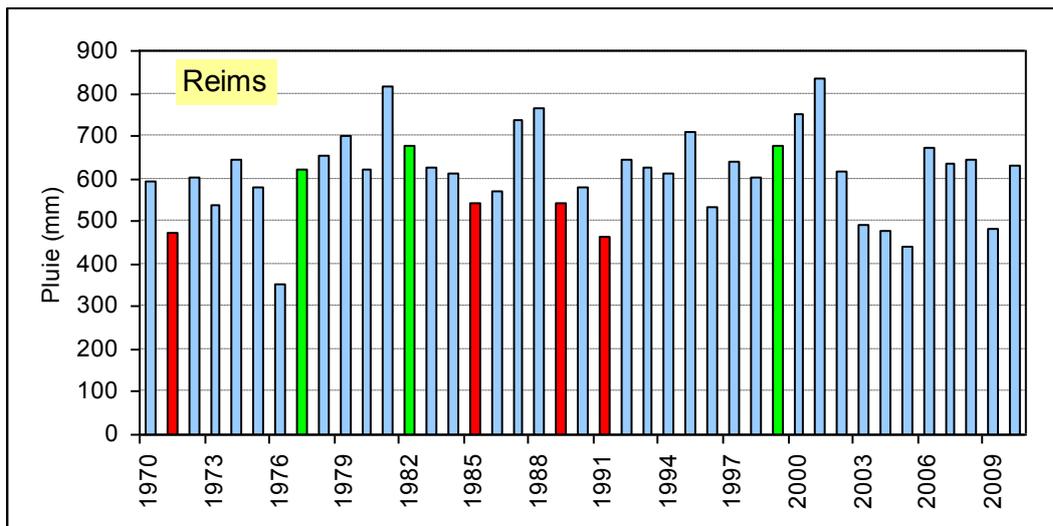
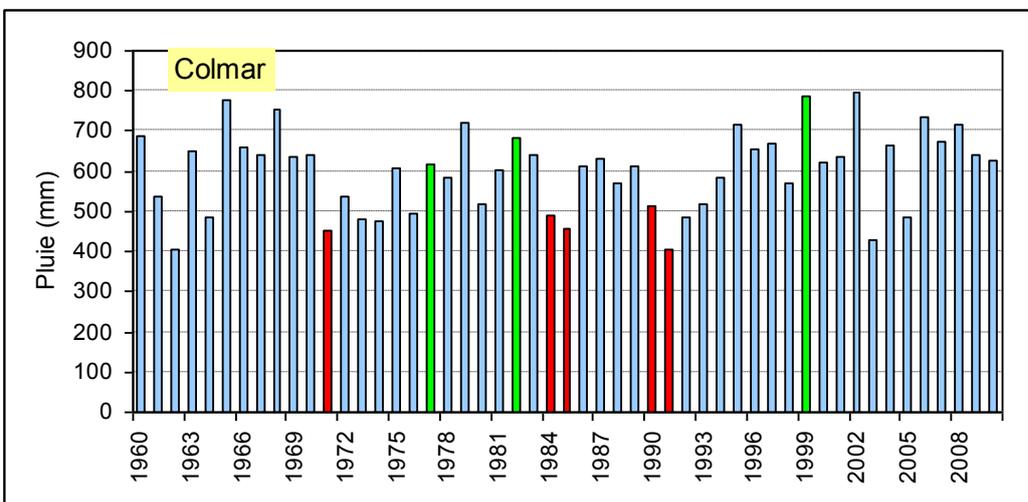
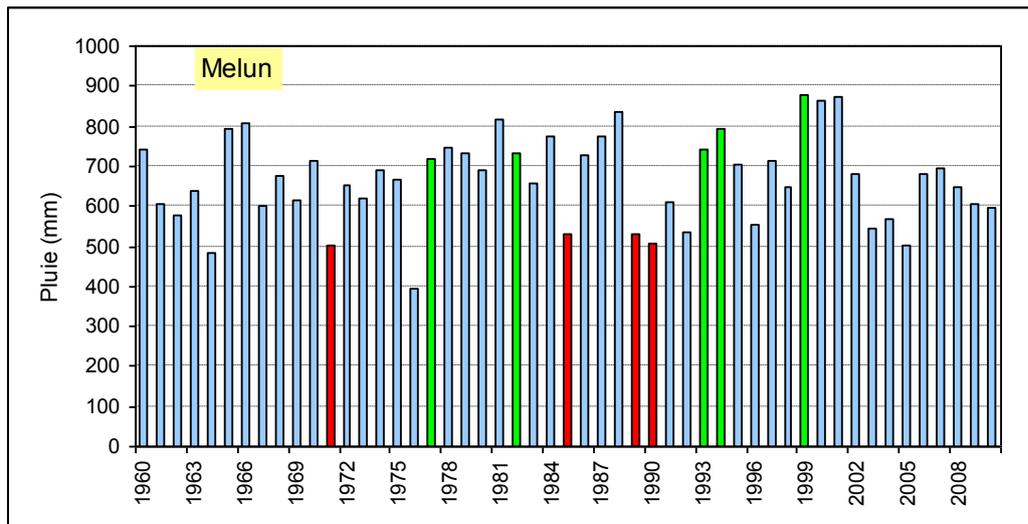


Illustration 21 – Précipitations annuelles à Melun, Colmar et Reims (données Météo-France)

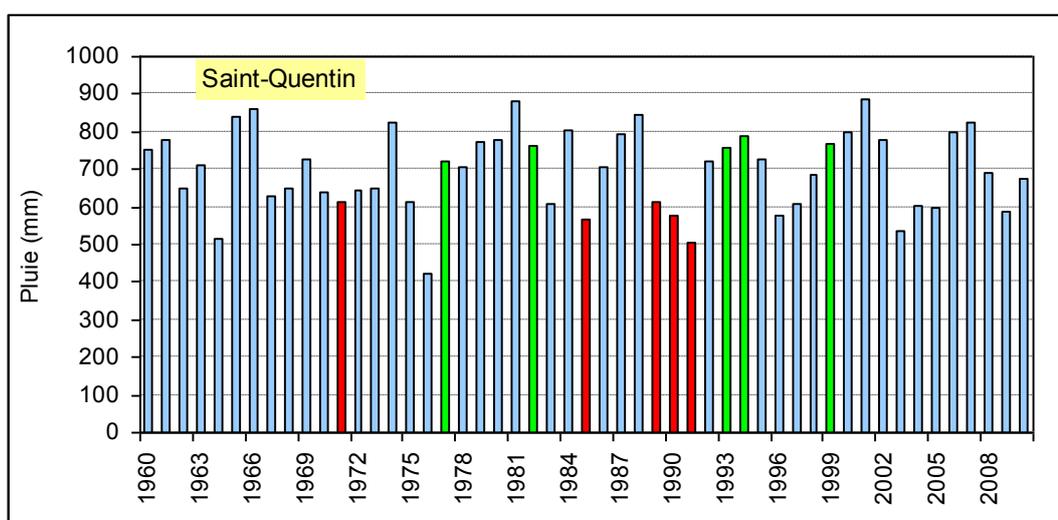
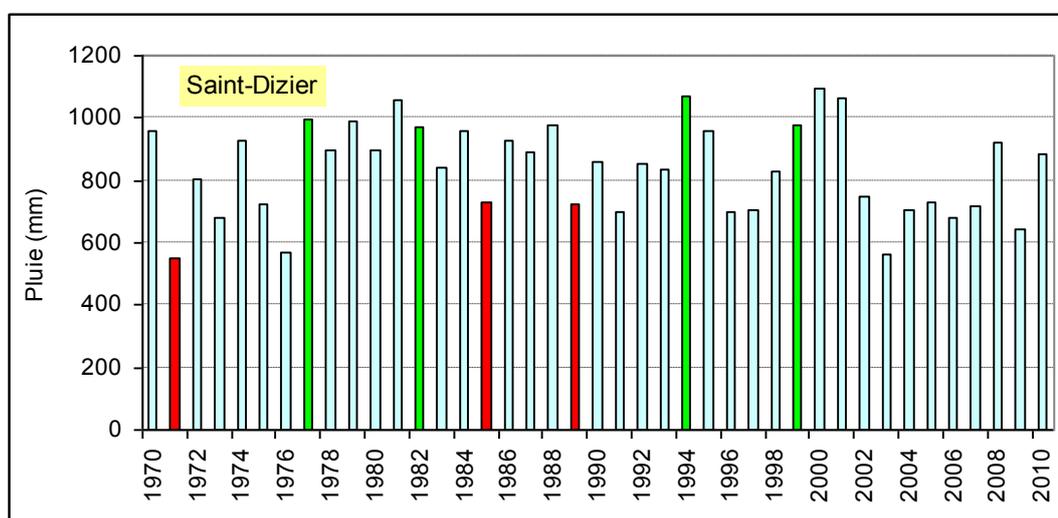
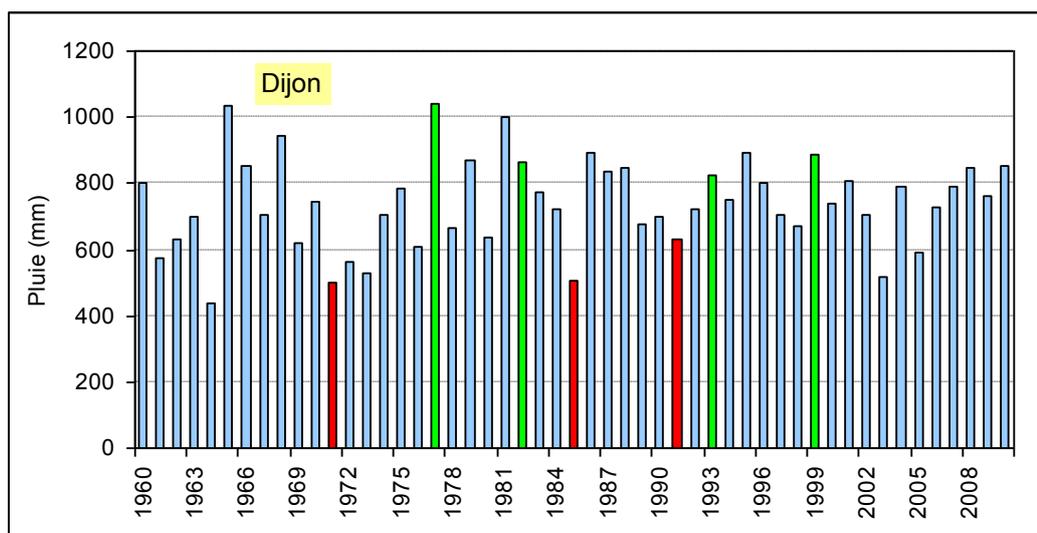


Illustration 22 – Précipitations annuelles à Dijon, St-Dizier et St-Quentin (données Météo-France)

#### 4.4. EFFET DE L'ÉVAPO-TRANSPIRATION

Le traitement statistique effectué par Météo-France sur les températures (cf. 4.2) n'a pas été réalisé sur l'évapotranspiration potentielle (ETP)<sup>2</sup>, mais il est fort probable que la tendance soit la même, à savoir une augmentation généralisée de l'ETP sur l'ensemble de la France.

Afin d'avoir une idée de l'effet d'une variation de l'évapotranspiration sur le niveau piézométrique, nous avons utilisé l'outil de modélisation globale GARDENIA pour simuler le comportement d'un piézomètre à partir de différentes séries d'ETP. Cette modélisation a été réalisée sur le piézomètre de Saint-Martin Chenetron (77) caractérisé par un comportement mixte (fluctuations annuelles et interannuelles) et une forte amplitude de battement. Les données de pluies et d'ETP utilisées pour la simulation sont celles de la station de Melun.

Une première analyse des données indique que l'ETP montre une tendance à la hausse avec une pente de 1.9 mm/an (Illustration 23) alors que les précipitations montrent une très légère tendance à la hausse, 0.3 mm/an (Illustration 24), alors qu'elle est de 0.9 mm/an sur Paris (Vernoux et Seguin, 2011). Quant au niveau piézométrique, il montre une tendance à la baisse marquée (Illustration 25), même si elle n'est pas significative sur un plan statistique (cf. chapitre précédent). Par contre on sait que ce piézomètre n'est pratiquement pas influencé par des pompages. Cette tendance à la baisse du niveau piézométrique serait donc à mettre au compte de l'augmentation de l'ETP.

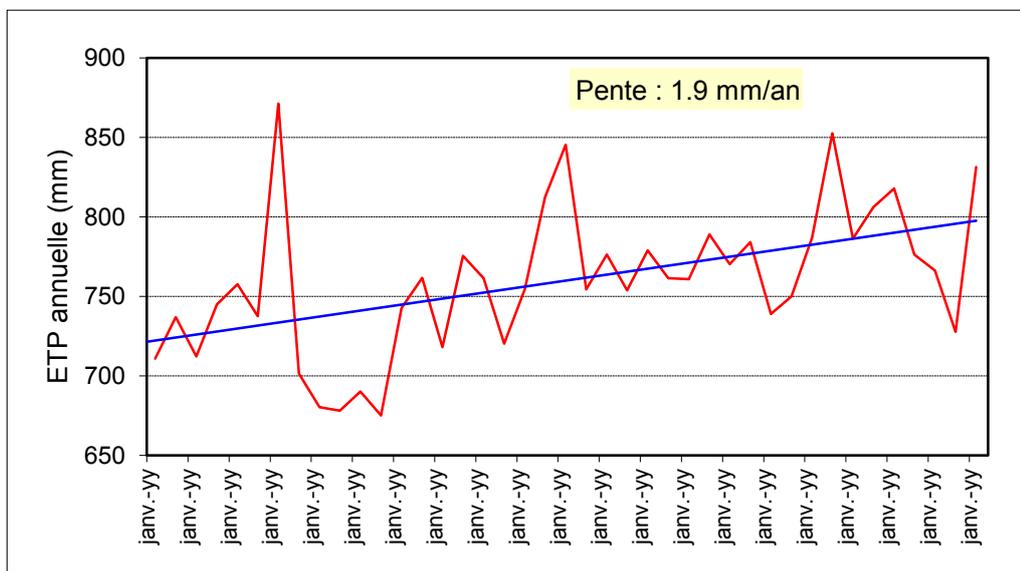


Illustration 23 – Tendance calculée sur l'ETP à la station de Melun (77)

<sup>2</sup> Météo-France utilise la formule de Penman pour le calcul de l'ETP

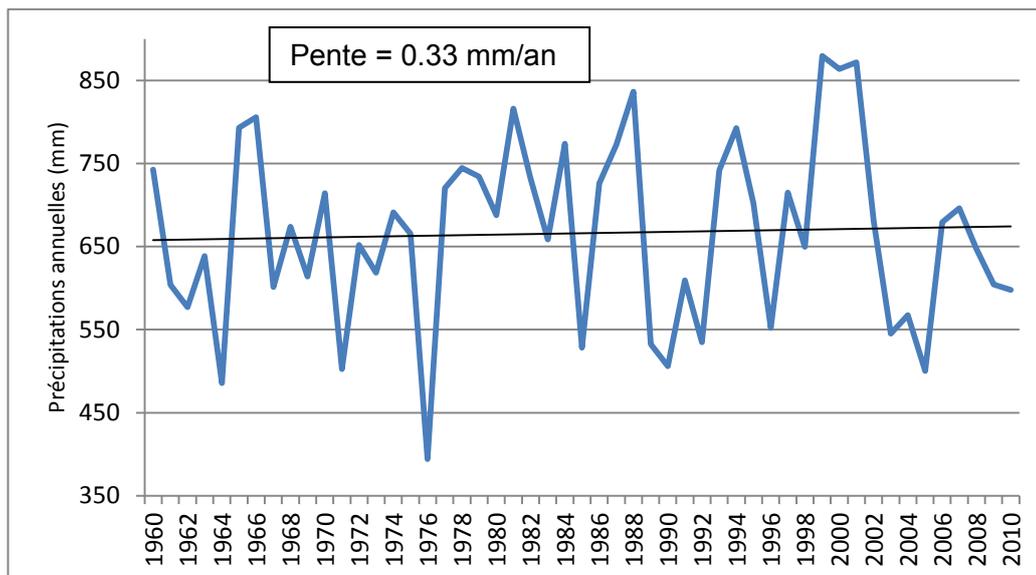


Illustration 24 - Tendance calculée sur les précipitations à la station de Melun (77)

Calcaire de Champigny PLACE DU VILLAGE - Saint-Martin-Chennet  
02603X0009

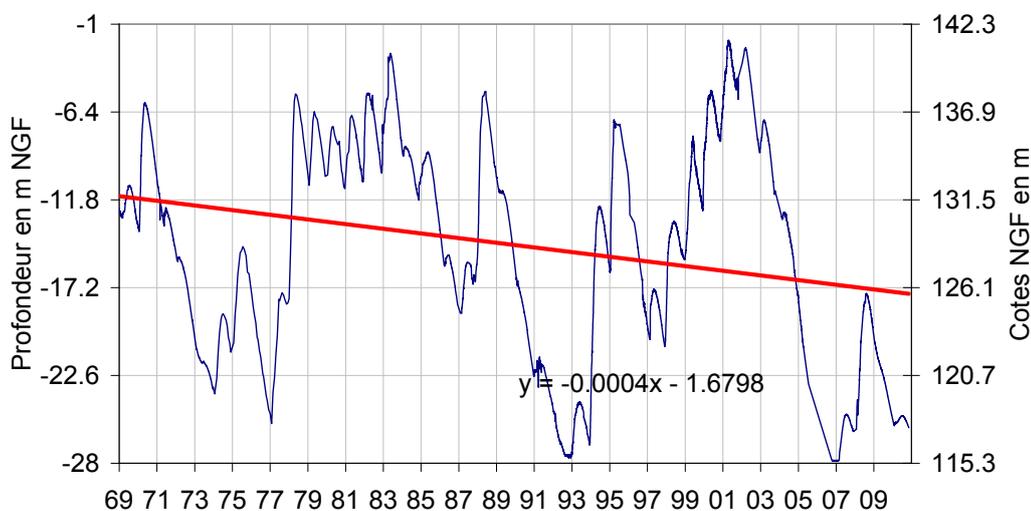


Illustration 25 – Tendance (non significative) calculée sur le niveau piézométrique à la station de Saint-Martin Chennetron (77)

Une première simulation a été réalisée avec le logiciel GARDENIA pour vérifier le calage du modèle. Le modèle a été calé sur la période 1976-2000 pour pouvoir simuler la période 2000-2010 avec différentes séries d'ETP. Toutes les données sont au pas de temps mensuel.

Les données utilisées sont les suivantes :

- Pluies mensuelles de Melun de 1970 à 2010
- ETP mensuelles de Melun de 1970 à 2010
- Niveaux piézométriques mensuels moyens de Saint-Martin-Chennetron de 1976 à 2000

La simulation a été réalisée sans possibilité de modification des valeurs d'ETP par le modèle. Sur cette période de 25 ans (1976-2000), le calage est tout à fait satisfaisant (Illustration 26)

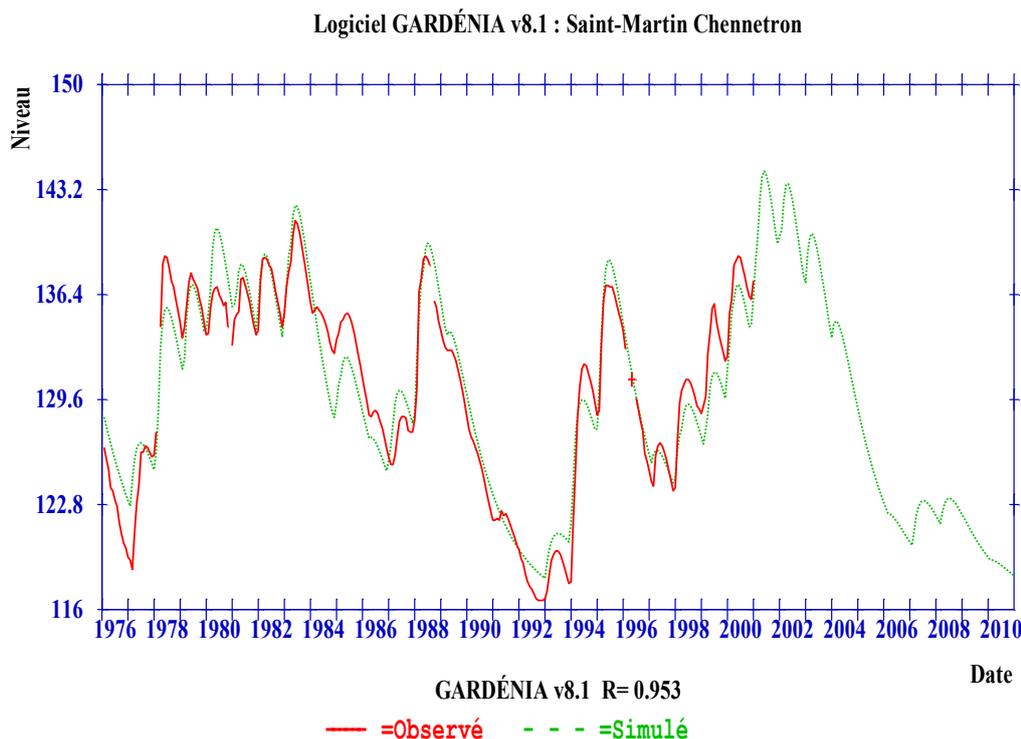


Illustration 26 – Comparaison graphique de la série observée (rouge) et de la série simulée (vert)

Il faut noter que l'extension sur la période 2001-2010 réalisé avec les données d'ETP fournies par Météo-France est très proche des niveaux observés sur cette même période, à l'exception de la période de très basses eaux 2005-2006 (Illustration 27), ce qui confirme la robustesse du modèle. Il faut noter que le niveau minimum observé fin 2006 et début 2007 correspond à un assec du puits.

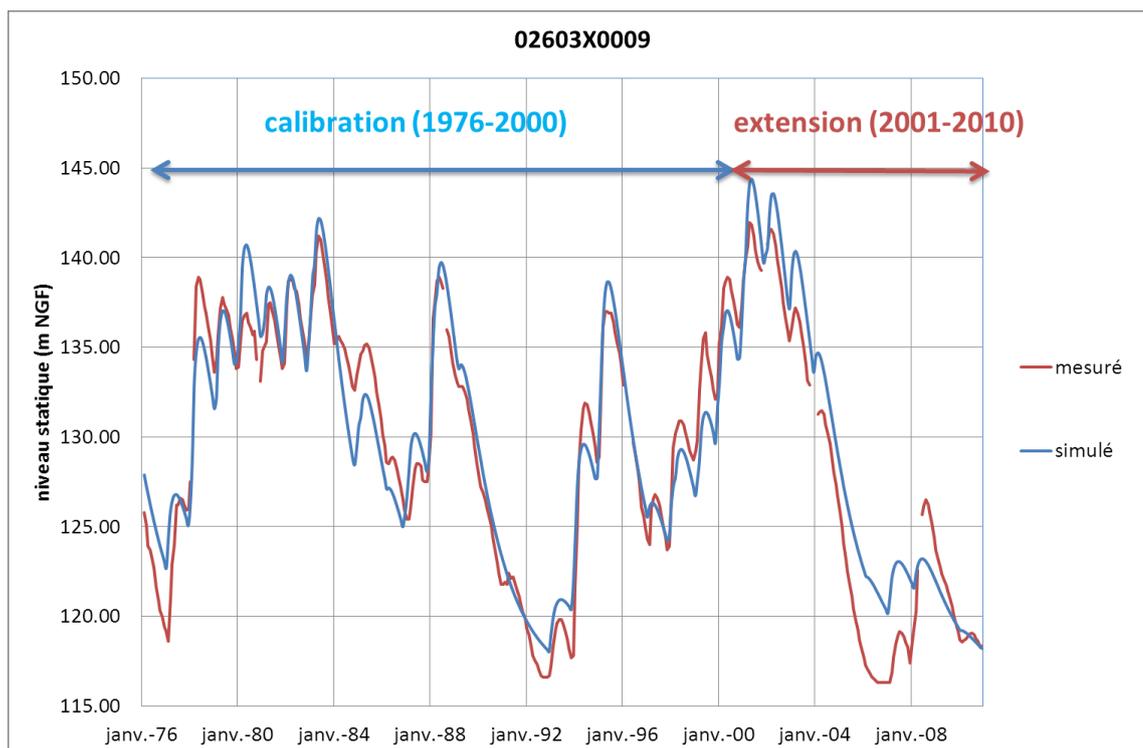


Illustration 27 – Extension de données sur la période 2001-2010 à partir des données d'ETP fournies par Météo-France (station de Melun)

Nous avons ensuite simulé l'évolution du niveau piézométrique de Saint-Martin-Chennetron à partir d'une série d'ETP recalculées sur la période 2001-2010.

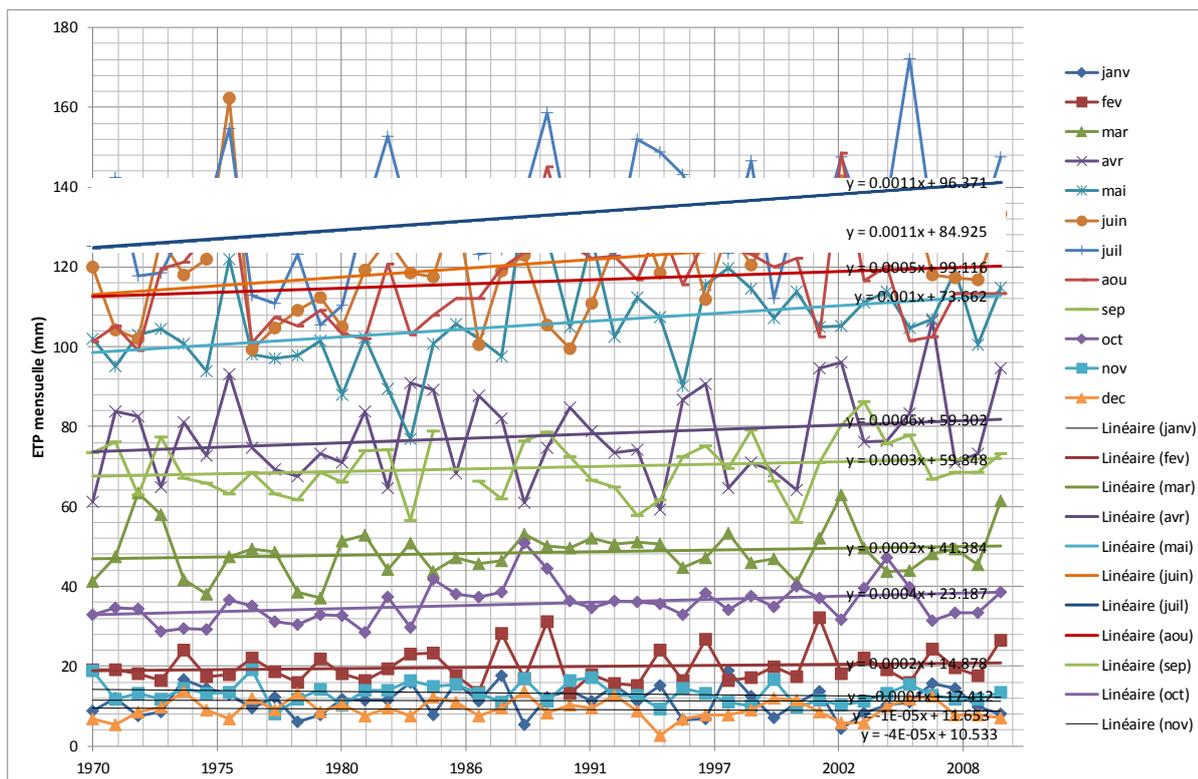
Les données utilisées sont les suivantes :

- Pluies mensuelles de Melun de 1970 à 2010
- ETP mensuelles de Melun de 1970 à 2000
- ETP mensuelles de Melun de 2001 à 2010 recalculées en considérant une absence de tendance
- Niveaux piézométriques mensuels moyens de Saint-Martin-Chennetron de 1976 à 2000

Pour calculer des ETP mensuelles en considérant une absence de tendance, nous avons d'abord déterminé les tendances mensuelles sur la période 1970-2010 (Illustration 28), puis calculé l'ETP à partir de la formule suivante :

$$ETP_{\text{calc}} = ETP_{\text{MF}} - (\text{nbannées} * \text{tendance\_mensuelle})$$

Les tendances sont les plus marquées pour les mois où l'ETP est la plus forte (mai, juin et juillet). Par contre on n'a pas de tendance pour les mois où elle est la plus faible (novembre, décembre, janvier).



	mm/jour	nb jours	mm/an
janv	-1.00E-05	31	-0.00365
fev	0.0002	28	0.07300
mar	0.0002	31	0.07300
avr	0.0006	30	0.21900
mai	0.001	31	0.36500
juin	0.0011	30	0.40150
juil	0.0011	31	0.40150
aoû	0.0005	31	0.18250
sep	0.0003	30	0.10950
oct	0.0004	31	0.14600
nov	0.0001	30	0.03650
dec	-4.00E-05	31	-0.01460

Illustration 28 – Tendances mensuelles calculées sur l'ETP à la station de Melun (77)

Le tableau ci-dessous (Illustration 29) donne les ETP fournies par Météo-France pour la période 2001-2010 et les ETP recalculées pour la même période sans tendance à la hausse. Ces dernières ont été utilisées pour à nouveau simuler l'évolution piézométrique de Saint-Martin-Chennetron.

La diminution d'ETP entraîne naturellement une remontée du niveau piézométrique, mais les différences entre les deux simulations apparaissent assez faibles (Illustration 30). Elles commencent à se manifester à partir de 2007 où on voit une différence de niveau piézométrique qui peut atteindre 45 cm, ce qui est très faible par rapport à l'incertitude du calage. Sur un cycle hydrologique, les différences les plus importantes s'observent alors en été (Illustration 31).

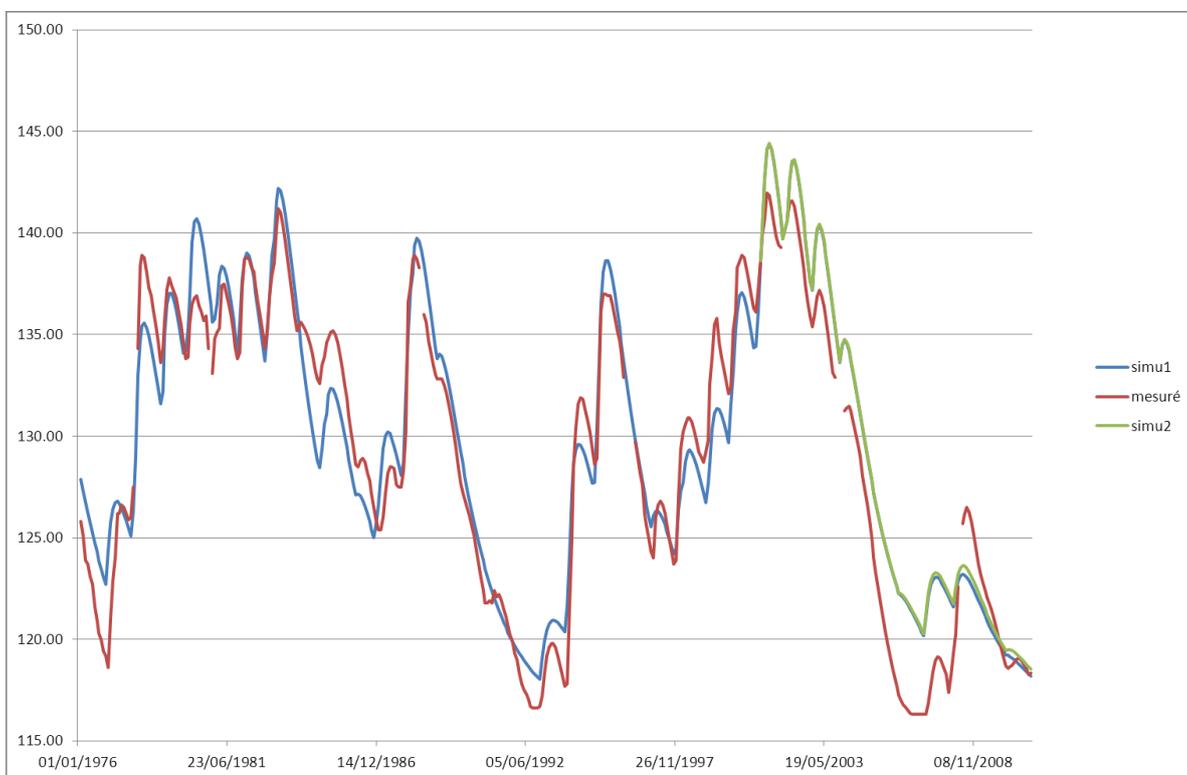
Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines – année 2

	janv	fev	mar	avr	mai	juin	juil	aoû	sep	oct	nov	dec
2000	7.1	19.9	47	68.8	107.1	129.2	112	119.9	66.4	34.8	16.7	12
2001	10.8	17.3	41	64.2	113.7	131.6	134.1	122.3	56	40.1	9.7	11.4
2002	13.6	32.2	52.1	94.7	104.9	130.6	128.2	102.4	71.1	37	11.4	8.5
2003	4.2	18.2	62.9	96	105.1	141.5	147.5	148.6	80.3	31.6	10.3	5.9
2004	8.2	22	49.5	76.1	111	128.7	131.7	116.4	86.2	39.5	11.1	5.9
2005	10.3	19	43.8	76.4	113.9	140.5	136.3	120.1	75.7	47.1	13.2	9.9
2006	10.9	15.9	43.9	83.2	104.7	140.6	172.2	101.6	77.9	39.8	15.5	11.6
2007	15.6	24.3	48	106.4	107	118	131.1	102.6	66.8	31.3	12.8	12.4
2008	14.5	19.6	49.4	70.9	118.9	117.3	140.7	113.4	68.5	33.4	11.8	7.8
2009	9.8	17.7	45.5	73.3	100.6	116.8	129.1	113.4	68.5	33.4	11.8	7.8
2010	8	26.4	61.3	94.7	114.7	133.3	147.4	113.4	73.3	38.5	13.4	7

2000	7.1	19.9	47.0	68.8	107.1	129.2	112.0	119.9	66.4	34.8	16.7	12.0
2001	10.8	17.2	40.9	64.0	113.3	131.2	133.7	122.1	55.9	40.0	9.7	11.4
2002	13.6	32.1	52.0	94.3	104.2	129.8	127.4	102.0	70.9	36.7	11.3	8.5
2003	4.2	18.0	62.7	95.3	104.0	140.3	146.3	148.1	80.0	31.2	10.2	5.9
2004	8.2	21.7	49.2	75.2	109.5	127.1	130.1	115.7	85.8	38.9	11.0	6.0
2005	10.3	18.6	43.4	75.3	112.1	138.5	134.3	119.2	75.2	46.4	13.0	10.0
2006	10.9	15.5	43.5	81.9	102.5	138.2	169.8	100.5	77.2	38.9	15.3	11.7
2007	15.6	23.8	47.5	104.9	104.4	115.2	128.3	101.3	66.0	30.3	12.5	12.5
2008	14.5	19.0	48.8	69.1	116.0	114.1	137.5	111.9	67.6	32.2	11.5	7.9
2009	9.8	17.0	44.8	71.3	97.3	113.2	125.5	111.8	67.5	32.1	11.5	7.9
2010	8.0	25.7	60.6	92.5	111.1	129.3	143.4	111.6	72.2	37.0	13.0	7.1

*Illustration 29 - ETP fournies par Météo-France pour la période 2000-2010 et recalculées sans tendance à la hausse*



*Illustration 30 – Extension de données sur la période 2001-2010 à partir des données d’ETP de Météo-France (simu1) et recalculées sans tendance (simu2)*

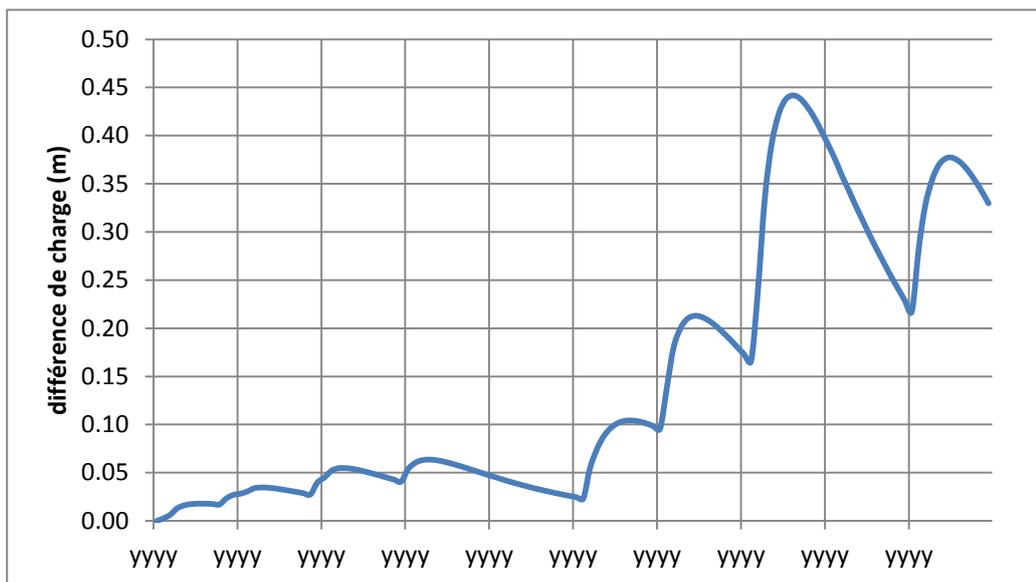


Illustration 31 – Différence entre les niveaux piézométriques calculés par le modèle avec les deux séries d'ETP sur la période 2001-2010

## 5. Evolution des niveaux piézométriques en fonction de scénarios de changement climatique

L'évolution des niveaux piézométriques est liée à l'infiltration des eaux météoriques dans le sol et la zone non-saturée (recharge), une composante de la pluie efficace, elle-même très sensible au changement climatique. Afin d'affiner le choix des points de suivi dans les zones sensibles, il avait été prévu de réaliser une modélisation du comportement de certains piézomètres sélectionnés en fonction de scénarios de changement climatique. Cette approche présente un inconvénient majeur, à savoir des résultats ponctuels couvrant une faible partie du territoire. Il nous a semblé plus pertinent d'avoir une vision globale de l'évolution des niveaux piézométriques en fonction de scénarios de changement climatique sur l'ensemble du territoire, et ce, en utilisant les résultats de modélisation du projet Explore 2070 (lot 4, hydrologie souterraine, *rapport provisoire*), en particulier les calculs de recharge. Les calculs ont été réalisés en utilisant le scénario d'émission médian A1B et sept modèles de climat (Illustration 32). Il faut noter que les simulations de précipitations et températures donnent des résultats très variables d'un modèle climatique à l'autre et que les valeurs de précipitations extrêmes peuvent être très différentes (Illustration 33 et Illustration 34).

Scénario	Modèle	Nom de la simulation	Centre climatique	Période fournie : (années hydrologiques comprises entre)
A1B	ARPEGE V3+	A1B-ARPV3	Météo-France	1961-1991 2046-2065
A1B	GFDL-CM2.0	A1B_GFDL-CM2.0	GFDL (USA)	1961-1991 2046-2065
A1B	GFDL-CM2.1	A1B_GFDL-CM2.1	GFDL (USA)	1961-1991 2046-2065
A1B	ECHAM5/MPI	A1B_ECHAM5-MPI	MPI (Allemagne)	1961-1991 2046-2065
A1B	MRI-CGCM2.3.2	A1B_MRI-CGCM2.3.2	MRI (Japon)	1961-1991 2046-2065
A1B	CCCMA_CGCM3	A1B_CCCMA-CGCM3	CCCMA (Canada)	1961-1991 2046-2065
A1B	GISS_MODEL_ER	A1B_GISS-MODEL-ER	GISS (USA)	1961-1991 2046-2065

Illustration 32 - Simulations « AR4 désagrégées par méthode CERFACS dsclim » fournies au projet Explore 2070

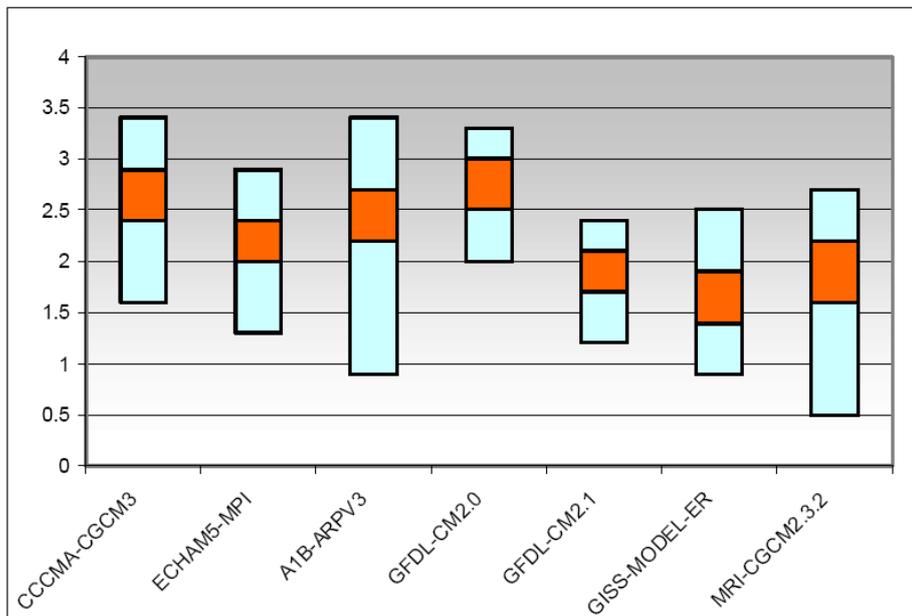


Illustration 33 - Ecart de moyenne annuelle de la température (en °C) quotidienne Safran simulé pour la France métropolitaine entre simulations 2046-2065 et référence 1961-1990 : intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour l'ensemble des 7 simulations climatiques-scénario A1B

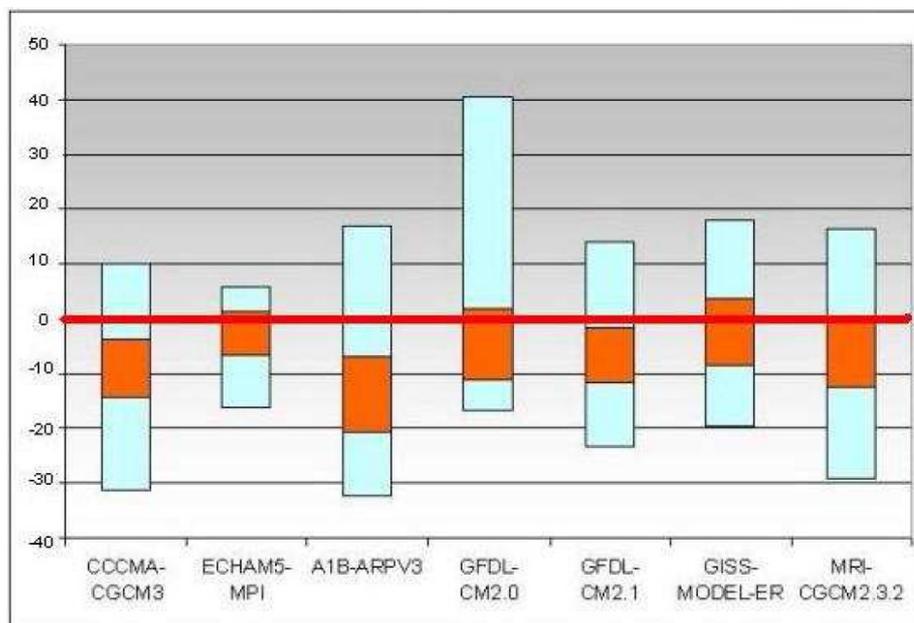


Illustration 34 - Rapports moyens du cumul annuel pluviométrique Safran simulé pour la France métropolitaine, pour la période de référence 1961-1990 aux cumuls simulés sur la période 2046-2065 pour l'ensemble des 7 simulations climatiques-scénario A1B (en %/valeur de réf.) – (MEDDTL, 2012)

## 5.1. EVOLUTION DE LA RECHARGE

Dans le cadre de ce projet, des cartes de recharges ont été établies pour la période actuelle (1961-1990) et le futur (2046-2065) à l'échelle des bassins versants de référence du projet (BV hydrographiques).

La recharge retenue pour les bassins versants Explore 2070 (illustration 35) est ainsi constituée des valeurs obtenues par modélisations hydrodynamiques complétées pour les bassins non modélisés par la recharge obtenue à l'aide de la lame ruisselée au moyen des résultats de modélisation GR4 réalisées par Irstea et 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 et de l'IDPR.

Hormis quelques bassins où les résultats fournissent une recharge proche voire supérieure à la pluie efficace et dont les valeurs peuvent être considérées comme légèrement surestimées, la recharge ainsi obtenue varie entre 20% (Durance\*) et 90 % de la pluie efficace avec une valeur moyenne comprise entre 55 et 60%. En valeur absolue, elles varient de 88 mm (Durance) ou 98 mm (Seine) à 600 mm (Pays Basque) voire 724 mm (Ain) autour d'une valeur moyenne d'environ 230 mm (Leyre, Cotentin,...).

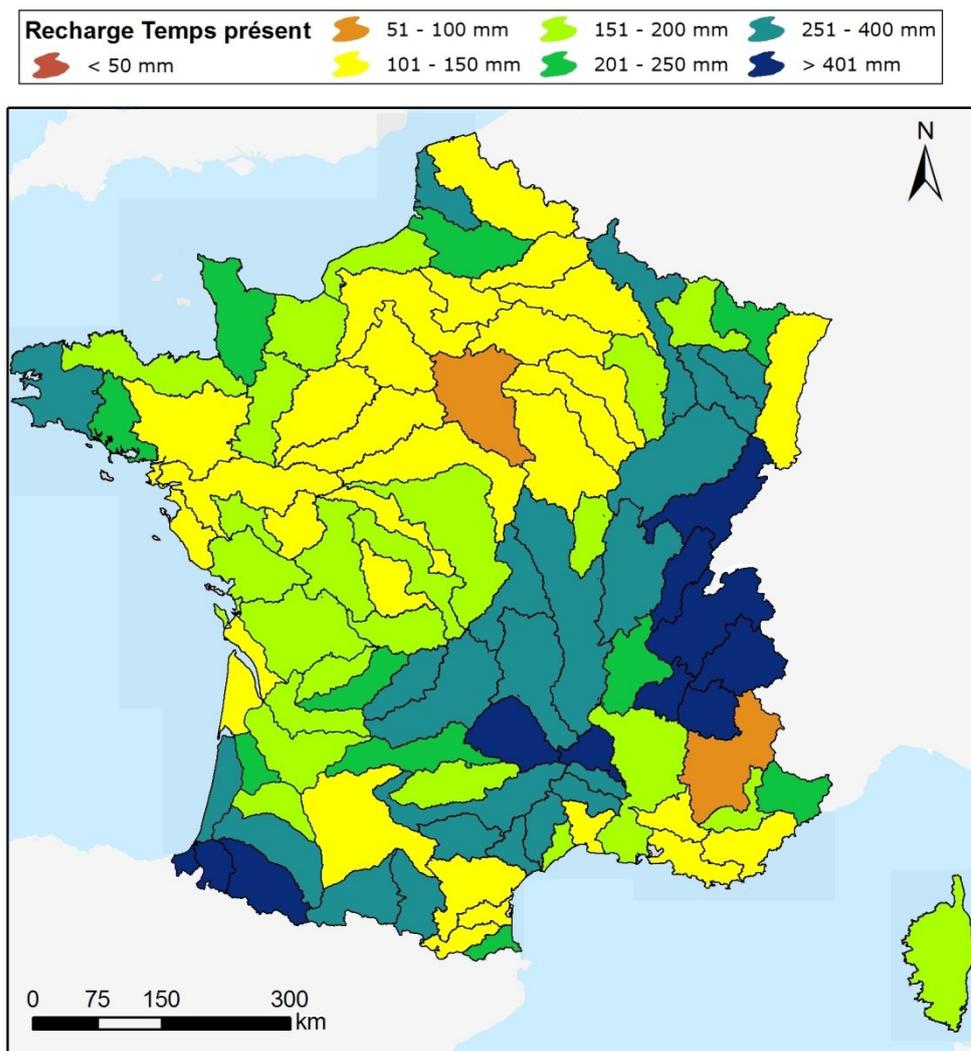


illustration 35 : Carte de la recharge temps présent (rapport provisoire Explore 2012)

La recharge temps futur est déterminée de façon similaire. Toutefois, afin de préciser les incertitudes dérivant des différents modèles climatiques utilisés dans le cadre de cette étude, il apparaît nécessaire de fournir non seulement la valeur moyenne obtenue par l'intermédiaires de ces sept modèles mais également les valeurs maximales et minimales des écarts évalués entre la recharge future et la recharge actuelle par chacun de ces modèles. Il y a donc trois cartes proposées permettant ainsi de fournir une évaluation moyenne et des évaluations minimales et maximales.

L'examen de ces cartes indique, pour la valeur moyenne (Illustration 36), 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%.

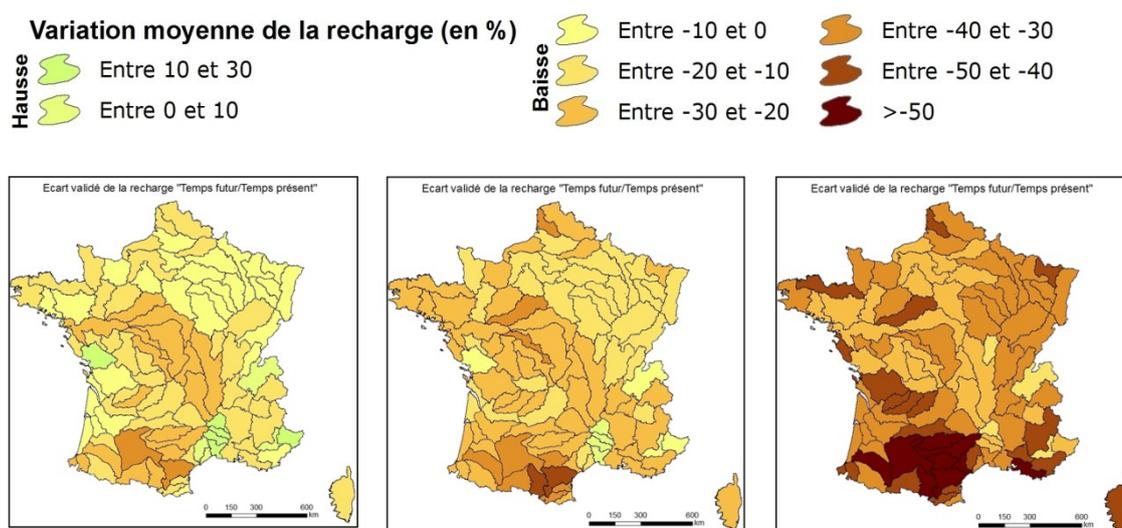


Illustration 36 - Ecart minimal, moyen et maximal de la recharge temps futur/ temps présent

Par rapport au temps présent et pour tous les modèles climatiques étudiés, l'ensemble des piézomètres montrent une baisse du niveau moyen mensuel de la nappe liée à la baisse de la recharge. Les données issues des modèles ARPV3 et CFDL- CM2.0 sont celles qui fournissent les simulations les plus pessimistes alors que les données des modèles GISS et CFDL CM2.1 fournissent les plus optimistes, et ce avec une variabilité très importante.

Sur les plateaux, les niveaux de la nappe sont relativement plus hauts et réagissent plus à la variation de la recharge comparé aux piézomètres qui sont proches de la rivière pour lesquels le niveau de la nappe est très lié au niveau de la rivière et à la cote topographique.

D'après les différentes modélisations réalisées il ressort :

- Que les modèles optimistes indiquent une légère baisse des niveaux de l'ordre de 0.5 m à 1.5 m, voire pour certaines régions (Aquitaine, Poitou, ) une hausse locale possible.
- Que les modèles pessimistes indiquent une baisse très limitée de la piézométrie au droit des plaines alluviales mais de fortes baisses, pouvant atteindre 10 m, sur les plateaux et ou contreforts au droit des bassins sédimentaires, les baisses étant conséquentes mais plus limitées sur le socle (1 à 4 m).

## 5.2. COMPARAISON AVEC LES TENDANCES ACTUELLES SUR LES PIEZOMETRES

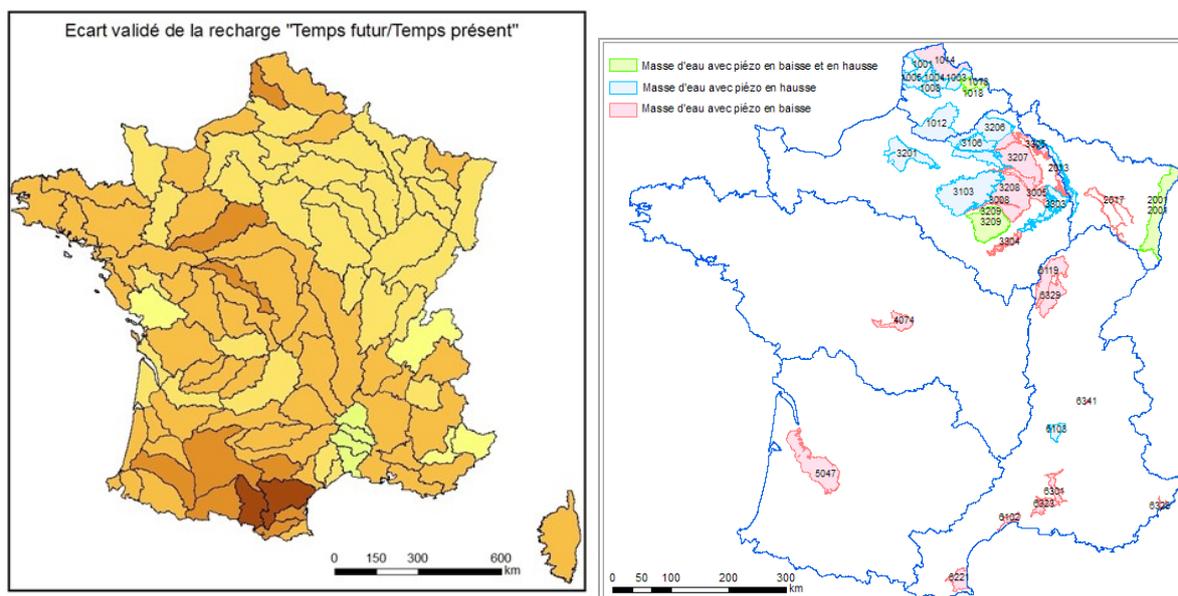
Les simulations réalisées dans le cadre du projet Explore 2070 fournissent pour la période actuelle (1961-1990) une estimation de la recharge moyenne sur la période mais pas une évolution de la recharge. Il n'est donc pas possible de comparer avec les tendances sur les piézomètres.

Par contre les simulations sur le futur (2046-2065) fournissent une estimation de l'évolution de la recharge par rapport à la période actuelle. La comparaison des tendances actuelles sur les masses d'eau souterraines et de l'évolution prévue de la recharge dans le futur (systématiquement à la baisse) montre que (Illustration 37) :

- Les masses d'eau du Tertiaire, de la craie et des calcaires du Jurassique en Seine-Normandie qui montrent une tendance à la baisse ou à la hausse devraient voir leur recharge diminuer de manière limitée (entre 10 et 20%)
- la masse d'eau du Plio-quaternaire du Roussillon qui montre une tendance à la baisse (peut-être accentuée par les prélèvements) devrait voir sa recharge diminuer de manière importante (entre 40 et 50%)
- la nappe d'Alsace qui montre à la fois une tendance à la baisse et une tendance à la hausse devrait voir sa recharge diminuer de manière limitée (entre 10 et 20%)
- les masses d'eau de divers systèmes alluvionnaires de la vallée du Rhône qui montre une tendance à la baisse ou à la hausse devraient voir leur recharge diminuer de manière assez importante (entre 30 et 40%)
- les masses d'eau de la craie dans le nord qui montre une tendance à la hausse devraient voir leur recharge diminuer de manière assez importante (entre 30 et 40%)
- la masse d'eau des sables des Flandres qui montre une tendance à la baisse devrait voir sa recharge diminuer de manière assez importante (entre 20 et 30%)

Même s'il est difficile de tirer des conclusions de cette comparaison, elle montre en tout cas qu'on ne doit pas limiter le réseau piézométrique aux points montrant des tendances à la baisse. En effet des tendances actuellement à la hausse pourraient s'inverser dans les années à venir.

Il faut également souligner l'intérêt que peut présenter cette carte d'évolution de la recharge pour la mise en place du réseau piézométrique dédié au changement climatique (cf. chapitre suivant).



Source : Stollsteiner (2012)

Illustration 37 – Comparaison de l'évolution prévue de la recharge dans le futur et des tendances actuelles sur les masses d'eau souterraines

## 6. Unités hydrogéologiques de référence pour la constitution du réseau

La définition de ces unités est un préalable à la mise en place d'un réseau de piézomètres dédié au suivi de l'évolution du niveau des nappes (année 3 de ce projet). On peut a priori les construire en intersectant les masses d'eau avec des zones climatiques, puis à les hiérarchiser en fonction d'un indicateur de recharge.

### 6.1. ZONES CLIMATIQUES : LA CARTE AURORE DE METEO-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 38, construite avec les données fournies par Météo-France).

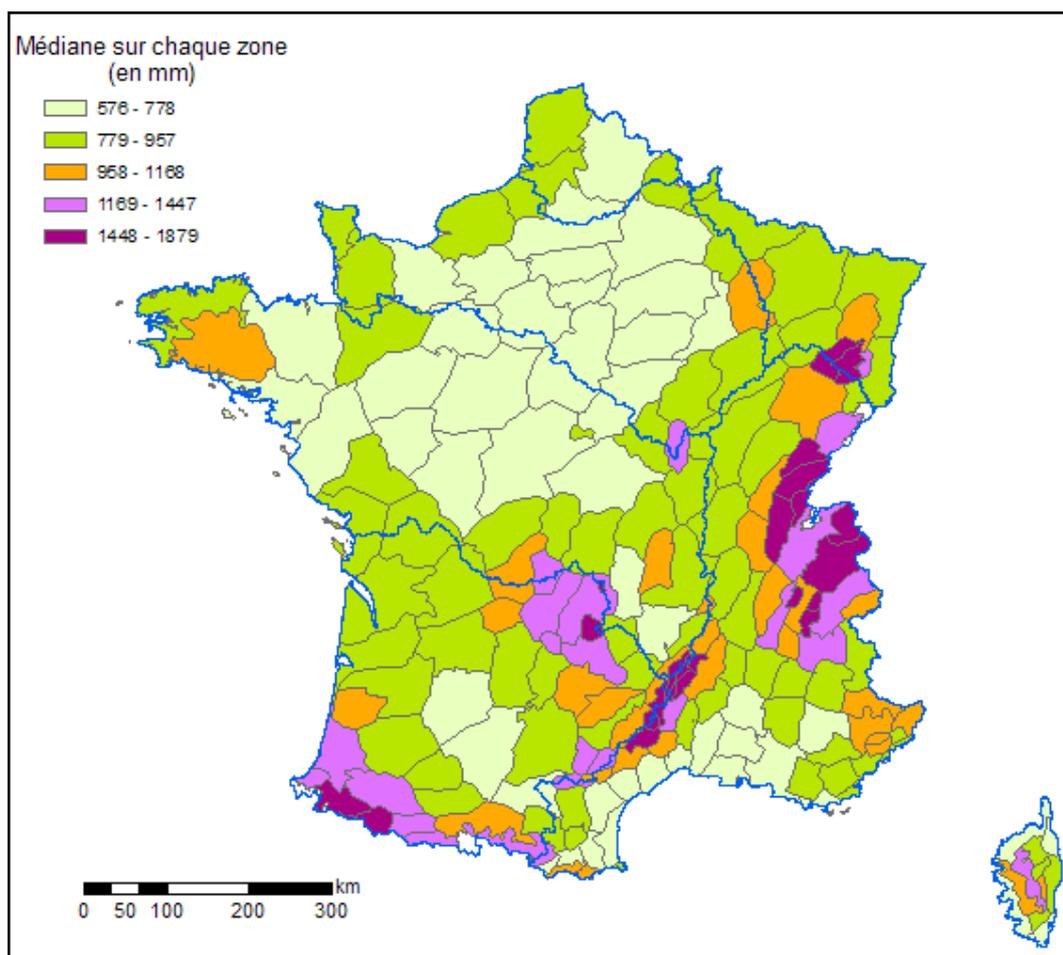


Illustration 38 – Zones climatiques "Aurore" (source Météo France)

## 6.2. INTERSECTION DE LA CARTE "AURORE" AVEC LES MASSES D'EAU ET CARACTÉRISATION DES INTERSECTIONS PAR L'IDPR

### 6.2.1. IDPR (Indice de Développement et de Persistance des Réseaux)

L'indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR), introduit par le BRGM dans le cadre des études de vulnérabilité, permet une approche indirecte de la partition entre ruissellement et infiltration, problème récurrent dans l'estimation de la recharge des nappes.

L'IDPR est calculé en comparant un réseau théorique indépendant, calculé à partir du MNT, (*indice de développement ID*), au réseau naturel mis en place (*de persistance des réseaux PR*) : en tout point, c'est le rapport entre la distance de ce point au plus proche cours d'eau théorique et sa distance au plus proche cours d'eau réel.

Il varie selon une échelle comprise entre 0 et n et est ramené à une gamme de 0 à 2000. Les deux distances calculées sont pondérées par la pente.

L'IDPR est inférieur à 1000 quand le réseau théorique n'est pas repris par une rivière réelle. Ce rapport indique alors une infiltration majoritaire des eaux. Inversement, quand le réseau réel est plus dense que le réseau calculé, on est en zone de ruissellement majoritaire, l'IDPR tend vers 2000 (tableau 10).

IDPR < 1000	Infiltration majoritaire par rapport au ruissellement superficiel. L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint un axe de drainage défini par l'analyse des talwegs sans que celui-ci ne se concrétise par l'apparition d'un axe hydrologique naturel.
IDPR = 1000	Infiltration et ruissellement superficiel de même importance. Il y a conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés au talweg et les écoulements en place.
IDPR > 1000	Ruissellement superficiel majoritaire par rapport à l'infiltration vers le milieu souterrain. L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint très rapidement un axe hydrologique naturel sans que la présence de celui-ci soit directement justifiée par un talweg.
IDPR voisin ou égal à 2000	Stagnation transitoire ou permanente des eaux, menant à deux interprétations différentes. Si la nappe est proche de la surface des terrains naturels, (cours d'eau et zones humides), le terrain est saturé et l'eau ne s'infiltré pas. Si la nappe est profonde, le caractère ruisselant peut démontrer une imperméabilité des terrains naturels.

Tableau 10 – Partition des valeurs de l'IDPR

La carte de l'illustration 39 montre la répartition de l'IDPR à l'échelle du territoire sur un maillage composé de cellules de 50 m de côté. Les zones rouges et vertes indiquent respectivement les zones infiltrantes et ruisselantes.

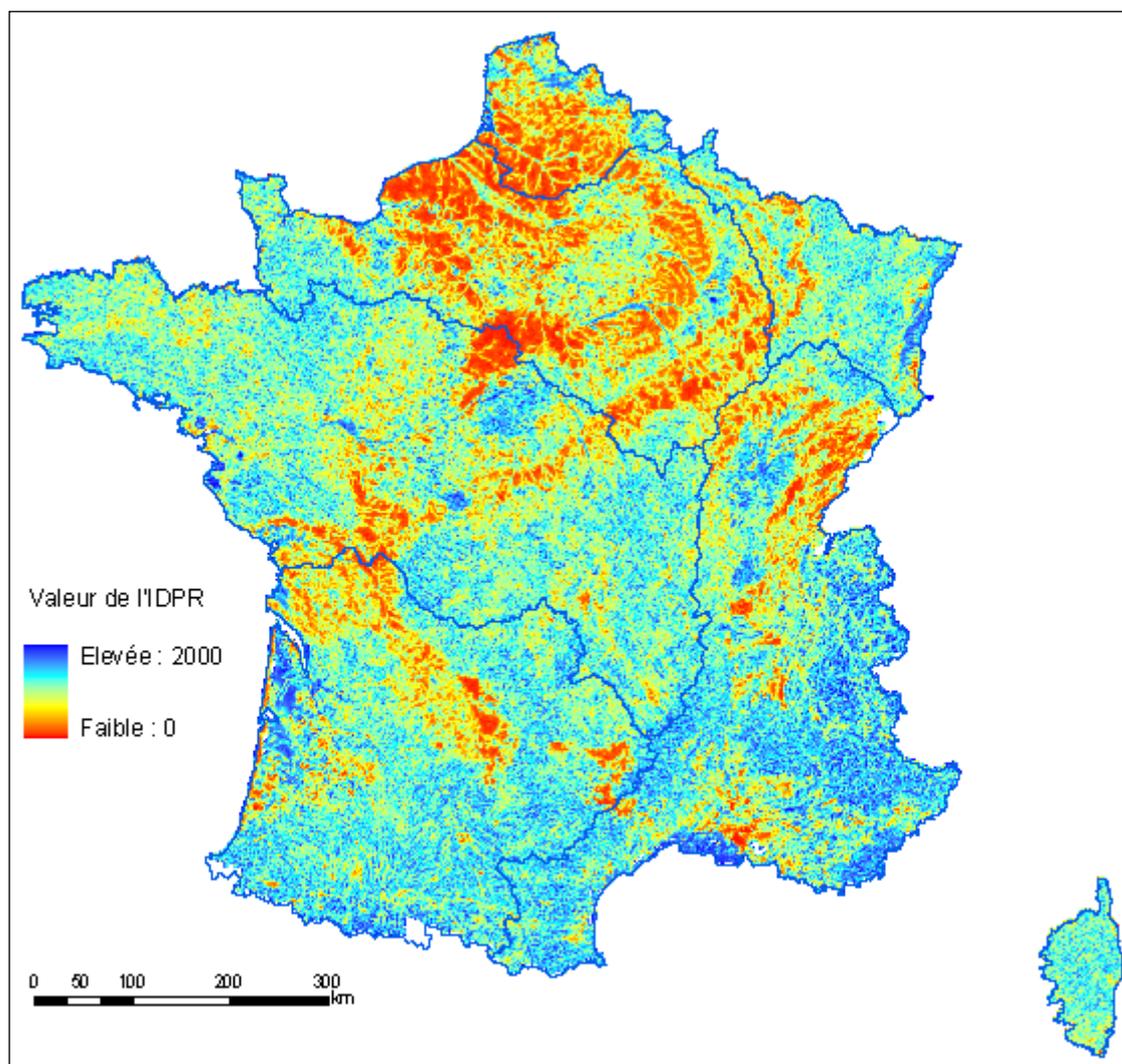
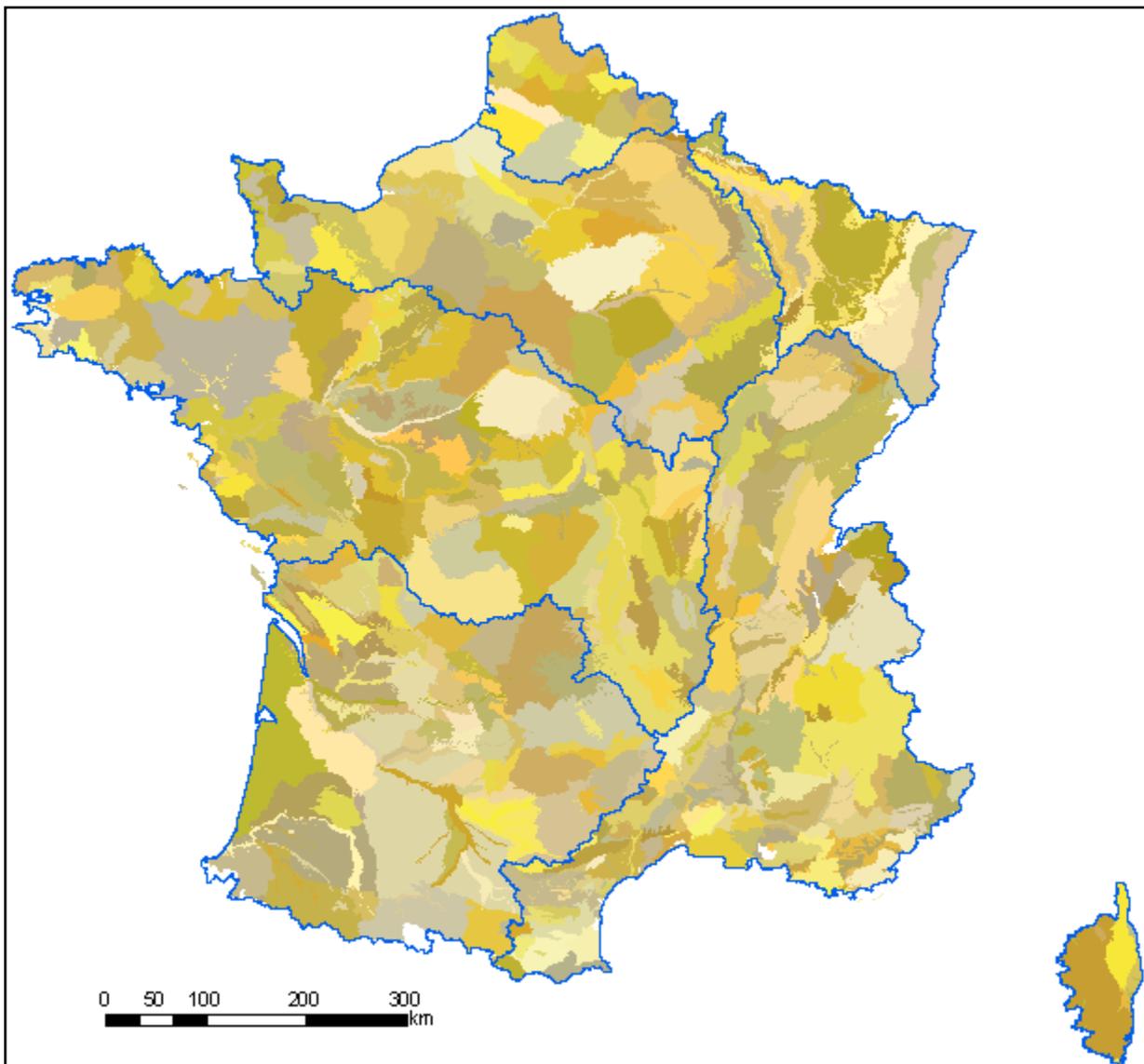


Illustration 39 – Cartographie de l'IDPR

### 6.2.2. Caractérisation des intersections masses d'eau – zones climatiques et IDPR

Les masses d'eau affleurantes (Illustration 40) sont au nombre de 498. Leur intersection avec les zones climatiques de la carte Aurore conduit à 1677 secteurs de masses d'eau caractérisables par une valeur d'IDPR (Illustration 41 et Illustration 42).



*Illustration 40 - Carte des masses d'eau affleurantes*

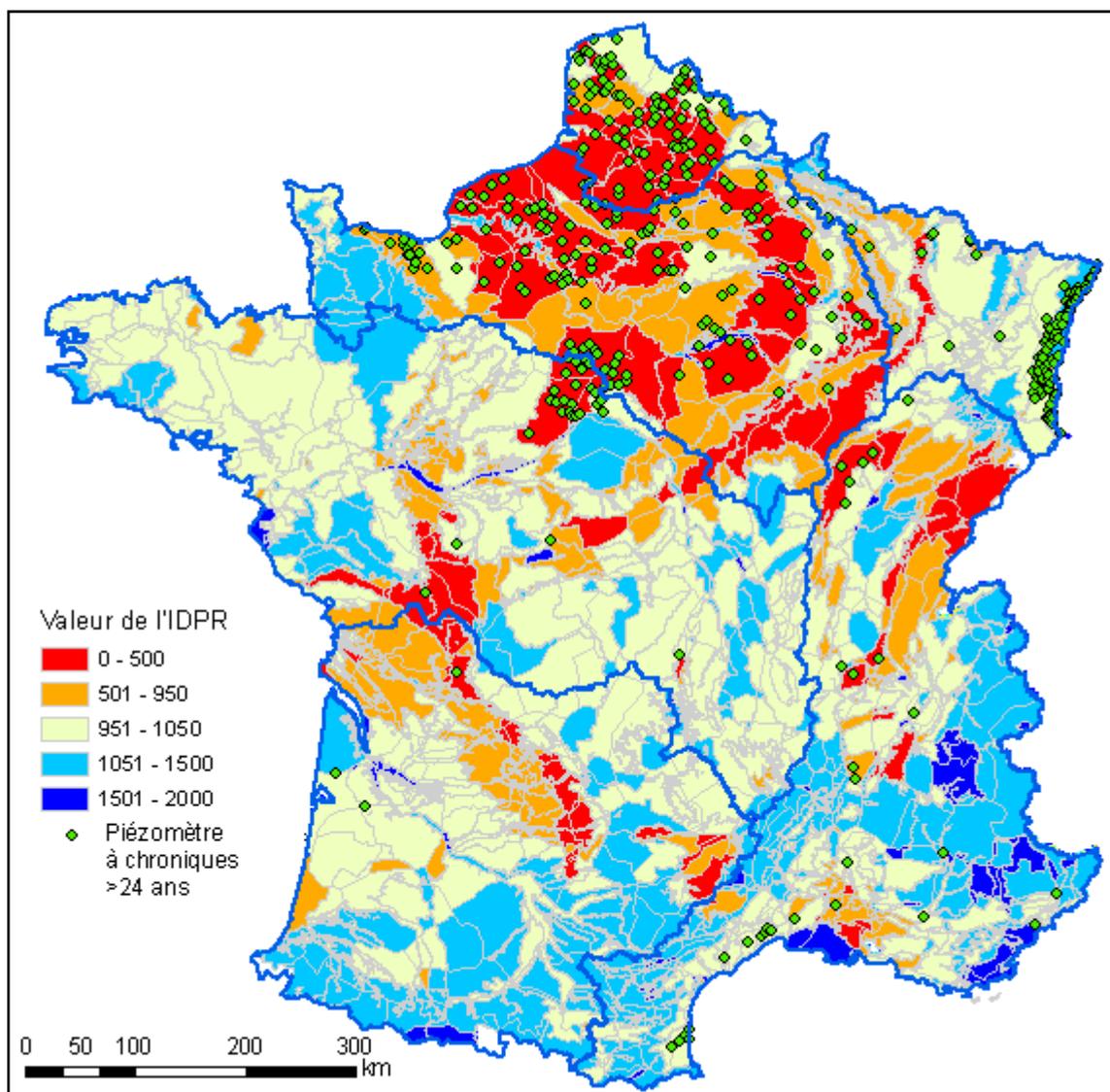


Illustration 41 – Caractérisation par l'IDPR des intersections zones climatiques/masses d'eau et report des piézomètres ayant 25 ans au moins de mesures

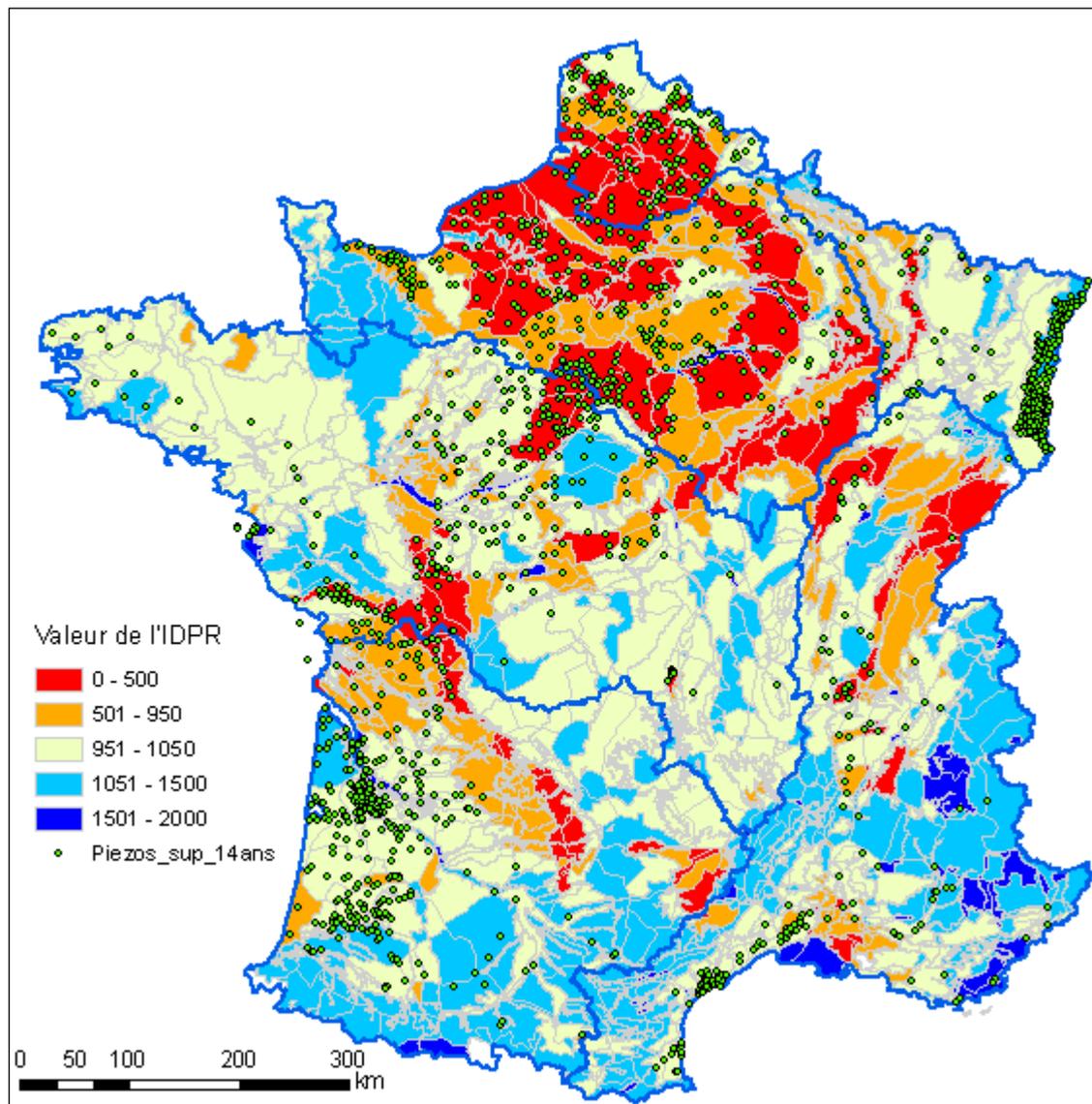
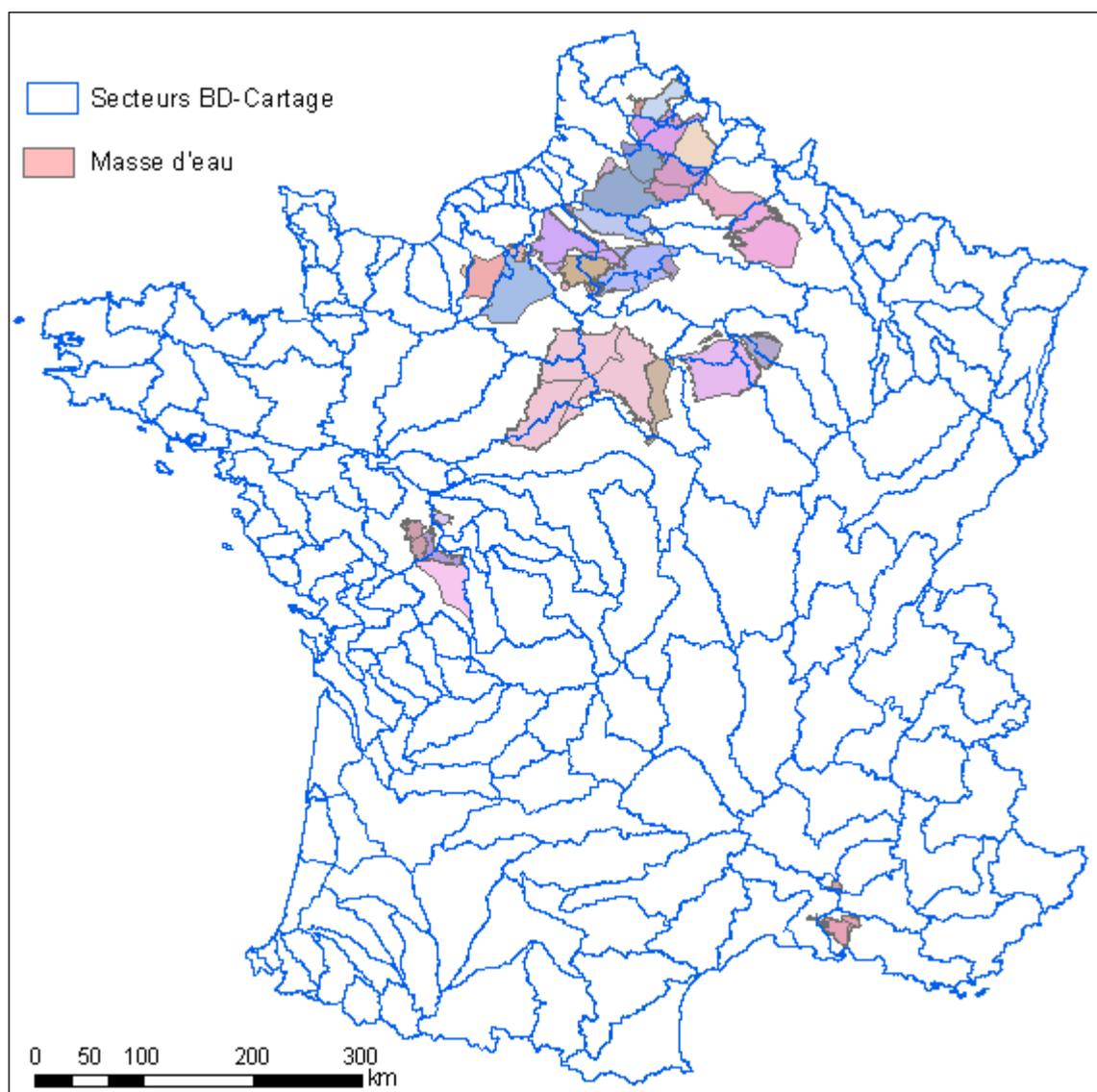


Illustration 42 – Caractérisation par l'IDPR des intersections zones climatiques/masses d'eau et report des piézomètres ayant 15 ans au moins de mesures

Sur cette base, en année 3 du projet, des sélections d'unités hydrogéologiques de référence pertinentes seront faites en tenant compte du découpage territorial (régions hydro-géoclimatiques) pour l'implantation de stations hydrométriques (Renard et al., 2008).

Ci-dessous un exemple de sélection d'unités hydrogéologiques superposées aux secteurs hydrographiques de la BD-Carthage (Illustration 43).



*Illustration 43 - Exemple de sélection d'unités hydrogéologiques (IDPR <500, hauteur de précipitations annuelles normales médiane < 700 mm) et masses d'eau correspondantes*

### 6.3. ZONES DE RECHARGE

Les cartes de recharge établies dans le cadre d'Explore 2070 (Illustration 36 et Illustration 37) pourront également être utilisés pour le dimensionnement du réseau piézométrique de référence.



## 7. Conclusion

Il ressort de cette étude qu'on ne peut actuellement pas mettre en évidence un impact d'une tendance climatique significative sur le niveau des nappes (tendance climatique qui se manifeste clairement sur les températures, nettement moins sur les pluies, comme le montre en particulier l'étude de Météo-France : "*A 50 year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system*", International Journal of Climatology, 2009). Un exemple de simulation sur un piézomètre de Seine-et-Marne d'une variation de l'ETP sur 10 ans en retirant la tendance actuelle à la hausse montre une variation très faible des niveaux piézométriques (quelques cm à quelques dizaines de cm).

Les tests de détection de tendance d'évolution des nappes d'eau souterraine 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.

Les tendances à la hausse ou la baisse peuvent dans certains cas être influencées par des prélèvements à proximité du pompage sans pour autant que l'on puisse le démontrer. Sur les 70 piézomètres concernés, on en trouve 44 qui apparaissent non influencés par les prélèvements, 10 moyennement influencés et 16 fortement influencés. Cette influence va se traduire par une modification des niveaux piézométriques « naturels » mais pas nécessairement par une modification de la tendance. Quant aux ruptures constatées dans les séries de niveaux, elles correspondent à des épisodes climatiques particuliers (plus secs ou plus humides, mais avec ensuite un retour à la « normale »).

Enfin, un traitement cartographique combinant zones climatiques, zones infiltrantes, masses d'eau souterraine a permis de définir un pré-découpage de zones homogènes en terme de suivi du changement climatique. Tous ces éléments seront repris et affinés en 2012 pour la définition du réseau piézométrique dédié au changement climatique, sachant que la condition de détection du changement est d'associer plusieurs réseaux, de stations piézométriques, mais également de stations hydrométriques pour le suivi des étiages, de stations climatologiques ainsi qu'un suivi fin des prélèvements d'eau souterraine.



## 8. Bibliographie

- Bayley GV, Hammersley Jh.1 (1946) - The effective number of independent observations in an autocorrelated time series *J R Statst Soc* 8 184-197
- Hamed, K.H., Rao, A.R., 1998. A modified Mann–Kendall trend test for autocorrelated data. *J. Hydrol.* 204, 182–196.
- Kundzewicz, Z. W., Robson, A. (eds) (2000). Detecting Trend and Other Changes in Hydrological Data. World Climate Programme — Water, World Climate Programme Data and Monitoring, WCDMP-45, WMO/TD no. 1013. World Meteorological Organization.
- Marsily de G. (2004) – Cours d'hydrogéologie, Université Paris VI
- MEDDTL (2012) – Explore 2070, lot n° 4 - Résumé du rapport final volume 9 Hydrologie souterraine
- Renard B. (2006). Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France. Thèse INP Grenoble.
- Renard B., Lang M., Sauquet E. (2008) - Identification des impacts hydrologiques du changement climatique, convention de partenariat 2008 ONEMA-Cemagref.
- Sen P.K. (1968) – Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *J. Am. Stat. Assoc.*, n°63.
- 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
- Vidal J.P., Martin E., Franchistéguy L., Baillon M. and Soubeyroux J.M. (2009) - A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system, *Int. J. Climatol.*
- Woodward W.A. and Gray H.L.(1993) – Global warming and the problem of testing for trends in time series data, *J. of Climate*, 6, 953-962
- Yue, S., Wang, C.Y., 2002a. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann–Kendall test. *Water Resour. Res.* 38 (6), 1068. doi:10.1029/2001WR000861.
- Yue, S. & Wang, C. Y. (2002) Assessment of the significance of serial correlation by the bootstrap test. *Water Resour. Manage.* **16**, 23–35.
- Yue, S., Pilon, P. & Cavadias, G. (2002) Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *J. Hydrol.* **259**, 254–271.
- Yue, S., Pilon, P. & Phinney, B. (2003) Canadian streamflow trend detection : impacts of serial and cross-correlation. *Hydrol. Sci. J.* **48**(1), 51–63.



## **Annexe 1**

# **Ouvrages de prélèvement à proximité des piézomètres**

Champs « influence » caractérisant l'influence des pompages sur le niveau d'eau du piézomètre :

1 : négligeable

2 : faible

3 : importante

prelevements										
CODE_BSS	Score	distance prelevement (m)	tendance	usage	Volume prélevé (m3/an)	influence	ID	remarques	code BDRHFv1	code MESO
00026X0040/P1	5	5000	B	IND ESU		1	1	captage eau de surface	501;	1014
00065X0011/P1	1	2000	H	IRR	5000	1	2	s négligeable	001a;	1001
00115X0011/P1	2	1300	H	AEP 001c	120000	2	3	s = 0,2 m (pour T=0.005 et S=0.01)	001c;	1005
00117X0023/P1	2	2200	H	AEP 001b	45000	1	4	s = 0,05 m (pour T=0.005 et S=0.01)	001b;	1001
00122X0064/P1	1	440	H	AEP 001b	330000	3	5	s = 0,9 m (pour T=0.005 et S=0.01)	001b;	1004
00146B0737/PZR2	1	400	H	IND 202 (+ 370000 à 465 m dans 001k)	630000	1	6	prélèvements dans masses d'eau différentes du piézo ; fiabilité de la chronique piézo ???	501;	1003
00147D0218/P1	6	15	H	AEP 001k (+18000 à 1 km)	45000	2	7	s = 0,3 m (pour T=0.005 et S=0.01)	001k;	1003
00172X0037/P1	1	3350	H	AEP 001c	60000	1	8	prélèvement dans une autre masse d'eau mais toujours nappe de la craie ; s = 0,04 m (pour T=0.005 et S=0.01)	001b;	1001
00173X0083/PZ13A	1	3200	H	AEP 001b	380000	2	9	prelevement dans une autre masse d'eau mais toujours nappe de la craie ; s = 0,28 m (pour T=0.005 et S=0.01)	001d;	1004
00187X0005/P1	8	1730	H			1	10	prél., dans autres nappes	001f;	1008
00203A0033/P1	2	650	H	IND + IRR 2500 à 800 m	2000	1	11	s négligeable	001j;	1003
00207X0133/F1	6	1500	H	ESU		1	12	piezo qui capte deux nappes !!!	001i;201c;	1006
00225X0077/FC2	2	940	B	AEP 002a1	750000	3	13	s= 0,9 m (pour T=0.005 et S=0.01) ; piezo qui capte deux nappes !!!	002a1;201c;	1007
00625X0002/S1	3	1200	H	AEP	20000	1	14	s négligeable	008b;	1012
00675X0019/S1	1	340	H	AEP	15000	1	15	s= 0,04 m (pout T=0.005 et S=0.01)	015;	3206
01066X0133/S1	2	1600	H	AEP ME3106	215000	2	16	s= 0,3 m (pour T=0.005 et S=0.01)	013a1;	3106
01256X0002/S1	2	2800	H	AEP ME3201	350000	2	17	s= 0,3 m (pour T=0.005 et S=0.01)	010b1;	3201
01377X0205/F3	1	4300	B		1900000	3	18	s = 0,9 m (pour T=0.005 et S=0.01)	207d;	2010
01593X0014/LV2	2	3400	B		25000	1	19	s négligeable	018a1;	3207
01853X0002/S1	2	3000	H	AEP ME3103	700000	2	20	s= 0,5 m (pour T=0.005 et S=0.01)	022b1;	3103
01918X0006/P1	2	4500	B		10000	1	21	s négligeable	206x;	3305
01987X0009/337C	3	1000	H	5	6000	1	22	s négligeable		2001
01995X0007/343	1	1500	B		90000	1	69	s = 0,13 m (pour T=0.005 et S=0.01)		
02267X0030/S1	2	580	B	AEP ME3005	940000	3	23	piezo et AEP dans alluvions ; s= 0,7 m (pour T=0.02 et S=0.01)	021a1;	3005
02344X0055/319	3		B			1	24	info AERM		2001
02344X0062/328A	4		B			1	70	info AERM		
02344X0070/319D1	1		B			1	25	info AERM		2001
02347X0014/316	2		B			1	26	info AERM		2001
02347X0062/245S	2		H			1	27	info AERM		2001
02351X0013/320A	2		B			1	28	info AERM		2001
02352X0002/339A	2		B			3	29	info AERM		2001
02615X0020/S1	4	4000	B	AEP ME3209	80000	1	30	s = 0,03 m (pour T=0.005 et S=0.01)	029;	3209
02621X0085/PZ	6	1800	B	AEP ME3208		1	31	prelevement dans autre aquifère	020;	3008
02653X0001/F1	4	3600	H	AEP 3303	45000	1	32	s= 0,03 m (pour T=0.005 et S=0.01)	069a1;	3303
02663X0001/S	2	3200	H			1	33	info AERM	206a;	2013
02718X0017/233	1	2600	B	4	3000000	3	34	s = 2,67 m (pour T=0.005 et S=0.01)		2001
02726X0016/236F	4		H			1	35	info AERM		2001
03043X0056/PZ4	4		B			3	36	info AERM	302b;	2017
03074X0013/218	2		B			1	37	info AERM		2001
03077X0238/209F	6		B			1	38	info AERM		2001
03078X0014/214	3		B			1	39	info AERM		2001
03081X0038/269	1	2000	H	2	200000	2	40	s = 0,23 m (pour T=0.005 et S=0.01) + autres prélèvements à proximité		2001
03082X0023/227	2/1		H/B			1	41	info AERM		2001
03314X1035/P	1	7000	H		60000	1	42		030;	3209

prelevements										
CODE_BSS	Score	distance prelevement (m)	tendance	usage	Volume prélevé (m3/an)	influence	ID	remarques	code BDRHFv1	code MESO
03422X0029/95	2	800	B	2	160000	2	43	s = 0,33 m (pour T=0.005 et S=0.01)		2001
03424X0029/203	2		B			3	44	36 points de prélèvements sur la commune		2001
03428X0067/91B	3		B			1	45	info AERM		2001
03431X0027/207A	1		B			1	46	info AERM		2001
03693X0017/P2	6	3000	B	AEP 3216		1	47	prelevement dans autre aquifère	066;	3304
03782X0080/84B	2		H			3	48	info AERM		2001
03788X0039/49	4		B			1	49			2001
03795X0037/55	1		B			1	50	info AERM		2001
03795X0093/PZ-N2	4		B			3	51	s = 0,51 m (pour T=0.005 et S=0.01) + situé à 500 m du Rhin		2001
04134X0022/39	3		B			3	52	info AERM		2001
04138X0019/25	3		B			1	53	info AERM		2001
04697X0004/SONDAG	1	80	B	AEP 098a	85000	2	54	s = 0,37 m (pour T=0.005 et S=0.01)	098a;	6119
05264X0029/S	6	270	B	AEP 174d	15000	1	55	prelevement dans autre aquifère	174b;	6329
05445X0081/P1	2/1	2200	B/H	IRR ?	127000	2	56	V annuel = V etiage ; s = 0,24 m (pour T=0.005 et S=0.01) sur 4 mois	057a1;	4074
07488X0011/F	6	3200	B	AEP 543b	400000	1	57	s = 0,03 m (pour T=0.005 et S=0.01)	543b;	6341
08184X0084/PZ1	3	1300	H	AEP 154a	600000	3	58	s = 0,9 m (pour T=0.005 et S=0.01)	154a;	6103
08511X0036/F1	6	2900	B	IRR (nappe inconnue)	100000	1	59	s = 0,1 m (pour T=0.005 et S=0.01) sur 4 mois de pompage	127a0;	5047
09146X0074/PU	3	1500	B	IND 155b	560000	3	60	s = 0,8 m (pour T=0.005 et S=0.01)	155b;	6301
09665X0073/203	2	1400	B	AEP 328b	900000	3	61	s = 1,3 m (pour T=0.005 et S=0.01)	328b;	6323
09724X0023/P2	6	660	B	IND 330	20000	1	62	s = 0,04 m (pour T=0.005 et S=0.01)	330;	6328
09907X0321/MLS3	4		B	IND + AEP 556c		1	63	prelevement dans autre aquifère	328c;	6102
10908X0263/FIGUER	6		B	IND 146		1	64	prelevement dans autre aquifère + prises ESU à 1 km	225;	6221
10912X0024/F	6	700	B		4000	1	65			6221
10912X0061/F3N4	6	30	B	AEP 146 (code erroné : 225 ??)	150000	3	66	s = 1 m (pour T=0.005 et S=0.001) nappe captive		6221
10915X0255/F2N3	6	1000	B	IRR 146 ??	70000	2	67	s = 0,27 m (pour T=0.005 et S=0.01) sur 4 mois de pompage		6221
10916X0061/F1N4	4	400	B	AEP 146 (code erroné : 225 ??)	275000	3	68	s = 1 m (pour T=0.005 et S=0.001) nappe captive		6221

## **Annexe 2**

### **Rappel sur les méthodes de détection d'une non stationnarité dans les séries piézométriques**

## **1. TESTS STATISTIQUES APPLIQUÉS AUX SÉRIES**

### **1.1. Tests retenus**

Une série chronologique (de pluies, de débits, de niveaux piézométriques, ...) est considérée comme non stationnaire si certaines de ses caractéristiques ont varié au cours du temps. Il peut y avoir :

- soit une modification graduelle au cours du temps, qui se manifeste par une tendance à la baisse (ou à la hausse) des valeurs de la série,
- soit une rupture (ou plus) survenant à une certaine date, les caractéristiques de la série n'étant plus les mêmes à partir de la date de rupture,
- soit un changement dans la distribution de probabilité d'une variable caractérisant la série à partir d'une date donnée.

Pour détecter ces changements et surtout leur significativité (au sens statistique), de nombreuses méthodes ont été mises au point depuis longtemps puis régulièrement affinées en hydro-climatologie, en particulier dans le cadre des études portant sur le changement climatique.

On trouvera une liste de ces méthodes et de nombreuses références dans la thèse de B. Renard (2006) et dans un document de l'Organisation Météorologique Mondiale (Kundzewicz et Robson, 2000).

Dans le cadre de cette étude, les méthodes et tests statistiques qui ont été choisis (sur une base bibliographique) et appliquées aux séries piézométriques sélectionnées sont,

- pour la détection d'une tendance :
  - la régression linéaire et le test de significativité du coefficient de régression,
  - la régression linéaire "modifiée" dans le cas d'une autocorrélation présente dans la série étudiée,
  - la méthode et le test de Mann Kendall,
  - le test de Mann-Kendall modifié dans le cas d'une autocorrélation ;
- pour la détection d'une rupture :
  - le test de Pettitt.

### **1.2. Caractéristiques des tests "tendance/rupture" retenus**

Les tests de Mann-Kendall et de Pettitt appartiennent à la catégorie des tests dits "non paramétriques".

Les tests "non paramétriques" ne nécessitent pas d'hypothèse sur la loi de distribution de la variable étudiée. Ils peuvent en particulier s'appliquer aux petits échantillons où la condition de Normalité est difficile à vérifier. Ils reposent pour la plupart sur un principe simple utilisant le classement des observations. Ils sont peu sensibles aux valeurs extrêmes.

Les tests "paramétriques" ne peuvent être utilisés que sous certaines conditions ; en particulier ils requièrent que les données soient distribuées suivant une certaine loi de

probabilité, en général une Loi Normale (une transformation appropriée peut parfois être appliquée aux données pour rendre la distribution "Normale" si elle ne l'est pas).

Tests paramétriques et non paramétriques ont été utilisés dans cette étude, avec, pour les premiers, vérification que les conditions d'application soient bien remplies. A propos de ces deux types de test, citons le point de vue suivant :

*"Si les formes fonctionnelles des fonctions de distribution sont connues, c'est une perte que de ne pas faire usage de cette information. Si l'on ne dispose pas de cette information, il faudra bien que le raisonnement statistique s'en passe. Dans ce dernier cas, la critique de quelques statisticiens qui prétendent que les méthodes non paramétriques ne sont pas efficaces ne tient pas, car l'efficacité au sens habituel du mot implique l'usage complet des ressources disponibles et il ne peut être inefficace de ne pas faire usage d'informations dont on ne dispose point..."* (J. Wolfowitz, "Non parametric statistical inference, Proc. of the Berkeley Symposium, 1949, cité par J. Raison dans "Revue de statistique appliquée, 1959, tome 7, n°1 - p.83-106).

### 1.3. Rappel sur les tests d'hypothèses

Les tests d'hypothèses ont pour but de vérifier la validité d'une hypothèse faite sur un échantillon de données. L'hypothèse à tester est classiquement appelée "*hypothèse nulle*" et désignée par  $H_0$ . Si l'on décide de rejeter cette hypothèse, c'est pour admettre implicitement la validité d'une autre hypothèse  $H_1$ , appelée "*hypothèse alternative*".

La mise en œuvre du test nécessite la construction d'une *statistique de test*, c'est-à-dire d'une variable aléatoire dont on connaît la distribution de probabilité. La valeur calculée pour cette variable à partir de l'échantillon de données est ensuite comparée à la valeur théorique issue de la loi de probabilité pour un *niveau de confiance* (ou *seuil de risque*) que l'on se donne, désigné par  $\alpha$  ; en général  $\alpha$  est pris égal à 1%, 5% ou 10%.

Pour décider, la comparaison peut aussi être faite entre le seuil de risque que l'on se donne et la probabilité correspondant à la valeur calculée de la *statistique de test*, appelée "*p-value*".

La p-value est le niveau de confiance extrême du test qui permet de rejeter l'hypothèse nulle ( $H_0$  sera rejetée au seuil de risque  $\alpha$  si la p-value est inférieure à  $\alpha$ ). Plus la *p-value* sera faible, moins l'hypothèse nulle sera crédible et donc plus grande sera la confiance que l'on pourra accorder à l'hypothèse alternative.

Si l'hypothèse  $H_0$  est rejetée au seuil  $\alpha$  alors qu'elle est vraie, on commet une erreur appelée *erreur de première espèce*, dont la probabilité est  $\alpha$ .

Mais il existe aussi une deuxième erreur, appelée *erreur de 2<sup>ème</sup> espèce* qui est la probabilité  $\beta$  d'accepter l'hypothèse nulle alors qu'elle est fautive.

Les différentes situations que l'on peut rencontrer dans la mise en œuvre d'un test sont souvent résumées à l'aide du tableau ci-dessous :

Décision	Situation	
	H <sub>0</sub> vraie	H <sub>0</sub> fausse (H <sub>1</sub> vraie)
Acceptation de H <sub>0</sub>	Décision correcte avec une probabilité 1- $\alpha$	Erreur (ou risque) de 2 <sup>ème</sup> espèce, commise avec une probabilité $\beta$
Rejet de H <sub>0</sub>	Erreur (ou risque) de 1 <sup>ère</sup> espèce, avec une probabilité $\alpha$	Décision correcte prise avec une probabilité 1- $\beta$

Tableau 11- Les 4 possibilités de décision dans la mise en œuvre d'un test

On définit la *puissance d'un test* comme la probabilité (1- $\beta$ ) de rejeter l'hypothèse nulle alors qu'elle est fausse. La puissance 1- $\beta$  d'un test est une fonction du niveau de confiance  $\alpha$ . Elle est en pratique difficile à calculer.

Dans cette étude, les tests ont été évalués en ne tenant compte que de l'erreur de première espèce (définition d'un niveau de confiance  $\alpha$ ).

#### 1.4. Problème de l'autocorrélation

Toute démarche probabiliste repose sur la notion d'indépendance des observations traitées. Il faut donc s'assurer que les valeurs successives de la série constituée sont bien indépendantes les unes des autres. C'est généralement le cas en hydrologie pour des valeurs mensuelles : dans une série pluriannuelle de débits moyens mensuels, le débit d'un mois donné est en général indépendant de celui du mois précédent (sans soutien d'une nappe). C'est encore plus vrai pour des valeurs moyennes annuelles.

Par contre, pour des nappes, le niveau d'un mois donné dépend en général du niveau des mois précédents, la "portée temporelle" de cette dépendance étant d'autant plus grande que "l'inertie" de la nappe est importante (par exemple la nappe des Calcaires de Beauce où les temps de régulation sont très longs, de plusieurs années). Il y a autocorrélation (corrélation entre elles des valeurs successives de la série).

Lorsque dans une série pluriannuelle de niveaux moyens mensuels on extrait les valeurs d'un mois donné pour constituer une série "dérivée", cette autocorrélation peut s'atténuer, voire disparaître. Dans le cas des grandes nappes, une autocorrélation significative peut néanmoins persister. C'est la raison pour laquelle il faut vérifier que la série dérivée vérifie bien la notion d'indépendance. Cette vérification peut se faire par l'intermédiaire d'un corrélogramme.

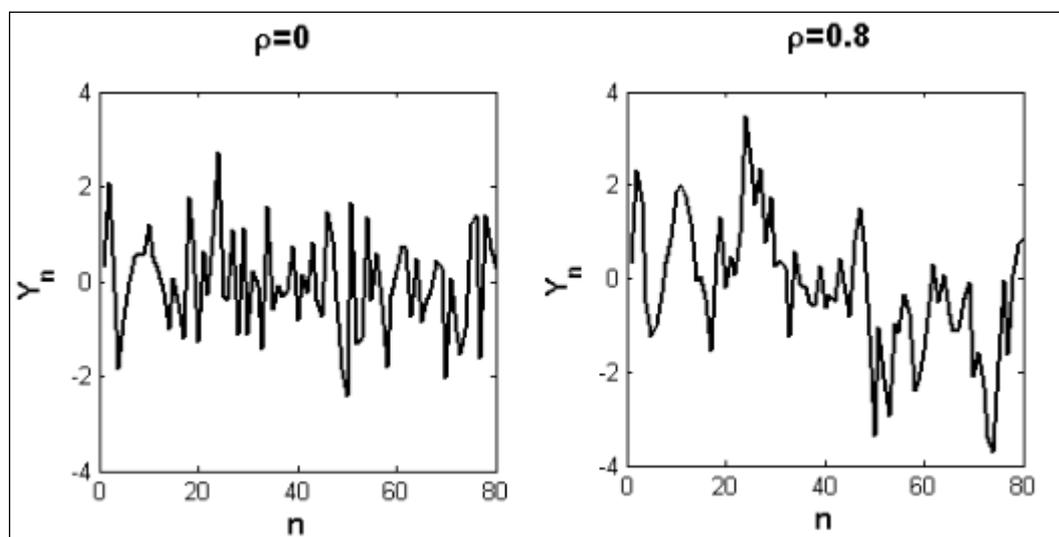
Le corrélogramme permet de mettre en évidence dans une série de données temporelles le degré de corrélation existant entre valeurs successives de la série pour des intervalles de temps croissants. Le corrélogramme représente graphiquement la

corrélation qui existe entre les valeurs de la série lorsqu'elles sont décalées de 1 pas de temps, puis 2 pas de temps, puis 3, ....

Le problème de l'autocorrélation dans les séries chronologiques a été étudié par de nombreux auteurs (cf références bibliographiques, en particulier : Woodward et Gray, 1993; Yue et al., 2002c; Yue et Wang, 2002a; Yue et Pilon, 2003; Yue et al., 2003; Yue et Wang, 2004)

L'existence d'autocorrélation dans les séries crée des tendances apparentes qui peuvent conclure à un taux de rejet important de l'hypothèse  $H_0$ , donc indiquer une tendance alors même qu'elle n'est que la manifestation d'une certaine autocorrélation.

La figure ci-dessous, empruntée à la thèse de B. Renard, illustre ce phénomène.



*Tendance apparente induite par une autocorrélation des données*

Source : Thèse B. Renard, 2006

La série de gauche a été générée suivant un "bruit blanc" gaussien (autocorrélation  $\rho = 0$ ) et la seconde par un processus autorégressif d'ordre 1 (autocorrélation  $\rho = 0.8$ ); sur celle-ci, on observe en effet une tendance apparente à la baisse.

et B. Renard de conclure :

" Le problème de distinguer ce qui relève de l'autocorrélation ou d'une tendance déterministe dans la détection de non-stationnarité est un problème quasiment insoluble, comme le note Jaruskova (1997): « *if the finite part of a time series is observed, it is impossible to distinguish between a stationary series with the positive dependence between the neighbouring observations and a sequence of independent variables with the slowly changing mean* ».

Ceci implique qu'il faut faire *a priori* le choix d'un modèle qui permet ou ne permet pas de prendre en compte l'autocorrélation, grâce à des considérations physiques du phénomène étudié notamment..."

Pour s'affranchir de ce problème, plusieurs méthodes ont été proposées (cf références citées ci-dessus).

Dans ce travail, les méthodes basées sur le calcul d'un nombre d'observations supposées effectivement indépendantes (*effective number of independant observations*) ont été utilisées.

## 2. DESCRIPTION DES TESTS

### 2.1. Recherche d'une tendance par régression linéaire

#### 2.1.1. Les valeurs de la série ne sont pas corrélées entre elles

- *Conditions d'application du test de détection*

Le modèle de régression linéaire est le suivant :

$$Y = a.t + b + E$$

- Y est la variable aléatoire associée aux valeurs mesurées y(t),
- t est le temps,
- a est le coefficient de la régression (la pente de la droite),
- E est une variable aléatoire représentant les écarts par rapport à la droite de régression a.t + b

On souhaite savoir si le coefficient a est significativement différent de 0. L'hypothèse nulle à tester est donc "H<sub>0</sub>: a=0"

Outre le fait que les valeurs de la série étudiée ne doivent pas être corrélées entre elles (hypothèse d'indépendance à la base de toute étude probabiliste) l'application du test suppose que les valeurs e<sub>i</sub> de la variable E (les "erreurs") soient :

- distribuées suivant une loi normale (les valeurs de la série devant suivre aussi une loi normale) ,
- de moyenne nulle,
- non corrélées entre elles.

Le respect de ces conditions a été vérifié en préalable à l'application de ce test :

- calcul des résidus,
- calcul de la moyenne des résidus,
- test de Shapiro-Wilk (cf annexe) pour vérifier la "normalité" de la distribution,
- test de Durbin-Watson (cf annexe) pour vérifier l'absence d'autocorrélation.

- *Mise en œuvre du test de régression linéaire*

Si A désigne la variable aléatoire associée au coefficient de régression a, on montre que la variable aléatoire T définie par :

$$T = \frac{A - a}{\sqrt{\text{Var}[A]}}$$

suit une loi de Student à (n-2) degrés de liberté, expression dans laquelle Var[A] est la variance de A, donnée par :

$$\text{Var}[A] = \frac{1}{n-2} \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - (at_i + b))^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}$$

Remarque :

Lorsque les valeurs du temps progressent régulièrement  $t_i = 1, 2, 3, 4, \dots$ , on a :

$$\text{Var}[A] = \frac{12 \sum_{i=1}^n (y_i - (at_i + b))^2}{(n-2)n(n^2 - 1)}$$

• Significativité

Sous l'hypothèse  $H_0 : a = 0$ , la *statistique du test* est :

$$T = \frac{\hat{a}}{\sqrt{\text{Var}[A]}} \quad \text{où } \hat{a} \text{ est la valeur estimée de } a$$

Etant donné un seuil de risque  $\alpha$ , l'hypothèse nulle  $H_0$  sera rejetée au seuil  $\alpha$  si la valeur calculée de T ( $T_{\text{calc}}$ ) est supérieure ou égale à la valeur  $T_{\text{Stud}}$  de la loi de Student à n-2 degrés de liberté pour une probabilité  $1-\alpha/2$  :

$$\text{rejet de } H_0 \text{ si : } T_{\text{calc}} \geq T_{\text{Stud}}(n-2, 1-\alpha/2)$$

ou bien si la p-value correspondant à la valeur T calculée est inférieure au seuil de risque  $\alpha$ ,

$$\text{rejet de } H_0 \text{ si : } p\text{-value}(T_{\text{calc}}) < \alpha$$

2.1.2. Les valeurs de la série sont corrélées entre elles.

Comme mentionné ci-dessus, la présence d'autocorrélation dans une série de données biaise les tests statistiques qui reposent sur l'hypothèse d'indépendance des valeurs de la série (réalisations d'une variable aléatoire).

Pour pouvoir utiliser le test de régression linéaire, une solution (Bayley et Hammersley, 1946 – Lettenmaier, 1976) consiste à remplacer le nombre de valeurs n par un nombre  $n^* < n$  ("*effective number of independant observations*"), ce nombre  $n^*$

renvoyant à une série dont les  $n^*$  valeurs correspondraient à des observations indépendantes (condition d'application du test de régression). Ce nombre  $n^*$  est calculé par la relation :

$$\frac{1}{n^*} = \frac{1}{n} + \frac{2}{n^2} \sum_{k=1}^{n-1} (n-k)\rho_k$$

$\rho_k$  est le coefficient d'autocorrélation d'ordre  $k$  de la série des résidus (tendance ôtée).

Le test de la régression est alors modifié en appliquant à la variance de la variable  $A$  un facteur correctif  $\gamma = n/n^*$  :

$$\text{Var}[A]_p = \frac{n}{n^*} \text{Var}[A]_{p=0} \quad \text{avec} \quad \frac{n}{n^*} = 1 + 2 \sum_{k=1}^{n-1} \left(1 - \frac{k}{n}\right) \rho_k$$

La statistique de Ljung-Box a été utilisée pour tester l'hypothèse d'indépendance des valeurs de la série : l'hypothèse nulle  $H_0$  est que les  $m$  coefficients d'autocorrélation sont nuls :

$$H_0 : \rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_m = 0$$

La statistique du test est :

$$Q(m) = T(T+2) \sum_{j=1}^m \frac{\rho_j}{T-j}$$

## 2.2. Recherche d'une tendance par le test de Mann-Kendall

### 2.2.1. Les valeurs de la série ne sont pas corrélées entre elles

- *Conditions d'application*

S'applique à un échantillon de  $n$  valeurs indépendantes (non corrélées entre elles) pour détecter des tendances "monotones".

- *Mise en œuvre du test*

Le test repose sur le calcul de la somme suivante :

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$$

où  $x_j$  et  $x_k$  sont deux valeurs successives de la série ( $j > k$ ) et où :

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{si } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{si } x_j - x_k < 0 \end{cases}$$

On dénombre donc pour tous les couples  $(x_j, x_k)$  le nombre de cas où la 2<sup>ème</sup> valeur est supérieure à la 1<sup>ère</sup> et le nombre de cas où c'est l'inverse et on fait la différence entre ces deux nombres. Si la série est stationnaire, S doit être proche de 0.

Le test ne nécessite pas d'hypothèse sur le distribution des valeurs (test non paramétrique). Si la série est stationnaire (hypothèse  $H_0$ ), alors :

- la moyenne de S est :  $E(S) = 0$
- et sa variance est :  $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$

S'il y a des valeurs égales dans la série, la variance  $\text{Var}(S)$  doit être calculée comme suit :

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q E_p(E_p-1)(2E_p+5) \right]$$

où  $E_p$  désigne le nombre d'égalités identifiées dans la série impliquant  $p$  valeurs.

Si le nombre  $n$  de valeurs de la série est supérieur à 10, la mise en œuvre du test fait intervenir la variable aléatoire  $Z$  définie par :

$$Z = \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \text{ si } S > 0$$

$$Z = \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \text{ si } S < 0$$

$$Z = 0 \text{ si } S = 0$$

Une valeur positive de  $Z$  indique une tendance croissante (cf remarque ci-après)

Cette variable suit (approximativement) une loi normale centrée réduite. La probabilité d'observer une tendance pour laquelle la valeur de  $Z$  est au moins égale en valeur absolue à  $z_{\text{obs}}$  est alors :

$$P(|Z| \geq |z_{\text{obs}}|) = 2(1 - \Phi(|z_{\text{obs}}|))$$

où  $\Phi$  est la fonction de répartition de la loi normale.

L'hypothèse de stationnarité sera rejetée au niveau de signification  $\alpha$  si cette probabilité calculée ( $p$ -value) est inférieure à  $\alpha$  (elle est peu probable).

Le résultat du test, au niveau de signification  $\alpha$ , s'obtient aussi en comparant la valeur  $Z_{\text{obs}}$  obtenue pour  $Z$  à la valeur théorique  $Z_{\text{th}}$  de la distribution cumulée de la loi normale centrée réduite (fonction de répartition). Pour un test bilatéral (*two-tailed test*) visant la détection d'une tendance à un niveau de confiance  $\alpha$ ,  $H_0$  est rejetée si la valeur absolue de  $Z$  est supérieure à  $Z_{1-\alpha/2}$ .

$$\text{si } |Z_{\text{obs}}| > Z_{\text{th}(1-\alpha/2)}, \text{ rejet de } H_0 \text{ au seuil de confiance } \alpha$$

**Remarque** : la pente de la tendance peut être calculée comme ci-dessus (coefficient  $a$  de la régression linéaire). Une autre méthode a été proposée par Sen (1968), la pente étant calculée comme suit :

$$a_{\text{Sen}} = \text{Médiane} \left[ \frac{(x_j - x_i)}{(j-i)} \right] \quad \forall j < i$$

$x_j$  et  $x_i$  sont respectivement la  $j^{\text{ème}}$  et la  $i^{\text{ème}}$  observation de la série.

La pente ainsi calculée est une estimation plus robuste de la pente de la tendance que celle issue de la régression où l'existence de valeurs très fortes ou très faibles peut biaiser le calcul de la pente. Au contraire, avec la méthode de Sen, la pente n'est pas très affectée par la présence de valeurs extrêmes.

### 2.2.2. Les valeurs de la série sont corrélées entre elles

Comme pour le cas de la régression linéaire, pour s'affranchir de l'autocorrélation, il est possible de calculer un nombre  $n^*$  d'observations supposées indépendantes, ce qui revient à substituer à la série initiale de  $n$  valeurs autocorrélées une série de  $n^*$  valeurs indépendantes,  $n^* < n$  (nombre équivalent d'observations indépendantes).

Comme dans le cas de la régression linéaire, le nombre  $n^*$  peut être calculé en utilisant l'expression donnée par Bayley et Hammersley (1946) :

$$\frac{1}{n^*} = \frac{1}{n} + \frac{2}{n} \sum_{k=1}^{n-1} \left(1 - \frac{k}{n}\right) \rho_k \quad \rho_k \text{ étant le coefficient d'autocorrélation d'ordre } k$$

et :

$$\text{Var}(S) = \frac{n}{n^*} \text{Var}_{\rho=0}(S)$$

Hamed et Rao (1998) retiennent cette méthode mais proposent un calcul de  $n^*$  différent :

$$\frac{n}{n^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{k=1}^{n-1} (n-k)(n-k-1)(n-k-2)\rho_k$$

Les deux expressions ont été utilisées dans les traitements réalisés

### 2.3. Recherche d'une rupture par le test de Pettitt

Ce test peut être utilisé pour savoir si la série étudiée présente une rupture significative. Il s'agit d'un test non paramétrique.

L'hypothèse nulle est  $H_0 =$  "absence de rupture" dans la série.

La mise en œuvre du test repose sur la variable aléatoire suivante :

$$U(k) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i)$$

Comme dans le cas du test de Mann-Kendall :

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{si } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{si } x_j - x_k < 0 \end{cases}$$

La variable  $U$  s'apparente à la variable  $S$  du test de Mann-Kendall, mais dans ce cas les couples de valeur  $(x_j, x_i)$  sont formés par sélection d'une valeur de part et d'autre d'un point de rupture supposé de rang  $k$  dans la série. En faisant varier  $k$  de 1 à  $n-1$ , on obtient donc une variable  $U$  fonction de  $k$ . La statistique de test est alors la variable :

$$Z = \max |U(k)|, k=1, \dots, n-1$$

La rupture possible se situerait alors au rang  $k_R$  correspondant au maximum de  $U(k)$ .

La probabilité de dépassement de la valeur  $z_{k_R}$  prise par la statistique  $Z$  du test sur la série observée est donnée par (Pettitt, 1979) :

$$\text{Prob}(Z > z_{k_R}) = 2 \exp\left(\frac{-6z_{k_R}^2}{n^3 + n^2}\right)$$

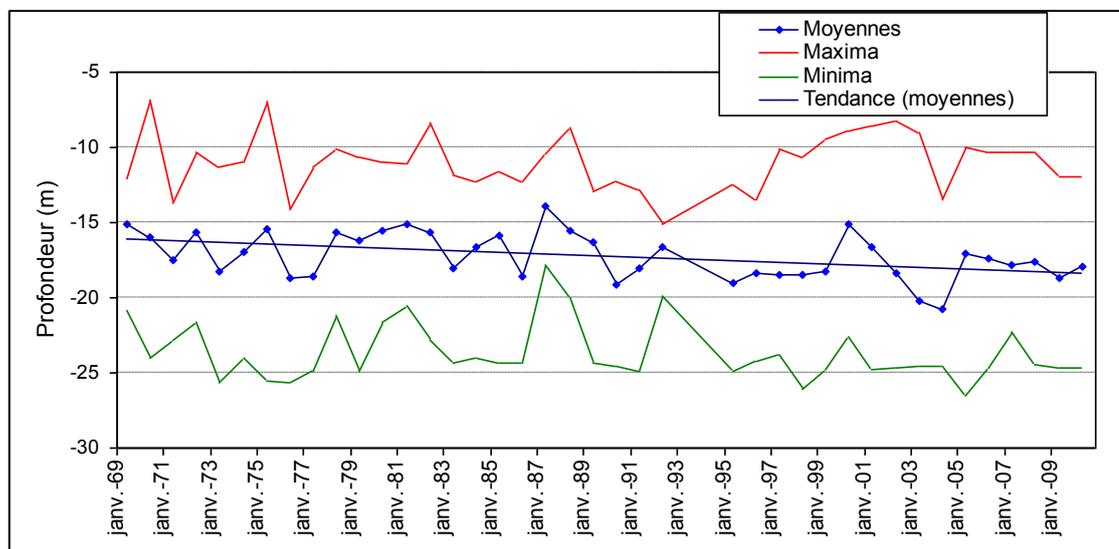
Pour un niveau de confiance  $\alpha$ , l'hypothèse d'une rupture dans la série sera rejetée si cette valeur de probabilité est inférieure à  $\alpha$ .

## **Annexe 3**

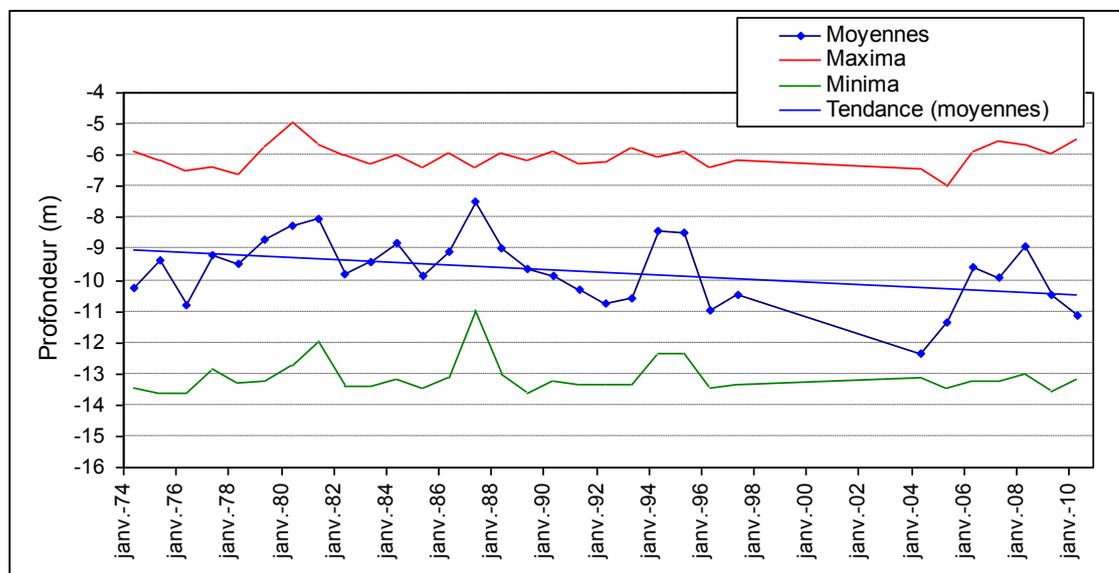
### **Graphiques des niveaux piézométriques en baisse significative**



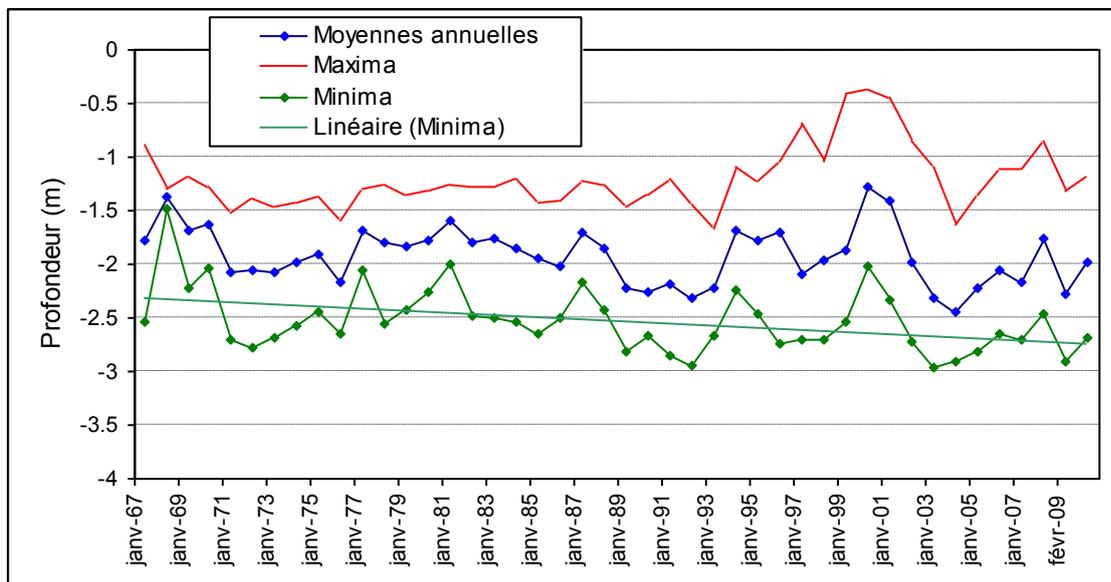
01593X0014 (type c)



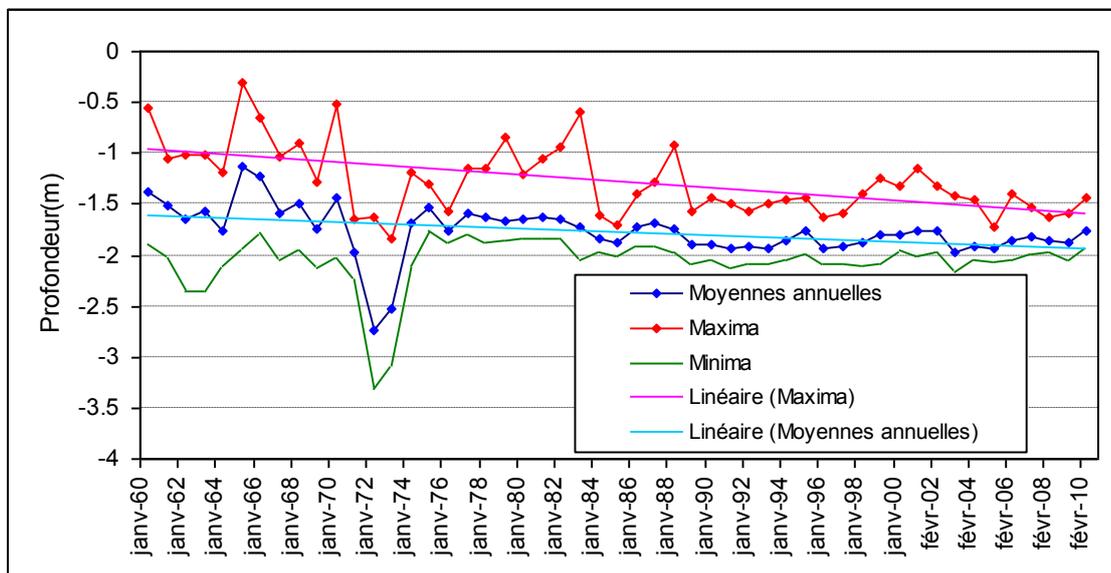
01918X0006 (type c)



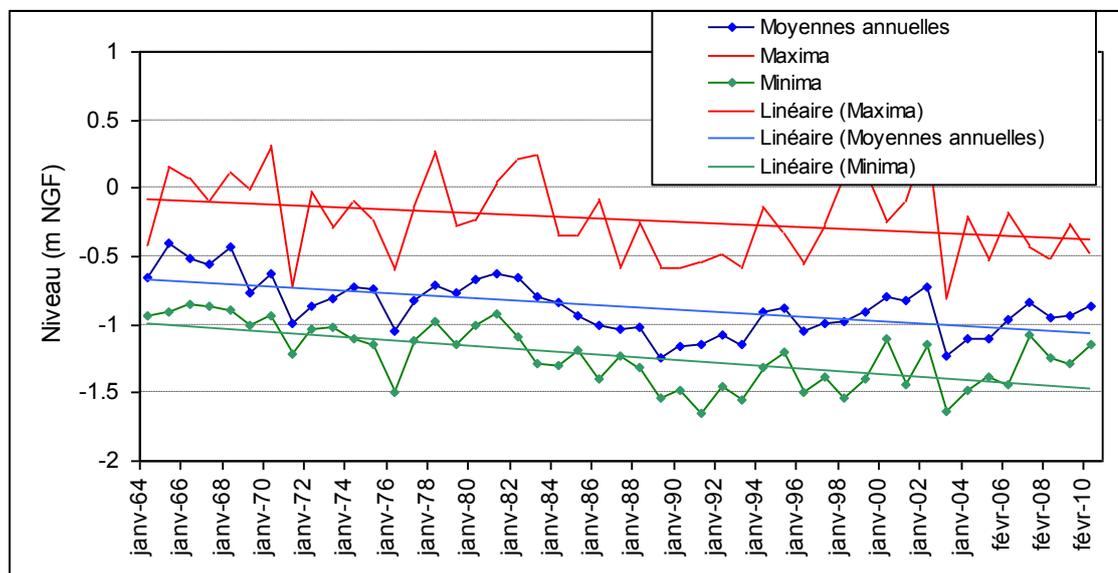
02267X0030 (type c)



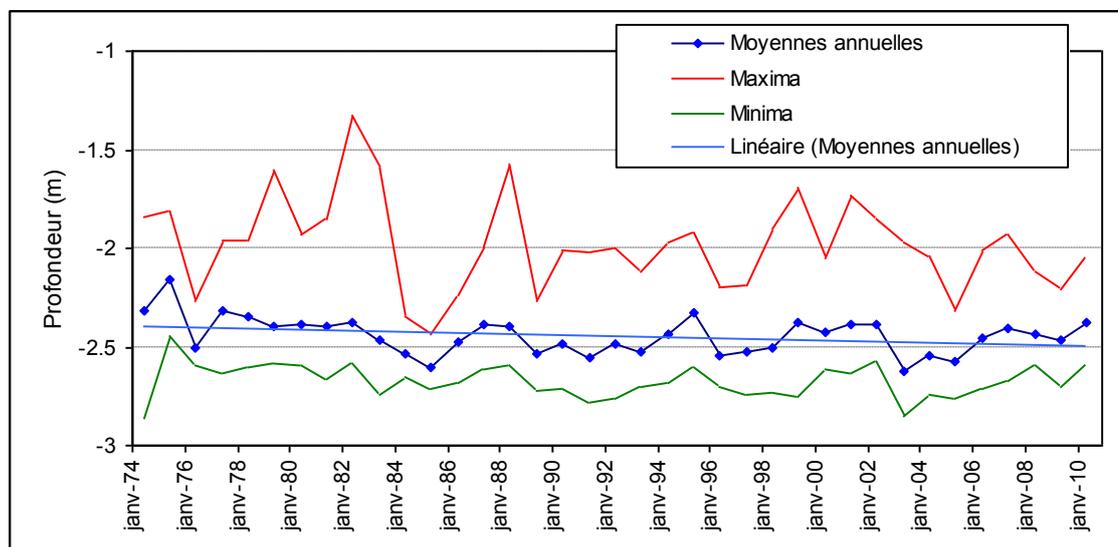
02344X0055 (type c)



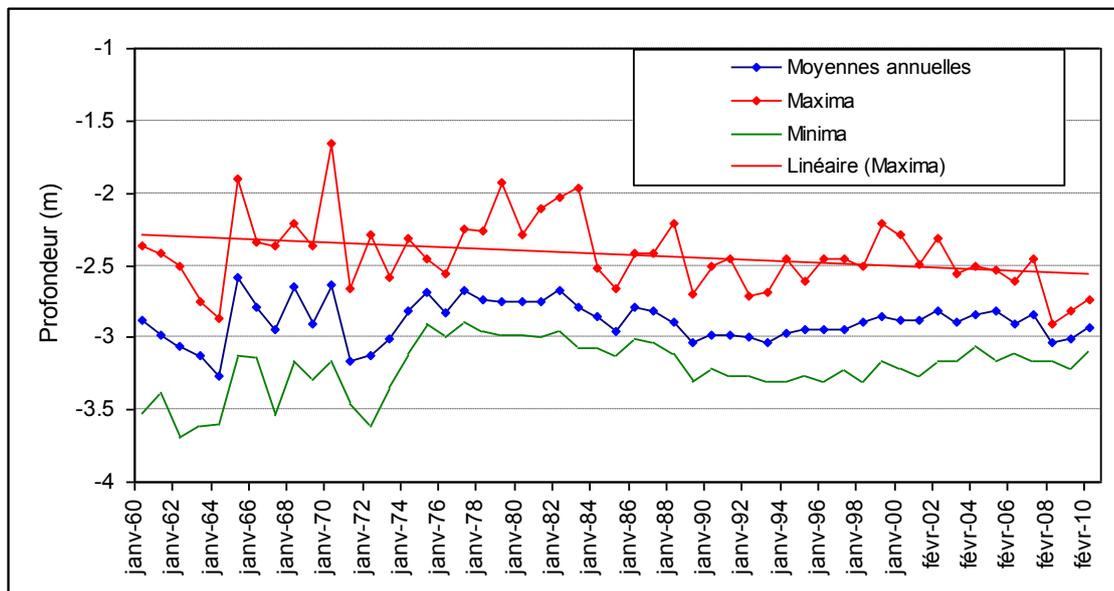
02344X0062 (type c)



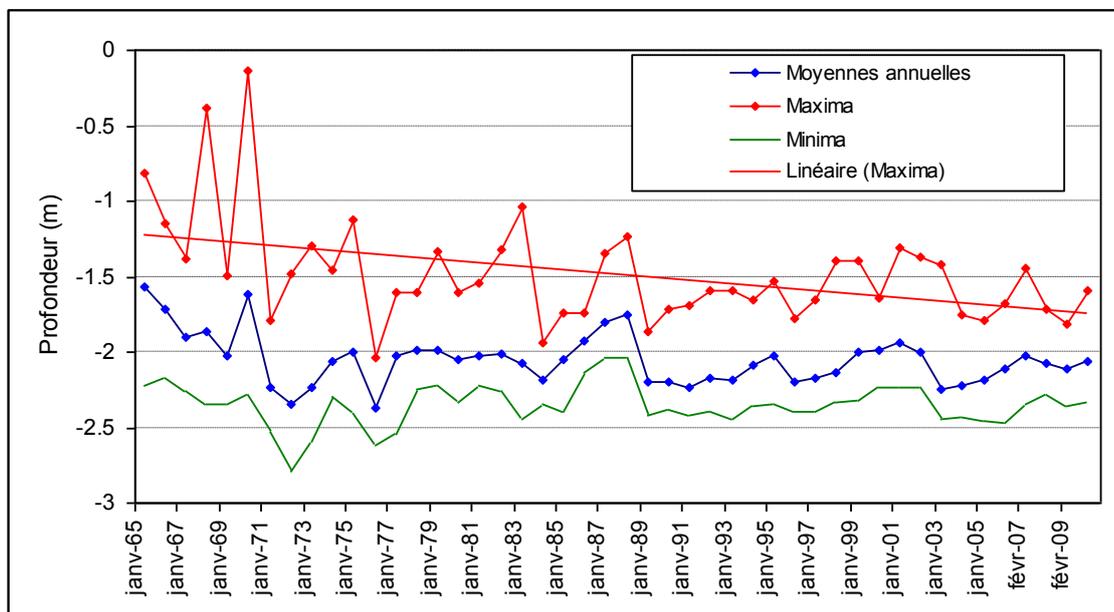
02344X0070 (type c)



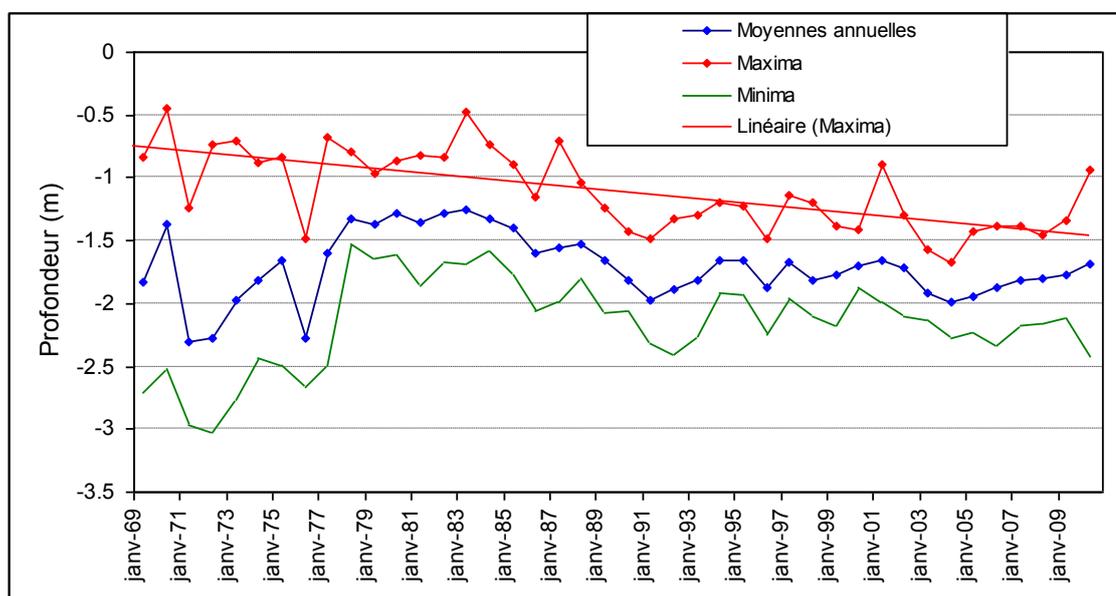
02347X0014 (type c)



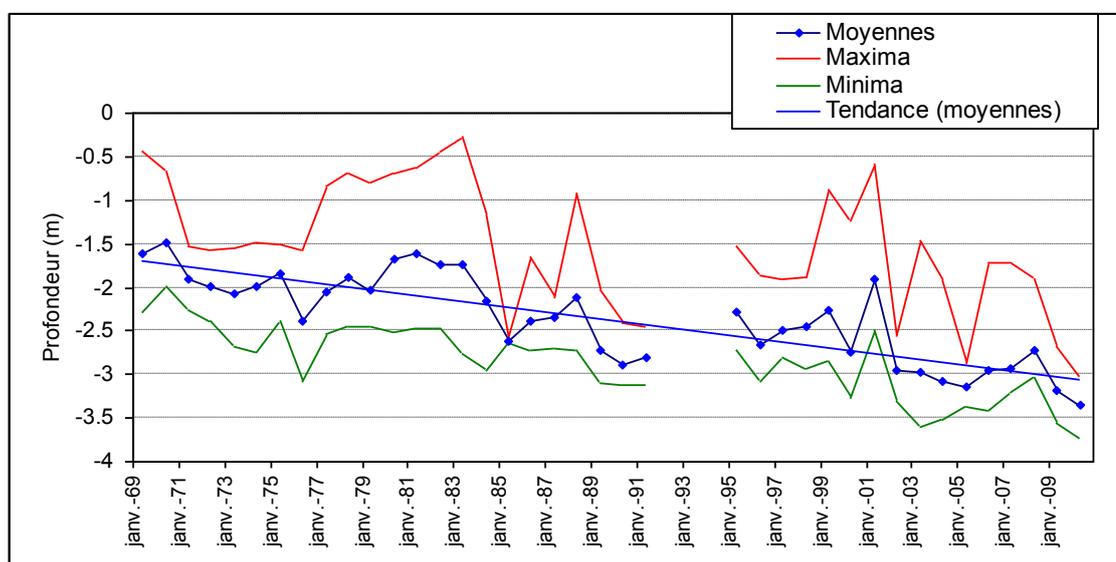
02351X0013 (type c)



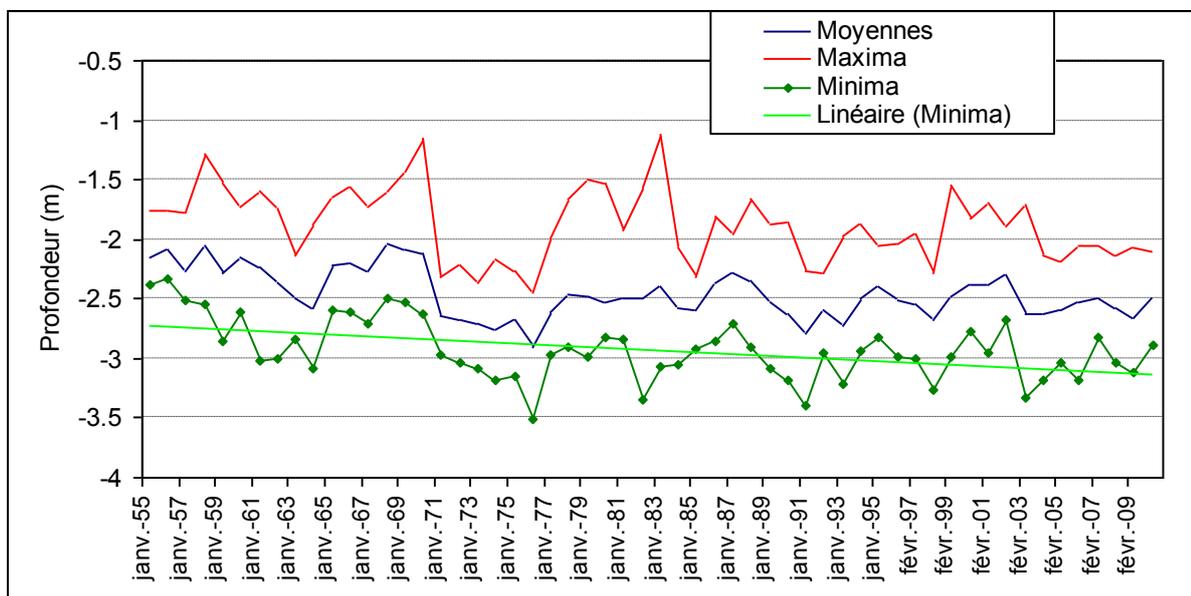
02352X0002 (type c)



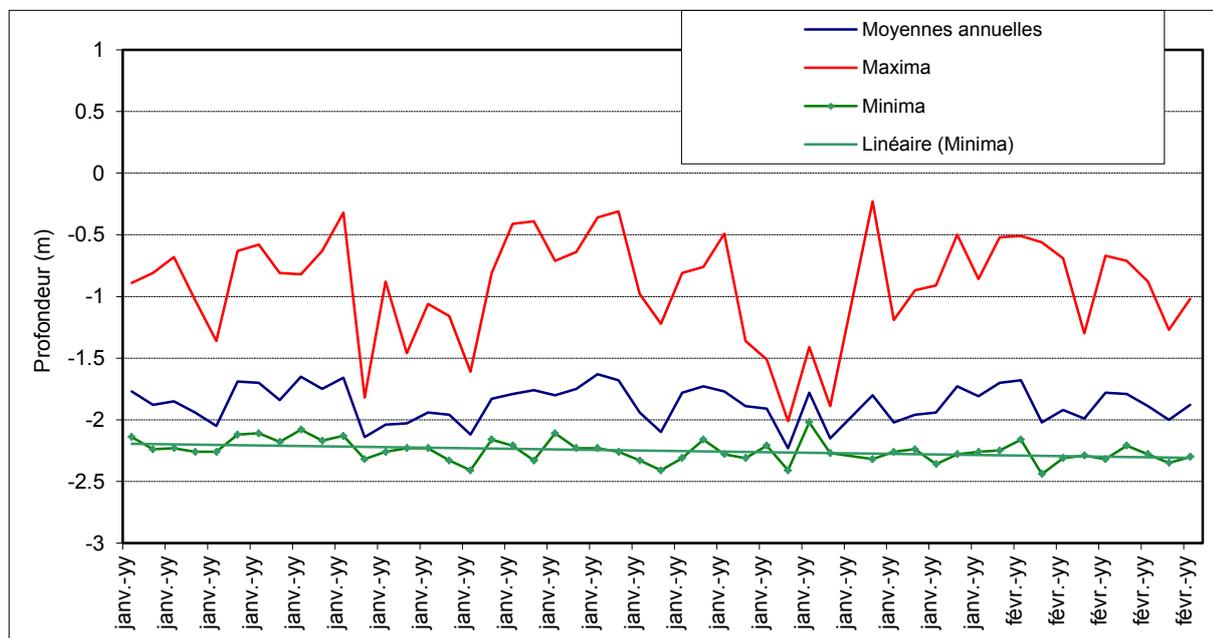
02621X0085 (type c)



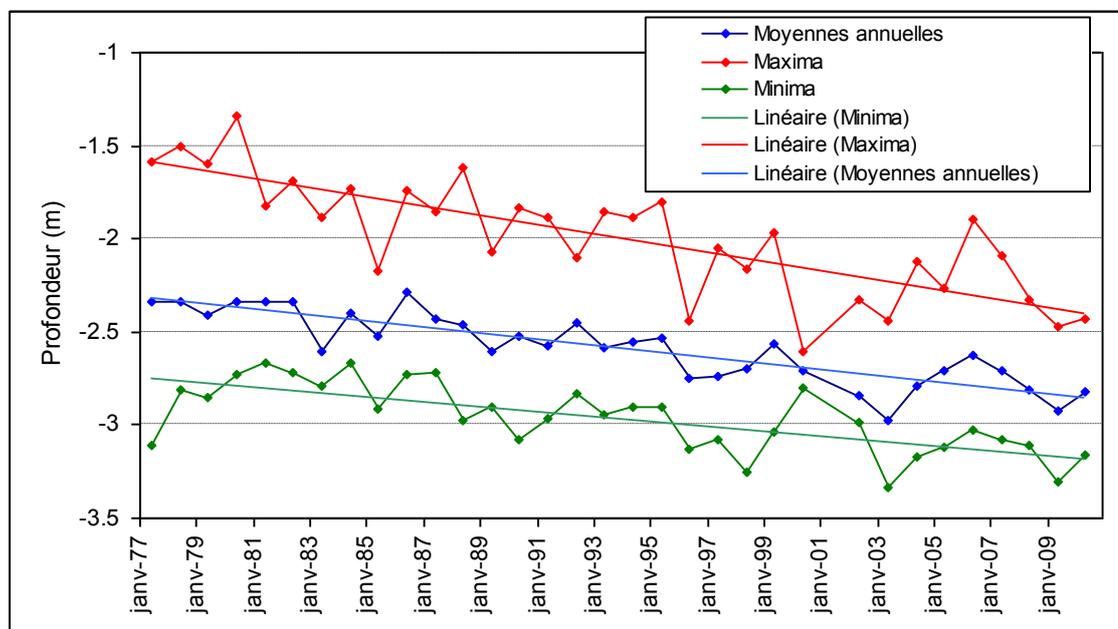
02718X0017 (type c)



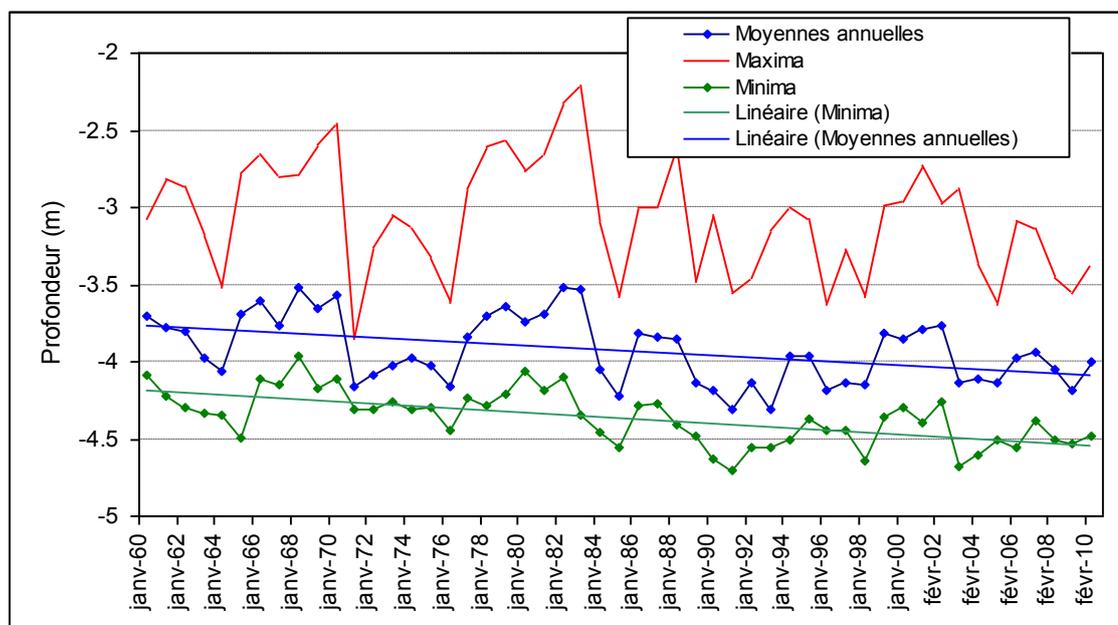
03074X0013 (type c)



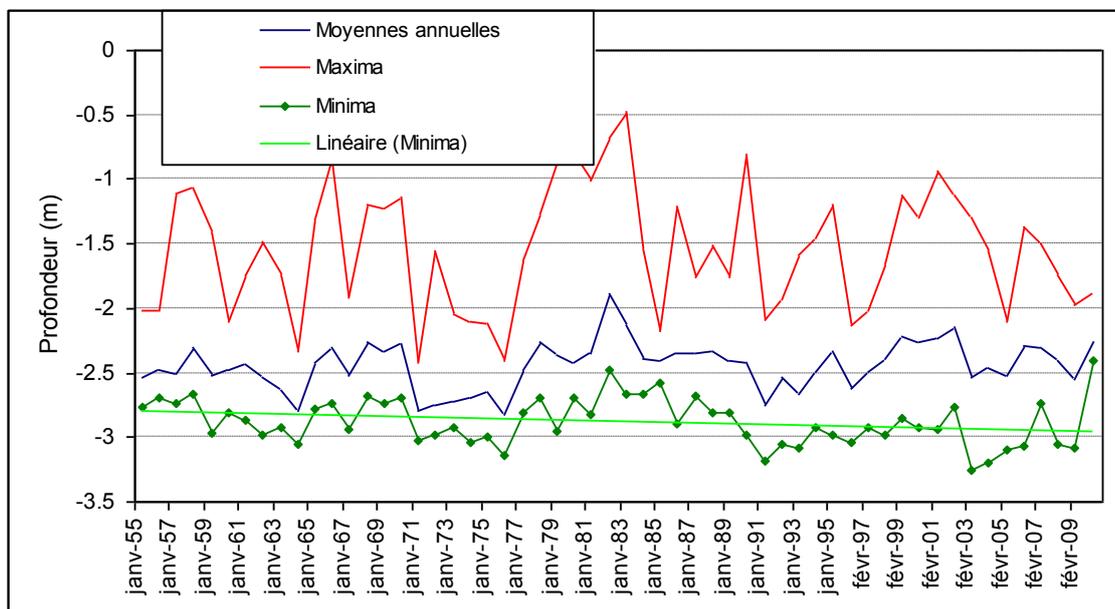
03077X0238 (type c)



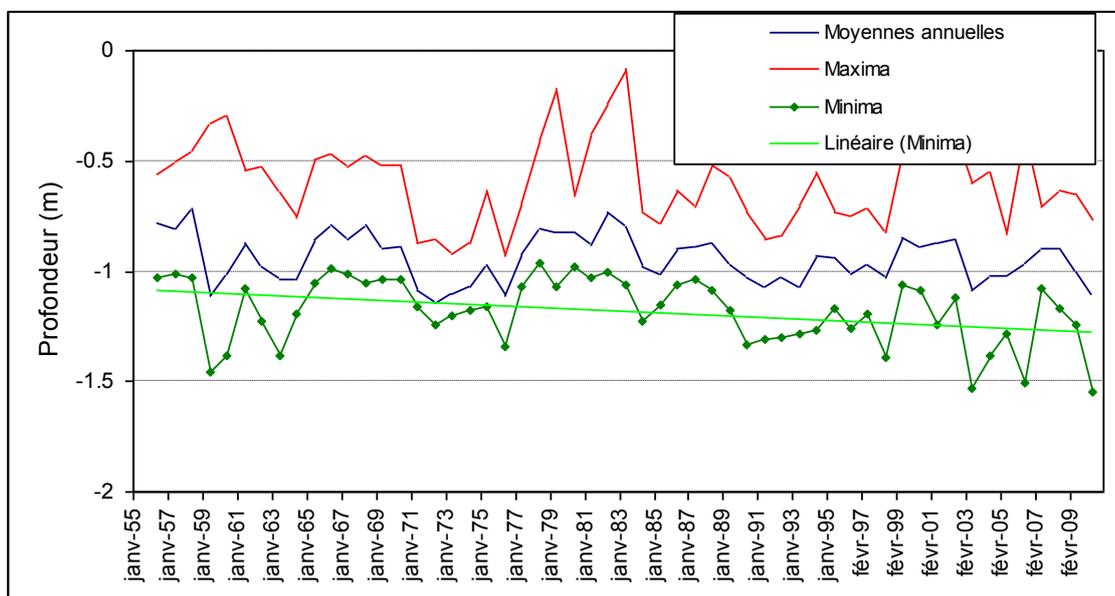
03078X0014 (type c)



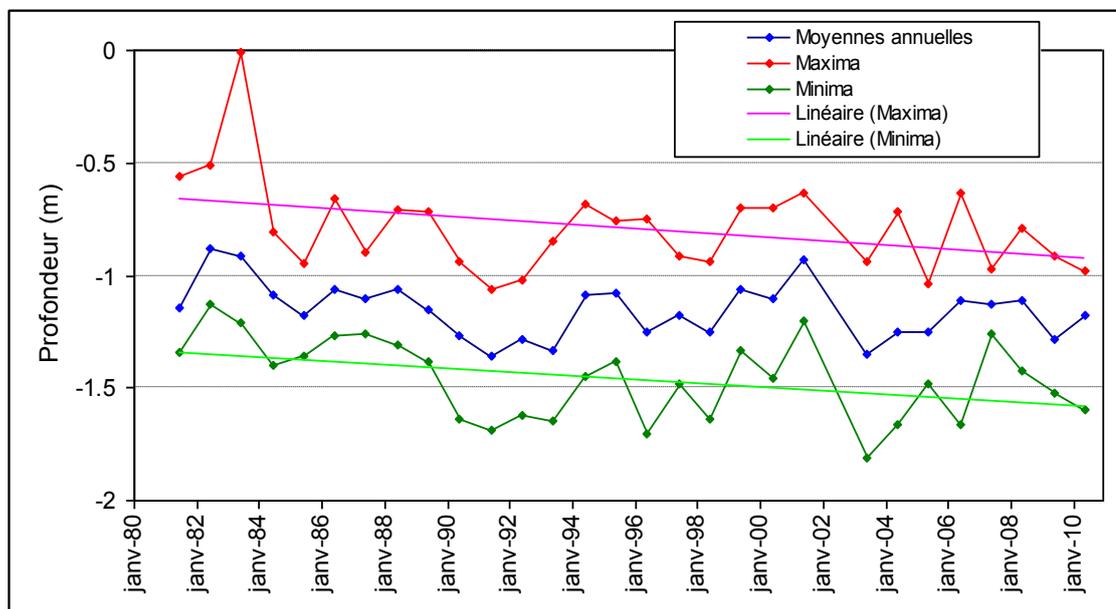
03422X0029 (type c)



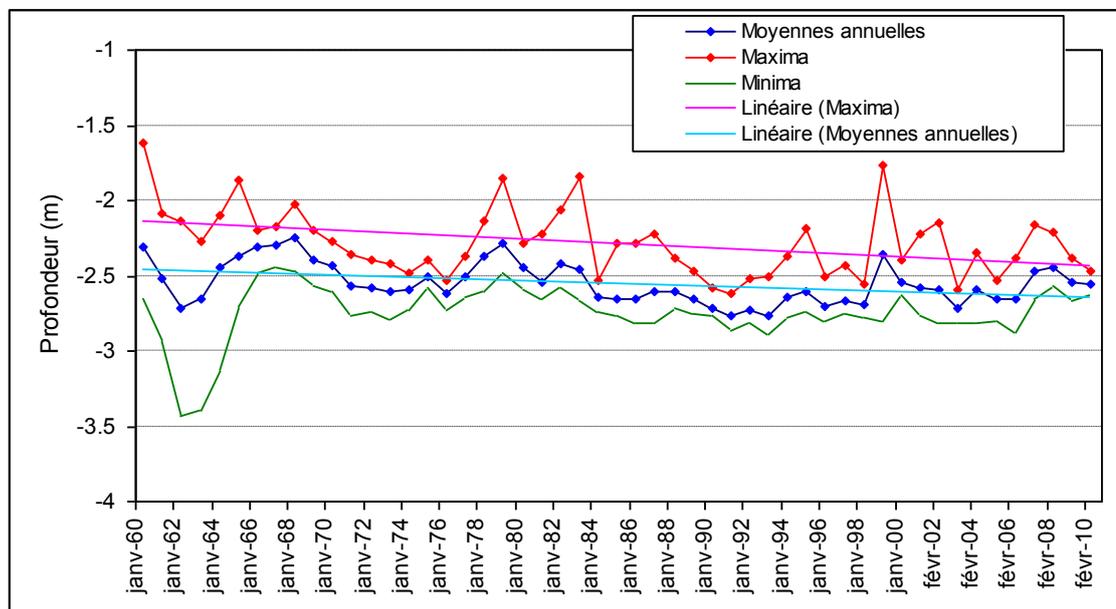
03424X0029 (type c)



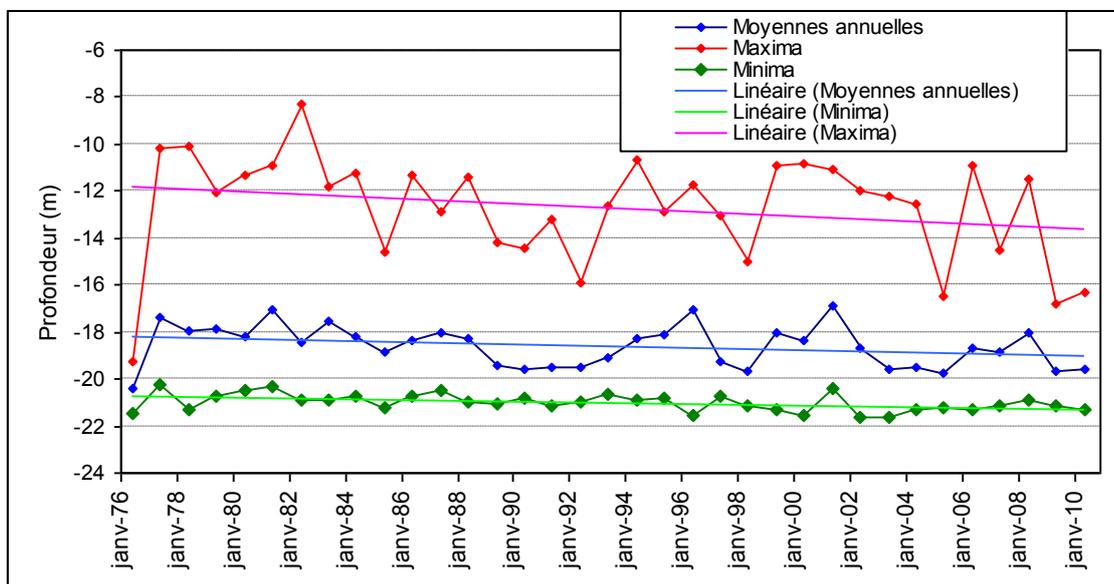
03428X0067 (type c)



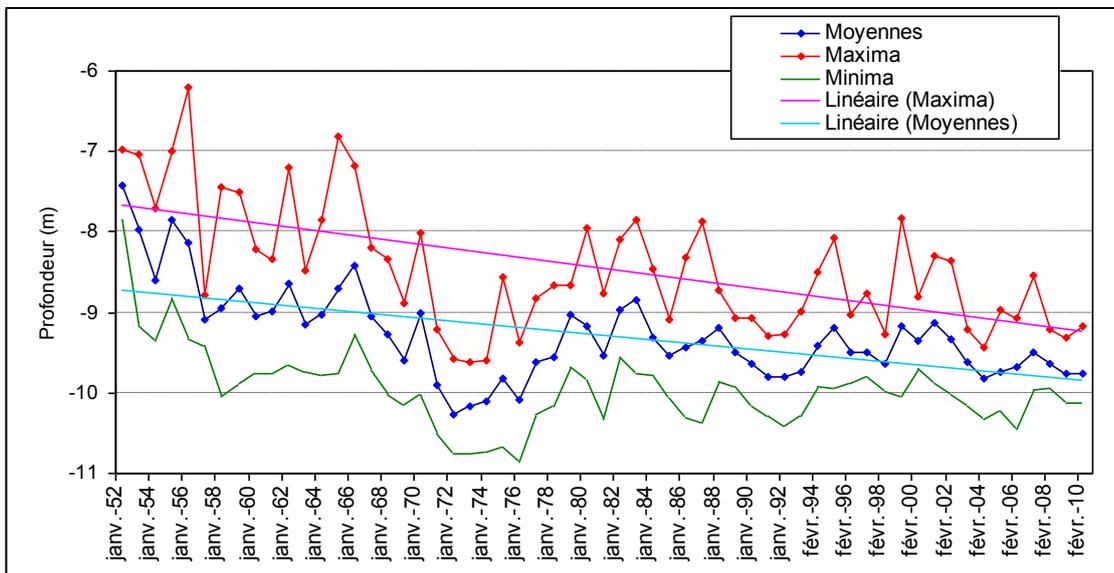
03431X0027 (type c)



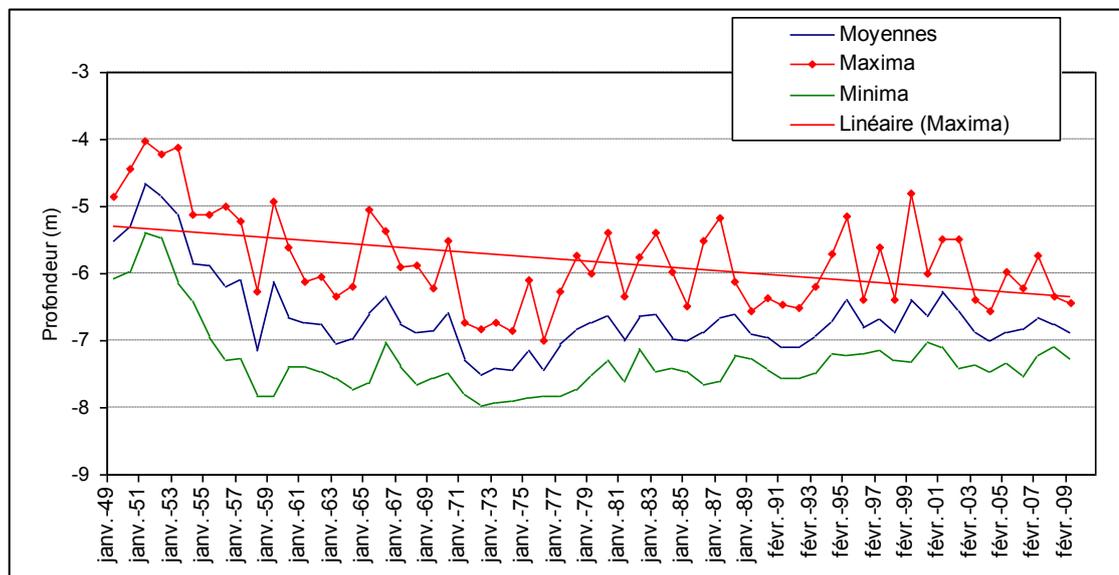
03693X0017 (type c)



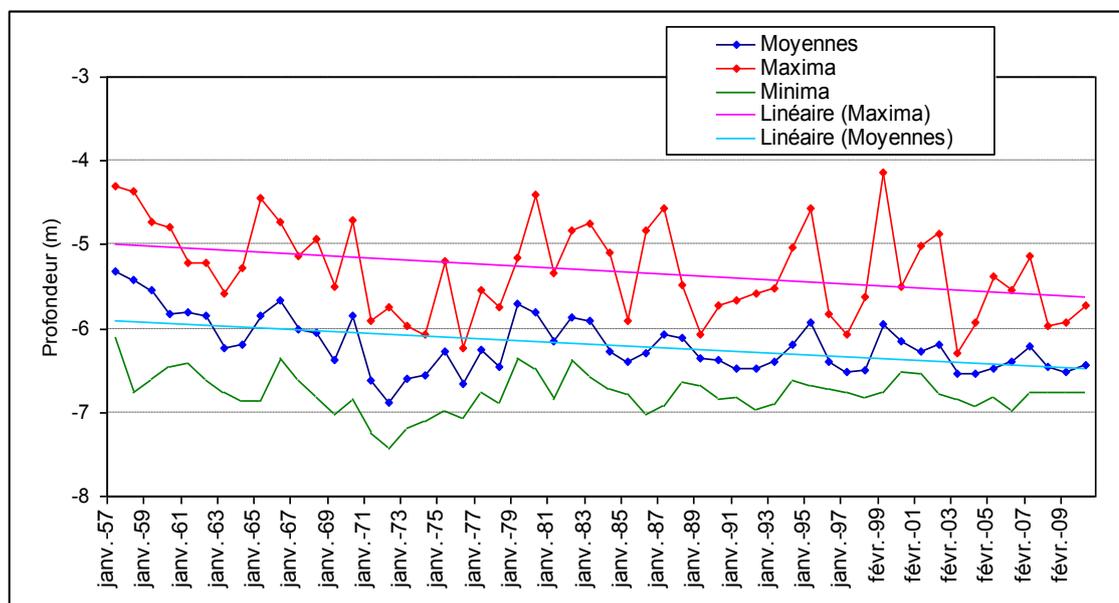
03788X0039 (type c)



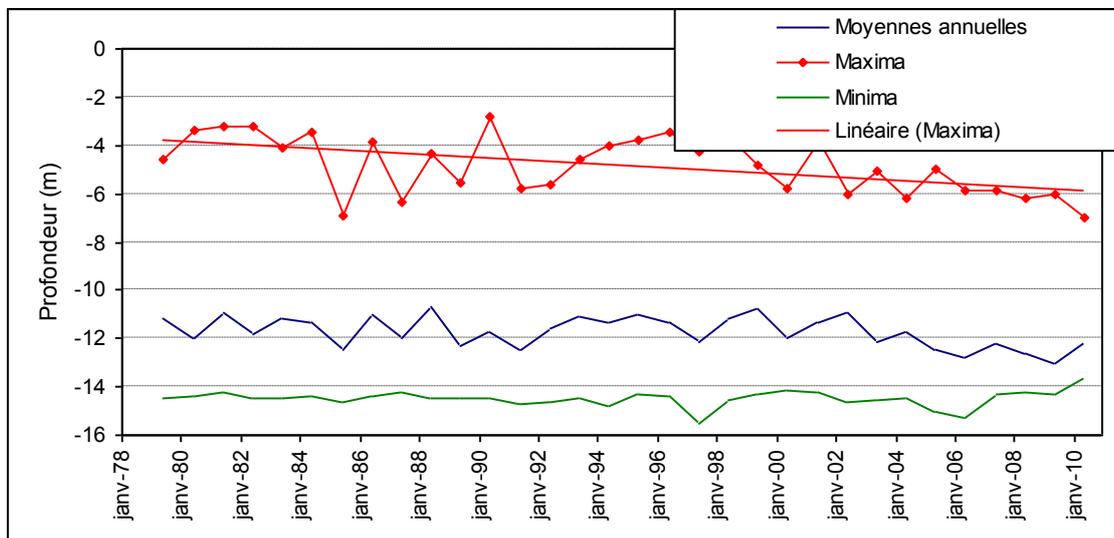
03795X0037 (type c)



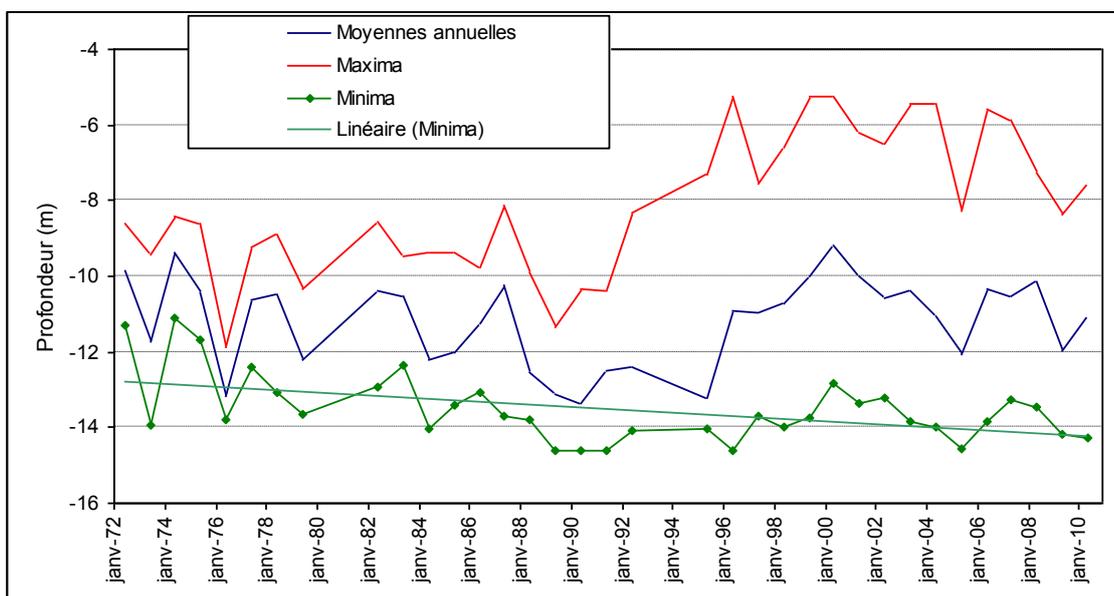
03795X0093 (type c)



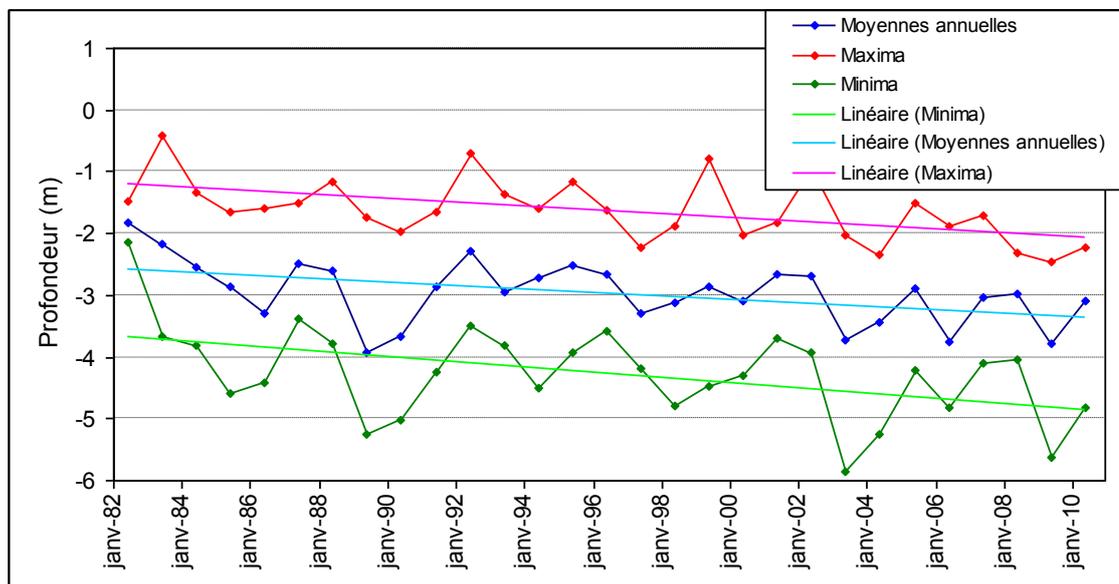
04697X0004 (type c)



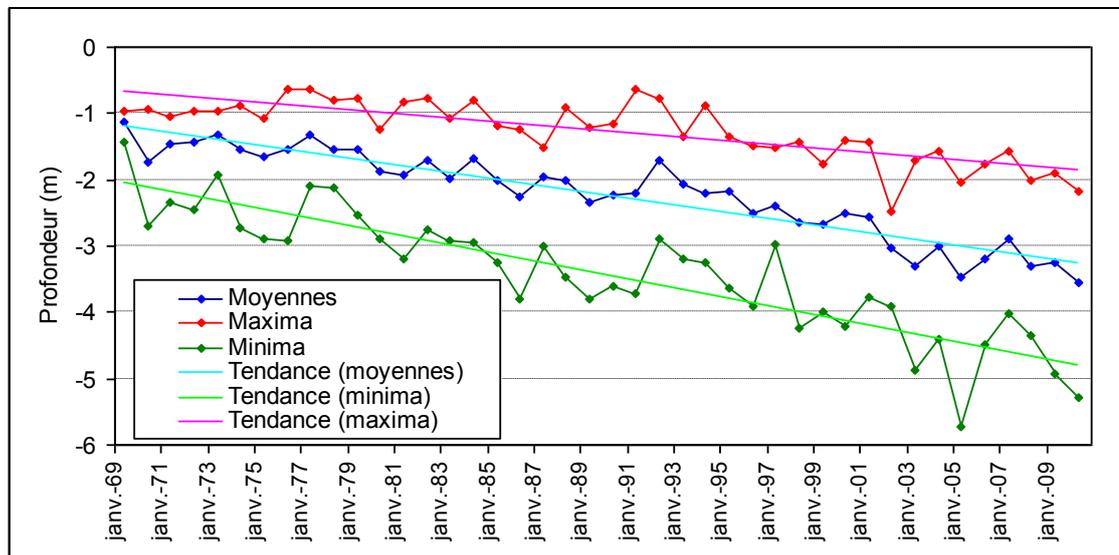
05445X0081 (type c)



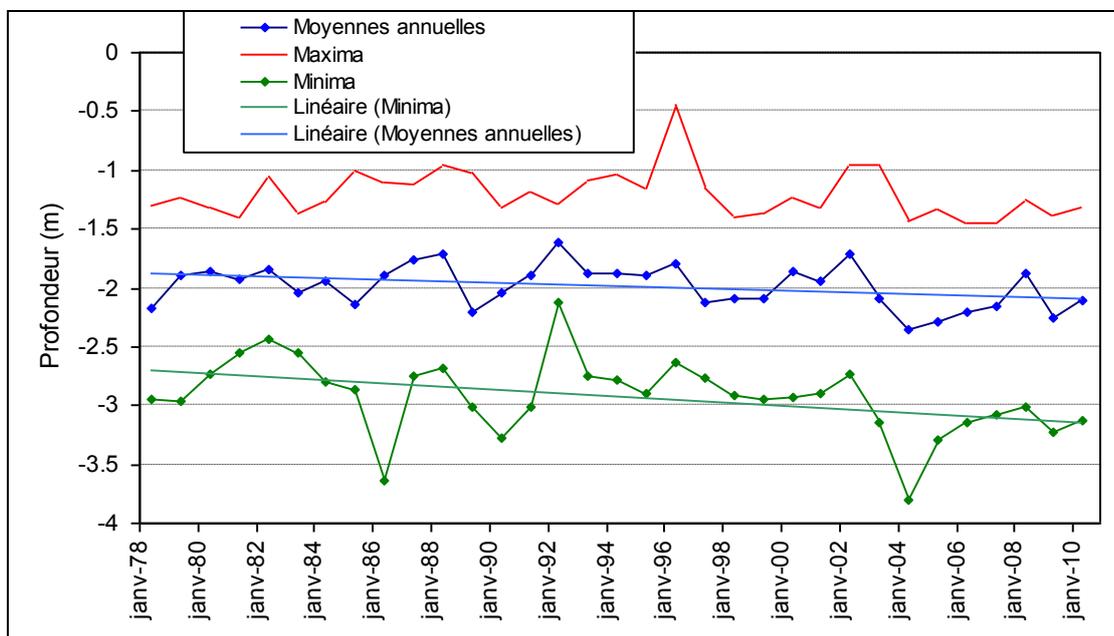
07488X0011 (type c)



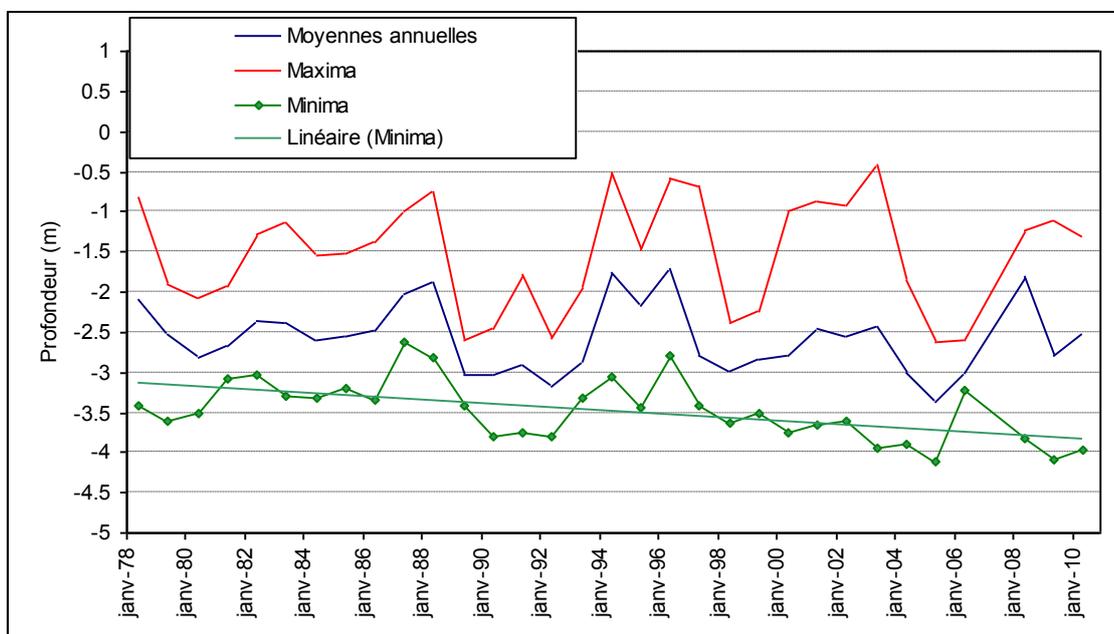
08511X0036 (type c)



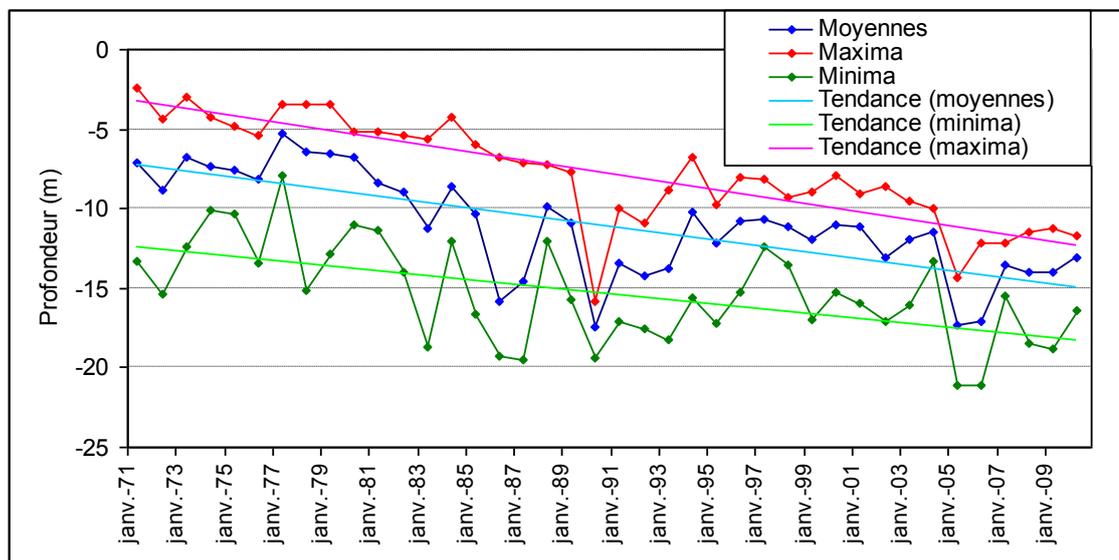
09146X0074 (type c)



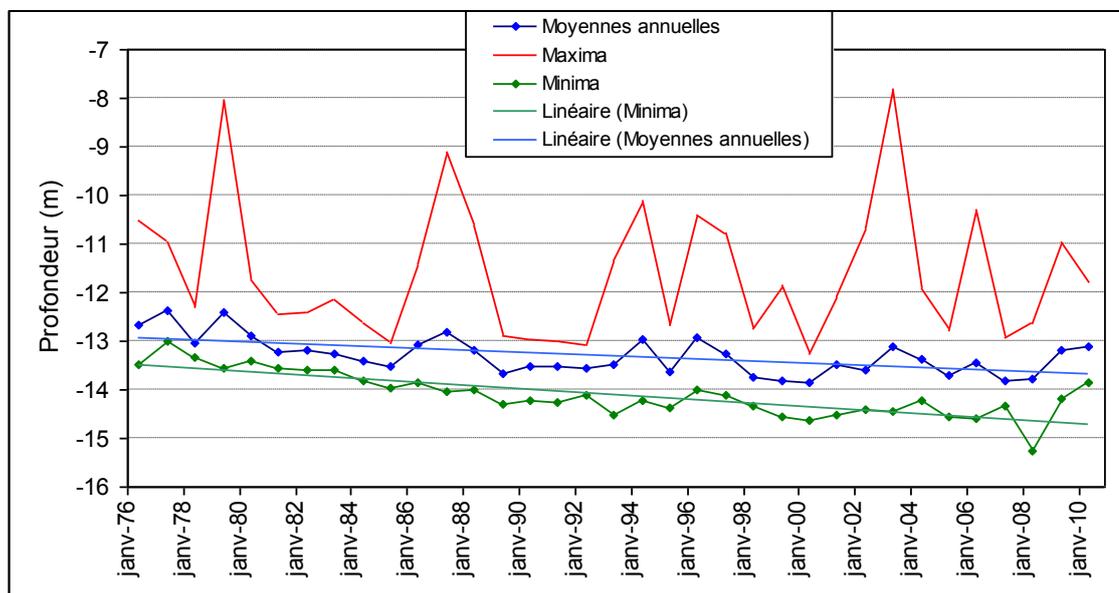
09665X0073 (type c)



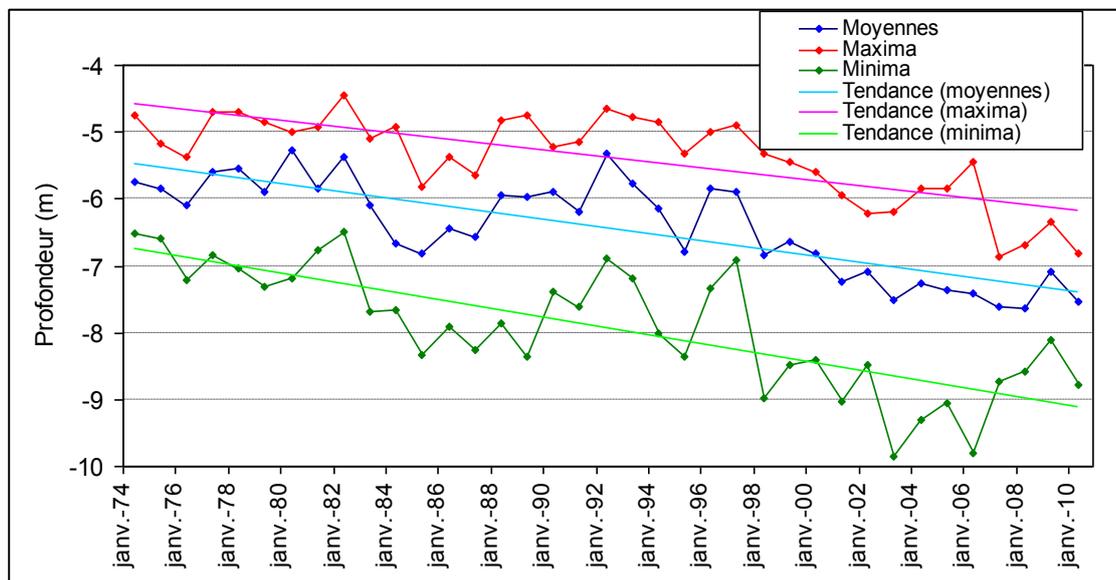
09724X0023 (type c)



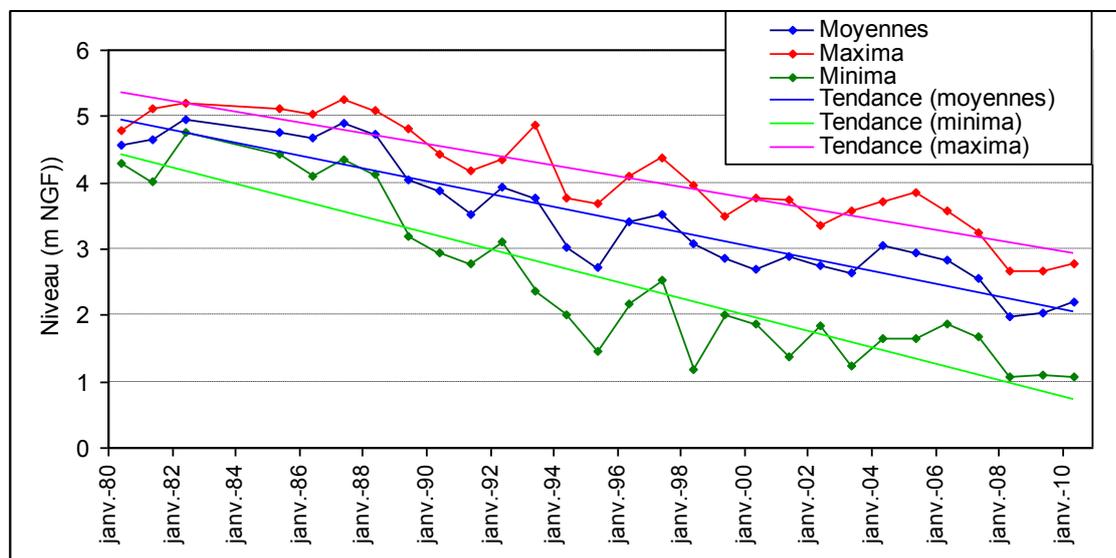
09907X0321 (type c)



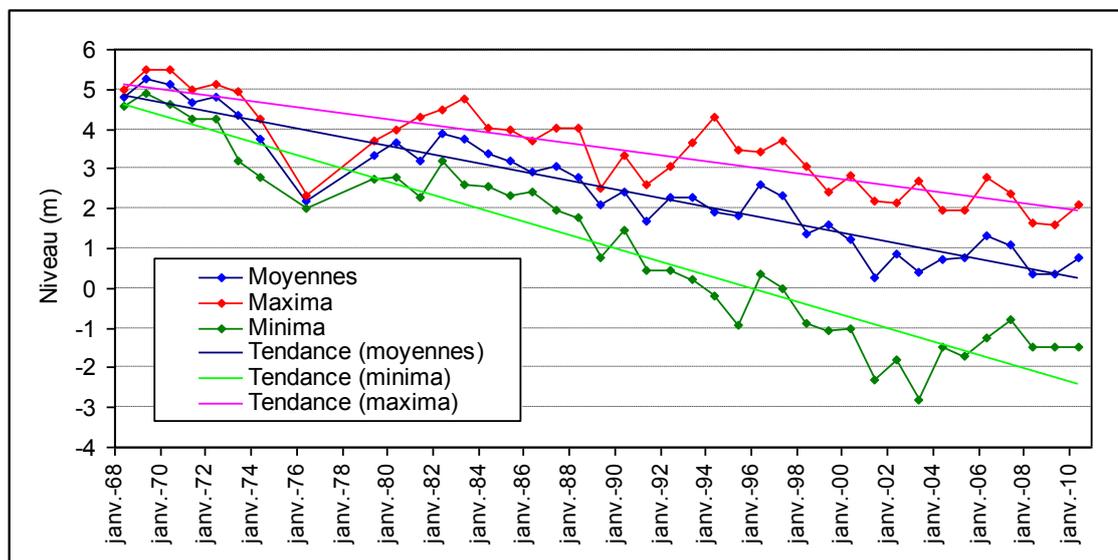
10908X0263 (type c)



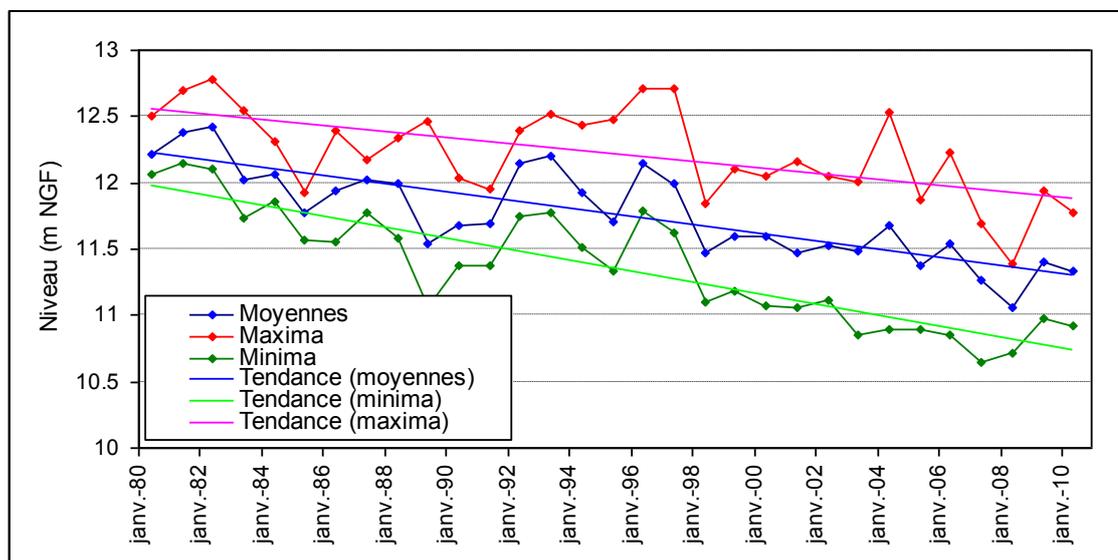
10912X0024 (type c)



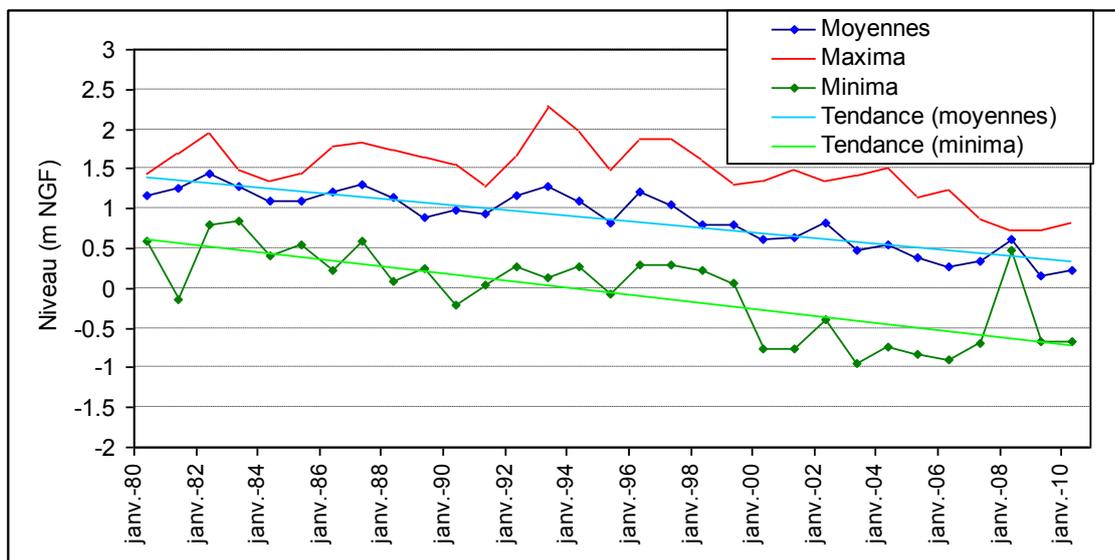
10912X0061 (type c)



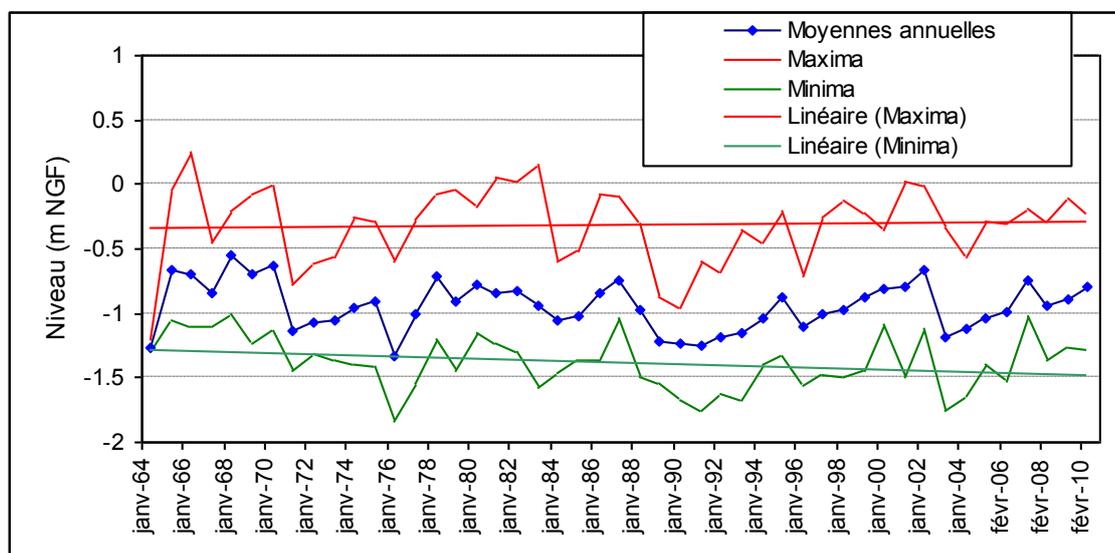
10915X0255 (type c)



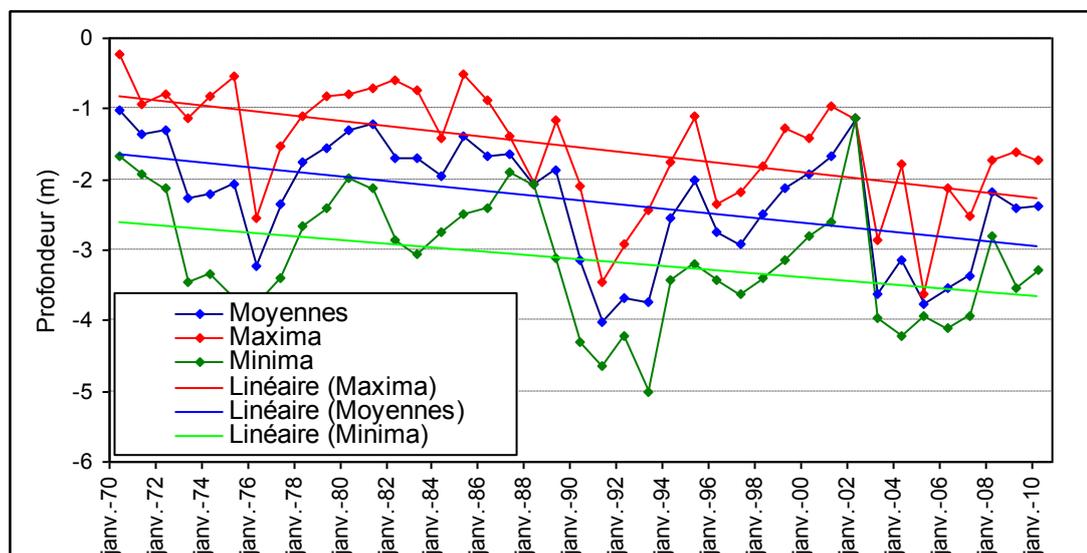
10916X0061 (type c)



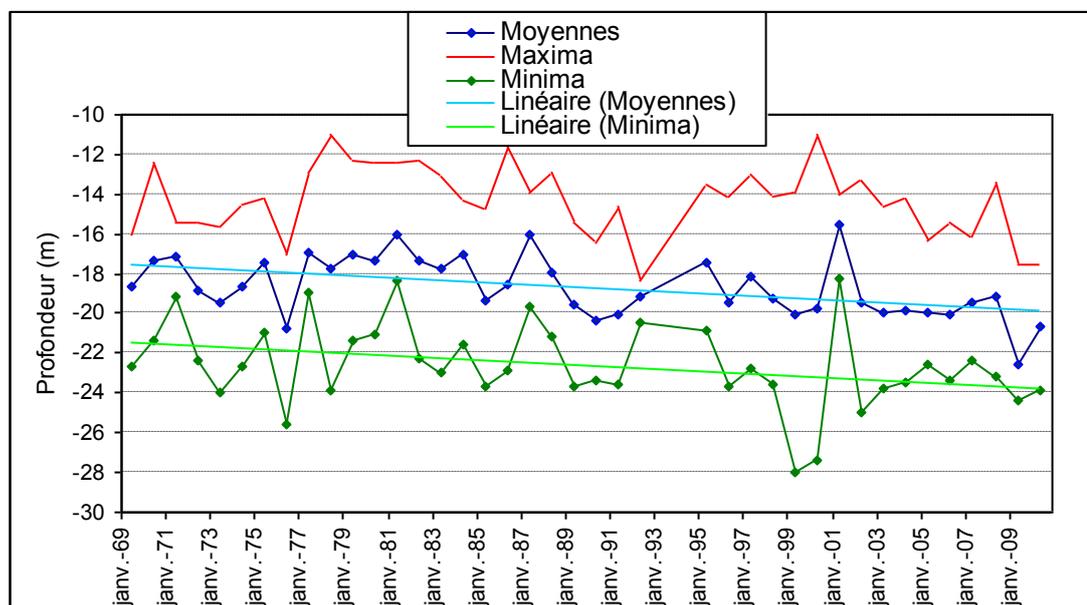
01995X0007 (type c)



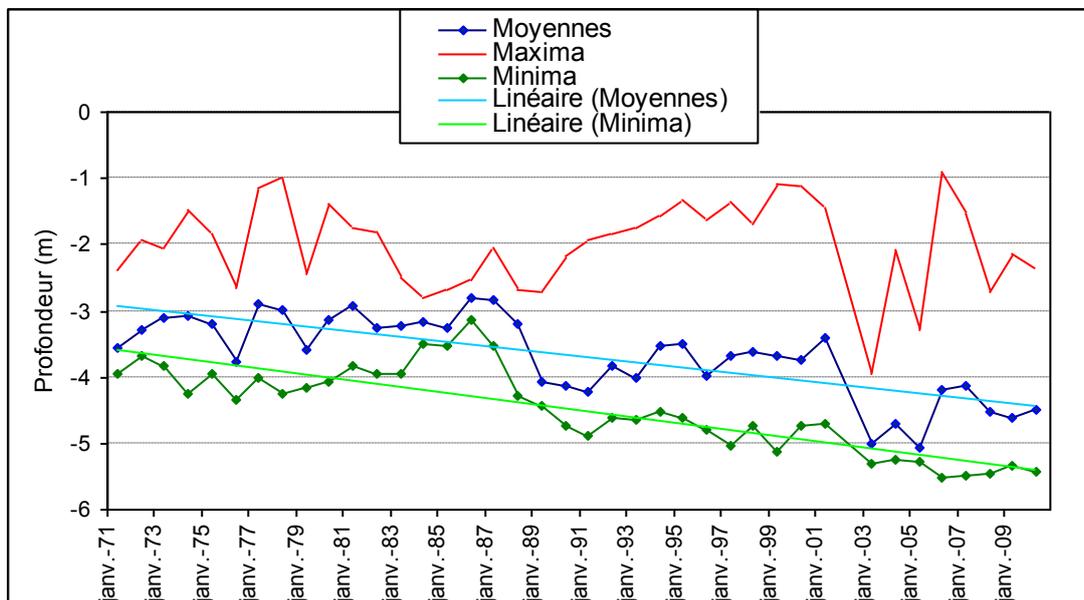
00225X0077 (type b1)



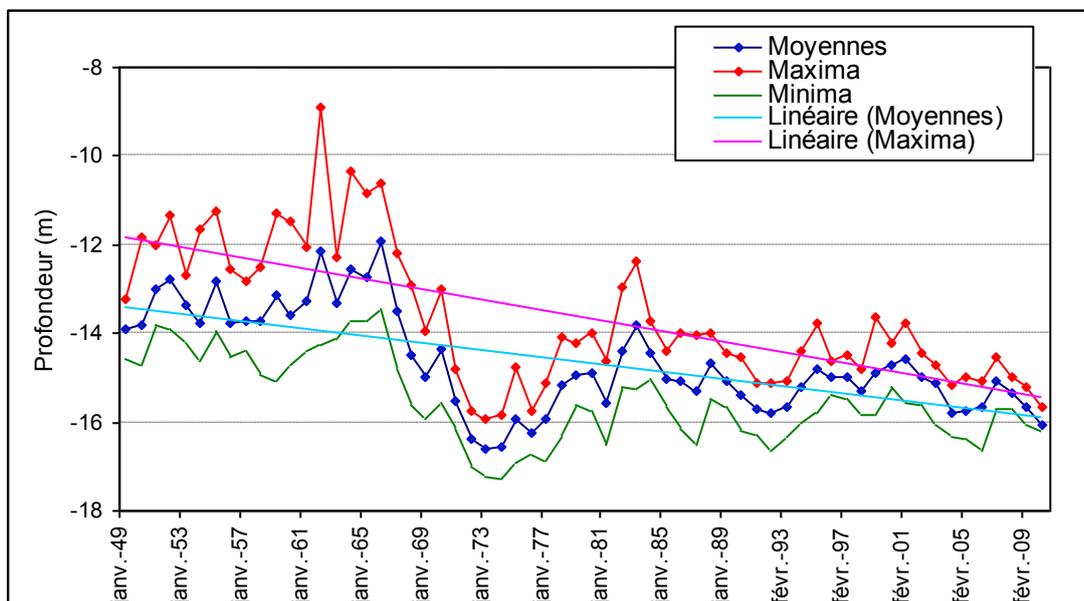
02615X0020 (type b1)



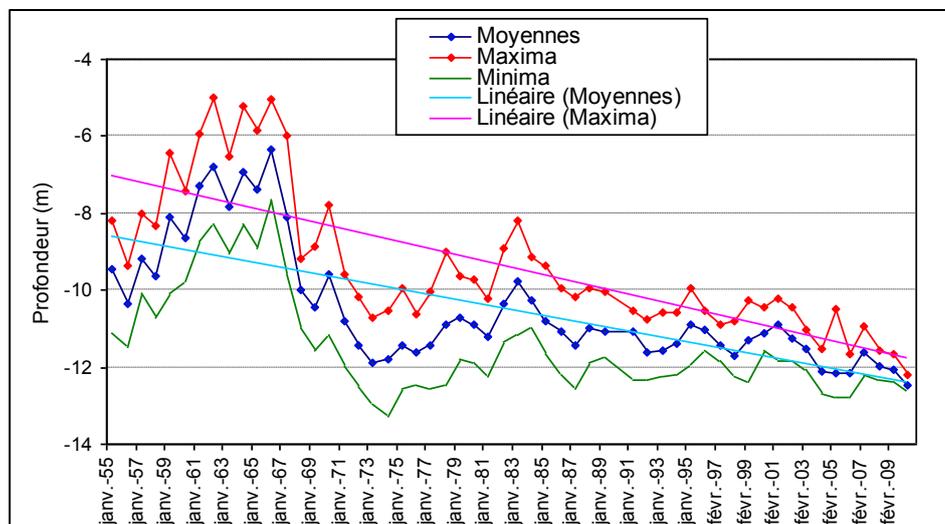
03043X0056 (type b1)



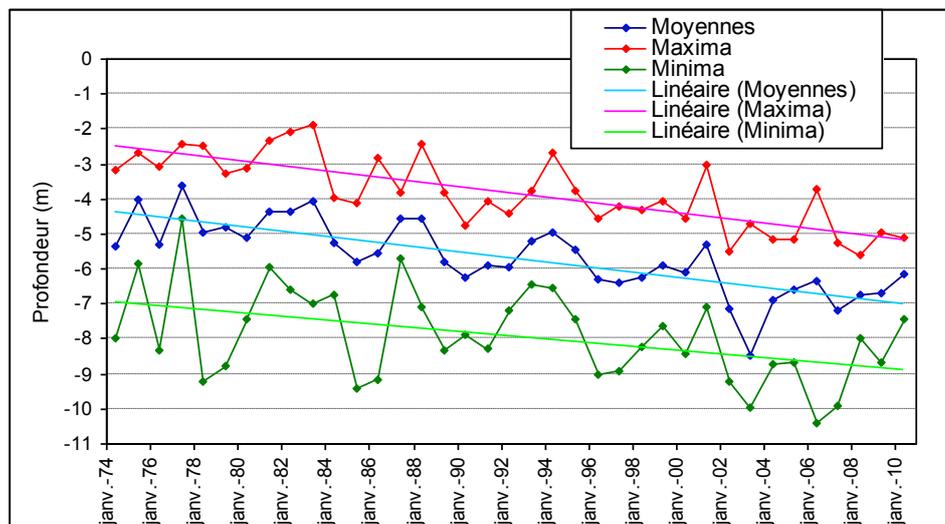
04134X0022 (type b1)



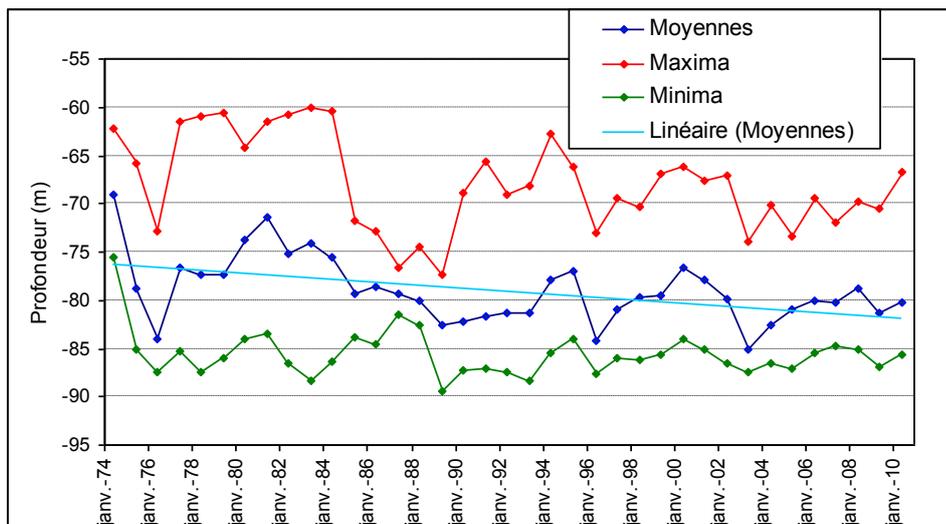
04138X0019 (type b1)



05264X0029 (type b1)



01377X0205 (type a)

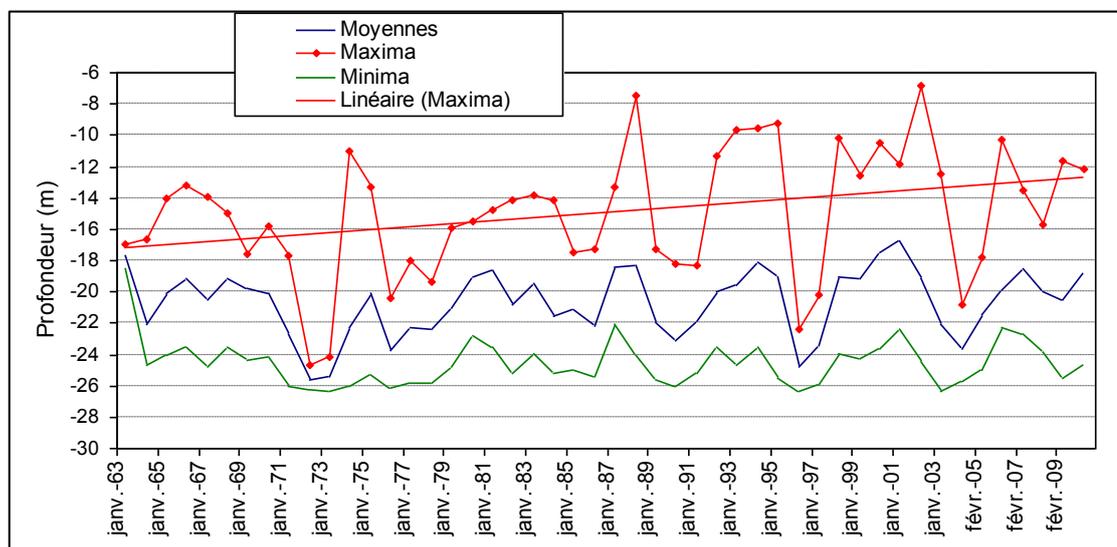


## **Annexe 4**

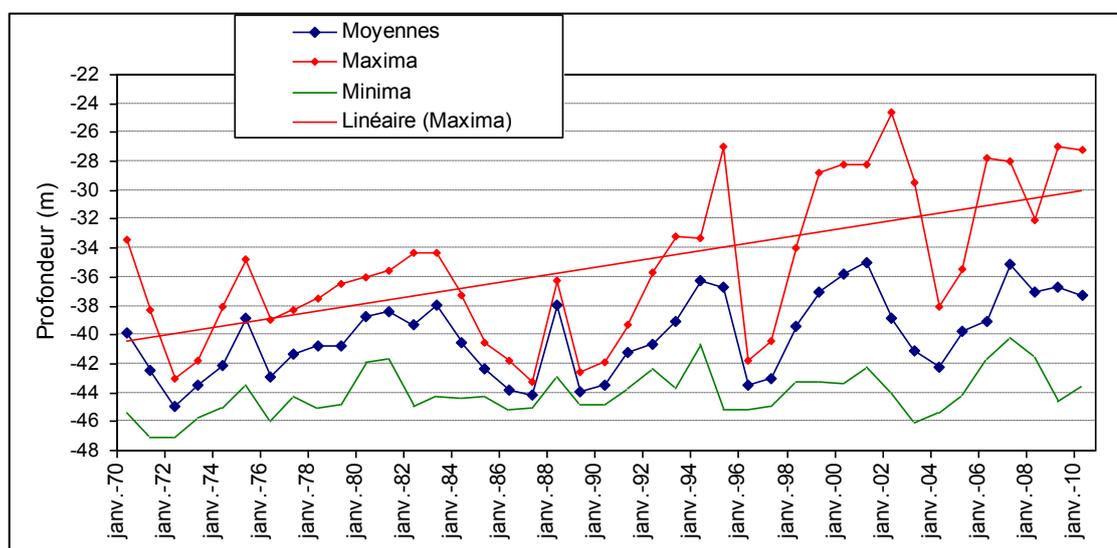
### **Graphiques des niveaux piézométriques en hausse significative**



00115X0011 (type c)

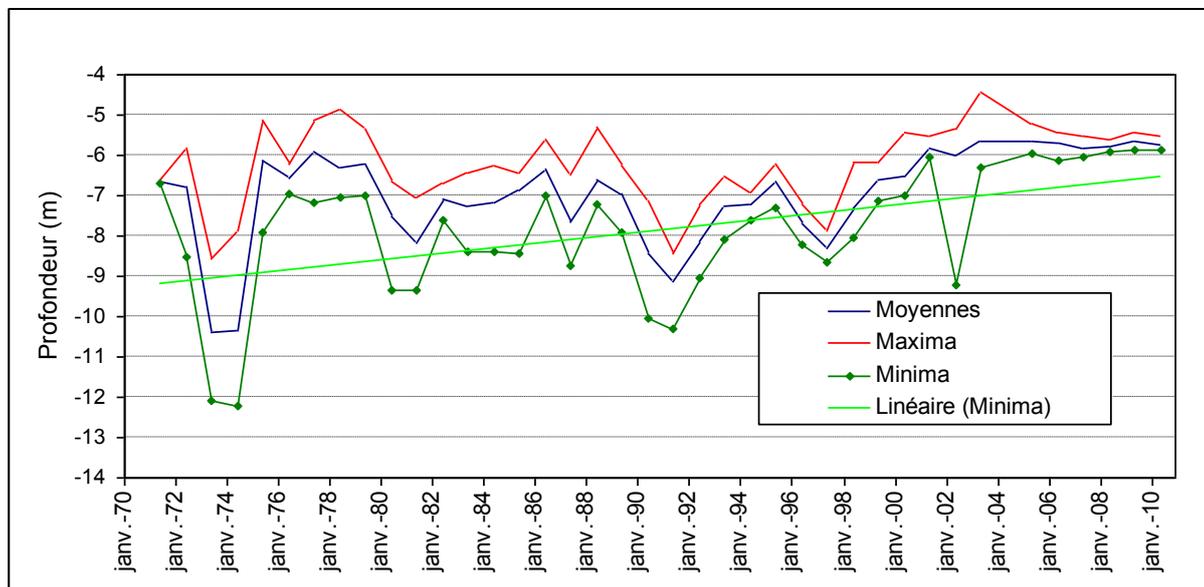


00117X0023 (type c)

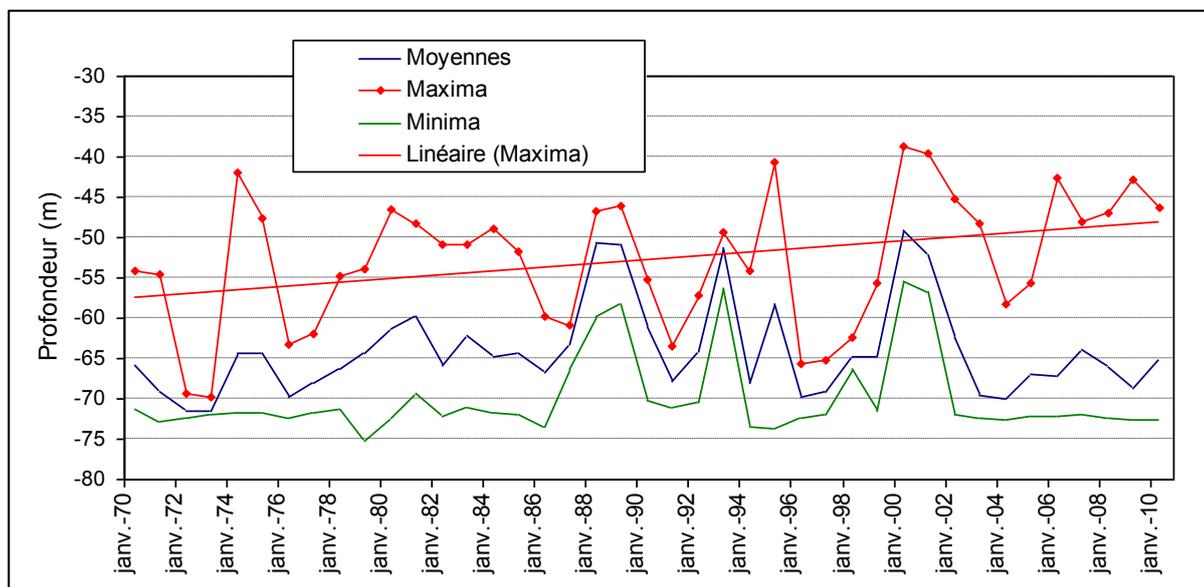




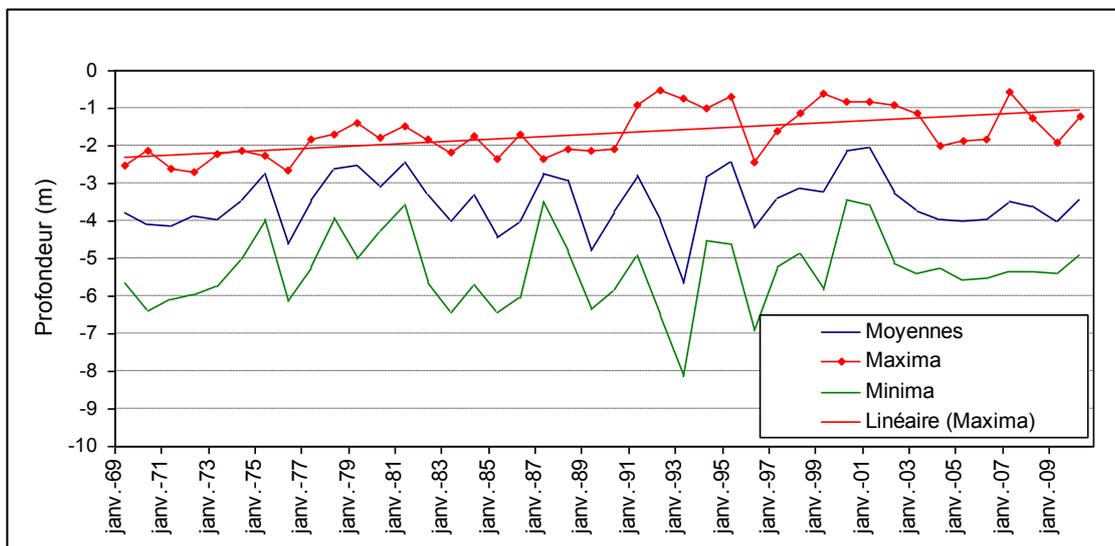
00146B0737 (type c)



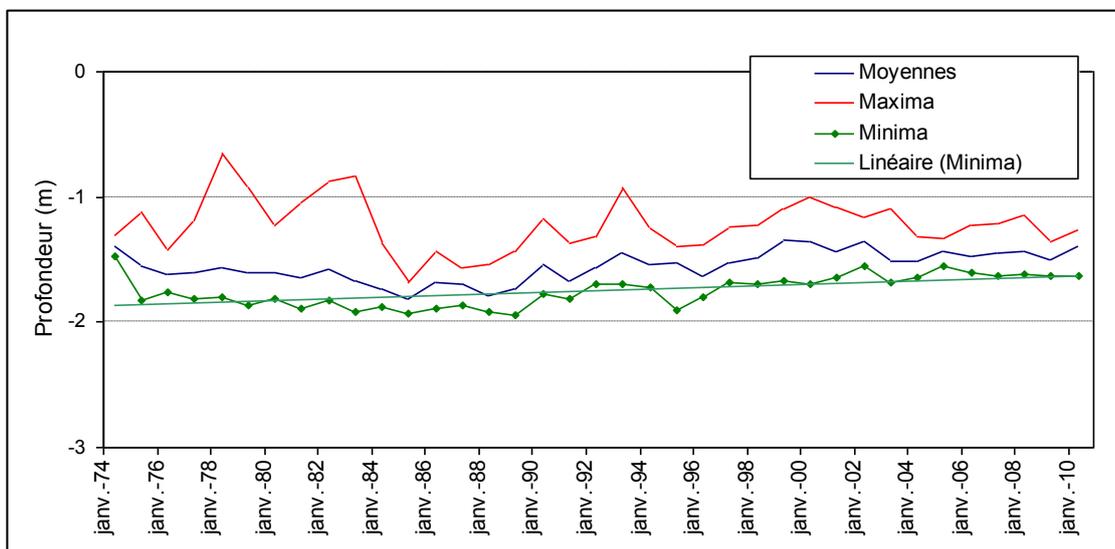
00172X0037 (type c)



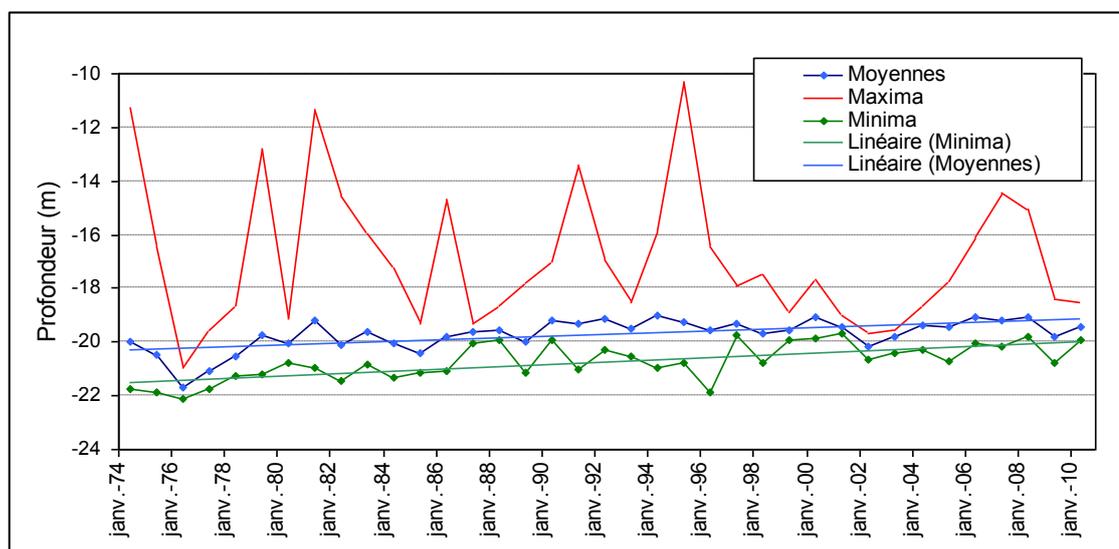
01853X0002 (type c)



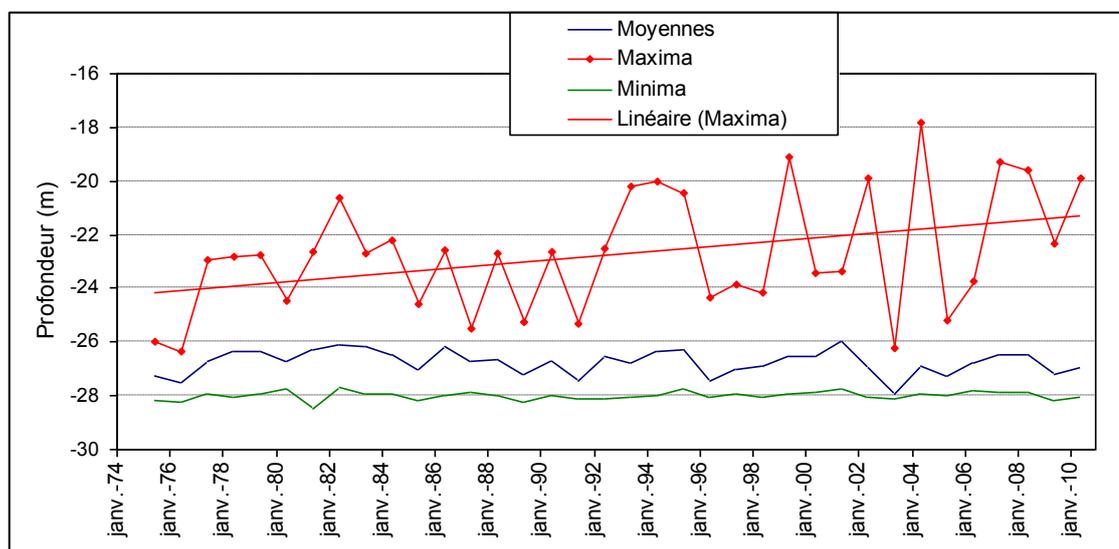
02347X0062 (type c)



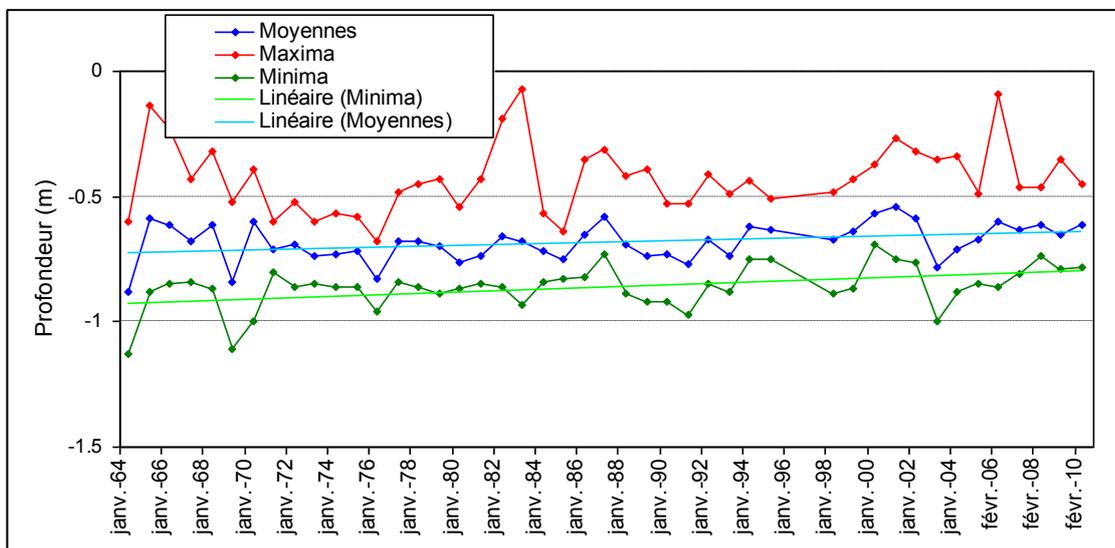
02653X0001 (type c)



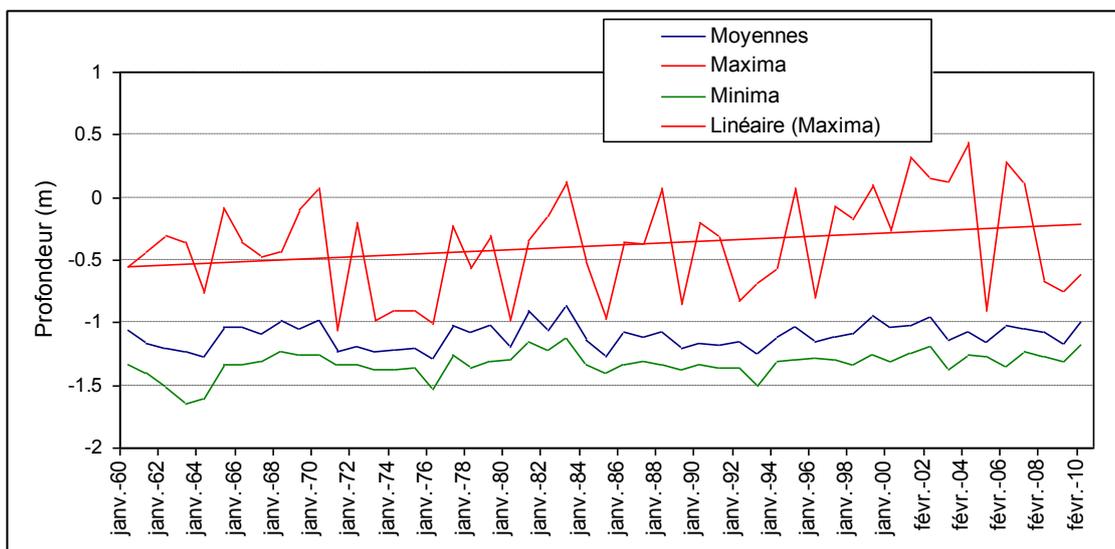
02663X0001 (type c)



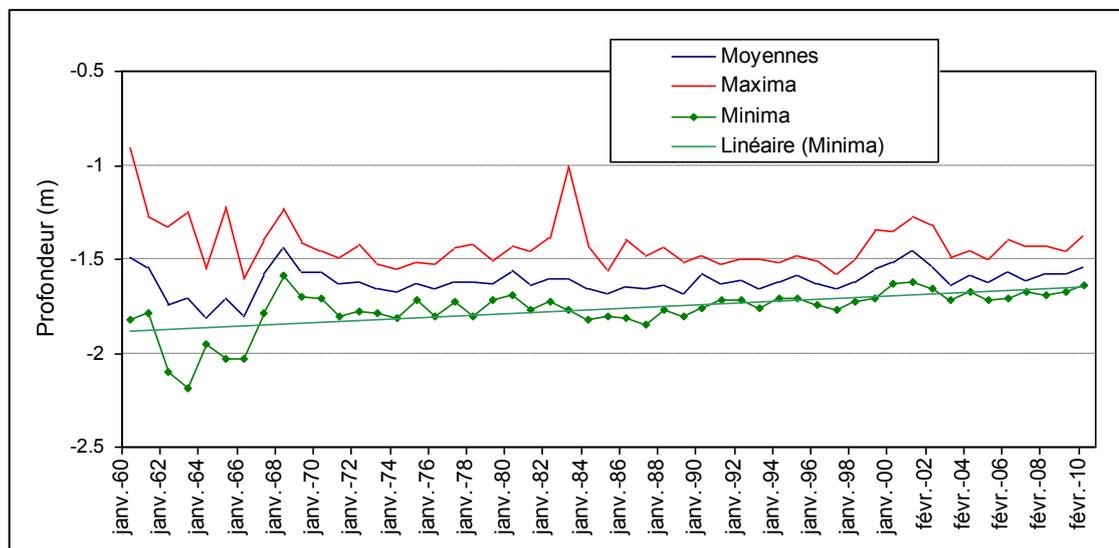
02726X0016 (type c)



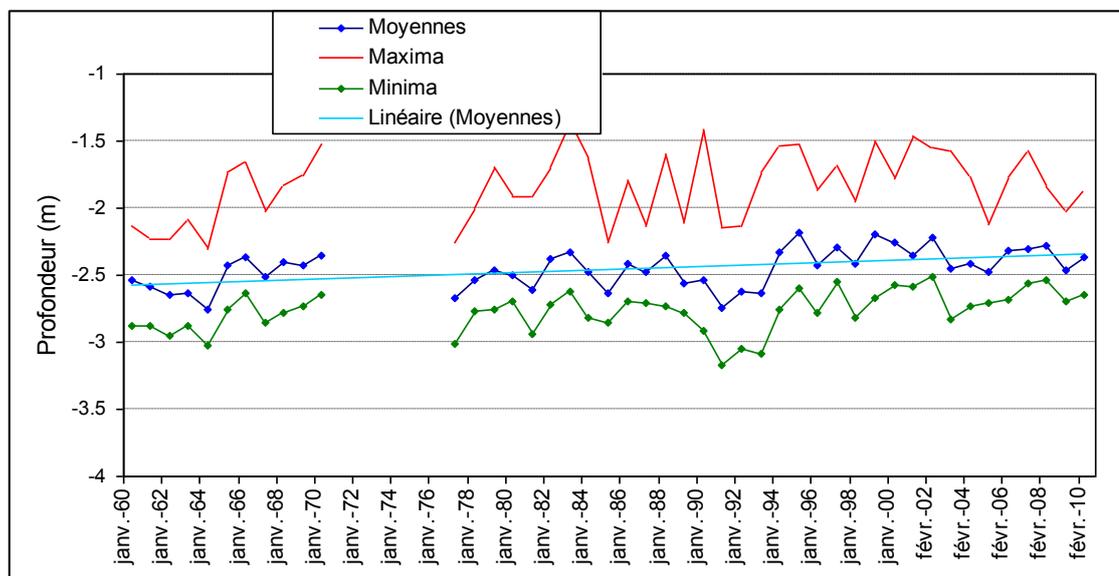
03081X0038 (type c)



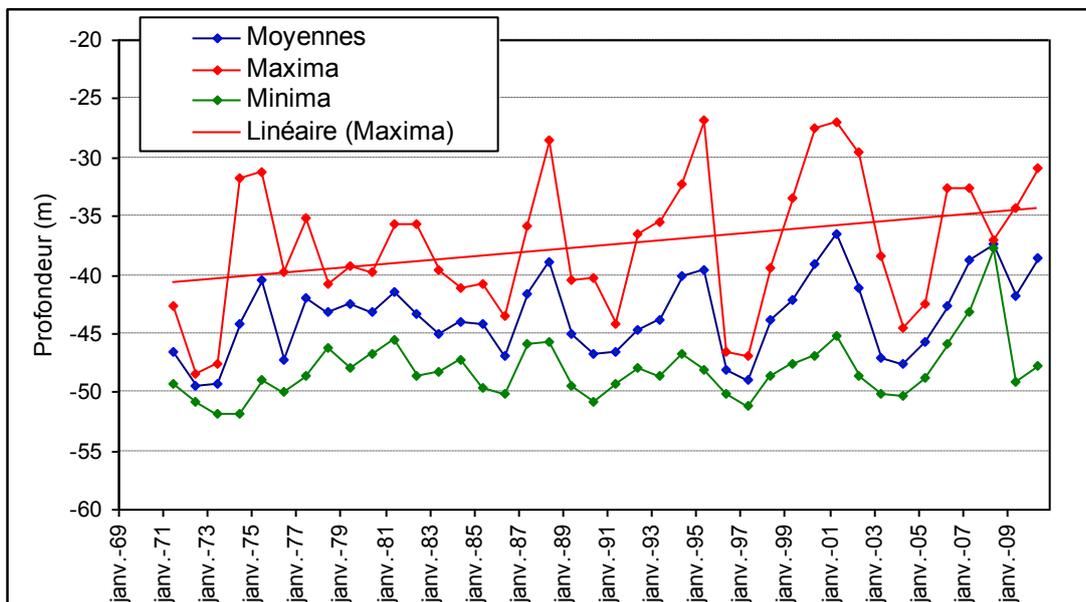
03082X0023 (type c)



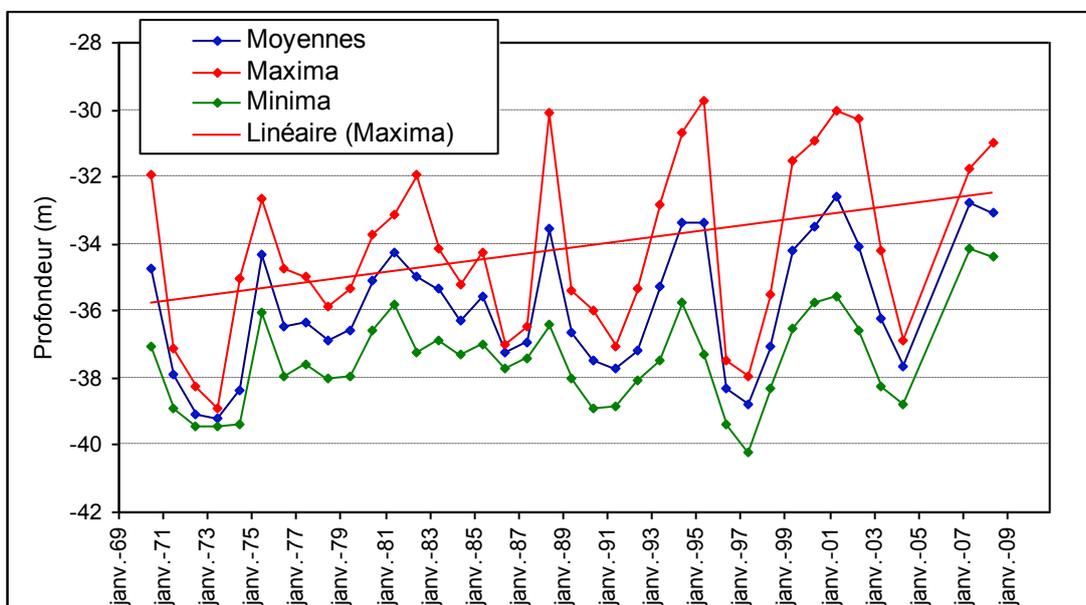
03782X0080 (type c)



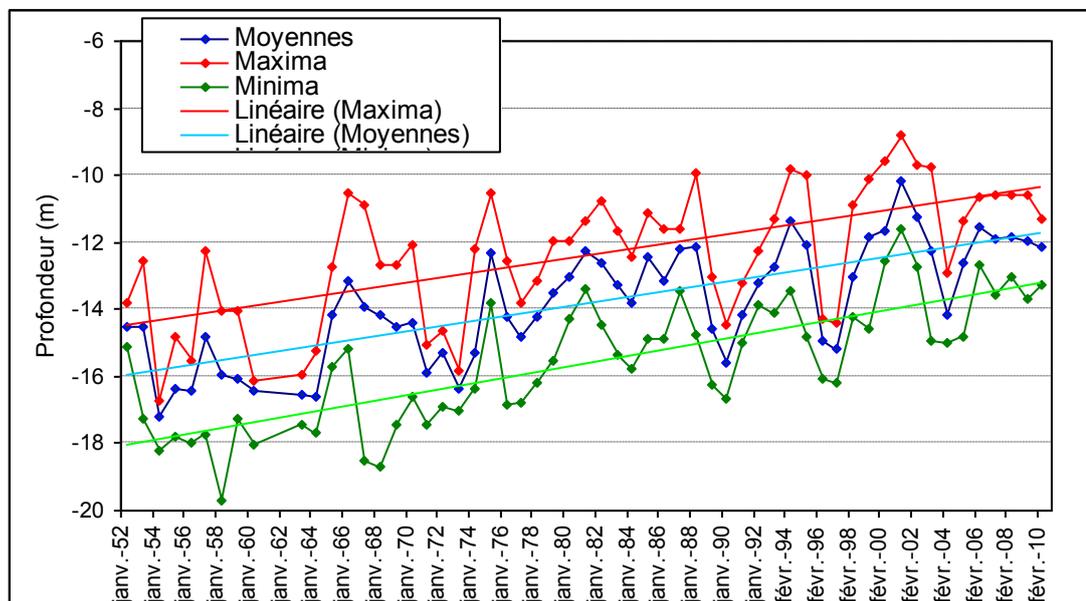
00065X0011 (type b1)



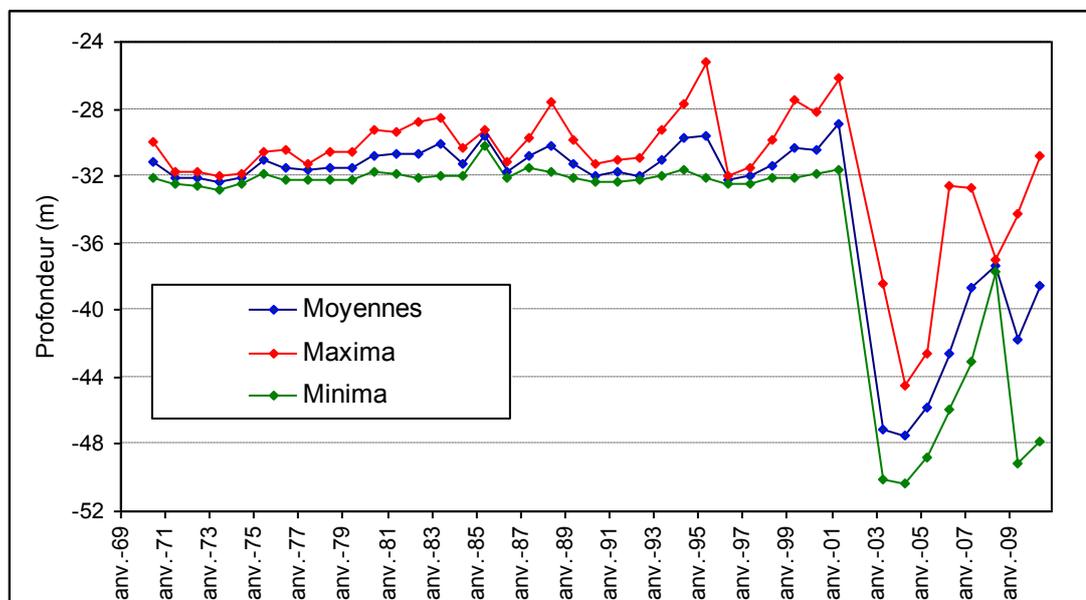
00122X0064 (type b1)



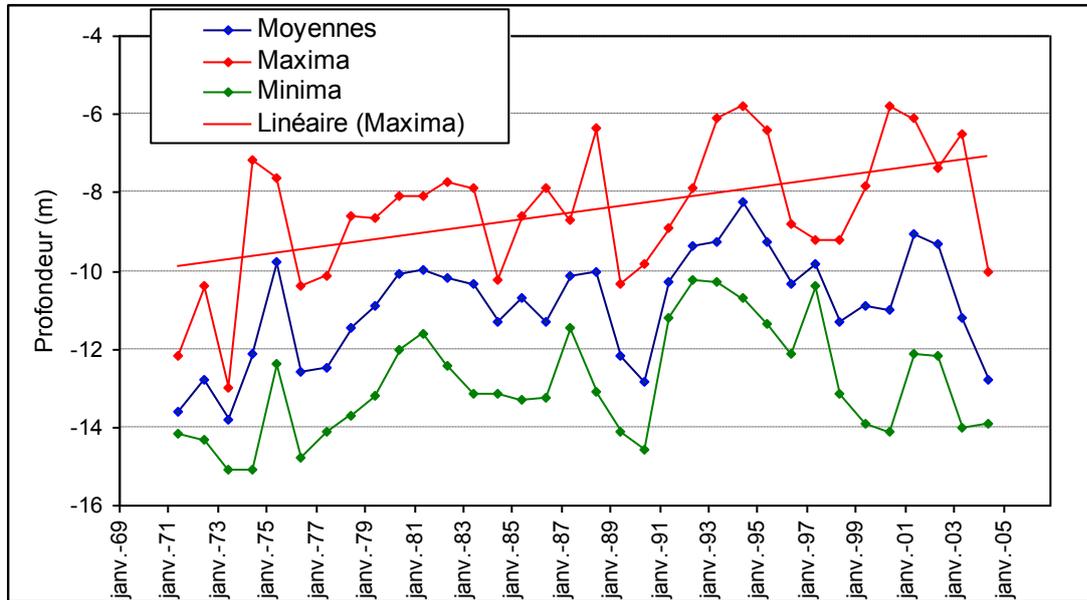
00147D0218 (type b1)



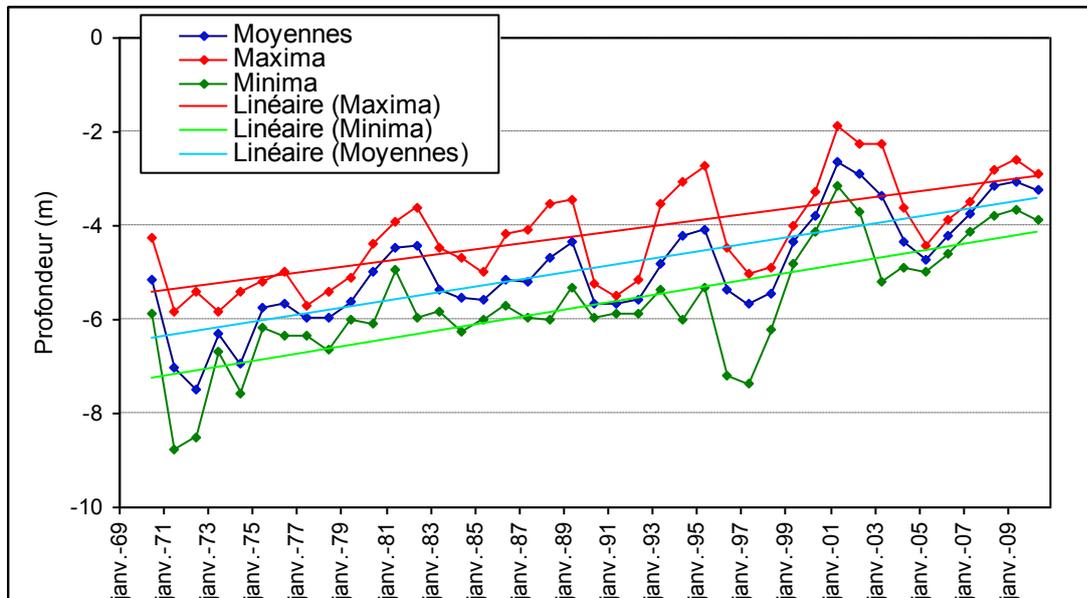
00187X0005 (type b1) Hausse des maxima jusqu'en 2001 seulement



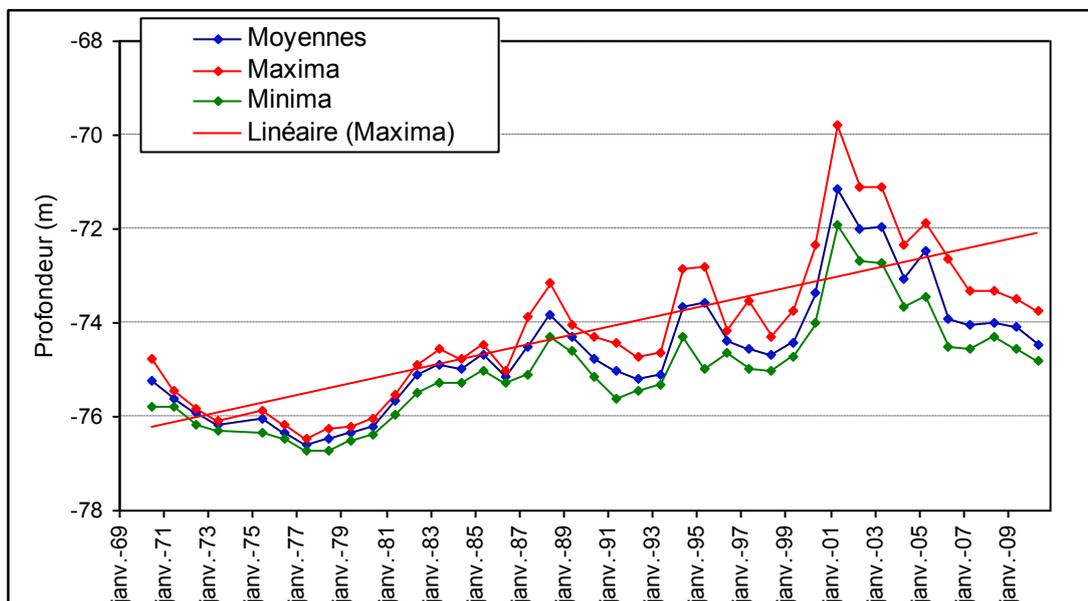
00203A0033 (type b1)



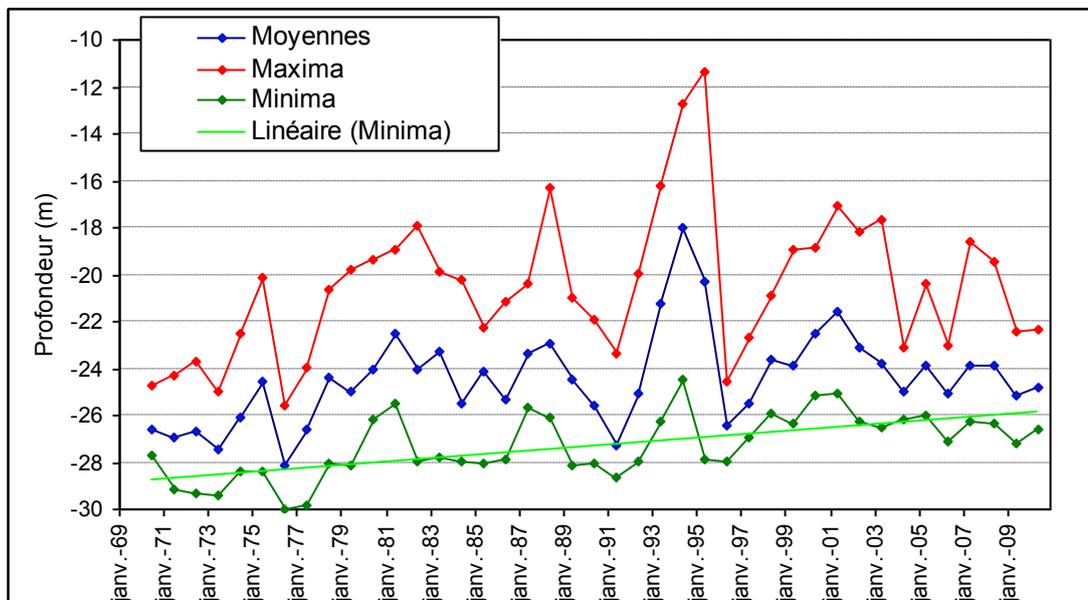
00207X0133 (type b1)



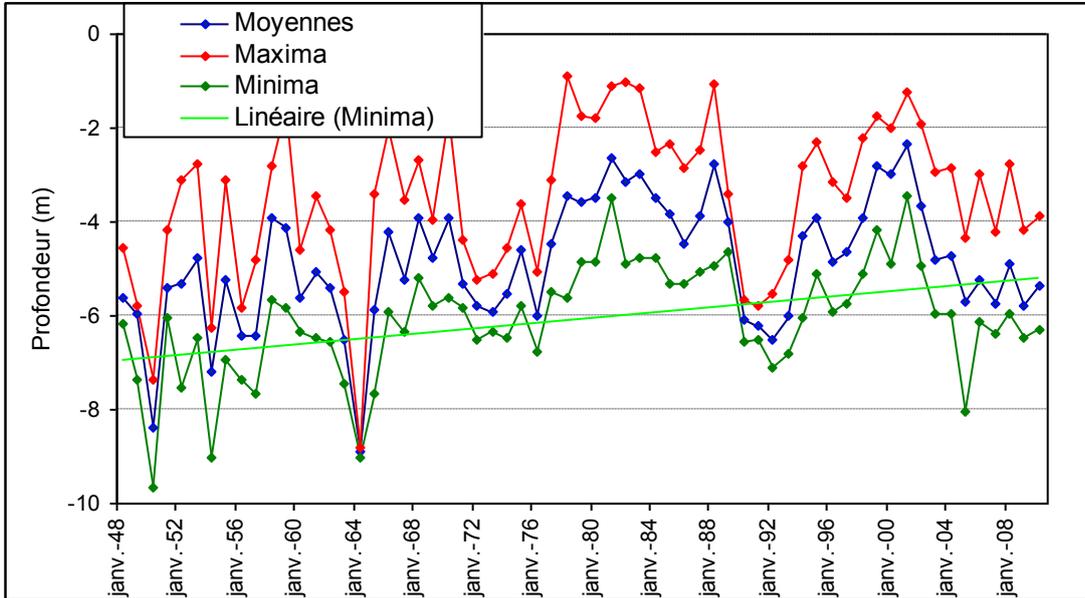
00625X0002 (type b1) - En hausse jusqu'en 2001



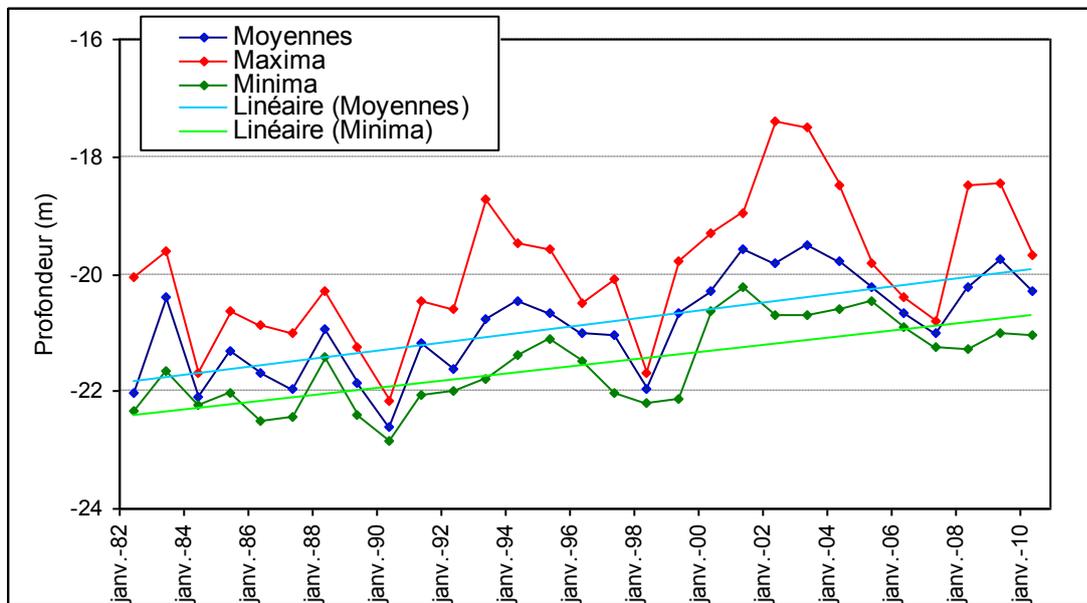
00675X0019 (type b1)



03314X1035 (type b1)



8184X0084 (type b1)





**Centre scientifique et technique  
Service EAU**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34