

Document à accès immédiat

Utilisation du modèle hydrogéologique des calcaires du Carbonifère pour évaluer l'impact des prélèvements à l'horizon 2050

Rapport final

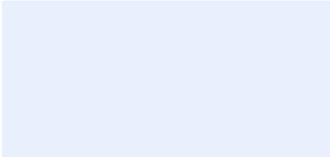
RP-69781-FR

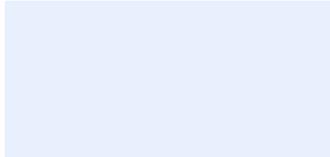
1er juin 2021

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

Géraldine PICOT-COLBEAUX, Marie ROUSSEAU, Marc PARMENTIER avec

Avec la collaboration de Mathilde GUILLAUME et
Pascal GODERNIAUX (Université de Mons)

Vérificateur :	
Nom :	Audigane P.
Fonction :	Responsable d'Unité DEPA/GDR
Date :	26/05/2021
Signature :	

Approbateur :	
Nom :	Pannet P.
Fonction :	Directeur régional
Date :	31/05/2021
Signature :	

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

Choisissez un élément.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire mis à votre disposition.

Mots clés : Modélisation hydrogéologique, Modèle maillé, MARTHE, calcaires du Carbonifère, Aquifère transfrontalier, gestion de la ressource en eau, eaux souterraines, Lille, Roubaix, Tourcoing, Mouscron, Tournai, Ath, Wallonie, Flandre, Belgique, Hauts-de-France, Nord

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

Géraldine PICOT-COLBEAUX, Marie ROUSSEAU, Marc PARMENTIER avec la collaboration de Guillaume M. et Goderniaux P. (2021) – Utilisation du modèle hydrogéologique des calcaires du Carbonifère pour évaluer l'impact des prélèvements à l'horizon 2050. Rapport final. **RP-69781-FR**, 50 p.

© BRGM, 2021, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-01/04/2021

Synthèse

Le BRGM, la DREAL Hauts-de-France et l'Agence de l'Eau Artois Picardie (AEAP) se sont associés afin de mettre en œuvre une coopération relative à la connaissance de la nappe transfrontalière des calcaires du carbonifère (synclinal de Tournai-Roubaix) s'étendant de Lille (Fr) à Lens (Be) et d'évaluer son état d'un point de vue quantitatif. En effet, dans le cadre des échanges ayant eu lieu au sein de la Commission Internationale de l'Escaut (CIE), et au vu des enjeux liés à cet aquifère particulier exploité pour l'alimentation en eau potable et pour d'autres aspects économiques en France et en Belgique (Flandres et Wallonie), il avait été décidé d'en créer un modèle conceptuel de fonctionnement basé sur une synthèse hydrogéologique et des caractérisations hydrogéologiques et hydrogéo-chimiques puis de réaliser un modèle hydrodynamique maillé. La modélisation de cet hydrosystème avait été réalisée via le projet ScaldWin, 3ème programme INTERREG, et finalisée en 2014 (Picot et al., 2014a et 2014b) et le modèle avait été transféré aux acteurs, notamment l'Université de Mons (UMONS) et la Métropole Européenne Lilloise (MEL), pour qu'ils puissent en autonomie faire évoluer à la fois les connaissances de la dynamique des eaux souterraines et les informations et données associées, mais aussi le modèle de l'hydrosystème pour éclairer les discussions locales internes (MEL, DREAL, Agence de l'eau, Régions) ou collectives (CIE) concernant l'exploitation pérenne de cette ressource en eau souterraine.

Par la suite, la DREAL avait porté un projet de convention d'échange de données relatives au fonctionnement de la nappe du Carbonifère, avec les partenaires wallons et flamands. Un des buts de cet échange de données était d'apporter annuellement au modèle hydrodynamique les dernières données disponibles. Suite aux évolutions du niveau piézométrique de la nappe depuis la réalisation de la 1ère version du modèle qui utilisait les données recensées jusqu'en 2009-2010, le BRGM a été sollicité pour mettre à jour le modèle jusqu'à 2017 en actualisant les données acquises depuis, et en intégrant les améliorations proposées entre temps par la MEL et l'UMONS (Picot-Colbeaux et al., 2020).

Afin de permettre l'évaluation de l'état quantitatif de la masse d'eau du calcaire du carbonifère, le modèle est étendu temporellement puis utilisé pour simuler l'évolution du niveau de la nappe et des bilans hydrodynamiques en fonction des prélèvements. Quatre scénarios sont proposés jusqu'en 2050 et consistent à : 1) un arrêt complet de tous les prélèvements dans la nappe ; 2) un maintien de la situation de prélèvement actuelle ; 3) une augmentation très importante des prélèvements ; et 4) des évolutions jugées crédibles par les principaux partenaires concernés par l'exploitation de la nappe.

L'étude a été réalisée en étroite collaboration avec l'UMONS et suivie par un Comité de pilotage constitué de l'AEAP, de la DREAL et du BRGM, en lien avec les acteurs locaux concernés, notamment la MEL, les partenaires wallons et flamands notamment au sein du groupe de travail « eaux souterraines » de la CIE.

A l'aide du modèle hydrogéologique mis à jour, les scénarios sont simulés sous contrainte climatique enregistrée par le passé (1989-2017) et les résultats sont comparés pour préciser l'influence future des prélèvements sur l'aquifère : bilans hydrodynamiques, évolution des niveaux piézométriques, directions d'écoulement, variations des échanges nappe-rivière et évolution de la captivité de l'aquifère.

Cet outil offre ainsi la possibilité de mettre en place des actions cohérentes de gestion de la ressource souterraine transfrontalière partagée entre les deux pays actions respectant le cadre fixé par la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE).

PROVISOIRE

Sommaire

1. INTRODUCTION	7
1.1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	7
1.2. EVOLUTION HISTORIQUE DES MODELES HYDROGEOLOGIQUES MAILLES DE L'AQUIFERE CARBONIFERE	10
1.3. DERNIERE VERSION ACTUALISEE DU MODELE MAILLE DE L'AQUIFERE CARBONIFERE	16
2. DEFINITION DES SCENARIOS PROSPECTIFS	21
2.1. DETAILS DES QUATRE SCENARIOS DE PRELEVEMENT	21
2.2. MODELE HYDRO-CLIMATIQUE PROSPECTIF 2018-2050.....	23
2.3. ETAT INITIAL ET CONDITIONS AUX LIMITES DU MODELE PROSPECTIF	24
3. RESULTATS DES SIMULATIONS PROSPECTIVES	26
3.1. BILANS HYDRIQUES PROSPECTIFS SIMULES	27
3.2. EVOLUTIONS PIEZOMETRIQUES PROSPECTIVES SIMULEES	30
3.3. DEBITS DE RVIERES PROSPECTIFS SIMULES	32
4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	33
5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	35

Liste des figures

Figure 1 : Extension de la nappe des calcaires dévono-carbonifères du bord nord du Synclinorium de Namur (Youssof H., 1973, modifié Brouyère et al. 2006).....	7
Figure 2 : Extension de l'aquifère des calcaires carbonifères et masses d'eau souterraines associées, en France, en Wallonie et en Flandre. Les limites de l'aquifère indiquées sur cette figure correspondent aux limites considérées dans les études et modèles associés. Elles correspondent à des limites hydrogéologiques (Au Nord, à l'Ouest et au Sud) et au cours d'eau la 'Dendre' (à l'Est).....	7
Figure 3 : Extension des zones captive et libre de l'aquifère des calcaires carbonifères (source : Projet ScaldWIN). Les courbes rouges correspondent au niveau piézométrique de l'aquifère (2010). Les courbes bleues correspondent à l'élévation de la limite supérieure de l'aquifère.	8
Figure 4 : Baisse du niveau piézométrique en 2010 par rapport à 1910, tel que simulé avec le modèle numérique de l'aquifère (simulateur MARTHE).....	8
Figure 5 : Evolution du niveau piézométrique mesuré à Bondues (Fr) de 1900 à 2017. La localisation du piézomètre de Bondues se trouve sur la Figure 2 et la Figure 4.....	9
Figure 6 : Evolution des volumes annuels prélevés dans l'aquifère des calcaires carbonifères de 1900 à 2017, considérant les limites de la Figure 2	9
Figure 7. Coupe géologique SO-NE entre Hénin-Beaumont et Roubaix (Besbes et Talbot, 1983).....	11

Figure 8 : Bilans hydrodynamiques calculés en phase 1b, représentatifs de l'état d'équilibre de l'hydrosystème sans prélèvements (unité en Mm^3/an ; valeurs > 0 indique une entrée d'eau dans l'hydrosystème ; valeurs < 0 indiquent une sortie d'eau de l'hydrosystème) 13

Figure 9 : Bilans hydrodynamiques des cours d'eau calculés en phase 1b, représentatifs de l'état d'équilibre de l'hydrosystème sans prélèvements (unité en Mm^3/an ; valeurs > 0 indique une entrée d'eau dans le cours d'eau ; valeurs < 0 indiquent une sortie d'eau du cours d'eau) 14

Figure 10 : Représentation des volumes échangés par masses d'eau (Mm^3 par an) au sein des calcaires carbonifères calculés pour l'année 2010 (Rorive et Bastien, 2016). En rouge masse d'eau française 1015, en orange masse d'eau flamande ss_1300, en jaune masse d'eau wallonne RWE060, en vert masse d'eau wallonne RWE013. 16

Figure 11. Evolution des termes du bilan hydrodynamique global calculé de 1900 à 2017 : « Glob_Intern_fix » prélèvements dans la nappe, « Glob_Limites » limites à potentiel imposé, « Glob_Stock » Stockage, « Recharge_Maill » recharge atmosphérique de l'hydrosystème, « Débord/Suintem » débordement en surface de la nappe, « Glob_Riv-Nappe » échange entre Rivière et Nappe (Les valeurs positives indiquent une entrée d'eau et les valeurs négatives une sortie d'eau dans l'hydrosystème). 17

Figure 12. Cartes piézométriques 2010 des calcaires carbonifères (a) et simulée en 2010 (b) (isopièzes en mNGF, coordonnées x et y en mL2E), et saturation en eau simulée en 2010 (%) de la couche n°4 représentant l'aquifère des calcaires carbonifères (en gris 100% saturation indique une nappe captive ou semi-captive, les valeurs $< 100\%$ indiquent que la nappe est libre). 20

Figure 13. Recharge et ruissellement annuels (mm/an) calculés par le modèle sur la période prospective à partir des séries temporelles quotidiennes de pluie, d'ETP (reproduction des séries historiques 1989-2017) et des paramètres de sol..... 24

Figure 13 : Représentation des variations piézométriques au sein des calcaires carbonifères observées et calculées pour le piézomètre 00143C0079 de Bondues dans la partie captive nord-ouest (Picot-Colbeaux et al., 2014ab ; Picot-Colbeaux et al., 2020ab ; Goderniaux et al., 2018) 31

Figure 14 : Représentation des variations piézométriques au sein des calcaires carbonifères observées et calculées pour le piézomètre FPMSCH00-5459 dans la partie est (Picot-Colbeaux et al., 2014ab ; Picot-Colbeaux et al., 2020ab ; Goderniaux et al., 2018) 31

Figure 15 : Représentation des variations piézométriques au sein des calcaires carbonifères observées et calculées pour le piézomètre FPMSCH00-5167 dans la partie est (Picot-Colbeaux et al., 2014ab ; Picot-Colbeaux et al., 2020ab ; Goderniaux et al., 2018) 31

Liste des annexes

Aucune entrée de table des matières n'a été trouvée.

1. Introduction

1.1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

L'aquifère des calcaires carbonifères est transfrontalier sur trois entités administratives : la France, la Wallonie et la Flandre (Figure 1 et Figure 2). Les ressources en eau souterraine y sont intensivement exploitées, depuis plus d'un siècle, dans ces trois entités, notamment pour la distribution d'eau potable, l'industrie, l'agriculture et par des opérations d'exhaure en carrière.

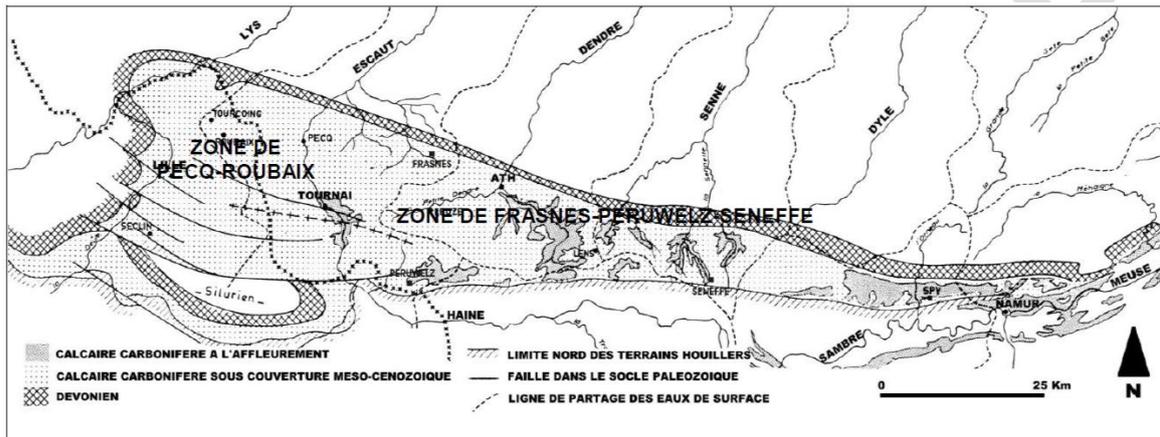


Figure 1 : Extension de la nappe des calcaires dévono-carbonifères du bord nord du Synclinorium de Namur (Youssef H., 1973, modifié Brouyère et al. 2006)

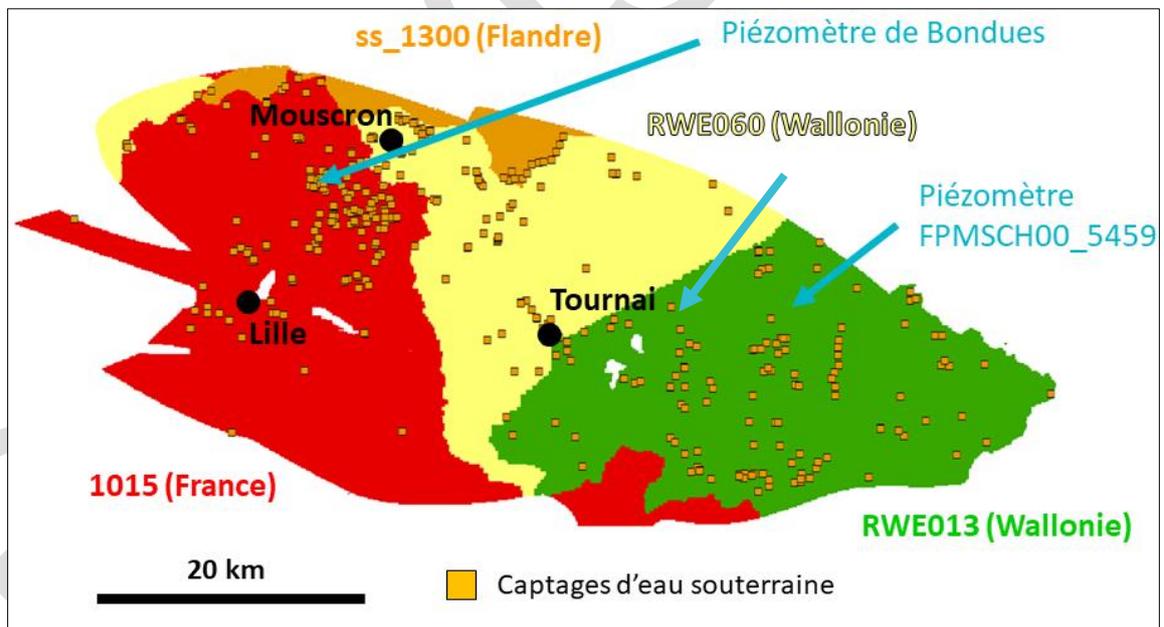


Figure 2 : Extension de l'aquifère des calcaires carbonifères et masses d'eau souterraines associées, en France, en Wallonie et en Flandre. Les limites de l'aquifère indiquées sur cette figure correspondent aux limites considérées dans les études et modèles associés. Elles correspondent à des limites hydrogéologiques (Au Nord, à l'Ouest et au Sud) et au cours d'eau la 'Dendre' (à l'Est).

L'aquifère est principalement composé de calcaires fracturés. Dans sa partie nord-ouest, il est considéré comme « captif » (Figure 3). L'eau souterraine s'y trouve « sous pression », sous des

couches géologiques peu perméables recouvrant l'aquifère des calcaires carbonifères. En raison de cette couverture peu perméable, l'alimentation depuis la surface du sol vers l'aquifère est beaucoup plus limitée en zone captive qu'en zone libre. De plus, les niveaux piézométriques y sont également beaucoup plus sensibles aux captages d'eau souterraine.

L'exploitation intensive de l'eau souterraine a induit une baisse importante des niveaux piézométriques, en particulier dans la zone nord-ouest correspondant approximativement à la partie captive de l'aquifère (Figure 3 et Figure 4).

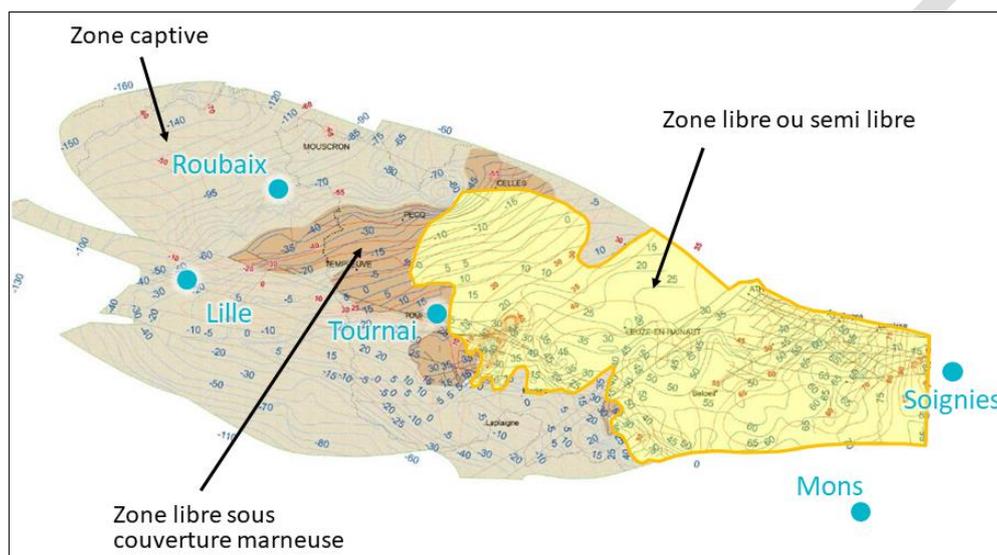


Figure 3 : Extension des zones captive et libre de l'aquifère des calcaires carbonifères (source : Projet ScaldWIN). Les courbes rouges correspondent au niveau piézométrique de l'aquifère (2010). Les courbes bleues correspondent à l'élévation de la limite supérieure de l'aquifère.

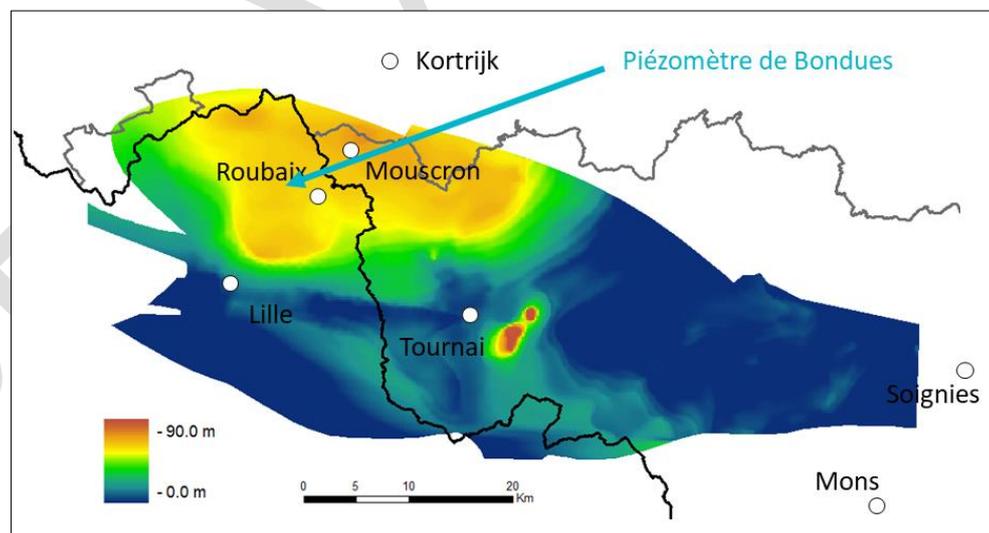


Figure 4 : Baisse du niveau piézométrique en 2010 par rapport à 1910, tel que simulé avec le modèle numérique de l'aquifère (simulateur MARTHE)

La Figure 6 montre l'évolution du volume total annuel prélevé dans l'aquifère des calcaires carbonifères et au sein des entités administratives. En parallèle, la Figure 5 montre l'évolution du niveau piézométrique mesuré entre 1900 et 2017 à Bondues (Fr), localisé dans la partie captive. Les volumes captés fluctuent de manière pluriannuelle. Le volume total capté, dans les

quatre masses d'eau souterraine a atteint un maximum entre 1965 et 2003 avoisinant les 100 Mm³/an. Cette période concorde avec une baisse importante des niveaux piézométriques dans la partie captive de l'aquifère. Au début des années 2000, la baisse des volumes captés a permis une remontée des niveaux piézométriques. Entre 2009 et 2016, une relative stabilité des volumes captés (de l'ordre de 75 Mm³/an) et des niveaux piézométriques est observée. Depuis 2017, les volumes captés sont de nouveau en hausse dans la partie captive de l'aquifère, induisant une nouvelle baisse des niveaux piézométriques.

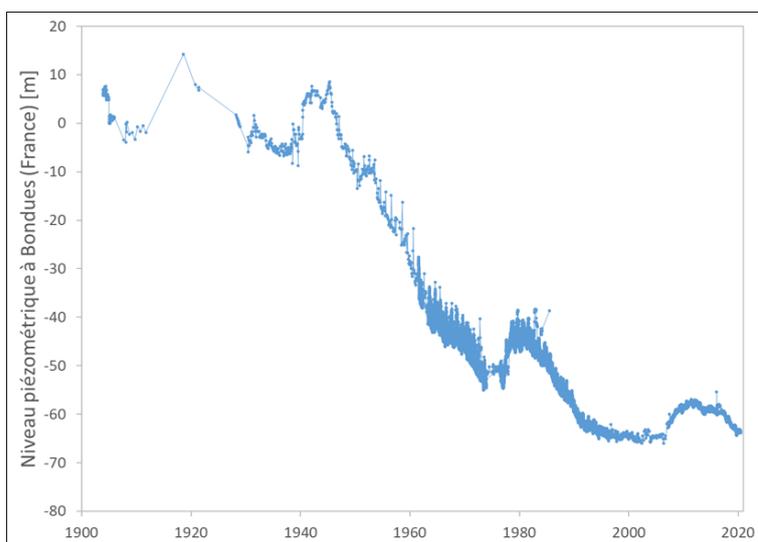


Figure 5 : Evolution du niveau piézométrique mesuré à Bondues (Fr) de 1900 à 2017. La localisation du piézomètre de Bondues se trouve sur la Figure 2 et la Figure 4.

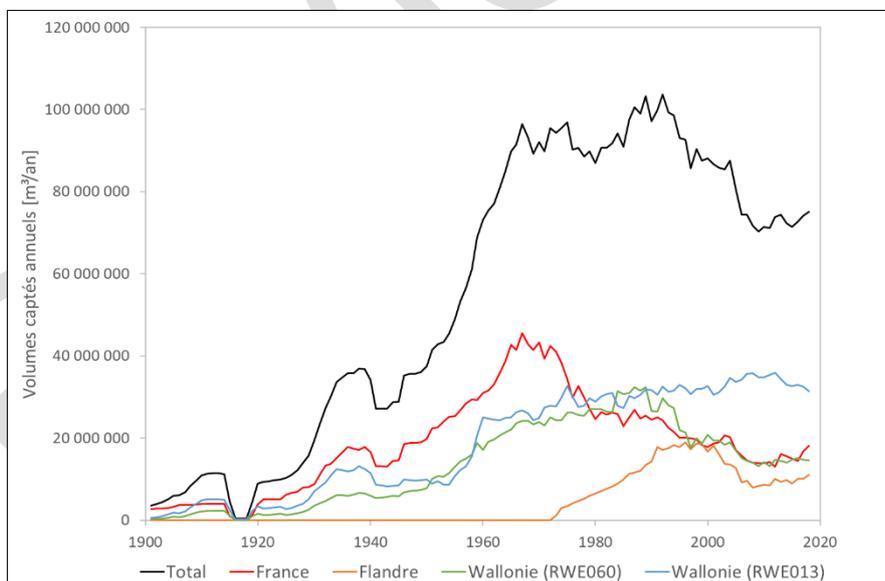


Figure 6 : Evolution des volumes annuels prélevés dans l'aquifère des calcaires carbonifères de 1900 à 2017, considérant les limites de la Figure 2

1.2. EVOLUTION HISTORIQUE DES MODELES HYDROGEOLOGIQUES MAILLES DE L'AQUIFERE CARBONIFERE

Depuis de nombreuses années, des travaux de caractérisation et de modélisation de l'aquifère ont été réalisés.

Dans les années 1970 les travaux de Youssof (1973) et Mania (Mania, 1974 ; Mania, 1976) permettent une caractérisation de l'aquifère (Figure 1) et l'élaboration d'un modèle monocouche maillé s'étendant de Lille à Tournai. Le logiciel DROUS (BRGM) est utilisé pour les calculs en régime permanent puis le logiciel DTR1 (BRGM) pour les calculs en régime transitoire au pas de temps annuel de 1889 à 1973. Basé sur une recharge constante de 175 mm/an, ce modèle a permis 1) de simuler plusieurs cartes piézométriques, 2) d'estimer les pertes de l'Escaut et la drainance des couches sus-jacentes (craie et alluvions) alimentant la nappe des calcaires (55 Mm³/an pour les pertes et la drainance), et 3) d'évaluer les impacts des prélèvements du secteur modélisé (totaux de 74.2 Mm³/an dont 33.9 Mm³/an en Belgique) sur la ressource en eau du Carbonifère. Enfin, le modèle est exploité par des simulations de divers scénarios. Un scénario de maintien de la situation des prélèvements de 1974 de façon constante jusqu'en 2000 est simulé et provoque un dénoyage de toute la partie captive ouest de l'aquifère Lille-Roubaix-Tourcoing-Mouscron. Un scénario de recharge artificielle sur le site de Ramegnies-Chin (nord de Tournai) avec des débits en provenance de l'Escaut (3 960 m³/h) est simulé et provoque une remontée des niveaux de quelques mètres dans les secteurs de pompages intensifs.

Dans les années 1980, un nouveau modèle est construit par Besbès et Talbot (Besbes M., Talbot A., 1983) intégrant le caractère multicouche de l'hydrosystème (de haut en bas : aquifère crayeux, éponte et aquifère des calcaires du Carbonifère) - sur la base du modèle géologique représenté sur la Figure 7 - et s'étendant cette fois de Lille à la Dendre orientale. Après un calcul en régime permanent représentant l'état piézométrique de 1973, un calcul en régime transitoire est réalisé au pas de temps mensuel de 1974 à 1978 à l'aide du logiciel NEWSAM (ENSMP). Les drainances sont alors estimées de 36 Mm³/an en 1973 contre 8 Mm³/an à l'état d'équilibre naturel. Les pertes de l'Escaut à Kain en 1977 sont estimées à 30 Mm³ afin de simuler les remontées piézométriques associées à cet accident d'effondrement du lit de l'Escaut. Le modèle calibré est alors exploité pour évaluer l'impact sur la piézométrie de la hausse des prélèvements en France et en Belgique selon 4 scénarios allant de +4%(FR) et +9%(BE) à +10%(FR) et +30%(BE). Les baisses de niveau engendrées sont évaluées de -7m à -19m au piézomètre de Bondues (BSS000AYLR, 00143C0079/F1).

A posteriori, les mesures de niveaux en 1990 ont montré que la baisse calculée était sous-évaluée puisque les niveaux observés sont inférieurs à ceux calculés alors que les prélèvements français ont été réduits. Il avait été admis à cette époque qu'une baisse de la nappe du calcaire carbonifère d'une quinzaine de mètre par rapport à 1973 (24 m par rapport aux niveaux de 1980) ne pouvait être tolérée. De tels niveaux ont néanmoins été atteints dans les années 2000.

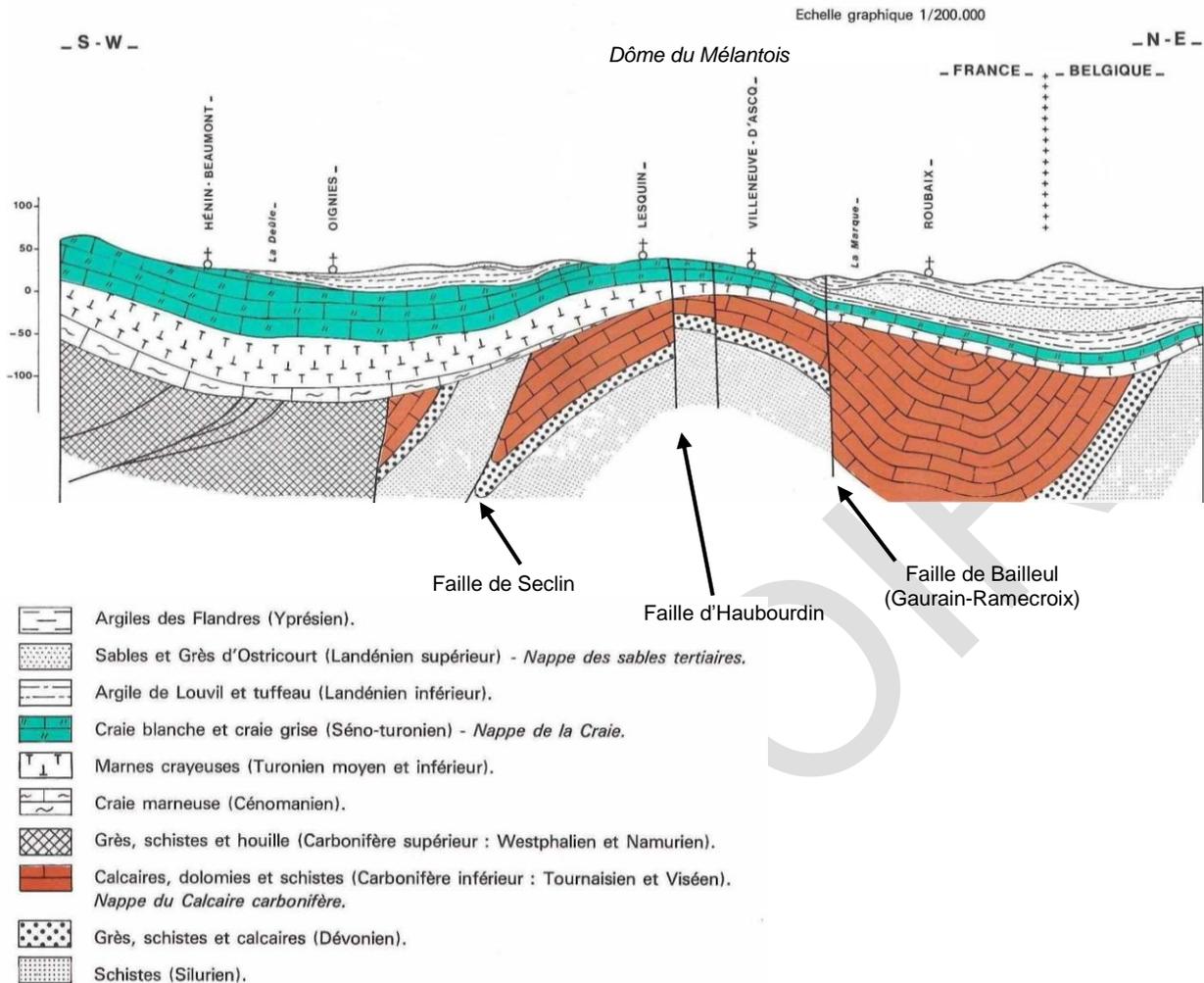


Figure 7. Coupe géologique SO-NE entre Hénin-Beaumont et Roubaix (Besbes et Talbot, 1983).

Dans les années 1990, le modèle multicouche transitoire de 1983 de Besbès et Talbot est repris et mis à jour par Combes toujours au pas de temps mensuel à l'aide du logiciel NEWSAM, d'abord de 1974 à 1988 (Combes, 1991) puis mis à jour de 1988 à 1992 (Combes, 1994). La modélisation de la perte de l'Escaut à Kain est précisée et étalée de 1974 à 1988 avec des débits de pointe de 1 à 2 m³/s en 1977. Les prélèvements de 1974 à 1988 sont détaillés et répartis entre usage eau potable et usage industriel et entre la France et la Belgique. A noter que les prélèvements de l'année 1988 ne sont pas concordants entre les deux modèles : 100.3 Mm³ dans le modèle de 1991 versus 69.6 Mm³ dans le modèle de 1994. Cette différence s'explique sans doute par les incertitudes liées aux manques dans les données recueillies. Par la suite, la mise à jour des données du modèle de 1988 à 1992 montre une baisse notable des prélèvements jusqu'en 1992 (total de 64 Mm³). Les piézométries évolutives observées sont comparées à celles calculées pour 12 piézomètres au Carbonifère mais aucun à la craie, et des bilans de flux sont calculés. Le modèle est exploité de 1989 à 2003, non plus pour connaître l'impact des prélèvements sur la piézométrie mais cette fois pour estimer les volumes prélevés qui permettraient de stabiliser les niveaux piézométriques de la nappe du Carbonifère.

Par rapport à la situation de 1988 la stabilisation des niveaux est simulée par des prélèvements français réduits de 3 Mm³ (soit 25.45 Mm³), des prélèvements belges réduits de 3.5 Mm³ (soit 30.97 Mm³) sur la partie ouest et inchangés sur la partie est (soit 37.56 Mm³). A partir de 1992 les niveaux simulés sont calculés pour 15 ans à la hausse à +12m puis +20m au piézomètre de

Bondues, pour des prélèvements de 1992 revus à la baisse de -3.4 Mm³ puis -5.1 Mm³ en France dans la région déprimée et de -5.3 Mm³ puis -6.3 Mm³ en Belgique sur la région Le Pecq-Roubaix-St Léger-Mouscron.

A posteriori des résultats de simulations, s'observe une baisse des prélèvements du même ordre de grandeur que ceux considérés dans les calculs alors que les niveaux observés à Bondues ne sont pas remontés, voire ont légèrement baissé puis se sont stabilisés de 2004 à 2006.

En parallèle de l'adaptation et de l'utilisation de ce modèle NEWSAM, SIDEHO et la Société Géologique de Belgique (1992) construisent un modèle toujours avec le logiciel NEWSAM (ENSMP) en régime permanent puis transitoire, mais s'étendant seulement de la frontière franco-belge à la Dendre. D'abord monocouche, ce modèle évolue en multicouche puis est mis à jour par SIDEHO en 1994-1995¹. En 1998 un modèle transitoire multicouche est également créé sur la région de Péruwelz par AQUA3D².

Depuis les années 2010 suite au colloque de Tournai de 2007³ dédié à la gestion de la ressource en eau transfrontalière de la nappe des calcaires du Carbonifère et à la synthèse hydrogéologique réalisée sur l'aquifère par Pinson et Seguin (2007), est élaboré un modèle multicouche transitoire de 1900 à 2010 au pas de temps annuel à mensuel à l'aide du logiciel MARTHE du BRGM (Thiéry, 2020ab) par Picot-Colbeaux et al. (2014a) avec la contribution de l'UMONS et de la MEL. Il s'agit du modèle dit Scaldwin car bâti dans le cadre du projet Interreg ScaldWin⁴. Comme ce modèle a pour vocation d'être un outil d'aide à la décision et de gestion de ressources de l'aquifère, il est suivi au sein du groupe eau souterraine de la Commission Internationale de l'Escaut (CIE)⁵, il a été partagé et régulièrement mis à jour et utilisé par les différents acteurs transfrontaliers notamment l'UMONS et la MEL.

De 2012 à 2014, dans le cadre du projet Interreg Scaldwin piloté par la MEL, Picot-Colbeaux et al., du BRGM (2014ab), en collaboration avec l'UMONS a poursuivi la mise au point un modèle numérique pour simuler la dynamique de l'eau de l'aquifère des calcaires carbonifères depuis son état d'équilibre 1900 jusqu'à la période d'intérêt 1989-2010. Cette période a servi de période de référence pour la calibration des paramètres hydrodynamiques de la nappe. Le modèle s'étend de la Dendre orientale à la limite ouest de l'aquifère aux environs de Lille.

Le modèle est construit en régime permanent puis en régime transitoire au pas de temps de calcul variant selon la complexité des processus pris en compte (calcul hydrodynamique annuel à mensuel). La géométrie du modèle se base sur le modèle géologique élaboré en amont dans le cadre du projet. Le modèle hydrogéologique comporte 4 couches, de la base de l'aquifère du

¹ pas de références bibliographiques à ce jour à la disposition du BRGM

² pas de références bibliographiques à ce jour à la disposition du BRGM

³ 9 Février 2007 - Colloque sur les eaux souterraines des calcaires carbonifères, partagées entre la France et la Belgique, Flandre et Wallonie

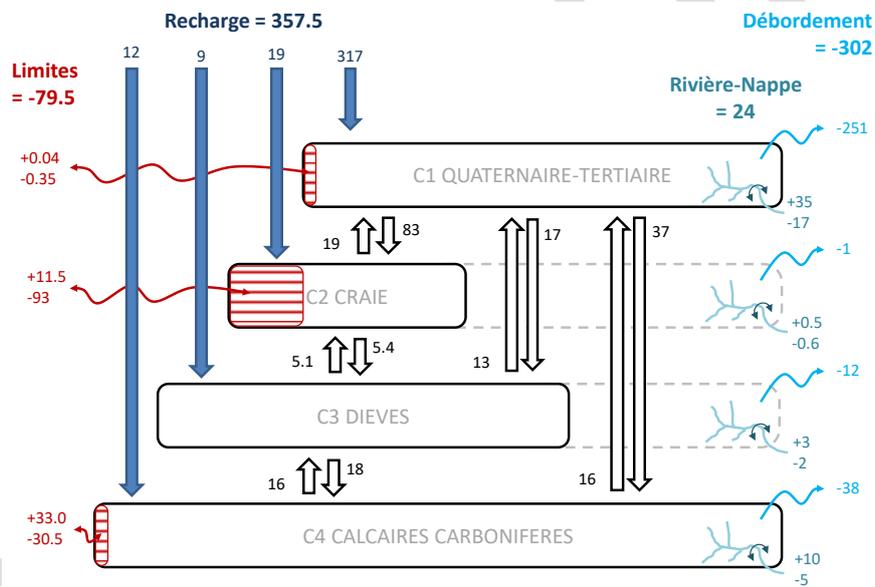
⁴ Le projet ScaldWIN est un projet de coopération transfrontalière entre 8 partenaires : la Vlaamse Milieumaatschappij (VMM), Bruxelles-Environnement (ex-IBGE), la Direction générale opérationnelle Agriculture, Ressources naturelles et Environnement de la Région wallonne (DGARNE), la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement Nord – Pas-de-Calais (DREAL), Lille Métropole Communauté Urbaine (LMCU), Waterschap Zeeuws-Vlaanderen (WSZV - Wateringue de Flandre zélandaise), Provincie Zeeland (la province de Zélande) et DG Water (Eau) du Ministère néerlandais des Transports et des Voies Navigables.

https://www.isc-cie.org/fr/domaines-dactivites/eaux-souterraines/#_ftnref3

⁵ Commission Internationale de l'Escaut (CIE) – Internationale ScheldeCommissie (ISC) <https://www.isc-cie.org/fr/>

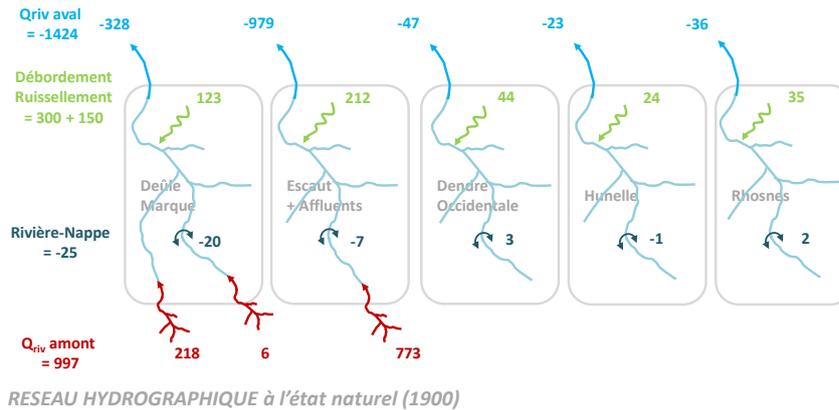
calcaire carbonifère jusqu'à la surface, dont 2 couches correspondent à des aquifères : craie secondaire et calcaires carbonifères.

La calibration du modèle de 1900-2010 a permis d'appréhender les quantités d'eau entrantes et sortantes de l'hydrosystème à l'état d'équilibre naturel à l'échelle de l'hydrosystème (Figure 8 et Figure 9) mais a surtout fait apparaître des disparités spatiales avec le temps, notamment une alimentation de l'aquifère des calcaires sur la partie est alors que les prélèvements s'effectuaient en majorité au nord-ouest dans la partie captive. Les simulations intégrant l'hydrosystème complet (réseau hydrographique et échange nappe-rivière, variation climatique et calcul de la recharge et du ruissellement, aquifères sus-jacents et drainances associées) ont montré qu'une part importante de la recharge était contrebalancée par le débordement en surface et par les limites à potentiel imposé, que la nappe des calcaires était principalement rechargée par les terrains tertiaires drainant sus-jacents et les zones d'affleurement et qu'au niveau de la Dendre Orientale une alimentation de la nappe par la rivière calculée était incohérente avec la réalité. Les bilans hydrodynamiques avaient été alors représentés sous forme de graphique temporelle selon la typologie de l'aquifère (captif sous aquifère crayeux, captif sous recouvrement quaternaire, semi-captif sous aquifère sableux à libre à l'affleurement).



HYDROSYSTEME à l'état naturel (1900)

Figure 8 : Bilans hydrodynamiques calculés en phase 1b, représentatifs de l'état d'équilibre de l'hydrosystème sans prélèvements (unité en Mm^3/an ; valeurs > 0 indique une entrée d'eau dans l'hydrosystème ; valeurs < 0 indiquent une sortie d'eau de l'hydrosystème)



RESEAU HYDROGRAPHIQUE à l'état naturel (1900)
Figure 9 : Bilans hydrodynamiques des cours d'eau calculés en phase 1b, représentatifs de l'état d'équilibre de l'hydrosystème sans prélèvements (unité en Mm^3/an ; valeurs > 0 indique une entrée d'eau dans le cours d'eau ; valeurs < 0 indiquent une sortie d'eau du cours d'eau)

Ce modèle avait permis de prendre en compte plusieurs scénarios prospectifs 1) le maintien des prélèvements, scénario A de référence, correspondant à la moyenne de ceux identifiés dans la base de données sur 2005-2009 ($75.54Mm^3/an$ au total dont $61.45 Mm^3/an$ belges et $14.09 Mm^3/an$ français) ; 2) un scénario B correspondant à la modification des prélèvements français, l'ouverture et l'agrandissements progressifs des carrières du Tournaisis et l'arrêt progressif des captages de la Transhennuyère (augmentation totale de 0 à $8Mm^3/an$ entre 2011 et 2050 principalement au niveau des carrières et $+1.5Mm^3/an$ en France).

Le maintien des prélèvements moyens calculés par le modèle avait mené à des écoulements inchangés, une piézométrie inchangée sauf sur la partie nord-ouest accrue de $+20m$ et sur le Tournaisis de $+10m$. Le scénario d'agrandissement des carrières n'était pas correctement représenté par le modèle qui ne considérait pas la totalité des prélèvements prévus sur la zone des carrières.

Deux ensembles fonctionnant quasiment indépendamment semblaient se distinguer de part et d'autre du tracé de l'Escaut : une partie nord-ouest captive au stockage-déstockage d'eau de l'aquifère lié aux prélèvements dont l'alimentation était essentiellement un transfert d'eau latéral provenant de l'est ; une partie est semi-captive au stockage-déstockage d'eau de l'aquifère lié à la recharge.

Un partage des connaissances a été réalisé avec l'UMONS et la MEL en terme de formation aux outils de calcul et de modélisation MARTHE appliqué au modèle aquifère du Carbonifère et aux données associées (base de données, fichiers du modèle et des résultats).

Depuis 2013, dans le cadre de projets régionaux, le modèle est régulièrement mis à jour, amélioré et utilisé pour des scénarios prospectifs, par l'UMONS (financement Service Public de Wallonie depuis 2013 par Rorive et Bastien (2015ab), Rorive et Bastien (2016), Bastien J. et al. (2016) Rorive et Licour, (2017) et Goderniaux et al. (2018)) et par la MEL (financement sur fond propre pour la gestion des captages AEP) :

L'analyse du modèle par l'UMONS (bilans hydrodynamiques, cartes piézométriques 2010, chroniques piézométriques, perméabilité, débits prélevés et sensibilité) avait montré que malgré la restitution correcte des écoulements à l'échelle de l'aquifère, localement le modèle n'était pas exploitable car il n'arrivait pas à respecter 1) dans la zone nord-ouest les niveaux $-50m$, $-60m$ et $-70m$; 2) l'ensemble des débits prélevés déclarés au niveau des carrières et des pompages à l'est (Transhennuyère et T.M.W). L'UMONS avait alors proposé de revoir la calibration du

modèle dans le but de prélever l'ensemble des débits sur la période 1900-2010 mais aussi sur la période prospective d'agrandissement des carrières.

Une version 1 modifiée du modèle par l'UMONS (zones de perméabilités différentes, contour des carrières adaptées, épaisseur aquifère localement augmentée sur Barry) avait permis au modèle la prise en charge totale des volumes prélevés et une meilleure représentation de la piézométrie dans la zone des carrières sans pour autant représenter correctement les rabattements de -50m, -60m et -70m au nord-ouest. Les scénarios prospectifs de 2011 à 2050 A et B de nouveau simulés (localement, augmentation des débordements et des échanges rivières vers nappe puis diminution liée à l'augmentation des exploitations des carrières). La piézométrie calculée en 2050 indiquait une hausse de +20m nord-ouest et +5m dans le Tournaisis.

Une version 2 modifiée du modèle par l'UMONS (relation entre les aquifères et la Dendre, mis à jour avec les données de prélèvements 2010-2013) avait apporté une nette amélioration du fonctionnement de la masse d'eau RWE013 située à l'est ainsi que de sa piézométrie. La partie nord-ouest de l'aquifère était restée inchangée. Le débit de base de la Dendre orientale était alors bien représenté par une alimentation par la nappe du Carbonifère. Les bilans hydrodynamiques avaient été alors représentés sous forme de carte pour l'année 2010 par masse d'eau (wallonne REW013 et REW60, française 1015 et flamande ss_1300_GWL_1) décrivant pour chacune les échanges d'eau entre elles mais aussi avec l'extérieur (Figure 10). Cette approche avait clairement montré que l'équilibre des masses d'eau française et flamande étaient étroitement liés à l'équilibre entre leurs prélèvements et leur principale alimentation via les apports latéraux de la masse d'eau wallonne RWE060. La masse d'eau wallonne RWE060 était exclusivement alimentée par la drainance des terrains sus-jacents et qu'il y avait un jeu d'équilibre entre prélèvements et transferts vers les masses d'eau ss_1300_GWL_1 et 1015. Par contre pour la masse d'eau wallonne RWE013, un rééquilibrage interne entre les entrées et les sorties avait été décrit comme ne se répercutant pas sur les autres masses d'eau, c'est-à-dire avec des échanges équilibrés.

Les résultats de simulation des scénarios prospectifs A et B avaient montré les mêmes résultats mis à part sur la partie est du modèle. Le scénario A avait montré que la piézométrie s'améliorait tandis que le scénario B avait montré une piézométrie moindre notamment sur la partie est et sur la zone des carrières.

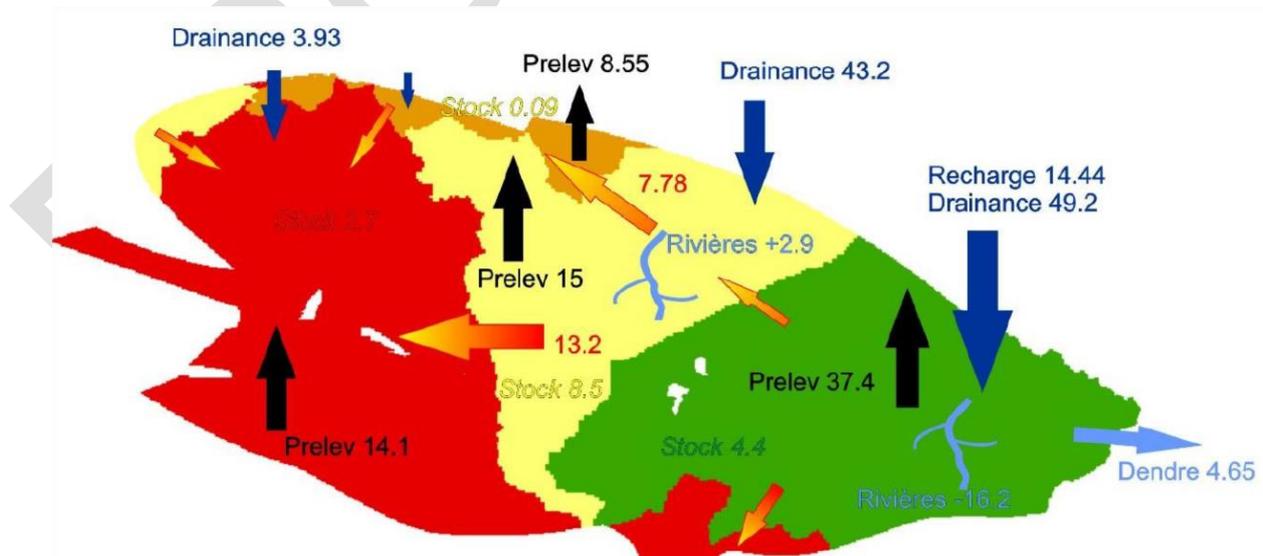


Figure 10 : Représentation des volumes échangés par masses d'eau (Mm^3 par an) au sein des calcaires carbonifères calculés pour l'année 2010 (Rorive et Bastien, 2016). En rouge masse d'eau française 1015, en orange masse d'eau flamande ss_1300, en jaune masse d'eau wallonne RWE060, en vert masse d'eau wallonne RWE013.

Une version adaptée du modèle 2 par l'UMONS avait été mise à jour avec les données acquises entre 2009 et 2015 concernant les données météorologiques (pluviométrie et évapotranspiration). Suite à l'arrêt de mesure pluviométrique pour certaines stations, il avait été proposé de compléter les chroniques temporelles par d'autres données similaires moyennant un facteur correctif. La mise à jour des données de prélèvements avait permis de revoir à la hausse les volumes de 2010 de $72Mm^3$ à $75Mm^3$ (avec une légère réduction des prélèvements en carrière de $13.7Mm^3$ à $12.8Mm^3$). Les volumes prélevés restaient relativement stables de 2005 à 2015 variant de $72.3Mm^3/an$ à $76.6Mm^3/an$ selon les années.

La version du modèle UMONS mise à jour « Calé-56 » avait servi de version finale pour les simulations prospectives à venir. Les scénarios A et B avaient été également modifiés pour prendre en compte les données de prélèvements réelles récemment acquises c'est-à-dire une moyenne de 2011-2015 pour le scénario A. D'autres scénarios C avaient été simulés pour étudier la sensibilité du modèle à l'augmentation des débits de prélèvements. La piézométrie calculée pour le scénario A avait mis en évidence une remontée de +20m dans la partie nord-ouest et aucune variation dans la partie est. La description et les résultats du scénario B n'avaient pas été communiqués par contre les résultats du scénario C (Scénario C17) avec des hypothèses de prélèvements plus importants de l'ordre de $80Mm^3/an$ inspirés de la situation 2017 (été sec et chaud) avaient montré une baisse significative de la piézométrie dans la partie nord-ouest de 8 à 13m par rapport aux simulation de référence du scénario A.

Une adaptation de la base de données des prélèvements par la MEL via une recherche bibliographique et une description plus fine de la déclaration historique des volumes prélevés avaient été réalisées au cours des années pour affiner les résultats de simulation sensibles aux volumes prélevés. Un recueil informel des erreurs perçues et des corrections proposées avait été rédigé par la MEL ainsi que le maintien de la base de données des prélèvements échangés depuis la création du modèle Scaldwin (format excel). La MEL avait également mis à jour chaque année le modèle initial BRGM avec les données actualisées de prélèvements et avec les données climatiques (pluviométrie et évapotranspiration) puis avait effectué des simulations dans le cadre de la gestion de leurs champs captants d'alimentation en eau potable partagés entre la nappe de la craie et du Carbonifère⁶.

1.3. DERNIERE VERSION ACTUALISEE DU MODELE MAILLE DE L'AQUIFERE CARBONIFERE

Depuis 2018 le BRGM a mis en commun les améliorations apportées par l'UMONS et la MEL (Picot-Colbeaux et al., 2020), puis a procédé à la calibration du modèle avec les données mises à jour à 2017 dans le cadre de la convention de partage des données entre les instituts français et belges. La calibration du modèle 1900-2017 selon l'évolution des prélèvements, des pluies et de l'évapotranspiration (Annexe 1) a permis de corriger la piézométrie simulée sur la plupart des piézomètres et de mettre à jour les bilans hydrodynamiques sans que ceux-ci soient grandement modifiés.

⁶ ⁶. Seuls les fichiers transcrivant les commentaires et les corrections des données de prélèvements avaient été communiqués au BRGM à ce jour

La calibration du modèle en régime permanent, puis en régime transitoire sur la période 1989-2017, s'est appuyé sur les cartes piézométriques régionales disponibles, ainsi que sur une trentaine de chroniques piézométriques et de trois chroniques de débit enregistrées aux stations hydrométriques d'intérêt implantées sur le réseau hydrographique. La calibration a principalement consisté à ajuster les paramètres hydrogéologiques (perméabilité et coefficients d'emmagasinement), les paramètres de recharge, et les paramètres dimensionnant les échanges nappe-rivière.

Les bilans hydrodynamiques (débits entrant et sortant de l'hydrosystème) sont calculés pour chaque pas de temps du calcul de l'état initial de 1900 à l'état actuel (au 31/12/2017) Leur évolution est représentée pour l'état « naturel » équilibré de façon détaillée par couche (Annexe 2) et pour chaque année au global de l'hydrosystème (Figure 11). Elle montre la répartition des débits de recharge, des débits de débordement de nappe, des débits de prélèvements, des débits d'échanges nappe-rivière, des débits des limites à potentiel imposé et des débits de stockage. A l'échelle de l'aquifère du carbonifère (couche 4) les bilans sont présentés pour des années significatives en terme de climat (Tableau 1) et surtout de prélèvements (Tableau 2) permettant d'apprécier les comportements extrêmes connus par le passé.

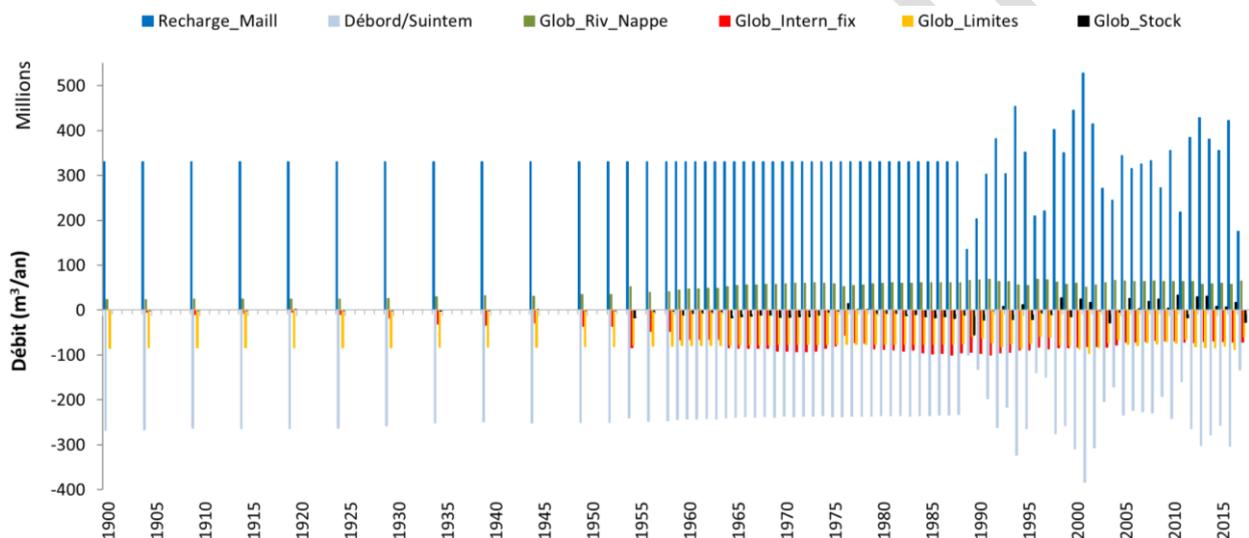


Figure 11. Evolution des termes du bilan hydrodynamique global calculé de 1900 à 2017 : « Glob_Intern_fix » prélèvements dans la nappe, « Glob_Limites » limites à potentiel imposé, « Glob_Stock » Stockage, « Recharge_Maill » recharge atmosphérique de l'hydrosystème, « Débord/Suintem » débordement en surface de la nappe, « Glob_Riv-Nappe » échange entre Rivière et Nappe (Les valeurs positives indiquent une entrée d'eau et les valeurs négatives une sortie d'eau dans l'hydrosystème).

L'évolution des débits calculés pour l'ensemble de l'hydrosystème s'observe suivant trois phases :

- **état initial de 1900** dominé essentiellement par ;
 - o Un apport d'eau par la recharge de 331 Mm³/an et par les rivières de 22 Mm³/an,
 - o Une perte d'eau par débordement de 268 Mm³/an et par les limites à potentiel imposé de 85 Mm³/an ;
- **évolution pluriannuelle de 1901 à 1988** dominée essentiellement par ;
 - o Un apport constant d'eau par la recharge de 331 Mm³/an,
 - o Une perte d'eau croissante par prélèvement de 5 à 100 Mm³/an compensée par une diminution des débits de débordement de nappe passant de 268 à 233 Mm³/an, par

une diminution des débits des limites à potentiel imposé passant de 85 à 76 Mm³/an, et par une augmentation des débits provenant des cours d'eau allant de 22 à 62 Mm³/an,

- Un déstockage croissant atteignant 11 Mm³/an, partiellement compensé par les apports d'eau de la perte de l'Escaut à Kain entre 1973 et 1980 ;

- **évolution mensuelle du 01/01/1989 au 31/12/2017** dominée essentiellement par ;

- Un apport d'eau par la recharge variable, alternant entre périodes sèches 1989-1990, 1996-1997, 2003-2004, 2011 et 2017, présentant des débits respectifs de 121-200, 208-216, 276-248, 221 et 175 Mm³/an, et périodes humides 1994, 2001, 2013 et 2016, présentant des débits respectifs de 456, 529, 428 et 420 Mm³/an. Un apport d'eau moyen par les cours d'eau de 62 Mm³/an variant très légèrement selon les cycles climatiques,
- Une perte d'eau par prélèvement en légère baisse sur la période de 100 Mm³/an à ~70 Mm³/an (avec un minimum de 68 Mm³/an atteint en 2008) et par les limites à potentiel imposé de l'ordre de 75 Mm³/an en moyenne variant selon les cycles climatiques,
- Un stockage-déstockage en complète interaction avec les cycles climatiques avec un stockage maximum de 32.5 Mm³/an (2010) et des déstockages maximum allant de 25 à 50 Mm³/an calculé à la suite des événements secs.

Le bilan hydrodynamique calculé en régime permanent pour l'état initial de 1900 montre que l'aquifère des calcaires carbonifères (couche 4 du modèle) reçoit 11 Mm³/an de recharge directe, soit 3% de la recharge perçue par l'ensemble de l'hydrosystème et 23 Mm³/an de recharge indirecte essentiellement via la couche tertiaire-quaternaire, soit 7 % de la recharge totale. La nappe alimente la Dendre Orientale à 6 Mm³/an au global satisfaisant les améliorations apportées par l'UMONS sur ce secteur est du modèle. Enfin la nappe alimente directement, par débordement et échanges nappe-rivière, les cours d'eau de 26 Mm³/an au global.

Au cours du temps, les bilans hydrodynamiques évoluent fortement en réaction aux augmentations des prélèvements dans la nappe des calcaires et aux variations de recharge. En effet l'augmentation des prélèvements (jusqu'à 100 Mm³/an) a un impact direct sur les débits des cours d'eau (débordements de la nappe, échange nappe-rivière et limite imposée réduit au global de 86 Mm³/an) et sur le stock d'eau disponible dans l'aquifère (jusqu'à 11 Mm³/an déstocké). Le phénomène est exacerbé lors des années à faible recharge.

Couche 4 - Carbonifère surface = 1672 km ²	Débits par la limite à potentiel imposé	Prélèvements	Recharge	Débordement	Echanges verticaux	Stockage	Echanges Nappe- Rivière
année sèche - 1997	-2 489	-86 437	7 591	-8 784	79 481	-6 943	4 594
année moyenne - 2008	-4 087	-67 476	11 128	-10 258	85 784	20 275	6 249
année humide - 2001	-6 350	-81 472	18 279	-19 016	94 295	8 987	4 477

Tableau 1. Evolution des bilans hydrodynamiques pour les saisons sèche, moyenne et humide calculés par le modèle actualisé (volumes en 1000 m³/an).

Couche 4 - Carbonifère surface = 1672 km ²	Débits par la limite à potentiel imposé	Prélèvements	Recharge	Débordement	Echanges verticaux	Stockage	Echanges Nappe- Rivière
année prélèvements min - 2008	-4 087	-67 476	11 128	-10 258	85 784	20 275	6 249
année prélèvements moy - 2002	-6 288	-81 186	15 077	-17 515	90 999	4 046	4 448
année prélèvements max - 1991	-2 113	-99 856	9 779	-9 263	82 548	-13 780	6 193

Tableau 2. Evolution des bilans hydrodynamiques pour les années de prélèvements minimal, moyen et maximal calculés par le modèle actualisé (volumes en 1000 m³/an).

Les charges hydrauliques calculées par le modèle actualisé, sous une contrainte d'exploitation intensive antérieure de l'aquifère, reflètent correctement les gradients hydrauliques et les grands ensembles de niveaux piézométriques identifiés par les isopièzes tracées à partir des relevés de 2010 (Figure 12). On identifie ainsi :

- Une zone Nord-Ouest dans laquelle la nappe est fortement rabattue,
- Une zone centrale sud où le dôme piézométrique est conservé,
- Une zone centrale nord de drainage de la nappe vers l'Escaut,
- Une zone de carrière où les rabattements sont importants,
- Une zone d'écoulement sud-est – nord-ouest de la Dendre Orientale vers la zone des carrières.

La saturation en eau calculée pour les calcaires du Carbonifère montre l'extension spatiale de la nappe libre en 2010 (Figure 12).

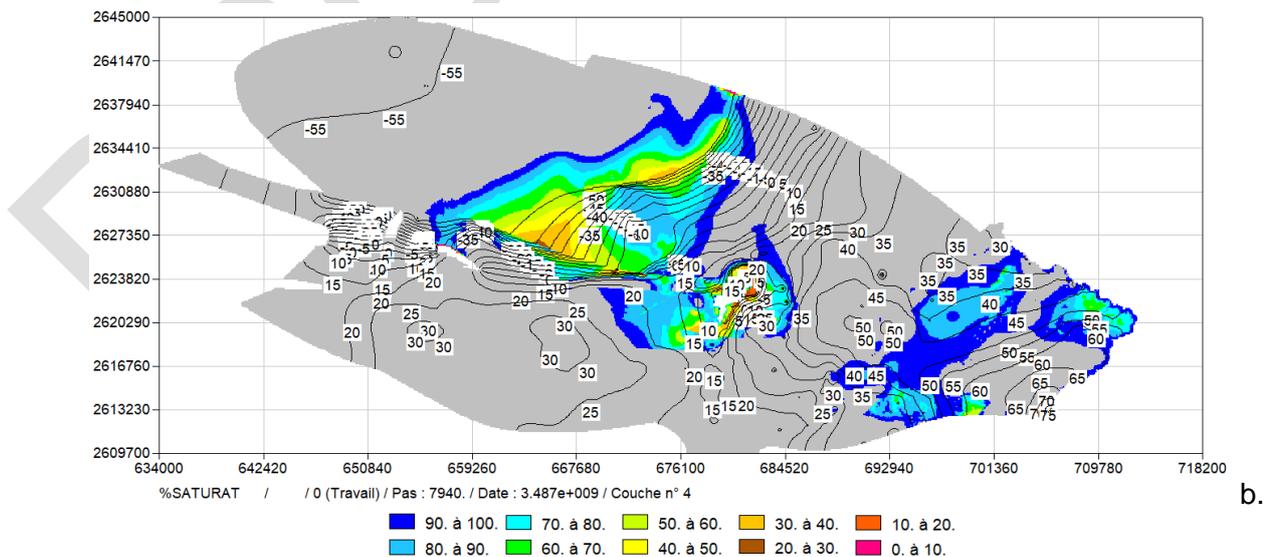
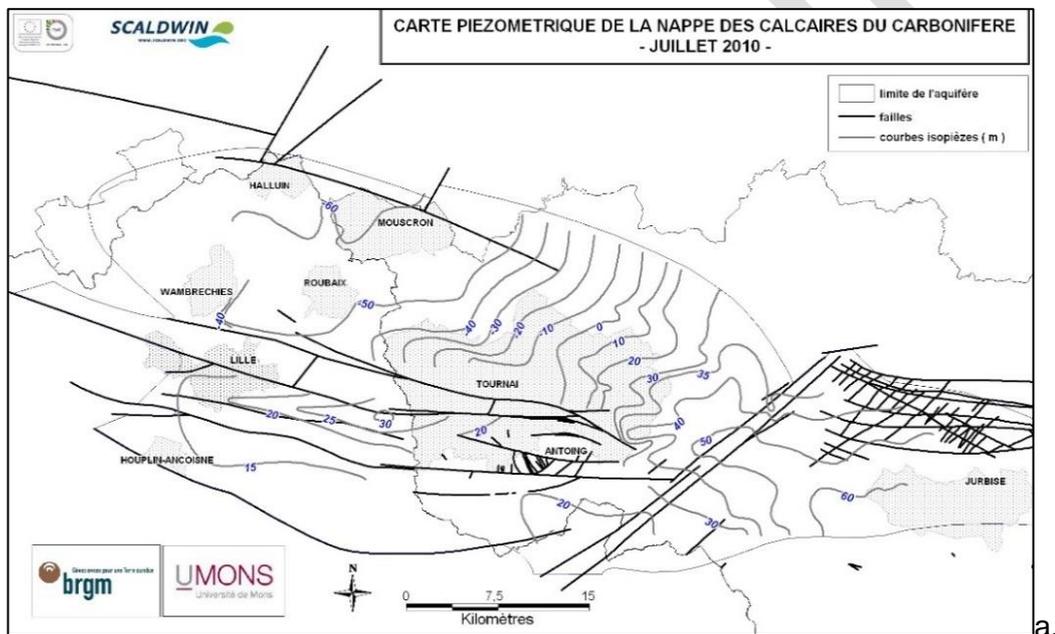


Figure 12. Cartes piézométriques 2010 des calcaires carbonifères (a) et simulée en 2010 (b) (isopièzes en mNGF, coordonnées x et y en mL2E), et saturation en eau simulée en 2010 (%) de la couche n°4 représentant l'aquifère des calcaires carbonifères (en gris 100% saturation indique une nappe captive ou semi-captive, les valeurs < 100% indiquent que la nappe est libre).

Localement, les charges hydrauliques calculées sur la période 1900-2017 (Annexe 3) reproduisent la baisse de l'ordre de 60 m qui est observée sur la partie captive ouest de l'aquifère, tout en reproduisant la remontée temporaire des niveaux piézométriques survenue dans les années 1970 suite à la perte des eaux de l'Escaut par effondrement karstique au niveau de la commune de Kain. La représentation de ces deux événements extrêmes, sachant que la recharge de l'aquifère est essentiellement effectuée sur la partie est de l'aquifère, montre que le modèle réalisé reproduit correctement le fonctionnement global de l'hydrosystème. Les nouveaux piézomètres 3-0056 et 3-005 sont également correctement représentés par le modèle actualisé. Pour cette partie de l'aquifère le modèle actualisé représente beaucoup mieux l'évolution piézométrique dont l'altitude était surestimée notamment sur la période actuelle par le modèle initial de 2014.

Contrairement à la partie captive ouest de l'aquifère, les évolutions piézométriques simulées pour les autres secteurs du domaine modélisé (Annexe 3) pour la zone centrale à proximité des carrières et la zone est sont moins influencées par les prélèvements. D'ailleurs, la nappe montre des fluctuations liées aux variations saisonnières. Dans ce secteur, les évolutions piézométriques sont correctement simulées par le modèle et parfois nettement améliorées par la mise à jour et les propositions de l'UMONS. Localement, des chutes piézométriques ne sont pas représentées par le modèle où inversement, des chutes piézométriques sont simulées alors qu'elles n'apparaissent pas dans les mesures. Ce phénomène est visible essentiellement dans la zone centrale à proximité des carrières où l'apparition progressive des carrières n'est pas considérée dans le modèle et où les débits prélevés sont les moins connus et donc moins bien contraints (point 5140 par exemple).

Les piézomètres tels que 00143B0027 et 00142D1082 représentatifs de la zone captive ouest montrent une évolution lente sans variations saisonnières ni interannuelles, par contre les piézomètres tels que 5459, 5460, 5491 et 5314 à l'Est du modèle montrent une évolution rapide des niveaux piézométriques liée aux variations saisonnières avec une évolution interannuelle (Annexe 3). Le modèle surestime les évolutions piézométriques dans la zone captive Ouest à partir des années 2010-2011 (contre 2000 pour le modèle initial de 2014). Dans la zone est du domaine, soit le modèle représente correctement les amplitudes inter-saisonnières avec des écarts pouvant atteindre 2 m entre les niveaux observés et ceux calculés où des ajustements de perméabilité permettraient d'améliorer les niveaux calculés ; soit le modèle ne restitue pas correctement les amplitudes saisonnières où des ajustements dans les échanges nappe-rivière et les échanges verticaux pourraient améliorer la réponse du modèle.

La variation des débits des cours d'eau simulés pour le Rhosnes, la Dendre Occidentale et la Hunelle sont comparés aux débits observés (Annexe 4) et montre que le modèle reproduit correctement les variations saisonnières observées ainsi que les ordres de grandeurs débits mesurés. Le modèle mis à jour sous-estime cependant les débits en période d'étiage pour la Hunelle.

C'est sur la base de cette dernière version du modèle carbonifère que sont réalisées les simulations des divers scénarios co-construits par le groupe « eau souterraine » de la CIE.

2. Définition des scénarios prospectifs

Afin d'évaluer l'état quantitatif de la masse d'eau du calcaire du carbonifère selon certaines sollicitations de la nappe, le modèle est étendu temporellement jusqu'en 2050 puis utilisé pour simuler l'évolution du niveau de la nappe et des bilans hydrodynamiques. Quatre scénarios sont proposés et consistent à :

- 1) un arrêt complet de tous les prélèvements dans la nappe ;
- 2) un maintien de la situation de prélèvement actuelle ;
- 3) une augmentation très importante des prélèvements ;
- 4) des évolutions jugées crédibles par les principaux partenaires concernés par l'exploitation de la nappe.

A l'aide du modèle hydrogéologique mis à jour, les scénarios sont simulés avec des évolutions climatiques enregistrées quotidiennement par le passé de 1989 à 2017 et les résultats sont comparés entre eux pour préciser l'influence des prélèvements sur l'aquifère, à savoir: bilans hydrodynamiques, évolution des niveaux piézométriques, directions d'écoulement, variations des échanges nappe-rivière et évolution de la captivité de l'aquifère.

Les simulations prospectives font suite au modèle transitoire mis à jour au 31/12/2017, et se déroulent sur une quarantaine d'années au pas de temps journalier, débutant le 01/01/2018 et se terminant le 31/12/2050.

Le détail des scénarios de prélèvements, les conditions hydroclimatiques ainsi que les conditions initiales et aux limites du modèle associées à ces simulations prospectives sont présentées ci-après.

2.1. DETAILS DES QUATRE SCENARIOS DE PRELEVEMENT

Plusieurs scénarios, même non opérationnels, semblent intéressants à modéliser pour apprécier le comportement hydrodynamique de la nappe selon l'intensité des prélèvements ainsi que leur variation spatiale et/ou temporelle :

- **Scénario 1 : arrêt complet** de tous les prélèvements dans la nappe à partir de 2018 pour évaluer la capacité de remontée de nappe optimale ;
- **Scénario 2 : prélèvements constants moyens** obtenus en supposant le maintien de la situation actuelle à partir de 2018. La situation actuelle peut être définie par la situation moyenne sur la période 2013-2017, pendant laquelle a eu lieu l'inflexion à la hausse du niveau piézométrique sur la partie captive. En fonction des hypothèses posées pour combler les lacunes dans la base de données des prélèvements trois situations semblent possibles pour calculer les prélèvements moyens ;
 - o 2a : moyenne des débits de 2013 à 2017 ;
 - o 2b : moyenne des débits de 2013 à 2017 incluant l'analyse de sensibilité effectuée sur certains forages français ;
 - o 2c : moyenne des débits de 2012 à 2016 plus représentative de la situation actuelle d'après les principaux partenaires concernés par l'exploitation de la

nappe ;

- **Scénario 3 : prélèvements constants maximums** supposant l'utilisation de l'intégralité des volumes annuels autorisés d'après l'arrêté gouvernemental relatif à chaque forage-prélèvement. Deux scénarios sont distingués selon l'ouverture de deux nouvelles carrières, actuellement en projet mais cependant aux prélèvements d'eau associés autorisés, ;
 - o 3a : maximum sans rajout des prélèvements d'eau associés aux deux nouvelles carrières ;
 - o 3b : maximum avec rajout des prélèvements d'eau associés aux deux nouvelles carrières dès 2020 ;
- **Scénario 4 : prélèvements variant** basés sur les évolutions jugées crédibles par les principaux partenaires concernés par l'exploitation de la nappe à partir de 2018 prenant en compte la fermeture et la création des forages ainsi que l'ouverture progressive des nouvelles carrières. Ce scénario a été co-construit avec les parties prenantes du groupe « eau souterraine » de la CIE.

*Les volumes annuels prélevés au total pour chaque scénario sont détaillés dans le * volumes annuels maximaux atteints sur la période 2018-2050 - ** volumes annuels supérieurs aux volumes exploités historiques*

Tableau 3. Selon l'hypothèse considérée pour le calcul des volumes moyens, le scénario 2 montre un écart de 5Mm³/an de volume total prélevé. Le scénario 3 indique un volume total largement supérieur aux 100Mm³/an maximum prélevés connus d'après les volumes prélevés historiques recensés depuis 1900 (150-160Mm³/an). Le scénario 4 présente une hausse des prélèvements par rapport à la situation moyenne du scénario 2 essentiellement due à la prévision d'exploitation des carrières (~10M³/an) et à celle d'une légère hausse des prélèvements français (~2-4Mm³/an).

	Constant Moyen 2013 à 2017	Constant Moyen 2013 à 2017 Sensibilité FR	Constant Moyen experts FR-BE	Constant Maximum autorisé**	Constant Maximum autorisé** avec nouvelles carrières	Variant* Évolution tangibile FR-BE
	Scénario 2a	Scénario 2b	Scénario 2c	Scénario 3a	Scénario 3b	Scénario 4
TOTAL FRANCE m ³ /an	15 702 351	18 387 707	17 930 554	24 805 658	24 805 658	20 103 034
TOTAL BELGIQUE m ³ /an	49 008 226	49 008 226	50 507 815	105 332 118	105 332 118	49 524 302
CARRIERES m ³ /an	8 547 175	8 547 175	9 619 133	18 198 509	31 698 509	19 011 361
TOTAL CARBONIFERE m ³ /an	73 257 751	75 943 107	78 083 856	148 336 285	161 836 285	88 638 697

* volumes annuels maximaux atteints sur la période 2018-2050 - ** volumes annuels supérieurs aux volumes exploités historiques

Tableau 3. Répartition des volumes totaux prélevés selon les 4 scénarios, entre les forages français, belges et les prélèvements en carrière (m³/an).

Le détail des variations des volumes prélevés en chaque forages/ouvrages est détaillé pour chaque scénario en annexe XXX.

2.2. MODELE HYDRO-CLIMATIQUE PROSPECTIF 2018-2050

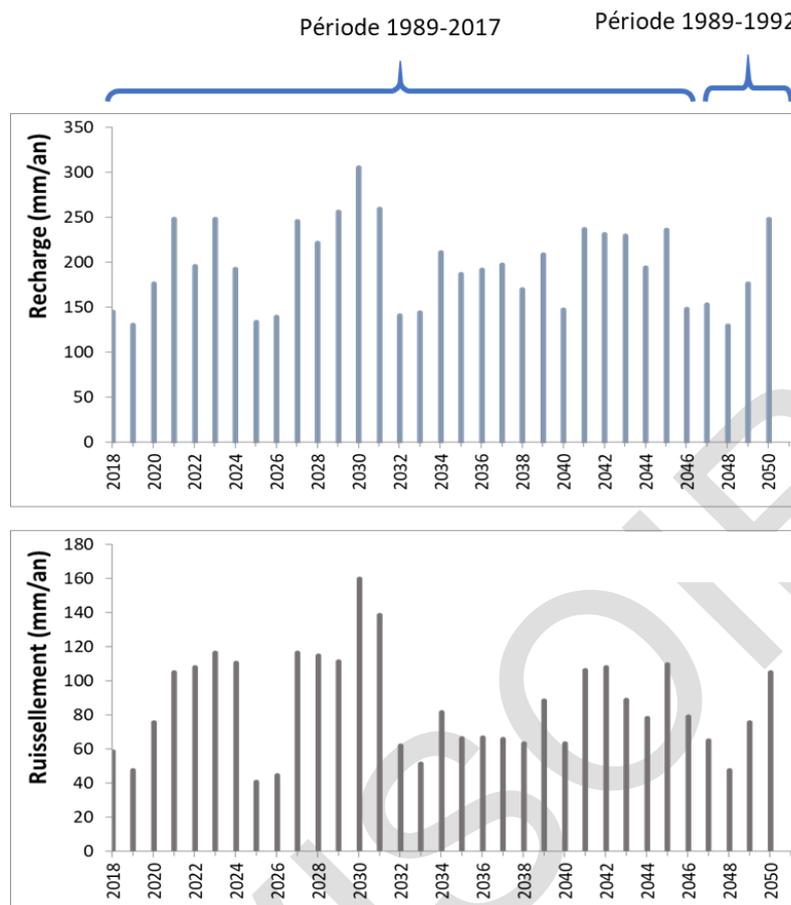
Le modèle hydroclimatique choisi pour les simulations prospectives reprend les variations journalières de pluies et ETP connues de 1989-2017 des 8 stations identifiées dans le modèle existant (Annexe 1). A partir du 1/1/2018 sont appliquées au modèle prospectif les chroniques de pluies et d'ETP connues par le passé jusqu'au 31/12/2050 comme indiqué sur le Tableau 4. De cette manière, vingt années de variations sont reproduites successivement dans le modèle prospectif ce qui permet de prendre en compte des variations naturelles climatiques connues par le passé tout en considérant des périodes extrêmes que sont la période sèche de 1997 et la période humide de 2001.

Le modèle hydroclimatique et les données de pluies et ETP sont identiques dans les différentes simulations des scénarios 1 à 4 de prélèvement.

Pas de temps journaliers du modèle	Chroniques de données journalières associées
01/01/2018 au 31/12/2046	01/01/1989 au 31/12/2017
01/01/2047 au 31/12/2050	01/01/1989 au 31/12/1992

Tableau 4. Correspondance des chroniques de données de pluie et ETP journalières par pas de temps du modèle prospectif

A partir des précipitations, ETP et des paramètres de sol indiqués, le modèle calcule sur la période prospective de 2018 à 2050 les hauteurs d'eau s'infiltrant dans le sol et se partageant entre la recharge (Figure 13 haut) atteignant la nappe superficielle et le ruissellement (Figure 13 bas) rejoignant les mailles des cours d'eau en suivant les directions de drainage précisées dans le modèle.



2.3. ETAT INITIAL ET CONDITIONS AUX LIMITES DU MODELE PROSPECTIF

L'état hydrogéologique initial du modèle prospectif est celui calculé par le modèle mis à jour à la date du 31/12/2017. Toutes les conditions aux limites et contraintes fixées au modèle prospectif sur la période 2018-2050 restent identiques au modèle mis à jour c'est-à-dire :

- Charges imposées sur la bordure est du modèle en lien avec la Dendres ;
- Charges imposées sur la surface de la couche 2 d'après les résultats du modèle régional de l'aquifère crayeux lui-même exploité sur la partie française ;
- Débits imposés en amont des cours d'eau n'ayant pas leur bassin versant inclus dans le domaine modélisé (Deûle, Marque et Escaut)

Les seules contraintes modifiées dans le modèle prospectif concernent :

- Les débits prélevés dans l'aquifère des calcaires carbonifères (couche 4 du modèle) qui sont définis selon le scénario de prélèvement considéré (scénarios 1 à 4) ;
- Les débits injectés dans l'aquifère des calcaires carbonifères simulant les pertes de Kain des années 1970 qui ne sont pas reproduites pendant la phase prospective de simulation 2018-2050 ;

PROVISOIRE

3. Résultats des simulations prospectives

Les quatre scénarios prospectifs et leurs variantes sont simulés de 2018 à 2050 et les résultats sont présentés en terme de bilans hydriques calculés à l'échelle de l'hydrosystème et à l'échelle de la couche n°4 représentant l'aquifère des calcaires carbonifères en chaque pas de temps (mensuel), puis en terme d'évolution piézométrique en chaque ouvrage identifié comme pertinent lors de la phase de calibration du modèle, et enfin en terme de débits de rivière en certains points des cours d'eau ayant une station de mesure ou non.

Tous les résultats ne sont pas représentés dans ce document mais sont accessibles via les fichiers numériques du modèle l'accompagnant (modèle prospectif et résultats associés partagés aux parties prenantes de la CIE).

3.1. VERIFICATION DE LA REPRESENTATION DES SCENARIOS PAR LE MODELE HYDRODYNAMIQUE

Avant toute présentation et discussion des résultats de simulation, il est pertinent de vérifier que le modèle est adapté à la simulation des scénarios qui lui sont imposés. Pour les quatre scénarios étudiés qui concernent les prélèvements en eau dans l'aquifère, il faut s'assurer que le modèle soit capable de maintenir les prélèvements fixés. Le scénario 1 qui n'impose aucun prélèvement au modèle n'est pas concerné par cette problématique de différence de volumes prélevés imposés et calculés contrairement aux autres scénarios. La Figure 14 montre que le modèle représente correctement les volumes prélevés imposés pour les scénarios 2 et 4 avec moins de 2% de différence entre les volumes fixés et calculés (moins de 5% en fin de simulation pour le scénario 4). Par contre pour le scénario 3 qui est censé simuler des volumes prélevés aux valeurs maximales autorisées (estimées souvent théoriquement, dont le total dépasse les volumes prélevés historiques), c'est plus de 10% des volumes qui ne sont pas considérés par les calculs. En ne tenant pas compte des prélèvements associés aux nouvelles carrières, l'écart est réduit à 3% en début de simulation mais dépasse les 10% de volumes prélevés impossibles à atteindre par le modèle en fin de simulation. Les résultats de simulation du scénario 3 sous-évaluent les prélèvements fixés et restent alors discutables.

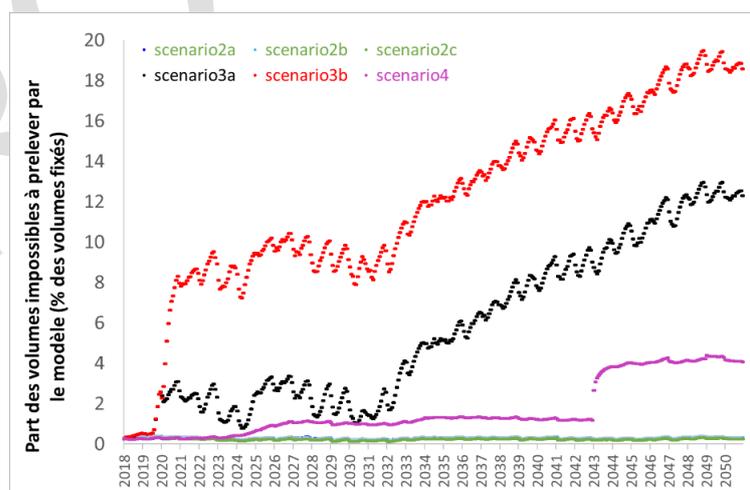


Figure 14. Proportion des volumes impossibles à prélever par le modèle dans la couche 4 aquifère carbonifère pour chaque scénario et variantes associées (scénario 2a.b.c : volumes prélevés moyens constant ; scénario 3a.b. : volumes maximums autorisés constant ; scénario 4 : volumes probables futurs variant).

3.2. BILANS HYDRIQUES PROSPECTIFS SIMULES

Pour chaque scénario les bilans hydriques sont présentés d'une part à l'échelle de l'hydrosystème considérant les quatre couches le composant, et d'autre part, à l'échelle de la couche aquifère carbonifère (couche n°4 de l'hydrosystème). La représentation des bilans hydriques à l'échelle de chaque masse d'eau n'a pas été représentée dans ce rapport mais les calculs peuvent être éditer en ce sens. Le bilan hydrique permet de mettre en avant les volumes d'eau entrant et sortant du système. Dans la suite du document, les graphiques présenteront :

- Les volumes d'eau entrant signalés positivement pouvant provenir de la recharge (*Recharge_Maill*), des échanges nappe-rivière (*Glob_Riv_Nappe*), des charges imposées aux limites via la Dendre et la nappe de la craie (*Glob_Limites*) et des injections (liées aux effondrements karstiques par exemple, non considérées dans ces simulations prospectives) ;
- Les volumes d'eau sortant indiqués négativement pouvant provenir des prélèvements en nappe (*Glob_Intern_fix*), des échanges nappe-rivière (*Glob_Riv_Nappe*), des charges imposées aux limites via la Dendre et la nappe de la craie (*Glob_Limites*) et des débordements de nappe (*Débord/Suitem*) ;
- La capacité de stockage de l'aquifère qui intervient également dans l'équilibre du bilan hydrique du système en indiquant soit les volumes stockés, signalés positivement, soit ceux déstockés, signalés négativement (*Glob_Stock*).

3.2.1. A l'échelle de l'hydrosystème (quatre couches)

Le bilan hydrique à l'échelle de l'hydrosystème montre pour tous les scénarios (Figure 15 et Annexe 5) une entrée d'eau importante due à la recharge (200-500Mm³/an) et une sortie d'eau associée représentée par le débordement de nappe (150-400Mm³/an). Ces deux termes du bilan varient périodiquement avec les cycles de recharge (selon les pluies imposées au modèle). Une part importante de sortie d'eau (80-100Mm³/an) moins influencée par la variation de recharge, s'effectue via les charges imposées aux limites du modèle (Dendre et nappe de la craie). Une part constante d'eau entre globalement depuis les rivières dont les volumes dépendent des scénarios (10-80Mm³/an). Les stockages et déstockages d'eau varient (0-100Mm³/an) en fonction de la recharge mais aussi des prélèvements qui sortent du système en fonction des scénarios (0-130Mm³/an).

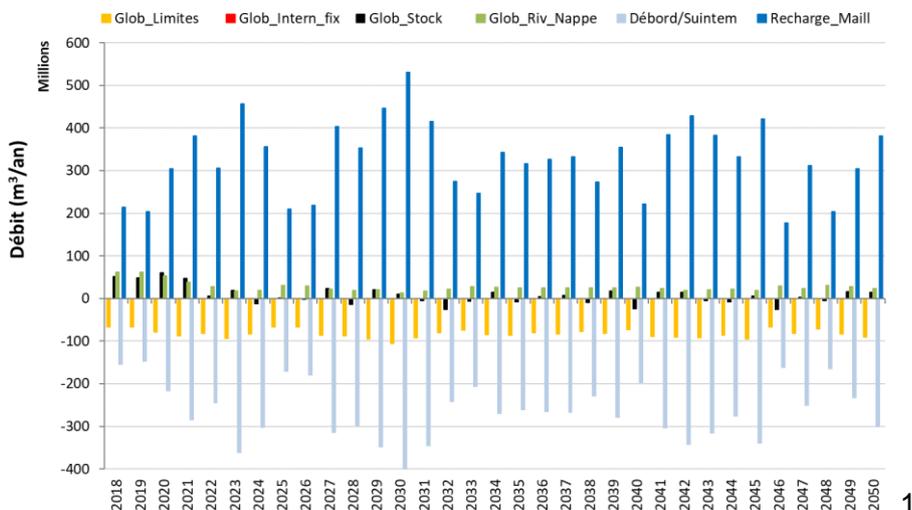


Figure 15 : Evolution des termes du bilan hydrique calculé de 2018 à 2050 à l'échelle de l'hydrosystème pour le scénario 1 avec arrêt des prélèvements (Les valeurs positives indiquent une entrée d'eau et les valeurs négatives une sortie d'eau dans l'hydrosystème).

Afin de mieux percevoir l'impact des prélèvements imposés en chaque scénario, les termes du bilan de chaque simulation sont comparés à ceux calculés pour le scénario n°1 représentant l'« équilibre » de l'hydrosystème. Ainsi sur la Figure 16 sont représentées les différences entre l'état d'équilibre (scénario 1) et l'état exploité par les scénarios 2a, 3a et 4 respectivement.

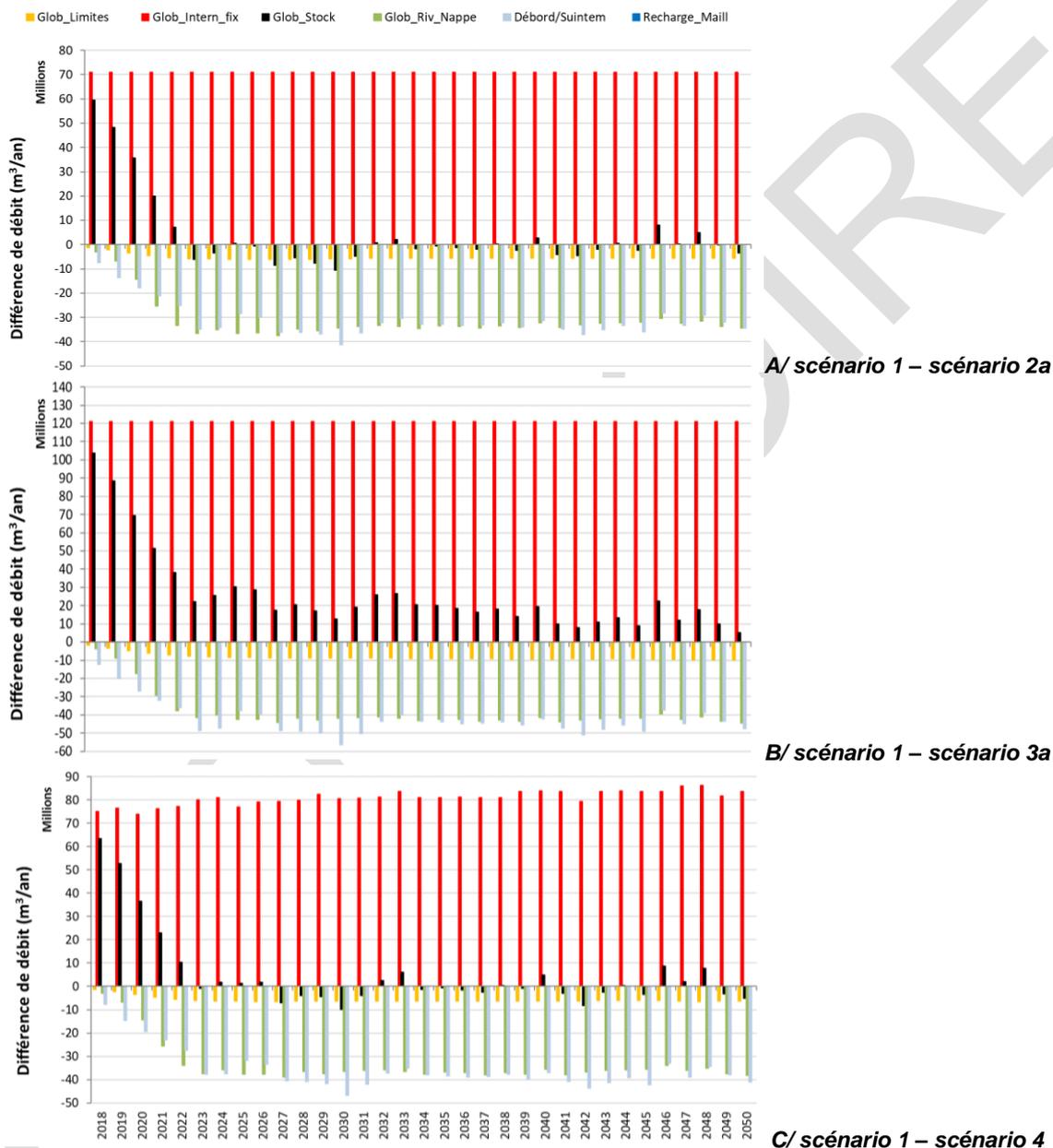


Figure 16 : Evolution de la différence des termes du bilan hydrique calculé de 2018 à 2050 à l'échelle de l'hydrosystème entre l'état d'équilibre (scénario 1) et l'état exploité par les scénarios 2a, 3a et 4 (A, B, C).

Cette représentation graphique d'identifier l'impact de l'ampleur des prélèvements sur l'hydrosystème à savoir :

- une diminution des sorties d'eau par les charges imposées aux limites du modèle (5-10Mm³/an) que sont la nappe de la craie (exploitée sur la partie française aquifère) et la Dendre orientale ;

- une diminution des sorties d'eau par débordement (30-55Mm³/an) ;
- une augmentation des entrées d'eau (jusqu'à 40Mm³/an) depuis les cours d'eau ;
- une augmentation des volumes déstockés les cinq premières années par les scénarios de prélèvement (ou plutôt une augmentation des volumes stockés les cinq premières années d'arrêt des prélèvements par le scénario^o1) avec un déstockage permanent pour le scénario n°3 (10-30Mm³/an).

Ces modifications du bilan hydrique dues aux prélèvements auront des conséquences attendues telles que la baisse des débits des cours d'eau (diminution des débordements de nappe, diminution des sorties d'eau aux charges imposées à la Dendre orientale, augmentation des échanges rivière vers nappe), la baisse d'alimentation de la nappe de la craie sur la partie française et enfin la baisse piézométrique en continue dans le cas de prélèvements très importants (augmentation et permanence du déstockage). Un rééquilibrage des niveaux piézométriques est pressenti en l'espace de cinq ans avec l'arrêt de tous les prélèvements (différence de stockage au début des simulations).

3.2.2. A l'échelle de la couche aquifère carbonifère (couche n°4)

Le bilan hydrique à l'échelle de la couche aquifère carbonifère est calculée pour l'ensemble des scénarios en différentes périodes des simulations prospectives : 2018-2025 ; 2018-2040 et 2018-2050 (Tableau 5).

La recharge directe de la nappe du carbonifère est de 10-11M³/an et représente 3% de la recharge de l'hydrosystème puisque la couche n'est quasiment pas affleurante sur le domaine modélisé, c'est-à-dire en contact direct avec l'atmosphère.

Par contre la recharge indirecte de la nappe est réalisée en partie par les « échanges verticaux », écoulements descendants via les couches sus-jacentes, et en partie par les « échanges nappe-rivière », écoulement transitant de la rivière vers la nappe. Les volumes échangés verticalement varient de 27M³/an à 93Mm³/an selon le scénario considéré. Plus les prélèvements sont importants, plus la recharge indirecte est importante. 4% des volumes en provenance des rivières atteignent la nappe du carbonifère en l'absence de prélèvements, puis augmentent respectivement à 8.5% et 11% pour les scénarios 2a et 3a, provoquant alors une perte de débit dans les cours d'eau.

La nappe du carbonifère restitue des volumes d'eau non négligeable vers la surface, soit par « débordement » (volumes calculés lorsque la charge hydraulique est supérieure à la cote topographique), soit par la « limite à potentiel imposé » au niveau de la Dendre. Les volumes de débordement de la nappe du carbonifère représentent 10% des volumes totaux débordant de l'hydrosystème et diminuent avec la croissant des prélèvements. Ils ne représentent plus que 6% pour le scénario 2a puis 3% pour le scénario 3a. Les volumes sortant par la limite à potentiel imposé (Dendre) diminuent également avec l'augmentation des prélèvements. Ils passent respectivement de 6%, 5% puis 3% du scénario 1, 2a puis 3. La perte des volumes par débordement et sortant par la limite à potentiel imposé augmentent la perte de débit dans les cours d'eau.

Enfin, la variation de stockage de l'eau dans l'aquifère carbonifère, couche 4, est importante. En considérant l'arrêt des prélèvements, comme au scénario 1, 74% des volumes re-stockés dans l'hydrosystème s'effectuent dans la couche 4. Et lors de prélèvements très importants comme considérés dans le scénario 3a, les volumes déstockés sont situés à 100% dans l'aquifère carbonifère couche 4.

Carbonifère (Couche n°4) surface = 1672 km²	Débites par la limite à potentiel imposé (Drendre)	Prélèvements	Recharge	Débordement	Echanges verticaux	Echanges latéraux	Stockage	Echanges Nappe-Rivière
moyenne 2018-2025	-4 909	0	10 463	-25 509	40 646	-	22 085	2 224
moyenne 2018-2040	-5 499	0	10 904	-27 154	28 929	-	7 738	1 207
moyenne 2018-2050	-5 490	0	10 822	-27 267	26 934	-	5 537	1 171

a. Scénario 1

Carbonifère (Couche n°4) surface = 1672 km²	Débites par la limite à potentiel imposé	Prélèvements	Recharge	Débordement	Echanges verticaux	Echanges latéraux	Stockage	Echanges Nappe-Rivière
moyenne 2018-2025	-3 561	-75 651	10 463	-13 546	81 674	-	3 483	5 016
moyenne 2018-2040	-4 143	-75 651	10 904	-14 100	81 581	-	2 663	4 864
moyenne 2018-2050	-4 122	-75 651	10 822	-14 005	80 952	-	2 156	4 942

b. Scénario 2a

Carbonifère (Couche n°4) surface = 1672 km²	Débites par la limite à potentiel imposé	Prélèvements	Recharge	Débordement	Echanges verticaux	Echanges latéraux	Stockage	Echanges Nappe-Rivière
moyenne 2018-2025	-3 021	-131 317	10 463	-7 056	89 491	-	-27 982	6 291
moyenne 2018-2040	-3 597	-133 518	10 904	-7 297	92 639	-	-22 172	6 926
moyenne 2018-2050	-3 570	-133 873	10 822	-7 193	92 913	-	-18 848	7 175

c. Scénario 3a

Carbonifère (Couche n°4) surface = 1672 km²	Débites par la limite à potentiel imposé	Prélèvements	Recharge	Débordement	Echanges verticaux	Echanges latéraux	Stockage	Echanges Nappe-Rivière
moyenne 2018-2025	-3 562	-77 090	10 463	-12 590	81 802	-	3 283	5 076
moyenne 2018-2040	-4 146	-79 871	10 904	-11 571	82 068	-	2 359	5 236
moyenne 2018-2050	-4 124	-80 979	10 822	-11 069	81 545	-	2 002	5 410

d. Scénario 4

Tableau 5. Evolutions des termes du bilan hydrique (en 1000m³/an) calculé de 2018 à 2050 à l'échelle de la couche aquifère carbonifère – couche n°4 – pour chaque scénario 1, 2a, 3a et 4 (Les valeurs positives indiquent une entrée d'eau et les valeurs négatives une sortie d'eau dans la couche aquifère).

3.3. EVOLUTIONS PIEZOMETRIQUES PROSPECTIVES SIMULEES

Les résultats de simulation montrent que dans la partie nord-ouest la remontée des niveaux piézométriques était très rapide et importante en cas d'arrêt de tous les captages et inversement si les volumes atteignaient les autorisations maximales de prélèvements. Les résultats d'un scénario de maintien de la situation actuelle avec une moyenne des prélèvements fluctuante sur la période 2013-2017 (plusieurs scénario 2a, 2b et 2c aux volumes prélevés totaux variant de 71Mm³/an à 75.8Mm³/an) indiquaient une stabilité et légère hausse des niveaux piézométriques dans la partie nord-ouest. Enfin un dernier scénario 4 avait été simulé avec les hypothèses probables des prélèvements par les différents exploitants, carriers compris, avec une évolution temporelle des prélèvements ayant une moyenne 2018-2050 de l'ordre de 80 Mm³/an. Les résultats de ce scénario 4 avaient montré dans la piézométrie au nord-ouest une ressemblance aux résultats des scénarios 2a, b, c, alors que les prélèvements étaient plus importants de 9 à 5 Mm³/an. Ceci s'explique du fait que les augmentations étaient principalement dues aux évolutions des prélèvements en carrières qui se situent dans une zone sans incidences sur les transferts d'eau latéraux vers le nord-ouest. Cependant l'augmentation de ces prélèvements en carrière montrait un abaissement de la piézométrie sur la partie est de l'aquifère et des transferts d'eau vers la surface (assèchement de zones humides et rivières).

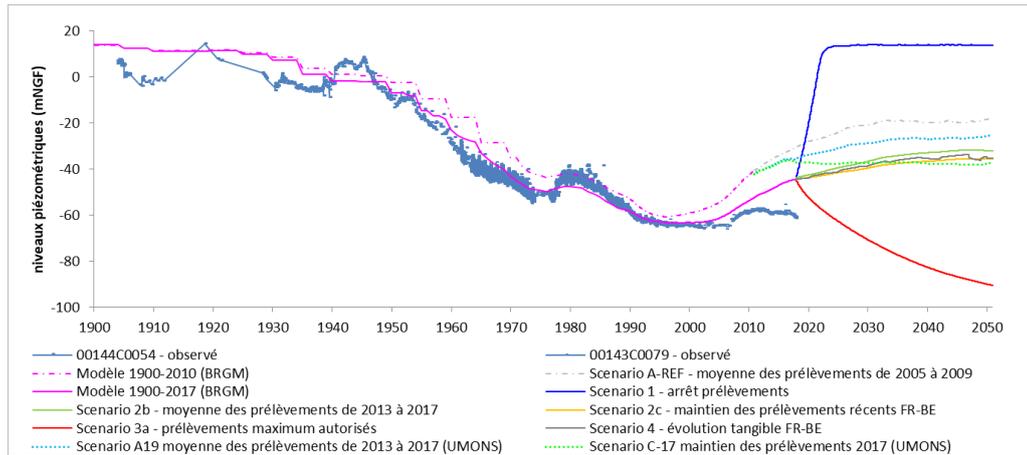


Figure 17 : Représentation des variations piézométriques au sein des calcaires carbonifères observées et calculées pour le piézomètre 00143C0079 de Bondues dans la partie captive nord-ouest (Picot-Colbeaux et al., 2014ab ; Picot-Colbeaux et al., 2020ab ; Goderniaux et al., 2018)

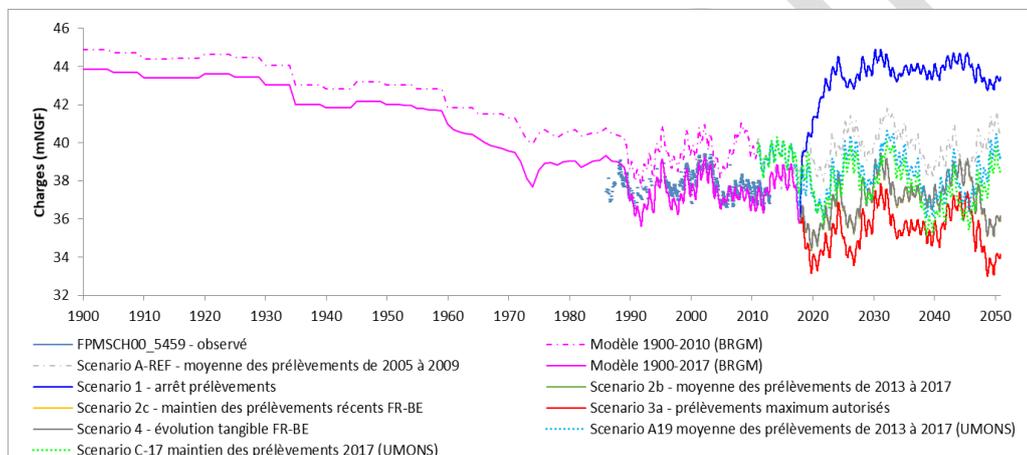


Figure 18 : Représentation des variations piézométriques au sein des calcaires carbonifères observées et calculées pour le piézomètre FPMSCH00-5459 dans la partie est (Picot-Colbeaux et al., 2014ab ; Picot-Colbeaux et al., 2020ab ; Goderniaux et al., 2018)

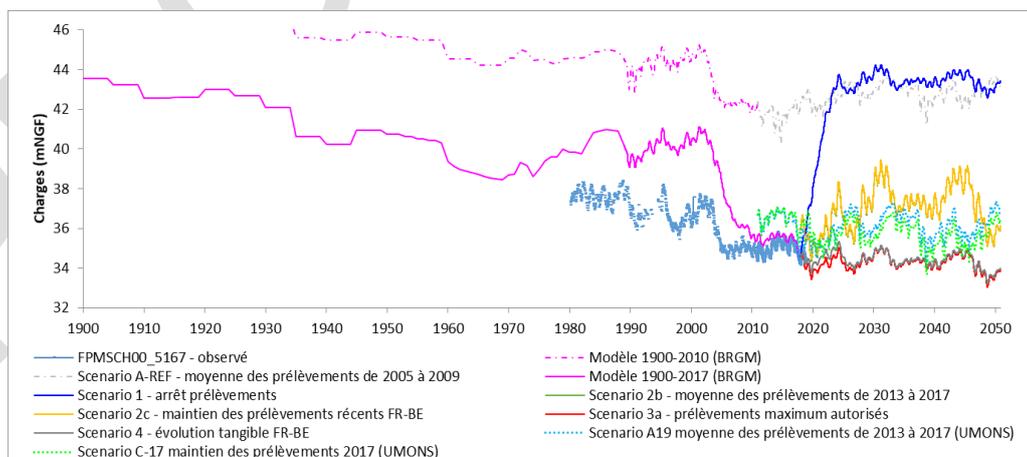


Figure 19 : Représentation des variations piézométriques au sein des calcaires carbonifères observées et calculées pour le piézomètre FPMSCH00-5167 dans la partie est (Picot-Colbeaux et al., 2014ab ; Picot-Colbeaux et al., 2020ab ; Goderniaux et al., 2018)

3.4. DEBITS DE RVIÈRES PROSPECTIFS SIMULES

L'évolution des débits des cours d'eau de la Deûle, de l'Escaut, de la Dendre Occidentale, du Rhosnes et de la Hunelle sont présentés en Annexe 6.

Les débits de la Deûle restent inchangés quel que soit le scénario de prélèvement considéré puisque le cours d'eau est localisé sur le domaine modélisé où la couche n°2 représentant la nappe de la craie exploitée sur la partie française est considérée comme limite à potentiel imposé. Les fluctuations exercées dans la nappe carbonifère sous-jacente n'ayant pas d'effet en surface.

Par contre les débits calculés par les autres cours d'eau sont influencés par les prélèvements. Plus les prélèvements considérés sont importants plus les débits des cours d'eau sont réduits, provoqués par les diminutions de débordement de nappe, les augmentations des échanges rivière vers nappe.

4. Conclusions et perspectives

Les scénarios prédictifs réalisés mènent aux enseignements suivants :

- Dans la partie captive, la remontée des niveaux piézométriques est rapide (~5 ans) en cas d'arrêt ou de baisse très importante de tous les captages (simulation 1 BRGM) ;
 - ➔ Levier d'action non négligeable par la réduction des prélèvements dans la zone ouest
- Le prélèvement d'eau souterraine à hauteur des autorisations maximales pour chaque captage mène à une diminution très importante des niveaux piézométriques (simulation scénario 3a BRGM) ;
 - ➔ Réflexion à mener sur les volumes maximaux autorisés
- Le maintien des prélèvements aux valeurs moyennes des volumes prélevés de la période 2010-2016 jusqu'en 2050 permet de maintenir les niveaux piézométriques stables, voire de les augmenter légèrement (scénarios A19 UMONS et 2b BRGM) ;
- Le maintien des prélèvements aux valeurs moyennes des volumes prélevés de 2017 jusqu'en 2050 induit une baisse des niveaux piézométriques (simulation scénario C-17 UMONS) ;
- Un scénario (scénario 4 – BRGM) intégrant l'évolution envisagée des prélèvements français et belges notamment ceux attendus de l'exhaure dans les carrières actuelles et à venir (scénario 4 – BRGM) montre un maintien, voire une légère augmentation des niveaux d'eau dans la partie captive, semblable au scénario 2b des prélèvements moyens de 2013 à 2017. Ce scénario implique une baisse importante de la piézométrie dans la partie est de l'aquifère mais il n'intègre cependant pas la hausse des prélèvements tels qu'observés durant ces trois dernières années de sécheresse ;
- L'impact des prélèvements sur les niveaux piézométriques n'est pas homogène sur l'aquifère et dépend des caractéristiques hydrogéologiques et dynamiques de l'aquifère. Cette différence au sein de la nappe montre qu'en terme de masse d'eau, l'équilibre des masses d'eau française 1015 et flamande 1300 est étroitement lié aux prélèvements et à leur principale alimentation via les apports latéraux de la masse d'eau wallonne RWE060. Par contre pour la masse d'eau wallonne RWE013, un rééquilibrage interne entre les entrées et les sorties ne se répercute pas sur les masses d'eau en aval, c'est-à-dire que les échanges latéraux sont équilibrés ;
- Les hausses de prélèvements ne se traduisent pas forcément immédiatement par une baisse piézométrique mais peuvent engendrer des déplacements de flux depuis la surface vers l'aquifère réduisant alors les débordements de la nappe et augmentant la drainance des terrains sus-jacents et les échanges des rivières vers la nappe. Les flux en surface se trouvent alors dégradés (zones humides, débits d'étiage, terrains aquifères sus-jacents).

Les modèles à disposition pourraient aider à mieux cerner les efforts de caractérisations d'écoulement à fournir par des études complémentaires en :

- Évaluant les impacts locaux des prélèvements liés à des groupes de forages, afin de d'estimer les prélèvements les plus influents sur les écoulements et les niveaux de la nappe ;

- Contraignant plus précisément le secteur des carrières ;
- Considérant le comportement transitoire de la nappe de la craie sus-jacente située sur la partie française via le modèle de la Craie régionale Nord-Pas-de-Calais ;
- Évaluant la sensibilité des flux de recharge et de ruissellement aux paramètres de sols notamment sur la partie est du modèle.

Enfin, il est important de noter les limites des connaissances actuelles et des modèles actuellement utilisés. Afin d'améliorer la compréhension de cet hydrosystème et sa gestion, il pourrait être envisager d'approfondir la caractérisation dans de futurs travaux de recherche :

- Des échanges nappe-rivières, en particulier l'Escaut et les zones d'effondrement ;
- Des échanges verticaux liés aux propriétés hydrodynamiques des terrains quaternaire-tertiaire sus-jacents pour la partie est et des terrains secondaires sus-jacents pour la partie ouest ;
- Des propriétés hydrodynamiques spatiales de l'aquifère, en particulier liées aux failles, diaclases et karstification des calcaires ;
- Du fonctionnement général du bloc sud du domaine et en particulier des échanges potentiels avec le houiller ou les couches aquifères tertiaires.

5. Références Bibliographiques

Youssof H., (1973): Hydrologie karstique du calcaire carbonifère de la Belgique et du nord de la France synthèse des données acquises en 1972. Thèse, Université de Lille, 120pp.

Mania J., (1974), Nappe du Calcaire carbonifère de la région Lille-Tournai. Observations sur l'utilisation d'un modèle permanent. BRGM 74 SGN 062 NPA, 22 pp.

Mania J., (1976), Modèle transitoire de la nappe au Calcaire Carbonifère de la région de Lille (Nord) à Tournai (Belgique). Simulation de l'alimentation artificielle. BRGM, Bulletin (2^e série), section III, n°1/2, pp 47-61.

Brouyère S., Ruthy I. et Orban Ph. al. (2006), L'état quantitatif et qualitatif des eaux souterraines en Région wallonne. Rapport EEW06/1, Faculté des Sciences Appliquées Département d'Architecture, Géologie, Environnement & Constructions Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement (ArGEnCo) - Université de Liège Secteur Géotechnologies, Hydrogéologie, Prospection géophysique (GEO³)

Besbes M., Talbot A., (1983), L'alimentation en eau potable de la métropole du Nord. Rapport BRGM, 83 SGN 589 NPC, 37pp.

Combes P. (1991), Modélisation mathématique de la nappe du calcaire carbonifère. Rapport LHM/RD/91/91, ENSMP 1991

Combes P. (1994), Gestion des ressources en eau potable. Evolution récente des niveaux de la nappe des calcaires du carbonifère et simulations d'exploitation à partir du modèle mathématique, Rapport Antea A01432.

SIDEHO et SGB (1992), G.T.H. Station de traitement des eaux pour le calcaire carbonifère, infrastructure de production, de stockage et de transport d'eau potable – Deuxième partie de l'étude préliminaire et conclusions. Ministère de la région wallonne, inspection générale de l'eau. 47pp.

Picot-Colbeaux G., Crastes de Paulet F., Thiéry D., Klinka T., avec la collaboration de Rorive A. et Bastien J. (2014)a, Modélisation maillée des écoulements souterrains de la nappe transfrontalière des calcaires carbonifères (France - Belgique). Rapport final, BRGM/RP- 63140 -FR, 139 p., 1 DVD.

Picot G., Crastes de Paulet F., Thiéry D., avec la collaboration de Rorive A. et Bastien J. (2014)b, Utilisation du modèle hydrogéologique des calcaires du Carbonifère pour évaluer l'impact des prélèvements à l'horizon 2050. Rapport final. BRGM/RP-63141-FR, 64 p., 46 fig, 6 tabl., 14 ann, 1 CD/DVD

Goderniaux P. et Guillaume M. (2018), Modélisation de la nappe transfrontalière des calcaires carbonifères. Rapport final du projet ScaldWIN 6. Projet SPW – UMONS - Polytech Mons, 59p (diffusion partielle).

Picot-Colbeaux G., M. Rousseau, M. Parmentier avec la collaboration de Guillaume M. et Goderniaux P. (2020)a – Actualisation du modèle maillé des écoulements souterrains de la nappe transfrontalière des calcaires carbonifères (France - Belgique). Rapport BRGM/RP-68738-FR

G. Picot-Colbeaux, M. Rousseau, M. Parmentier avec la collaboration de Guillaume M. et Goderniaux P. (2020)b – Utilisation du modèle hydrogéologique des calcaires du Carbonifère pour évaluer l'impact des prélèvements à l'horizon 2050. Rapport BRGM/RP-69781-FR

Rorive et Licour, (2017), Modélisation de la nappe transfrontalière des calcaires carbonifères. Rapport final du projet ScaldWIN 5. Projet SPW – UMONS - Polytech Mons, 52p.

Bastien J., Picot-Colbeaux G., Crastes-de-Paulet F., Rorive A., Bouvet A., Goderniaux P., Thiéry D. (2016), Sustainable management of transboundary water resources (Belgium/France) : Characterization and modelling of the Carboniferous aquifer. AGU conference, San Francisco, USA.

Rorive A. et Bastien J., (2016). Modélisation de la nappe transfrontalière des calcaires carbonifères. Rapport final du projet ScaldWIN 4. Projet SPW – UMONS - Polytech Mons, Juillet 2016, 66p.

Rorive A. et Bastien J., (2015)b, Modélisation de la nappe transfrontalière des calcaires carbonifères (masses d'eau souterraine E13 et E60) – Présentation des bilans hydrodynamiques par masse d'eau. Projet ScaldWIN 3. Projet SPW – UMONS - Polytech Mons, Juin 2015, 24p.

Rorive A. et Bastien J., (2015)a, Modélisation de la nappe transfrontalière des calcaires carbonifères (masses d'eau souterraine E13 et E60) – rapport sur l'amélioration du modèle BRGM. Projet ScaldWIN 3. Projet SPW – UMONS - Polytech Mons, Mars 2015, 38p.

Picot G., Crastes de Paulet F., Thiéry D., Klinka T., avec la collaboration de Rorive A. et Bastien J. (2014a) – Modélisation maillée des écoulements souterrains de la nappe transfrontalière des calcaires carbonifères (France - Belgique). Rapport final, BRGM/RP-63140-FR, 139p., CD/DVD.

Picot G., Crastes de Paulet F., Thiéry D., avec la collaboration de Rorive A. et Bastien J. (2014b) –Utilisation du modèle hydrogéologique des calcaires du Carbonifère pour évaluer l'impact des prélèvements à l'horizon 2050. Rapport final. BRGM/RP-63141-FR, 64 p., 46 fig, 6 tabl., 14 ann, 1 DVD.

Picot-Colbeaux G., M. Rousseau, M. Parmentier avec la collaboration de Guillaume M. et Goderniaux P. (2020) – Actualisation du modèle maillé des écoulements souterrains de la nappe transfrontalière des calcaires carbonifères (France - Belgique). Rapport BRGM/RP-68738-FR, 94 p., 88 fig., 5 ann.

Picot J. avec la collaboration de Dufrenoy R. (2012) Modélisation géologique dans la région Lilloise et du Tournaisis du toit de l'aquifère du Calcaire Carbonifère et des ensembles géologiques sus-jacents. Rapport BRGM/RP-61113-FR, 94 p., 25 fig., 4 ann.

Rorive A. et Bastien J. (2014) Modélisation de la nappe transfrontalière des calcaires carbonifères (Masses d'eau souterraine E013 et E060). Rapport sur la reprise et l'utilisation du modèle du BRGM. Convention RW – UMONS - Polytech Mons, Septembre 2014, 17p.

Rorive A. et Bastien J. (2015) Modélisation de la nappe transfrontalière des calcaires carbonifères (Masses d'eau souterraine E013 et E060). Rapport sur l'amélioration du modèle du BRGM. Convention SPW – UMONS - Polytech Mons, Mars 2015, 38p.

Rorive A. et Bastien J. (2016) Modélisation de la nappe transfrontalière des calcaires carbonifères. Rapport final du projet ScaldWIN 4. Projet SPW – UMONS - Polytech Mons, Juillet 2016, 66p.

Rorive A. et Licour L. (2017) Modélisation de la nappe transfrontalière des calcaires carbonifères. Rapport final du projet ScaldWIN 5. Projet SPW – UMONS - Polytech Mons, 52p.

Thiéry D. (2020a) – Code de calcul MARTHE version 7.8 - Modélisation 3D des écoulements et des transferts dans les hydrosystèmes - Notice d'utilisation. Rapport BRGM/RP-69541-FR, 339 p., 160 fig.

Thiéry D. (2020b) - Didacticiel du code de calcul MARTHE v7.8. Exploration des fonctionnalités de modélisation des écoulements et des transferts dans les hydrosystèmes. Rapport BRGM/RP-69542-FR. 381 p., 256 fig.

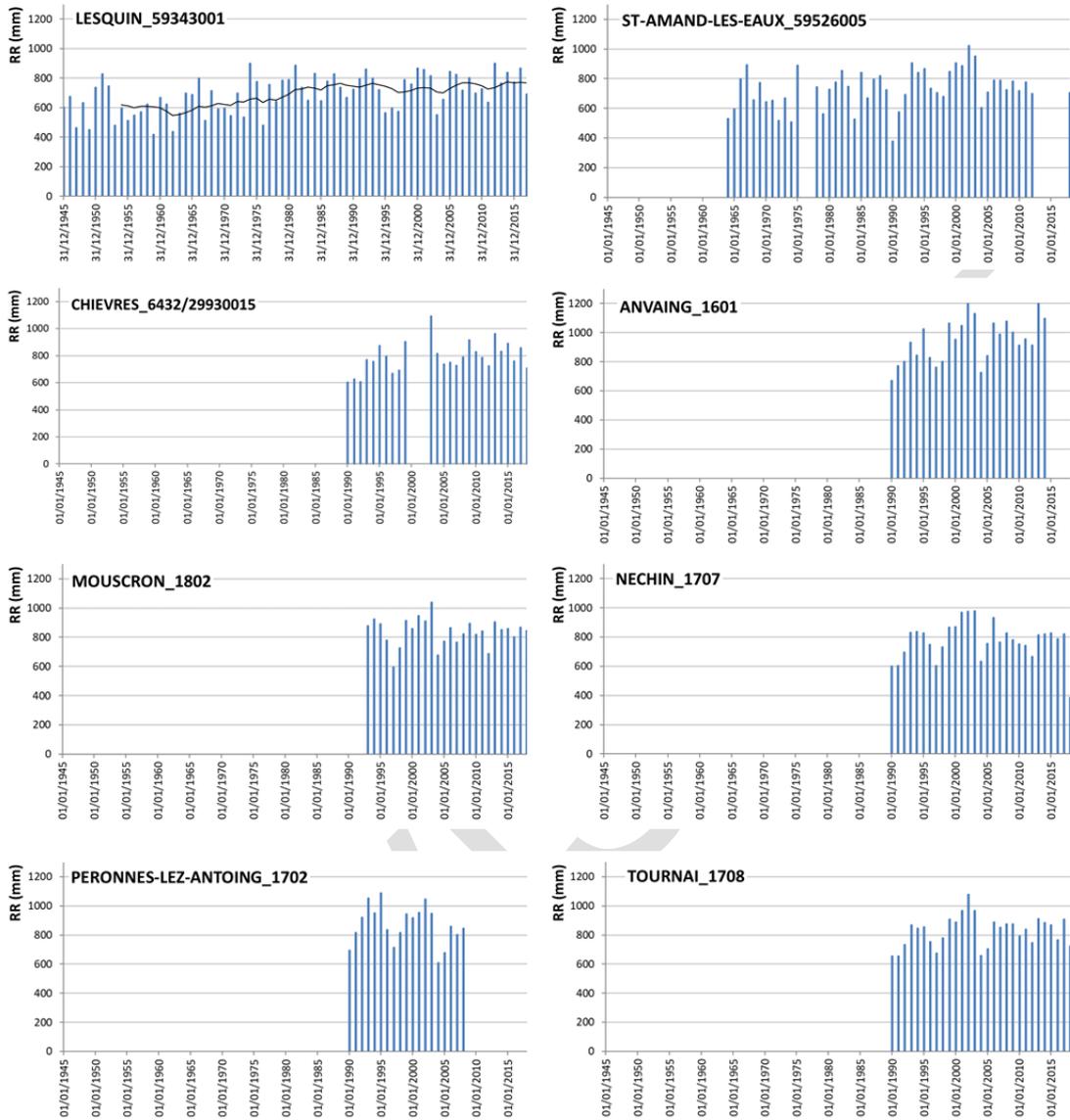
Thiéry D. (2006) - Didacticiel du pré processeur WinMarthe v4.0. BRGM/RP-54652-FR, 86 p., 55 fig.

PROVISOIRE

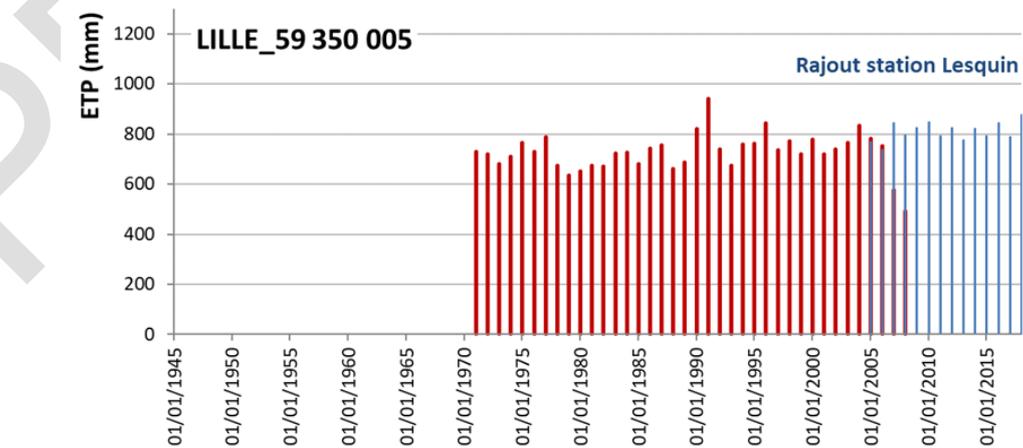
Annexe 1

Historiques de pluies et d'ETP

PROVISOIRE



Historiques des pluies brutes annuelles des stations de suivi météorologique.

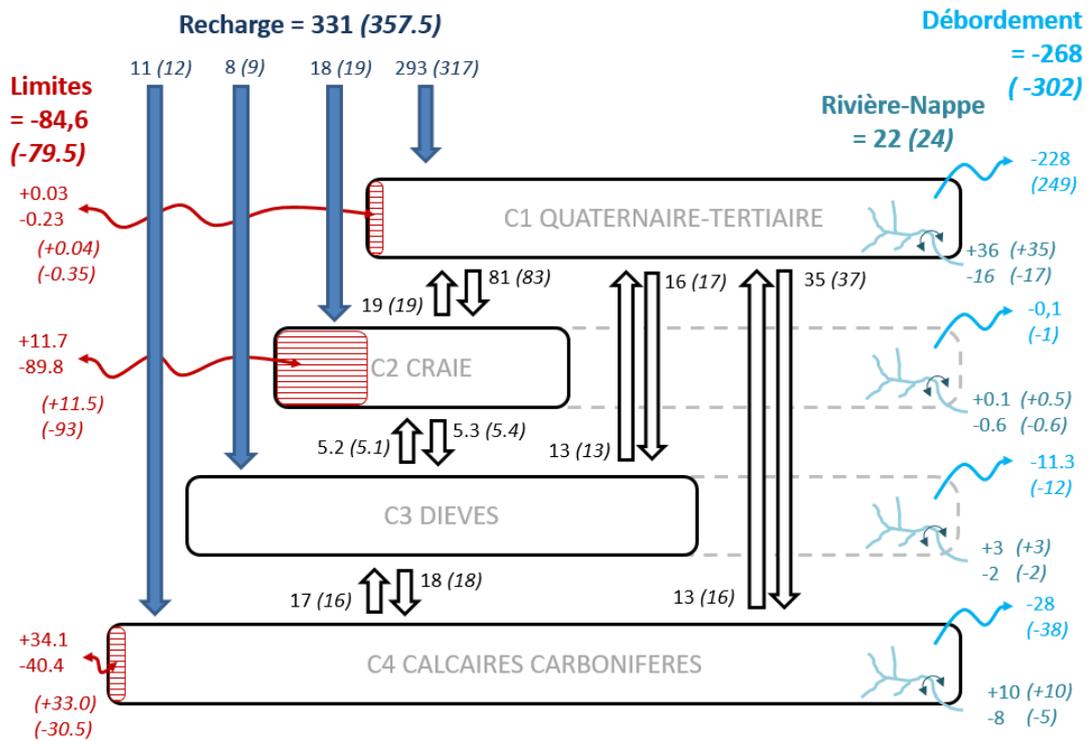


Historiques d'ETP (EvapoTranspiration Potentielle) des stations de suivi météorologique, à Lille (en rouge) et Lesquin (en bleu).

Annexe 2

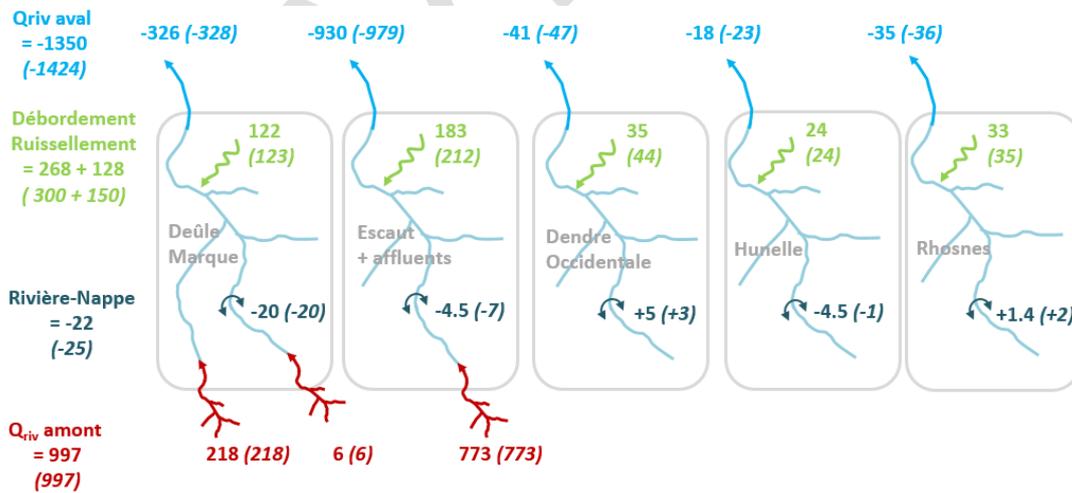
Bilans hydrodynamiques simulés

PROVISOIRE



HYDROSISTEME à l'état naturel (1900) - Mm^3/an - « version actualisée vs. version initiale (2014) »

Bilans hydrodynamiques calculés pour le modèle actualisé et mis à jour de 2019 comparés à ceux calculés par le modèle initial de 2014 (indication entre parenthèse), représentatif de l'état d'équilibre de l'hydrosystème sans prélèvements (unité en Mm^3/an ; valeurs > 0 indique une entrée d'eau dans l'hydrosystème ; valeur < 0 indique une sortie d'eau de l'hydrosystème).



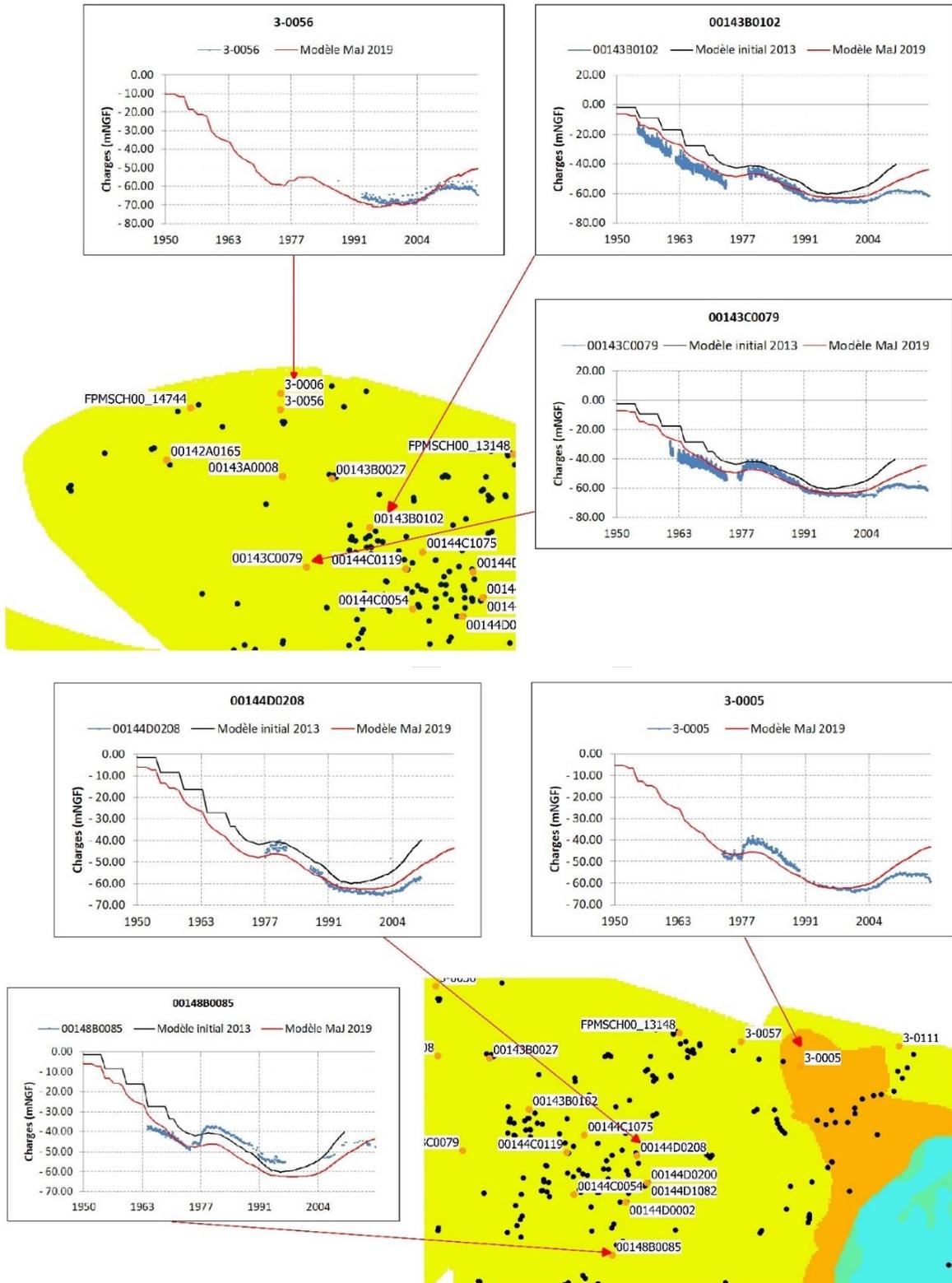
RESEAU HYDROGRAPHIQUE à l'état naturel (1900) - Mm^3/an

Bilans hydrodynamiques des cours d'eau calculés pour le modèle actualisé et mis à jour de 2019 comparés à ceux calculés par le modèle initial de 2014 (indication entre parenthèse), représentatifs de l'état d'équilibre de l'hydrosystème sans prélèvements (unité en Mm^3/an ; valeurs > 0 indique une entrée d'eau dans l'hydrosystème ; valeur < 0 indique une sortie d'eau de l'hydrosystème).

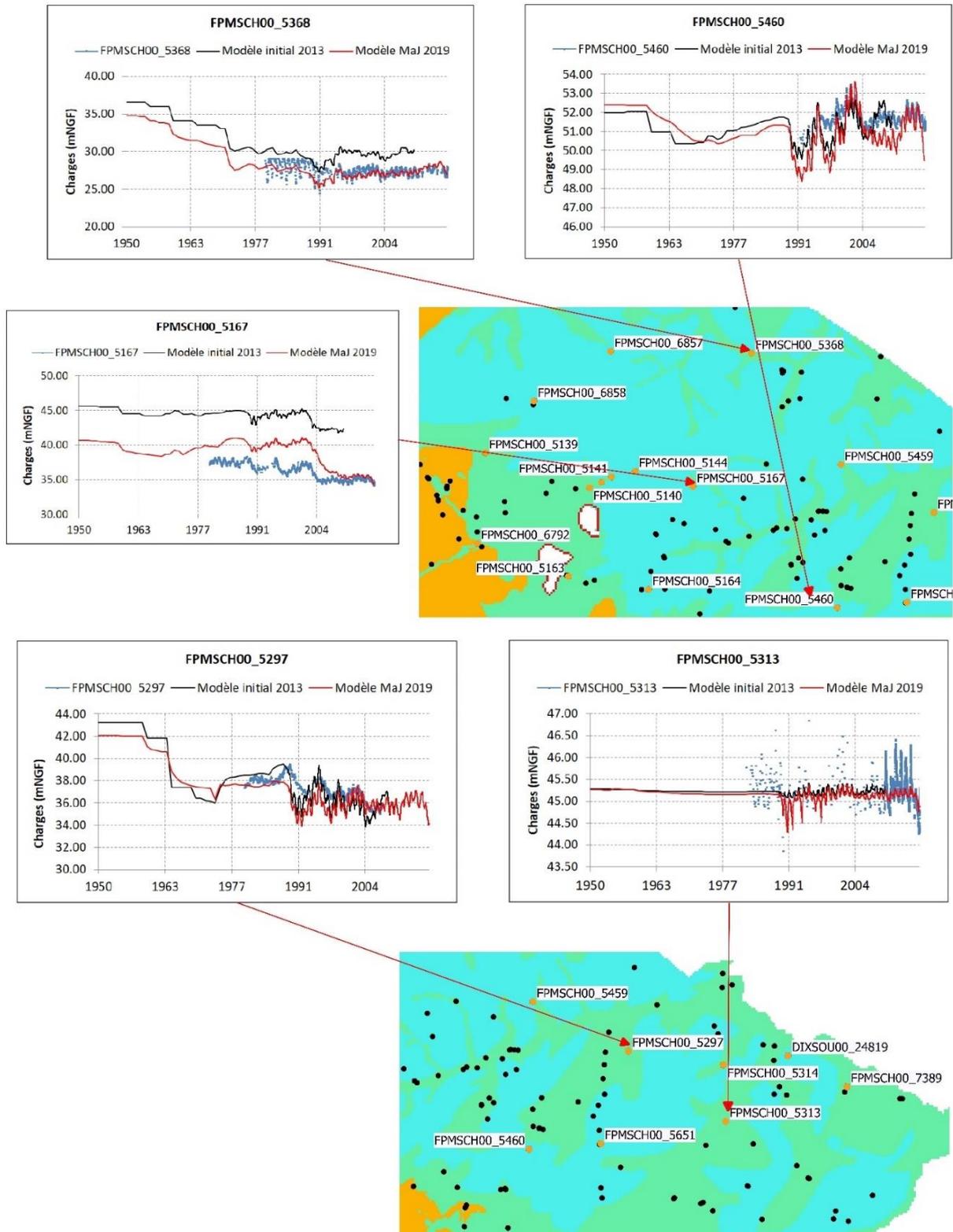
Annexe 3

Chroniques piézométriques simulées

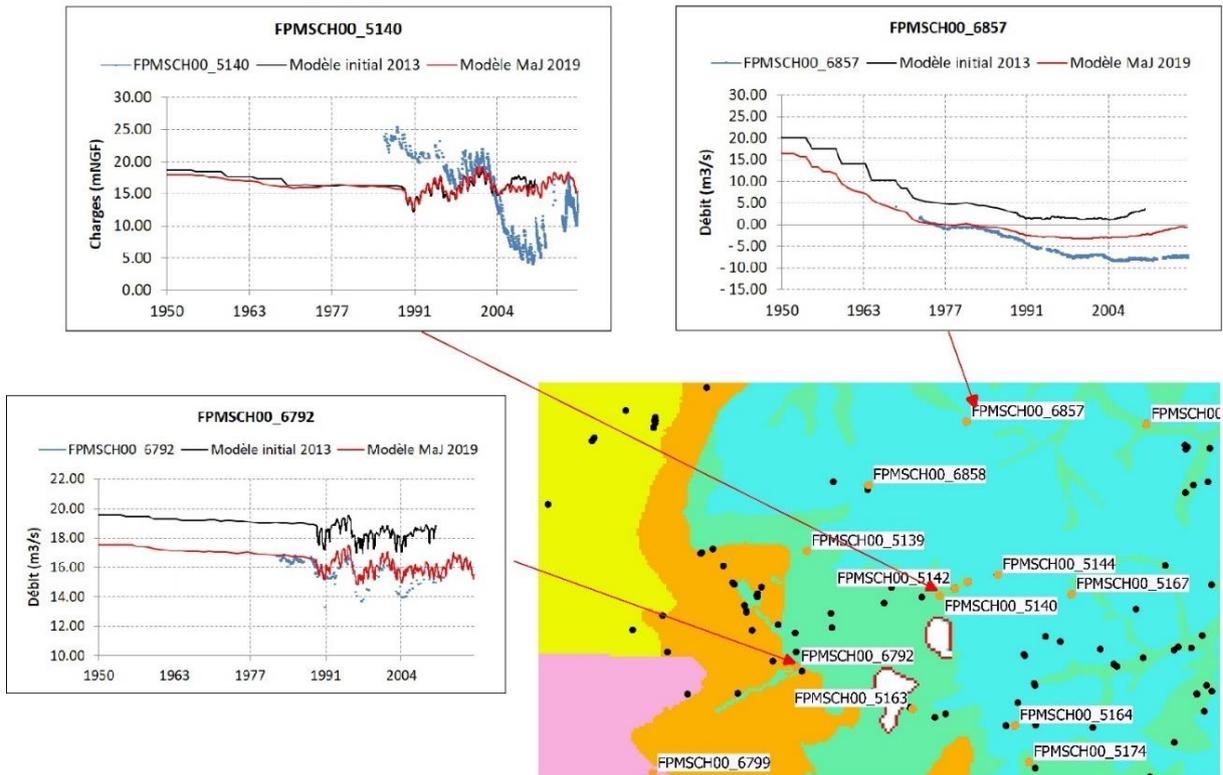
PROVISOIRE



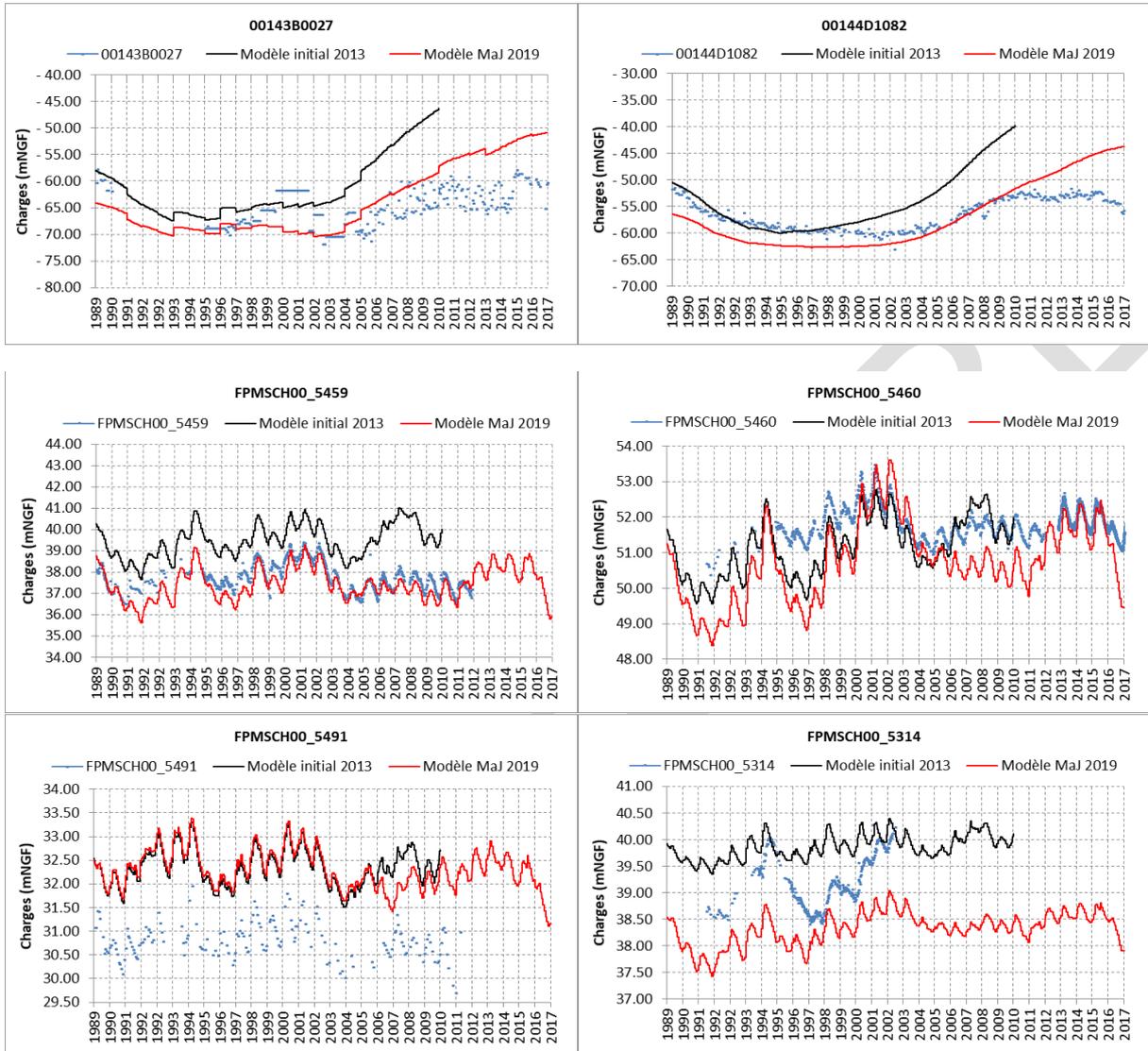
Comparaisons des évolutions piézométriques observées (points bleus et verts) et calculées par le modèle actualisé (ligne rouge) et le modèle initial (ligne noire) de 1900 à 2017 pour la partie captive Ouest de l'aquifère des calcaires carbonifères.



Comparaisons des évolutions piézométriques observées (points bleus) et calculées par le modèle actualisé (ligne rouge) et le modèle initial (ligne noire) de 1900 à 2017 pour la zone Est de l'aquifère des calcaires carbonifères.



Comparaisons des évolutions piézométriques observées (points bleus) et calculées par le modèle actualisé (ligne rouge) et le modèle initial (ligne noire) de 1900 à 2017 pour la zone centrale de l'aquifère des calcaires carbonifères et à proximité des carrières.

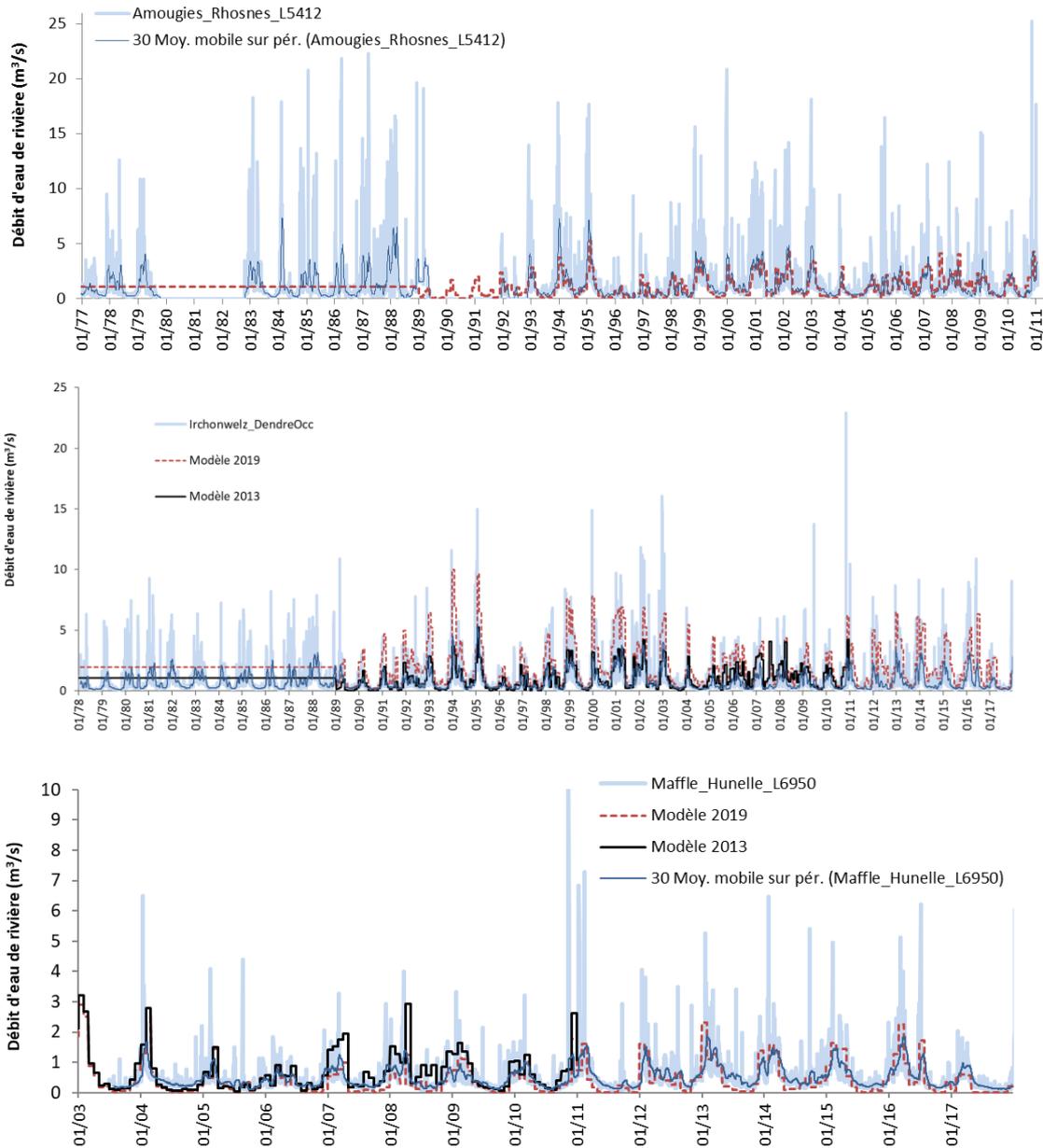


Comparaisons des évolutions piézométriques observées et calculées de 1989 à 2017 pour différentes parties de l'aquifère des calcaires carbonifères.

Annexe 4

Chroniques de débit de rivière simulées

PROVISOIRE

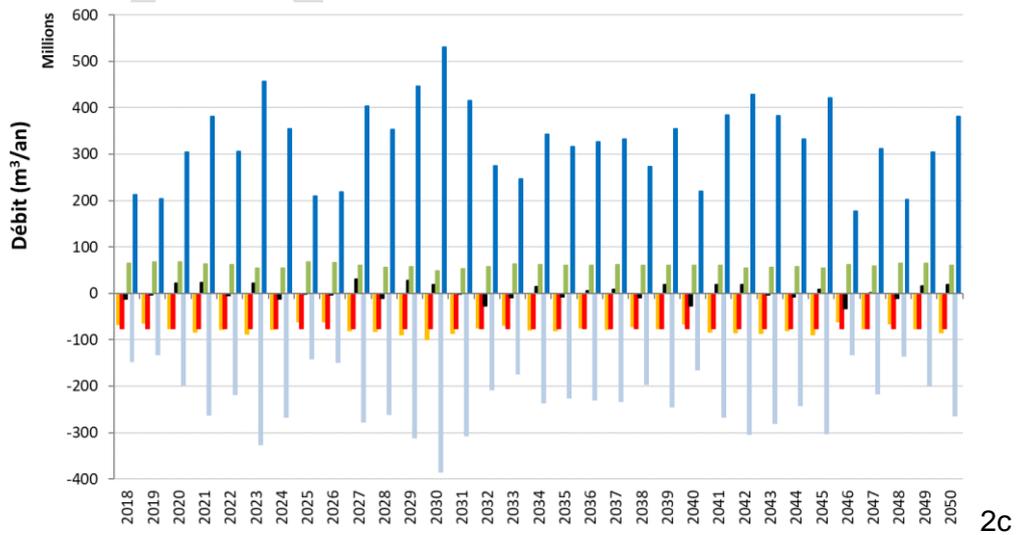
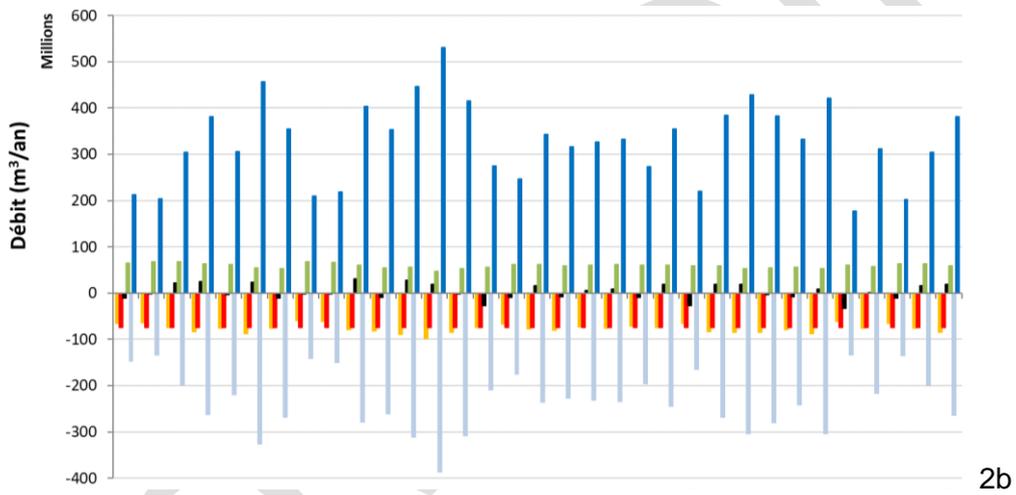
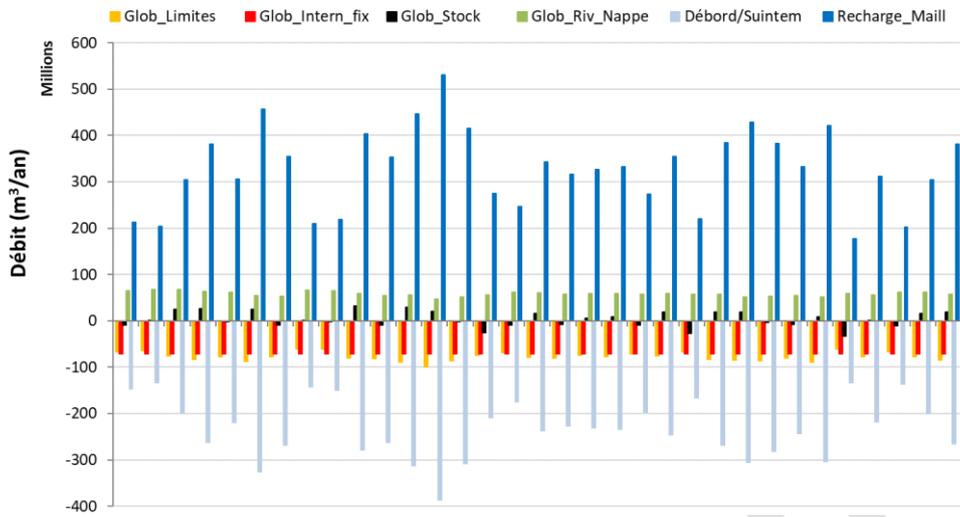


Evolution des débits journaliers des cours d'eau mesurés pour le Rhosnes, la Dendre Occidentale et la Hunelle comparés aux débits mensuels calculés par le modèle MARTHE en régime transitoire ; moyenne mensuelle sur 30j des données observées en ligne bleue foncée continue ; modèle actualisé et mis à jour de 2019 en ligne rouge pointillée ; modèle 2013 en ligne noire.

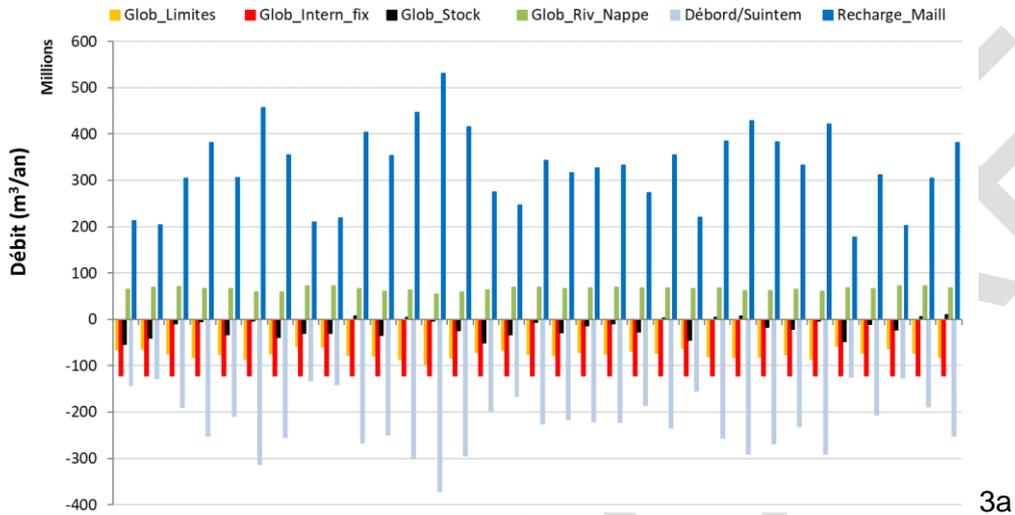
Annexe 5

Bilans hydriques prospectifs de l'hydrosystème

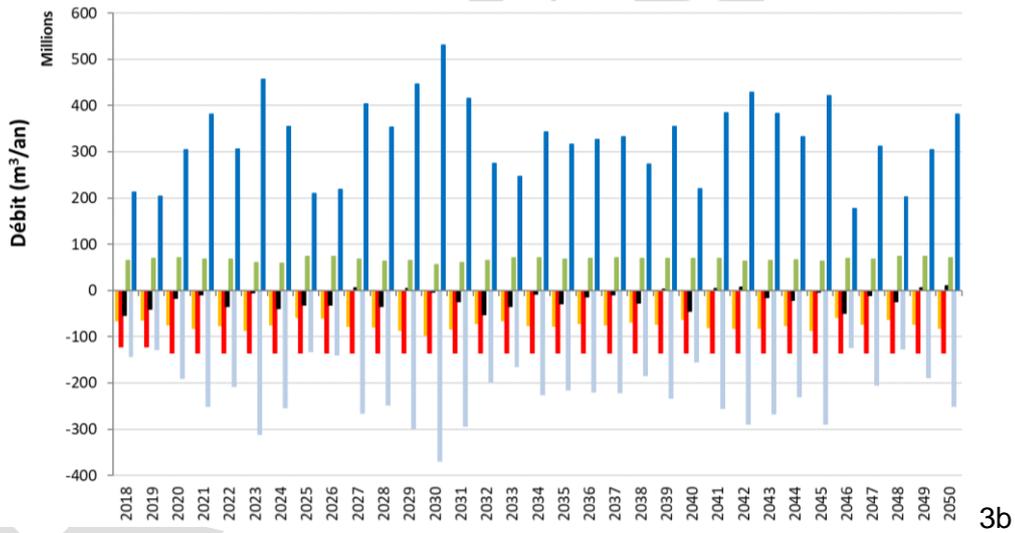
PROVISOIRE



Evolution du bilan hydrique du scénario 2 et de ses variantes (valeurs négatives indiquent une sortie d'eau de l'hydrosystème et valeurs positives indiquent une entrée d'eau dans l'hydrosystème)

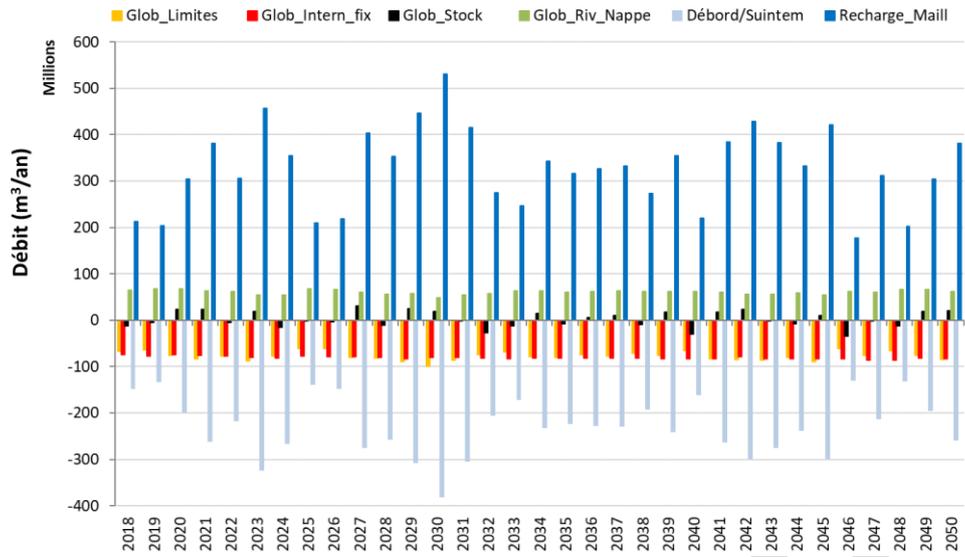


3a



3b

Evolution du bilan hydrique du scénario 3 et de ses variantes (valeurs négatives indiquent une sortie d'eau de l'hydrosystème et valeurs positives indiquent une entrée d'eau dans l'hydrosystème)

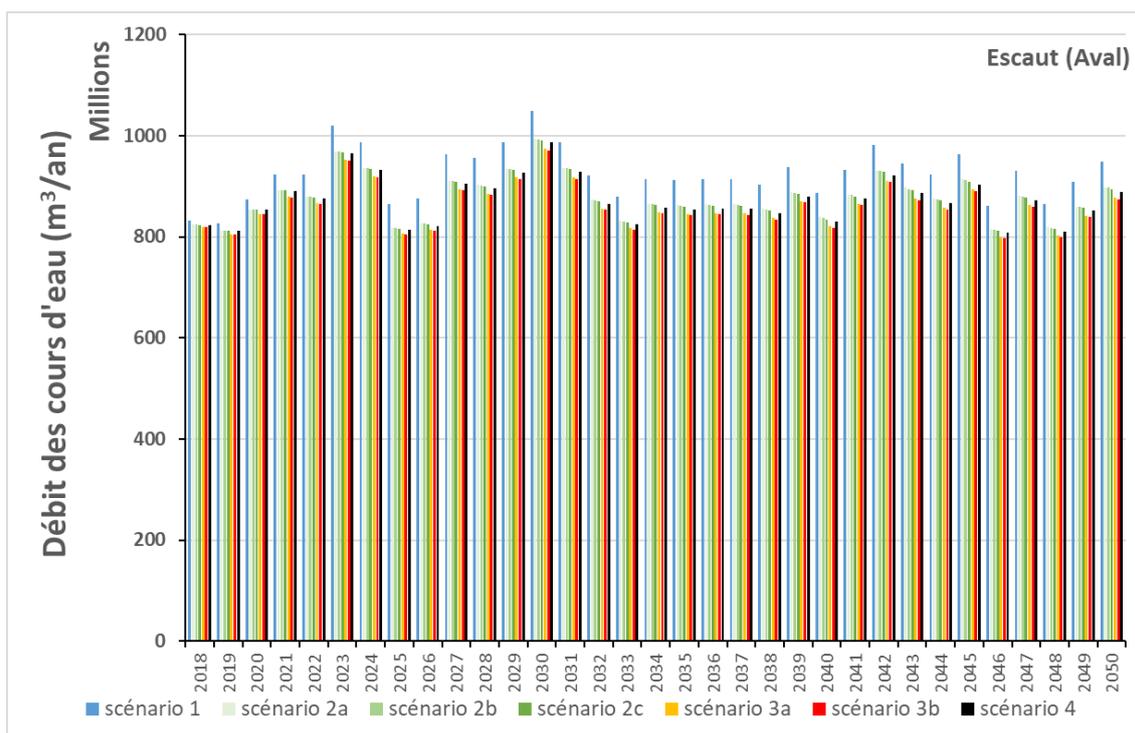


Evolution du bilan hydrique du scénario 4 (valeurs négatives indiquent une sortie d'eau de l'hydrosystème et valeurs positives indiquent une entrée d'eau dans l'hydrosystème)

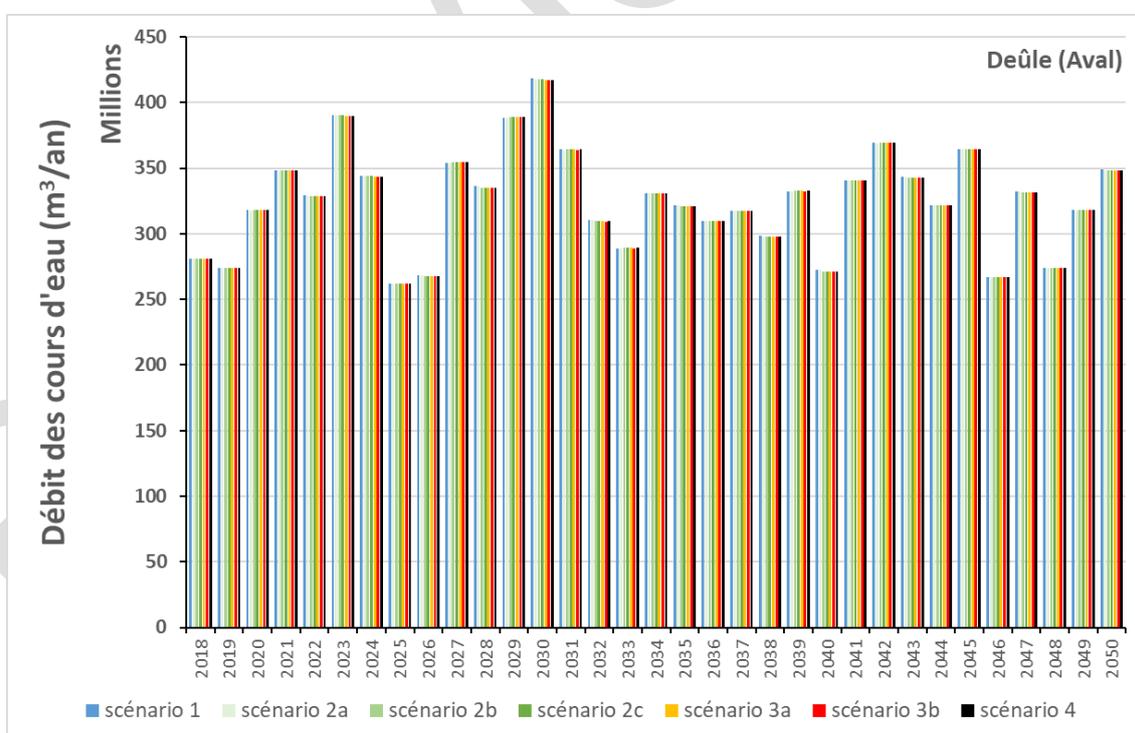
Annexe 6

Débits des cours d'eau prospectifs simulés

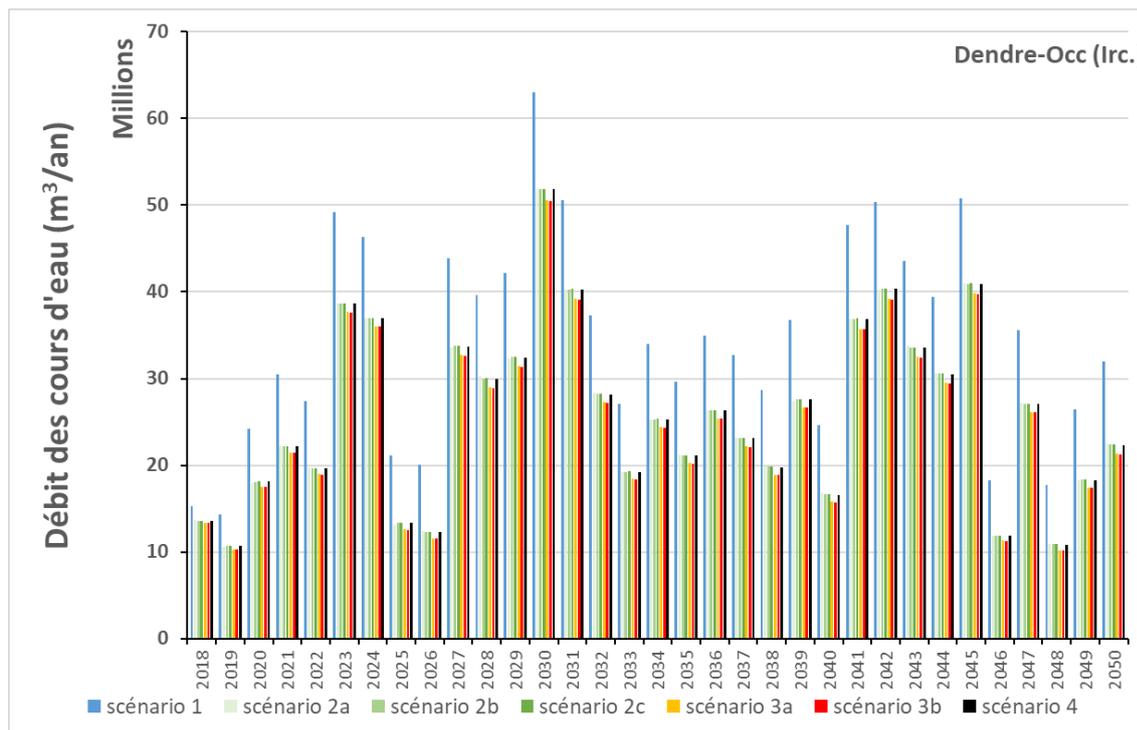
PROVISOIRE



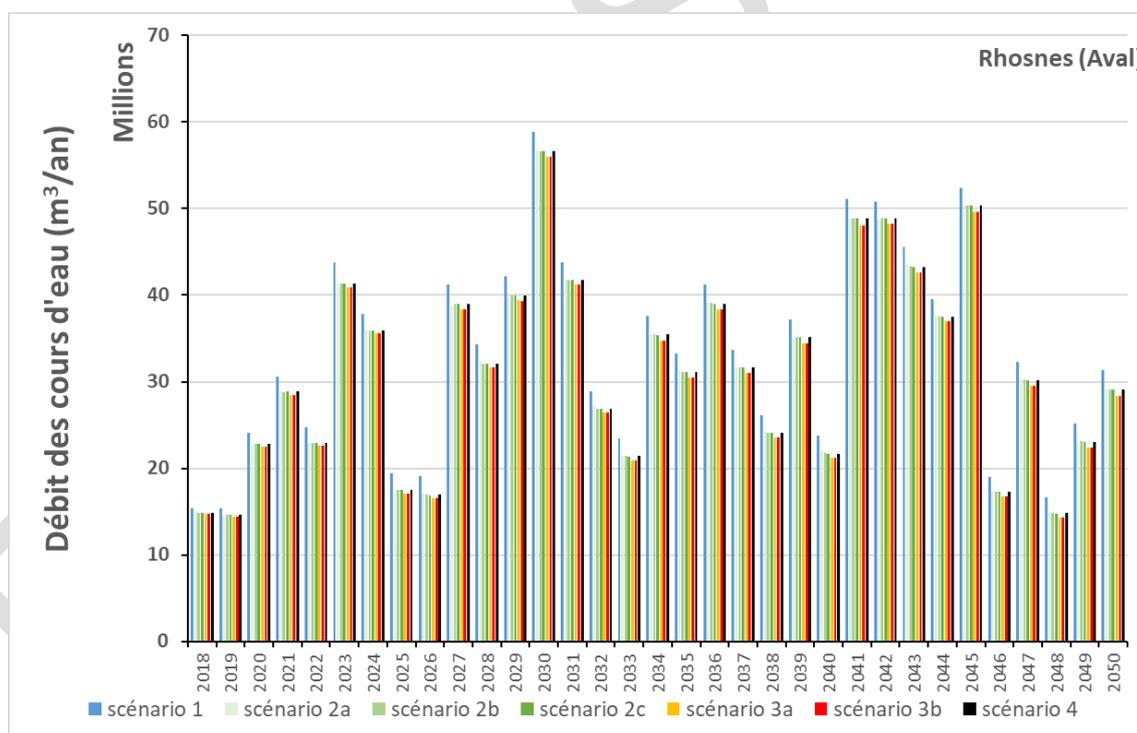
Evolution du débit de l'Escaut simulé en un point fictif en sortie du domaine modélisé pour chaque scénario de prélèvement et ses variantes.



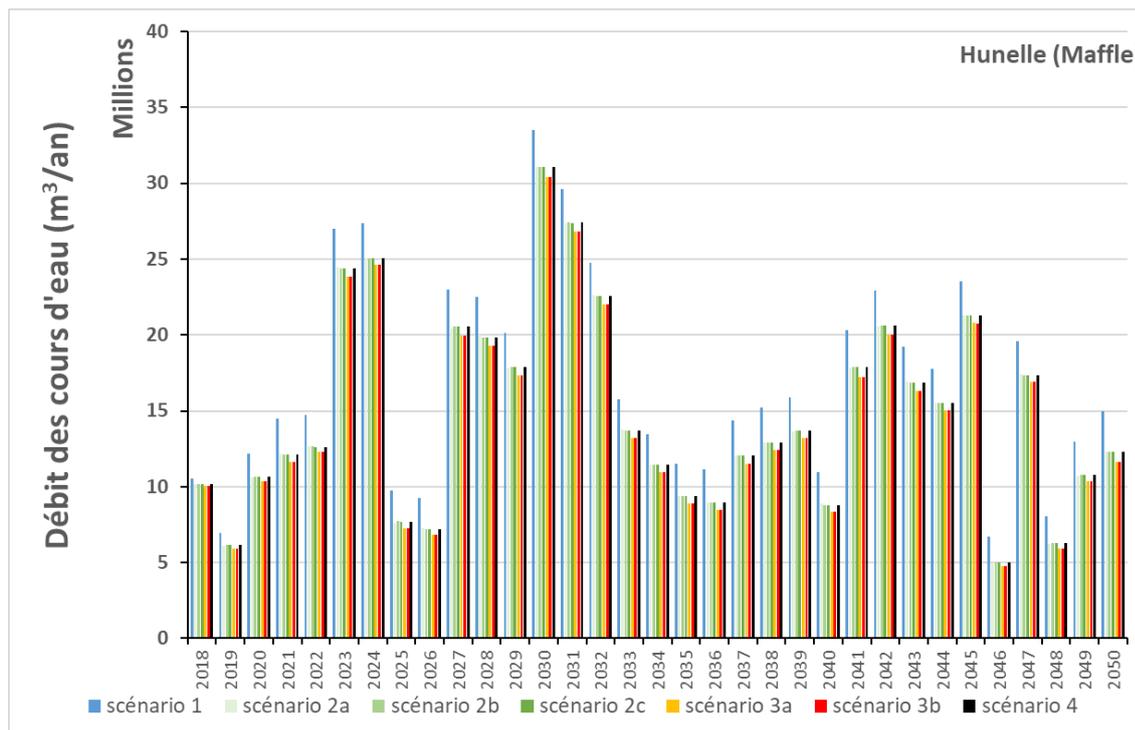
Evolution du débit de la Deûle simulé en un point fictif en sortie du domaine modélisé pour chaque scénario de prélèvement et ses variantes.



Evolution du débit de la Dendre Occidentale simulé à la station d'Irchonwelz pour chaque scénario de prélèvement et ses variantes.



Evolution du débit du Rhosnes simulé en un point fictif en sortie du domaine modélisé pour chaque scénario de prélèvement et ses variantes.



Evolution du débit de la Hunelle simulé à la station de Maffle pour chaque scénario de prélèvement et ses variantes.

PROVISOIRES



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm