

Sécheresse hydrogéologique : mise en place d'indicateurs piézométriques adaptés à la dynamique des eaux souterraines

Delphine Allier, Etienne Buscarlet, Jean-Charles Manceau, Thomas Klinka, Xavier Marly

▶ **To cite this version:**

Delphine Allier, Etienne Buscarlet, Jean-Charles Manceau, Thomas Klinka, Xavier Marly. Sécheresse hydrogéologique : mise en place d'indicateurs piézométriques adaptés à la dynamique des eaux souterraines. Sécheresses, étiages et déficits en eau, Dec 2019, Paris, France. hal-02337510

HAL Id: hal-02337510
https://brgm.hal.science/hal-02337510

Submitted on 29 Oct 2019

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

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

Sécheresse hydrogéologique : mise en place d'indicateurs piézométriques adaptés à la dynamique des eaux souterraines

Delphine ALLIER[1], Etienne BUSCARLET[1], Jean-Charles MANCEAU[1], Thomas KLINKA[1], Xavier MARLY[2]

[1] BRGM, 3 av. Claude-Guillemin 45060 Orléans Cedex 2, France, e-mail: d.allier@brgm.fr, e.buscarlet@brgm.fr, jc.manceau@brgm.fr, t.klinka@brgm.fr

[2]DREAL Grand Est - Délégation de bassin Rhin-Meuse, 2 rue Augustin Fresnel 57071 METZ Cedex 03, France, e-mail: Xavier.MARLY@developpement-durable.gouv.fr

La sécheresse hydrogéologique est une conséquence d'une sécheresse météorologique sur les nappes d'eau souterraine dont les niveaux sont impactés par la baisse de la recharge due au déficit pluviométrique. A l'heure actuelle, des indicateurs ont été développés pour caractériser les épisodes de sécheresse météorologique, de sécheresse du sol et de sécheresse hydrologique mais les indicateurs manquent pour les sécheresses hydrogéologiques. L'objectif de la présente étude est de proposer une approche pour la mise en place de tels indicateurs, basés sur les niveaux piézométriques, et adaptés à la dynamique des eaux souterraines qui influe sur les caractéristiques des sécheresses hydrogéologiques rencontrées. Cette approche consiste en 1) l'analyse préalable des chroniques piézométriques existantes dans le secteur d'étude dans le but d'identifier les différentes dynamiques rencontrées et 2) le choix d'indicateurs adaptés à cette dynamique. Cette approche est mise en place dans la région Grand-Est, en France (jeu de données considéré de plus de 150 ouvrages). Les premiers résultats montrent que le traitement automatique des chroniques temporelles des niveaux piézométriques permet le regroupement d'ouvrages aux comportements similaires, avec, en particulier, l'identification sur le secteur d'étude de chroniques à cyclicité annuelle dominante (sensibles aux sécheresses météorologiques saisonnières) et de chroniques à cyclicité pluriannuelle non négligeable (signe d'une sensibilité aux successions d'années sèches). Le test de différents indicateurs potentiels est en cours afin de sélectionner le/les plus pertinents, en fonction de la dynamique mise en évidence.
Mots-clefs : sécheresses hydrogéologiques, indicateur, piézométrie, cyclicité

Groundwater drought: design of water-level based indicators adapted to groundwater dynamics

Groundwater drought is a consequence of meteorological drought on groundwater levels due to the low recharge induced by the precipitation deficiency. Up to now, indicators/indices have been developed for characterizing episodes of meteorological drought, of soil moisture drought and of hydrological drought, but such indicators are lacking for characterizing hydrogeological drought episodes. The aim of the present study is to propose an approach for designing groundwater drought indicators, based on groundwater level data, and adapted to groundwater dynamics. This approach is made of two main steps: 1) the preliminary analysis of groundwater level time series with the objective of identifying the major groundwater dynamics encountered in a given study area; and 2) the choice of indicators adapted to those dynamics. This approach is applied to the groundwater level data set of the "Grand-Est" region in France (selection of more than 150 piezometers). The first results show that the automatic water level data processing enables the clustering of hydrographs showing similar behaviour: in particular, time series with strong annual/seasonal periodicity (i.e. sensitive to seasonal meteorological drought) together with time series showing also significant pluri-annual periodicity (i.e. sensitive to successions of "dry" years) have been identified. The testing of several potential indicators, for selecting the most appropriate according to the highlighted dynamics, is on the way.
Key words : groundwater drought, indicator, groundwater level, periodicity

I CARACTÉRISTIQUES D'UNE SÉCHERESSE HYDROGÉOLOGIQUE

Plusieurs processus spécifiques régissent la propagation d'une sécheresse météorologique aux hydrosystèmes terrestres et permettent de caractériser la sécheresse hydrologique et hydrogéologique (Figure 1), et leurs retours à la normale, une fois l'épisode de sécheresse terminé :

- Du point de vue hydrologique, des évènements de déficits pluviométriques rapprochés peuvent se combiner pour ne former qu'un seul évènement prolongé de sécheresse météorologique ;
- Le déficit pluviométrique se propage avec un retard au travers du cycle hydrologique. Ainsi la sécheresse hydrogéologique débute plus tard que la sécheresse hydrologique, elle-même démarrant après la sécheresse météorologique ;

- Le déficit pluviométrique initial se trouve atténué dans les réservoirs hydrologiques (réserve utiles, humidité du sol) et hydrogéologiques (emmagasinement, perméabilité). Ces derniers réduisent l'ampleur du déficit (lissage de l'anomalie pluviométrique) ;
- A l'inverse, dans le cas d'une forte sécheresse, ces réservoirs mettent plus de temps à revenir à la normale, et induisent une prolongation de la sécheresse. On peut donc assister à une sécheresse hydrogéologique qui perdure malgré des conditions météorologiques normales ou même humides.

Ces processus de sécheresse au travers du cycle hydrologique (combinaison des évènements, retard, atténuation et prolongation) dépendent des caractéristiques du bassin versant hydrologique, du système aquifère et du climat.

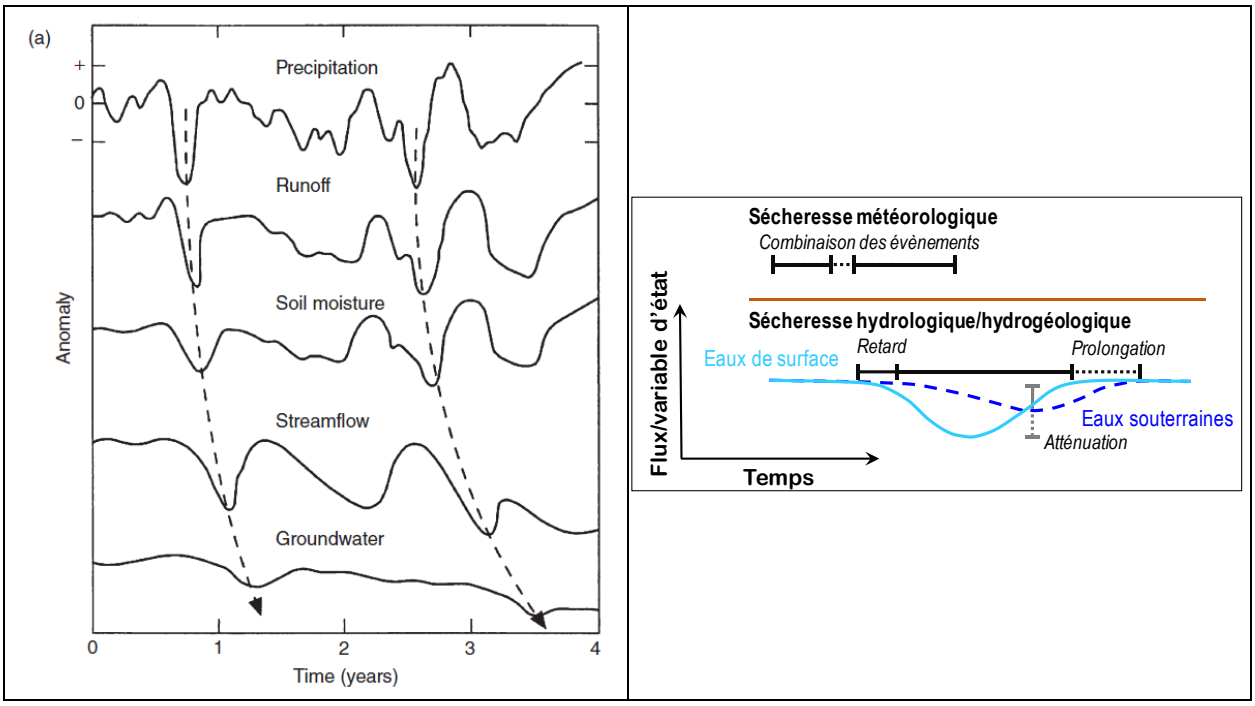


Figure 1 : Propagation d'une anomalie de précipitation au travers du cycle hydrologique (gauche) et caractéristiques des sécheresses hydrologiques et hydrogéologiques (droite). [D'après Van Loon, 2015]

La sécheresse hydrogéologique peut être définie selon deux perspectives [Collin et al, 1994] :

- Dans un cadre naturel : elle correspond à l'assèchement des sources pérennes, à la diminution de la contribution aux cours d'eau, aux assecs ;
- Dans un cadre anthropocentrique : elle correspond à des baisses significatives de niveaux piézométriques dans les forages, conduisant à leur assèchement ou leur inexploitabilité.

Pour décrire la sécheresse hydrogéologique d'un système aquifère, il est donc nécessaire de caractériser des flux (recharge du système et exutoire, sources ou débits de base des cours d'eau) mais aussi des variables d'état (niveau piézométrique et réserves au sens large : emmagasinement, géométrie de l'aquifère, perméabilité, etc.).

II INDICATEURS ET SEUILS

Afin d'anticiper les situations de crise et de qualifier/quantifier les épisodes de sécheresse, de nombreux outils de caractérisation ont été développés. Ils consistent essentiellement à calculer des indicateurs ou des indices de sécheresse que l'on peut comparer entre eux et/ou à des seuils. En particulier, l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) propose un Manuel des indicateurs et indices de sécheresse (OMM-n°1173, 2016) qui présente un état assez exhaustif des techniques disponibles. Notons que ce manuel propose des définitions qui sont rappelées ci-dessous et qui seront utilisées dans ce sens dans la suite de l'article :

- Un indicateur est une variable ou un paramètre qui sert à décrire les conditions de sécheresse ; il est caractérisé par une gamme de valeurs particulières (ou seuils de gestion) ;
- Un seuil correspond à la valeur d'un indicateur qui indique un état de sécheresse et détermine le début et la fin d'actions sur la gestion des ressources.

Le choix des indicateurs ou seuils dépend de l'objectif de l'indicateur (par exemple : déclenchement des arrêtés préfectoraux de restriction d'usage, etc.), du régime hydrologique/hydrogéologique du système étudié, et enfin des données mesurées disponibles propres à ce dernier.

En plus du manuel de l'OMM, plusieurs publications détaillent les indicateurs les plus usités, en décrivant leurs mérites et leurs faiblesses : on peut citer [Tallaksen et Van Lanen, 2004], [Mishra et Singh, 2010] et enfin [Van Loon, 2015].

Les indicateurs se distinguent en plusieurs catégories :

- Les indicateurs permettant de caractériser les débits d'étiage, calculés à partir d'une analyse d'hydrogramme : il s'agira par exemple de calculer un quantile à partir d'une fonction de répartition, de déterminer des QMNA (Quantité Mensuelle miNimale Annuelle), de calculer un Baseflow Index ou encore de caractériser une courbe de tarissement par un temps de demi-décroissance ;
- Les indicateurs permettant de quantifier le déficit en eau, également estimés à partir d'une analyse d'hydrogramme : la méthode des seuils est communément utilisée ;
- Les indicateurs standardisés : Ces indicateurs représentent des anomalies par rapport à une situation normale d'une manière standardisée et permettent des comparaisons régionales. Parmi les plus utilisés on peut citer l'index standardisé des précipitations (Standardized Precipitation Index, SPI), l'index de Palmer (Palmer Severity Drought Index, PDSI), ou encore l'Index Piézométrique Standardisé (IPS, similaire au Standardized Groundwater Index – SGI). De multiples déclinaisons de ces indicateurs existent, considérant par exemple la neige, l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'humidité du sol, le ruissellement, le débit des cours d'eau, etc.
- Les indicateurs composites : qui utilisent des données de plusieurs types pour caractériser la sécheresse, par exemple le CDI (Combined Drought Indicator) qui combine le SPI, un indicateur sur l'humidité du sol et l'état de la végétation, déterminé par télédétection, pour déceler les sécheresses qui ont une incidence sur l'agriculture.

Il est important de noter que l'immense majorité de ces indicateurs se concentre essentiellement sur des paramètres de surface ou de sol, et qu'en dehors de l'IPS (ou SGI), aucun de ces indicateurs ne caractérise les variables hydrogéologiques (niveaux piézométriques) ou la sécheresse hydrogéologique en tant que telle. Pour les indicateurs de sécheresse hydrogéologique, Tallaksen et Van Lanen [2004] proposent la méthodologie suivante : « En principe, les mêmes méthodes que pour les débits de rivières peuvent être appliquées, avec des précautions sur la charge hydraulique qui est une variable d'état ». Dans la mesure où le niveau piézométrique est une variable non-cumulative, très souvent auto-corrélée, rarement stationnaire, les méthodes énumérées ci-dessus concernant le débit des rivières sont en effet d'un usage potentiellement délicat.

III ANALYSE PREALABLE POUR IDENTIFIER LA DYNAMIQUE DES EAUX SOUTERAINES

La piézométrie étant la variable la plus accessible traduisant directement le déséquilibre entre les flux entrant et sortant dans un aquifère donné, les traitements indiqués par la suite seront appliqués aux chroniques piézométriques.

Les exemples fournis ont été réalisés dans le cadre d'une étude en cours sur la région Grand Est (France métropolitaine) pour améliorer les indicateurs de gestion utilisés pour la sécheresse hydrogéologique et qui fait suite à une première analyse (Klinka et al., 2017).

L'approche choisie est la suivante :

1- Caractérisation de chaque piézomètre de la région Grand Est par analyse et traitement automatiques de sa chronique piézométrique (inertie, cyclicité, temps de demi-décroissance, …) ;
2- Regroupement spatial des différents comportements des niveaux de nappes ;
3- Mise en place d'une méthode de détermination des indicateurs adaptés à chaque typologie hydrodynamique rencontrée.

III.1 Données traitées

Les chroniques piézométriques ont été extraites du portail national d'accès aux données sur les eaux souterraines : https://ades.eaufrance.fr/, en prenant comme critère :

- Ouvrages localisés dans la région Grand Est ;
- Chroniques contenant au moins 120 données entre la première et la dernière date d'acquisition ;
- Chroniques caractérisées par une durée entre la première et la dernière date d'acquisition supérieure à 10 années ;
- Mesures ayant comme statut « Contrôlée niveau 1 » ou « Contrôlée niveau 2 », et ayant comme qualification « Correcte ».

Au total, 921 562 mesures ont pu être extraites sur un total de 157 ouvrages.

Pour chacun des piézomètres, une analyse préliminaire (cf. Figure 2) a été réalisée permettant :

- La visualisation de la chronique ;
- Le calcul du périodogramme associé : c'est ici le périodogramme de Lomb-Scargle [Scargle, 1982] qui est calculé, au pas de temps mensuel. Le résultat fournit les périodes des cycles contribuant le plus à la dynamique de la série. Les trois principaux cycles sont automatiquement calculés ;
- Le calcul de l'IPS-1mois : le calcul n'est fait que si la série bénéficie de plus de 15 années de mesure ;
- La construction d'une courbe type de décharge (décroissance des niveau piézométriques).

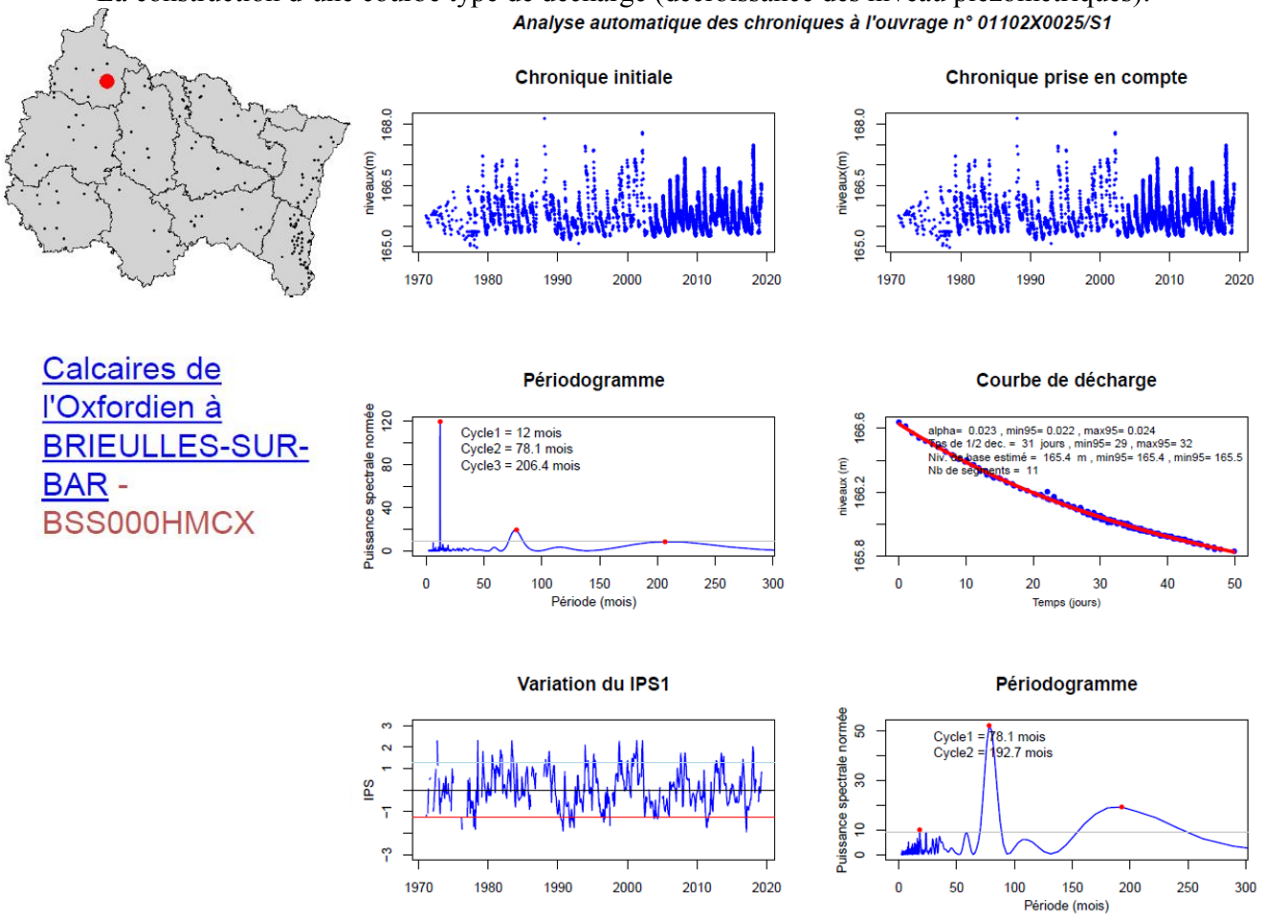


Figure 2 : Exemple de l'analyse préliminaire menée pour chaque ouvrage disposant d'une chronique piézométrique suffisamment longue (Ouvrage BSS000HMCX à Brieulles-sur-mer, captant les calcaires de l'Oxfordien)

A noter qu'une première observation des chroniques piézométriques a mis en évidence certaines valeurs ponctuelles atypiques, voire des comportements anomaliques concernant des périodes plus longues. Les valeurs atypiques ont été supprimées ou la chronique a été écartée. La suite de l'analyse a donc porté sur 152 chroniques piézométriques.

III.2 Analyse de la cyclicité

La première étape de l'analyse des chroniques a porté sur l'évaluation de leur cyclicité. Il apparait en effet essentiel de bien connaître les principaux cycles expliquant l'évolution des niveaux piézométriques dans le temps pour traiter de la question des sécheresses : une cyclicité annuelle très marquée se traduira par des niveaux absolus bas atteints chaque année mais durant un temps limité ; à l'inverse une cyclicité

pluriannuelle très marquée se traduira par des niveaux absolus bas atteints seulement pour certaines années mais durant un temps beaucoup plus long (plusieurs mois, voire années).

Il s'agit donc d'évaluer si les chroniques mesurées sont représentatives de niveaux piézométriques avec cyclicité annuelle principale, pluriannuelle principale, voire avec une combinaison de plusieurs cyclicités.

Comme indiqué précédemment, les principaux cycles de chaque chronique piézométrique sont déduits de l'étude du périodogramme. Les périodes associées à des puissances spectrales importantes contribuent le plus à la dynamique de la série. La Figure 3 montre la répartition, sur les 152 chroniques, de la valeur des cycles principaux calculés, c'est-à-dire des cycles ayant la puissance spectrale la plus importante : on voit que la majorité des chroniques présente une cyclicité annuelle, mais une fraction non négligeable présente une cyclicité principale pluriannuelle (47 chroniques sur 152), avec deux cyclicités principales semblant se dégager, l'une autour de 78 mois (6.5 années) et l'autre autour de 16 années. Le même histogramme est réalisé pour la cyclicité secondaire (Figure 4). Se dégagent cette fois-ci quatre groupes : les trois cyclicités identifiées précédemment, 12 mois, 6.5 années et 16 années, à laquelle s'ajoute une cyclicité de 18 mois environ.

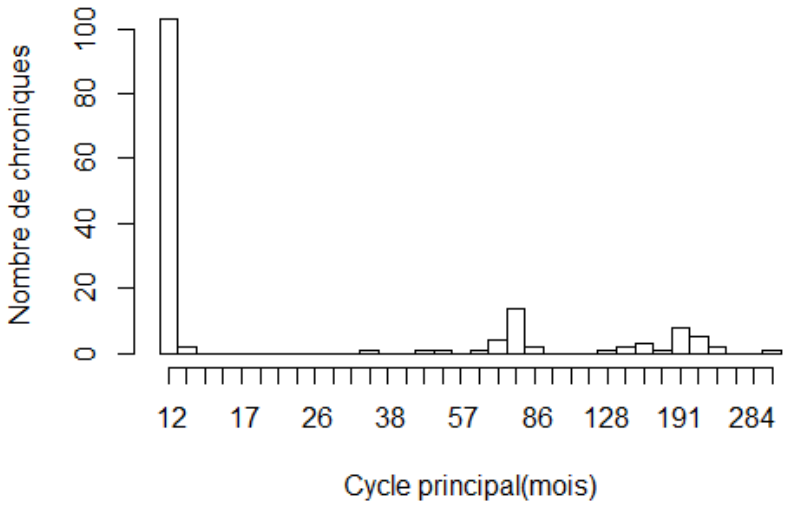


Figure 3 - Histogramme de la valeur calculée des cycles principaux

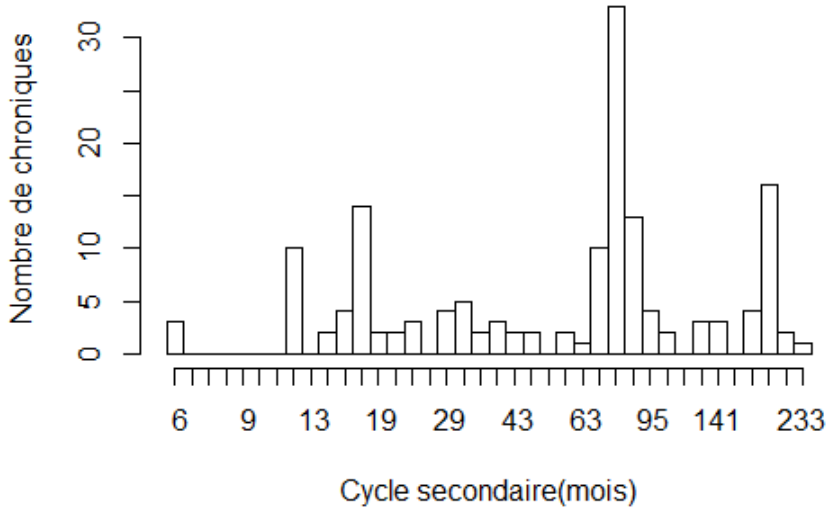


Figure 4 - Histogramme de la valeur calculée des cycles secondaires

Ces histogrammes montrent les cycles importants au sein des chroniques mais ils ne permettent pas de décrire l'importance des différentes cyclicités détectées au sein d'une même chronique.

De plus, concernant les cyclicités pluriannuelles détectées, la durée de la chronique limite *de facto* la période maximale des cycles pouvant être identifiés. On se restreint, dans cette étude, à des périodes inférieures à la moitié de la durée d'observation, ce qui est déjà optimiste. A titre d'illustration, 72 des 152 chroniques ne permettent ainsi pas la détection d'une éventuelle cyclicité de 16 ans, et 14 ne permettent pas la détection d'une éventuelle cyclicité de 6.5 ans.

Nous poursuivons donc l'analyse en utilisant la puissance spectrale pour qualifier l'importance du cycle principal par rapport à l'importance du cycle secondaire. La domination d'un cycle par rapport à un autre a été (arbitrairement) considérée lorsque le rapport des puissances spectrales associées était supérieur à 0.5. Cette analyse permet de mettre en évidence trois catégories :

- A : Cyclicité annuelle dominante,
- B : Cyclicité pluriannuelle dominante,
- C : Cyclicités annuelles et pluriannuelles d'ordre comparable.

Les regroupements obtenus sont représentés sur la Figure 5.

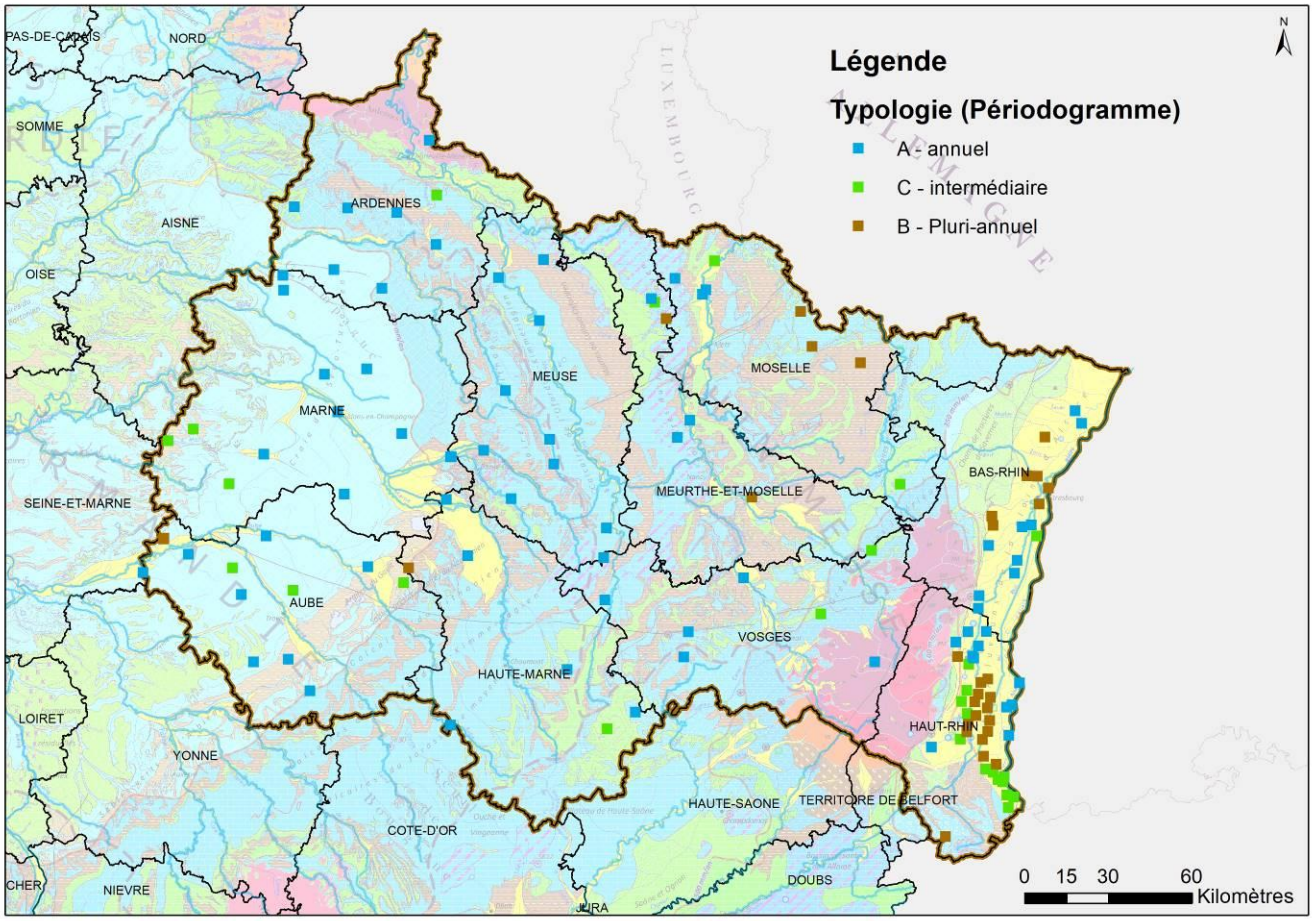


Figure 5 - Classement des piézomètres selon les cyclicités détectées et selon leur importance relative (en fond : la carte hydrogéologique de la France à l'échelle du millionième).

Cette classification donne un premier regroupement lisible et facile à interpréter, mais une des difficultés de cette classification est le choix d'un seuil au-delà duquel on considère une cyclicité comme dominante (ici ratio de 0.5).

III.3 Regroupement des ouvrages aux chroniques « similaires »

Afin de lever ce verrou, nous proposons d'évaluer la similarité des chroniques directement par le calcul des corrélations croisées entre paire d'ouvrages. Plus la corrélation est importante, plus une ressemblance entre les chroniques est attendue. Une corrélation au pas de temps mensuel est réalisée pour une plage de décalage d'une année (positivement et négativement). Le maximum des coefficients de corrélations obtenus entre deux chroniques sur cette plage de décalage est pris en compte ; ainsi les chroniques présentant des similarités mais décalées dans le temps sont considérées comme présentant des caractéristiques similaires. On calcule ces coefficients pour des périodes d'observation communes entre les paires d'ouvrages, suffisamment longue pour maximiser les possibilités de discrimination entre les chroniques mais permettant tout de même de conserver le plus d'ouvrages possible ; afin de minimiser les biais induits par l'absence de données au sein des chroniques, les chroniques ayant des mesures mensuelles au moins 75% du temps entre 1998 et 2019 sont comparées entre elles. Ensuite, nous proposons de mettre en place une approche de classification / regroupement considérant comme indice de dissimilarité, le coefficient de corrélation obtenu.

Au final, 94 chroniques ont pu être comparées ; un regroupement entre 7 et 16 groupes, avec un optimum à 15 selon la méthode des k-medoids est obtenu par la méthode de la corrélation de Mantel (voir par exemple Borcard et al., 2011). La répartition géographique des groupes formés pour un total de 7 groupes est affichée à la Figure 6.

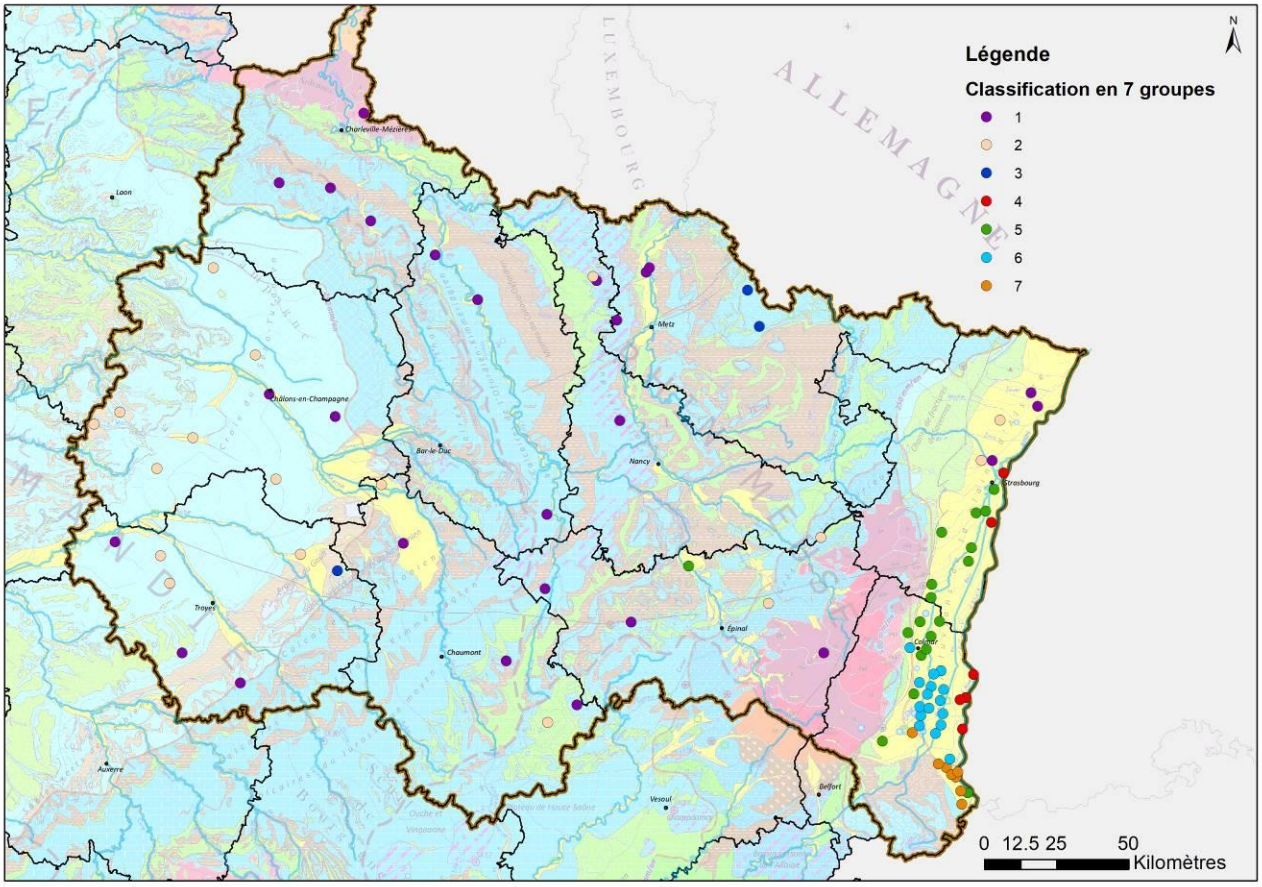


Figure 6 - Classification selon la méthode des k-medoids, 7 groupes

Cette classification met en évidence différentes dynamiques :

- Certaines classes regroupent les chroniques caractérisées par une forte composante annuelle, traduisant une sensibilité aux sécheresses météorologiques saisonnières/annuelles, plus ou moins prononcée selon l'amplitude de variation des niveaux piézométriques. Sur la Figure 6, c'est le cas du groupe n°1, et des groupes n°4 et n°5. A noter que certains ouvrages présentant de telles caractéristiques captent des nappes très liées à des cours d'eau. C'est le cas notamment du groupe n°5, qui rassemble des ouvrages situés au bord du Rhin qui présente un régime nival : les périodes de hautes eaux mesurées sur ces ouvrages sont donc autour du mois de juin.
- D'autres classes regroupent des chroniques caractérisées par une forte composante pluriannuelle, comme le groupe 6 et le groupe 7 (dans une moindre mesure) de la Figure 6. Cette forte composante pluriannuelle traduit une inertie de la nappe associée à ces ouvrages : ces nappes ont un effet tampon important sur la circulation des eaux, c'est-à-dire que la décharge par contribution aux débits des cours d'eau est plus régulière que la recharge par les eaux météoriques. Cela se traduit par un déséquilibre à l'échelle annuelle entre apports et exports, et donc à une alternance d'années soit déficitaires (recharge < décharge), soit excédentaires (recharge > décharge). Sur les niveaux piézométriques, se superposent donc aux variations annuelles, des variations pluriannuelles qui peuvent devenir prédominantes : ces nappes sont donc surtout sensibles aux sécheresses météorologiques pluriannuelles (succession d'années sèches).
- Certaines classes présentent également des comportements intermédiaires comme par exemple le groupe 2 de la Figure 6, dont les ouvrages traduisent une cyclicité annuelle des niveaux piézométriques mais également une certaine inertie qui se matérialise par une cyclicité pluriannuelle non négligeable.

IV CHOIX DES INDICATEURS EN FONCTION DE LA DYNAMIQUE IDENTIFIEE

Les méthodes statistiques qui ont été mises en œuvre permettent de mettre en évidence des groupes de piézomètres ayant une dynamique similaire, i.e. réagissant de la même manière aux précipitations et présentant ainsi une sensibilité semblable aux sécheresses météorologiques, qu'elles soient saisonnières ou pluriannuelles (succession d'années sèches).

Différentes variables sont actuellement testées afin d'identifier les indicateurs les plus pertinents pour la caractérisation des sécheresses hydrogéologiques. Il s'agit, en plus de la chronique des mesures elle-même :

- des niveaux moyens et médians annuels ;
- des niveaux minimaux annuels ;
- des niveaux moyens mensuels minimum de chaque année (HMNA, par analogie avec les QMNA en hydrologie) ;
- des niveaux moyens minimaux de chaque année calculés sur une période de n jours consécutifs (par analogie avec les VCNn en hydrologie) ;
- de l'indicateur piézométrique standardisé calculé sur une période adaptée à la dynamique des nappes (un mois, trois mois, six mois, …).

Concernant les méthodes d'établissement des seuils, à construire à partir des chroniques des variables précédemment citées, sont envisagées 1) l'analyse fréquentielle quand celle-ci sera possible : données stationnaires, indépendantes et homogènes (vraisemblablement pour les ouvrages captant des nappes à faible inertie) et donc la définition de seuils basés sur la notion de période de retour (par exemple le HMNA5), ou 2) l'analyse des caractéristiques statistiques de la chronique de l'indicateur choisi (par exemple moyenne des HMNA, moyenne des minima annuels, minimum des HMNA, minimum absolu/seuil historique).

V CONCLUSIONS

L'objectif de la présente étude était de proposer une approche pour la mise en place d'outils de caractérisation des épisodes de sécheresses hydrogéologiques ; les indicateurs attendus sont basés sur les niveaux piézométriques et doivent être adaptés à la dynamique des eaux souterraines puisque celle-ci influe sur les caractéristiques des sécheresses hydrogéologiques rencontrées. Cette approche consiste en 1) l'analyse préalable des chroniques piézométriques existantes dans le secteur d'étude dans le but d'identifier les différentes dynamiques rencontrées et 2) le choix d'indicateurs adaptés à cette dynamique. Cette approche est actuellement mise en place dans la région Grand-Est, en France (jeu de données considéré de plus de 150 ouvrages). Les premiers résultats montrent que le traitement automatique des chroniques temporelles des niveaux piézométriques permet le regroupement d'ouvrages aux comportements similaires, avec, en particulier, l'identification sur le secteur d'étude de chroniques à cyclicité annuelle dominante (sensibles aux sécheresses météorologiques saisonnières) et de chroniques à cyclicité pluriannuelle non négligeable (signe d'une sensibilité aux successions d'années sèches). Le test de différents indicateurs potentiels est en cours afin de sélectionner le/les plus pertinents, en fonction de la dynamique mise en évidence.

VI REFERENCES

Borcard, D., Gillet, F. & Legendre, P. (2011). Numerical Ecology with R. Use R! series. Springer Science, New York.

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

Klinka T., Seguin J.J., Fourniguet G. (2017) - Les indicateurs sécheresse en région Grand Est (Champagne Ardenne, Lorraine, Alsace) : analyse et propositions. Rapport final. BRGM/RP-67043-FR

Mishra M., Singh V., (2010), A review of drought concepts, Journal of Hydrology, 391, 202–216

Scargle, J.D., (1982), Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data, The Astrophysical Journal, vol 263, pp. 835-853

Tallaksen L., Van Lanen H. (2004), Hydrological Drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater, Developments in Water Science n°48, Elsevier

Van Loon A. (2015), Hydrological Drought Explained, Wiley Interdisciplinary Reviews Water 2015, https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/wat2.1085

World Meteorological Organization (2016), Handbook of Drought Indicators and Indices, WMO-No.1173, Integrated Drought Management Programme