

Mémoire

Auteur : Demorcy, Gaspard

Promoteur(s) : Brouyère, Serge

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/18460>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Annexes

Table des matières

| | | |
|----|--|----|
| 1. | Diagraphies par imageries au site H+ de Poitiers _____ | 2 |
| 2. | Perte dans le lit de la Smagne _____ | 3 |
| 3. | Estimations des volumes prélevables _____ | 4 |
| 4. | Protocole de gestion des Autizes (2016) _____ | 8 |
| 5. | Détails techniques des réserves de substitution _____ | 10 |
| 6. | Etudes d'impact BRGM (2010) _____ | 11 |
| 7. | Qualité des eaux au sein des réserves de substitution _____ | 13 |
| 8. | Description détaillée des profils de sols utilisés dans AquaCrop _____ | 18 |

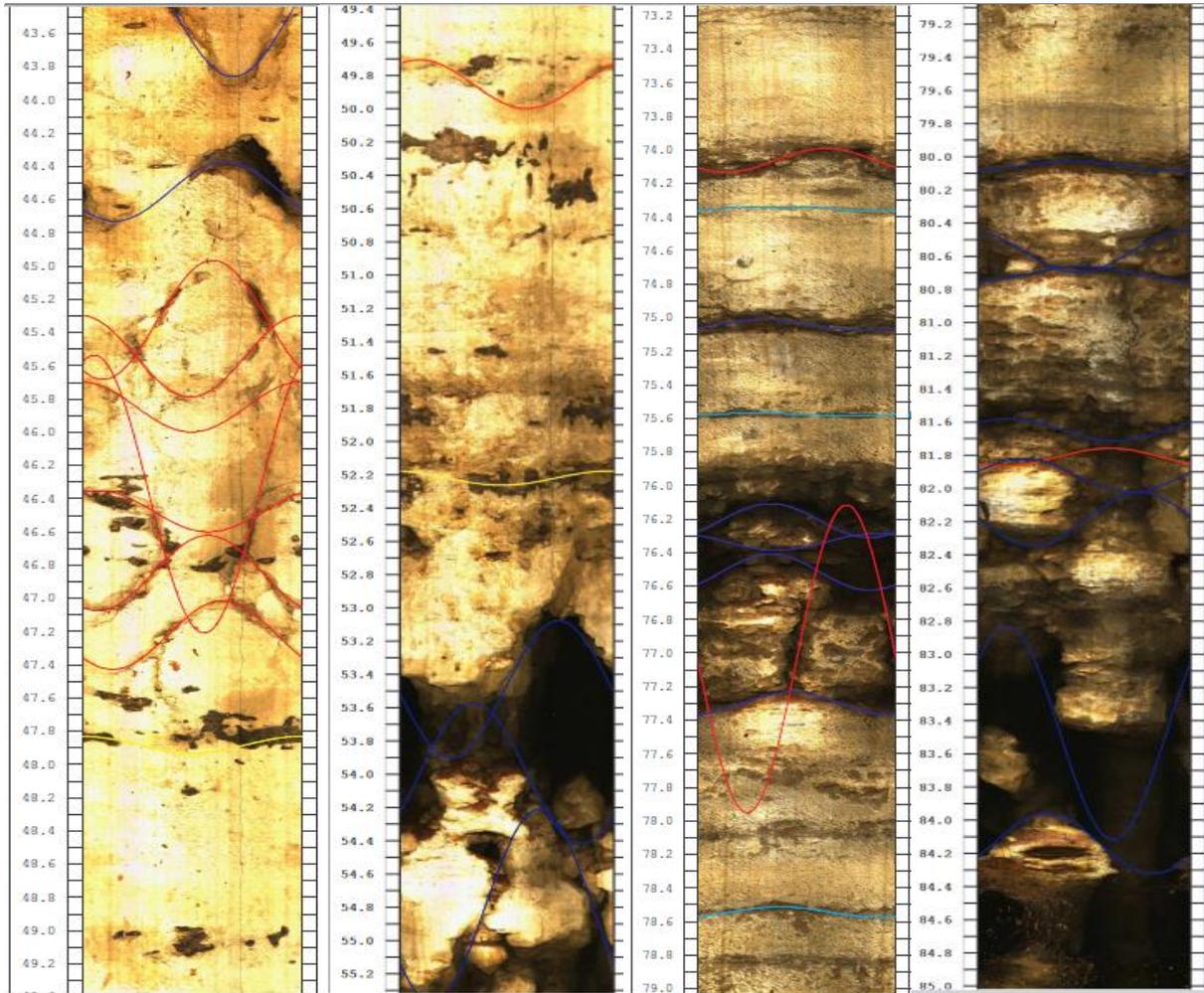
Liste des figures

| | |
|--|-----------|
| <i>Figure 1: Diagraphies par imagerie formation du Bathonien/Bajocien au site H+ de Poitiers _____</i> | <i>2</i> |
| <i>Figure 2: Localisation des forages et de la perte de la Smagne. Communes de Bessay et de St Jean-de-Beugné – Echelle 1/25000^{ème} _____</i> | <i>3</i> |
| <i>Figure 3 : Protocole de gestion des Autizes _____</i> | <i>8</i> |
| <i>Figure 4: Courbe standard de consommation . _____</i> | <i>8</i> |
| <i>Figure 5 : Détails technique des réserves de substitution. _____</i> | <i>10</i> |
| <i>Figure 6: Comparaison des niveaux piézométriques de la nappe du Dogger de janvier 2005 restitués par le modèle avec et sans pompage hivernaux pour le remplissage de retenues de substitution _____</i> | <i>11</i> |
| <i>Figure 7: Impact de la mise en place des retenues sur le bassin de l'Autize sur le piézomètre du Grand-Nati __</i> | <i>11</i> |
| <i>Figure 8: Comparaison des débits de l'Autize entre le modèle calé et la simulation avec retenues de substitution sur un point de mesure fictif en bordure du Marais _____</i> | <i>12</i> |
| <i>Figure 9: Evolution de la concentration en chlorophylle-a sur les 50 premier cm des réserves d'Oulmes Sud et Nord de juin à septembre 2022 à partir des images Sentinel 2) _____</i> | <i>16</i> |
| <i>Figure 10: Concentration cyanobactérie sur les 50 premiers cm des réserves d'Oulmes Sud et Nord en août de 2017 à 2020 à partir des images Sentinel 2. _____</i> | <i>16</i> |
| <i>Figure 11: Evolution des concentrations en chlorophylle-a et cyanobactérie sur les 50 premiers cm des réserves d'Oulmes Sud et Nord entre 2018 et 2022 à partir des images Sentinel 2. _____</i> | <i>17</i> |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----------|
| <i>Tableau 1: Volumes prélevables pour respecter les objectifs du SDAGE 2010-2015 _____</i> | <i>7</i> |
| <i>Tableau 2 : Qualité des eaux aux points de pompages projeté _____</i> | <i>13</i> |
| <i>Tableau 3: Paramètre de qualité de l'eau mesuré, formules mobilisant les différentes bandes spectrales et résultats statistiques des validations. _____</i> | <i>16</i> |

1. Diagraphies par imageries au site H+ de Poitiers



- Fracture ouverte
- Fissure - Fracture
- Schistosité
- Filons - Veines
- Stratification
- Fracture avec remplissage
- Structure indéterminée

Figure 1: Diagraphies par imagerie formation du Bathonien/Bajocien au site H+ de Poitiers (Source : Site H+, Poitiers).

2. Perte dans le lit de la Smagne

Une perte dans le lit de la Smagne, située en amont d'une chaussée (la retenue de Mainclaye), se serait mis en place le 8 juillet 1986, jusqu'à ce que la perte soit colmatée avec de l'argile compacté l'aven a absorbé l'entièreté du volume retenu par le barrage et ensuite du débit de la Smagne. Le phénomène a pu également être observé par une nette remontée du niveau piézométrique du captage AEP du Chatelard situé à 1600 m. à l'Est, alors que la tendance aurait dû être à la baisse pour cette saison (Roy, 1987). Pour essayer d'expliquer ce phénomène, un forage de reconnaissance a été réalisé sur la rive droite, à 25m de la perte, celui-ci a montré que le niveau de la nappe du Lias inférieur se maintenait à plus de 10 en dessous de la côte du lit pendant la période d'irrigation (Ibid). C. Roy explique que la faible couverture argileuse du fond du lit a cédé par l'action conjuguée de la charge que représentait la retenue, de l'important rabattement de la nappe et de la fracturation des calcaires (1987).

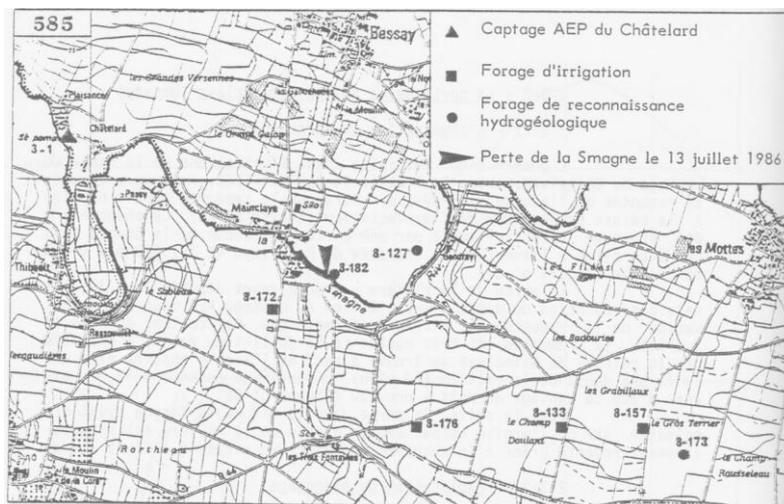


Figure 2: Localisation des forages et de la perte de la Smagne. Communes de Bessay et de St Jean-de-Beugné – Echelle 1/25000^{ème} (Roy, 1987).

Dès l'arrêt des pompes dans la région des Mottes au S-E, le niveau piézométrique est remonté pour venir s'équilibrer avec le niveau de la Smagne, ainsi on observe une relation relativement directe entre la perte dans le lit de la Smagne, le captage AEP rive droite et les captages pour l'irrigation via une zone fracturée de direction NW-SE. Un essai de pompage a été réalisé en dehors des périodes d'irrigation sur deux forages agricoles au S-E (585-8-133 et 585-8-157), on remarque que c'est selon l'axe de fracturation NW-SE que s'organisent les rabattements observés, ainsi l'ouvrage le plus proche, situé quelque centaine de mètres plus au Nord (8-127) n'accuse aucune baisse alors que l'on observe une baisse de 35 cm sur le forage (8-182) après 400 mn de pompage (Roy, 1987). Les chroniques piézométriques des deux forages (8-133 et 8-182) sont très précisément corrélées, ce qui confirme la présence d'un conduit karstique via lequel les transferts de pressions se font de manière instantanée, des essais de lâcher de barrage provoquent également des variations piézométriques similaires entre les deux forages pourtant disant de 1.5 km (Roy, 1987).

Ainsi, bien qu'il soit situé à 3.500 mètres, un groupe de forage a pu interférer avec un captage AEP par l'intermédiaire d'un axe faillé et drainant de direction NW-SE, et l'exploitation des eaux souterraines en période d'étiage a pu créer une dépression piézométrique à même de provoquer l'ouverture d'un aven (Roy, 1987).

3. Estimations des volumes prélevables

3.1. CACG

Le bureau d'étude de la Compagnie d'aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG) a calculé des volumes prélevables en soustrayant à des chroniques de débits naturels non influencés reconstitués, les prélèvements qu'il était possible de réaliser jusqu'à atteindre le DOE. Les résultats obtenus pour le bassin des Autizes, pour lequel il n'existe pas de soutien de débit artificiel, sont de l'ordre de 0,4 M.m³ en année quinquennale sèche et 0,6 M.m³ en année médiane, pour un DOE de 150 l/s (CACG, 2002). Un objectif moins ambitieux de 100 à 50 l/s pourrait au mieux doubler ces volumes prélevables selon les auteurs (CACG, 2002).

3.2. Calligée

Le bureau d'étude Calligée a produit une expertise sur les objectifs du projet de SDAGE de la ressource en eau sur la bordure nord du Marais Poitevin vendéen, pour le compte du conseil général de la Vendée (Mondain, 2008). La méthode proposée pour estimer les volumes prélevables repose sur le principe de la cote d'équilibre qui s'établit temporairement au printemps et s'observe sur les chroniques piézométriques des années 1990 à 2005. Elle correspond au niveau d'équilibre entre la nappe et le marais, au-delà de laquelle une rupture nette est observée systématiquement au début de la période d'irrigation à partir du 1^{er} juin. Mondain (2008) déduit qu'en l'absence de précipitation, la nappe du Dogger se comporte comme un réservoir, et il devrait exister une relation linéaire entre les volumes pompés et la baisse de niveau de la nappe à partir de début juin.

Assumer une relation linéaire entre ces deux facteurs permet de déterminer un volume spécifique exploité par mètre de rabattement de la nappe. Ainsi, grâce à la connaissance des volumes prélevés par quinzaine, le bureau d'étude a pu calculer des volumes spécifiques par mètre de rabattement sur des années de références peu influencées par des précipitations estivales (2000, 2003, 2005 et 2006) sur les secteurs du Sud-Vendée.

Calligée obtient des volumes exploitables en été 4 années sur 5, de l'ordre de 3,4 M.m³ pour un niveau piézométrique de crise de 2,5 m. NGF à Oulmes, et de 2,25 M.m³ pour un niveau piézométrique de crise de 1,6 m. NGF à Benet (Aziré). Ces volumes prélevables sont donc entre 3.6 et 5.6 fois plus importants que ceux estimés par la CACG avec d'autres critères.

3.3. BRGM TEMPO

Afin de mettre en évidence des paliers, de définir des indicateurs de gestions de niveaux piézométriques pour les eaux souterraines de la plaine vendéenne au Nord du Marais Poitevin en période d'étiage, et d'avancer des ordres de grandeurs de volumes prélevables, le BRGM a analysé les chroniques piézométriques et hydrométriques disponibles sur base du logiciel TEMPO (Rouxel et al., 2007), (Bichot et Pinault, 2007) et (Bichot, 2007). Les auteurs ont pu modéliser des fonctions de transferts entre les niveaux piézométriques représentatifs de l'état de la recharge de la nappe, les débits du cours d'eau et les conditions météorologiques.

Comme illustré sur la figure ci-dessous, pour la même période de retour des précipitations, le modèle estime le volume disponible en intégrant l'écart entre la courbe des débits observés (3), et la courbe pseudo-naturelle modélisée (1) jusqu'à atteindre la courbe théorique d'évolution vers le débit objectif d'étiage (2). Ainsi le calcul des volumes disponibles d'avril à août a été réalisé pour différentes périodes de retour et différents débits objectif d'étiage.

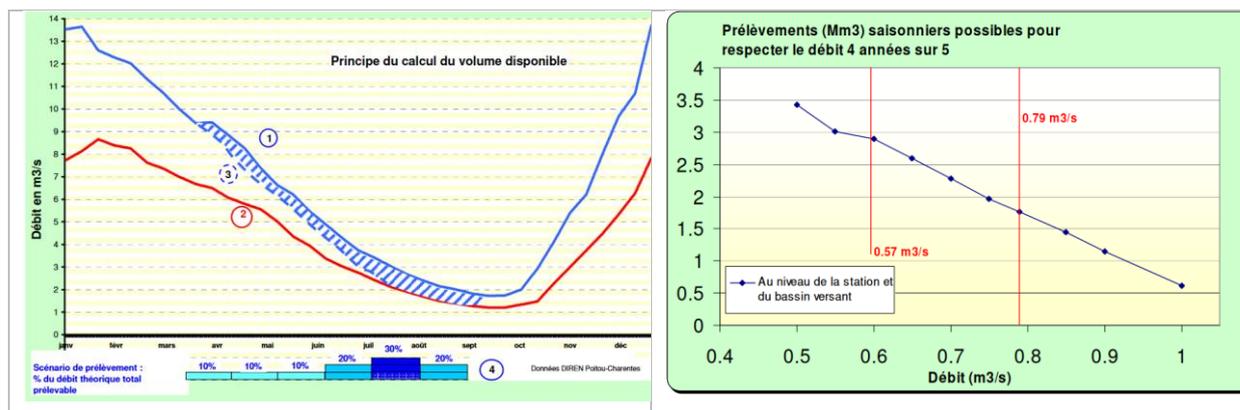


Figure 27: Principe du calcul du volume disponible avec TEMPO (Bichot et Pinault, 2007)

Le calcul donne une courbe proche d'une droite qu'on peut visualiser sur la figure ci-dessus à droite, elle donne une idée de l'influence du choix des débits objectifs d'étiage sur les volumes disponibles.

Au niveau des débits de l'Autize enregistré à St-Hilaire-des-Loges, le QMNA5 non influencé que le modèle restitue pour une période de retour 5 ans sec, est de l'ordre de 0.25 m³/s. Avec un objectif de débit d'étiage fixé à 0.25 m³/s, le logiciel restitue un volume prélevable de 1M.m³ en année médiane (une sur deux) sur l'ensemble du bassin versant amont de la station de St-Hilaire. C'est un chiffre que les auteurs proposent de doubler pour être transposé à l'entièreté du bassin versant de l'Autize. Le volume descend à 0 en année quinquennale sèche.

3.4. Groupe d'expert

C'est le manque de cohérence entre les directions prises par les différentes CLE (Commission Locale de l'Eau) des trois SAGE qui a poussé les services de l'Etat des deux régions et des trois départements ainsi que le cabinet du ministère de l'écologie et du développement durable, à commander un travail d'expertise en 2007. Il s'agissait d'apprécier le contenu des SAGEs au regard des objectifs qui étaient de retrouver des fréquences et des durées d'assecs qui permettent le bon état des écosystèmes des zones humides, pallier au phénomène d'inversion des flux entre nappes et marais par endroit ainsi qu'au tarissement des sources de débordements.

La CLE du SAGE de la Sèvre Niortaise et du Marais Poitevin (SNMP) s'était jusque-là donné comme principe de gérer les nappes aquifères afin que les cotes piézométriques soient toujours supérieures aux cotes des eaux superficielles des fossés et des cours d'eau au niveau des points de contact entre nappes et marais (Groupe d'expert, 2007).

Selon les experts, cela impliquerait que les niveaux piézométriques objectifs de crise et de fin d'étiage soient fixés à des niveaux supérieurs ou égaux aux niveaux objectifs d'étiage et de crise des zones nodales les plus proches. Cela leur semble irréalisable, car cela impliquerait des volumes prélevables très faibles et donc une baisse des prélèvements trop importante, avec une réduction drastique de l'irrigation. Ainsi, afin de réduire, à minima, la fréquence et l'ampleur des flux d'eau du marais vers la nappe, selon le groupe d'expert, il est nécessaire que les niveaux piézométriques objectifs soient les plus proches possible des niveaux objectifs aux points nodaux. Le groupe rappelle également à ce sujet, que les niveaux d'eau dans le marais s'effondrent réellement uniquement lorsque la baisse des niveaux piézométrique est d'une durée et d'une ampleur suffisante (Groupe d'expert, 2007).

Le groupe d'expert (2007) a classé en trois classes les piézomètres présents sur le Marais Poitevin et les bassins qui l'alimentent :

- 1 : les piézomètres situés directement à proximité du marais, pour lesquels il a jugé pertinent d'établir une piézométrie objective de début et de fin d'étiage (POE), car on y observe un phénomène de palier au début de l'été qui correspond à l'équilibre qui se met en place entre le

niveau des eaux superficielles et la nappe et se maintient tout le long de l'été en l'absence de prélèvement

- 2 : les piézomètres qui sont situés proche d'un affluent du marais, et présentent une dynamique proche des premiers, avec un niveau d'équilibre autour duquel se définit si c'est la nappe qui alimente et soutient le cours d'eau ou l'inverse, qui se maintient en l'absence de prélèvement, pour lesquels il a également été jugé pertinent d'établir une PO de début et fin d'étiage
- 3 : les piézomètres qui sont situés en amont des bassins versants, sur lesquels ne sont pas observés les phénomènes de palier au début de la période estivale, la fixation d'une POE n'est pas souhaitable dans la mesure où ils semblent peu influencés par les prélèvements, ils représentent cependant des bons indicateurs de l'état de la recharge et pourraient être utilisés en gestion de crise

Pour le secteur des Autizes le groupe d'expert a résumé la dynamique réellement observée et celle restituée par la courbe pseudo-naturelle donnée par le modèle TEMPO du BRGM (sans l'influence des prélèvements agricoles), des piézomètres d'Aziré (Benet) et du Grand Nati (Oulmes), afin de proposer des valeurs pour fixer les niveaux piézométriques d'étiage.

| Piézomètres | Palier fin printemps (m. NGF) | Cote moyenne estivale (2000-2005) (m. NGF) | Cote pseudo naturelle TEMPO estivale (m. NGF) | POEd (m. NGF) | POEf (m. NGF) | PCR (m. NGF) |
|---------------------|-------------------------------|--|---|---------------|---------------|--------------|
| Aziré (Benet) | 2,4 | 1,2 | 2,4 | 2,4 | 1,9 | 1,6 |
| Grand Nati (Oulmes) | 5 | 2,4 | 4,2 | 4,6 | 3 | 2,5 |

Tableau 11 : Niveau piézométrique objectif pour les Autizes (Groupe d'expert, 2007).

Sur base de ces niveaux, le groupe d'expert a proposé un ordre de grandeur de volume prélevable en attendant les résultats d'un modèle maillé. Le calcul consiste à appliquer un coefficient de réduction aux prélèvements d'une année proche d'une quinquennale sèche.

Ainsi, pour les Autizes, le volume prélevé en 2003 de 5.51 M.m³ a provoqué un rabattement de nappe de l'ordre -3,4 m (Grand-Nati) et -2 m (Aziré). Pour que le rabattement ne dépasse pas la POEf, il aurait fallu limiter la baisse de niveau piézométrique à -1,2 m (35% de -3,4) au Grand-Nati et -0,6 m (30% de 2) à Aziré. C'est donc un coefficient de réduction moyen de 32% qui est appliqué au volume prélevé en 2003, afin d'atteindre la cote de piézométrie de fin d'étiage, pour arriver à un volume prélevable de l'ordre de 1.76 M.m³ pour le bassin versant des Autizes.

3.5. BRGM Modélisation Marthe

Les objectifs et les seuils réglementaires définis par le groupe d'expert ont été repris dans le projet de SDAGE Loire Bretagne (2010-2015). La DIREN Poitou Charentes et l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne ont demandé au BRGM de réaliser une étude par modélisation afin de donner des estimations de l'apport des nappes au marais, et des éléments afin de quantifier les volumes « prélevables » au regard des objectifs et des seuils réglementaires défini par le SDAGE Loire Bretagne.

Le modèle « Marais Poitevin » a été construit pour couvrir la totalité des bassins versants qui alimentent le Marais, les mailles font 1 km de côté mais sont subdivisées en 9 (333m de côté) à la périphérie du Marais, afin de mieux représenter les relations nappes-rivières ainsi que les prélèvements, notamment sur la zone de contact entre le Dogger et le bri¹. C'est le code MARTHE (Modélisation d'Aquifères par

¹ Comme l'ont soulevé les deux ingénieurs mandatés par les ministres de l'agriculture et du développement durable en 2018, un manque de ce modèle est de ne prendre en compte que l'apport des nappes au marais par l'intermédiaire des cours d'eau, et pas l'ensemble des points de débordements plus diffus ((Ayphassorho (CGEDD) et Renoult (CGAER)).

un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements), qui est utilisé pour la modélisation, sur base de la méthode aux différences finies.

Globalement le modèle retranscrit en moyenne 86% l'atteinte ou non des seuils POEd, POEf, et PCR. Selon Olivier Douez, (2010), le modèle permet donc d'obtenir des réponses satisfaisantes aux regards des objectifs de gestions fixés, tant en termes de niveaux que de dates.

Sur la figure 15 ci-dessous on retrouve les volumes proposés par les auteurs pour respecter 4 années sur 5 les objectifs inscrit dans le SDAGE, notamment pour garantir l'alimentation du marais et le maintien des niveau objectifs de niveaux dans les canaux au 15 juillet (les volumes sont donnés à +/- 10 % près, pour tenir compte des sources d'incertitudes).

| Piézomètres | POEd m. NGF | POEf m. NGF | PCR m. NGF | Zone de gestion | Volume printemps Mm ³ | Volume été Mm ³ | Volume total Mm ³ |
|-------------|----------------|----------------|---------------|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Azéré | 2.3 | 1,90 | 1.6 | Autize | 0,30 | 2,00 | 2.3 |
| Grand-Nati | 4.6 | 3,00 | 2,50 | | | | |

Tableau 1: Volumes prélevables pour respecter les objectifs du SDAGE 2010-2015 (Duez et al., 2010).

Une dernière étude (Compère et al., 2020), a été réalisée à la demande de l'EPMP, et à la suite de l'annulation en 2019 par le tribunal de Poitiers de l'AUP (de 2016). Elle s'est basée sur un nouveau schéma de répartition des prélèvements pour l'irrigation, afin d'estimer un volume prélevable estival qui permette de respecter les objectifs piézométriques sur quatre unités de gestion dont celle de l'Autize sédimentaire.

La nouvelle configuration prend en compte l'évolution des prélèvements agricoles, avec notamment la substitution, une nouvelle répartition des volumes de prélèvement et pour le piézomètre du Grand-Nati un niveau objectif de fin d'été (POEf) fixé à 3,2 m. NGF. Pour le secteur des Autizes la nouvelle répartition implique principalement la fermeture de deux forages à proximité direct du piézomètre du Grand-Nati ce qui a permis de modéliser un respect suffisant de la POEf pour un volume inchangé.

Pour respecter une valeur de 3.2 m. NGF 9 années sur 12, un volume prélevable printemps/été entre 2,36 M. m³ et 2.89 M. m³ est estimé, et entre 2.1 M. m³ et 2,62 M. m³ pour un respect 10 années sur 12 (Compère et al., 2020).

4. Protocole de gestion des Autizes (2016)

Selon le protocole, on distingue 4 temporalités :

- Avant le franchissement du seuil d'alerte, la limitation est volontaire et s'appuie sur un plan de fractionnement en période qui est notifié à chaque irriguant.
- A partir du franchissement du seuil d'alerte, les règles de limitations sont appliquées
- A partir du franchissement du seuil d'alerte renforcée, les dispositions de l'arrêt cadre sont intégrées en plus des limitations prévues
- A partir du franchissement du seuil de coupure, tous les prélèvements sont interdits y compris pour les agriculteurs connectés directement aux réserves

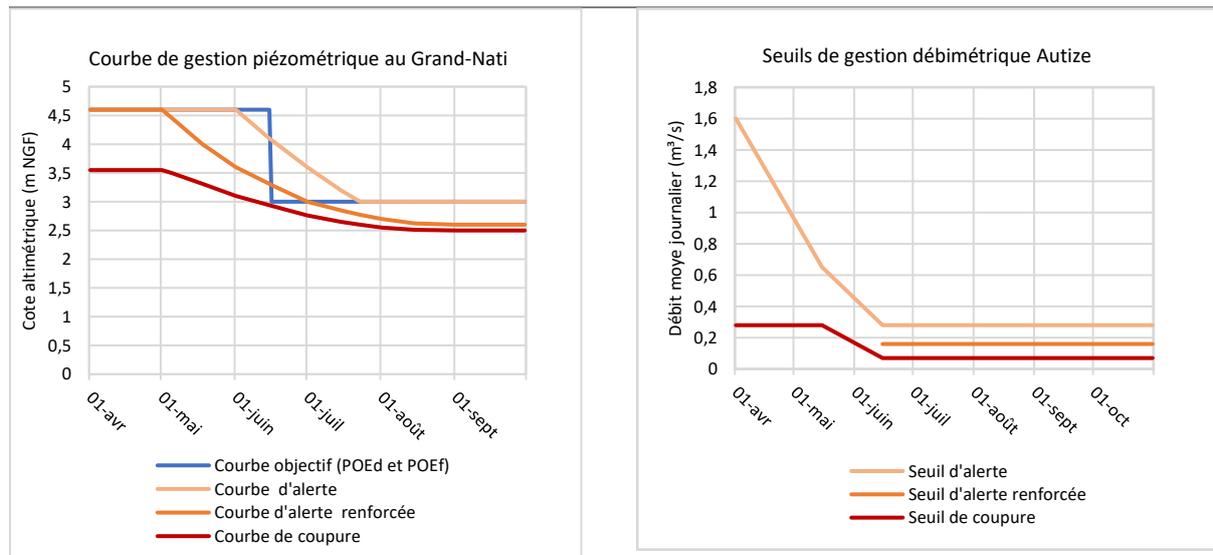


Figure 3 : Protocole de gestion des Autizes (EPMP 2016).

Au printemps, l'indicateur à respecter entre le 1^{er} avril et le 15 juin, est le POEd (4.6 m NGF au piézomètre du Grand Nati à Oulmes). Si le niveau piézométrique passe en dessous du POEd avant le 1^{er} mai, les prélèvements sont limités à 15% du volume total prélevable (6.6 Mm³).

La répartition du volume de printemps entre irrigant n'est pas pré-établie. Un relevé obligatoire est imposé le 1^{er} juin, pour estimer la part des volumes consommés au printemps et déterminer les volumes restant disponibles pour les quinze jours à venir.

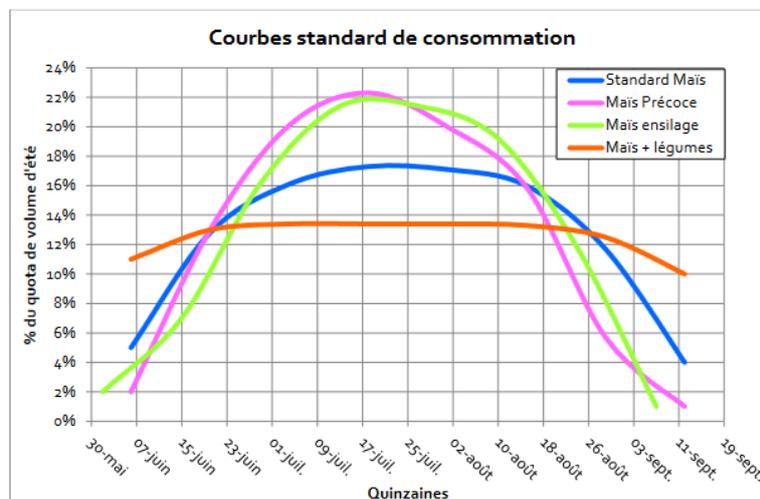


Figure 4: Courbe standard de consommation (Protocole 2016 de gestion des Autizes, EPMP).

En été, à partir du 1^{er} juin la consommation est définie à partir d'une courbe standard qui est modulée par grand type de cultures (maïs précocé, maïs tardif ensilage, standard maïs, maïs + légumes), chaque préleveur choisit sa courbe. Celles-ci sont définies au printemps, en fonction des dates de semis observées, et peuvent évoluer en fonction de la météo.

Ainsi, en été :

- si l'on passe sous la courbe d'alerte, le volume prélevé ne peut dépasser celui indiqué par la courbe standard choisie et une limitation jusqu'à 40% du volume peut être appliquée.

-si l'on passe sous la courbe d'alerte renforcée une restriction de minimum 40% est appliquée.

-si l'on passe sous la courbe de coupure, aucun prélèvement n'est possible sauf dérogation

Le calcul des volumes alloués en cas de réduction se fait par :

$$V = (V_{\text{annuel}} - V_{\text{printemps}}) * \% \text{ courbe} * (1 - \% \text{ restriction})$$

5. Détails techniques des réserves de substitution

Comme illustré sur la figure ci-dessus, les réserves sont entourées d'une digue périphérique composée par les remblais compactés issus de la fraction utilisable des matériaux provenant du terrassement de la cuvette ou zone centrale. Au niveau des premiers horizons du sol, on retrouve les calcaires de dimensions variables sous une couverture limono-argileuse assez peu épaisse en plaine (0.2m) et plus importante en fond de vallées (3 à 4m), après 1 à 3 m. d'horizon supérieur on retrouve ensuite un calcaire massif qui nécessite des moyens plus lourds pour être extraits (CACG, 2005).

Les réserves sont toutes bâchées par une géomembrane en EPDM pour assurer l'étanchéité du fond et des parois latérales de la réserve, à l'exception du site de Damvix, pour lequel les remblais compactés composée en grande partie d'argiles ont pu assurer une étanchéité (CACG, 2005). Les crêtes des digues ont une largeur de 3m afin de pouvoir faire circuler un engin, et 50 cm sont nécessaires au repli de la membrane afin d'assurer son ancrage. Une certaine pente intérieure et extérieure est nécessaire pour assurer la tenue des talus, qui dépend de la proportion de matériaux fin du volume total utilisé (CACG, 2005).

Plusieurs mesures techniques sont également nécessaires afin de limiter les risques liés aux effets des sous-pressions liées aux remontées de la nappe. Ainsi, une couche de transition est installée entre le contact entre la sous-face de la membrane et de la fondation, dans laquelle est mis en place un réseau de drainage reliés par des collecteurs périphériques, ou si ce n'est pas possible un clapet de décharge est mis en place au sein même de la retenue (CACG, 2005). Ces volumes drainés à partir de la nappe affleurante sont ensuite collectés et alimentent les réserves.

Des ouvrages annexes sont également nécessaires notamment pour assurer la vidange en cas d'incident, de façon à rapidement abaisser le niveau du plan d'eau et vidanger vers le cours d'eau à travers un fossé d'évacuation, mais également une canalisation de trop-plein pour éviter des débordements (vidange totale en 9 jours) ainsi qu'un système de vannes pour assurer les fonctions de distribution et de remplissage (CACG, 2005).

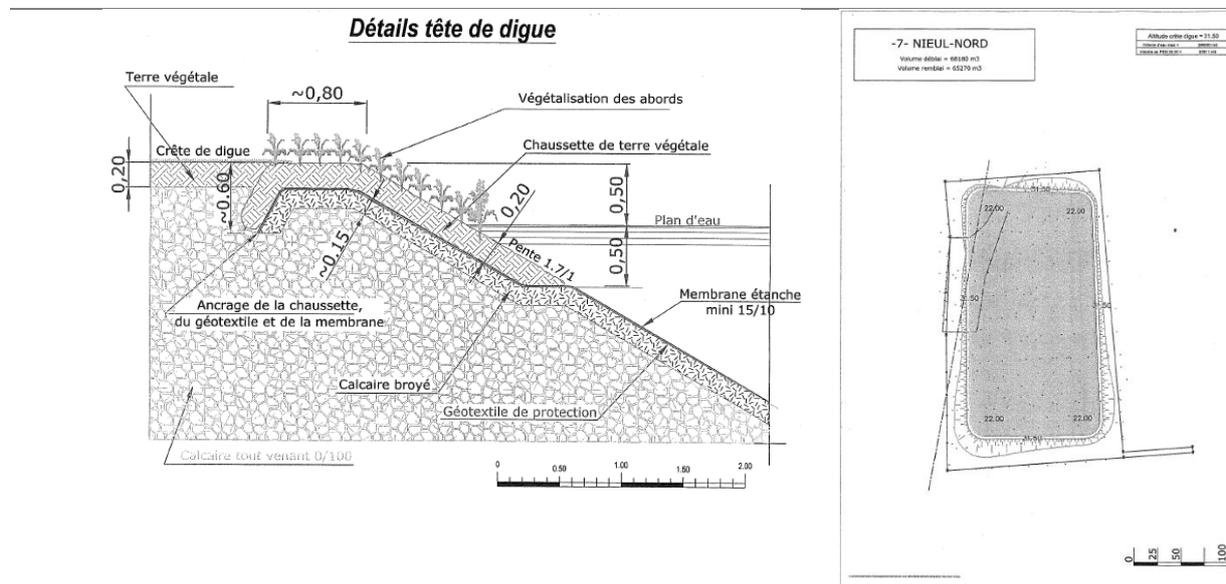


Figure 5 : Détails technique des réserves de substitution (CACG, 2005).

6. Etudes d'impact BRGM (2010)

En ce qui concerne l'impact de la substitution sur la nappe du Dogger, ce sont les résultats du modèle pour janvier 2005 qui sont présentés. Les auteurs précisent que l'impact est faible globalement sur la nappe du Dogger. Sur la figure ci-dessus, les niveaux piézométriques modélisés avec et sans pompages sont représentés. On observe un recul de l'ordre d'un kilomètre entre l'isopiez 15 m. NGF de la piézométrie simulant les prélèvements hivernaux de substitution (en bleu sur la carte) et celle sans prélèvements (en gris). En dehors de ce point, on observe peu de variation pour ce mois de janvier 2005 en valeur moyenne mensuelle.

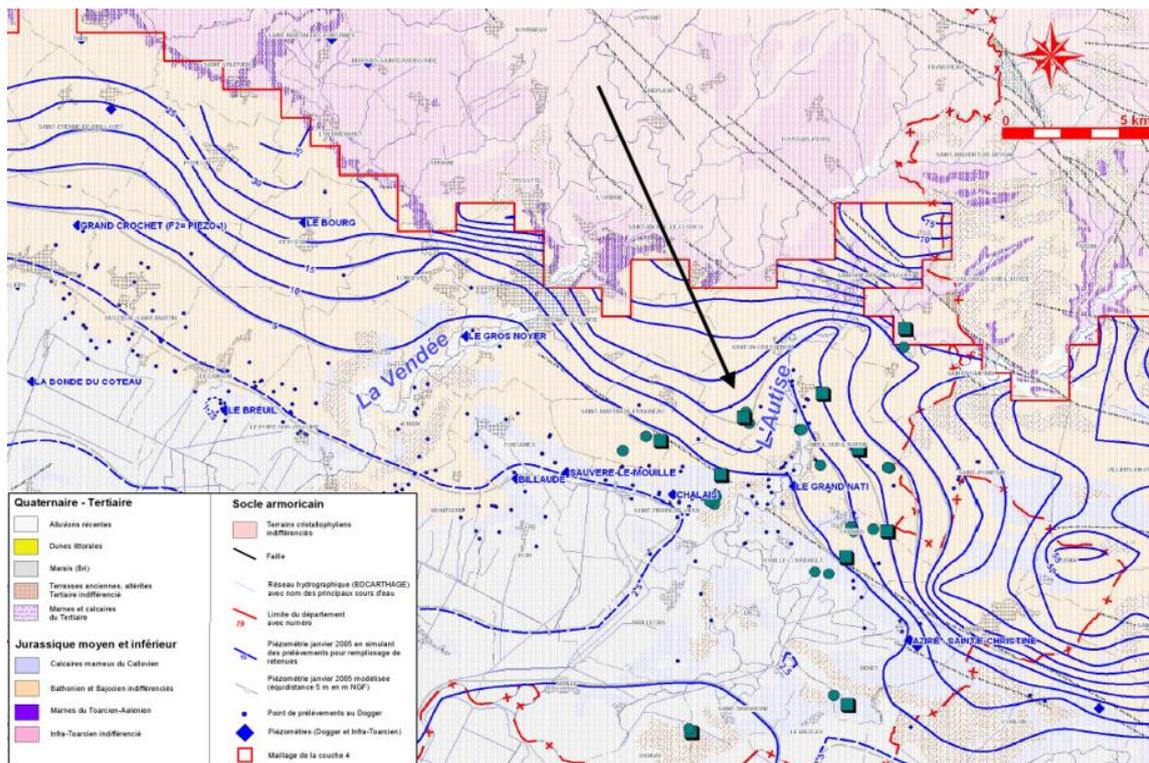


Figure 6: Comparaison des niveaux piézométriques de la nappe du Dogger de janvier 2005 restitués par le modèle avec et sans pompage hivernaux pour le remplissage de retenues de substitution (Domez et al., 2010)

Les résultats avec retenues sont comparés avec les résultats du calage modélisé (par rapport aux observations réelles le modèle a du mal à reproduire les variations dans la totalité de leurs amplitudes et surtout pour les niveaux hauts).

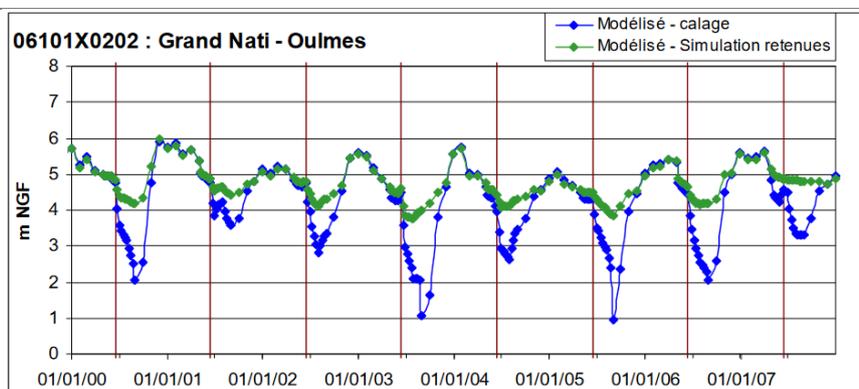


Figure 7: Impact de la mise en place des retenues sur le bassin de l'Autize sur le piézomètre du Grand-Nati (Domez et al., 2010)

Les auteurs ont également estimé l'impact de la substitution sur le débit de l'Autize modélisé sur un point de mesure fictif sur son cours en bordure du marais, les simulations présentent des résultats de l'ordre d'une augmentation de 50 à 100 l/s pour la période estivale par rapport aux résultats du calage. Les auteurs précisent que par un rapide calcul on comprend que les prélèvements hivernaux qui concernent directement l'Autize ont des impacts négligeables sur le débit, de l'ordre de 300 000 m³ et de 30 l/s (Douez et al., 2010).

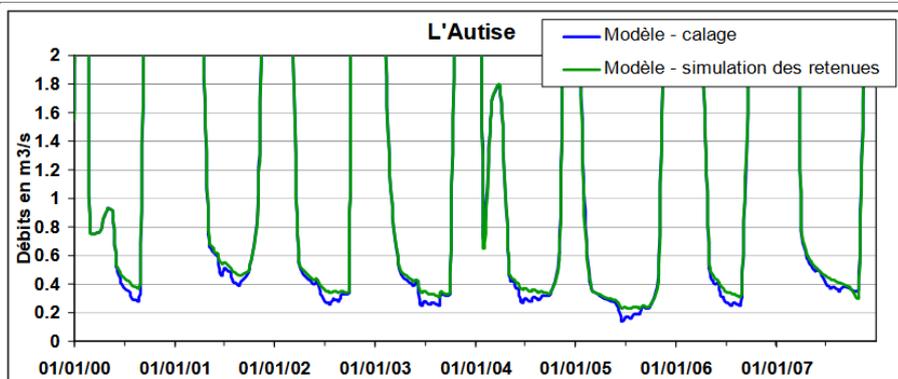


Figure 8: Comparaison des débits de l'Autize entre le modèle calé et la simulation avec retenues de substitution sur un point fictif en bordure du Marais (Douez et al., 2010)

La réserve de Nieul Nord est remplie par deux pompes, une prélevant en eau de surface et une autre en eau souterraine, sans connaître la répartition des volumes pompés entre les deux, nous pouvons arbitrairement prendre la moitié, soit 160000 m³ de volume utile. Ainsi, il faut maintenir un débit de 28 l/s pendant 1600 heures (66 jours et 16h), pour remplir la réserve de Nieul Nord à moitié avec des eaux de surfaces au débit de pompage autorisé (100 m³/h soit 28 l/s). Si l'on tient pour acquis que la réserve de St-Hilaire (174000 m³) est remplie avec un débit autorisé équivalent (entre 80 à 130 m³/h), le débit est certainement de l'ordre de (28x2) soit 60 l/s.

Même cumulé, ces débits restent négligeables au vu du débit moyen mensuel de l'Autize sur la période de hautes eaux. Néanmoins, lors de l'étiage 2022, le débit de l'Autize est resté en dessous du seuil de remplissage de 0.45 m³/s entre le 08/05 et 17/11.

7. Qualité des eaux au sein des réserves de substitution

Des proliférations algales ont pu être observées au sein de certaines réserves depuis plusieurs années, cela s'ajoute au problème de développement de biofilms à l'intérieur des réseaux de distribution et d'irrigation, ce qui est problématique pour les irrigants car cela limite la pression (CONSULT'EAU, 2018).

7.1. Anticipation dans l'étude d'impact de la CACG (2005)

Le mode de raisonnement explicité dans l'étude d'impact des projets de substitutions des Autizes, est d'analyser la qualité des eaux utilisées pour le remplissage afin d'estimer la qualité probable des eaux stockées. Ainsi, selon les auteurs, les effets sur la qualité des eaux restituées par les réserves dépendent premièrement de la qualité des eaux stockées. C'est la concentration en éléments nutritifs et tout particulièrement le phosphore qui déterminerait le niveau trophique d'une réserve, le temps de séjour est un facteur pondérant de cette concentration (CACG, 2005). Les auteurs ont repris les résultats des analyses en eaux de surface réalisées par le Conseil Général de Vendée, dans le périmètre du projet, le facteur déclassant est systématiquement la concentration en nitrate, et celle-ci augmente à mesure que l'on se rapproche du marais.

Les résultats des analyses complémentaires effectuées au point des prélèvements prévu, sont présentés ci-dessous, ils montrent, selon les auteurs « une bonne qualité générale hors les nitrates, une absence de pollution par les produits phytosanitaires usuels » (CACG, 2005, p. 17). Les eaux de la nappe sont assez similaires au niveau des paramètres considérés.

| Secteur | Autize amont | Le Mauvais | Canal de Reth |
|----------------------|--------------|------------|---------------|
| Date prélèvement | 10/03/2005 | 10/03/03 | 10/03/03 |
| NO ₃ mg/l | 24.80 | 27.30 | 26.5 |
| Ptot mg/l | < 0.05 | < 0.05 | < 0.05 |

Tableau 2 : Qualité des eaux aux points de pompages projetés (CACG, 2005).

Les auteurs concluent que le niveau trophique anticipé pour le projet ne correspondra pas à un développement excessif de peuplement d'algues phytoplanctoniques susceptible de produire des toxines, car les taux de phosphores sont faibles (de 0.05 à 0.2 mg/l) et l'eau devrait être renouvelée presque entièrement chaque année (CACG, 2005). Ce sont ces éléments qui permettent de classer le niveau trophique des eaux des réserves concernées comme mésotrophe à eutrophe.

Toujours selon les auteurs, cela impliquerait un développement non excessif de peuplement planctonique, qui se forment en plusieurs vagues successives annuelles, avec des cycles de croissance et de déclin. Ces cycles contribueraient à la différenciation verticale des conditions physico-chimiques dans la colonne d'eau au printemps et en été. La tranche superficielle de l'eau, dans laquelle domineraient des mécanismes chlorophylliens par lesquels les éléments nutritifs seraient absorbés, et la tranche d'eau plus profonde, où domineraient des mécanismes trophiques de décomposition bactérienne qui mèneraient à une situation d'anoxie au cours de l'été à la suite de la consommation de l'oxygène dissous (sans être contrebalancée par sa production via des métabolismes photosynthétiques ; CACG, 2005).

Ainsi la qualité des eaux stockées pourrait varier verticalement, parallèlement à la stratification thermique, avec des eaux en surfaces de meilleure qualité physico-chimique que les eaux profondes (CACG, 2005).

Selon les auteurs, le risque de toxicité potentiel peut être écarté notamment car :

-il est peu probable d'observer un développement de cyanophycées, dans la mesure où les eaux des réserves ne seraient pas caractéristiques de leur condition de développement à savoir des eaux hyper-eutrophes ou dystrophes avec une carence du milieu en azote

-la production de toxine par ses algues n'est pas systémique

-un contact direct ou une ingestion n'est pas envisageable dans la mesure où les réserves sont clôturées et interdites d'accès

7.2. Expertise 2018

Un expert a été mandaté en 2018 par la CACG, pour comprendre le phénomène de développement algales au sein de certaines retenues, identifier des leviers de gestions, les pistes de solutions adaptées et proposer un suivi pour anticiper ces phénomènes, mais également évaluer l'efficacité d'un curage de l'épais dépôt de sédiments qui s'est formé.

L'analyse de l'auteur se focalise sur les retenues d'Oulmes nord, de Saint-Pierre le Vieux et de Pouillé. Il résume la situation pour les retenues ainsi : la qualité se dégrade avec le stockage, car le pH augmente à la fois par effet d'eutrophisation et par dégazage du CO₂, avec l'évaporation le phosphore se concentre, et les algues prolifèrent. Ainsi l'eau des retenues, à la suite de son stockage, acquiert les caractéristiques d'une eau superficielle eutrophe (CONSULT'EAU, 2018).

Le fond des retenues d'Oulmes et de Saint-Pierre-le-Vieux est recouvert de sédiment verdâtre d'environ 10 cm d'épaisseur que l'expert qualifie de faiblement organique et tapissé de résidus secs de thalles de *Chara major*. C'est une algue de la famille de *Charophycées*, qui a également été observée sur les crépines de la réserve de Saint-Pierre, elle est indicatrice d'eau stagnantes à dureté élevée, fortement éclairée. Cette algue peut développer des thalles de plus de 100 cm, qu'elle va calcifier par bio-minéralisation, ce qui entraîne des débris relativement « cassants » (CONSULT'EAU, 2018).

L'auteur synthétise les conditions qui amènent à la prolifération (efflorescence ou bloom) des algues qu'on retrouve de base dans toutes les masses d'eau. Il faut une conjonction de facteurs abiotiques, comme un ensoleillement important, une colonne d'eau stable, une montée de la température (>15°C) et particulièrement un enrichissement de l'eau par les facteurs limitant que sont l'azote et le phosphore (>30µg/l) (CONSULT'EAU, 2018).

L'eutrophisation dans ces réserves se résume en trois étapes. La prolifération des algues entraîne une fluctuation du pH lié à la consommation en journée du gaz carbonique, et une fois leur cycle de vie achevé elles vont constituer une boue formée de lysat, riche en matière organique. L'auteur précise également que des germes saprophytes peuvent proliférer dans la boue en consommant beaucoup d'oxygène (CONSULT'EAU, 2018). La matière organique contenue dans la boue est minéralisée et au printemps suivant l'azote et le phosphore recyclé va s'ajouter aux concentrations apportées par la ressource, ainsi le processus d'eutrophisation est irréversible et va légèrement croître et s'intensifier petit à petit chaque année. Seul un curage est à même de ralentir le phénomène, en limitant le relargage de flux eutrophe, selon l'auteur (Ibid).

Un traitement chimique a déjà été réalisé, qui donnait des effets positifs seulement quelque temps, un traitement biologique à l'intérieur des canalisations a également été mis en place en 2018, avec des résultats « peu probants » (CONSULT'EAU, 2018).

Sur base des moyennes des résultats de quatre captages AEP du secteur, la ressource en eau pompée dans le milieu est qualifiée de riche en phosphore total (70µg/l en moyenne), en organophosphates (200µg/l en moyenne) et en nitrates (>33mg/l), avec un fort risque d'eutrophisation selon l'expert car le rapport N/P est déséquilibré (>480). Cependant le rapport N/P s'est amélioré entre les eaux captées dans le milieu et les eaux stockées justement par l'eutrophisation car les microalgues consomment largement plus d'azote que de phosphore. L'auteur précise que la qualité de la ressource, au niveau des eaux pompées peut potentiellement varier plus fortement en milieu karstifié.

Il précise que l'eau de ces retenues est verte, avec une odeur de géosmine qui traduit une eau eutrophe, avec une teneur en cyanobactéries très élevées, supérieur à 160.000 cellules par ml à Oulmes Nord, ce qui est supérieur au seuil d'alerte de l'OMS pour des eaux de consommation, mais il précise que la teneur en microcystines (cyanotoxines²) est inférieure au seuil de quantification.

Deux autres phénomènes sont également observés, l'entartrage qui est provoqué par le dépôt d'ions carbonate (de tartre) dans les canalisations et sur le fond de la membrane et la formation de Biofilm favorisée par la rugosité créée par le tartre (CONSULT'EAU, 2018). La technique que recommande

²Toxines aux effets neurotoxiques, hépatotoxiques ou dermato-toxiques produites par des cyanobactéries (ANESES, 2012).

l'expert, et qu'un irriguant utilise déjà, est l'utilisation régulière de biocide non rémanents comme le peroxyde d'hydrogène, en rappelant que son efficacité décroît avec la teneur en matière organique et que sont coûts soit élevé. Le plus efficace restant de traiter la source du problème en contrôlant les proliférations algales au sein des réserves.

Il souligne que le traitement des proliférations algales est complexe, car les traitements algicides sont basés sur des biocides rémanents et toxiques pour les végétaux, que les volumes à traiter sont considérables et que la réglementation sur les biocides est assez stricte. La plupart des solutions envisagées comme l'insufflation d'air, l'introduction de carpes, ou des systèmes à ultrasons ne sont pas recommandées par l'expert car elles risquent d'aggraver plus la situation que de la résoudre selon lui. Seules des options de couverture flottantes semblent envisageables comme des « shades balls », dalles PVC, liner et panneau solaire, mais présentent néanmoins une série d'inconvénients, elles peuvent notamment servir de support à la formation de bactéries, annuler l'effets des UV germicides naturels, où même augmenter la persistance des toxines produites par les cyanobactéries comme les micro-cystines (Sivonen & Jones 1999 in CONSULT'EAU, 2018).

L'auteur fait mention de plusieurs études (Chorus et Bartram 1999, Corbel et al 2014) qui ont démontré une possible bioaccumulation des cyanotoxines dans les plantes cultivées, l'irrigation avec de l'eau contenant des cyanobactéries peut donc devenir une source de contamination pour les humains à travers la consommation des produits cultivés, et ce, sans contact direct avec les eaux (CONSULT'EAU, 2018).

L'auteur précise également que en cas de contamination, l'action d'un biocide non rémanent peut abattre la concentration des germes mais pas celle des toxines, il faudrait mettre en œuvre une oxydation puissante comme une ozonation et une filtration sur charbon actif, ainsi qu'une floculation/décantation pour séparer les matières en suspensions et matières organiques.

Enfin, l'auteur préconise de renforcer la surveillance des ressources et des retenues, avec par exemple la mise en place d'une analyse avant chaque saison d'irrigation et à la mi-saison des germes problématiques et des cyanotoxines, mais aussi de mettre en œuvre un protocole d'intervention en cas d'incidents, de nettoyer les matériels et canalisations 2 fois par ans, et de couvrir les retenues pour limiter l'évaporation et conserver la qualité d'eau souterraines aux eaux stockées

7.4. Dynamiques des blooms algaux

Pour illustrer la dynamique des blooms algaux au sein des réserves de substitutions sans avoir accès à une chroniques de données mesurées in-situ, nous pouvons utiliser les images Sentinel-2 L2A. Sentinel 2 est équipé de capteur multispectral et fournit des images tous les 5 jours. Un code a été développé dans le cadre du projet PRIMA MAGO par CETAQUA, afin d'estimer des paramètres de qualité de l'eau à partir de l'absorption et la réflexion de la lumière solaire par les composants de l'eau, selon les différentes bandes spectrales obtenue par données satellites. A titre d'exemple : la bande spectrale rouge (640-670 nm) est absorbée par le pigment d'algue chlorophylle-a, tandis que la bande verte (530-590 nm) est reflétée³.

³"MAGO-Water-Quality-Monitoring-Tool" GITHUB, <https://github.com/cetaqua/MAGO/tree/main/MAGO-Water-Quality-Monitoring-Tool>, (consulté le 02/06/23).

Tableau 3: Paramètre de qualité de l'eau mesuré, formules mobilisant les différentes bandes spectrales et résultats statistiques des validations (Source : Outil de surveillance de la qualité de l'eau MAGO, code ouvert pour le Sentinel EO Browser, développé dans le cadre du projet PRIMA MAGO).

| ID Number | Parameter measured | Formula | Parameter range | Application | Number of samples for validation | R ² | Reference |
|-----------|---|------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------------------|
| 1 | Chlorophyll a for high values > 5 mg / m ³ (Soria-Perpinyà 2021) | $19.866 \times (B05/B04)^{2.3051}$ | 5.16 – 674.70 mg m ⁻³ | Mediterranean reservoirs and lakes | 144 | 0.90 | Soria-Perpinyà et al. 2021 |
| 4 | Cyanobacteria (Phycocyanin) mg/m ³ (Soria-Perpinyà 2021) | $21.554 \times (B05/B04)^{3.4791}$ | 0.13 – 1040 mg m ³ | Mediterranean reservoirs and lakes | 138 | 0.79 | Soria-Perpinyà et al. 2021 |

Nous avons récupéré la formule 1 pour les concentrations élevées en chlorophylle-a et la formule 4 pour les concentrations en cyanobactérie toutes deux développées par Sòria-Perpinyà et al., (2021). Ces formules ont été développée pour une application aux masses d'eau intérieures de la zone méditerranéenne, et ont été calibrées et validées avec des mesures de réflectance in-situ. Les concentrations en cyanobactéries sont déduites à partir des mêmes bandes de réflectance que la chlorophylle-a.

Nous avons appliqué les codes sur différentes images de Landsat 2 pour des jours ne présentant pas de nébulosité sur le secteur, de juin à septembre 2022 et en août de 2018 à 2022, en réalisant un focus sur les réserves d'Oulmes Sud et Nord.



Figure 9: Evolution de la concentration en chlorophylle-a sur les 50 premiers cm des réserves d'Oulmes Sud et Nord de juin à septembre 2022 à partir des images Sentinel 2 (Données : Sentinel-2 L2A, Sentinel Hub, code développé par CETAQUA dans le cadre du projet PRIMA MAGO)



Figure 10: Concentration cyanobactérie sur les 50 premiers cm des réserves d'Oulmes Sud et Nord en août de 2017 à 2020 à partir des images Sentinel 2 (Données : Sentinel-2 L2A, Sentinel Hub, code développé par CETAQUA dans le cadre du projet PRIMA MAGO).

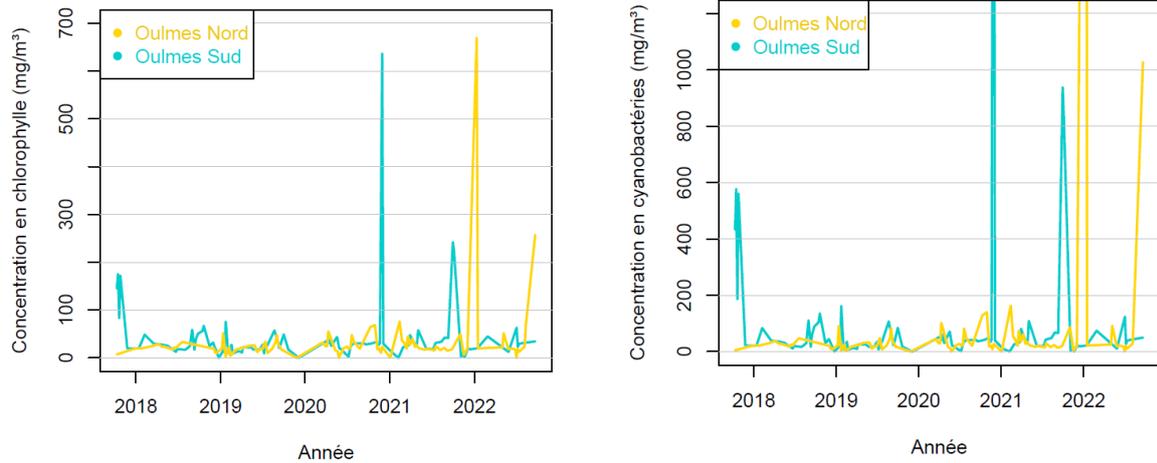


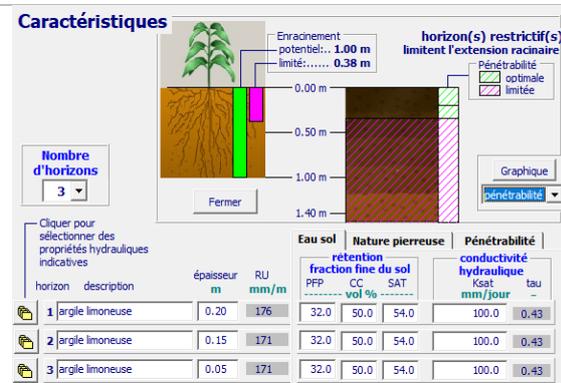
Figure 11: Evolution des concentrations en chlorophylle-a et cyanobactérie sur les 50 premiers cm des réserves d'Oulmes Sud et Nord entre 2018 et 2022 à partir des images Sentinel 2 (Données : Sentinel-2 L2A, Sentinel Hub, code développé par CETAQUA dans le cadre du projet PRIMA MAGO).

En octobre 2018, le bureau d'étude CONSULT'EAU mesurait entre 7 et 10 $\mu\text{g/l}$ (soit entre 7 et 10 mg/m^3) de chlorophylle-a au sein de la réserve d'Oulmes Nord, les concentrations obtenues par données satellites se situent, elles, plutôt autour de 30 $\mu\text{g/l}$.

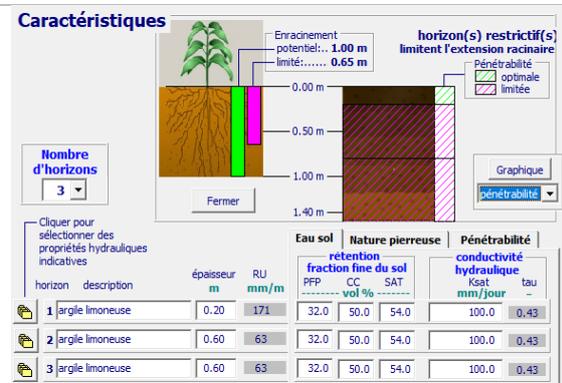
On observe une dynamique annuelle, avec des pics qui se situent globalement plutôt vers le début d'automne, ce qui correspond au période où l'on retrouve les plus faibles volumes au sein des réserves, à la fin de la période d'irrigation et avant la période de remplissage.

8. Description détaillée des profils de sols utilisés dans AquaCrop

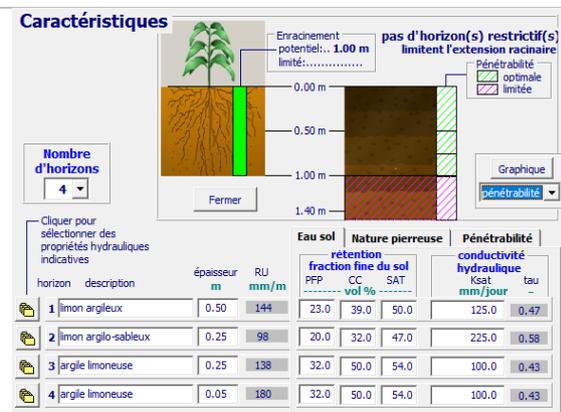
Petites Groies :



Grosses Groies :



Limons :



Marais desséché :

