

Construction et mise en œuvre d'un simulateur hydrologique et chimique du bassin ferrifère lorrain

Rapport final

BRGM/RP-62998-FR
Décembre 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets de Recherche du BRGM APMR03

L. Vaute, S. Lanini, N. Galet

Vérificateur :

Nom : S. Ollagnier

Date : 16/12/2013

Signature :



Approbateur :

Nom : D. Midot

Date : 16/12/2013

Signature :



Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



lorraine
conseil régional



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : modèle hydrologique, modèle géochimique, modèle Tempo, bassin ferrifère lorrain, exhaure mine, mine abandonnée, mine souterraine, réservoir minier, Lorraine.

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

Vaute L., Lanini S., Galet N. (2013) – Construction et mise en œuvre d'un simulateur hydrologique et chimique du bassin ferrifère lorrain. Rapport BRGM/RP-62998-FR, 67 p., 41 fig., 6 tabl.

Synthèse

La volonté d'une gestion globale, concertée, et à long terme des ressources en eau du bassin ferrifère lorrain, de même que les conséquences parfois non prévues de l'ennoyage des réservoirs miniers, ont mis en évidence la nécessité d'un outil d'aide à la gestion des ressources en eau du bassin ferrifère.

Le Conseil Régional de Lorraine, l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et le BRGM ont ainsi souhaité développer un simulateur hydrogéologique et chimique des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain. Cet outil opérationnel de gestion a pour but de permettre de prévoir notamment :

- les débits des points de débordement et de fuites des réservoirs ;
- les niveaux piézométriques des réservoirs ;
- l'évolution de la concentration en sulfate aux principaux points de prélèvement et de débordement des réservoirs.

Le présent rapport présente la méthodologie de modélisation retenue, puis les résultats de la modélisation des 3 grands réservoirs Sud, Centre et Nord.

Trois simulateurs de fonctionnement hydrologique et chimique des trois grands réservoirs miniers ennoyés du bassin ferrifère lorrain ont été construits. Ces simulateurs sont basés sur une approche globale de réacteurs en réseaux. Une sectorisation des réservoirs a été obtenue par le croisement entre a) les tendances observées d'évolution des concentrations en sulfate, et b) les résultats de l'analyse détaillée des plans miniers. Le recueil et le traitement de toutes les données disponibles a permis de synthétiser les informations nécessaires à la construction des simulateurs de ces 3 réservoirs.

Les simulateurs ont été utilisés à titre prédictif afin d'estimer les dates à partir desquelles les concentrations en sulfate dans chaque secteur des réservoirs pourraient être inférieures à la limite de potabilité de 250 mg/l : selon un scénario de recharge moyen, cette limite ne sera pas atteinte avant 2015 à 2022 selon les secteurs pour le réservoir Sud ; avant 2030 à 2032 pour les 2 secteurs les mieux renouvelés en eau du réservoir Centre ; et avant 2025 à 2027 pour les 2 secteurs les mieux renouvelés en eau du réservoir Nord.

Les simulateurs pourront être utilisés pour connaître l'impact de nouveaux pompages sur les débits, les niveaux et les évolutions des concentrations en sulfate.

Enfin, ces simulateurs sont modulables, il sera possible dans le futur de modifier la configuration du réseau de réacteurs afin de prendre en compte de nouvelles connaissances concernant les écoulements ou les concentrations à l'intérieur de chaque réservoir.

Sommaire

1. Objet de l'étude	9
1.1. LES BASSINS MINIERES NORD-LORRAINS	9
1.2. LA ZONE D'ETUDE : LE BASSIN FERRIFERE LORRAIN	9
1.3. L'ARRET DE L'EXPLOITATION DES MINES DE FER	11
1.4. UN SCHEMA D'AMENAGEMENT ET DE GESTION DES EAUX (SAGE) POUR LE BASSIN FERRIFERE	12
1.5. LA SURVEILLANCE RENFORCEE DES EAUX SOUTERRAINES DU BASSIN FERRIFERE LORRAIN.....	12
1.6. LA NECESSITE D'UN OUTIL D'AIDE A LA GESTION DES EAUX SOUTERRAINES	14
1.7. LES RESULTATS PROMETTEURS DES ETUDES PRELIMINAIRES.....	15
2. Méthodologie de modélisation	17
2.1. MODELE CONCEPTUEL D'UN RESERVOIR MINIER.....	17
2.1.1. Le fonctionnement hydrogéologique des réservoirs miniers	17
2.1.2. Les processus géochimiques de minéralisation de l'eau	18
2.2. CHOIX D'UNE METHODE DE MODELISATION : L'APPROCHE GLOBALE « REACTEURS EN RESEAUX ».....	22
2.2.1. Choix d'une approche globale : représentation d'un réservoir par un réacteur mélangeur parfait	22
2.2.2. Introduction d'un niveau de spatialisation : représentation d'un réservoir par un réseau de réacteurs mélangeurs parfaits	23
2.2.3. Choix des codes de calcul	24
2.3. CONSTRUCTION DES SIMULATEURS DE RESERVOIRS	25
2.3.1. Recueil et traitement des données chronologiques.....	25
2.3.2. Géométrie des secteurs	26
2.3.3. Mise en réseau des secteurs.....	26
2.3.4. Calcul de la recharge.....	26
2.3.5. Modèle de cinétique chimique de dissolution du gypse	27
2.4. CALAGE DES SIMULATEURS DE RESERVOIRS.....	28
2.4.1. Calage des paramètres K d'échange entre secteurs	28

2.4.2. Calage des paramètres de cinétique chimique	28
2.4.3. Modélisation de la recharge à des fins de prévisions	28
3. Modélisation du réservoir Sud	31
3.1. EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN SULFATE DANS LE RESERVOIR SUD	31
3.2. SECTORISATION DU RESERVOIR SUD	31
3.3. RESULTATS DU CALAGE DU SIMULATEUR DU RESERVOIR SUD	35
3.4. SIMULATION PREVISIONNELLE DES CONCENTRATIONS EN SULFATE POUR LE RESERVOIR SUD	35
4. Modélisation du réservoir Centre	43
4.1. EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN SULFATE DANS LE RESERVOIR CENTRE	43
4.2. SECTORISATION DU RESERVOIR CENTRE	44
4.3. RESULTATS DU CALAGE DU SIMULATEUR DU RESERVOIR CENTRE	46
4.4. SIMULATION PREVISIONNELLE DES CONCENTRATIONS EN SULFATE POUR LE RESERVOIR CENTRE	46
5. Modélisation du réservoir Nord	53
5.1. EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN SULFATE DANS LE RESERVOIR NORD	53
5.2. SECTORISATION DU RESERVOIR NORD	54
5.3. RESULTATS DU CALAGE DU SIMULATEUR DU RESERVOIR NORD	56
5.4. SIMULATION PREVISIONNELLE DES CONCENTRATIONS EN SULFATE POUR LE RESERVOIR NORD	56
6. Conclusion	63
7. Bibliographie	65

Liste des figures

Figure 1 :	Cadre géographique de la zone d'étude.	10
Figure 2 :	Schéma conceptuel du fonctionnement hydrogéologique d'un réservoir minier, avant et après ennoyage (exemple du réservoir Sud, coupe schématique SO-NE).	20
Figure 3 :	Modèle conceptuel d'un simulateur de réservoir minier.	24
Figure 4 :	Concentrations maximales annuelles en sulfate dans le réservoir Sud	31
Figure 5 :	Carte des 6 secteurs du réservoir Sud (Ollagnier, 2013).	34
Figure 6 :	Simulateur du réservoir Sud : Schéma des liaisons entre les 6 secteurs du réservoir.	36
Figure 7 :	Simulateur du réservoir Sud : Schéma des cotes des murs et toits des secteurs (travaux miniers en rouge, calcaires du Dogger en bleu, cotes de débordement en pointillé).	36
Figure 8 :	Réservoir Sud -secteur 1 : concentrations observées et simulées.	37
Figure 9 :	Réservoir Sud -secteur 2 : concentrations observées et simulées.	37
Figure 10 :	Réservoir Sud -secteur 3 : concentrations observées et simulées.	38
Figure 11 :	Réservoir Sud -secteur 4 : concentrations observées et simulées.	38
Figure 12 :	Réservoir Sud -secteur 5 : concentrations observées et simulées.	39
Figure 13 :	Réservoir Sud -secteur 6 : concentrations observées et simulées.	39
Figure 14 :	Réservoir Sud : niveaux piézométriques observés et simulés pendant l'ennoyage.	40
Figure 15 :	Réservoir Sud : niveaux piézométriques observés et simulés après le débordement.	40
Figure 16 :	Réservoir Sud : débits de débordement observés et simulés.	41
Figure 17 :	Réservoir Sud : concentrations simulées jusqu'en 2034.	41
Figure 18 :	Concentrations maximales annuelles en sulfate dans le réservoir Centre.	43
Figure 19 :	Carte des 4 secteurs du réservoir Centre (Ollagnier, 2013).	45
Figure 20 :	Simulateur du réservoir Centre : Schéma des liaisons entre les 4 secteurs du réservoir.	47
Figure 21 :	Simulateur du réservoir Centre : Schéma des cotes des murs et toits des secteurs (travaux miniers en rouge, calcaires du Dogger en bleu, cotes de débordement en pointillé).	47
Figure 22 :	Réservoir Centre -secteur 1 : concentrations observées et simulées.	48
Figure 23 :	Réservoir Centre -secteur 2 : concentrations observées et simulées.	48
Figure 24 :	Réservoir Centre -secteur 3 : concentrations observées et simulées.	49
Figure 25 :	Réservoir Centre -secteur 4 : concentrations observées et simulées.	49
Figure 26 :	Réservoir Centre : niveaux piézométriques observés et simulés pendant l'ennoyage.	50

Figure 27 : Réservoir Centre : niveaux piézométriques observés et simulés après le débordement.	50
Figure 28 : Réservoir Centre : débits de débordement observés et simulés.	51
Figure 29 : Réservoir Centre : concentrations simulées jusqu'en 2034.	51
Figure 30 : Concentrations maximales annuelles en sulfate dans le réservoir Nord.	53
Figure 31 : Carte des 4 secteurs du réservoir Nord (Ollagnier, 2013).	55
Figure 32 : Simulateur du réservoir Nord : Schéma des liaisons entre les 4 secteurs du réservoir.	57
Figure 33 : Simulateur du réservoir Nord : Schéma des cotes des murs et toits des secteurs (travaux miniers en rouge, calcaires du Dogger en bleu, cotes de débordement en pointillé).	57
Figure 34 : Réservoir Nord - Secteur 1 : concentrations observées et simulées.	58
Figure 35 : Réservoir Nord - secteur 2 : concentrations observées et simulées.	58
Figure 36 : Réservoir Nord -secteur 3 : concentrations observées et simulées.	59
Figure 37 : Réservoir Nord -secteur 4 : concentrations observées et simulées.	59
Figure 38 : Réservoir Nord : niveaux piézométriques observés et simulés pendant l'ennoyage.	60
Figure 39 : Réservoir Nord : niveaux piézométriques observés et simulés après le débordement.	60
Figure 40 : Réservoir Nord : débits de débordement observés et simulés.	61
Figure 41 : Réservoir Nord : concentrations simulées jusqu'en 2034.	61

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des points de surveillance représentatifs de chaque secteur du réservoir Sud (Ollagnier, 2013).	34
Tableau 2 : Résultats de la simulation prévisionnelle des concentrations en sulfate pour le réservoir Sud : années d'atteinte de la concentration limite 250 m/l.	35
Tableau 3 : Caractéristiques des points de surveillance représentatifs de chaque secteur du réservoir Centre (Ollagnier, 2013).	45
Tableau 4 : Résultats de la simulation prévisionnelle des concentrations en sulfate pour le réservoir Centre : années d'atteinte de la concentration limite 250 m/l.	46
Tableau 5 : Caractéristiques des points de surveillance représentatifs de chaque secteur du réservoir Nord (Ollagnier, 2013).	55
Tableau 6 : Résultats de la simulation prévisionnelle des concentrations en sulfate pour le réservoir Nord : années d'atteinte de la concentration limite 250 m/l.	56

1. Objet de l'étude

1.1. LES BASSINS MINIERS NORD-LORRAINS

Depuis la deuxième moitié du 19^{ème} siècle, le nord de la Lorraine a connu une importante activité minière sur deux secteurs :

- le bassin ferrifère, situé principalement dans le nord-ouest mosellan, le nord de la Meurthe-et-Moselle (Pays-Haut) et une frange meusienne ;
- le bassin houiller, dans le secteur de Forbach-St-Avold-Creutzwald.

Ces deux bassins miniers se prolongent au nord, en territoires belge, luxembourgeois et allemand. L'exploitation de ces gisements, qui est aujourd'hui arrêtée sur les deux bassins ne s'est pas faite sans incidence sur les eaux superficielles et souterraines.

1.2. LA ZONE D'ETUDE : LE BASSIN FERRIFERE LORRAIN

Les exploitations minières de fer en Lorraine se situent sous le plateau du revers occidental de la côte de Moselle, à l'ouest d'une ligne Thionville - Metz - Nancy. Les bassins concédés s'étendent ainsi sur environ 100 km du nord au sud, entre la frontière franco-luxembourgeoise et Nancy, pour une largeur qui varie entre 10 et 30 km. Ils intéressent trois départements qui sont, d'est en ouest, la Moselle, la Meurthe-et-Moselle et, pour une faible part, la Meuse.

Le gisement, qui affleure en particulier le long de la côte de Moselle, s'interrompt sur près de 25 km en son centre, entre Pagny-sur-Moselle et Pont-à-Mousson. Cette discontinuité partage la région en deux zones distinctes :

- le bassin ferrifère de Nancy au sud, hors de la zone de notre étude,
- le bassin ferrifère de Briey-Longwy au nord, entièrement inclus dans la zone d'étude.

L'extension des travaux miniers du bassin de Briey-Longwy est d'environ 50 km du nord au sud pour 30 km d'est en ouest (Figure 1).

Dans le bassin ferrifère de Briey-Longwy, l'exploitation par chambres et piliers a souvent conduit au foudroyage des galeries abandonnées, et donc à la fissuration des terrains situés au-dessus des zones exploitées, induisant une modification du régime des nappes d'eau souterraine et des rivières : pertes dans le lit mineur des cours d'eau, rabattement de nappes influant sur l'alimentation des cours d'eau, mise en communication de bassins souterrains jadis hydrologiquement isolés.

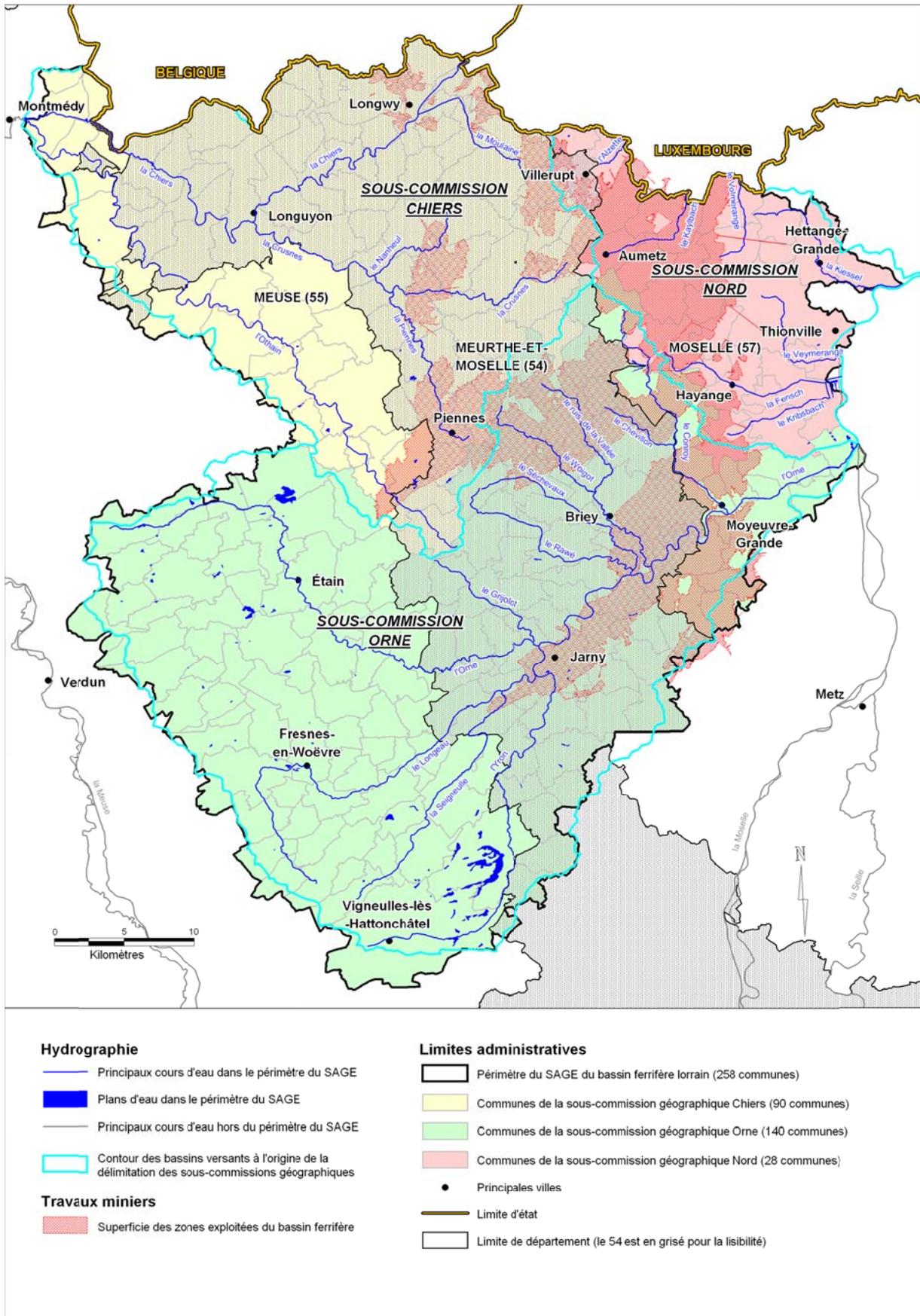


Figure 1 : Cadre géographique de la zone d'étude.

L'activité minière n'a alors été possible que grâce à la mise en place d'importants pompages d'exhaure, permettant d'évacuer hors des mines les grandes quantités d'eau souterraine qui s'y infiltraient. Les rejets d'eau d'exhaure dans les cours d'eau compensaient alors partiellement les autres impacts constatés durant la période d'exploitation, notamment grâce à la dilution des rejets d'eaux usées domestiques ou des effluents liés aux activités industrielles connexes au travail de la mine. Durant toute la période d'exploitation du bassin ferrifère, un nouvel équilibre hydrodynamique s'est progressivement mis en place, différent de celui qui prévalait avant l'exploitation.

Ainsi, durant plus d'un siècle d'exploitation dans le bassin ferrifère nord lorrain, 3 milliards de tonnes de minerai de fer ont été excavés (environ 40 000 km de galeries). Le bassin ferrifère est divisé en trois principaux bassins : Sud, Centre et Nord. L'exhaure des eaux de mines a atteint 291 millions de m³ par an en 1981, l'essentiel du débit pompé dans les réseaux de galerie était alors déversé dans les cours d'eau. La dernière exploitation minière du bassin ferrifère a fermé en 1997.

1.3. L'ARRET DE L'EXPLOITATION DES MINES DE FER

La cessation de l'activité minière et l'arrêt des pompages d'exhaure a entraîné l'ennoyage des réservoirs Centre et Sud entre 1994 et 1999, tandis que l'ennoyage du réservoir Nord a commencé le 1^{er} décembre 2005 et s'est achevé le 5 mars 2008. La surface totale de l'ensemble des travaux miniers du bassin ferrifère est de près de 430 km², dont les $\frac{3}{4}$ sont ennoyés, ce qui représente un volume d'eau supérieur à 450 millions de m³ d'eau.

L'arrêt progressif de l'exploitation minière dans le bassin ferrifère, ces deux dernières décennies, a ainsi conduit à de nouvelles modifications du régime des eaux souterraines et superficielles, ainsi qu'à l'altération de leur qualité. Il en a résulté des impacts lourds vis-à-vis des usages (alimentation en eau), des risques naturels (variation du débit des cours d'eau) et des conditions d'alimentation des cours d'eau en période d'étiage.

Par exemple, si l'ennoyage des mines permet aujourd'hui, sur certains secteurs, de retrouver de bonnes conditions de réalimentation naturelle des cours d'eau (Conroy et Chevillon par exemple), dans la plupart des cas le retour au régime hydrologique *ante* minier conduit à une forte baisse des débits comparativement aux apports par exhaures, voire des situations d'assec en période d'étiage.

1.4. UN SCHEMA D'AMENAGEMENT ET DE GESTION DES EAUX (SAGE) POUR LE BASSIN FERRIFERE

Ce constat a conduit les pouvoirs publics à initier en 1994 l'élaboration d'un schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE). L'arrêté inter-préfectoral fixant le périmètre du SAGE a été pris le 5 avril 1994. Le périmètre du SAGE englobe 258 communes, pour une superficie de 2418 km², et une population de 376 703 personnes en 1999. Le périmètre du SAGE s'étend sur les départements lorrains de la Moselle, de la Meurthe-et-Moselle et de la Meuse (Figure 1).

A cette époque, le SAGE n'a pas pu aboutir. Il a été relancé en 2003 sous l'impulsion des représentants des collectivités locales. La séance d'installation de la CLE a eu lieu le 5 novembre 2004 à la Préfecture de Région. La Région Lorraine est la structure porteuse du projet du SAGE du bassin ferrifère. Les deux premières séquences de l'élaboration du SAGE ont été validées par la CLE en mars 2007. Elles ont donné lieu à deux rapports de référence :

- Séquence n°1 – l'état des lieux : ce document cartographique, qui a pour ambition de devenir une référence objective pour les acteurs du territoire, vise à donner une vision globale du bassin ferrifère, aussi complète que possible, au travers de l'ensemble des milieux et des usages liés au domaine de l'eau.
- Séquence n°2 – synthèse, diagnostic et tendances : ce document a pour objectif d'évaluer de manière globale et objective le territoire, de présenter le point de vue des acteurs, de définir les tendances d'évolution des milieux et des usages, afin de définir les enjeux du SAGE.

1.5. LA SURVEILLANCE RENFORCEE DES EAUX SOUTERRAINES DU BASSIN FERRIFERE LORRAIN

A partir de 1995, en complément de la surveillance prescrite en 1994 par arrêtés préfectoraux à l'ancien exploitant minier Lormines, l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et la DIREN Lorraine ont souhaité engager des actions de prévention et de protection de la ressource. Ils avaient donc demandé au BRGM Lorraine d'assurer, dans le cadre de ses missions de Service Public, le suivi d'un réseau de surveillance des eaux souterraines des bassins Sud et Centre, dont l'ennoyage des réservoirs venait de débuter (cf. en bibliographie les rapports annuels intitulés : « Surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain »). A partir du 1^{er} janvier 2001, date à laquelle Lormines a été dégagé de ses obligations concernant la surveillance des eaux souterraines, les points suivis par Lormines ont été intégrés au réseau de surveillance exploité par le BRGM. En 2005, dans le cadre des obligations qui lui ont été prescrites par l'arrêté préfectoral du 29 octobre 1998, la société ARBED (Arcelor Luxembourg) a installé un réseau de surveillance des eaux souterraines dans le bassin Nord. Ce réseau est opérationnel depuis le 1^{er} décembre 2005, date à laquelle l'ennoyage du réservoir Nord a débuté. Ce réseau a été transféré en 2006 à l'Etat représenté par la DRIRE Lorraine, à l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et au BRGM, ce dernier en assurant l'exploitation.

Le coût d'acquisition des données et de leur interprétation en termes de fonctionnement hydrogéologique et chimique des bassins, d'abord assumé entièrement par l'Agence de l'eau, a été partagé par le BRGM dès 1997, avec une participation de la DIREN Lorraine en 2000 et 2001. Depuis 2004, le BRGM est maître d'ouvrage de l'étude annuelle de surveillance, et bénéficie d'une aide de l'Agence de l'eau, ainsi que de la DRIRE Lorraine pour l'année 2006.

Les objectifs généraux du programme de surveillance des eaux souterraines sont les suivants :

- suivre l'évolution des niveaux piézométriques, des débits des sources ou des points de débordement, suivre l'évolution de la qualité des eaux souterraines dans les réservoirs miniers et dans les aquifères sus-jacents, durant les phases d'ennoyage et après celles-ci, en particulier dans les secteurs où se pose la question des relations hydrauliques entre réservoirs miniers,
- interpréter l'ensemble des mesures afin, en particulier, d'améliorer la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de l'ensemble réservoirs miniers / nappe du Dogger ; cette interprétation s'appuyant sur les travaux de recherche et les outils développés par le BRGM dans le cadre du GISOS depuis 1999,
- présenter les résultats de la surveillance dans un rapport annuel, ainsi que par le biais de chroniques périodiques (mensuelles à semestrielles selon les années) intitulées « Bassin Ferrifère : Surveillance Eau », accessibles sur le site Internet de l'Agence de l'eau (www.eau-rhin-meuse.fr) et de la DREAL Lorraine (www.lorraine.ecologie.gouv.fr).

La plupart des points d'accès aux réservoirs miniers ont donc fait l'objet d'un suivi piézométrique ou d'une mesure de débit, et/ou d'une mesure de la qualité des eaux souterraines, dans le but d'évaluer la disponibilité de la ressource, et l'évolution de sa qualité en différents points.

La fréquence de mesure du niveau piézométrique est variable selon l'équipement des points de mesure, d'une mesure par heure à une mesure par mois. Les 3 réservoirs miniers Sud, Centre et Nord sont équipés chacun d'une centrale d'acquisition télétransmise.

Le débit de débordement et la conductivité des 3 réservoirs sont mesurés une fois par heure par des stations télétransmises. Des jaugeages mensuels sont effectués sur certains points non équipés de stations.

Concernant le suivi de la qualité des eaux souterraines (41 points), les échantillonnages et les analyses sont effectués à des fréquences trimestrielles à annuelles. Les analyses sont de type « normale » ou « étendue » en fonction du type de point de mesure. Une analyse « normale » correspond à la mesure de la concentration des composés suivants :

- éléments majeurs : calcium, magnésium, sodium, potassium, sulfate, chlorure, bicarbonate,
- composés azotés : ammonium, nitrite, nitrate,
- autres éléments : fer, manganèse, bore.

Une analyse « étendue » correspond à une analyse « normale » à laquelle sont ajoutées les mesures de concentration en :

- strontium,
- nickel,
- hydrocarbures totaux,
- indice phénol.

Enfin, des sondes de mesure en continu de la conductivité de l'eau ont été installées par le GISOS en novembre 2005, dans 10 des puits et piézomètres du bassin Nord, au titre de ses activités de recherche – développement, en accord avec Arcelor Luxembourg (ex. ARBED) et la DRIRE Lorraine.

1.6. LA NECESSITE D'UN OUTIL D'AIDE A LA GESTION DES EAUX SOUTERRAINES

La seule surveillance des eaux souterraines et des eaux de surface n'est bien entendu pas un objectif en soi : les mesures ne sont utiles que pour alimenter des modèles de comportement des réservoirs, eux-mêmes nécessaires pour aider à la gestion de la ressource en eau.

Or, les ressources en eau souterraines du bassin ferrifère lorrain, évaluées à environ 450 millions de m³, constituent un enjeu important pour le nouveau développement de cette région. Mais tant que le retour à une bonne qualité de l'eau n'est pas réalisé, elles ne sont que peu ou difficilement exploitables. Des solutions de substitution ont dû être recherchées. Un nouveau schéma d'alimentation en eau potable a été mis en place (nouveaux captages, redéfinition du réseau de distribution, recalibrage du lit des rivières, soutien d'étiage, construction de barrages (albraques) dans les zones non ennoyées des réservoirs, etc...).

De plus, les ressources en eau souterraines du bassin ferrifère lorrain sont en relation directe avec les eaux de surfaces : pertes des cours d'eau dans les réservoirs miniers, débordements et fuites des réservoirs miniers dans les cours d'eau, soutiens d'étiage des cours d'eau avec de l'eau pompée dans les réservoirs miniers... La connaissance la plus précise possible et la quantification de ces relations eaux souterraines – eaux de surface est donc nécessaire pour appuyer toute décision de gestion.

Ainsi, la volonté d'une gestion globale, concertée, et à long terme des ressources en eau, de même que les conséquences parfois non prévues de l'ennoyage, ont mis en évidence la nécessité d'un outil d'aide à la gestion des ressources en eau du bassin ferrifère.

1.7. LES RESULTATS PROMETTEURS DES ETUDES PRELIMINAIRES

Des études préliminaires, à caractère méthodologique, cofinancées par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et réalisées par le BRGM, ont fourni des résultats prometteurs :

- « Un modèle de l'évolution de la concentration en sulfate dans le bassin ferrifère Lorrain – étude préliminaire : construction et mise en œuvre d'un simulateur de fonctionnement simplifié » (Vaute et al., 2001)
- « Construction et mise en œuvre d'un simulateur hydrologique et chimique du bassin ferrifère lorrain – Phase 1 : Synthèse hydrogéologique » (Vaute et al., 2005).

Ces études ont montré qu'il est possible, malgré le manque de données réparties dans l'espace, de construire un simulateur simplifié du comportement hydrogéologique et chimique des réservoirs miniers. La méthode de simulation mise en œuvre en 2001 est basée sur l'analyse et la modélisation de séries chronologiques de mesures de terrain (pluie, débit, niveau piézométrique) et d'expérimentations de laboratoire (courbes d'évolution de la concentration en sulfate lors de la lixiviation d'échantillons de roche).

Ce travail de modélisation préliminaire avait été rendu possible grâce :

- **à l'acquisition de mesures hydrogéologiques et chimiques depuis 1994** dans le cadre de la surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain (cf. bibliographie),
- **au développement par le BRGM de nouvelles méthodes et de nouveaux outils de modélisation** des séries de données hydrologiques et des systèmes de réacteurs en réseaux, et à leur application à la résolution des problèmes d'environnement minier (Vaute et Pinault, 1999 ; Fabriol et al., 2000 ; Collon et al., 2000), en particulier dans le cadre des travaux du GISOS – Groupement d'Intérêt Scientifique sur l'impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains, structure regroupant des équipes de recherche du BRGM, de l'INERIS, de l'Université de Lorraine (ENSG et ENSMP), et de Mines Paristech.

Ces premiers travaux avaient abouti au développement d'un simulateur simplifié qui prédisait l'évolution de la concentration moyenne aux points de débordement principaux de chaque réservoir, mais **qui ne pouvait pas simuler l'évolution des concentrations en d'autres points des réservoirs.**

De plus, les résultats de la modélisation de 2001 étaient affectés par **de nombreuses incertitudes, dont les principales ont pu être levées** depuis cette date :

- les principales directions d'écoulement à l'intérieur des réservoirs n'étaient pas connues à l'époque de la réalisation de cette étude : **la synthèse hydrogéologique de 2005 a permis d'obtenir ces informations**, grâce à une analyse minutieuse des plans miniers,
- la méthode de définition des chroniques de pluie utilisées pour les calculs de prévision était empirique : depuis 2001, **le BRGM a développé un « générateur de pluie » qui permet de générer des chroniques de pluies respectant les caractéristiques statistiques des pluies observées dans le passé**, ce qui permet la définition de scénarios de périodes sèches, humides, exceptionnelles...

Enfin, afin de vérifier et d'affiner les prévisions d'évolution des concentrations en sulfates dans les réservoirs miniers, les travaux de recherche menés dans le cadre du GISOS ont été poursuivis ces dernières années (Collon et al., 2000, 2003a-b, 2004, 2005a-b, 2006 ; Hamm et al. 2008a-b).

Le Conseil Régional de Lorraine, l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et le BRGM ont donc considéré que les conditions scientifiques étaient réunies pour engager sur ces bases la construction d'un simulateur hydrogéologique et chimique des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain.

La finalité de l'étude était de disposer d'un outil opérationnel de gestion des ressources en eau souterraines du bassin ferrifère. Cet outil intégré devait permettre de prévoir notamment :

- les débits des points de débordement et des fuites des réservoirs ;
- les niveaux piézométriques des réservoirs ;
- l'évolution de la qualité de l'eau aux principaux points de prélèvement et de débordement des réservoirs.

Le présent rapport présente la méthodologie de modélisation retenue, puis les résultats de la modélisation des 3 grands réservoirs Sud, Centre et Nord.

2. Méthodologie de modélisation

2.1. MODELE CONCEPTUEL D'UN RESERVOIR MINIER

La description qui suit est une synthèse des résultats de la surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain réalisée par le BRGM depuis 1994 (Vaute, 2007) et de certains travaux du GISOS (Collon, 2003). Le modèle conceptuel qui en découle est à la base des travaux de construction du simulateur de fonctionnement hydrologique et chimique du bassin ferrifère lorrain. Pour plus de détails sur les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques du bassin ferrifère lorrain, le lecteur est invité à se reporter aux rapports annuels de surveillance du bassin ferrifère lorrain (par exemple Vaute, 2007) et à l'état des lieux du SAGE du bassin ferrifère (Vaute et al, 2007).

2.1.1. Le fonctionnement hydrogéologique des réservoirs miniers

a) *Pendant la période d'exhaure, des nappes d'eau souterraines réduites à l'état de lambeaux*

Pendant la période d'exploitation minière (Figure 2 – schéma du haut), au fur et à mesure que s'étendaient les travaux miniers, les foudroyages réalisés – ils concernent en moyenne 40 à 50 % de la surface des travaux miniers – provoquent la rupture de l'écran imperméable des marnes micacées qui supportait la nappe des calcaires du Dogger. L'eau de la nappe s'est alors infiltrée en grande quantité dans les galeries minières (à certaines périodes, jusqu'à près de 300 millions de m³ par an sur l'ensemble du bassin ferrifère), obligeant les exploitants miniers à mettre en place des systèmes de collecte (rigoles et galeries de drainage), de stockage (bassins de stockage temporaires, appelés albraques) et de pompage des eaux d'infiltration : c'était l'exhaure minière.

Au-dessus des travaux miniers, la nappe des calcaires du Dogger était généralement réduite à l'état de lambeaux, lorsqu'elle n'avait pas complètement disparu, au droit des zones foudroyées notamment (Ramon, 1976 ; Maillou, 1994). L'abaissement généralisé du niveau de la nappe au droit des travaux s'est propagé à plusieurs km à l'extérieur des limites des exploitations, constituant un cône de rabattement de grande ampleur.

b) Après l'ennoyage, des nappes d'eau souterraines en partie reconstituées, et un nouveau fonctionnement hydrogéologique

Après l'arrêt des exhaustes (Figure 2 – schéma du bas), l'eau d'ennoyage a rempli les vides artificiels laissés par l'activité minière : les plus grands vides sont ainsi constitués par le réseau de galeries interconnectées ; les plus petits sont les pores de dimensions variées se trouvant dans les amas rocheux des zones foudroyées. La remontée du niveau d'ennoyage des différents réservoirs a été limitée par la présence d'un ou plusieurs points de débordement, qui jouent le rôle de déversoirs des eaux d'ennoyage vers les cours d'eau. Généralement, le niveau d'un réservoir ne peut pas dépasser de beaucoup la cote du seuil de son point de débordement le plus bas, même en période de hautes eaux. En effet, la plupart des points de débordement sont aménagés pour laisser passer des débits de crue très importants, ce qui limite la possibilité d'élévation du niveau du réservoir.

La « nappe » d'un réservoir minier présente une autre particularité hydrogéologique : son niveau piézométrique est pratiquement identique en tout point du réservoir (cf. la ligne rouge horizontale du schéma de la Figure 2 – schéma du bas). Le très faible gradient piézométrique du réservoir (c'est-à-dire la très faible « pente » du niveau de l'eau dans le réservoir) résulte de la très faible résistance à l'écoulement de l'eau dans le réseau de galerie : autrement dit, l'eau en mouvement dans les galeries n'est pas suffisamment « freinée » par les frottements sur les parois pour acquérir une « pente » mesurable (on dit que les pertes de charge sont très faibles).

Lors de l'ennoyage, la remontée du niveau dans les réservoirs s'est accompagnée de la reconstitution de la nappe des calcaires du Dogger. Toutefois, cette reconstitution n'a été que partielle, puisque la remontée du niveau d'un réservoir est limitée par l'existence des points de débordement. D'autre part, la nappe des calcaires du Dogger continue à être en très forte relation avec les réservoirs miniers, par l'intermédiaire des zones foudroyées. Le réservoir minier ennoyé conserve donc son rôle de drainage général de la nappe du Dogger. Au-dessus des travaux miniers, la surface piézométrique de la nappe principale des calcaires du Dogger est déprimée, et présente un relief « bosselé » : les « creux » piézométriques correspondent aux zones où le drainage vers le réservoir minier sous-jacent est important (zones foudroyées ou fracturées), les « bosses » correspondent aux zones de drainage moindre (zones non foudroyées ou de perméabilité verticale plus faible).

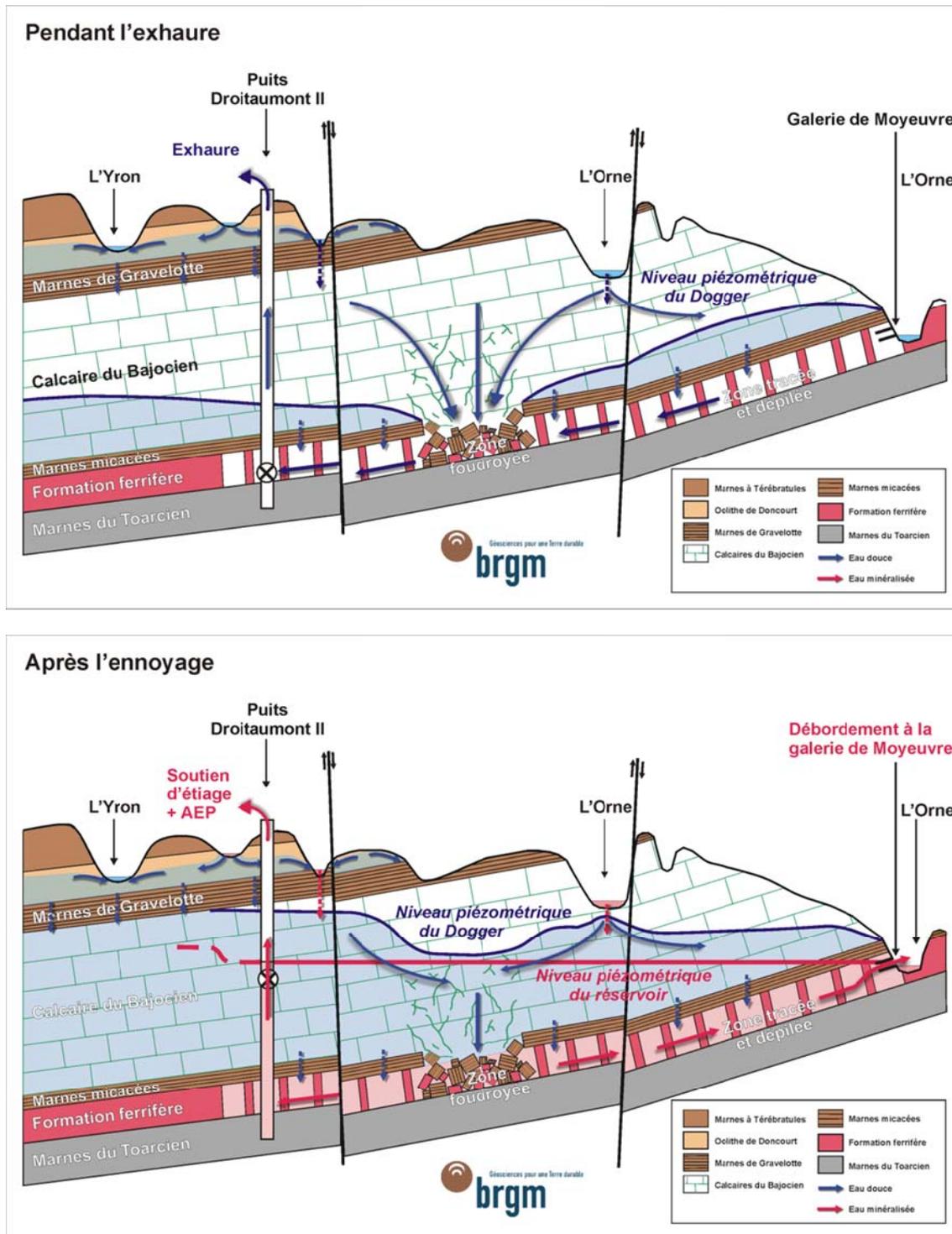
2.1.2. Les processus géochimiques de minéralisation de l'eau

Lors de l'ennoyage des réservoirs miniers, l'eau de remplissage des galeries des anciennes mines de fer se charge en sulfate, magnésium, sodium, calcium, potassium et bore, et, dans une moindre mesure, en strontium, manganèse, et chlorure.

Ces éléments chimiques proviennent des réactions de mise en solution des sels minéraux issus de l'oxydation, lors de l'exploitation minière, de la pyrite contenue dans les inter-bancs marneux de la formation ferrifère. Ils sont dissous totalement quelques dizaines de jours après le début de l'ennoyage, et ce stock d'éléments pouvant être dissous ne se renouvelle pas en milieu insuffisamment oxygéné, tel qu'un réservoir noyé.

Cette situation est transitoire, jusqu'à ce que le stock d'eau minéralisée soit évacué par le jeu naturel des circulations souterraines (le stock d'éléments chimiques qui peuvent se dissoudre dans l'eau et sont responsables de sa minéralisation ne se renouvelle pas en milieu ennoyé). Cependant, cette situation transitoire peut durer quelques années, voire quelques dizaines d'années si le temps de résidence de l'eau dans le réservoir est long.

Les mécanismes chimiques responsables de la minéralisation de l'eau des réservoirs miniers ont été étudiés de manière détaillée par le GISOS. Le texte qui suit résume les conclusions de ces travaux, et notamment celles des travaux de thèse de P. Collon (2003).



a) *Le constat : l'eau des réservoirs miniers se charge en éléments minéraux lors de l'ennoyage*

- Au contact des roches du bassin ferrifère lorrain, l'eau d'ennoyage se charge en sulfate, magnésium, sodium, calcium, potassium et bore, et, dans une moindre mesure, en strontium, manganèse, et chlorure. Son pH reste compris entre 7 et 8. Si cette augmentation des concentrations rend l'eau impropre à la consommation humaine en regard des Concentrations Maximales Admissibles (CMA), les éléments présents en excès ne sont, néanmoins, pas toxiques pour l'homme. Dans le bassin ferrifère, le drainage minier est neutre. Ceci est un avantage puisque lorsque le drainage minier est acide (c'est le cas général de beaucoup de mines dans le monde), le phénomène se traduit par un pH bas qui favorise la mise en solution de métaux lourds toxiques pour l'homme et l'environnement.
- Le temps de contact entre l'eau et la roche doit être au minimum de 50 jours pour des roches de granulométrie comprise entre 5 et 10 mm, pour que les réactions chimiques de mise en solution des éléments atteignent un état d'équilibre. C'est pourquoi en période d'exhaure le ruissellement rapide à travers les fractures ne permet pas à l'eau d'acquiescer des concentrations en ions importantes.
- Les masses totales d'éléments solubles sont limitées en quantité : les expériences de lessivage en laboratoire et l'exemple des réservoirs ennoyés depuis longtemps montrent que la minéralisation engendrée par l'ennoyage des roches du bassin ferrifère lorrain décroît au fur et à mesure du renouvellement de l'eau du réservoir.

b) *L'explication : le rôle de l'oxygène à l'ouverture des galeries, et le rôle de l'eau dès le début de l'ennoyage*

- Pendant l'exploitation, l'atmosphère de la mine s'oxygène dès l'ouverture des galeries. La présence conjuguée d'eau et d'oxygène de l'air dans les pores de la roche entraîne l'oxydation de la pyrite contenue principalement dans les intercalaires marneux. La dissolution de carbonates (minéraux des roches calcaires comme la calcite) limite l'acidité produite par cette première réaction et conduit à la précipitation de minéraux sulfatés tels que le gypse (sulfate de calcium). Parallèlement, les baisses locales de pH occasionnées par l'oxydation de la pyrite provoquent une dissolution lente de minéraux contenant des ions sodium, magnésium, et potassium qui se fixent à la surface des oxydes de fer.

- A l'arrêt des pompages d'exhaure, l'eau ennoie la mine. La dissolution du gypse formé pendant la période d'exhaure entraîne la mise en solution d'ions sulfate et calcium, ce dernier permettant à son tour par réaction d'échange la libération des ions magnésium, sodium, potassium. Les expériences de laboratoire montrent que les quantités de contaminants libérés dans l'eau du réservoir minier sont limitées : en effet, les réactions chimiques à l'origine de la formation des éléments solubles sont stoppées dès que les roches sont ennoyées.

2.2. CHOIX D'UNE METHODE DE MODELISATION : L'APPROCHE GLOBALE « REACTEURS EN RESEAUX »

2.2.1. Choix d'une approche globale : représentation d'un réservoir par un réacteur mélangeur parfait

Il est précisé plus haut que le bassin ferrifère lorrain a été exploité par la méthode de chambre et piliers, suivie partiellement par le foudroyage des piliers résiduels (Vaute et al., 2007) sur environ 50% de la surface des travaux miniers. Le bassin ferrifère Lorrain est aujourd'hui constitué de 3 grands réservoirs hydrauliquement indépendants, les réservoirs Sud, Centre et Nord. Chacun des 3 grands réservoirs miniers est ainsi un patchwork de zones foudroyées et de zones de galeries. Lors de l'ennoyage d'un réservoir, l'eau de recharge alimente d'abord l'aquifère calcaire du Dogger sus-jacent, puis s'infiltre dans les vides miniers essentiellement par les zones foudroyées, et remplit progressivement les réservoirs. Les zones foudroyées sont le siège des réactions géochimiques de dissolution du gypse qui libèrent des sulfates dans l'eau du réservoir. Les zones de galeries assurent ensuite la dilution des eaux ainsi minéralisées.

Le système à modéliser diffère ainsi des milieux naturels par la présence des vides miniers. Le réseau de galeries d'exploitation est développé principalement dans plusieurs couches superposées (généralement 3 couches), faiblement inclinées, et connectées en différents points. Or, les codes hydrogéologiques « classiques » ne sont pas conçus pour traiter de telles configurations hydrauliques. Le développement ou la modification de codes capables de simuler l'écoulement et le transport de solutés dans de tels réseaux est un des axes de travail du BRGM dans le cadre du GISOS (Hamm et al. 2008a-b).

De plus, même si l'on pouvait disposer d'un code adapté au problème, on ne dispose pas de suffisamment d'informations réparties dans l'espace pour le mettre en œuvre, en particulier sur les écoulements internes. La complexité de la structure du système hydrologique à modéliser, ainsi que l'absence de données spatialisées impose donc la mise en œuvre d'une modélisation « globale », basée sur l'analyse des séries de données disponibles au démarrage de l'étude.

Dans cette approche (Figure 3), un réservoir minier ennoyé sera donc considéré comme un « réacteur » au fond étanche, dans lequel l'eau de recharge pénètre par la limite supérieure perméable du réservoir, après avoir alimenté l'aquifère des calcaires fissurés du Dogger. Lorsque l'eau de recharge pénètre dans le réacteur, elle est en contact avec des roches contenant une masse de sulfate cristallisé sous forme de gypse soluble, qu'elle peut dissoudre.

Le réacteur représentant le réservoir minier se comporte comme un « mélangeur parfait » du point de vue des concentrations : tout changement de concentration se répercute instantanément dans le tout le volume du réservoir. L'eau qui est entrée dans le réservoir peut y être stockée ou ressortir par débordement(s), fuite(s) et pompage(s). Le sulfate dissous dans l'eau peut ainsi être transporté hors du réservoir.

2.2.2. Introduction d'un niveau de spatialisation : représentation d'un réservoir par un réseau de réacteurs mélangeurs parfaits

Les données de surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère montrent l'existence de fortes disparités au sein d'un même grand réservoir : les niveaux de concentration en sulfate mesurés aux différents points de mesure sont parfois très différents, et leurs évolutions peuvent être divergentes (Ollagnier, 2013).

Ainsi, pour reproduire l'ensemble des évolutions observées, il est nécessaire d'introduire dans le simulateur un certain degré de spatialisation. Un travail préliminaire d'analyse des plans miniers (Vaute et *al.*, 2005) avait permis d'identifier des « sous-unités hydrogéologiques » dans chaque réservoir : il s'agit de zones de travaux miniers reliées aux zones de travaux voisines par l'intermédiaire d'un nombre restreint de galeries minières.

Sur la base de ce travail de détail, chaque grand réservoir a pu être découpé en 4 à 6 secteurs représentatifs des évolutions observées des concentrations en sulfate, ou dont le fonctionnement est particulier du point de vue hydrogéologique. Au sein d'un réservoir, chaque secteur est relié à un certain nombre de secteurs voisins par un nombre restreint de galeries de jonction, l'ensemble constituant un réseau de secteurs.

Le réseau de secteurs est alors représenté dans le simulateur par un réseau de « réacteurs » (cf. paragraphe précédent pour l'explication des fonctionnalités d'un réacteur). Par l'intermédiaire des liaisons entre réacteurs, chaque réacteur peut échanger de l'eau et des éléments chimiques avec les réacteurs auxquels il est relié, ou avec l'extérieur si le réacteur déborde. Chaque réacteur est alimenté par une fraction de la recharge totale du réservoir et peut faire l'objet d'un pompage. Pour chaque réacteur le simulateur calcule un seul niveau piézométrique et une seule concentration en sulfate, variables au cours du temps. Les différences de niveau piézométrique entre réacteur contrôlent les échanges d'eau (et donc de sulfate) entre réacteurs, et avec l'extérieur pour les réacteurs qui débordent.

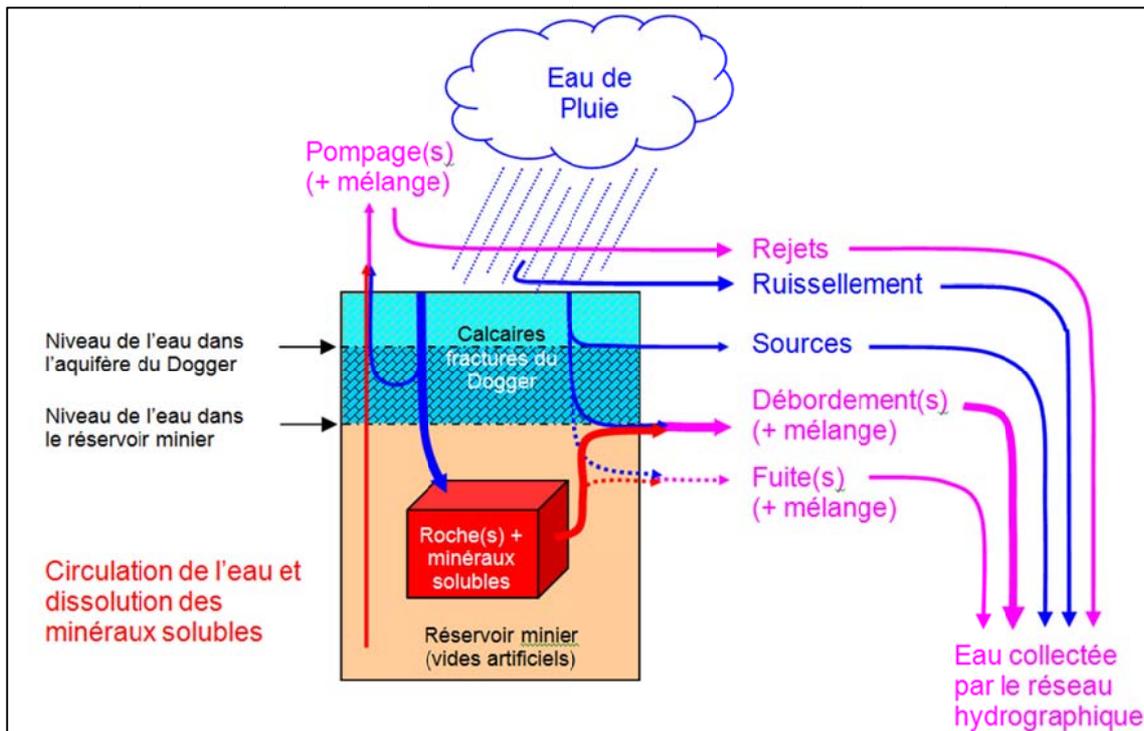


Figure 3 : Modèle conceptuel d'un simulateur de réservoir minier.

2.2.3. Choix des codes de calcul

Pour représenter numériquement ce réseau de réacteurs, les logiciels TEMPO® (logiciel BRGM) et Matlab®-Simulink® ont été retenus. Ces logiciels assurent deux fonctions différentes :

- **Module de simulation hydrologique avec Tempo : calcul et prévision de la recharge des réservoirs.** Ce module est basé sur la modélisation inverse des chroniques de données (pluviosité, niveaux, débit) avec TEMPO®, par des méthodes dérivées du traitement du signal (Pinault et Baubron, 1996 ; Pinault et al., 1999 ; Pinault, 2001 ; Pinault et al, 2001-a, Pinault et al, 2001-b) . Les prévisions sont réalisées grâce à un simulateur de pluie, construit à partir de l'analyse des chroniques de pluie passées.

Module de simulation hydrochimique avec Matlab-Simulink : calcul des niveaux, des débits de débordement et de fuite, des concentrations en sulfate. Construit sous l'interface graphique Simulink® et le solveur Matlab®, le réseau de réacteurs est modulable, depuis le réseau le plus simple jusqu'au plus complexe (Fabriol et al., 2000 ; Collon et al., 2000, 2003a-b, 2004, 2005a-b, 2006). Chaque réacteur réalise des fonctions simples : stockage d'eau, réaction chimique de dissolution du gypse, mélange des concentrations. Chaque réacteur peut être relié à 1 à 6 autres réacteurs, et échanger avec eux de l'eau et des éléments chimiques, ou avec l'extérieur pour les réacteurs qui débordent.

Pour les besoins du calcul, un réacteur est lui-même subdivisé en deux sous-réacteurs, correspondants aux fonctions de calcul chimique et de calcul hydrologique : le premier sous-réacteur « réactif » représente les zones foudroyées et assure la fonction de calcul du taux de dissolution de la masse de gypse présente ; tandis que le deuxième réacteur « non réactif » représente les zones de galeries et assure la fonction de dilution et de transport du sulfate hors du réservoir. La concentration de sortie du réacteur résulte ainsi du mélange des concentrations en sulfate calculées pour chacun des deux sous-réacteurs.

Les deux modules sont associés : afin de réaliser des prévisions d'évolution de concentration, le module de simulation hydrochimique utilise les résultats des prévisions du module de simulation hydrologique.

2.3. CONSTRUCTION DES SIMULATEURS DE RESERVOIRS

2.3.1. Recueil et traitement des données chronologiques

L'acquisition et le traitement de nombreuses séries de données chronologiques est indispensable à la bonne réalisation du modèle :

- indicateurs permettant de calculer la recharge des réservoirs : pluie et débit de l'Orne ;
- débits de débordement et de fuite des réservoirs vers les cours d'eau ;
- débits pompés dans les réservoirs miniers, avant et après ennoyage ;
- niveaux piézométriques dans les réservoirs miniers ;
- analyses chimiques de l'eau des débordements, des fuites, et des pompages.

Une partie de ces données est acquise dans le cadre de la surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère.

Les autres données ont été recueillies auprès des divers organismes producteurs de données : Agence de l'eau, DIREN Lorraine, ARS, exploitants miniers (ARBED), industriels, syndicats AEP et d'assainissement, communes.

Un travail très important de saisie, de vérification et de mise en cohérence des données a été réalisé. Lorsque les valeurs journalières étaient manquantes entre les mesures mensuelles, elles ont été généralement estimées par interpolation linéaire. Le pas de temps de calcul du simulateur étant le jour, les données ont toutes été traitées pour être disponibles à ce pas de temps.

2.3.2. Géométrie des secteurs

Comme on l'a dit plus haut, les plans miniers de l'ensemble des concessions des réservoirs Sud, Centre et Nord ont été analysés en 2004-2005 (Vaute et al., 2005). On dispose ainsi d'une cartographie et de données concernant les zones foudroyées, les zones de galeries, les galeries de jonction entre secteurs voisins de travaux miniers, les directions d'écoulement dans les réservoirs miniers (zones noyées et dénoyées), et les zones d'alimentation probables des sous-unités hydrogéologiques.

Ce travail a servi de base à l'identification de secteurs de réservoirs cohérents avec la zone d'influence de chaque point de surveillance disposant d'analyses chimiques. Le découpage des réservoirs en secteurs a été réalisé en fonction des limites des travaux miniers et des accidents géologiques.

Les données déjà compilées sous une forme essentiellement cartographique ont été exploitées de manière à en extraire pour chaque secteur des informations plus synthétiques directement utilisables par le simulateur numérique : altitudes minimum et maximum de secteurs, volumes de vide totaux des zones foudroyées et des zones de galeries. Le volume de vides miniers a été évalué à l'aide des données d'exploitation minière : surface des zones exploitées et taux de défrètement (% de matériau extrait).

2.3.3. Mise en réseau des secteurs

Pour chaque réservoir, les connections entre les 4 à 6 secteurs ont été identifiées, et les secteurs ont été mis en réseau. Un paramètre K contrôlant l'échange entre secteurs connectés a été introduit. Ce paramètre est analogue à une conductivité hydraulique : plus il est grand, plus l'échange entre secteurs se fait « facilement », et plus les niveaux piézométriques des deux secteurs est proche ; au contraire, si ce paramètre est faible, les échanges sont « difficiles », et les niveaux piézométriques peuvent être très différents.

2.3.4. Calcul de la recharge

La recharge totale d'un réservoir, c'est-à-dire l'eau qui entre dans l'ensemble des secteurs d'un réservoir à chaque pas de temps, est calculée à l'aide de l'équation (1) :

$$\Delta V_{\text{Stock}} = V_{\text{Recharge}} - (V_{\text{Débordements}} + V_{\text{Fuites}} + V_{\text{Pompages}}) \quad (1)$$

Cette équation exprime simplement que la variation du stock d'eau ΔV_{Stock} dans le réservoir au cours d'un pas de temps est égale à la différence des volumes d'eau entrés (recharge) et des volumes d'eau sortis (débordements, fuites, pompages) au cours de ce pas de temps.

La variation du stock d'eau présent dans le réservoir à un pas de temps donné est déduite de la géométrie des différents réservoirs, par l'intermédiaire de la courbe de variation du volume de vide avec l'altitude, dénommée « courbe de volume ». Les sorties d'eau sont mesurées (débordements, pompages) ou calculées (fuites). A chaque pas de temps, dès lors que toutes les autres variables sont mesurées (débordements, pompages) ou fixées (courbe de volume), la recharge peut être calculée par l'équation (2) :

$$V_{\text{Recharge}} = \Delta V_{\text{Stock}} + V_{\text{Débordements}} + V_{\text{Fuites}} + V_{\text{Pompages}} \quad (2)$$

L'utilisation d'une telle formule implique par ailleurs que les erreurs de mesure des débordements et des pompages, et les erreurs de calcul des fuites et de la courbe de volume, sont intégrées dans le calcul de la recharge. L'ajustement des variables hydrologiques de sorties du simulateur (niveaux, débits de débordement) est donc nécessairement bon sur toute la période de calage du modèle.

2.3.5. Modèle de cinétique chimique de dissolution du gypse

Les mécanismes mis en jeu lors des réactions chimiques ont été recensés par Collon (2003, 2004) et simplifiés par Hamm *et al.* (2008). La cinétique de dissolution du gypse prise en compte est la suivante :

$$r = \alpha m^{\beta} \left(1 - \frac{PI}{K} \right)$$

Avec : r la vitesse de dissolution du gypse

m la masse de gypse pouvant être dissoute ($\text{kg}_{\text{gypse}}/\text{kg}_{\text{eau}}$),

PI le produit d'activité ionique $PI = (Ca^{2+})(SO_4^{2-})$ ($\text{mol}/\text{kg}_{\text{eau}}$)²,

K la constante de dissolution égale à $10^{-4.58}$ ($\text{mol}/\text{kg}_{\text{eau}}$)² à 25°,

α une constante cinétique

β un paramètre de forme

Cette équation exprime que la vitesse de dissolution du gypse augmente avec la masse de gypse à dissoudre et la distance à l'équilibre de la réaction de dissolution.

2.4. CALAGE DES SIMULATEURS DE RESERVOIRS

Trois simulateurs correspondants aux 3 grands réservoirs ont été construits. Ces simulateurs ont été calés sur les chroniques de données recueillies, de manière à reproduire au mieux l'ensemble des données observées : niveaux piézométriques des réservoirs, débits de débordement et de fuite, évolution des concentrations dans les puits miniers et les points de débordement et de fuite.

Deux phases très différentes de la vie des réservoirs ont été simulées :

- la phase d'ennoyage, pendant laquelle l'eau s'accumule dans le réservoir avec des écoulements internes très faibles et une évolution chimique de l'eau dominée par les interactions entre l'eau et la roche,
- la phase de débordement, pendant laquelle l'eau circule à travers le réservoir jusqu'au(x) point(s) de débordement(s) (et de fuite éventuellement) avec une évolution chimique dominée par la dilution.

2.4.1. Calage des paramètres K d'échange entre secteurs

Lors de la phase de calage, les paramètres K qui règlent les échanges entre les réservoirs ont été ajustés de manière à obtenir une bonne répartition entre les débits de débordement et de fuites. Ils sont généralement très grands, ce qui traduit le fait que les échanges sont faciles entre secteurs, et que les niveaux piézométriques sont très proches.

2.4.2. Calage des paramètres de cinétique chimique

Les paramètres α et β de la cinétique chimique de dissolution du gypse ont aussi fait l'objet d'un calage. Les mêmes paramètres ont été retenus pour les 3 simulateurs, ce qui est un gage de robustesse.

2.4.3. Modélisation de la recharge à des fins de prévisions

Pour obtenir un modèle prédictif de la recharge calculée au § 2.3.4, il est nécessaire de modéliser la recharge en fonction de données externes : pluie, influence éventuelle des pompages, autre indicateur pertinent. Ce travail de calage a été réalisé à l'aide du logiciel de traitement du signal TEMPO, pour la période postérieure à l'ennoyage de chaque réservoir.

Si l'on fait l'hypothèse (à vérifier) que la variation du stock est négligeable devant le débit de débordement et les pompages, l'équation (2) se simplifie :

$$V_{\text{Recharge}} = (V_{\text{Débordements}} + V_{\text{Fuites}}) + V_{\text{Pompages}} \quad (3)$$

Modéliser la recharge revient donc dans ce cas à modéliser le débit total de débordement et de fuites, puisque le volume pompé est une décision humaine, devant faire l'objet de scénarios. Dans le cas des 3 réservoirs du bassin ferrifère lorrain, le débit total de débordement et de fuites de chaque réservoir peut être modélisé avec Tempo à l'aide d'une réponse impulsionnelle unique considérant comme entrée le débit de la rivière Orne, qui s'avère être une très bonne estimation de la pluie efficace. On dispose ainsi d'un modèle prédictif de débordement + fuites pour chaque réservoir.

On a vérifié ensuite que la recharge calculée à l'aide de l'équation (2) peut être correctement modélisée par l'équation (3), qui devient donc :

$$V_{\text{Recharge}} = \text{Réponse Impulsionnelle Tempo } (V_{\text{Débordements}} + V_{\text{Fuites}}) + V_{\text{Pompages}} \quad (4)$$

Le calcul d'un modèle inverse Tempo « pluie / ETP - débit de l'Orne » permet enfin de relier le débit de l'Orne à la pluie.

A des fins prédictives, le schéma de calcul est donc le suivant :

Pluie + ETP → Modèle inverse Tempo → Débit de l'Orne

Débit de l'Orne → Réponse impulsionnelle Tempo → $V_{\text{Débordements}} + V_{\text{Fuites}}$

$$V_{\text{Débordements}} + V_{\text{Fuites}} + V_{\text{Pompages}} = V_{\text{Recharge}}$$

V_{Recharge} → Simulateur → Débits, niveaux, concentrations

Il est ainsi possible d'utiliser le modèle de recharge en supposant qu'il n'y a pas de variation de régime hydrodynamique, ce qui est vrai après le débordement des réservoirs. Pour prédire la recharge, on utilise un modèle Tempo de génération stochastique de chroniques de pluie. Ce dernier génère un grand nombre de chroniques possibles de pluie (jusqu'à 1024), puis calcule les chroniques de débit de l'Orne correspondantes. Il est alors facile de choisir parmi toutes les chroniques possibles de débit de l'Orne, celles qui permettront de calculer par exemple la recharge moyenne, ou les recharges à +/- 20 % de la moyenne.

3. Modélisation du réservoir Sud

3.1. EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN SULFATE DANS LE RESERVOIR SUD

La Figure 4 présente les chroniques des concentrations maximales annuelles en sulfate sur les stations disposant de données de surveillance. L'analyse du graphique met en évidence une tendance à la baisse sur la totalité des stations, avec des nuances concernant la concentration maximale atteinte au moment du débordement ainsi que la vitesse de diminution des concentrations.

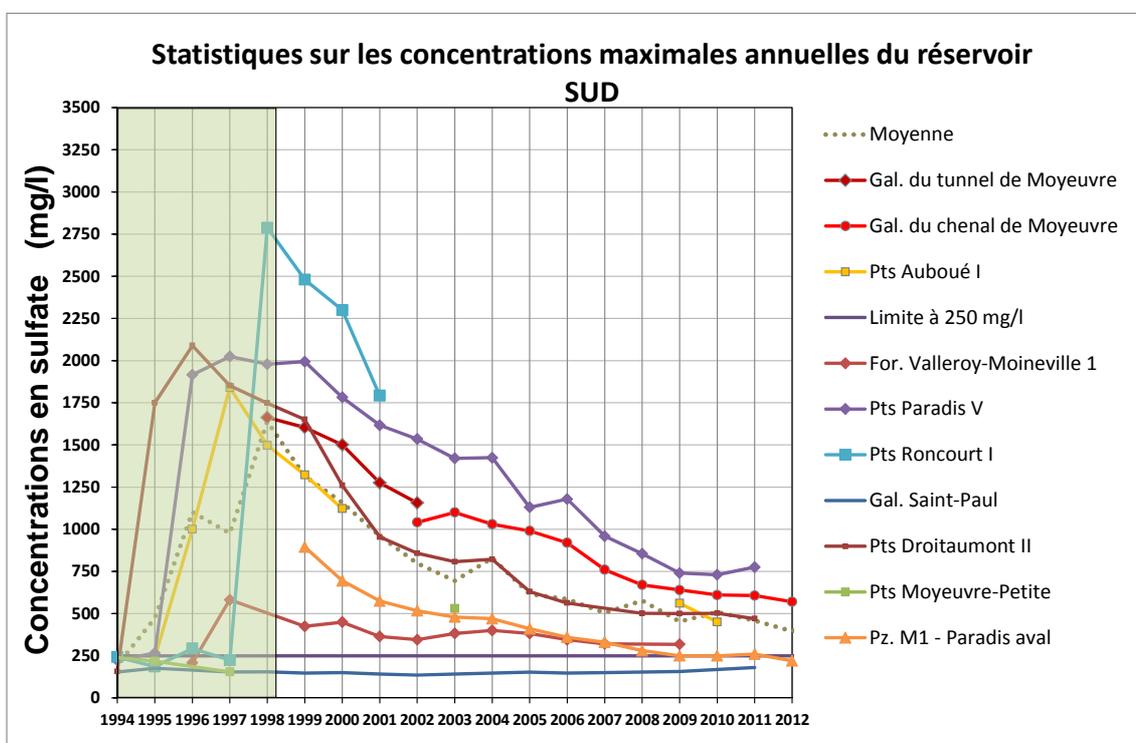


Figure 4 : Concentrations maximales annuelles en sulfate dans le réservoir Sud (le rectangle vert signale la période d'envoie du réservoir).

3.2. SECTORISATION DU RESERVOIR SUD

La carte de la Figure 5 présente le résultat du travail de sectorisation pour le réservoir Sud. Un numéro a été attribué pour chaque secteur potentiellement homogène. Au total, 6 secteurs ont été identifiés dans le réservoir Sud. Une analyse détaillée de ces secteurs et des points de surveillance associés est présentée dans le Tableau 1.

La délimitation des secteurs homogènes résulte du croisement de l'analyse des plans miniers et des données de surveillance concernant l'ion sulfate. Une appréciation du taux de renouvellement de l'eau de chaque secteur a été réalisée (bon, moyen ou mauvais/nul, cf. le Tableau 1). Le taux de renouvellement n'est pas quantifié à ce stade, et cette appréciation présente donc un caractère indicatif, déduit essentiellement des tendances observées sur l'évolution des concentrations en sulfates pour chaque secteur.

Une seule station est implantée dans le secteur N°1 qui correspond aux parties les plus profondes du réservoir Sud. Il s'agit de la station du puits Droitaumont II sur laquelle une nette tendance à la baisse des concentrations est observée. Le secteur N°1 bénéficie d'un très bon renouvellement de l'eau du réservoir.

Plusieurs stations de surveillance sont implantées dans le secteur N°2 (puits Paradis V, piézomètre M1 Paradis Aval, Puits Auboué). Toutes ces stations présentent des tendances à la baisse des concentrations en sulfates selon des tendances assez comparables. Les niveaux de concentrations y sont toutefois très variables. Cette variabilité a plusieurs causes :

- une conduite d'eau provenant du secteur n°5 (Valleroy) débouche directement dans le puits Auboué. Lorsque que des différences de niveaux s'établissent entre ces deux parties du réservoir, des échanges d'eau peuvent se mettre en place entre le secteur N°2 et le secteur N°5 moins minéralisé : lorsque les échanges se font du secteur N°5 vers le secteur N°2, la concentration mesurée au puits Auboué diminue,
- le piézomètre Pz M1 Paradis aval présente les concentrations en sulfates les plus faibles mesurées sur le secteur N°2. Il est en effet situé dans les parties supérieures du réservoir, au droit d'une zone foudroyée constituant une zone de recharge du réservoir. Cette situation particulière explique les plus faibles niveaux de concentration qui y sont observés.

Le puits Paradis V apparaît ainsi être le plus représentatif du secteur N°2 du réservoir Sud.

Le secteur N°6 est surveillé par le puits Roncourt I sur lequel les analyses les plus récentes datent de 2001. Les concentrations en sulfates y apparaissent à l'époque les plus importantes mesurées sur le réservoir Sud. On constate également que les concentrations ont augmenté tardivement au cours de l'ennoyage. Ce phénomène est lié à l'altitude de la base du puits Roncourt I dans le secteur N°6, dans lequel les parties les plus au Sud ont été ennoyées les premières, l'eau n'envahissant les parties septentrionales qu'en dernier. La configuration du secteur N°6 et la nette tendance à la baisse observée sur les concentrations en sulfates au puits Roncourt I laissent supposer un bon renouvellement de l'eau sur cette partie du réservoir.

Le secteur N°5 correspond à l'ancienne mine de Valleroy. La mine de Valleroy est en relation directe avec la mine voisine de Moutiers. L'ensemble Valleroy-Moutiers est relativement isolé des mines voisines (Paradis et Auboué notamment) dites encaissantes, grâce à des barrages en galeries (Vaute, 2003). Cette partie du réservoir est toutefois en communication hydraulique avec le reste du réservoir Sud à travers les terrains de la formation ferrifère et également au droit d'une conduite endommagée reliant le secteur N°5 au secteur N°2. Comme indiqué précédemment, le sens des communications hydrauliques est lié aux différences de niveaux piézométriques existantes entre ces deux parties du réservoir Sud. Le secteur N°5 est surveillé par les forages de Valleroy-Moineville qui présentent des concentrations en sulfates assez faibles (elles n'ont pas dépassé 700 mg/l à l'issue de l'ennoyage). En raison de son histoire, cette partie du réservoir a déjà été renouvelée plusieurs fois. Il constitue en effet un sous-réservoir déjà utilisé pour l'AEP avant le début de l'ennoyage. Le secteur présente par ailleurs un bassin d'alimentation particulièrement étendu (nombreuses pertes de cours d'eau en milieu karstique), son taux de renouvellement est par conséquent excellent.

Les secteurs N°3 et 4 correspondent aux parties les plus septentrionales du réservoir Sud. Leur surveillance est assurée par les ouvrages de débordement (Galerie du Tunnel de Moyeuve et galerie du chenal de Moyeuve) et par le puits Moyeuve-petite. La galerie du tunnel de Moyeuve collecte les eaux provenant du secteur N°4 et la galerie du chenal de Moyeuve (nouveau point de débordement après abaissement du niveau du réservoir) collecte les eaux provenant du secteur N°3. Les chroniques d'évolution des concentrations en sulfates montrent la très bonne continuité des tendances et des niveaux de concentrations entre ces deux stations. Ce constat pourrait justifier de raccorder les secteurs 3 et 4 qui présentent des comportements analogues. Le puits Moyeuve-petite, est implanté à l'extrémité Nord du secteur N°4. Il présente par comparaison aux points de débordement, des concentrations en sulfates assez faibles qui sont expliquées par la proximité de la station avec les zones non ennoyées (mélange de l'eau du secteur N°4 par de l'eau moins minéralisée provenant des zones non ennoyées). Les données de la galerie St-Paul, qui est située dans les zones non ennoyées sont présentées à titre indicatif.

L'analyse des concentrations en sulfates et des plans miniers fait donc ressortir, pour le réservoir Sud, 6 secteurs relativement homogènes. Ces secteurs présentent des comportements assez similaires du point de vue des tendances d'évolution des concentrations en sulfates (hormis le secteur N°5 de Valleroy qui présente de par sa situation très déconnectée un comportement plus atypique). L'ensemble des secteurs homogènes délimités dans le cadre du travail d'optimisation présente donc un bon renouvellement d'eau qui explique la baisse progressive des concentrations en sulfates observée depuis le débordement.

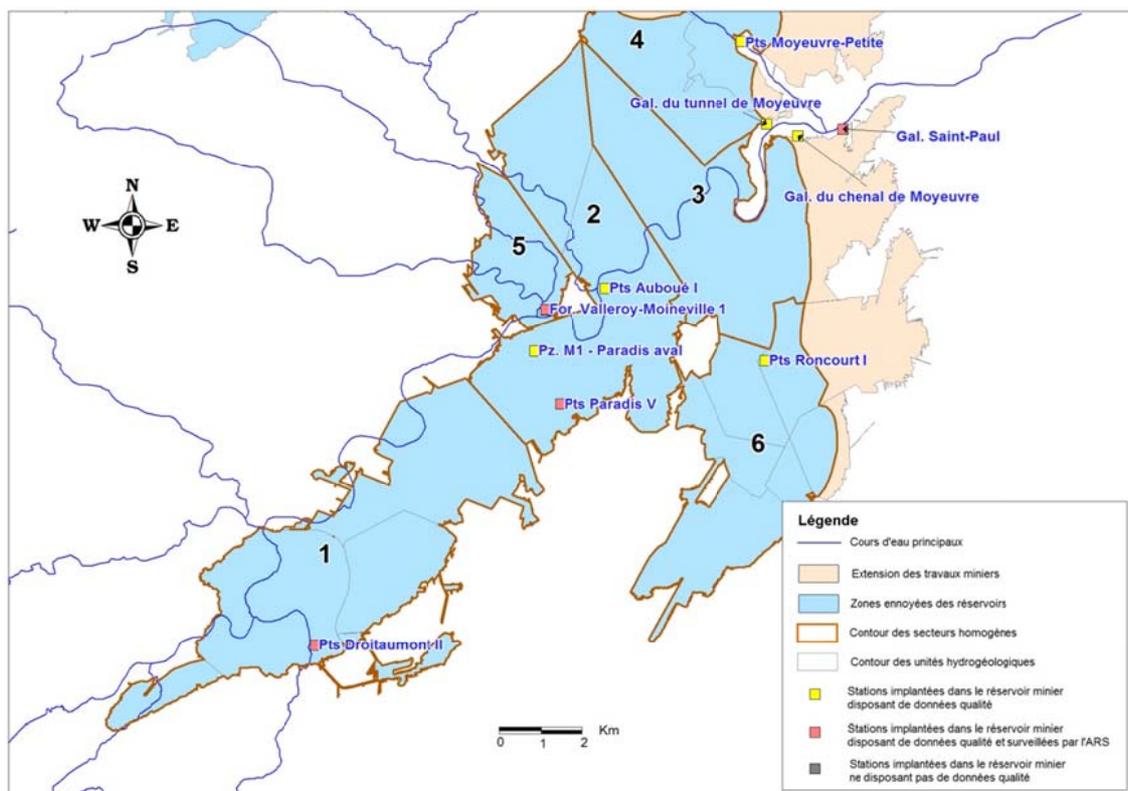


Figure 5 : Carte des 6 secteurs du réservoir Sud (Ollagnier, 2013).

N°	Nom	Caractérisation des tendances d'évolution des concentrations en sulfates depuis le débordement	N° Secteur	Commentaire sur la sectorisation	Renouvellement de l'eau
S20	Pts Droitaumont II	Baisse	1	Ce secteur correspond aux parties les plus profondes du réservoir Sud	Bon
S14	Pz. M1 - Paradis aval	Baisse	2		
S19	Pts Auboué I	Baisse			
S22	Pts Paradis V	Baisse			
S4	Gal. du chenal de Moyeuve	Baisse	3	-	Bon
S5	Gal. du tunnel de Moyeuve	Baisse	4	-	Bon
S21	Pts Moyeuve-Petite	?			
S2	For. Valleroy-Moineville 1	Baisse	5	Ce secteur est isolé du reste du réservoir Sud. Des échanges sont possibles au travers d'une conduite d'eau endommagée reliant la concession de Valleroy à celle d'Auboué	Bon
S3	For. Valleroy-Moineville 2	Baisse			
S23	Pts Roncourt I	Baisse	6	-	Bon
S6	Gal. Saint-Paul	Hors zone ennoyée	Hors zone ennoyée	-	-

Tableau 1 : Caractéristiques des points de surveillance représentatifs de chaque secteur du réservoir Sud (Ollagnier, 2013).

3.3. RESULTATS DU CALAGE DU SIMULATEUR DU RESERVOIR SUD

Les Figure 6 et Figure 7 présentent schématiquement la configuration du réseau de 6 réacteurs qui constitue le simulateur du réservoir Sud. Ce réseau reproduit la sectorisation définie au paragraphe précédent, en prenant en compte les liaisons entre secteurs, ainsi que les points de débordement et de fuite.

Les résultats du calage du simulateur sont présentés de la Figure 8 à la Figure 16. On constate le très bon ajustement des niveaux piézométriques et des débits de débordement, et l'ajustement satisfaisant des concentrations en sulfate. Les particularités de chaque secteur, décrites précédemment, sont correctement reproduites.

3.4. SIMULATION PREVISIONNELLE DES CONCENTRATIONS EN SULFATE POUR LE RESERVOIR SUD

La Figure 17 présente les résultats de la simulation prévisionnelle d'évolution des concentrations dans les 20 prochaines années. La simulation prend en compte une recharge moyenne du point de vue statistique, et des prélèvements qui répètent les valeurs observées entre les années 2008 à 2011.

Le Tableau 2 indique pour chaque secteur l'année au cours de laquelle la concentration limite de 250 mg/l pourrait être atteinte selon ce scénario moyen. Le cas du secteur 5 est particulier, puisque sa concentration est déjà proche de 250 mg/l, et que la concentration du secteur dépend du volume pompé.

Réservoir Sud	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4	Secteur 5	Secteur 6
Scénario Moyen	2015	2019	2020	2019	–	2022

Tableau 2 : Résultats de la simulation prévisionnelle des concentrations en sulfate pour le réservoir Sud : années d'atteinte de la concentration limite 250 m/l.

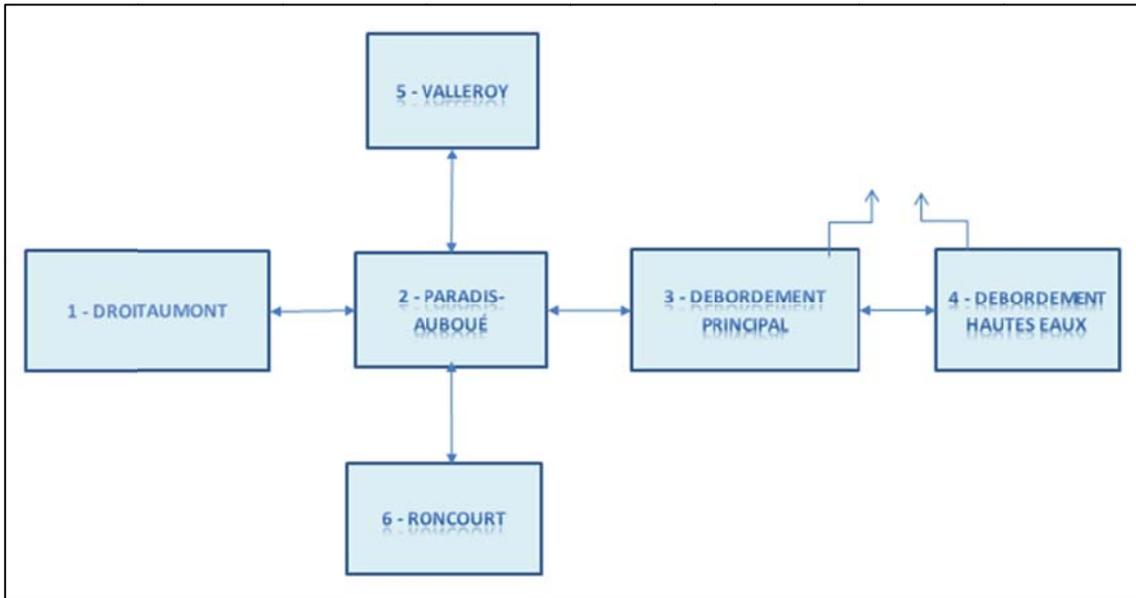


Figure 6 : Simulateur du réservoir Sud : Schéma des liaisons entre les 6 secteurs du réservoir.

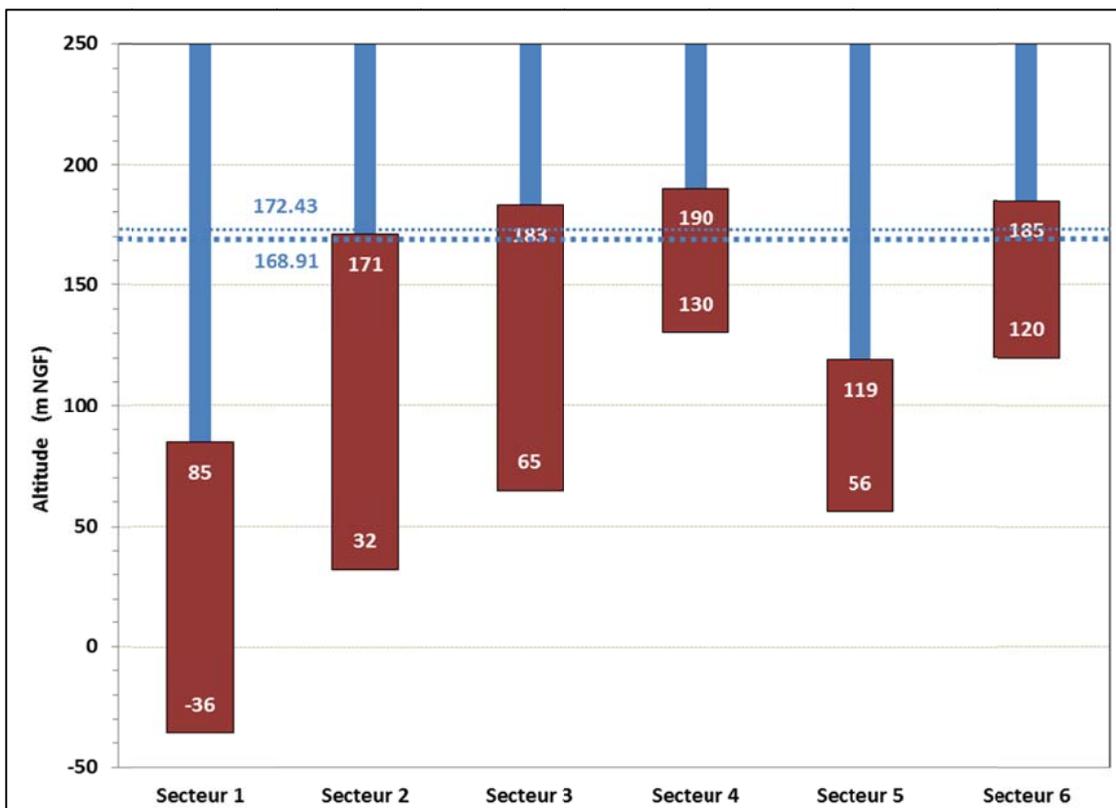


Figure 7 : Simulateur du réservoir Sud : Schéma des cotes des murs et toits des secteurs (travaux miniers en rouge, calcaires du Dogger en bleu, cotes de débordement en pointillé).

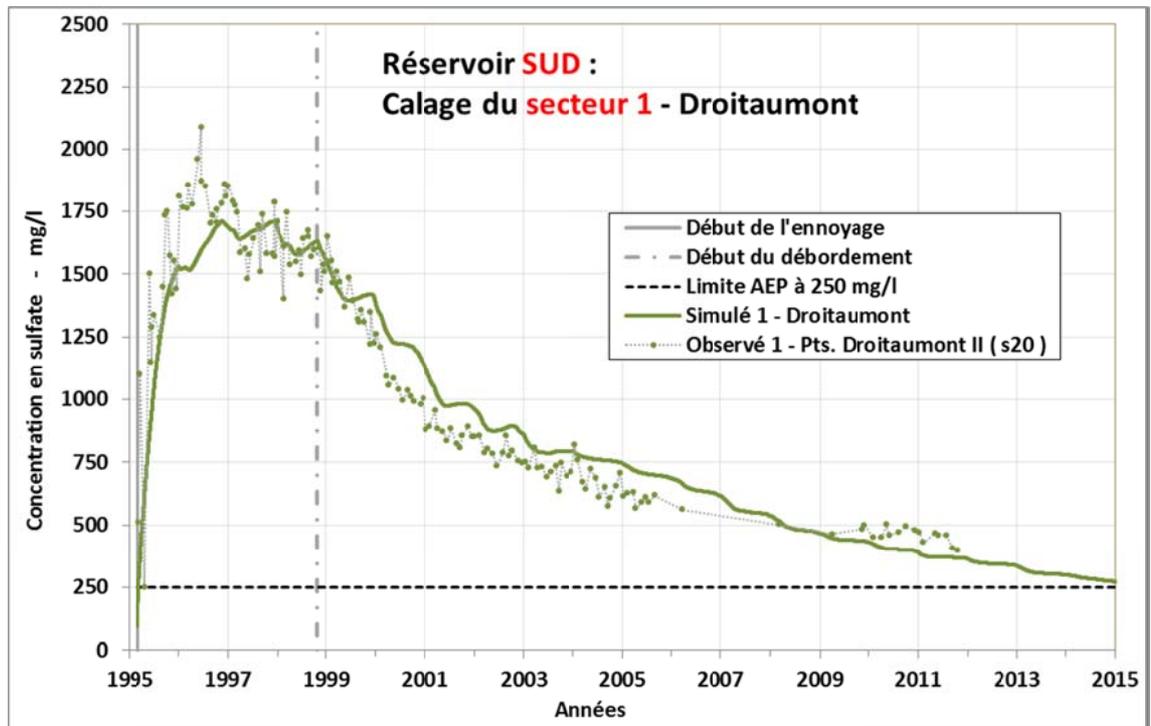


Figure 8 : Réservoir Sud -secteur 1 : concentrations observées et simulées.

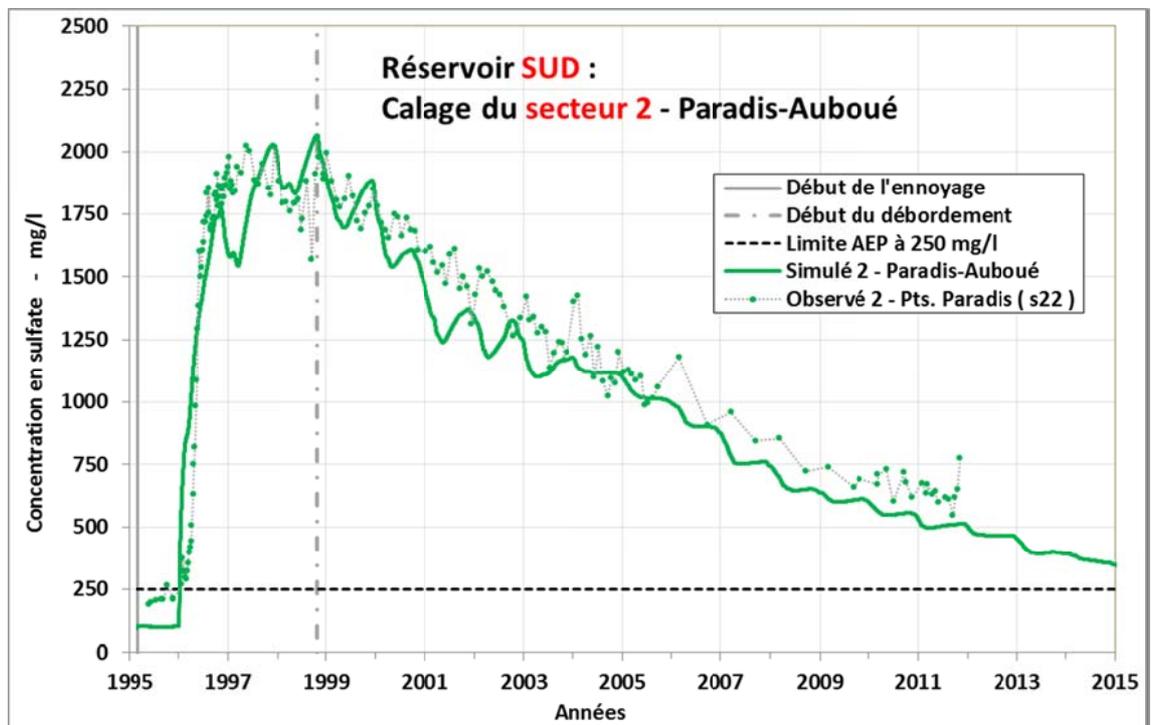


Figure 9 : Réservoir Sud -secteur 2 : concentrations observées et simulées.

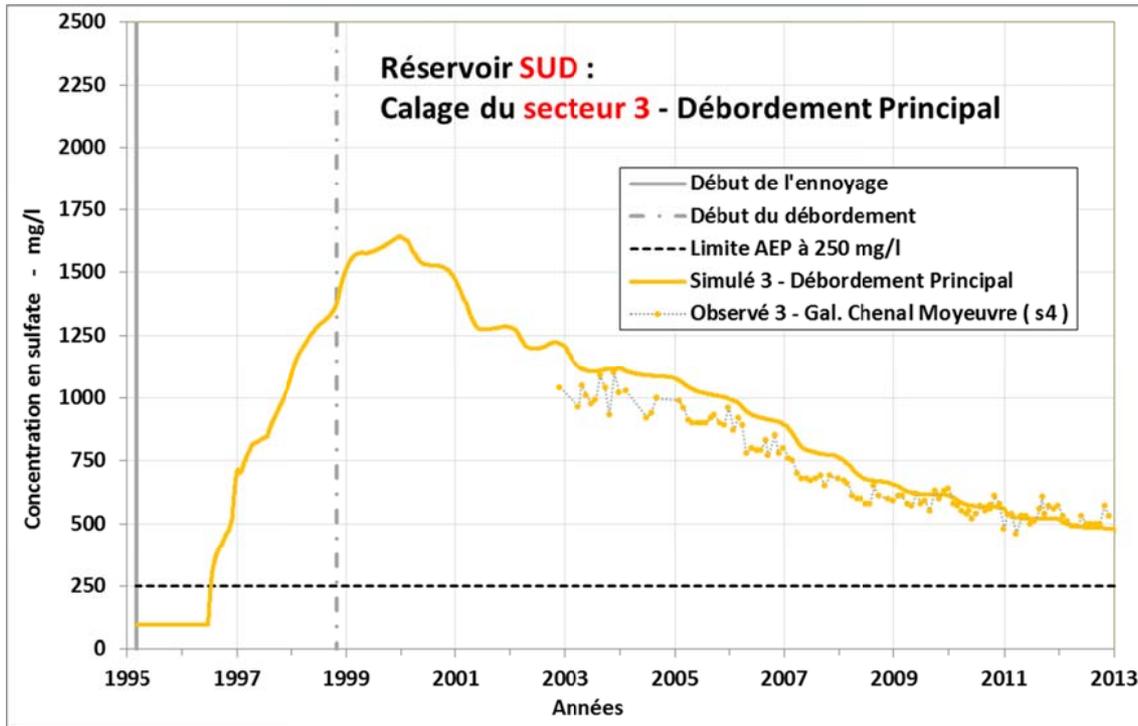


Figure 10 : Réservoir Sud -secteur 3 : concentrations observées et simulées.

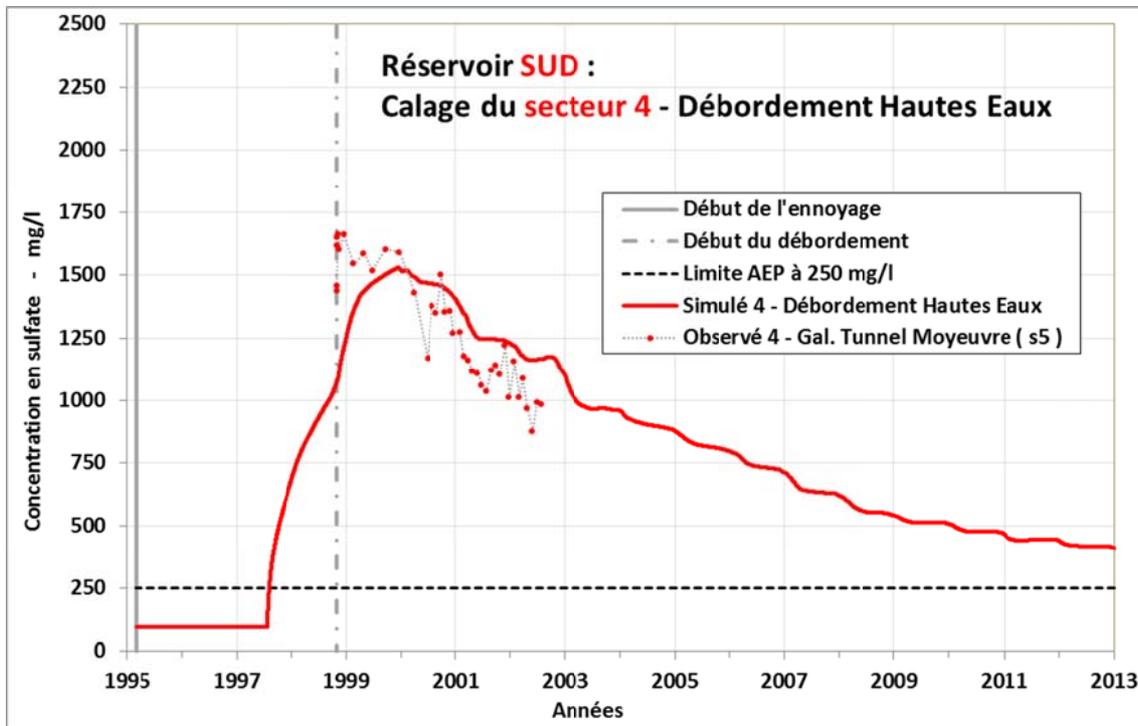


Figure 11 : Réservoir Sud -secteur 4 : concentrations observées et simulées.

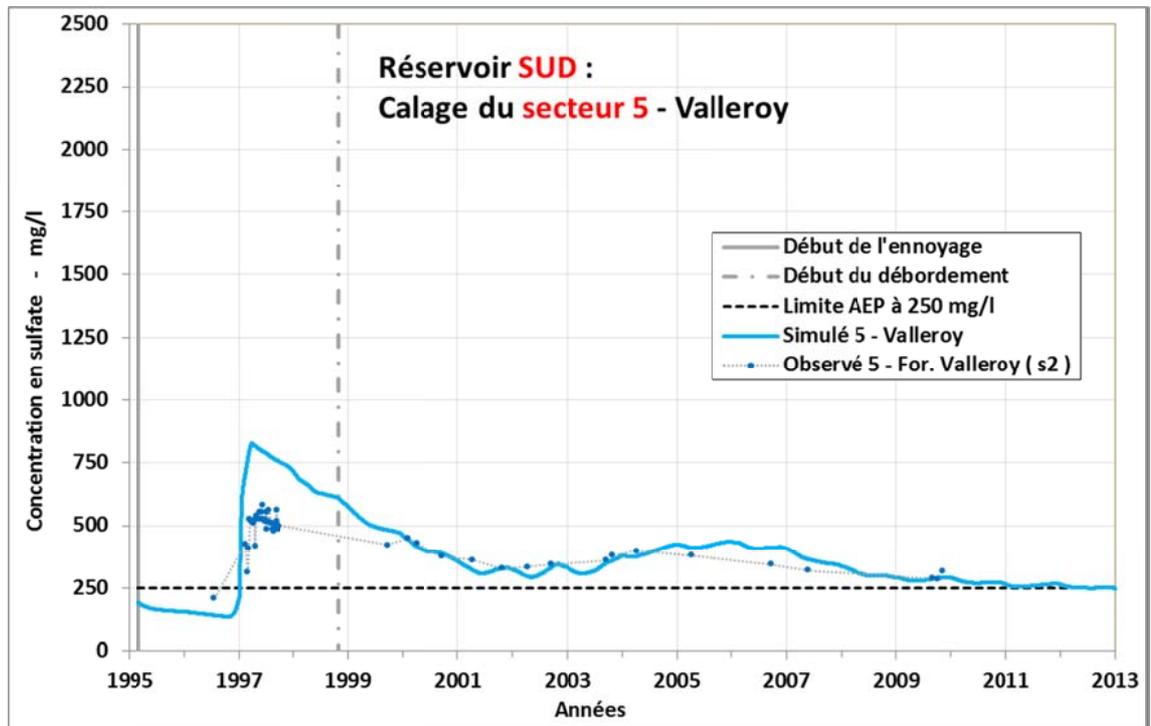


Figure 12 : Réservoir Sud -secteur 5 : concentrations observées et simulées.

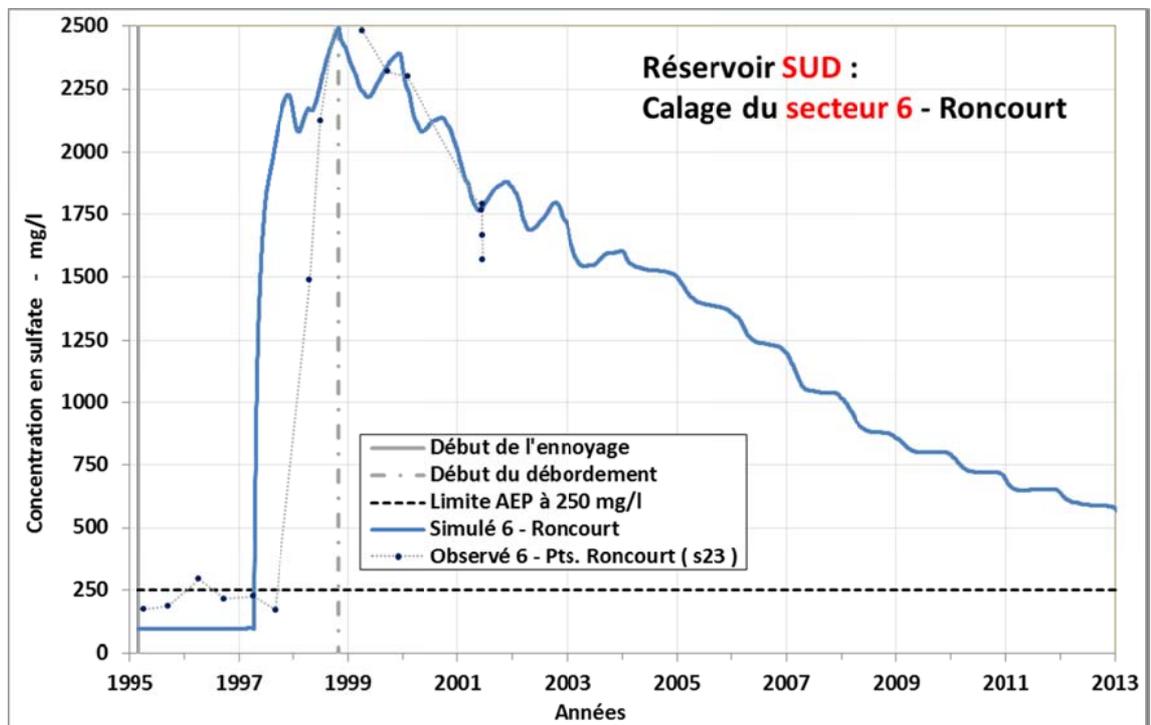


Figure 13 : Réservoir Sud -secteur 6 : concentrations observées et simulées.

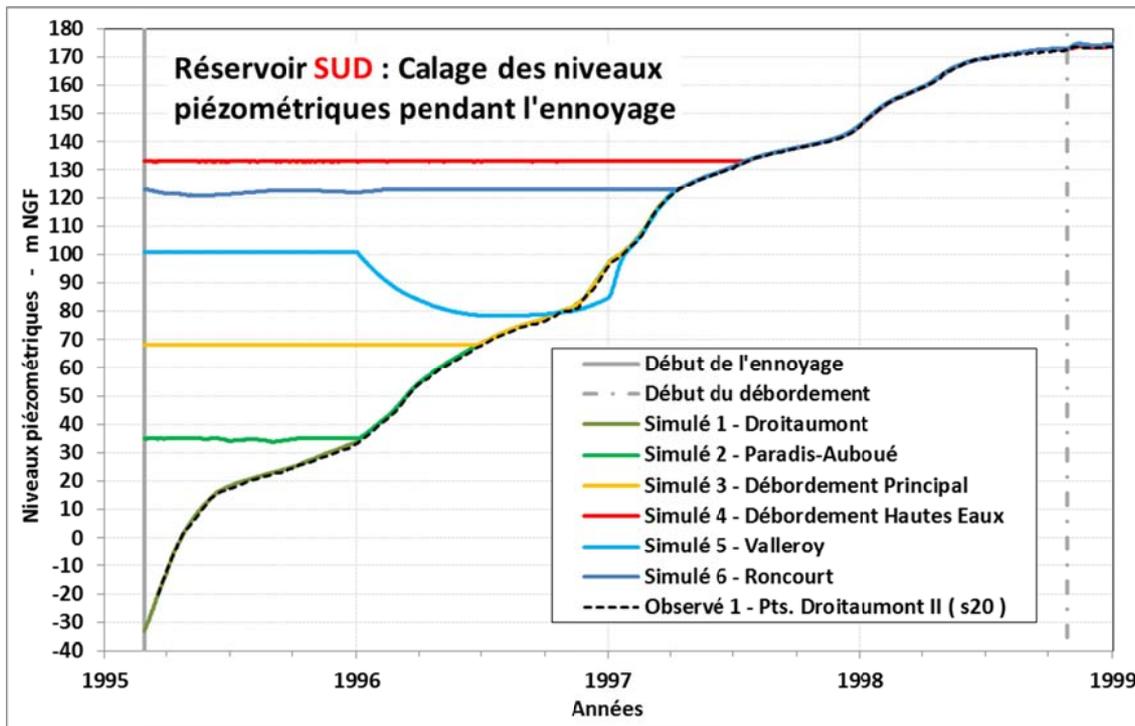


Figure 14 : Réservoir Sud : niveaux piézométriques observés et simulés pendant l'ennoyage.

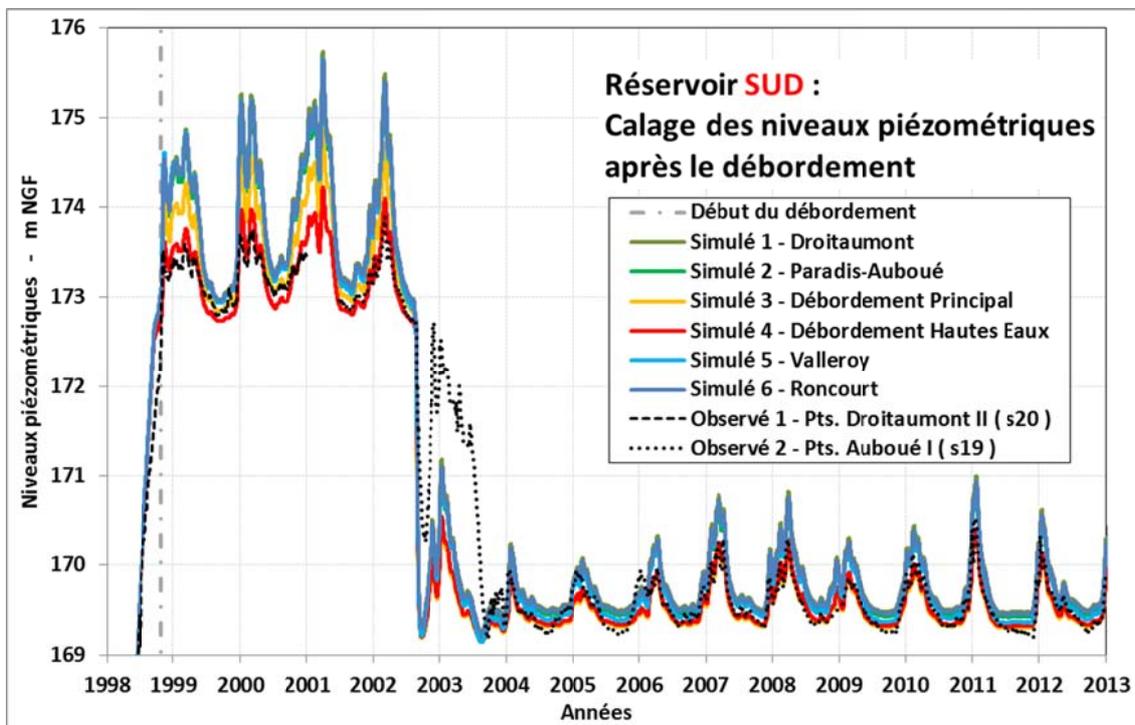


Figure 15 : Réservoir Sud : niveaux piézométriques observés et simulés après le débordement.

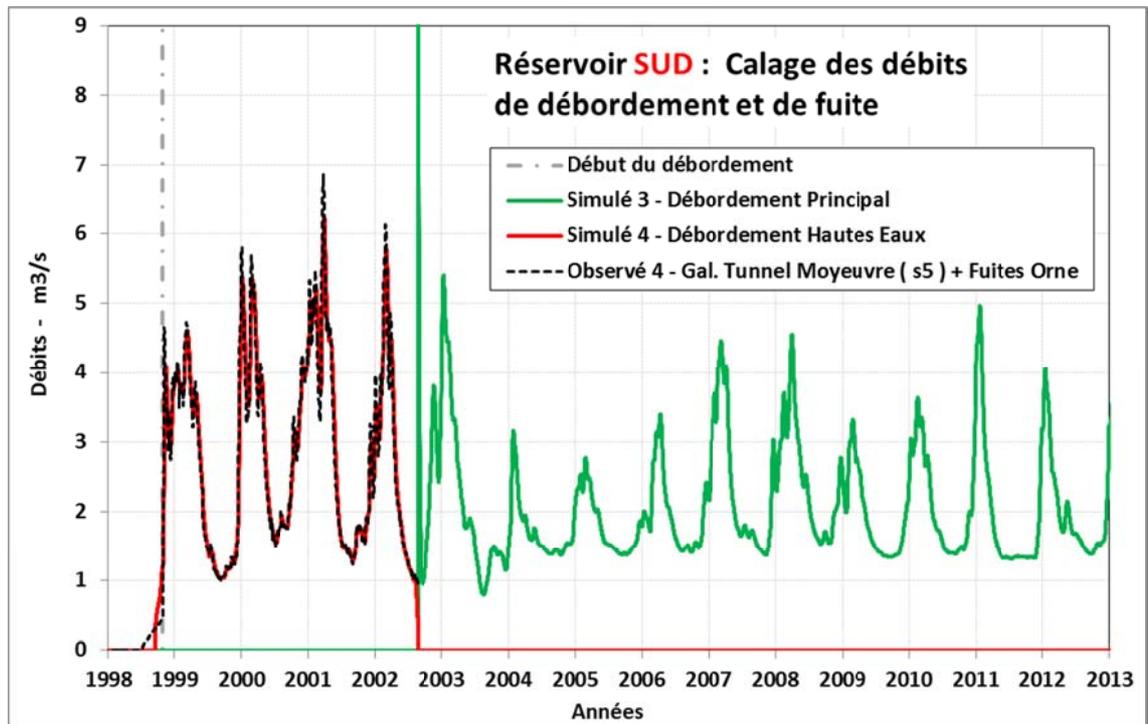


Figure 16 : Réservoir Sud : débits de débordement observés et simulés.

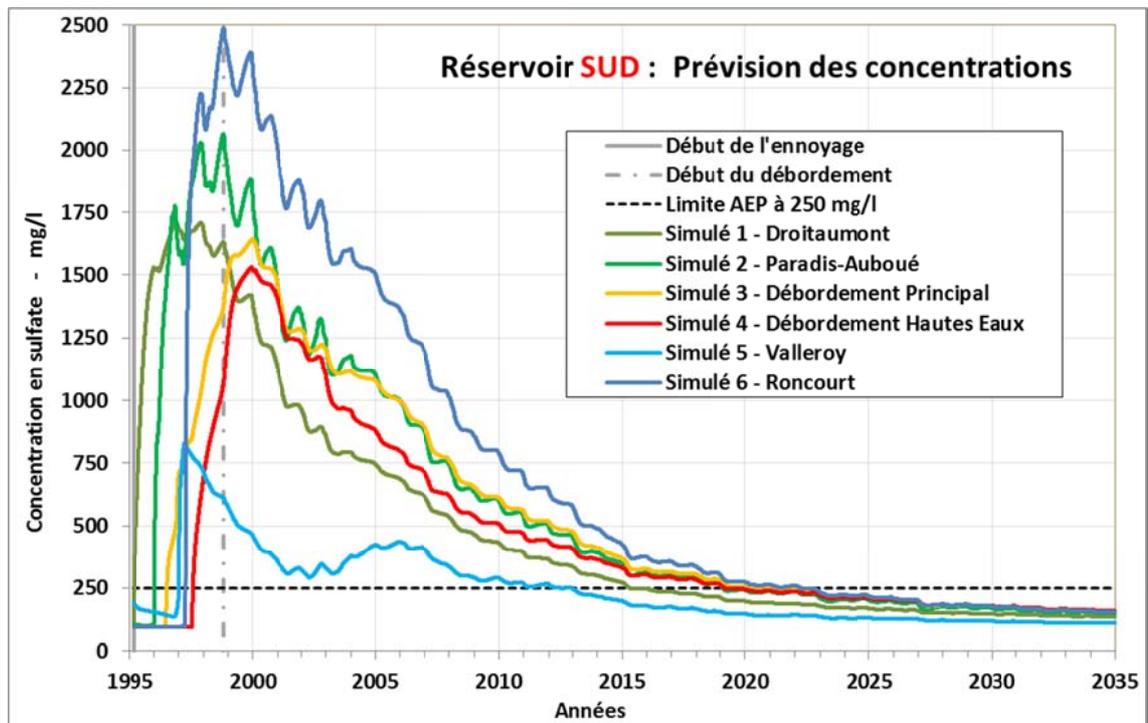


Figure 17 : Réservoir Sud : concentrations simulées jusqu'en 2034.

4. Modélisation du réservoir Centre

4.1. EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN SULFATE DANS LE RESERVOIR CENTRE

La Figure 18 présente les chroniques des concentrations maximales annuelles en sulfate sur les stations disposant de données de surveillance. L'analyse du graphique fait ressortir plusieurs groupes de stations avec des tendances particulières :

- Tendence à la baisse pour les stations du forage de route blanche (C2), Pz Chevillon artésien (C8), puits Anderny II (C14), Source Chapelle (C18), galerie de Bois d'Avril (C3)
- Tendances stables pour les stations du débordement du Woigot (C5), du puits Tucqueneux (C17) et du puits Amermont III (C13).

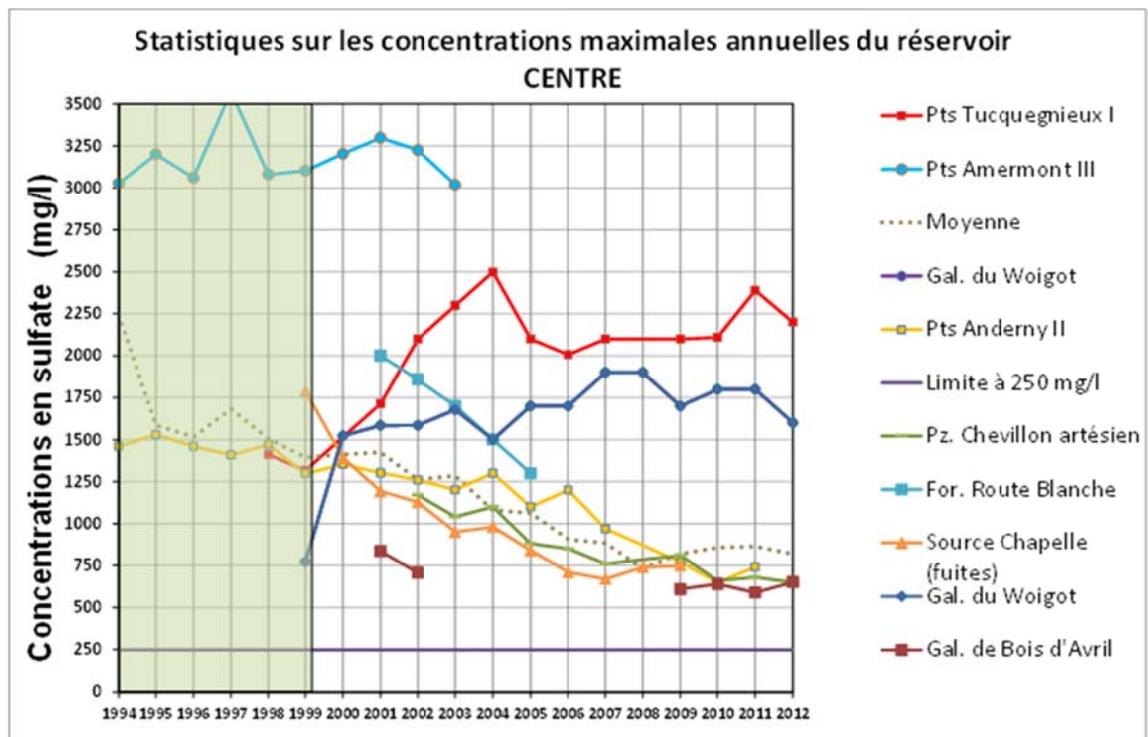


Figure 18 : Concentrations maximales annuelles en sulfate dans le réservoir Centre (le rectangle vert signale la période d'ennoyage du réservoir).

4.2. SECTORISATION DU RESERVOIR CENTRE

La carte de la Figure 19 présente le résultat du travail de sectorisation pour le réservoir Centre. Un numéro a été attribué pour chaque secteur potentiellement homogène. Au total, 4 secteurs ont été identifiés dans le réservoir Centre. Une analyse détaillée de ces secteurs et des points de surveillance associés est présentée dans le Tableau 3.

La délimitation des secteurs homogènes résulte du croisement de l'analyse des plans miniers et des données de surveillance concernant l'ion sulfate. Une appréciation du taux de renouvellement de l'eau de chaque secteur a été réalisée (bon, moyen ou mauvais/nul, cf. le Tableau 3). Le taux de renouvellement n'est pas quantifié à ce stade, et cette appréciation présente donc un caractère indicatif, déduit essentiellement des tendances observées sur l'évolution des concentrations en sulfates pour chaque secteur.

Le secteur N°1 correspond aux parties les plus profondes du réservoir Centre. Les données de surveillance disponibles sur ce secteur proviennent de la station du puits Amermont III. Les concentrations en sulfate de cette station sont les plus importantes mesurées sur le réservoir Centre et sur le bassin ferrifère. Les données les plus récentes disponibles datent de 2003. On distingue sur les 4 années de suivi post-débordement une tendance stable des concentrations. Ce comportement est lié au très faible renouvellement de l'eau sur cette partie du réservoir.

Les données de surveillance du secteur N°2 proviennent des stations du puits Tucquenieux I, et du débordement principal du Woigot. Les concentrations en sulfates apparaissent moins élevées que sur le secteur N°1 (puits Amermont III) mais présentent de manière analogue au secteur N°1 une tendance stable depuis le débordement du réservoir Centre. Ce comportement est lié au faible renouvellement de l'eau de cette partie du réservoir.

Les données de surveillance du secteur N°3 proviennent de la station du puits Anderny II. Les concentrations en sulfate présentent sur cette station une nette tendance à la baisse, liée au meilleur renouvellement de l'eau de cette partie du réservoir.

Le secteur N°4 présente un comportement assez similaire au secteur N°3 avec un meilleur renouvellement de l'eau confirmé par les tendances à la baisse observées sur les stations de Bois d'Avril, et du piézomètre du Chevillon artésien.

L'analyse des concentrations en sulfates fait donc ressortir pour le réservoir Centre une grande partie Ouest sur laquelle le renouvellement de l'eau est faible à très faible, ce qui induit des tendances d'évolution des concentrations stables ou légèrement décroissantes ; la partie Est du réservoir bénéficie au contraire d'un renouvellement de l'eau plus important qui est confirmé par les tendances à la baisse observées.

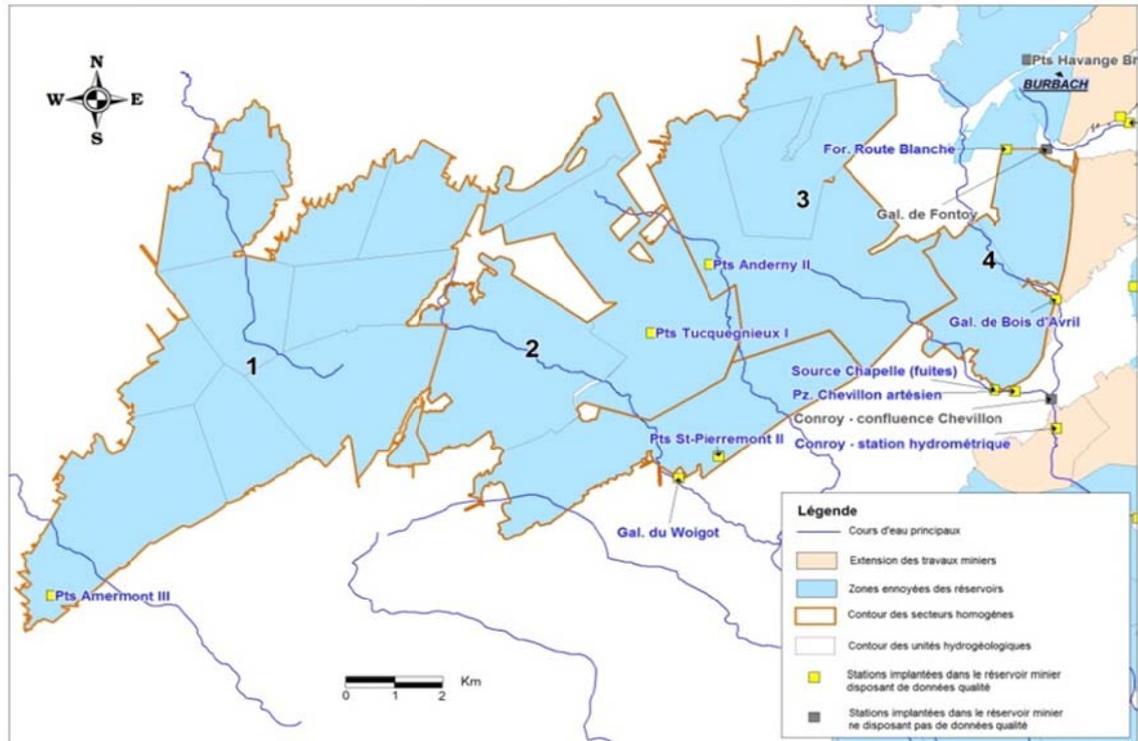


Figure 19 : Carte des 4 secteurs du réservoir Centre (Ollagnier, 2013).

N°	Nom	Caractérisation des tendances d'évolution des concentrations en sulfates depuis le débordement	N° Secteur	Commentaire sur la sectorisation	Renouvellement de l'eau
C13	Pts Amermont III	Stable	1	Ce secteur correspond aux parties les plus profondes du réservoir Centre. Ce secteur apparaît très déconnecté du reste du réservoir Centre (et du secteur N°2 en particulier).	Faible voire nul
C5	Gal. du Woigot	Stable	2	Ce secteur, situé en partie centrale du réservoir est très peu connecté aux secteurs 1 et 3. Il est relié à l'exutoire principal du réservoir Centre (galerie du Woigot)	Faible voire nul
C16	Pts St-Pierremont II	Pas de surveillance			
C17	Pts Tucquegnieux I	Stable			
C14	Pts Anderny II	Baisse	3	Ce secteur est quasiment déconnecté du secteur 2. Au vu des chroniques de concentrations en sulfates de la seule station qui suit ce secteur (Anderny II) et des plans miniers, un regroupement des secteurs 3 et 4 est possible.	Moyen
C2	For. Route Blanche	Baisse	4	Ce secteur correspond aux parties les moins profondes du réservoir Centre. Il présente pour particularité d'avoir un meilleur taux de renouvellement de l'eau souterraine que les secteurs 1 et 2, ce qui se traduit par des tendances à la baisse des concentrations en sulfates.	Moyen
C3	Gal. de Bois d'Avril	Baisse			
C4	Gal. de Fontoy	Pas de surveillance			
C18	Source Chapelle (fuites)	Baisse			
C20	Conroy - confluence Chevillon	Pas de surveillance			
C21	Conroy - station hydrométrique	Baisse			

Tableau 3 : Caractéristiques des points de surveillance représentatifs de chaque secteur du réservoir Centre (Ollagnier, 2013).

4.3. RESULTATS DU CALAGE DU SIMULATEUR DU RESERVOIR CENTRE

Les Figure 20 et Figure 21 présentent schématiquement la configuration du réseau de 4 réacteurs qui constitue le simulateur du réservoir Centre. Ce réseau reproduit la sectorisation définie au paragraphe précédent, en prenant en compte les liaisons entre secteurs, ainsi que les points de débordement et de fuite.

Les résultats du calage du simulateur sont présentés de la Figure 22 à la Figure 28. On constate le très bon ajustement des niveaux piézométriques et des débits de débordement, et l'ajustement satisfaisant des concentrations en sulfate. Les particularités de chaque secteur, décrites précédemment, sont correctement reproduites.

4.4. SIMULATION PREVISIONNELLE DES CONCENTRATIONS EN SULFATE POUR LE RESERVOIR CENTRE

La Figure 29 présente les résultats de la simulation prévisionnelle d'évolution des concentrations dans les 20 prochaines années. La simulation prend en compte une recharge moyenne du point de vue statistique, et des prélèvements qui répètent les valeurs observées entre les années 2008 à 2011.

Le Tableau 4 indique pour chaque secteur l'année au cours de laquelle la concentration limite de 250 mg/l pourrait être atteinte selon ce scénario moyen.

Réservoir Centre	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4
Scénario Moyen	>>> 2034	> 2034	2032	2030

Tableau 4 : Résultats de la simulation prévisionnelle des concentrations en sulfate pour le réservoir Centre : années d'atteinte de la concentration limite 250 mg/l.

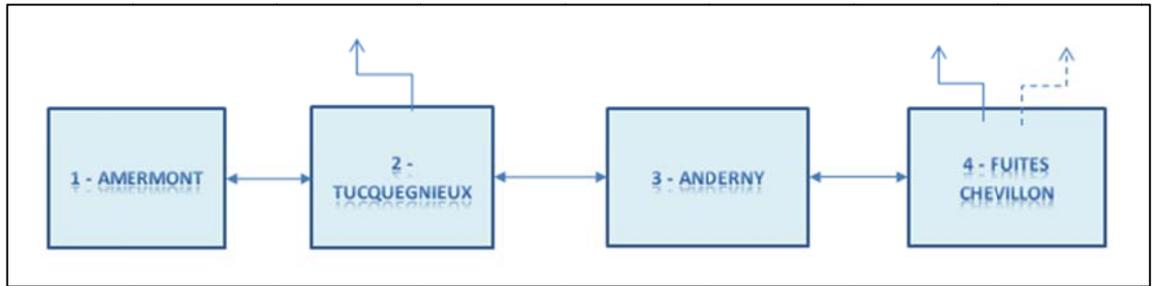


Figure 20 : Simulateur du réservoir Centre : Schéma des liaisons entre les 4 secteurs du réservoir.

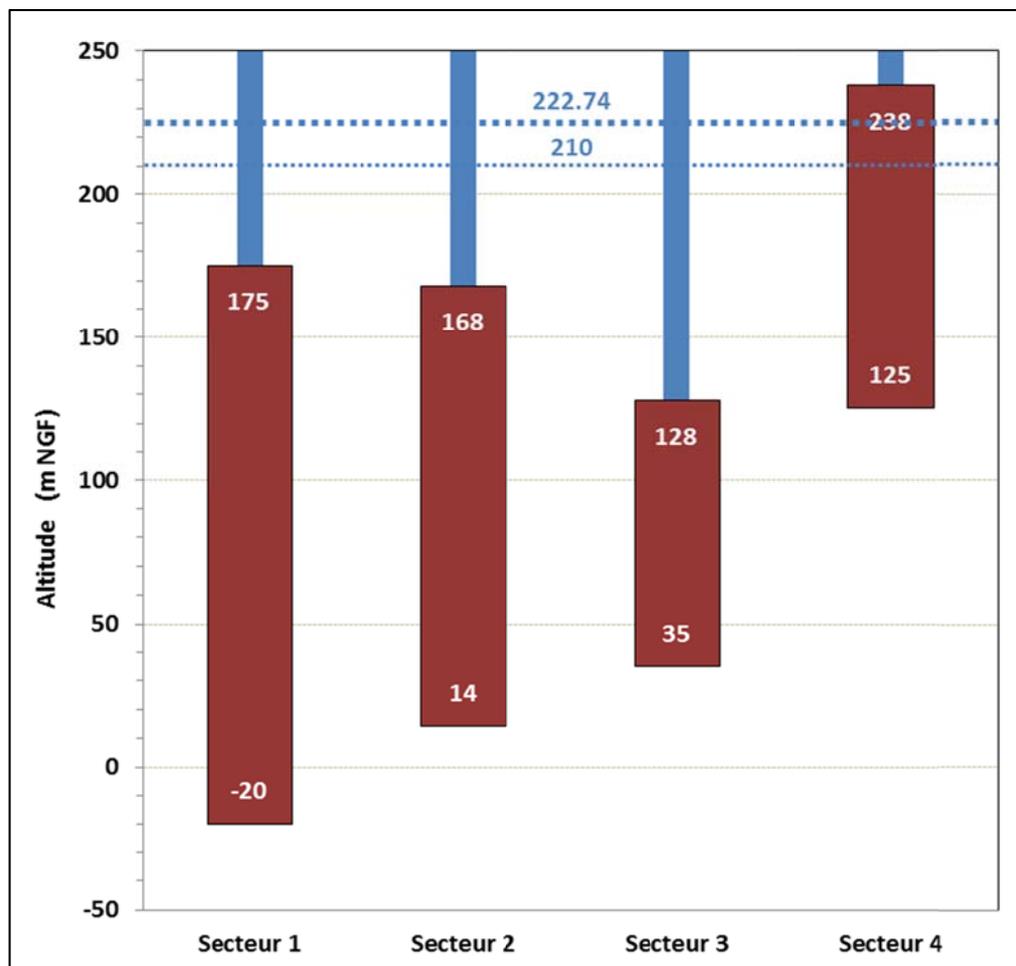


Figure 21 : Simulateur du réservoir Centre : Schéma des cotes des murs et toits des secteurs (travaux miniers en rouge, calcaires du Dogger en bleu, cotes de débordement en pointillé).

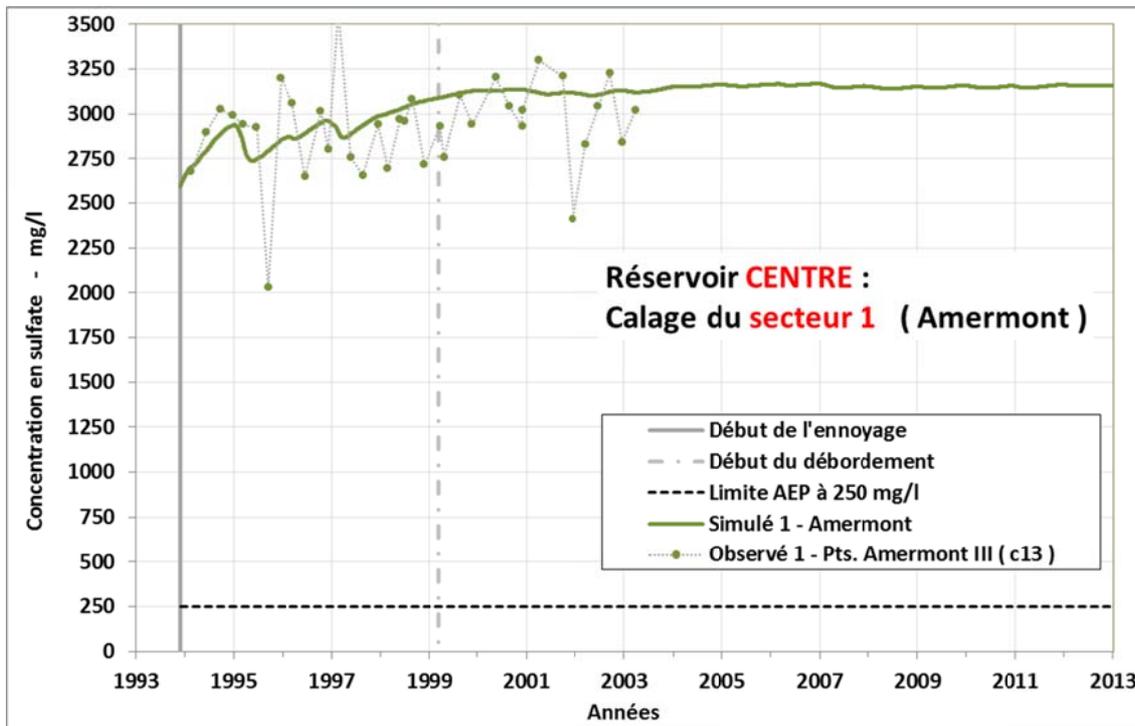


Figure 22 : Réservoir Centre -secteur 1 : concentrations observées et simulées.

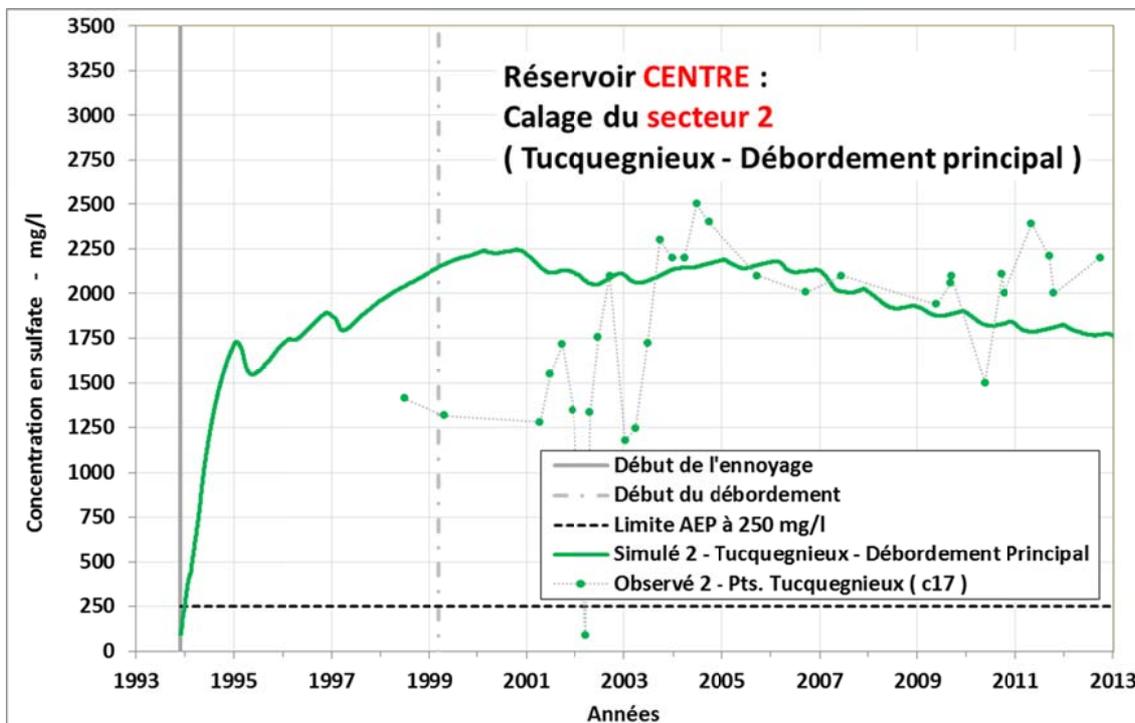


Figure 23 : Réservoir Centre -secteur 2 : concentrations observées et simulées.

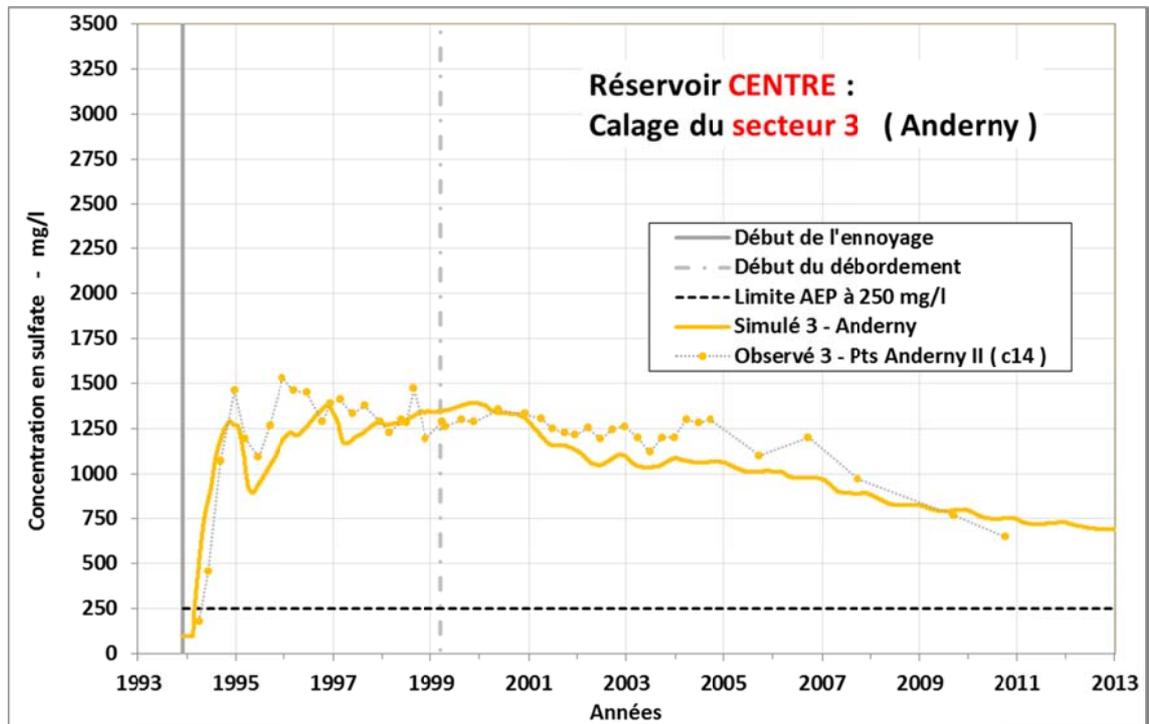


Figure 24 : Réservoir Centre -secteur 3 : concentrations observées et simulées.

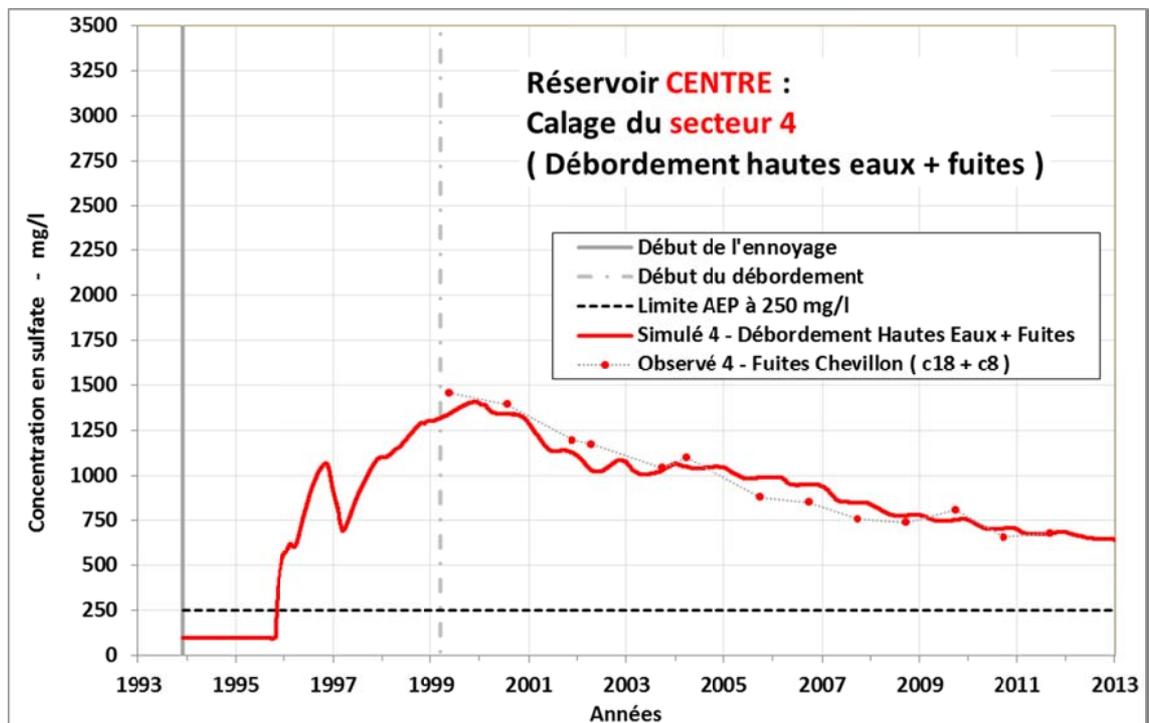


Figure 25 : Réservoir Centre -secteur 4 : concentrations observées et simulées.

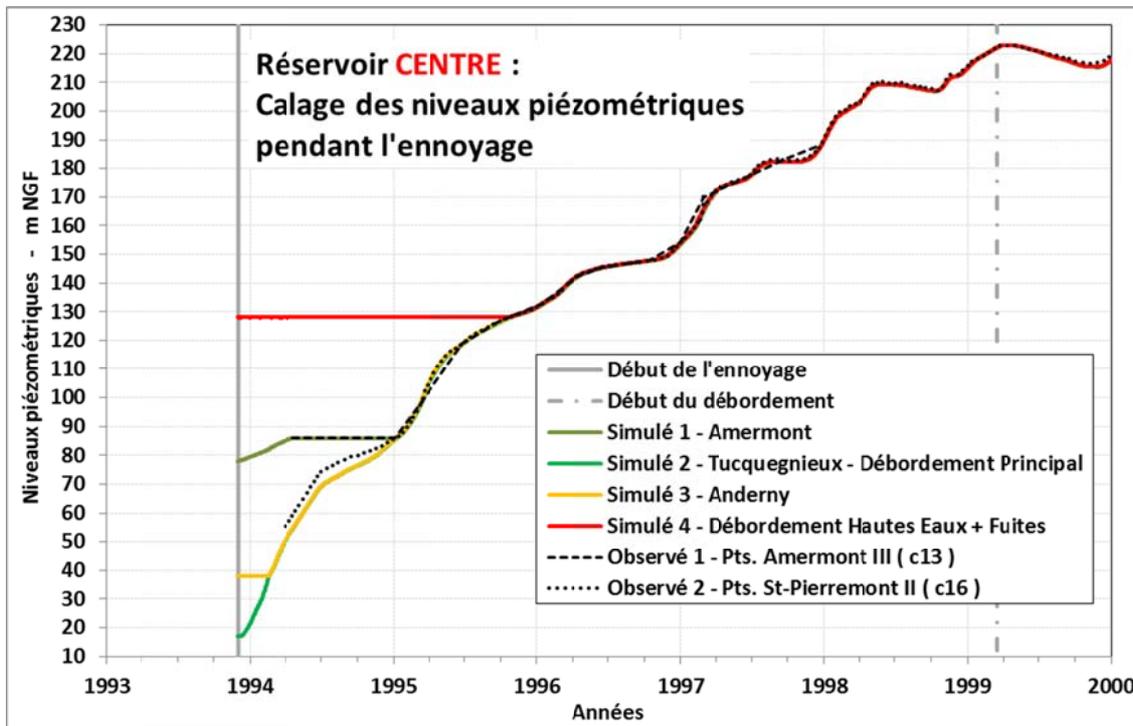


Figure 26 : Réservoir Centre : niveaux piézométriques observés et simulés pendant l'ennoyage.

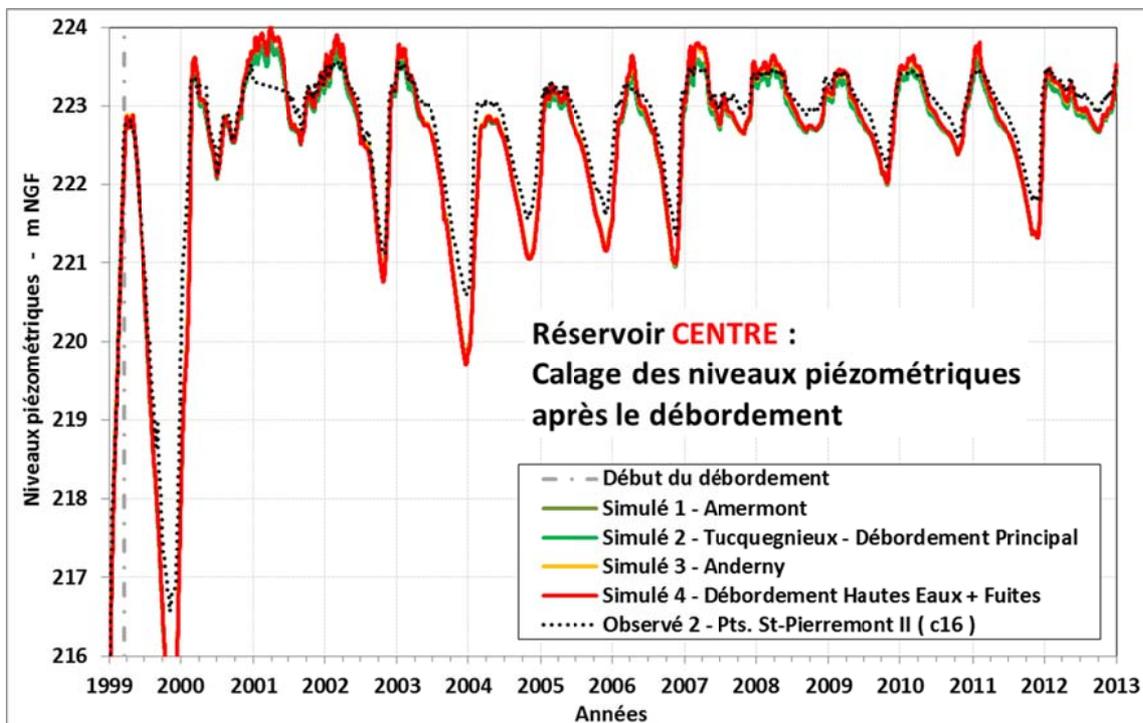


Figure 27 : Réservoir Centre : niveaux piézométriques observés et simulés après le débordement.

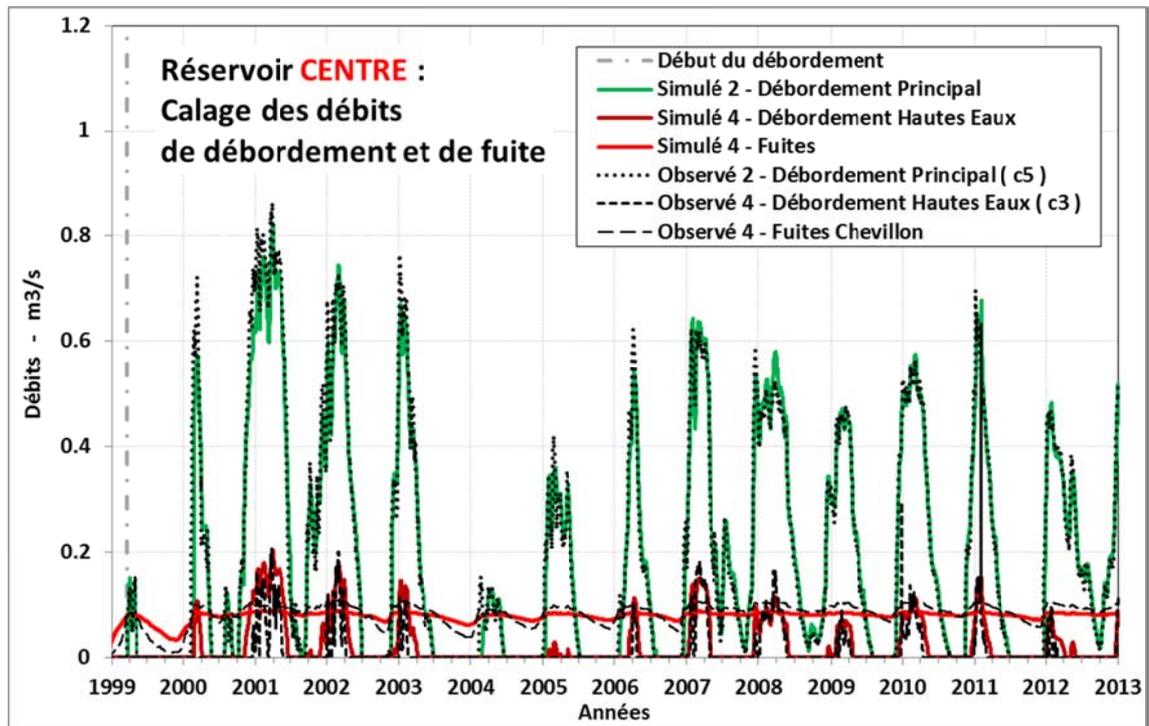


Figure 28 : Réservoir Centre : débits de débordement observés et simulés.

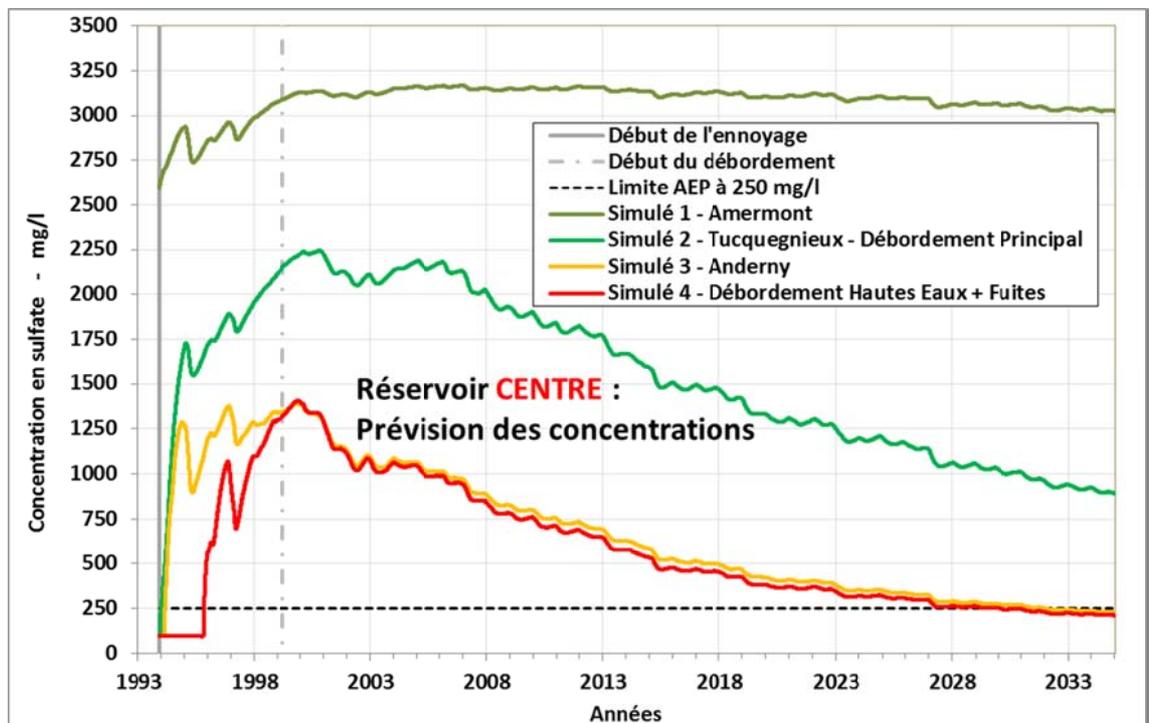


Figure 29 : Réservoir Centre : concentrations simulées jusqu'en 2034.

5. Modélisation du réservoir Nord

5.1. EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN SULFATE DANS LE RESERVOIR NORD

La Figure 30 présente les chroniques des concentrations maximales annuelles en sulfate sur les stations disposant de données de surveillance. L'analyse du graphique fait ressortir deux groupes de stations avec des tendances différentes :

- Tendence stable voire à la hausse sur les stations du puits Errouville III (N17) et du piézomètre Angevillers Grise (N7),
- Tendence à la baisse sur toutes les autres stations et baisse très marquée sur la station de la galerie de Metzange N18.

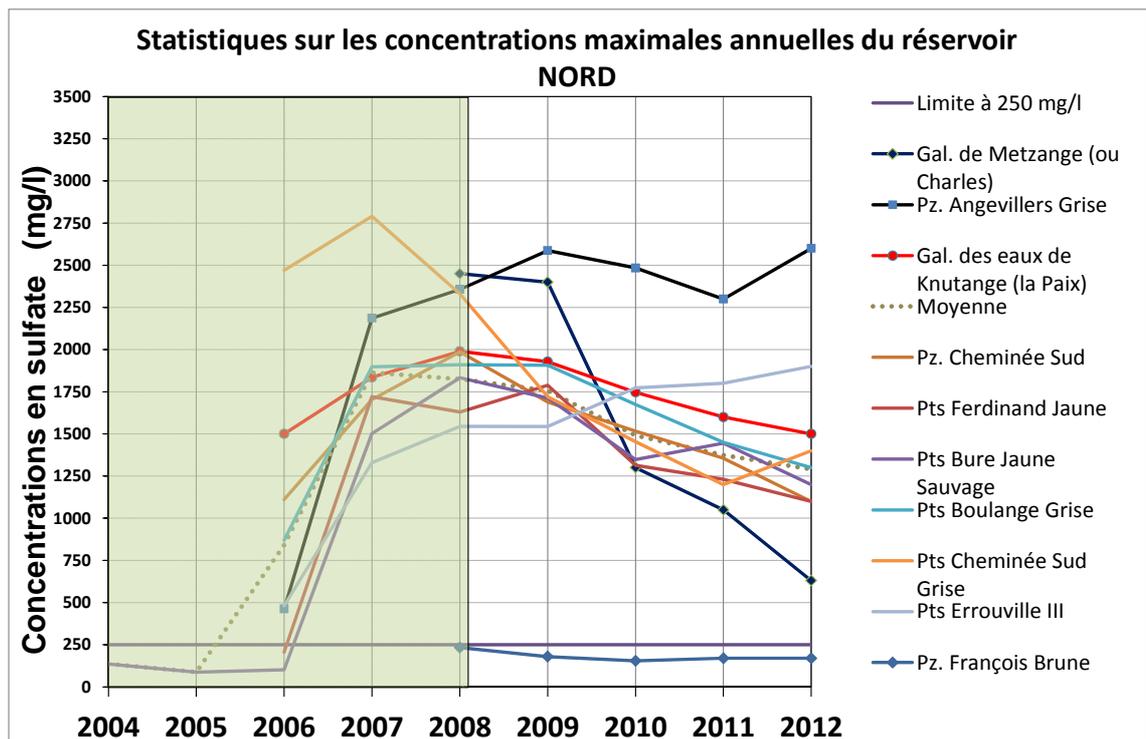


Figure 30 : Concentrations maximales annuelles en sulfate dans le réservoir Nord (le rectangle vert signale la période d'ennoyage du réservoir).

5.2. SECTORISATION DU RESERVOIR NORD

La carte de la Figure 31 présente le résultat du travail de sectorisation pour le réservoir Nord. Un numéro a été attribué pour chaque secteur potentiellement homogène. Au total, 4 secteurs ont été identifiés dans le réservoir Nord. Une analyse détaillée de ces secteurs et des points de surveillance associés est présentée dans le Tableau 5.

La délimitation des secteurs homogènes résulte du croisement de l'analyse des plans miniers et des données de surveillance concernant l'ion sulfate. Une appréciation du taux de renouvellement de l'eau de chaque secteur a été réalisée (bon, moyen ou mauvais/nul, cf. le Tableau 5). Le taux de renouvellement n'est pas quantifié à ce stade, et cette appréciation présente donc un caractère indicatif, déduit essentiellement des tendances observées sur l'évolution des concentrations en sulfates pour chaque secteur.

Au total, 4 secteurs ont été identifiés sur le réservoir Nord. Le secteur N°1 occupe la quasi-totalité du réservoir. L'allure à la baisse des chroniques des teneurs en sulfates laisse supposer un bon renouvellement de l'eau dans toute cette partie du réservoir. Dans le détail, quelques différences entre les chroniques sont constatées, concernant aussi bien les tendances que sur les niveaux de concentration en sulfate. La carte de la Figure 31 met en évidence sur le secteur N°1 l'existence de nombreuses sous-unités hydrogéologiques, confirmant la complexité du système. Bien que les données disponibles à ce jour permettent de considérer ce secteur comme homogène, des modifications sont susceptibles d'être apportées à son découpage en fonction des tendances qui seront observées dans le futur.

Les secteurs 2 et 3 ont une extension beaucoup plus réduite et ont une configuration qui limite le renouvellement de l'eau et qui se traduit par des tendances stables d'évolution des concentrations en sulfate.

Le secteur N°4 correspond aux parties du réservoir Nord qui alimentent le débordement de la galerie de Metzange (N18). Ce secteur a été individualisé en raison des tendances atypiques des concentrations en sulfate qui y sont observées. La lecture des plans miniers laisse supposer que l'eau qui s'écoule à la galerie de Metzange provient en partie du secteur N°1, du secteur N°3 et d'apports des zones non ennoyées, ce qui expliquerait en particulier la chute des concentrations qui y est observée à partir de 2009 lors de la mise en service de la galerie. Ce secteur N°4 correspond donc à une eau de mélange de différentes origines.

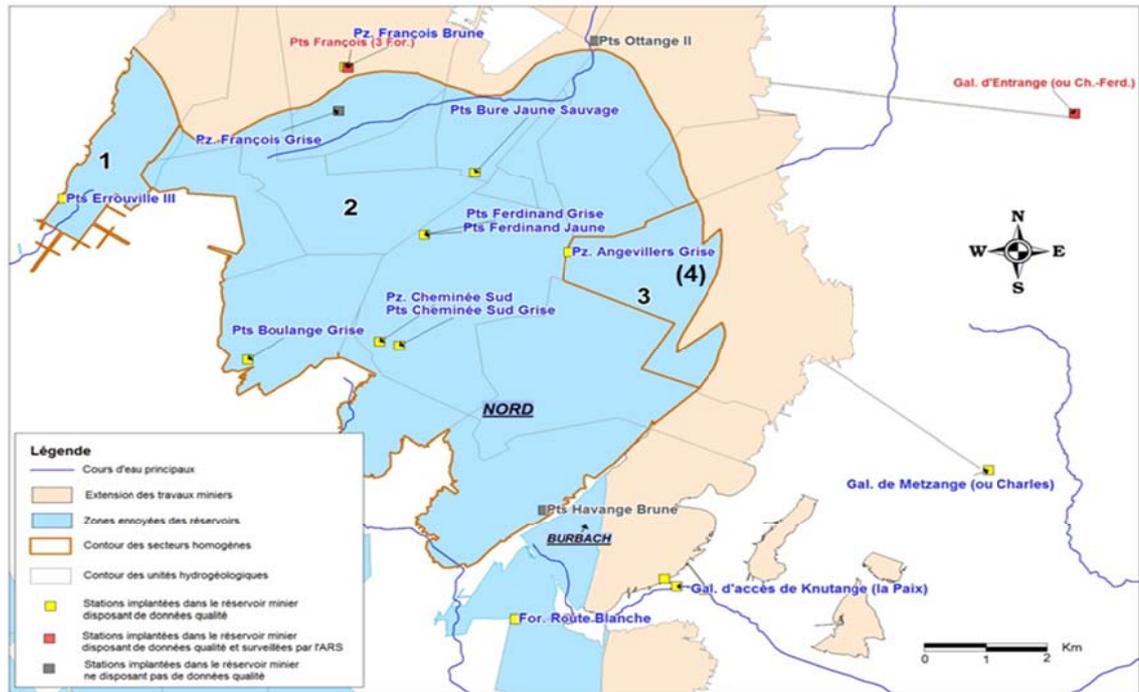


Figure 31 : Carte des 4 secteurs du réservoir Nord (Ollagnier, 2013).

N°	Nom	Caractérisation des tendances d'évolution des concentrations en sulfates depuis le débordement	N° Secteur	Commentaire sur la sectorisation	Renouvellement de l'eau			
N17	Pts Errouville III		1	Ce secteur correspond à l'ancien albraque d'Errouville, mis en communication avec le réservoir Nord au cours de l'ennoyage. La communication hydraulique avec le reste du réservoir ne s'effectue qu'à travers des zones dépliées. Il s'agit donc d'un secteur très isolé du reste du réservoir Nord.	Faible voire nul			
N1	Pz. François Grise	Pas de surveillance						
N3	Pts Ferdinand Grise	Baisse						
N3bis	Pts Ferdinand Jaune	Baisse						
N5	Pts Cheminée Sud Grise	Baisse						
N6	Pts Boulange Grise	Baisse						
N8	Pts Havange Brune	Pas de surveillance						
N9	Pts Bure Jaune Sauvage	Baisse						
N11	Pz. Cheminée Sud	Baisse						
N14	Gal. d'accès de Knutange (la Paix)	Baisse						
N14bis	Gal. des eaux de Knutange (la Paix)	Baisse	2	Ce secteur englobe la quasi-totalité du réservoir Nord. Il regroupe de nombreuses sous-unités hydrogéologiques qui ont pour particularité d'avoir de nombreuses interconnexions (par galeries/travers-bancs). Les fortes similitudes entre les chroniques d'évolution des concentrations en sulfates permettent d'avancer l'hypothèse qu'il s'agit d'un secteur homogène à l'échelle du réservoir du point de vue qualitatif.	Bon			
N19	Gal. d'Entrange (ou Ch.-Ferd.)	Pas de surveillance						
N7	Pz. Angevillers Grise	Stable						
N18	Gal. de Metzange (ou Charles)	Forte baisse						
N2	Pz. François Brune	Stable						
N22	Pts François (3 For.)					Hors zone ennoyée	Pas de sectorisation proposée. Zone non ennoyée.	
N23	Pts Ottange II							
N24	Pts Saint-Michel							

Tableau 5 : Caractéristiques des points de surveillance représentatifs de chaque secteur du réservoir Nord (Ollagnier, 2013).

5.3. RESULTATS DU CALAGE DU SIMULATEUR DU RESERVOIR NORD

Les Figure 32 et Figure 33 présentent schématiquement la configuration du réseau de 4 réacteurs qui constitue le simulateur du réservoir Nord. Ce réseau reproduit la sectorisation définie au paragraphe précédent, en prenant en compte les liaisons entre secteurs, ainsi que les points de débordement et de fuite.

Les résultats du calage du simulateur sont présentés de la Figure 34 à la Figure 40. On constate le très bon ajustement des niveaux piézométriques et des débits de débordement, et l'ajustement satisfaisant des concentrations en sulfate. Les particularités de chaque secteur, décrites précédemment, sont correctement reproduites.

5.4. SIMULATION PREVISIONNELLE DES CONCENTRATIONS EN SULFATE POUR LE RESERVOIR NORD

La Figure 41 présente les résultats de la simulation prévisionnelle d'évolution des concentrations dans les 20 prochaines années. La simulation prend en compte une recharge moyenne du point de vue statistique, et des prélèvements qui répètent les valeurs observées entre les années 2008 à 2011.

Le Tableau 6 indique pour chaque secteur l'année au cours de laquelle la concentration limite de 250 mg/l pourrait être atteinte selon ce scénario moyen.

Réservoir Nord	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4
Scénario Moyen	>>> 2034	2027	> 2034	2025

Tableau 6 : Résultats de la simulation prévisionnelle des concentrations en sulfate pour le réservoir Nord : années d'atteinte de la concentration limite 250 m/l.

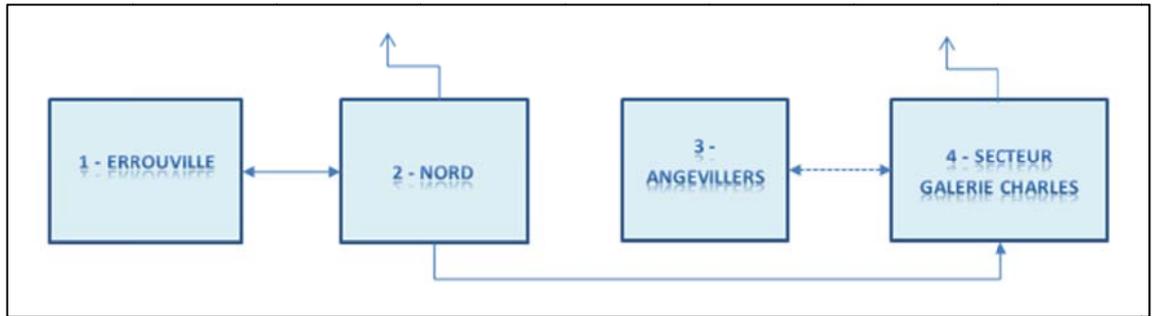


Figure 32 : Simulateur du réservoir Nord : Schéma des liaisons entre les 4 secteurs du réservoir.

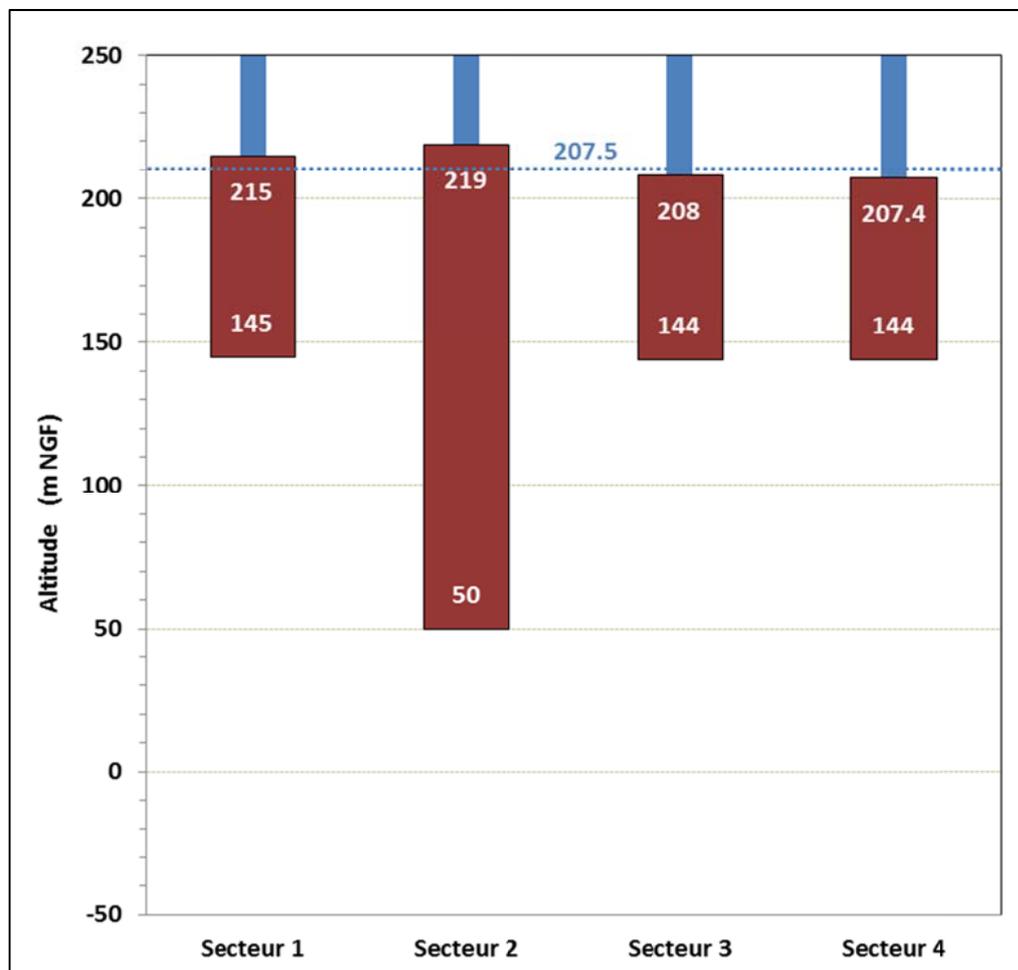


Figure 33 : Simulateur du réservoir Nord : Schéma des cotes des murs et toits des secteurs (travaux miniers en rouge, calcaires du Dogger en bleu, cotes de débordement en pointillé).

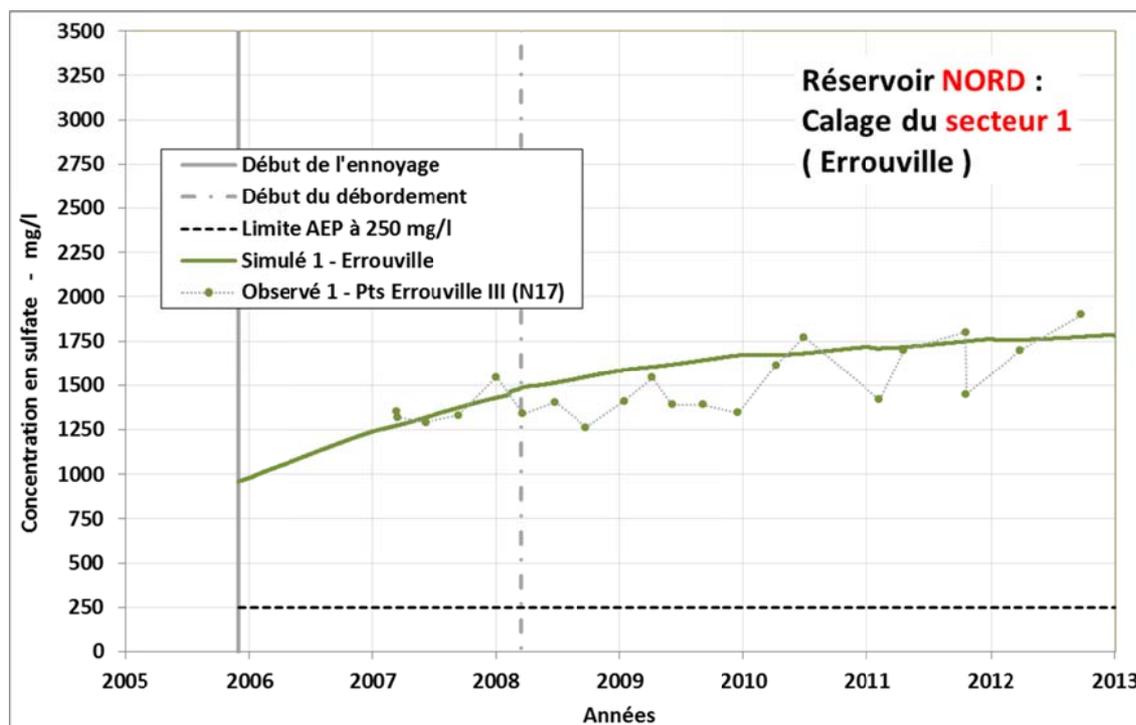


Figure 34 : Réservoir Nord - Secteur 1 : concentrations observées et simulées.

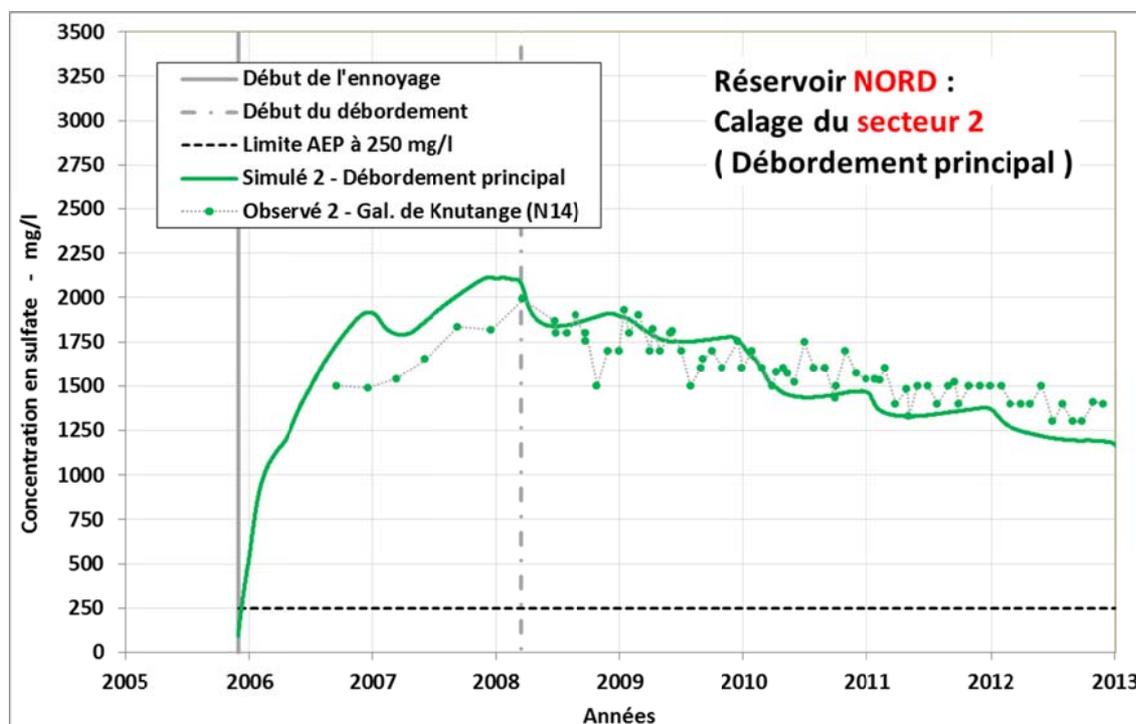


Figure 35 : Réservoir Nord - secteur 2 : concentrations observées et simulées.

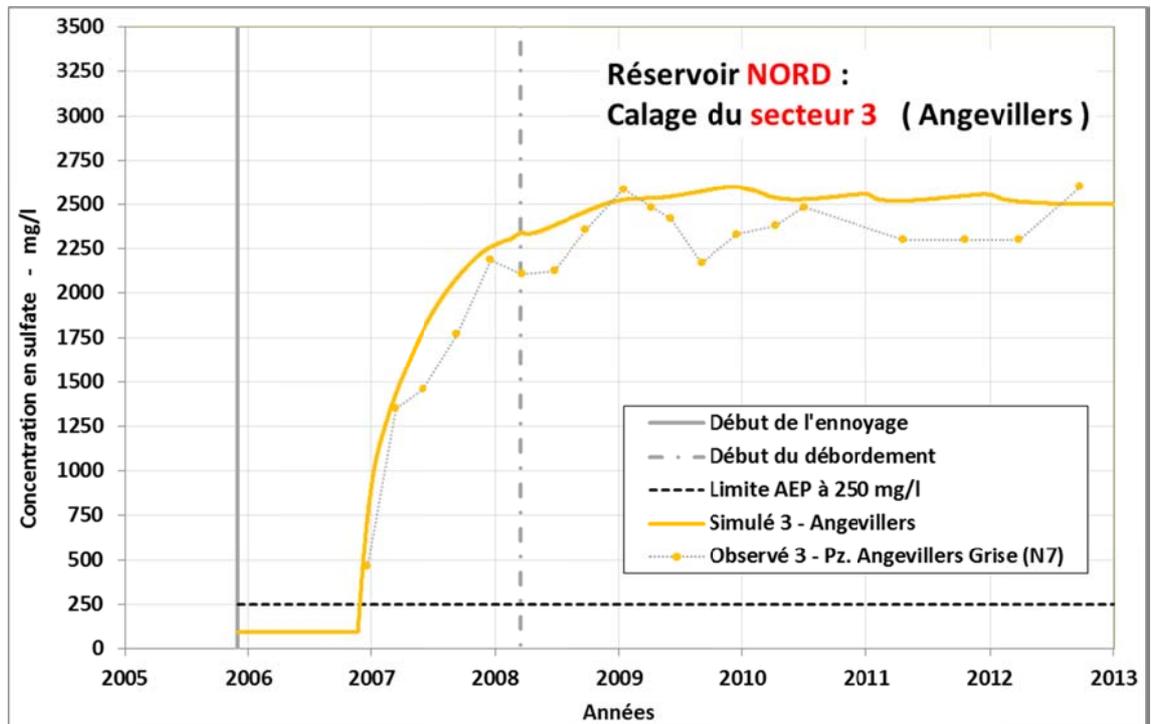


Figure 36 : Réservoir Nord -secteur 3 : concentrations observées et simulées.

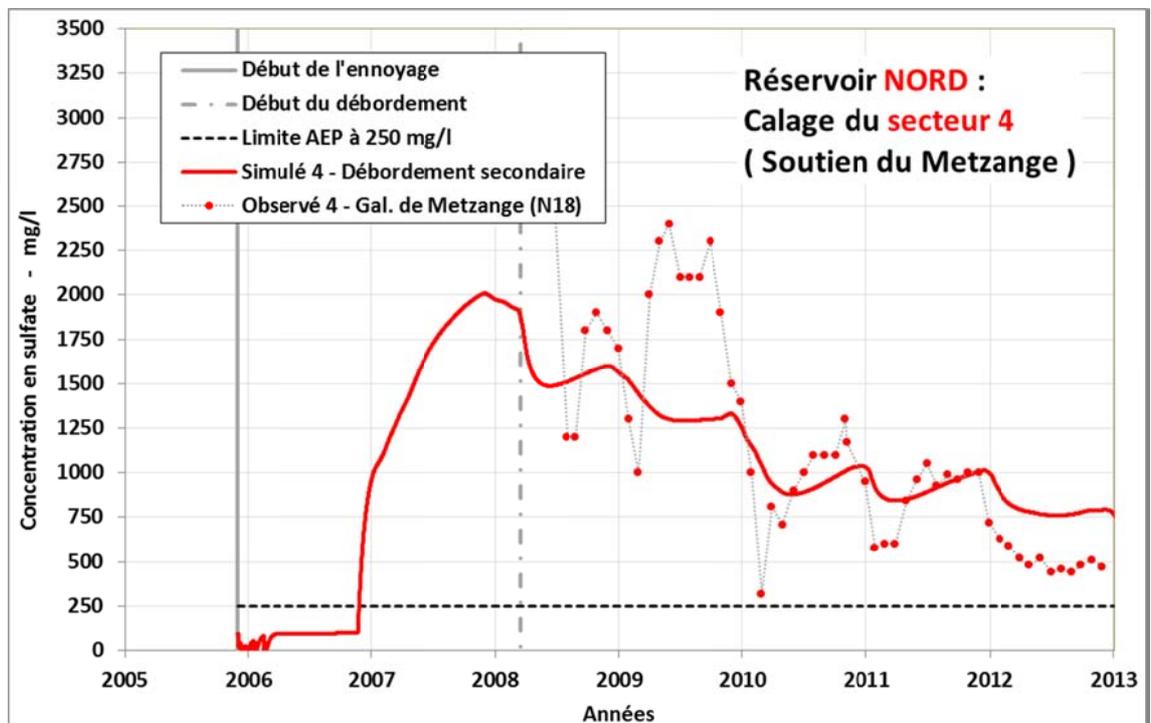


Figure 37 : Réservoir Nord -secteur 4 : concentrations observées et simulées.

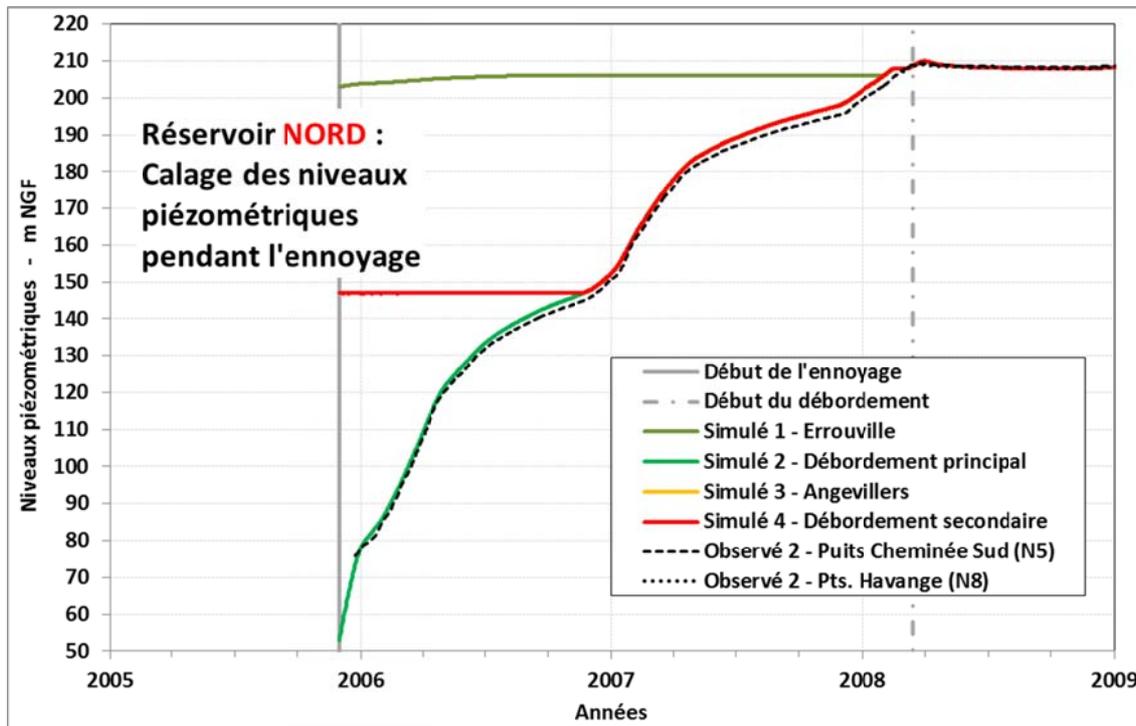


Figure 38 : Réservoir Nord : niveaux piézométriques observés et simulés pendant l'ennoyage.

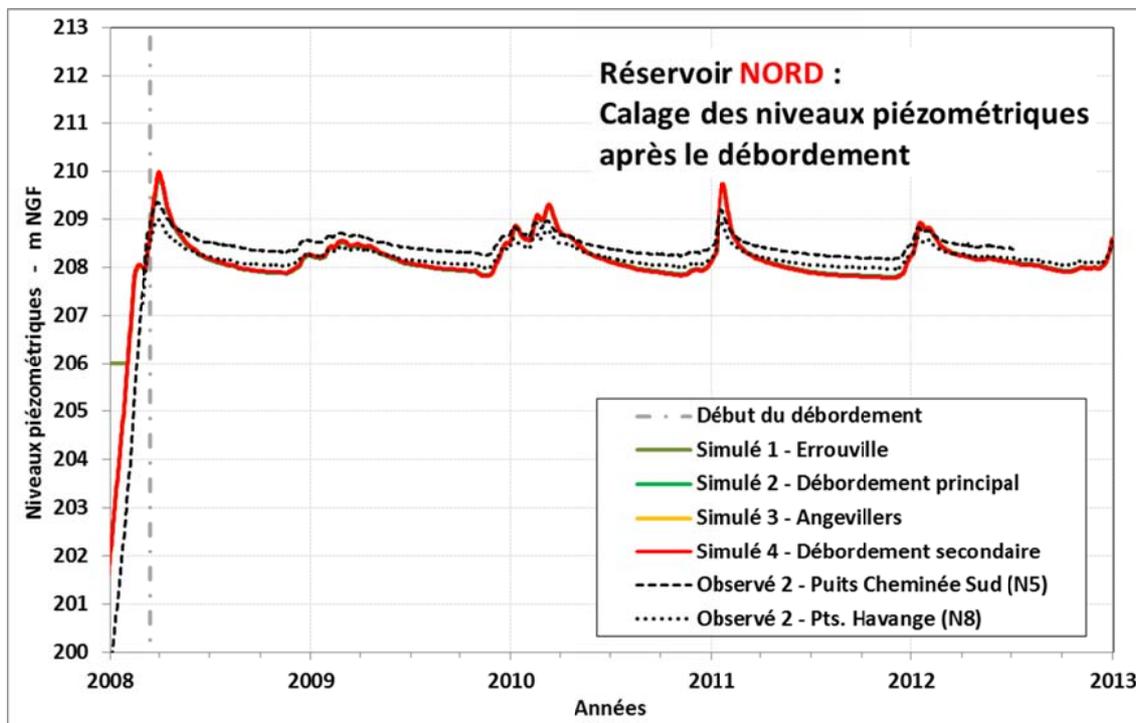


Figure 39 : Réservoir Nord : niveaux piézométriques observés et simulés après le débordement.

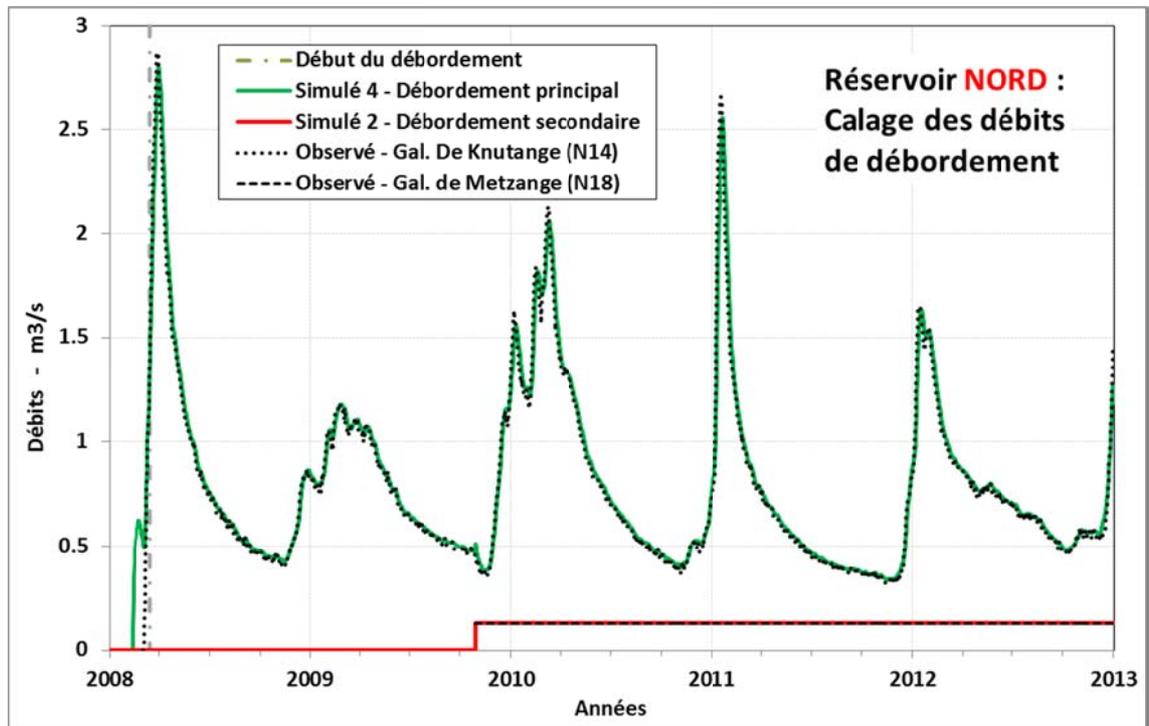


Figure 40 : Réservoir Nord : débits de débordement observés et simulés.

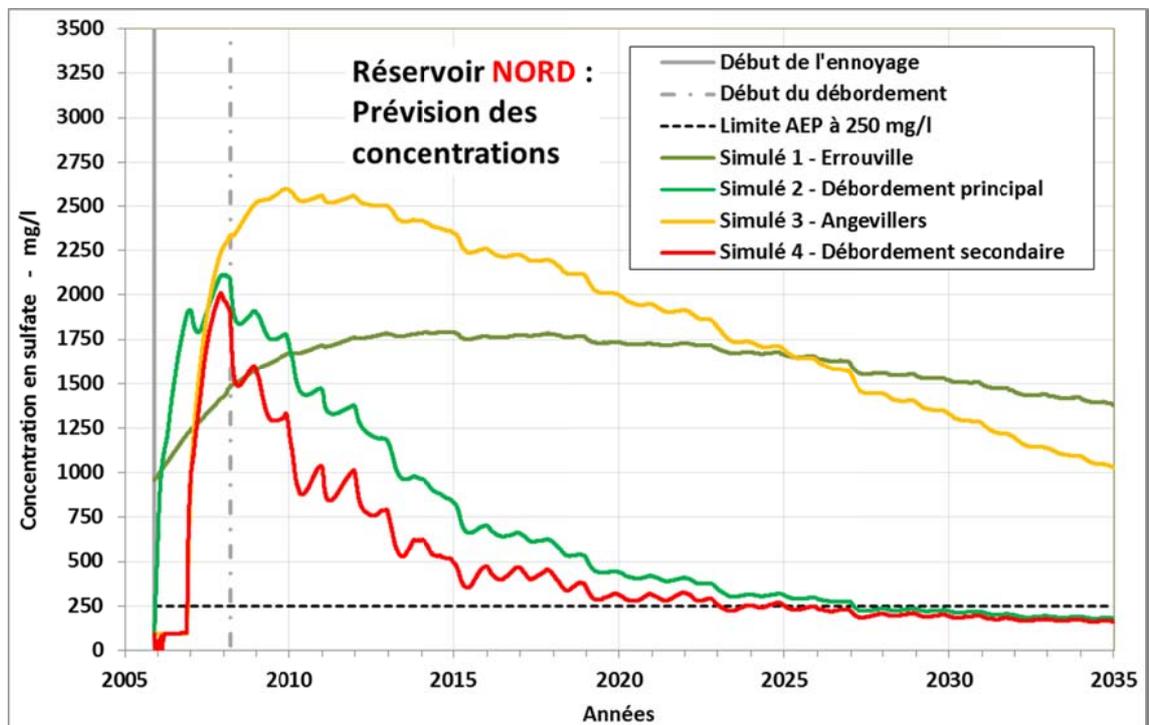


Figure 41 : Réservoir Nord : concentrations simulées jusqu'en 2034.

6. Conclusion

Trois simulateurs de fonctionnement hydrologique et chimique des trois grands réservoirs miniers ennoyés du bassin ferrifère lorrain ont été construits. Ces simulateurs sont basés sur une approche globale de réacteurs en réseaux. Ils ont pour but de modéliser l'évolution des échanges d'eau entre secteurs à l'intérieur de chaque réservoir, les débits de débordements et de fuites, les niveaux piézométriques de chaque secteur, ainsi que l'évolution des concentrations en sulfate dans chaque secteur.

La sectorisation des réservoirs a été obtenue par le croisement entre a) les tendances observées d'évolution des concentrations en sulfate, et b) les résultats de l'analyse détaillée des plans miniers.

Le recueil et le traitement de toutes les données disponibles a permis de synthétiser les informations nécessaires à la construction des simulateurs de ces 3 réservoirs.

Les simulateurs ont été utilisés à titre prédictif afin d'estimer les dates à partir desquelles les concentrations en sulfate dans chaque secteur des réservoirs pourraient être inférieures à la limite de potabilité de 250 mg/l : selon un scénario de recharge moyen, cette limite ne sera pas atteinte avant 2015 à 2022 selon les secteurs pour le réservoir Sud ; avant 2030 à 2032 pour les 2 secteurs les mieux renouvelés en eau du réservoir Centre ; et avant 2025 à 2027 pour les 2 secteurs les mieux renouvelés en eau du réservoir Nord.

Les simulateurs pourront aussi être utilisés pour connaître l'impact de nouveaux pompages sur les débits, les niveaux et les l'évolution des concentrations en sulfate.

Enfin, ces simulateurs sont modulables, il sera possible dans le futur de modifier la configuration du réseau de réacteurs afin de prendre en compte de nouvelles connaissances concernant les écoulements ou les concentrations à l'intérieur de chaque réservoir.

7. Bibliographie

BRGM (1995) – Surveillance de l'évolution du niveau de la nappe et de la qualité des eaux après arrêt des exhaures des exploitations minières dans le bassin ferrifère lorrain, campagnes de mesures 1994-95. Rapport BRGM R 38265, 26 p., 6 fig., 5 tabl., 1 ann.

Caudron M., Durand F., Renaud J.C. (1996) – Surveillance des nappes d'eau souterraine dans le bassin ferrifère lorrain, campagnes de mesures 1994-1995 et 1995-1996, bassins centre et sud. Rapport BRGM R 38265, 40 p., 13 fig., 4 ann.

Collon P., Fabriol R., Buès M. (2006). Modelling the evolution of water quality in abandoned mines in the Lorraine Iron Basin. *Journal of Hydrology*, Vol 328, pp. 620-634

Collon-Drouaillet P., Fabriol R., Buès M. (2005b) A semi-distributed modelling of the evolution of groundwater quality in flooded mines in the Lorraine Iron Basin. "Post Mining 2005" Symposium. Nancy, 16-17 novembre 2005. 15 p. ISBN : 2-85555-061-0

Collon P., Fabriol R., Buès M. (2005a) Evolution of water quality in the abandoned iron mines of Lorraine : towards a semi-distributed modelling approach. *C. R. Geoscience* Vol 337, p. 1492-1499.

Collon P., Fabriol R., Buès M. (2004) - Ennoyage des mines de fer lorraines : impact sur la qualité de l'eau. *C. R. Geoscience* Vol 336, Issue 10, p 889-899.

Collon P. (2003b). Evolution de la qualité de l'eau des mines abandonnées du bassin ferrifère lorrain. De l'expérimentation en laboratoire à la modélisation in situ. Thèse INPL, Octobre 2003, 247 p.

Collon P., Fabriol R., Bues M. (2003a) – Variabilité minéralogique des intercalaires marneux du bassin ferrifère lorrain. Conséquences sur la qualité de l'eau dans la mine, Colloque "Après-mine 2003", Nancy, 5-7 février 2003. CD ROM. 14 p. ISBN : 2-85555-057-2

Collon P., Fabriol R., Vaute L. (2000) – Simulation de l'évolution de la concentration en sulfate dans l'eau de la mine de fer de Saizerais (Lorraine). Rapport GISOS-BRGM/RP-50456-FR, 86 p., 37 fig., 7 tabl., 1 ann.

Durand F. (1998) – Surveillance des nappes d'eau souterraine dans le bassin ferrifère lorrain, campagne de mesures 1996-1997, bassins centre et sud. Rapport BRGM R 39823, 43 p., 16 fig., 1 tabl., 4 ann.

Fabriol R., Pinault J-L., Vaute L. (2000) – Traitement du signal et réacteurs en réseaux, application à la simulation de l'évolution de la concentration en sulfate dans l'eau du bassin ferrifère lorrain. Rapport BRGM/RP-50153-FR, 48 p., 25 fig., 2 tabl.

Fabriol R., Hamm V. (2007) – Suivi de l'ennoyage du bassin nord (mines de fer de Lorraine). BRGM/RP-55819-FR, 23 p., 7 ill., 1 tableau.

Hamm V., Collon-Drouaillet P., Fabriol R. (2008b) Modelling the sulphate concentration of a flooded iron-ore mine with a network of chemical reactors (NCR) and a pipe network model (PNM), in Post-Mining Symposium 2008 proceedings, 06-08/02/2008 - Nancy - France, 15 p.

Hamm V., Collon-Drouaillet P., Fabriol R. (2008a) – Two modelling approaches to water-quality simulation in a flooded iron-ore mine (Saizerais, Lorraine, France): a semi-distributed chemical reactor model and a physically based distributed reactive transport pipe network model. *Journal of Contaminant Hydrology*, 96/1-4 pp 97-112

Maillou F. (1994) – Réactualisation des cartes piézométriques de la nappe aquifère du Dogger entre le Rupt de Mad et la Chiers. Rapport de stage hydrogéologique, Agence de l'eau Rhin-Meuse, 26 p., 8 fig., 3 ann.

Ollagnier S. (2013) – Optimisation des réseaux de surveillance quantitative et qualitative des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain. Rapport BRGM/RP-60939-FR, en cours d'édition.

Pinault J-L. (2001) – Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems. 1) Theory. *Water Resources Research*, à paraître.

Pinault J-L., Baubron J-C. (1996) – Signal processing of soil gas radon, atmospheric pressure, moisture, and soil temperature data: a new approach for radon concentration modeling. *Journal of geophysical research*, vol. 101, n° B2, p. 3157-3171.

Pinault J-L., Fritsche V., Turner J.V. (1999) – Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of catchments. *Water Resources Research*, à paraître.

Pinault J-L., Pauwels H., Cann C. (2001-a) – Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems. 2) Nitrate transport and denitrification. *Water Resources Research*, à paraître.

Pinault J-L., Plagnes V., Aquilina L., Bakalowicz M. (2001-b) – Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems. 3) Characterization of karst system functioning. *Water Resources Research*, à paraître.

Ramon S. (1976) – Réservoir aquifère des côtes de Moselle ; Carte piézométrique de la nappe dans les Ardennes et le nord de la Lorraine en juillet 1976. Rapport Agence de l'eau Rhin-Meuse, 10 p., 2 cartes.

Vaute L. (1999-a) – Identification d'éléments indésirables ou toxiques dans les ressources en eau potentielles du bassin ferrifère lorrain. Rapport BRGM R 40908, 37 p., 8 fig., 2 ann.

Vaute L. (1999-b) – Surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en 1998. Rapport BRGM R 40789, 69 p., 26 fig., 6 ann.

Vaute L. (2000) – Surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en 1999. Rapport BRGM/RP-50215-FR, 79 p., 31 fig., 4 ann.

Vaute L. (2001) – Surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en 2000. Rapport BRGM R50820, 81 p., 33 fig., 4 ann.

Vaute L. (2007) – Surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en 2006. Rapport BRGM/RP-56142-FR, 104 p., 40 fig., 4 tabl., 1 ann.

Vaute L., Bastien F., Douche A., Jozefiak M. (2002) – Surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en 2001. Rapport BRGM/RP-51616-FR, 100 p., 42 fig., 7 ann.

Vaute L., Bastien F., Douche A., Jozefiak M. (2002) – Surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en 2001. Rapport BRGM/RP-51616-FR, 100 p., 42 fig., 7 ann.

Vaute L., Durendeau B., Fourniguet G., Soulas C., Mathieu E. (2007) – Schéma d'aménagement et de gestion des eaux du bassin ferrifère lorrain, séquence n°1 : l'état des lieux. BRGM/RP-55434-FR, 190 p., 96 fig, 15 tabl., 4 ann.

Vaute L., Fabriol R., Pinault J-L. (2001) – Un modèle de l'évolution de la concentration en sulfate dans le bassin ferrifère lorrain. Etude préliminaire : construction et mise en œuvre d'un simulateur de fonctionnement simplifié. Rapport BRGM/RP-50066-FR, 63 p., 9 fig., 4 tabl., 10 ann.

Vaute L., Frappier G. (2004) – Surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en 2003. Rapport BRGM/RP-53276-FR, 108 p., 45 fig., 1 tab., 5 ann (cd-rom).

Vaute L., Khat M-O, Douche A., Fourniguet G., Frappier G., Goubot M-J., Josefiak M. (2005) – Construction et mise en œuvre d'un simulateur hydrologique et chimique du bassin ferrifère lorrain – Phase 1 : Synthèse hydrogéologique. Rapport BRGM/RP-53277-FR, 93 p., 36 fig, 4 tabl., 5 ann (sur cd-rom), 22 planches (vol. séparé).

Vaute L., Pinault J-L. (1999) – Modélisation inverse du système hydrologique « réservoir minier – nappe alluviale – Orne » à Moyeuvre-Grande. Rapport BRGM R 40860, 23 p., 7 ann.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin – BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale Lorraine
1, avenue du parc de Brabois
54500 – Vandoeuvre-lès-Nancy – France
Tél. : 03.83.44.81.49