



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Contribution des débordements des réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain au débit des cours d'eau en période de crue

Rapport final

BRGM/RP-71481-FR

Version 1 du 8 mars 2022

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

L. Vaute, S. Guignat

Vérificateur :

Nom : Delphine Allier

Fonction : Hydrogéologue

Date : 13/01/2022

Signature :

Approbateur :

Nom : Dominique Midot

Fonction : Directeur Régional Grand Est

Date : 10/03/2022

Signature :

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

Contact : qualite@brgm.fr

 **Moselle
Aval**
SYNDICAT MIXTE

Avertissement

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

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

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

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

Votre avis nous intéresse

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

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés : BASSIN FERRIFERE LORRAIN, ENNOYAGE, MINE SOUTERRAINE, MODELE GARDENIA, CRUE, LORRAINE

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

L. Vaute, S. Guignat (2022) – Contribution des débordements des réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain au débit des cours d'eau en période de crue. Rapport final V1. BRGM/RP-71481-FR, 81 p., 26 fig., 1 ann.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-21/09/2021

Synthèse

L'objectif de l'étude est d'évaluer, en période de crue, la contribution du débordement des réservoirs miniers au débit des cours d'eau du bassin ferrifère en intégrant, d'une part, l'effet des travaux relatifs aux réservoirs miniers (aménagement des points de débordement, arrêt et redémarrage des soutiens d'étiage, pompages) et, d'autre part, en prenant en compte l'effet potentiel à long terme du changement climatique.

L'étude s'inscrit dans la démarche du Programme d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) d'intention Moselle aval, portée par le Syndicat Mixte Moselle Aval et conventionné le 06 novembre 2019. Les conditions de réalisation de l'étude ont été établies dans une convention de partenariat entre Moselle Aval et le BRGM, datée du 04 juin 2020.

Trois modèles hydrologiques globaux à réservoirs ont été construits et calibrés à l'aide du logiciel GARDÉNIA du BRGM. Ces modèles ont été utilisés pour réaliser des simulations de longues chroniques (60 ans) de débit de débordement selon différents scénarios d'évolution future des données météorologiques et des prélèvements dans les réservoirs. L'ajustement de lois de probabilité sur les maximums annuels extraits de ces chroniques de débit simulées a permis de calculer les débits caractéristiques de débordement des réservoirs miniers correspondant à différentes périodes de retour. Ces débits caractéristiques ont ensuite été comparés aux débits caractéristiques de 3 stations hydrométriques situées en aval des points de débordement des réservoirs.

L'analyse des résultats montre que la contribution des réservoirs miniers aux débits des cours d'eau à l'aval des points de débordement est faible pour l'Orne aval et le Woigot aval, et forte pour la Fensch amont.

Le pourcentage de contribution des débits de débordement pour les crues de « moyennes eaux à premiers dommages conséquents » de périodes de retour de 10 et 30 ans est de :

- Réservoir Sud : 1,9 à 2,5 % du débit de l'Orne à la station hydrométrique de Rosselange ;
- Réservoir Centre : 2,8 à 4 % du débit du Woigot à la station hydrométrique de Briey ;
- Réservoir Nord : 37,8 à 59,7 % du débit de la Fensch à la station hydrométrique de Knutange.

Le pourcentage de contribution des débits de débordement pour les crues de « très hautes eaux » de périodes de retour de 100 ans est de :

- Réservoir Sud : 1,5 à 1,6 % du débit de l'Orne à la station hydrométrique de Rosselange ;
- Réservoir Centre : 2,4 à 2,6 % du débit du Woigot à la station hydrométrique de Briey ;
- Réservoir Nord : 29,8 à 31,8 % du débit de la Fensch à la station hydrométrique de Knutange.

Ces chiffres sont majorés du fait des conditions du calcul et des hypothèses prises pour les scénarios d'évolution future des données météorologiques et des prélèvements. Par ailleurs, ils ne sont valables que pour les 3 couples « point de débordement – station hydrométrique » pour lesquels le calcul a été possible, en d'autres points de chaque cours d'eau ils ne fournissent qu'un ordre de grandeur. Le pourcentage de contribution pourra être calculé en d'autres points d'un cours d'eau récepteur à chaque fois qu'il sera possible à l'avenir de disposer de débits caractéristiques en ces points.

Contribution des débordements des réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain au débit des cours d'eau en période de crue

Les résultats de la présente étude contribueront notamment à alimenter la démarche d'élaboration du schéma directeur de l'Orne, menée en régie par le Syndicat Mixte Moselle Aval, et également l'étude portée par la Communauté d'Agglomération du Val de Fensch qui vise une définition d'actions d'amélioration de l'état de la Fensch et de lutte contre les inondations.

Sommaire

1. Cadre et périmètre de l'étude	9
1.1. Cadre conventionnel	9
1.2. Objectifs de l'étude.....	9
1.3. Travaux réalisés.....	10
2. Les réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain et leurs points de débordement.....	11
2.1. Contexte historique	11
2.2. L'observatoire des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain	15
2.3. Le modèle conceptuel de structure et de fonctionnement hydrogéologique des réservoirs miniers	16
2.4. Les simulateurs de prévision de la qualité de l'eau des réservoirs miniers	19
2.5. Les points de débordement des réservoirs miniers	20
2.5.1. Les points de débordement du réservoir Sud.....	25
2.5.2. Les points de débordement du réservoir Centre.....	25
2.5.3. Les points de débordement du réservoir Nord.....	26
2.6. Les stations hydrométriques sur les cours d'eau récepteurs des débordements miniers	26
3. Construction d'un modèle hydrologique global de chaque réservoir minier.....	29
3.1. Principe d'une modélisation hydrologique globale avec le logiciel GARDÉNIA du BRGM.....	29
3.2. Données utilisées pour la construction des modèles	30
3.3. Résultats de la calibration	34
4. Calcul de la contribution des débordements des réservoirs miniers au débit des cours d'eau	41
4.1. Méthodologie.....	41
4.2. Etape 1 : définition des scénarios.....	41
4.2.1. Simulation 1 : scénario sans changement (situation actuelle).....	41
4.2.2. Simulation 2 : scénario avec changement climatique	42
4.2.3. Simulation 3 : scénario avec changement climatique et aucun prélèvement	42
4.3. Etape 2 : simulation des 3 scénarios pour chacun des 3 réservoirs miniers	42
4.4. Etape 3 : ajustement d'une loi de probabilité continue sur chaque série de débits maximums annuels simulés.....	45
4.5. Etape 4 : calcul de la contribution des réservoirs miniers	45
4.6. Synthèse des résultats pour les périodes de retour 10, 30 et 100 ans et carte du POURCENTAGE de contribution.....	46
5. Conclusion	51
6. Bibliographie	53

Liste des figures

Figure 1 – Caractéristiques des trois principaux réservoirs miniers du bassin ferrifère (modifié d'après Vaute et al., 2007a).....	11
Figure 2 – Carte des réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain (modifié d'après Vaute et al., 2007a).....	12
Figure 3 – Liste des ouvrages surveillés dans le cadre de l'observatoire des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain (en gras dans le tableau : ouvrages de débordement des réservoirs miniers vers les cours d'eau).....	13
Figure 4 – Carte des ouvrages surveillés dans le cadre de l'observatoire des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain.....	14
Figure 5 – Photo de gauche : système complet de monitoring en puits minier profond comprenant un échantillonneur « pneumatique » de conception BRGM et une sonde de mesure de la conductivité en continu. Photo de droite : échantillonneur mobile d'une capacité de 300 m.	16
Figure 6 – Schéma conceptuel de structure et de fonctionnement hydrogéologique d'un réservoir minier du bassin ferrifère, avant et après ennoyage (exemple du réservoir Sud, coupe schématique SO-NE).....	17
Figure 7 – Caractéristiques des points de débordement et de fuite des zones ennoyées des trois principaux réservoirs miniers du bassin ferrifère (modifié d'après Vaute et al., 2007a).....	20
Figure 8 – Carte de situation des points de débordements des trois principaux réservoirs miniers Sud, Centre et Nord dans le bassin versant du cours d'eau récepteur correspondant Orne, Woigot, et Fensch.....	21
Figure 9 – Points de débordements du réservoir Sud.....	22
Figure 10 – Points de débordements du réservoir Centre.....	23
Figure 11 – Points de débordements du réservoir Nord.....	24
Figure 12 – Caractéristiques comparées des points de débordement des réservoirs miniers et des stations hydrologiques utilisées pour le calcul du pourcentage de contribution.....	27
Figure 13 – Conceptualisation d'un bassin versant hydrologique avec le logiciel GARDENIA du BRGM.....	30
Figure 14 – Liste des points de prélèvement et des exploitants contactés.....	31
Figure 14 – Schéma d'un modèle hydrologique global avec le logiciel GARDENIA du BRGM.....	32
Figure 15 – Schéma de modèle hydrologique global GARDENIA retenu pour la modélisation.....	33
Figure 16 – Statistiques sur les données relatives au réservoir minier Sud sur la période de calibration des modèles (18/11/2008 – 22/10/2019).....	35
Figure 17 – Statistiques sur les données relatives au réservoir minier Nord sur la période de calibration des modèles (18/11/2008 – 22/10/2019).....	35
Figure 18 – Statistiques sur les données relatives au réservoir minier Centre sur la période de calibration des modèles (18/11/2008 – 22/10/2019).....	36
Figure 19 – Résultats de la calibration du débit de débordement et du niveau piézométrique du réservoir Sud sur la période 18/11/2008 – 22/10/2019.....	37
Figure 20 – Résultats de la calibration du débit de débordement et du niveau piézométrique du réservoir Centre sur la période 18/11/2008 – 22/10/2019.....	38

Figure 21 – Résultats de la calibration du débit de débordement et du niveau piézométrique du réservoir Nord sur la période 18/11/2008 – 22/10/2019.....	39
Figure 22 – Identification des maxima annuels (points rouges) sur une série de débits simulés : exemple de la simulation n°1 du réservoir Nord.	43
Figure 23 – Ajustement d'une loi de probabilité continue pour chacune des 9 séries de débits maximums annuels issues des 9 simulations réalisées avec GARDENIA.	43
Figure 24 – Calcul de la contribution des débordements des réservoirs miniers aux débits des cours d'eau (tableau du bas) par comparaison des débits caractéristiques de débordement des réservoirs miniers (tableau du haut, valeurs déduites des lois de probabilité ajustées) aux débits caractéristiques des stations hydrologiques (tableau du milieu, résultats de l'étude de la Région Grand Est).....	44
Figure 25 – Synthèse des résultats : contribution des débordements des réservoirs miniers aux débits des cours d'eau pour les périodes de retour 10, 30 et 100 ans.	48
Figure 26 – Carte de la contribution des débits de débordement des réservoirs miniers au débit des cours d'eau en période de crue.....	49

Liste des annexes

Annexe 1 – Chroniques hors-séries 2014-2015	55
---	----

1. Cadre et périmètre de l'étude

1.1. CADRE CONVENTIONNEL

L'objectif de la présente étude est d'évaluer les contributions des débordements des réservoirs miniers sur les débits des cours d'eau sous leur influence, en intégrant l'effet des travaux relatifs aux réservoirs miniers et l'effet potentiel à long terme du changement climatique.

L'étude s'inscrit dans la démarche du Programme d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) d'intention Moselle aval, portée par le Syndicat Mixte Moselle Aval et conventionné le 06 novembre 2019. Les conditions de réalisation de l'étude ont été établies dans une convention de partenariat entre Moselle Aval et le BRGM, datée du 04 juin 2020.

Les résultats des travaux de la présente étude contribueront notamment à alimenter la démarche d'élaboration du schéma directeur de l'Orne, menée en régie par le Syndicat Mixte Moselle Aval, et également l'étude portée par la Communauté d'Agglomération du Val de Fensch qui vise une définition d'actions d'amélioration de l'état de la Fensch et de lutte contre les inondations.

1.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Dans le Bassin Ferrifère, l'ennoyage de tous les réservoirs miniers est achevé depuis mars 2008. Depuis cette date, les aquifères du Bassin Ferrifère ont trouvé un nouvel équilibre hydrodynamique. La question de la contribution du débordement des réservoirs miniers sur les débits des cours d'eau du Bassin Ferrifère en période de crue est régulièrement soulevée par les acteurs locaux du SAGE du Bassin Ferrifère.

Un rapport de la Préfecture de Région Lorraine, daté de décembre 2004, concernant le « Devenir de l'eau dans le bassin versant de la Fensch après l'ennoyage du bassin Nord » concluait que l'apport des eaux de débordement à l'aval du point de débordement du réservoir Nord (galerie de la Paix à Knutange) pouvait être estimé à 13 à 22 % du débit à cet endroit, ce qui est significatif. Cette estimation avait été réalisée avant le débordement du réservoir Nord, donc sans connaissance précise des débits de débordement, et devait être actualisée.

Un autre rapport réalisé par le BRGM en 2010 et intitulé « Evaluation de la contribution des eaux d'exhaure du Bassin Ferrifère lorrain aux débits de l'Orne en période de crue » (<http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-58256-FR.pdf>) concluait que l'apport des débordements est faible pour l'Orne aval (quelques % à Rosselange).

Selon le contexte et la position du point considéré dans le réseau hydrographique, la contribution des débordements des réservoirs miniers du Bassin Ferrifère lorrain peut donc être négligeable ou au contraire significative.

L'objectif de la présente étude est d'évaluer, en période de crue, la contribution du débordement des réservoirs miniers sur les débits des cours d'eau du bassin ferrifère. La quantification de cette contribution doit être réalisée en intégrant, d'une part, l'effet des travaux relatifs aux réservoirs miniers (aménagement des points de débordement, arrêt et redémarrage des soutiens d'étiage, pompages) et, d'autre part, en évaluant l'effet potentiel à long terme du changement climatique.

Les tronçons de cours d'eau concernés sont ceux situés à l'aval des points de débordement des réservoirs Sud, Centre, et Nord du bassin ferrifère lorrain, à savoir l'Orne à l'aval de Boncourt et ses affluents rive gauche : le Woigot, le Ruisseau de la Vallée, le Conroy, la Fensch, et tout autre cours d'eau potentiellement influencé.

1.3. TRAVAUX REALISES

La présente étude s'appuie :

- sur les données acquises par le BRGM dans le cadre de l'observatoire du Bassin Ferrifère ;
- sur des données complémentaires fournies par le Syndicat Mixte Moselle Aval ;
- sur l'expérience acquise par le BRGM lors du développement de modèles du bassin ferrifère dans le cadre de ses travaux de recherche et développement.

Elle comporte 3 parties principales, correspondant aux chapitres 2 à 4 du présent rapport :

- Chapitre 2 : synthèse des connaissances acquises sur les bassins versants de l'Orne et de la Fensch, concernant les relations entre les réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain et les eaux souterraines et les cours d'eau ;
- Chapitre 3 : construction et calibration de 3 modèles globaux de débordement des 3 réservoirs Sud, Centre et Nord ;
- Chapitre 4 : simulation des débits de débordement des réservoirs selon 3 scénarios dont celui intégrant les problématiques de changement climatique, puis calcul du pourcentage de contribution des débordements miniers au débit des cours d'eau en période de crue.

2. Les réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain et leurs points de débordement

Ce chapitre a pour but de résumer les principales connaissances utiles à la compréhension des résultats de la présente étude. Le lecteur intéressé pourra trouver des informations plus détaillées dans les trois « Chroniques semestrielles hors-série 2014-2015 » figurant en annexe 1. Pour une information encore plus complète, le lecteur pourra prendre connaissance du document « Etat des lieux du bassin ferrifère lorrain » (Vaute et al. 2007a) téléchargeable sur la page internet de recherche des rapports publics du BRGM à l'adresse <http://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-55434-FR>, ou sur <https://sagebassinferrifere.grandest.fr/> à la rubrique « Documents et outils / Les documents de référence ».

2.1. CONTEXTE HISTORIQUE

Durant plus d'un siècle d'exploitation dans le bassin ferrifère lorrain, 3 milliards de tonnes de minerai de fer ont été excavés, 40 000 km de galeries ont été creusés. Le bassin ferrifère est divisé en trois principaux bassins : Sud, Centre et Nord (Figure 2). 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 a fermé en 1997. La cessation de l'activité minière et l'arrêt des pompages d'exhaure a entraîné l'envoyage des principaux bassins entre 1994 et 2008, ce qui a abouti à la création de 3 grands réservoirs miniers envoyés. La surface totale de l'ensemble des travaux miniers du bassin ferrifère s'élève à près de 430 km², dont les ³/₄ sont envoyés, ce qui représente un volume d'eau supérieur à 450 millions de m³ (Figure 1 et Figure 2).

Réservoir	Superficie travaux miniers	Superficie zone envoyée	Superficie zone hors envoi	% zone hors envoi	Volume envoyé (estimé)	Date début envoi	Date premier débordement	Période soutien d'étiage par pompage
	km ²	km ²	km ²	%	millions m ³			
SUD	137,4	105,6	31,8	23,2	229	03/1995	11/1998	1995-2004
CENTRE	125,6	121,7	3,9	3,1	154	02/1994	03/1999	1994-2017
NORD	96,8	50,4	46,4	47,9	53	12/2005	03/2008	(gravitaire uniquement)

Figure 1 – Caractéristiques des trois principaux réservoirs miniers du bassin ferrifère (modifié d'après Vaute et al., 2007a).

L'arrêt progressif de l'exploitation minière dans le bassin ferrifère a conduit à des 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. Ce constat a conduit les pouvoirs publics à initier en 2004 l'élaboration d'un SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) du bassin ferrifère (cf. le site internet dédié au SAGE à l'adresse <https://sagebassinferrifere.grandest.fr/>). En 2005, le BRGM a été chargé par le Conseil Régional de Lorraine, alors structure porteuse du SAGE du Bassin Ferrifère, de réaliser les deux premiers documents constitutifs de l'élaboration du SAGE : l'état des lieux et le diagnostic du SAGE du Bassin Ferrifère (Vaute et al. 2007a, 2007b).

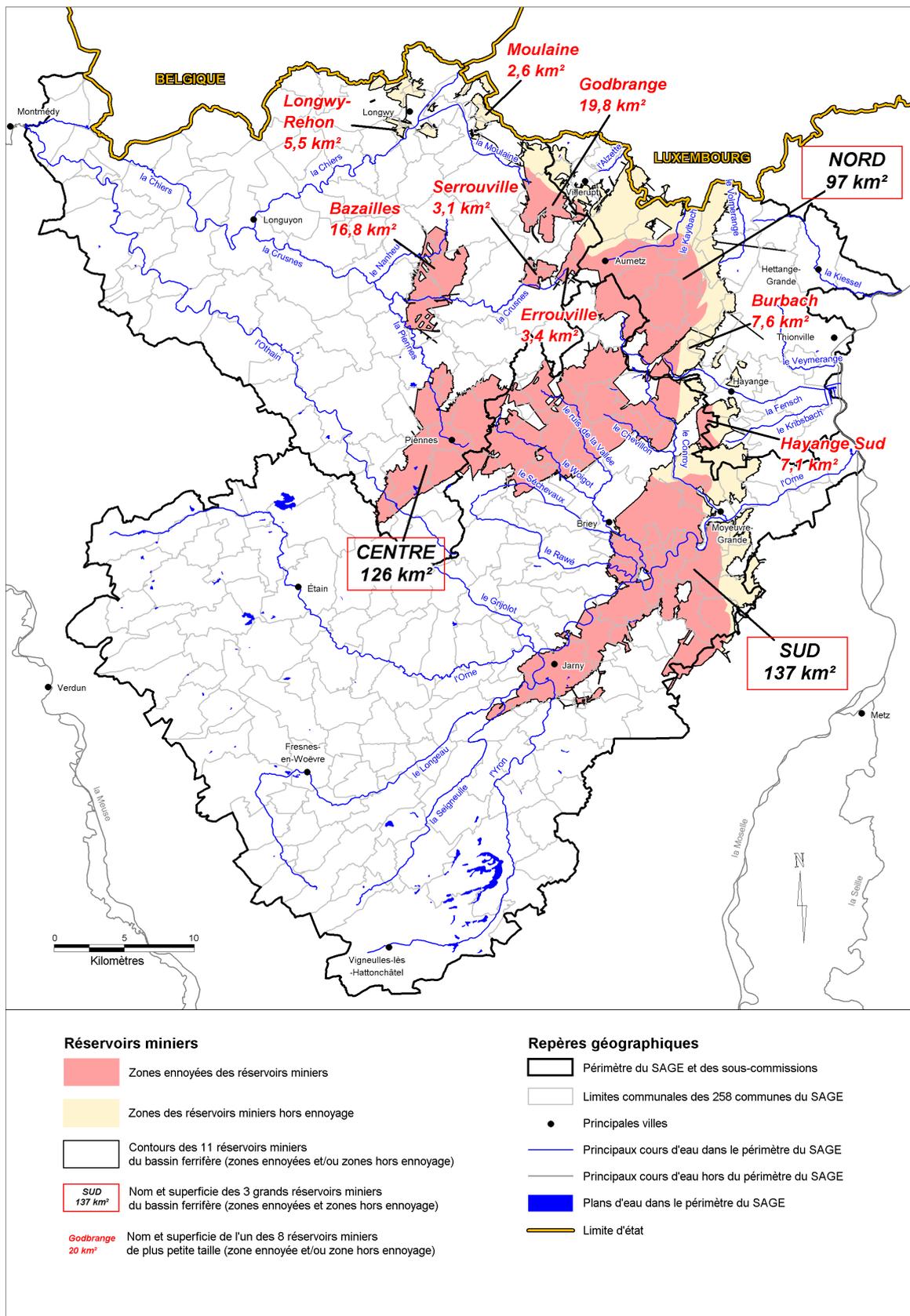


Figure 2 – Carte des réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain (modifié d'après Vaute et al., 2007a).

Au terme de plus de 10 ans de travaux menés par la Commission Locale de l'Eau (CLE) du SAGE, ce dernier a été adopté en 2016 : il constitue désormais un fil conducteur pour toutes les actions menées sur le bassin pour la préservation de l'eau et des milieux aquatiques.

En parallèle, à partir de 1995, d'abord en complément puis en substitution de la surveillance qui avait été prescrite aux exploitants miniers pendant une durée limitée, le BRGM, en partenariat avec l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, le Conseil Régional Grand Est et la DREAL Grand Est, ont engagé des actions de connaissance et de protection de la ressource. Le BRGM assure depuis cette date la surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain, dans le cadre de ses activités de service public, grâce à un réseau d'ouvrages de surveillance qui est devenu un observatoire des eaux souterraines en 2017 (Figure 3 et Figure 4). Par ailleurs, le BRGM a contribué aux travaux de recherche du GISOS, Groupement d'intérêt scientifique de recherche sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains, qui a eu pour objectifs entre 1999 et 2015 d'anticiper et de contribuer à résoudre les problèmes posés dans le cadre de l'après-mine en France. Les travaux menés par le BRGM dans le cadre du GISOS ont contribué au développement d'un modèle numérique de prévision de la concentration en sulfates dans l'eau des réservoirs miniers.

BASSIN	CODE BSS	NUMERO	NOM	COMMUNE	AQUIFERE CAPTE
NORD	01138X0185/PZ-15	N15	Pz. Fensch aval 1	KNUTANGE	Alluvions de la Fensch
	01137X0174/PZ-16	N16	Pz. Fensch amont 2	KNUTANGE	Alluvions de la Fensch
	01137X0173/PZ-12	N12	Pz. Chem. Sud Dogger inf.	BOULANGE	Calcaires du Dogger
	01137X0172/PZ-13	N13	Pz. Chem. Sud Dogger sup.	BOULANGE	Calcaires du Dogger
	01137X0160/F	N20	Pz. Fontoy nord	FONTOY	Calcaires du Dogger
	01137X0159/F	N21	Pz. Fontoy sud	FONTOY	Calcaires du Dogger
	01137X0143/S	N3	Puits Ferdinand Grise	TRESSANGE	Réservoir minier
	01137X0182/N3BIS	N3bis	Puits Ferdinand Jaune	TRESSANGE	Réservoir minier
	01137X0175/PTS-5	N5	Puits Cheminée Sud Grise	BOULANGE	Réservoir minier
	01137X0099/P1	N6	Puits Boulange Grise	BOULANGE	Réservoir minier
	01137X0169/PZ-7	N7	Pz. Angevillers Grise	HAVANGE	Réservoir minier
	01137X0170/PTS-8	N8	Puits Havange Brune	FONTOY	Réservoir minier
	01137X0171/PZ-11	N11	Pz. Cheminée Sud	BOULANGE	Réservoir minier - Zone foudroyée
	01138X0184/G14BIS	N14bis	Gal. des eaux de Knutange (la Paix)	KNUTANGE	Réservoir minier
	01132X0164/PUITS	N17	Puits Errouville III	ERROUVILLE	Réservoir minier
01138X0147/P	N18	Gal. de Metzange (Charles)	THONVILLE	Réservoir minier	
BURBACH	01138X0172/BURBACH	Bu1	Gal. de Burbach	ALGRANGE	Réservoir minier
CENTRE	01373X0132/P01	C11	Pz. P1 - St-Pierremont	AVRIL	Calcaires du Dogger
	01373X0133/P02	C12	Pz. P2 - St-Pierremont	AVRIL	Calcaires du Dogger
	01373X0176/PREL	C21	Conroy - station hydrométrique	MOYEVRE-GRANDE	Cours d'eau Conroy
	01372X0211/PZBIS	C10	Pz. Mance bis	MANCE	Formation ferrifère non exploitée
	01373X0158/PZ	C8	Pz. Chevillon artésien	AVRIL	Formation ferrifère non exploitée
	01137X0157/PUITS	C2	For. Route Blanche	FONTOY	Réservoir minier
	01373X0134/EXHAUR	C3	Gal. de Bois d'Avril	NEUFCHÉF	Réservoir minier
	01372X0197/EX	C5	Gal. du Woigot	MANCIEULLES	Réservoir minier
	01364X0042/P3	C13	Puits Amermont III	DOMMAY-BARONCOURT	Réservoir minier
	01136X0148/P	C14	Puits Anderny II	TUCQUEGNIEUX	Réservoir minier
	01372X0204/M52	C9	Pz. M52 - Mance	MANCE	Calcaires du Dogger
01372X0198/P2	C16	Pts St-Pierremont	MANCIEULLES	Réservoir minier	
SUD	01376X0149/H01	S13	Pz. H1 - Hatrize	HATRIZE	Calcaires du Dogger
	01377X0212/M02	S15	Pz. M2 - Paradis aval	MOINEVILLE	Calcaires du Dogger
	01632X0070/V105	S16	Pz. V105 - Ville / Yron	VILLE-SUR-YRON	Calcaires du Dogger
	01372X0210/BRIEYA	S9	Pz. Briey A	BRIEY	Calcaires du Dogger
	01372X0209/BRIEYB	S10	Pz. Briey B	BRIEY	Formation ferrifère non exploitée
	01378X0121/RC1	S23	Puits Roncourt I	RONCOURT	Réservoir minier
	01374X0273/G	S4	Gal. du chenal de Moyevre	MOYEVRE-GRANDE	Réservoir minier
	01377X0211/M01	S14	Pz. M1 - Paradis aval	MOINEVILLE	Réservoir minier - Zone foudroyée
	01377X0099/FM	S19	Puits Auboué I	AUBOUE	Réservoir minier
01377X0205/F3	S18	Pz. Vernéville	VERNEVILLE	Calcaires du Dogger	

Figure 3 – Liste des ouvrages surveillés dans le cadre de l'observatoire des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain (en gras dans le tableau : ouvrages de débordement des réservoirs miniers vers les cours d'eau).

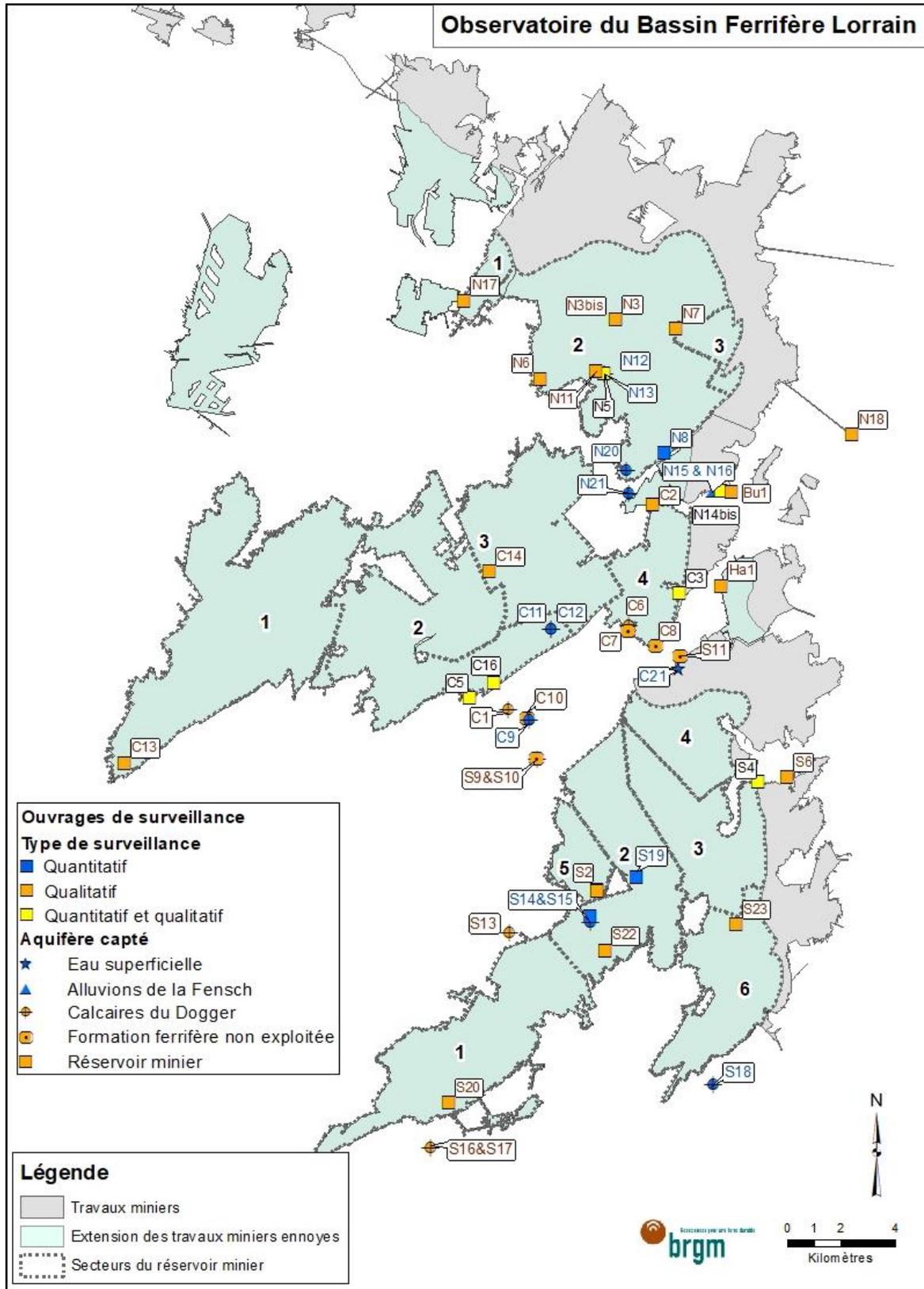


Figure 4 – Carte des ouvrages surveillés dans le cadre de l'observatoire des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain.

2.2. L'OBSERVATOIRE DES EAUX SOUTERRAINES DU BASSIN FERRIFERE LORRAIN

Du point de vue hydrogéologique, le bassin ferrifère lorrain est un système hydrodynamique et chimique complexe (cf. § suivant et schémas de la Figure 6), formé par la superposition d'un aquifère calcaire fracturé et localement karstique (nappe du Dogger), et d'un aquifère artificiel constitué d'un réseau de grands vides (réservoir minier). La surveillance de la quantité (niveaux, débits) et de la qualité des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain a pour premier objectif de mieux comprendre le fonctionnement de ce système, et notamment les relations entre les réservoirs miniers et les aquifères adjacents, ainsi que les éventuelles communications entre réservoirs miniers. Il s'agit en second lieu de constituer un ensemble de bases de données (géographiques, géologiques, minières, hydrodynamiques, chimiques) destinées à alimenter des modèles numériques de prévision et de gestion. Un réseau de surveillance de 39 ouvrages a ainsi été progressivement constitué (Figure 3 et Figure 4). Les résultats de la surveillance sont présentés par des rapports publics téléchargeables sur le site du BRGM (www.brgm.fr), ainsi que par le biais de chroniques périodiques (sigesrm.brgm.fr rubrique « Actualités »). Par ailleurs, les données de surveillance sont bancarisées dans la banque ADES (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines : www.ades.eaufrance.fr) où elles peuvent être consultées et téléchargées. Le Système d'information pour la gestion des eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse (SIGES) fournit un accès simplifié à ces données ainsi qu'à un grand nombre d'autres données relatives aux eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse (sigesrm.brgm.fr).

Les niveaux piézométriques et les débits de débordement des réservoirs sont mesurés en continu par des centrales d'acquisition. Les échantillonnages et les analyses sont effectués à des fréquences mensuelles à annuelles, et concernent les éléments majeurs (calcium, magnésium, sodium, potassium, sulfate, chlorure, bicarbonate), les composés azotés (ammonium, nitrite, nitrate), certains éléments caractéristiques de l'eau d'ennoyage des réservoirs miniers (strontium, fer, manganèse, bore), et les polluants potentiellement présents dans l'eau des réservoirs miniers (nickel, hydrocarbures totaux, indice phénol).

Des profils de conductivité électrique de l'eau et de température réalisés dans tous les puits de grand diamètre (5 à 7 m) du bassin ferrifère permettent de constater l'existence dans les puits d'une tranche d'eau supérieure peu minéralisée de composition proche de celle de l'eau des calcaires du Dogger, séparée, par un palier très abrupt, d'une tranche d'eau inférieure minéralisée représentative de l'eau d'ennoyage des mines. Il a été démontré qu'un échantillon représentatif de l'eau circulant dans le réseau de galeries du réservoir minier ne peut être obtenu que par prélèvement dans la tranche inférieure d'eau minéralisée, et de préférence à la profondeur du débouché de la galerie dans le puits. L'échantillonnage correct de l'eau des puits et des piézomètres d'un réservoir minier exige donc de mettre en œuvre des techniques adaptées aux profondeurs importantes en jeu (jusqu'à 260 m) ainsi qu'à l'absence de moyens de pompage dans la plupart des cas. Pour répondre à l'ensemble de ces contraintes, le BRGM a conçu un système d'échantillonnage fixe « pneumatique » sans purge préalable qui a été installé dans un grand nombre de puits à partir de 2005 (Figure 5).



Figure 5 – Photo de gauche : système complet de monitoring en puits minier profond comprenant un échantillonneur « pneumatique » de conception BRGM et une sonde de mesure de la conductivité en continu. Photo de droite : échantillonneur mobile d'une capacité de 300 m.

2.3. LE MODELE CONCEPTUEL DE STRUCTURE ET DE FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DES RESERVOIRS MINIERES

L'interprétation et la synthèse des résultats de mesure acquis depuis 1995 dans le cadre de la surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère, complétée par les résultats des expériences de laboratoire menés par le BRGM dans le cadre du GISOS (Collon, 2003 ; GISOS, 2009, 2010), ont permis de décrire le fonctionnement hydrogéologique des réservoirs miniers et leurs relations hydrauliques avec les nappes des calcaires du Dogger sus-jacentes. Ce fonctionnement est résumé ci-après sous la forme d'un modèle conceptuel illustré par la Figure 6.

Pendant la période d'exploitation minière (Figure 6, 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 (jusqu'à près de 300 millions de m³ par an sur l'ensemble du bassin ferrifère), ce qui a obligé 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. 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 la nappe de grande ampleur.

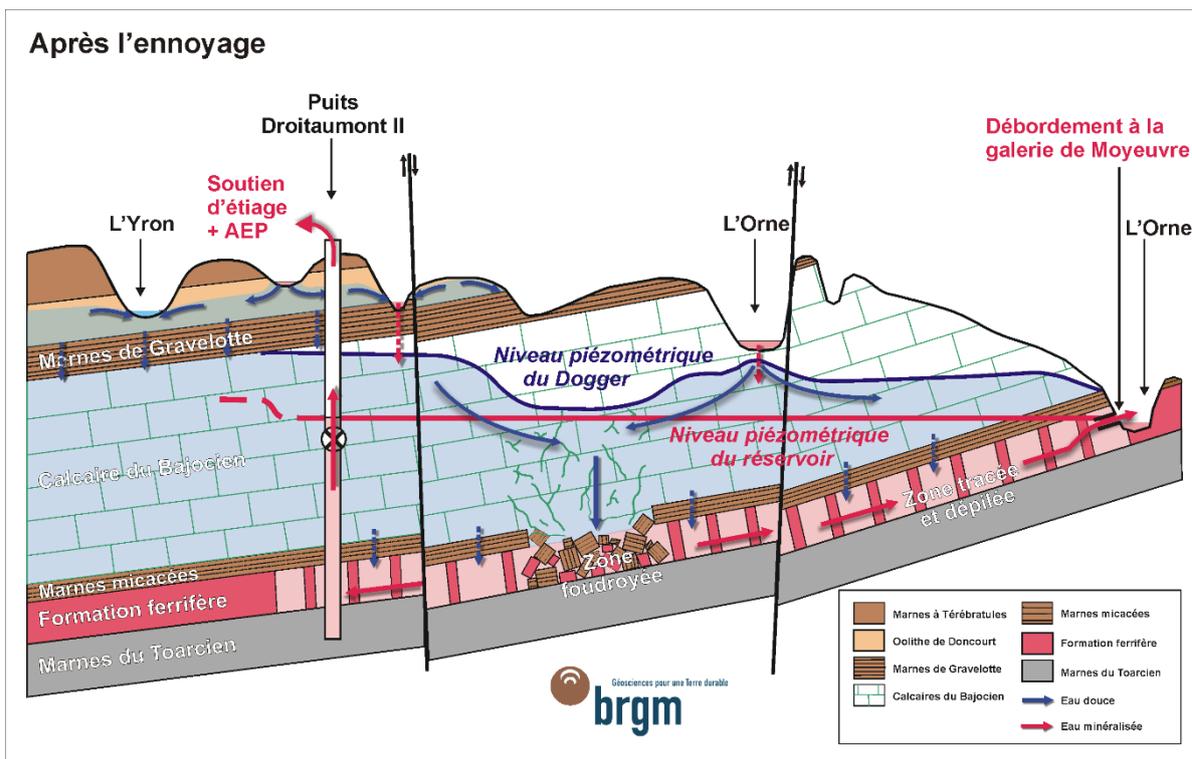
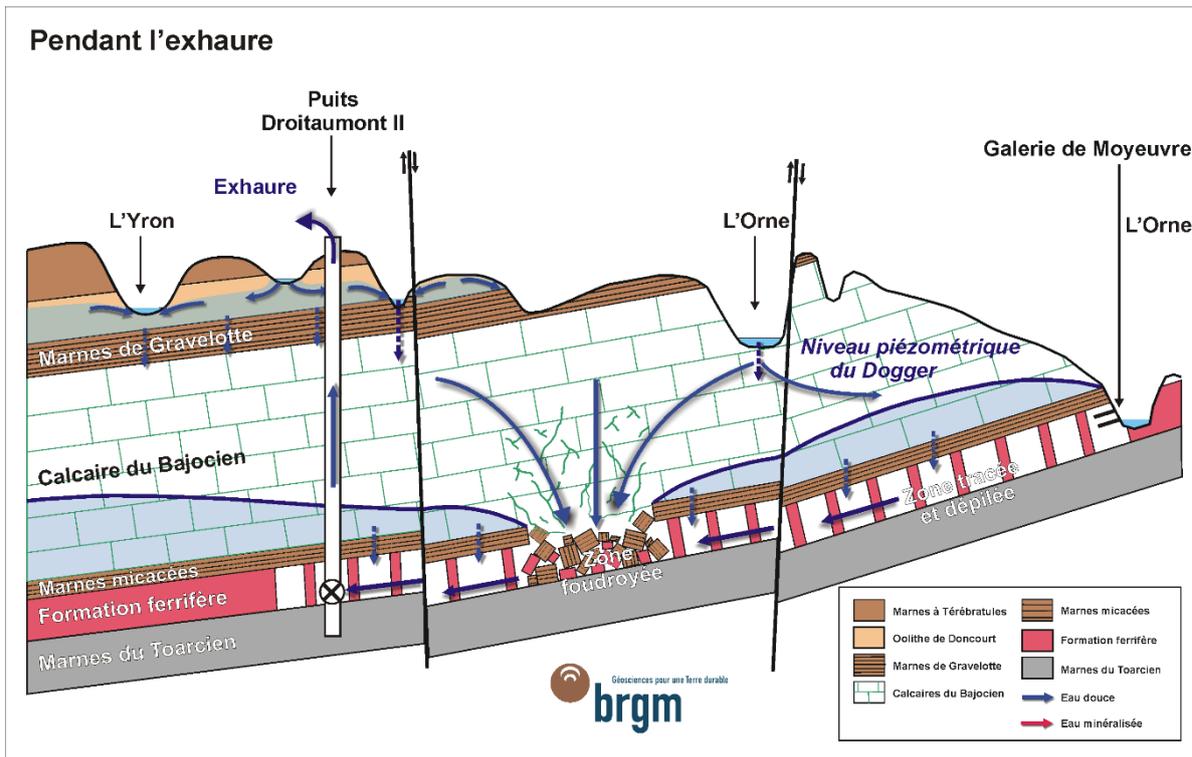


Figure 6 – Schéma conceptuel de structure et de fonctionnement hydrogéologique d'un réservoir minier du bassin ferrifère, avant et après envoyage (exemple du réservoir Sud, coupe schématique SO-NE).

Après l'arrêt des exhaures (Figure 6, 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 dimension variée 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. 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 » importante (les pertes de charge à l'écoulement 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).

Du point de vue de la qualité de l'eau, lors de l'ennoyage des réservoirs miniers, l'eau de remplissage des galeries des anciennes mines de fer s'est chargée en sulfate, magnésium, sodium, calcium, potassium et bore, et, dans une moindre mesure, en strontium, manganèse, et chlorure. Son pH est resté compris entre 7 et 8. Si cette augmentation des concentrations a généralement rendu l'eau impropre à la consommation humaine au regard des concentrations maximales admissibles, ces éléments présents en excès ne sont, néanmoins, pas toxiques pour l'homme. De plus, 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.

Les éléments chimiques en excès dans l'eau des réservoirs miniers du bassin ferrifère proviennent des réactions de mise en solution des sels minéraux (gypse notamment) issus de l'oxydation de la pyrite contenue dans les interbanco marneux de la formation ferrifère (Collon, 2003). Ces sels se sont formés lors de l'exploitation minière, lorsque la pyrite a été mise en contact avec l'oxygène de l'air introduit dans le milieu souterrain par l'aération des mines. 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 ennoyé. Ainsi, cette situation est transitoire, jusqu'à ce que le stock d'eau minéralisée initial qui s'est formé lors de l'ennoyage soit évacué par le jeu normal des circulations souterraines. Le temps nécessaire au renouvellement de l'eau du réservoir peut aller de quelques années à quelques dizaines d'années, voire beaucoup plus, selon le temps de résidence de l'eau dans le réservoir.

2.4. LES SIMULATEURS DE PREVISION DE LA QUALITE DE L'EAU DES RESERVOIRS MINIERES

La volonté, partagée par tous les acteurs du territoire du SAGE du bassin ferrifère, 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'envoyage 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, l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et le BRGM ont ainsi souhaité développer un modèle hydrogéologique et chimique des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain. Cet outil opérationnel de gestion a pour but de permettre de prévoir les débits des points de débordement et de fuites des réservoirs ; les niveaux piézométriques des réservoirs ; et l'évolution de la concentration en sulfate aux principaux points de prélèvement et de débordement des réservoirs.

Trois simulateurs de fonctionnement hydrologique et chimique des trois grands réservoirs miniers envoyés du bassin ferrifère lorrain (Sud, Centre, et Nord) ont été construits en 2012 à partir des données disponibles entre 1993 et 2011 (Vaute et al., 2013). Ces simulateurs sont basés sur une approche globale de réacteurs en réseaux, chaque réacteur représentant un secteur d'un réservoir minier envoyé. La sectorisation des réservoirs a été obtenue par le croisement entre les tendances d'évolution observées des concentrations en sulfate (Ollagnier, 2013), et les résultats de l'analyse détaillée des plans miniers (Vaute et al., 2005). Le recueil et le traitement de toutes les données disponibles a permis de synthétiser les informations nécessaires à la construction des simulateurs.

Les résultats de la calibration des 3 simulateurs sont présentés dans la chronique hors-série n°3 en annexe 1 du présent rapport. Les graphiques présentés sur la carte permettent de visualiser sur la période 1993-2015 les concentrations mesurées dans les ouvrages représentatifs des différents secteurs simulés, et de les comparer aux concentrations calculées par les simulateurs sur la même période. A l'époque de la réalisation de cette figure, en 2015, les données acquises entre 2012 et 2015 validaient les tendances prévues par les simulateurs sur l'ensemble des points de mesure. Les simulateurs ont alors permis d'estimer les dates à partir desquelles la concentration en sulfates dans chaque secteur d'un réservoir pourrait être inférieure à la limite de potabilité de 250 mg/l, avec une marge d'incertitude qui augmente avec l'éloignement de l'horizon de prévision. Ces dates seront réévaluées en 2022-2023 lors de la future mise à jour des simulateurs, qui aura notamment pour but de prendre en compte les données météorologiques observées depuis 2012 (les simulateurs ne sont calibrés avec des données observées que jusqu'à 2011).

Pour des raisons techniques (logiciels utilisés, objectifs de réalisation des simulateurs, période de calibration ancienne), les simulateurs des réservoirs miniers n'ont pas été utilisés directement dans le cadre de la présente étude, mais les données et l'expérience acquises lors de leur construction ont été mobilisées pour permettre la construction de 3 nouveaux modèles de débit de débordement (cf. chapitre 3).

2.5. LES POINTS DE DEBORDEMENT DES RESERVOIRS MINIERES

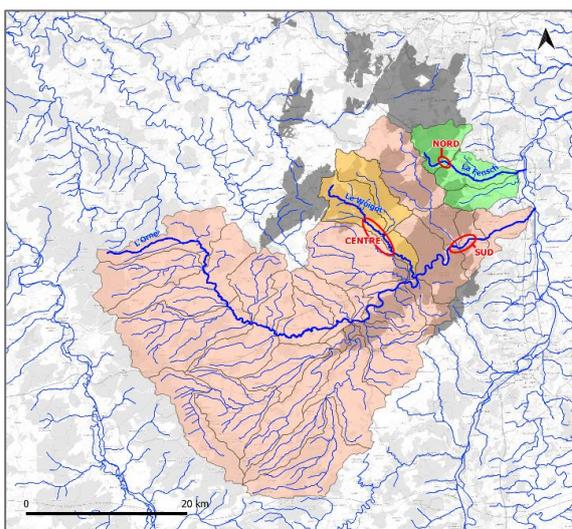
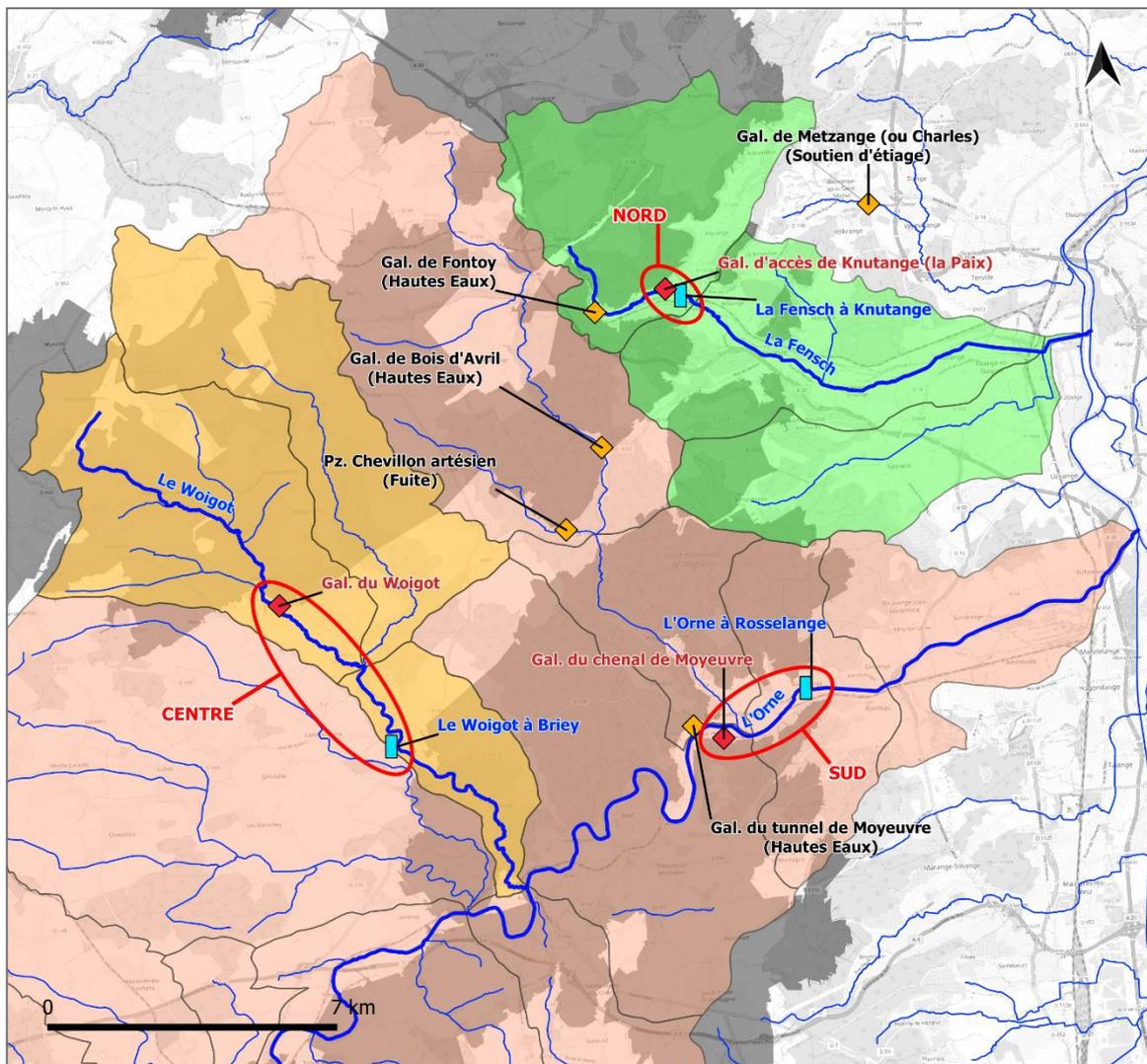
Le tableau de la Figure 7 fournit les caractéristiques des points de débordement, notamment leur type (principal ou secondaire de hautes eaux, fuite), la cote de leur seuil de débordement et le nom de leur cours d'eau récepteur.

La carte de la Figure 8 montre la situation des points de débordement principaux des trois grands réservoirs miniers Sud, Centre et Nord, dans le bassin versant du cours d'eau récepteur correspondant, respectivement l'Orne (affluent important de la Moselle), le Woigot (affluent de l'Orne) et la Fensch (petit affluent de la Moselle). La carte montre aussi les points de débordement secondaires vers des affluents de ces trois cours d'eau : en raison de la capacité importante de débordement des points principaux, les débits de ces points secondaires sont nuls ou très faibles, et dans ce dernier cas leur débit est ajouté au débit du point principal pour les besoins de la modélisation. Les statistiques relatives aux valeurs de débits qui débordent via ces différents points de débordement sont présentées dans les tableaux de la Figure 7.

Les débits d'étiage de nombreux cours d'eau du bassin ferrifère étaient liés aux rejets des eaux d'exhaure. L'arrêt des exhaures a conduit à des baisses importantes des débits allant jusqu'à l'assèchement de certains tronçons de cours d'eau. Compte tenu des problèmes de qualité des eaux induits par la baisse des débits, des arrêtés préfectoraux ont initialement imposé la mise en place de pompages pour le soutien d'étiage de 5 cours d'eau impactés par l'arrêt des exhaures des réservoirs Sud, Centre et Nord. Tous ces pompages sont aujourd'hui arrêtés, seul persiste un soutien gravitaire du Veymerange par l'intermédiaire d'un point de débordement secondaire du réservoir Nord (galerie de Metzange, débordant un débit constant de 130 L/s).

Réservoir	Nom de l'exutoire	Indice national	Type d'exutoire	Cote du seuil (m NGF)	Cours d'eau récepteur
SUD	Galerie du chenal de Moyeuivre (nouvel exutoire créé en 2003)	01374X0273	Débordement principal	168,91	Orne
	Galerie du tunnel de Moyeuivre	01374X0234	Débordement secondaire hautes eaux	172,43	Orne
CENTRE	Galerie du Woigot	01372X0197	Débordement principal	222,74	Woigot
	Galerie de Bois d'Avril	01373X0134	Débordement secondaire hautes eaux	223,15	Conroy
	Galerie de Fontoy	01137X0151	Débordement secondaire très hautes eaux	223,50	Fensch
	Fuites du réservoir Centre	01373X0158	Fuites réservoir minier		Chevillon
NORD	Galerie de Knutange (ou de la Paix)	01138X0184	Débordement principal (capté partiellement par SOLLAC)	207,47	Fensch
	Galerie de Metzange (ou Charles)	01138X0147	Débordement secondaire soutien d'étiage (limité à 130 L/s)	193	Veymerange

Figure 7 – Caractéristiques des points de débordement et de fuite des zones ennoyées des trois principaux réservoirs miniers du bassin ferrifère (modifié d'après Vaute et al., 2007a).



- Calcul du % de contribution du débordement
- ◆ Point de débordement principal
- ◆ Point de débordement secondaire
- Station hydrométrique influencée
- Cours d'eau récepteur principal
- Cours d'eau du bassin Rhin-Meuse
- Bassin versant de la Fensch
- Bassin versant du Woigot
- Bassin versant de l'Orne
- Travaux miniers du bassin ferrifère

Figure 8 – Carte de situation des points de débordements des trois principaux réservoirs miniers Sud, Centre et Nord dans le bassin versant du cours d'eau récepteur correspondant Orne, Woigot, et Fensch.

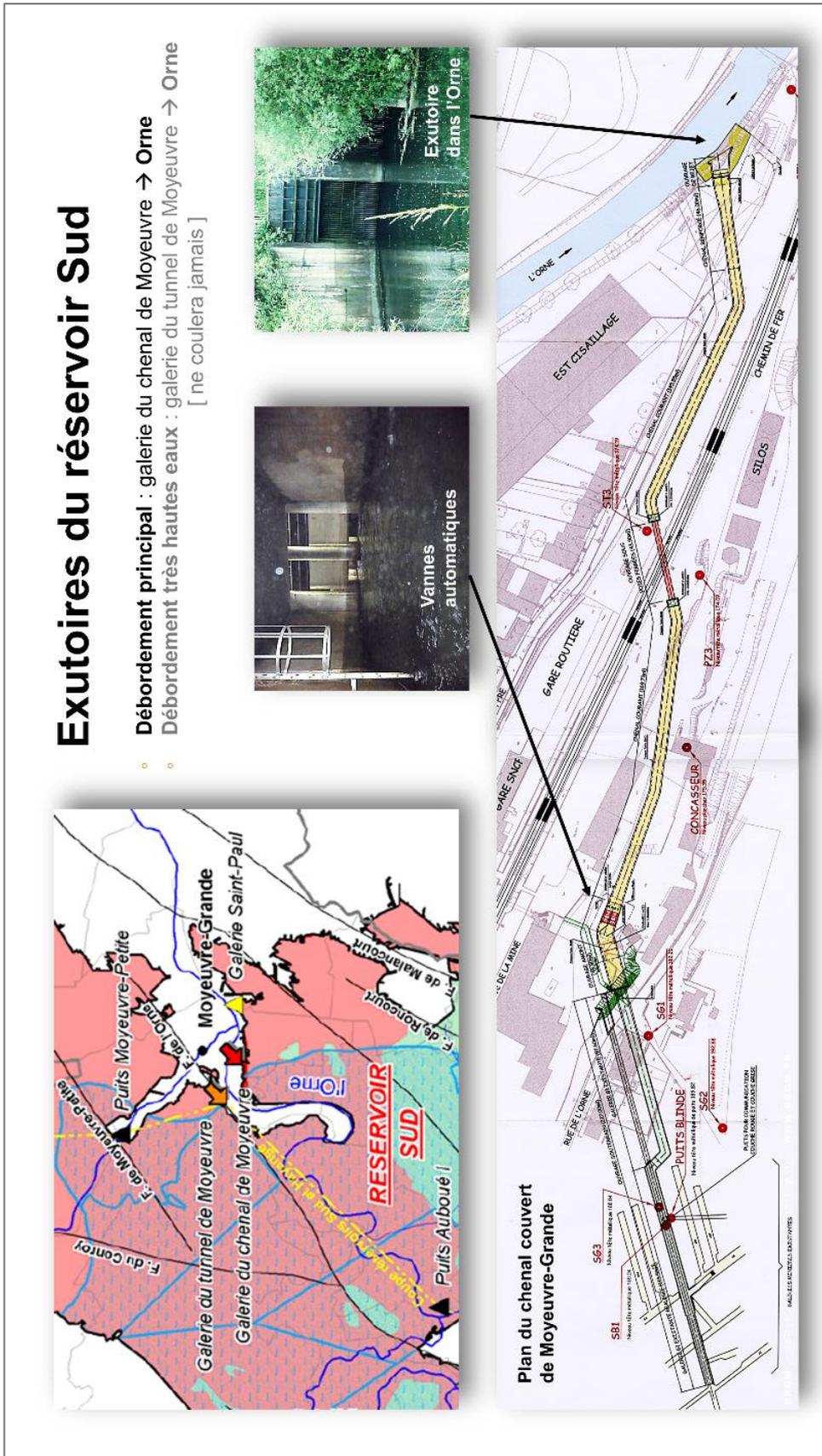


Figure 9 – Points de débordements du réservoir Sud.

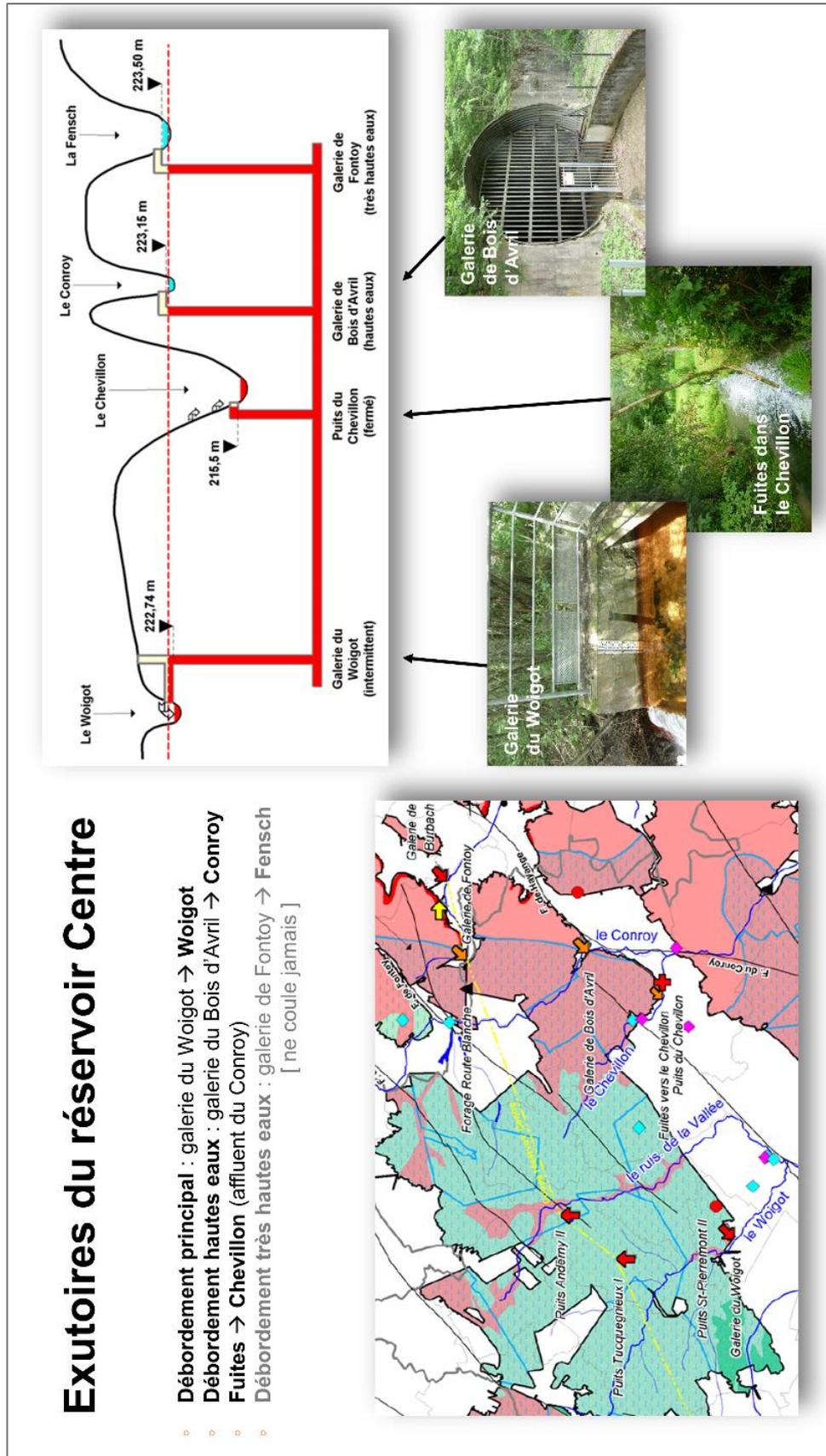


Figure 10 – Points de débordements du réservoir Centre.

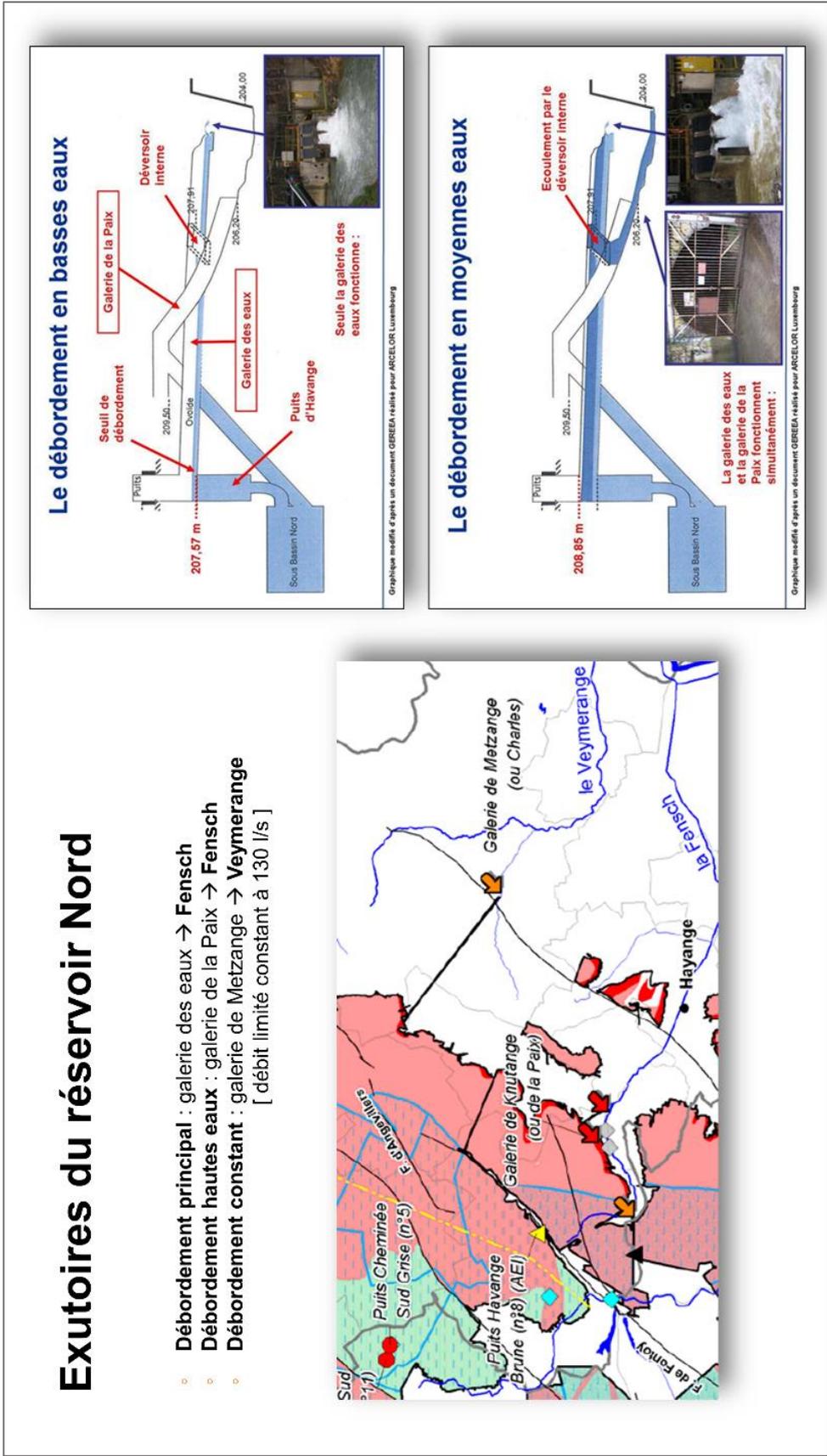


Figure 11 – Points de débordements du réservoir Nord.

2.5.1. Les points de débordement du réservoir Sud

Le bassin versant de l'Orne est entièrement inclus dans le périmètre du SAGE du bassin ferrifère. L'Orne prend sa source en Meuse et s'écoule lentement dans la plaine de la Woëvre, avant d'entrer dans le périmètre de l'ancienne zone d'exploitation minière du bassin Sud. Sur son cours aval, l'Orne traverse une vallée industrielle et urbaine encaissée, fortement occupée par l'homme. Après l'arrêt des exhaures, un soutien d'étiage a été assuré jusqu'en 2004 par pompage dans le réservoir Sud via l'ancien puits minier Droitaumont II, l'eau était alors rejetée dans l'Yron aval, un affluent de l'Orne, à environ 5 km à l'amont de sa confluence avec l'Orne.

L'Orne traverse le bassin Sud, mais certains de ses affluents (le Woigot et le Conroy) sont alimentés en partie par les débordements et fuites du réservoir Centre. L'Orne reçoit aujourd'hui de l'eau issue des réservoirs miniers, via les débordements et fuites suivants :

- débordement du réservoir Sud dans l'Orne, à Moyeuve ;
- débordement du réservoir Centre dans le Woigot, à Mancieulles ;
- fuites du réservoir Centre dans la vallée du Chevillon.

Le point de débordement principal du réservoir Sud est la galerie du chenal de Moyeuve (Figure 9). Ce système complexe de débordement situé en rive droite de l'Orne est actif depuis 2003, il remplace l'ancien ouvrage de débordement nommé galerie du tunnel de Moyeuve qui a fonctionné entre 1998 et 2003 en rive gauche de l'Orne. Le nouvel ouvrage a été créé afin de permettre l'abaissement du niveau du réservoir Sud d'environ 3 m, de manière à supprimer les inondations de caves récurrentes qui se produisaient dans certains quartiers rive droite de la ville de Moyeuve-Grande. Ce point de débordement du réservoir Sud est caractérisé par l'existence d'un système de vannes automatiques qui se ferment lorsque le niveau de la rivière Orne est supérieur à celui du réservoir, afin d'empêcher toute intrusion d'eau de la rivière dans le réservoir minier. Suite à la mise en service de ce nouvel ouvrage capable de conduire des débits de crue centennaux, l'ancien ouvrage ne déborde plus et ne sera pas considéré dans la modélisation.

2.5.2. Les points de débordement du réservoir Centre

Le Woigot est un affluent rive gauche de l'Orne. Son affluent principal est le ruisseau de La Vallée. Jusqu'à fin 2013 et fin 2017 respectivement, le Woigot et le ruisseau de La Vallée faisaient l'objet de soutiens d'étiage par pompage dans le réservoir Centre via les anciens puits miniers Tucquegnieux I et Anderny II.

Le Woigot reçoit le débordement principal du réservoir Centre par la galerie du Woigot à Mancieulles (Figure 10). Jusqu'en 2011, le débit de débordement pouvait s'annuler en étiage, car le niveau du réservoir s'abaissait sous le seuil de débordement du réservoir Centre, en raison de débits de prélèvement pour le soutien d'étiage supérieurs au débit d'alimentation du réservoir.

Le Conroy est un affluent rive gauche de l'Orne, son principal affluent est le Chevillon. Il s'agit de deux cours d'eau à dominante karstique, qui montraient de fréquents assècs estivaux, avant l'ennoyage du réservoir Centre. Le Conroy reçoit par intermittence un très faible débordement hivernal du réservoir Centre par l'ancienne mine du Conroy, dont la galerie d'accès, la galerie du Bois d'Avril, a été aménagée en point de débordement de hautes eaux du réservoir Centre.

Un exutoire du réservoir Centre, le puits du Chevillon, devait assurer un soutien d'étiage du Chevillon, mais la vanne du puits a été fermée en février 1999 juste avant le premier débordement de réservoir Centre pour éviter la minéralisation de l'eau captée par deux puits d'alimentation en eau potable situés dans les alluvions du Conroy, en aval. Le puits du Chevillon est aujourd'hui rebouché. Le Chevillon bénéficie toutefois de l'apport des fuites du réservoir Centre à travers les calcaires constituant les flancs et le soubassement de la vallée dans laquelle il coule. Ces fuites constituent donc un débordement secondaire permanent du réservoir Centre, dont le débit est relativement constant et limité par la perméabilité des terrains (0,1 m³/s en moyenne, cf. statistiques sur la Figure 19).

La galerie de Fontoy est un deuxième point de débordement des hautes eaux vers la Fensch, mais les 3 autres exutoires sont suffisants et cet exutoire n'a jamais fonctionné.

2.5.3. Les points de débordement du réservoir Nord

La Fensch est un affluent rive gauche de la Moselle, son principal affluent est le Kribsbach. Le tracé de ces cours d'eau a été modifié : initialement la Fensch rejoignait le Veymerange et confluaient avec la Moselle à Thionville, et le Kribsbach rejoignait directement la Moselle. Aujourd'hui le Kribsbach est un affluent de la Fensch, qui rejoint la Moselle via un siphon sous le canal à Florange.

Le point de débordement du réservoir Nord est un système complexe constitué de deux galeries superposées, la galerie des eaux qui fonctionne en permanence, et la galerie de La Paix qui ne fonctionne qu'en très hautes eaux. Les deux galeries communiquent et rejettent leurs eaux dans la Fensch à quelques dizaines de mètres l'une de l'autre, elles constituent un même point de débordement.

Le Veymerange est un affluent rive gauche de la Moselle. Son cours amont est rural et peu pérenne. Rapidement le ruisseau s'écoule dans des zones urbanisées, d'Elange à Thionville. Son principal affluent est le Metzange. Le Metzange est un cours d'eau actuellement soutenu par un débordement gravitaire constant de 130 L/s provenant du réservoir Nord via une canalisation traversant le serrement qui ferme la galerie de Metzange (ou galerie Charles).

2.6. LES STATIONS HYDROMETRIQUES SUR LES COURS D'EAU RECEPTEURS DES DEBORDEMENTS MINIERES

Les débits caractéristiques de 5 stations hydrométriques du bassin ferrifère ont été recalculés récemment dans le cadre d'une étude du fonctionnement hydrologique global du bassin versant de la Moselle (Région Grand Est, étude en cours).

Trois stations hydrométriques sont ainsi utilisables pour faire le calcul du pourcentage de contribution des débordements (cf. leur situation sur la carte de la Figure 8) : l'Orne à Rosselange pour le réservoir Sud, le Woigot à Briey pour le réservoir Centre, la Fensch à Knutange pour le réservoir Nord. Les 2 autres stations sont situées à l'amont des points de débordement des réservoirs et ne sont donc pas utilisables.

Les caractéristiques comparées des points de débordement et des stations hydrométriques sont présentées sur la Figure 12. Les superficies des bassins d'alimentation souterrain indiquées sur la figure proviennent d'un calcul réalisé lors de la modélisation des débits de débordement des réservoirs (cf. chapitre 3).

Les ellipses en rouge sur la carte de la Figure 8 permettent d'identifier les 3 couples « point de débordement d'un réservoir minier – station hydrométrique du cours d'eau récepteur » pour lesquels il est possible actuellement de calculer la contribution du débit de débordement au cours d'eau récepteur, c'est-à-dire lorsqu'il existe une station hydrométrique fiable, disposant d'une longue série de mesures de débit de cours d'eau, située à l'aval d'un point de débordement modélisé, permettant la comparaison des débits (cf. § 4.5).

Caractéristiques des points de débordement et des stations hydrologiques			
Nom du point de débordement	Réservoir SUD - Galerie du chenal de Moyeuve	Réservoir CENTRE - Galerie du Woigot à Mancieulles	Réservoir NORD - Galerie de la Paix à Knutange
Altitude du seuil de débordement (m)	168,91	222,74	207,57
Superficie des travaux miniers (km ²)	137	126	97
Superficie du bassin d'alimentation souterrain calculé par modélisation (km ²)	257	76	131
Nom de la station hydrologique	Orne à Rosselange	Woigot à Briey	Fensch à Knutange
Altitude de la station hydrologique (m)	164	204	200
Superficie du bassin versant (km ²)	1226	76	29

Figure 12 – Caractéristiques comparées des points de débordement des réservoirs miniers et des stations hydrologiques utilisées pour le calcul du pourcentage de contribution.

3. Construction d'un modèle hydrologique global de chaque réservoir minier

3.1. PRINCIPE D'UNE MODELISATION HYDROLOGIQUE GLOBALE AVEC LE LOGICIEL GARDÉNIA DU BRGM

Le code de calcul GARDÉNIA (modèle Global A Réservoirs pour la simulation des DÉbits et des Niveaux Aquifères) (Thiéry, 2014) est un modèle hydroclimatique global à réservoirs pour la simulation de l'hydrologie des bassins versants. Le code GARDÉNIA du BRGM est téléchargeable avec sa documentation associée sur le site internet gardenia.brgm.fr/.

À partir de chroniques de données météorologiques (précipitation, évapotranspiration potentielle, neige, température) mesurées sur un bassin versant, GARDÉNIA permet de calculer :

- le débit à l'exutoire d'un cours d'eau (ou celui d'une source) ;
- le niveau piézométrique en un point de la nappe libre sous-jacente.

Les effets d'un pompage, ou d'un ensemble de pompages, situés dans le bassin versant peuvent être pris en compte.

GARDÉNIA est un modèle hydrologique global à réservoirs. Il simule, par des lois physiques simplifiées (Thiéry, 2015a), les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (

Figure 13) : pluie, ruissellement, évapotranspiration, infiltration, écoulement souterrain.

Ces lois physiques simplifiées correspondent à un écoulement à travers une succession de réservoirs (Figure 15) qui représentent le sol, une zone intermédiaire incluant la zone non saturée, et une zone aquifère. Il est possible de prendre en compte la fonte de la neige.

En raison du caractère global de cette schématisation et de la complexité du système hydrologique réel, les paramètres qui régissent les lois physiques simplifiées, bien qu'ayant un sens physique, peuvent difficilement être déduits a priori des caractéristiques physiographiques ponctuelles du bassin versant (géologie, couverture végétale, etc.).

Les paramètres doivent donc être déterminés en recherchant le meilleur ajustement des sorties du modèle sur une ou deux séries d'observations : le débit à l'exutoire du bassin versant (cours d'eau ou source) et/ou un niveau représentatif de l'évolution de la nappe d'eau souterraine dans le bassin versant. Cette recherche des paramètres du modèle s'appelle la calibration du modèle, elle peut être réalisée de manière semi-automatique par le code GARDÉNIA.

Un modèle GARDÉNIA, une fois calibré, peut être utilisé pour réaliser une simulation, qui consiste à calculer la chronique de débits d'une rivière ou d'une source et / ou la chronique de niveaux piézométriques en un point de la nappe associée, en fournissant uniquement au modèle les chroniques de données météorologiques pour la période qui nous intéresse : il est alors possible de reconstituer des débits et/ou niveaux passés, ou de prévoir des débits et/ou niveaux futurs.

Après différents essais, le schéma GARDÉNIA retenu pour modéliser les réservoirs ennoyés est présenté sur la Figure 16 : c'est un schéma à 2 réservoirs souterrains permettant de représenter les écoulements lents et rapides qui se produisent dans le milieu souterrain.

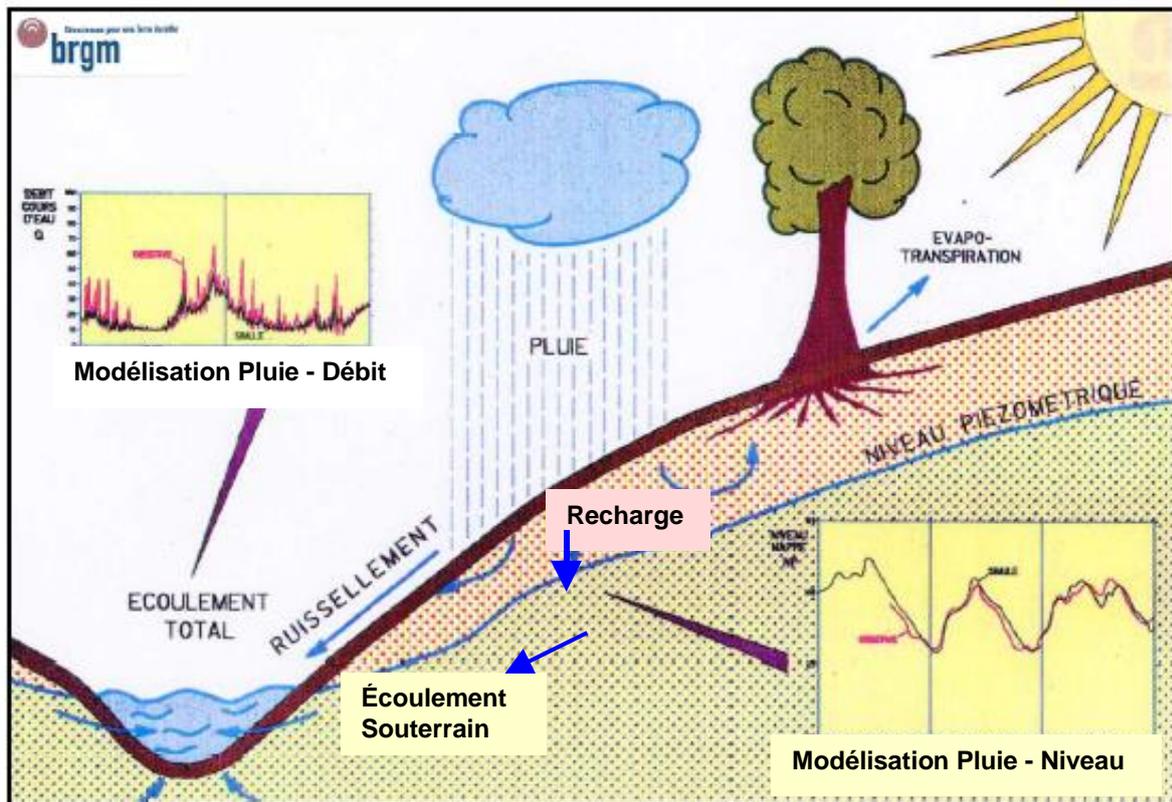


Figure 13 – Conceptualisation d'un bassin versant hydrologique avec le logiciel GARDENIA du BRGM.

3.2. DONNEES UTILISEES POUR LA CONSTRUCTION DES MODELES

Les données utilisées pour la construction des modèles de débit et de niveau piézométrique des 3 réservoirs Sud, Centre et Nord sont les suivantes :

- **Chroniques des données météorologiques** SAFRAN de Météo-France (pluie, neige, évapotranspiration potentielle, température) au pas de temps journalier pour les 9 mailles SAFRAN de 8 x 8 km qui couvrent les travaux miniers du bassin ferrifère lorrain : ces données ont été fournies par le BRGM ;
- **Chroniques des débits de prélèvements pompés** dans chaque réservoir pour le soutien d'étiage ou l'alimentation en eau potable ou industrielle depuis le premier débordement jusqu'à fin 2020, au pas de temps le plus fin disponible (journalier si disponible, à défaut mensuel ou annuel) ; ces données ont été fournies, sur la demande du Syndicat Mixte Moselle Aval, par les organismes concernés : syndicats de production d'eau potable, communes, industriels (cf. tableau de la Figure 14) ;
- **Chroniques des débits de débordement des réservoirs miniers** mesurés dans le cadre de l'observatoire des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain ; ces données ont été fournies par le BRGM (cf. les courbes en bleu de la Figure 20 à la Figure 22) ;
- **Chroniques des niveaux piézométriques des réservoirs miniers** mesurés dans le cadre de l'observatoire des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain ; ces données ont été fournies par le BRGM (cf. les courbes en bleu de la Figure 20 à la Figure 22).

EXPLOITANT	TYPE DONNEE FOURNIE	FREQUENCE	PERIODE	EXPLOITATION	BASSIN	COMMUNE	INDICE BSS	INDICE BFL	NOM	ARRET
ArcelorMittal Atlantique et Lorraine	Débit	mensuel	2008 - 2020	AEI	Nord	FONTOY	01137X0170	N8	Puits Havange Brune	
Commune de Rumelange (Luxembourg)	Consommation électrique	mensuel	2010 - 2020	Soutien étiage	Nord	OTTANGE	01133X0046	N23	Puits Ottange II	
Commune de Audun le Tiche	Débit	journalier	2009 - 2020	AEP	Nord	AUDUN-LE-TICHE	01133X0074	N24	Puits Saint-Michel	
Commune de Thionville	Débit	journalier	2009 - 2020	Soutien étiage	Nord	ENTRANGE	01141X0024	N19	Galerie Charles-Ferdinand)	
Syndicat mixte de production d'eau Fensch Lorraine	-			AEP	Nord	AUMETZ	01133X0095	N22	Puits François (3 For.)	
	-				Centre	FONTOY	01137X0157	C2	For. Route Blanche	2004
Syndicat Intercommunal du contrat de rivière WOIGOT	Débit	journalier	2002 - 2017	Soutien étiage	Centre	TUCQUEGNIEX	01372X0196	C17	Puits Tucquegnieux I	2013
	Débit				Centre	TUCQUEGNIEX	01136X0148	C14	Puits Anderny II	2017
Syndicat Intercommunal des Eaux Gravelotte et Vallée Orne S.I.E.G.V.O	Débit	journalier	1999 - 2020	AEP	Sud	MOYEUVE-GRANDE	01374X0176	S6	Gal. Saint-Paul	2004
					Sud	RONCOURT	01378X0121	S23	Puits Roncourt I	2004
	Débit				Sud	AUBOUÉ	01377X0099	S19	Puits I Auboué	2005
					Sud	MOINEVILLE	01377X0210	S2	For. Valleroy-Moineville 1	
					Sud	MOINEVILLE	01377X0221	S3	For. Valleroy-Moineville 2	
Syndicat Intercommunal des eaux du Soiron	Débit	annuel	2000 - 2019	AEP	Sud	MOINEVILLE	01377X0213	S22	Puits Paradis V	
Commune de Jarny (SIAJ)	-			AEP + soutien étiage	Sud	JARNY	01376X0148	S20	Puits Droitaumont II	2004
Commune de Moyeuve-Grande	Débit	annuel	2007 - 2019	AEP	Sud	MOYEUVE-PETITE	01373X0129	S21	Puits Moyeuve-Petite	

Figure 14 – Liste des points de prélèvement et des exploitants contactés.

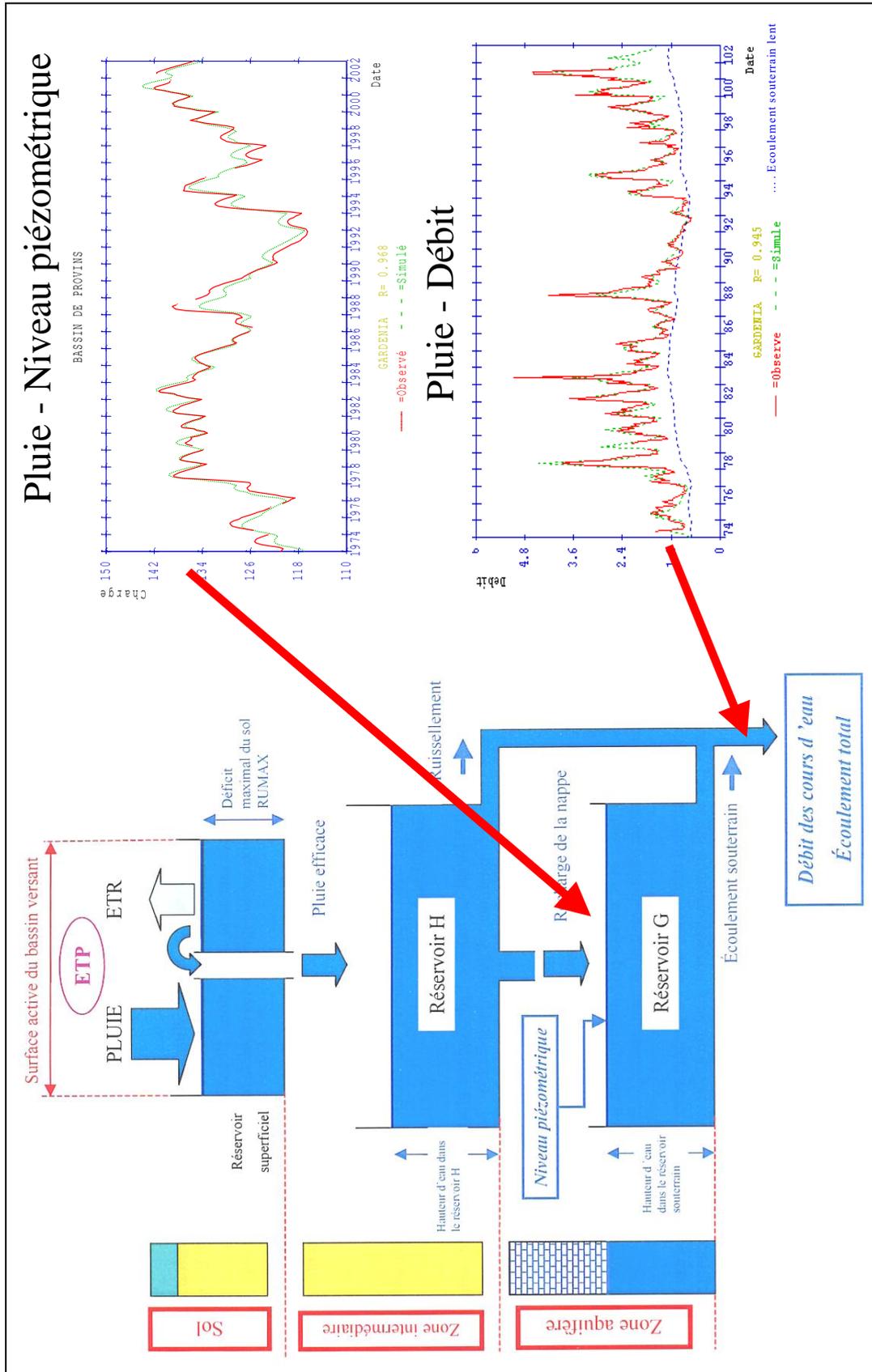


Figure 15 – Schéma d'un modèle hydrologique global avec le logiciel GARDENIA du BRGM.

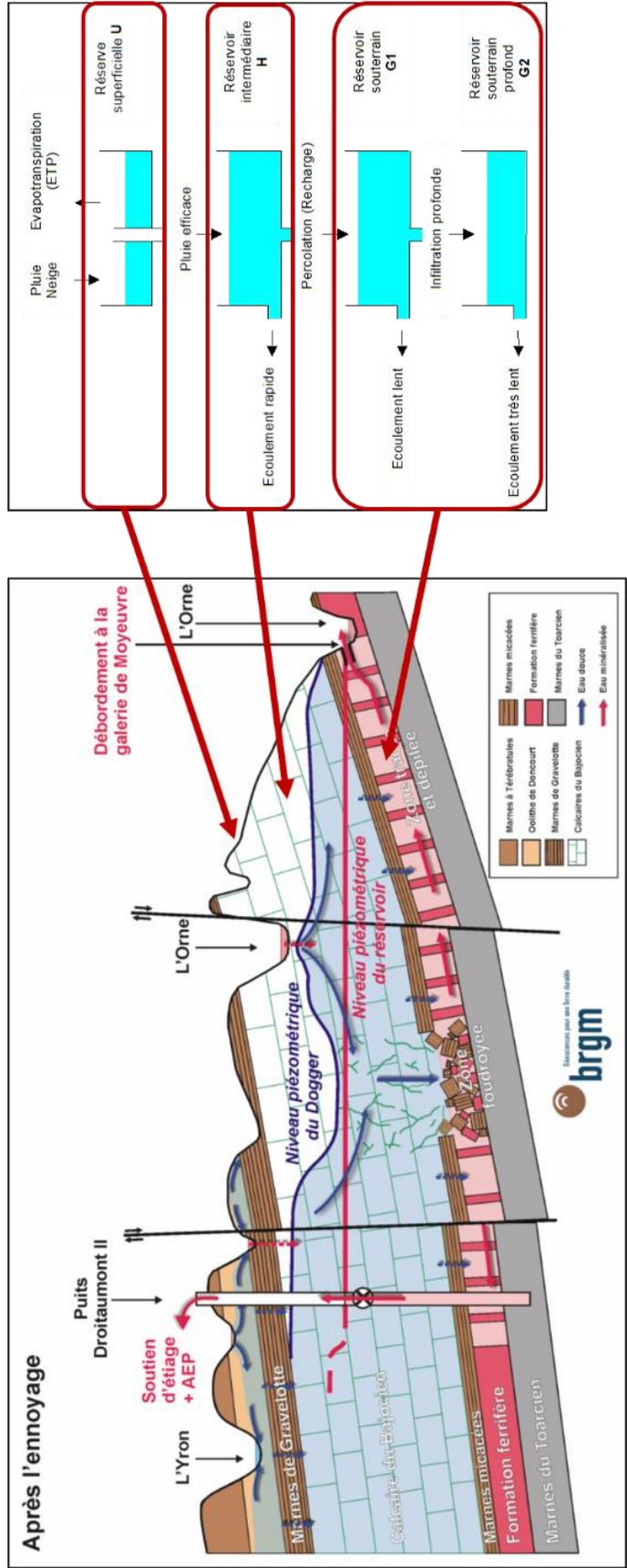


Figure 16 – Schéma de modèle hydrologique global GARDENIA retenu pour la modélisation.

Les tableaux de la Figure 17 à la Figure 19 présentent les principales statistiques sur les données utilisées pour la calibration des modèles GARDÉNIA (colonnes colorées dans les tableaux), ainsi que les informations relatives aux points de mesure le cas échéant.

Le réservoir Sud présente une particularité : son niveau piézométrique est influencé par la fermeture périodique des vannes du point de débordement (cf. 2.5.1). Il est donc nécessaire de supprimer de la chronique de niveau les valeurs influencées en appliquant un filtre basé sur une corrélation avec la chronique de niveau du réservoir Nord qui est non influencée. On peut ensuite recalculer le débit de débordement du réservoir Sud à l'aide de la courbe de tarage construite à l'aide de jaugeages ponctuels réalisés hors des périodes de fermeture des vannes. Ces chroniques transformées sont utilisées par le modèle du réservoir Sud.

3.3. RESULTATS DE LA CALIBRATION

Les 3 modèles GARDÉNIA des réservoirs Sud, Centre et Nord ont été calibrés sur la période 18/11/2008 – 22/10/2019, commençant après le premier étiage qui a suivi la fin de l'ennoyage du réservoir Nord (mars 2008). Cette période de 11 ans est suffisamment longue pour obtenir des modèles robustes.

Les résultats des calibrations des débits de débordement et des niveaux piézométriques des réservoirs sont présentés sur les graphiques de la Figure 20 (réservoir Sud), Figure 21 (réservoir Centre), Figure 22 (réservoir Nord). Sur chaque graphique, la chronique observée est tracée en bleu et la chronique calculée par le modèle est tracée en rouge.

On constate un bon ajustement des chroniques calculées par chaque modèle, le coefficient de Nash variant entre 0,93 et 0,95 pour le réservoir Sud, et entre 0,82 et 0,86 pour les réservoirs Centre et Nord (le coefficient de Nash est un indicateur de la proximité des courbes calculées et observées, le meilleur ajustement possible est obtenu lorsque le coefficient est égal à 1).

Les 3 modèles de débit de débordement des réservoirs Sud, Centre et Nord peuvent être utilisés pour réaliser des simulations selon différents scénarios des données d'entrées des modèles : données météorologiques et données de prélèvements.

Statistiques sur les données du réservoir SUD				
Donnée	Total débits débordement	Total débits prélèvement en zone ennoyée	Niveau piézométrique filtré	Niveau piézométrique
Type de la donnée dans le modèle GARDENIA	Débit	Pompage	Niveau	-
Unité	m3/s	m3/s	m NGF	m NGF
Nom du point de mesure	Gal. du chenal de Moyeuivre	-	Puits Auboué I	Puits Auboué I
Code BSS	01374X0273	-	01377X0099	01377X0099
Numéro	S4	-	S19	S19
Minimum	0,5	0	169,2	169,2
Maximum	5,77	0,3	170,51	171,9
Moyenne	1,84	0,17	169,54	169,57
Amplitude	5,27	0,3	1,31	2,7

Figure 17 – Statistiques sur les données relatives au réservoir minier Sud sur la période de calibration des modèles (18/11/2008 – 22/10/2019).

Statistiques sur les données du réservoir NORD			
Donnée	Débit débordement principal	Débit débordement secondaire	Niveau piézométrique
Type de la donnée dans le modèle GARDENIA	Débit	Pompage	Niveau
Unité	m3/s	m3/s	m NGF
Nom du point de mesure	Gal. des eaux de Knutange (La Paix)	Gal. de Metzange (Charles)	Puits Cheminée Sud Grise
Code BSS	01138X0184	01138X0147	01137X0175
Numéro	N14bis	N18	N5
Minimum	0,3	0,1	208
Maximum	3,72	0,13	209,22
Moyenne	0,84	0,13	208,24
Amplitude	3,42	0,03	1,22

Figure 18 – Statistiques sur les données relatives au réservoir minier Nord sur la période de calibration des modèles (18/11/2008 – 22/10/2019).

Statistiques sur les données du réservoir CENTRE							
Donnée	Total débits débordement	Débit débordement principal	Débit débordement secondaire	Total débits prélèvements + fuites Chevillon	Total débits prélèvement en zone ennoyée	Débit fuites dans le Chevillon	Niveau piézométrique
Type de la donnée dans le modèle GARDENIA	Débit	-	-	Pompage	-	-	Niveau
Unité	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m NGF
Nom du point de mesure	Gal. Woigot + Bois d'Avril	Gal. du Woigot	Gal. de Bois d'Avril	-	-	Pz. Chevillon artésien	Puits Saint-Pierremont II
Code BSS		01372X0197	01373X0134	-	-	01373X0158	01372X0198
Numéro	C5 + C3	C5	C3	-	-	C8	C16
Minimum	0	0	0	0,1	0	0,1	221,8
Maximum	1,17	1,02	0,63	0,26	0,17	0,11	223,52
Moyenne	0,29	0,27	0,02	0,14	0,04	0,1	223,17
Amplitude	1,17	1,02	0,63	0,16	0,17	0,01	1,72

Figure 19 – Statistiques sur les données relatives au réservoir minier Centre sur la période de calibration des modèles (18/11/2008 – 22/10/2019).

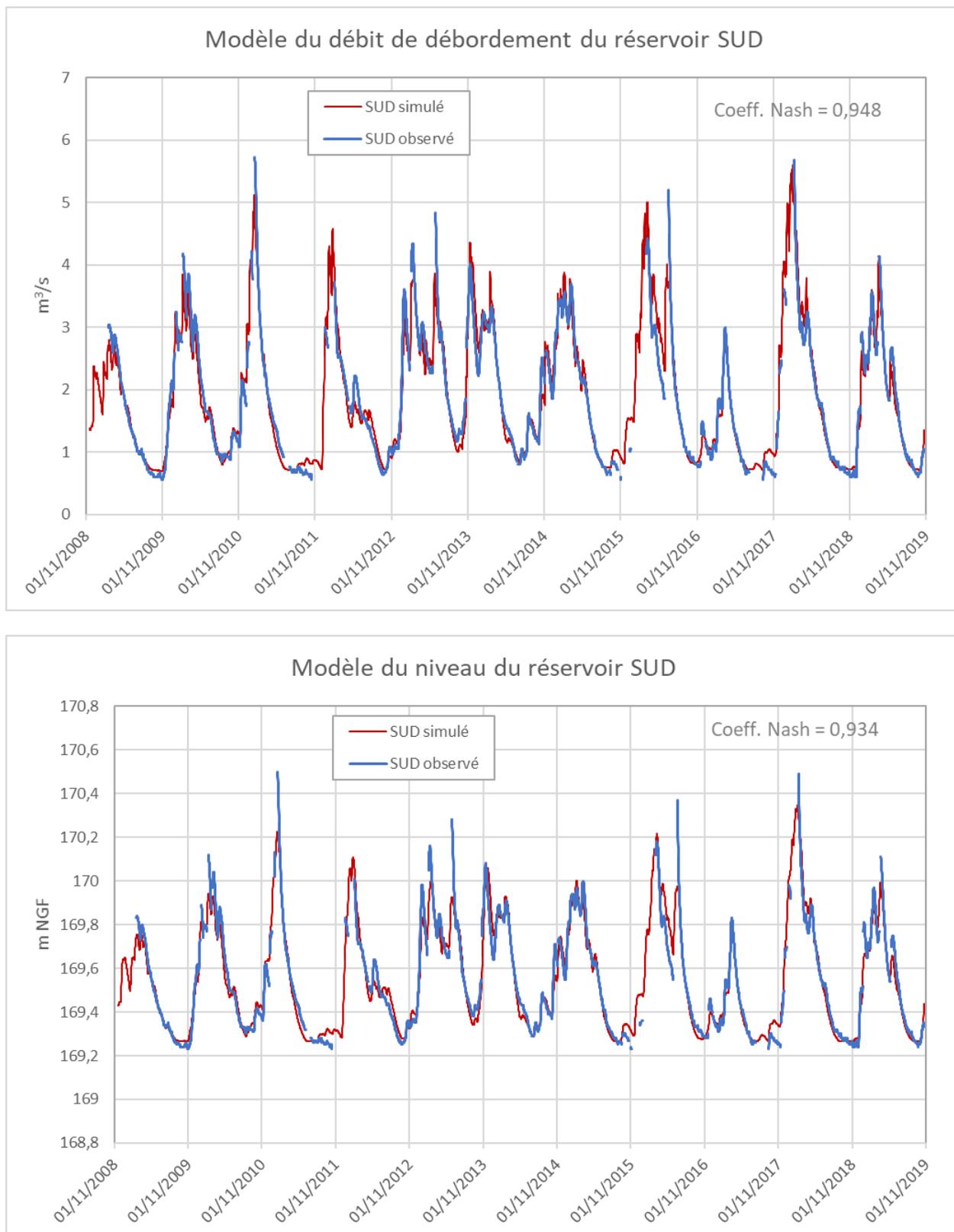


Figure 20 – Résultats de la calibration du débit de débordement et du niveau piézométrique du réservoir Sud sur la période 18/11/2008 – 22/10/2019.

Contribution des débordements des réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain au débit des cours d'eau en période de crue

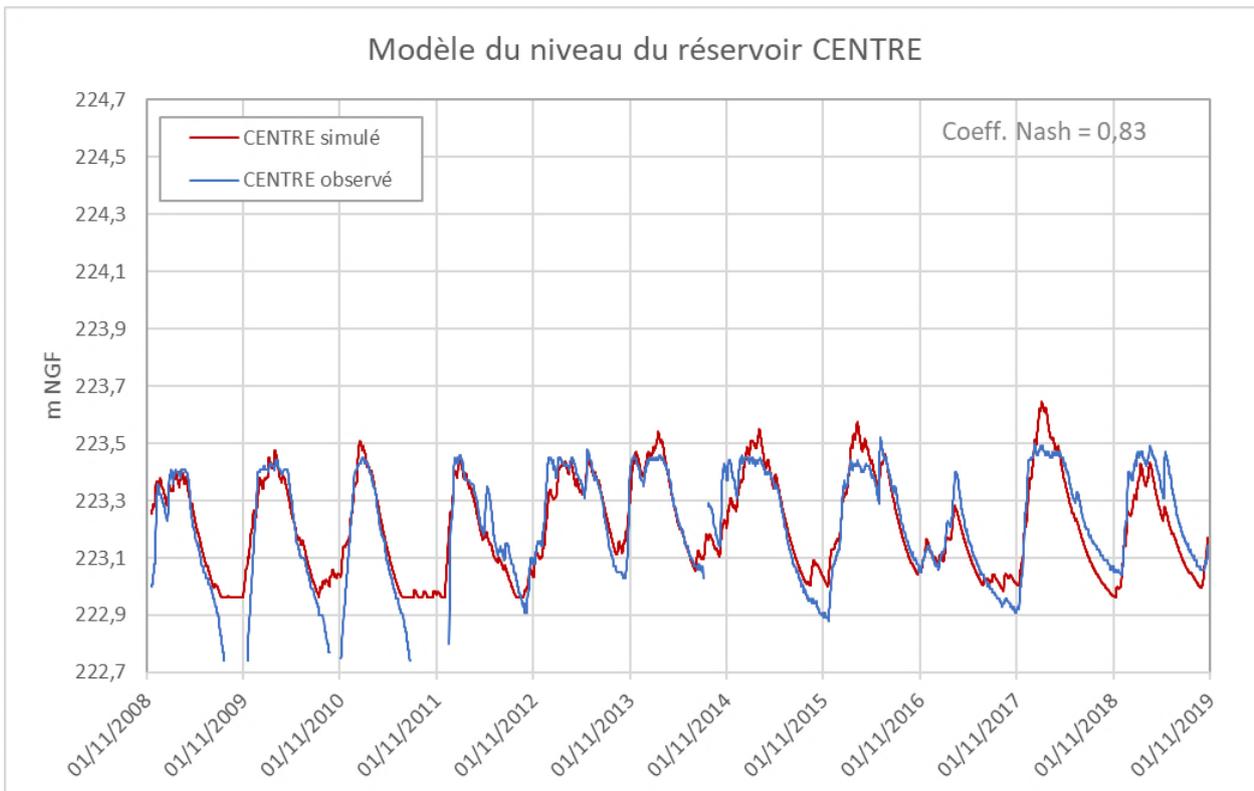
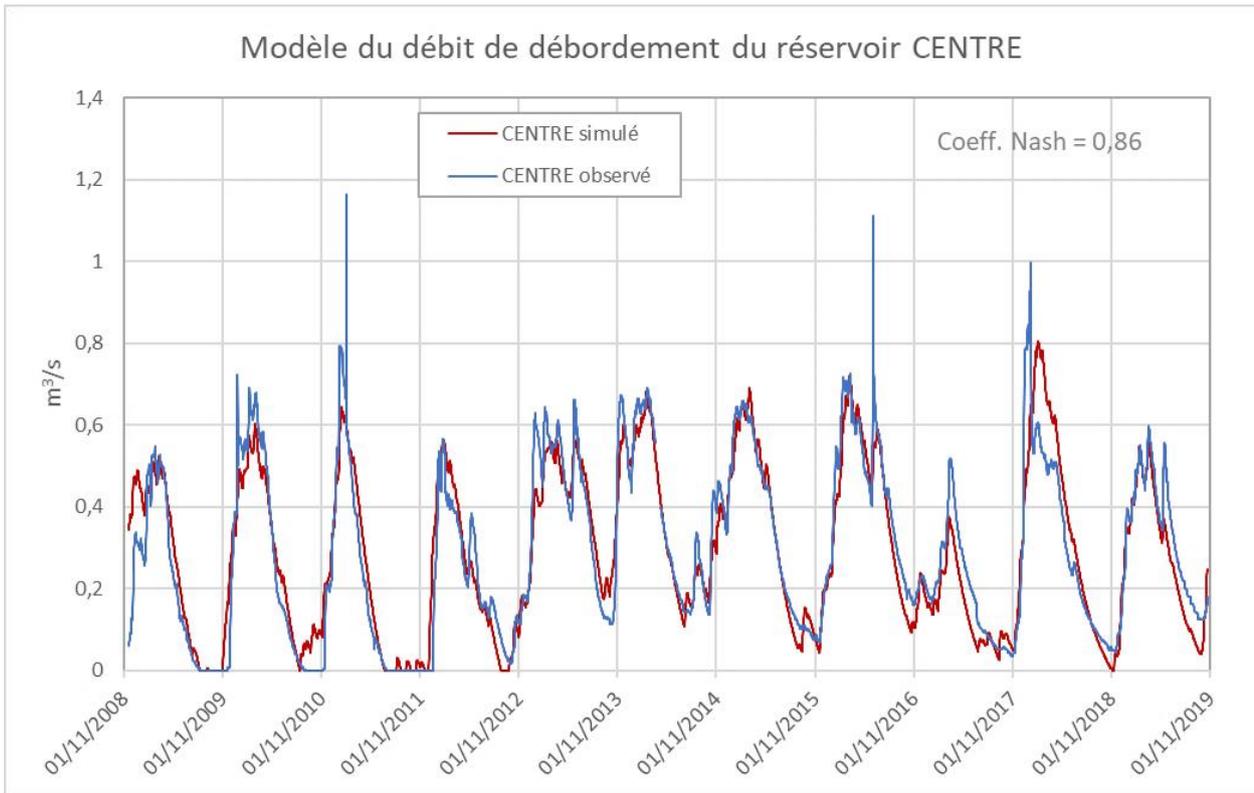


Figure 21 – Résultats de la calibration du débit de débordement et du niveau piézométrique du réservoir Centre sur la période 18/11/2008 – 22/10/2019.

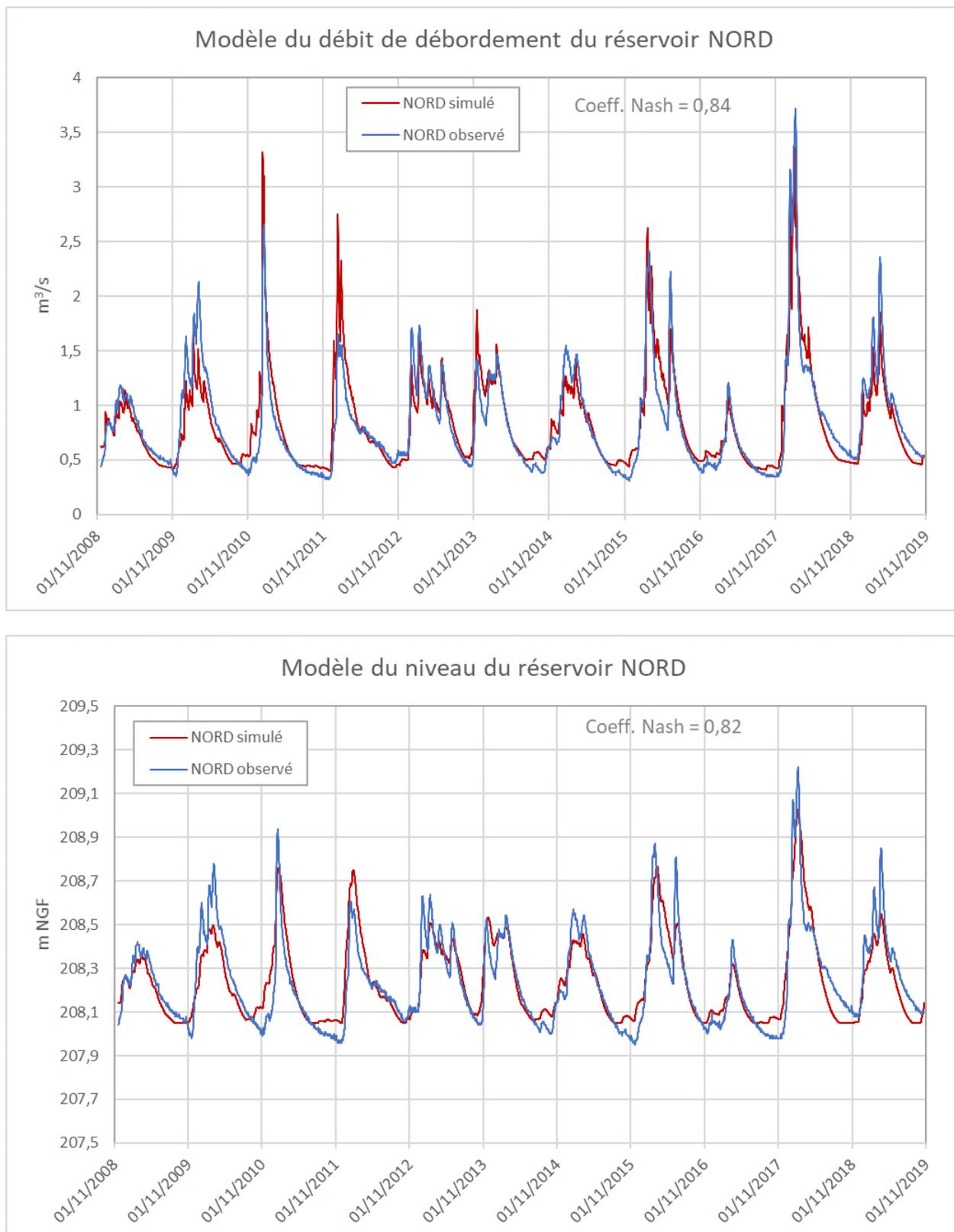


Figure 22 – Résultats de la calibration du débit de débordement et du niveau piézométrique du réservoir Nord sur la période 18/11/2008 – 22/10/2019.

4. Calcul de la contribution des débordements des réservoirs miniers au débit des cours d'eau

4.1. METHODOLOGIE

La méthodologie retenue découle :

- de la disponibilité de longues séries de données permettant de faire des ajustements statistiques de bonne qualité : 60 ans de données météorologiques observées 1960-2019 (données SAFRAN de Météo-France), et 60 ans de données simulées avec changement climatique (projections climatiques mises à disposition sur www.drias-climat.fr);
- du souhait de faire converger les résultats de l'étude et ceux de l'étude hydrologique globale du bassin versant de la Moselle française, portée par la Région Grand Est.

Elle comporte 4 étapes :

- **définition de 3 scénarios combinant l'évolution future des données météorologiques et l'évolution future des pompages ;**
- **simulation de ces 3 scénarios à l'aide des modèles des 3 réservoirs Sud, Centre et Nord** (donc 9 simulations à réaliser) : on obtient pour chaque réservoir les débits de débordement correspondant aux 3 scénarios ;
- **ajustement d'une loi de probabilité continue** pour chaque série simulée et **calcul des débits caractéristiques de débordement** de périodes de retour 2, 5, 10, 30, 50, 100 ans pour chaque scénario et chaque réservoir ;
- **calcul du pourcentage de contribution** par comparaison des débits caractéristiques de débordement à ceux des cours d'eau calculés par l'étude de la Région Grand Est.

Nota bene : la pointe de crue d'un débordement se produit toujours après la pointe de crue dans un cours d'eau, à cause du temps nécessaire à l'infiltration de l'eau depuis la surface du sol (jusqu'à plusieurs jours de décalage pour un événement isolé). **Ce décalage temporel ne peut pas être pris en compte** car les données nécessaires à ce type de calcul ne sont pas disponibles : **les pourcentages de contribution des débordements calculés seront donc majorés du fait de cette simplification.**

4.2. ETAPE 1 : DEFINITION DES SCENARIOS

4.2.1. Simulation 1 : scénario sans changement (situation actuelle)

Ce scénario considère en entrée de chaque modèle :

- les données météorologiques observées dans le passé sur 60 ans (1960-2019), cette période incluant la période de calibration des modèles 2008-2019 ;
- la valeur minimale du total des prélèvements observée sur les 11 dernières années (2008-2019) pour chacun des réservoirs.

Ce scénario n'est ni majorant ni minorant sur le calcul du pourcentage de contribution, car les prélèvements sont minimaux l'hiver, donc le choix de telles chroniques simplifiées des prélèvements a très peu d'impact sur le calcul.

4.2.2. Simulation 2 : scénario avec changement climatique

Ce scénario considère en entrée de chaque modèle :

- les données météorologiques simulées sur 60 ans (2020-2079) du scénario de changement climatique DRIAS : scénario médian d'émission de CO₂ – RCP 4.5 (et modèle climatique régional WRF381P de l'IPSL, pour en savoir plus, se référer à www.drias-climat.fr);
- la valeur minimale du total des prélèvements observée sur les 11 dernières années (2008-2019) pour chacun des réservoirs.

Ce scénario est majorant sur le calcul du pourcentage de contribution car le changement climatique augmente la fréquence et l'intensité des événements extrêmes.

4.2.3. Simulation 3 : scénario avec changement climatique et aucun prélèvement

Ce scénario considère en entrée de chaque modèle :

- les données météorologiques simulées sur 60 ans (2020-2079) du scénario de changement climatique DRIAS : scénario médian d'émission de CO₂ – RCP 4.5 (et modèle climatique régional WRF381P de l'IPSL, pour en savoir plus, se référer à www.drias-climat.fr);
- aucun prélèvement : ni pompage, ni fuites (dans le cas du réservoir Centre), ni soutien d'étiage gravitaire (dans le cas du réservoir Nord).

Ce scénario est majorant sur le calcul du pourcentage de contribution car le changement climatique augmente la fréquence et l'intensité des événements extrêmes, et l'annulation de tous les prélèvements augmente d'autant le débit en période de crue.

4.3. ETAPE 2 : SIMULATION DES 3 SCENARIOS POUR CHACUN DES 3 RESERVOIRS MINIERS

Cette étape consiste à réaliser 9 simulations au total, correspondant aux 3 scénarios définis plus haut, pour chacun des 3 réservoirs Sud, Centre et Nord.

On obtient ainsi donc 9 séries de débits simulés sur 60 ans (cf. un exemple de série simulée sur la Figure 23), correspondant à des données météorologiques connues (situation actuelle) ou futures (changement climatique avec ou sans prélèvements).

On recherche ensuite pour chacune des 9 séries de débit simulé sur 60 ans les maximas annuels, pour en modéliser la distribution statistique (cf. les points rouges sur la simulation montrée en exemple sur la Figure 23).

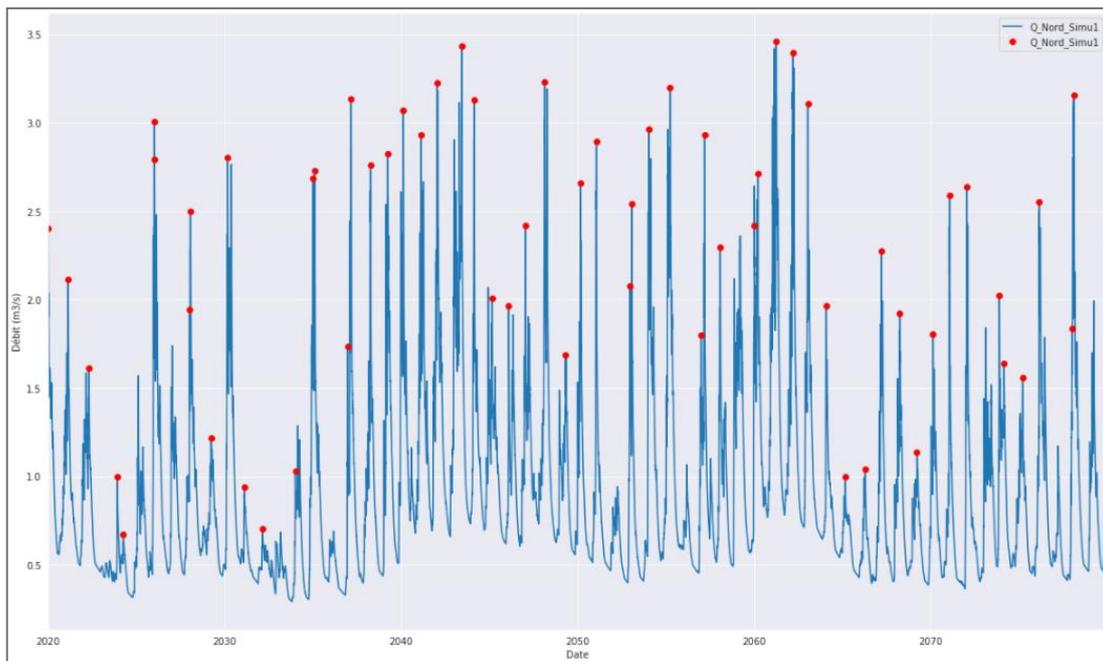


Figure 23 – Identification des maxima annuels (points rouges) sur une série de débits simulés : exemple de la simulation n°1 du réservoir Nord.

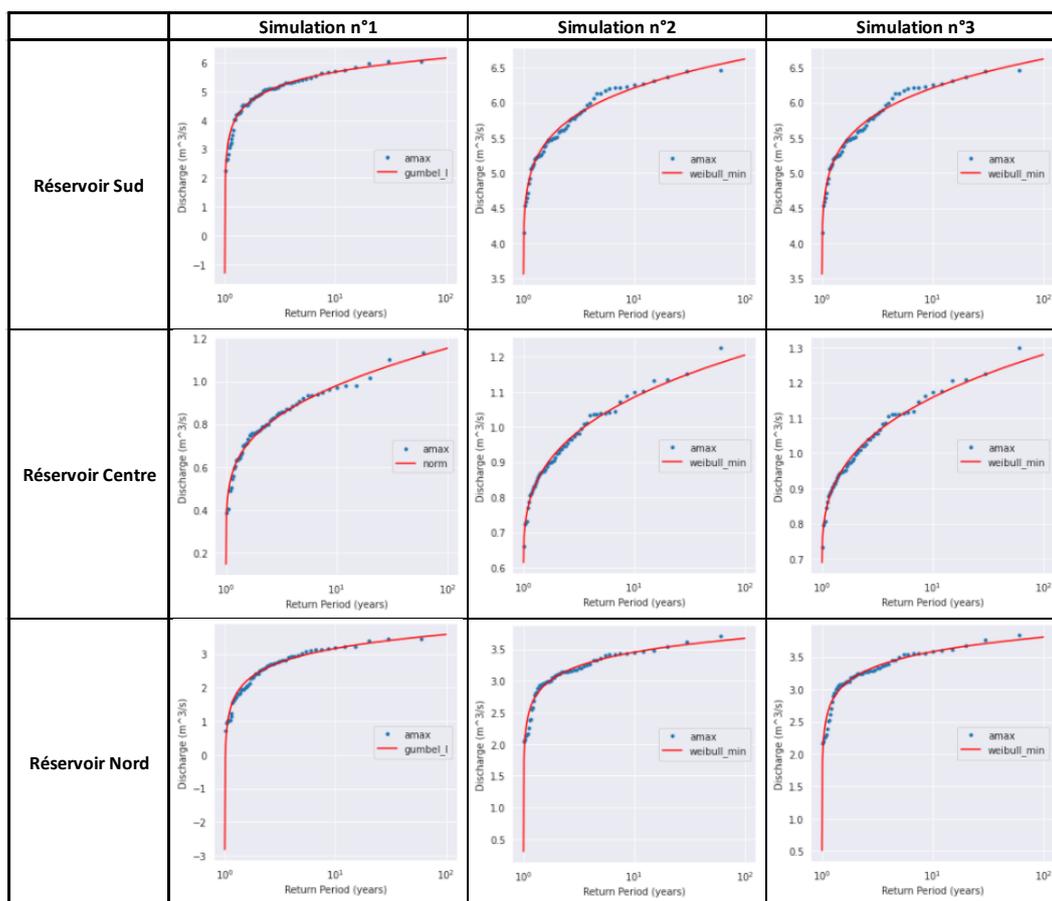


Figure 24 – Ajustement d'une loi de probabilité continue pour chacune des 9 séries de débits maximums annuels issues des 9 simulations réalisées avec GARDENIA.

Contribution des débordements des réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain au débit des cours d'eau en période de crue

Débits caractéristiques de débordement des réservoirs miniers									
	Simulation n°1 : situation actuelle avec prélèvements minimums			Simulation n°2 : changement climatique avec prélèvements minimums			Simulation n°3: changement climatique sans pompages, ni fuite, ni soutien d'étiage gravitaire		
Période de retour	Réservoir SUD	Réservoir CENTRE	Réservoir NORD	Réservoir SUD	Réservoir CENTRE	Réservoir NORD	Réservoir SUD	Réservoir CENTRE	Réservoir NORD
Années	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
2	4,81	0,76	2,42	5,61	0,93	3,06	5,61	1	3,18
5	5,42	0,91	2,94	6,02	1,03	3,33	6,02	1,1	3,46
10	5,67	0,98	3,16	6,21	1,08	3,45	6,21	1,16	3,58
30	5,95	1,08	3,4	6,41	1,15	3,58	6,41	1,22	3,71
50	6,06	1,12	3,48	6,49	1,17	3,63	6,49	1,25	3,76
100	6,17	1,16	3,58	6,58	1,2	3,68	6,58	1,28	3,81

Débits caractéristiques aux stations hydrologiques					
Période de retour	Yron à Jarny (AGREGEE)	Orne à Boncourt (AGREGEE)	Orne à Rosselange (AGREGEE)	Woigot à Briey (AGREGEE)	Fensch à Knutange (GRADEX)
Années	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
2	76	55	153	17	4
5	107	75	208	24	5
10	129	89	250	29	6
30	165	115	318	38	9
50	183	131	359	42	10
100	210	154	419	49	12

Stations inutilisées car situées à l'amont des points de débordement

Contribution des débordements des réservoirs miniers aux débits des cours d'eau									
	Simulation n°1 : situation actuelle avec prélèvements minimums			Simulation n°2 : changement climatique avec prélèvements minimums			Simulation n°3: changement climatique sans pompages, ni fuite, ni soutien d'étiage gravitaire		
Période de retour	Orne à Rosselange (AGREGEE)	Woigot à Briey (AGREGEE)	Fensch à Knutange (GRADEX)	Orne à Rosselange (AGREGEE)	Woigot à Briey (AGREGEE)	Fensch à Knutange (GRADEX)	Orne à Rosselange (AGREGEE)	Woigot à Briey (AGREGEE)	Fensch à Knutange (GRADEX)
Années	%	%	%	%	%	%	%	%	%
2	3,1	4,5	60,5	3,7	5,5	76,5	3,7	5,9	79,5
5	2,6	3,8	58,8	2,9	4,3	66,6	2,9	4,6	69,2
10	2,3	3,4	52,7	2,5	3,7	57,5	2,5	4	59,7
30	1,9	2,8	37,8	2	3	39,8	2	3,2	41,2
50	1,7	2,7	34,8	1,8	2,8	36,3	1,8	3	37,6
100	1,5	2,4	29,8	1,6	2,4	30,7	1,6	2,6	31,8

Figure 25 – Calcul de la contribution des débordements des réservoirs miniers aux débits des cours d'eau (tableau du bas) par comparaison des débits caractéristiques de débordement des réservoirs miniers (tableau du haut, valeurs déduites des lois de probabilité ajustées) aux débits caractéristiques des stations hydrologiques (tableau du milieu, résultats de l'étude de la Région Grand Est).

4.4. ETAPE 3 : AJUSTEMENT D'UNE LOI DE PROBABILITE CONTINUE SUR CHAQUE SERIE DE DEBITS MAXIMUMS ANNUELS SIMULES

Différentes lois de probabilité continue ont été testées, celles permettant le meilleur ajustement ont été retenues. Les lois retenues sont les lois de Gumbel, de Weibull et la loi normale, elles peuvent être différentes pour chaque simulation (Figure 24).

Les lois de probabilité continues ainsi ajustées sur chaque série de débits maximums annuels simulés permettent de calculer les débits caractéristiques de débordement des réservoirs miniers correspondant à une période de retour quelconque. Pour chaque réservoir et chaque simulation, on peut par exemple calculer un débit caractéristique de débordement pour les périodes de retour 2, 5, 10, 30, 50 et 100 ans (cf. le tableau du haut sur la Figure 25).

4.5. ETAPE 4 : CALCUL DE LA CONTRIBUTION DES RESERVOIRS MINIERES

On rappelle que les ellipses en rouge sur la carte de la Figure 8 permettent d'identifier les 3 couples « point de débordement d'un réservoir minier – station hydrométrique du cours d'eau récepteur » pour lesquels il est possible actuellement de calculer la contribution du débit de débordement au cours d'eau récepteur (cf. § 2.5.1).

En effet, les débits caractéristiques de 5 stations hydrométriques du bassin ferrifère ont été recalculés récemment dans le cadre d'une étude du fonctionnement hydrologique global du bassin versant de la Moselle (Région Grand Est, étude en cours). Les 3 stations hydrométriques utilisables pour faire le calcul du pourcentage de contribution sont l'Orne à Rosselange pour le réservoir Sud, le Woigot à Briey pour le réservoir Centre, la Fensch à Knutange pour le réservoir Nord (cf. tableau du milieu sur la Figure 25). Les 2 stations hydrométriques restantes sont situées en amont des points de débordement et ne sont donc pas utilisables.

Les débits caractéristiques de débordement des réservoirs miniers calculés à l'étape précédente peuvent ainsi être comparés aux débits caractéristiques des cours d'eau pour les mêmes périodes de retour, ce qui permet de calculer le pourcentage de contribution pour les mêmes périodes de retour (cf. tableau du bas sur la Figure 25).

L'analyse des résultats, toutes périodes de retour confondues (2 à 100 ans), montre que la contribution des réservoirs miniers aux débits des cours d'eau à l'aval des points de débordement est faible pour l'Orne aval et le Woigot aval, et forte pour la Fensch amont :

- Orne à Rosselange : 1,5 à 3,7 % selon le scénario ;
- Woigot à Briey : 2,4 à 5,9 % selon le scénario ;
- Fensch à Knutange : 29,8 à 79,5 % selon le scénario.

On rappelle que ce sont des pourcentages majorés du fait des conditions du calcul et des hypothèses prises pour les scénarios (cf. § 4.1 et 4.2). Ils sont aussi majorés car les débits caractéristiques des stations hydrométriques qui servent de base au calcul n'intègrent pas les effets du changement climatique.

On observe que plus la crue est forte, moins la contribution des réservoirs est élevée : 60 à 80 % environ de contribution pour la Fensch en crue moyenne (période de retour 2 ans), mais 30 % environ en crue centennale (période de retour 100 ans).

Ces résultats ne sont valables que pour les 3 couples « point de débordement – station hydrométrique » pour lesquels le calcul a été possible, en d'autres points de chaque cours d'eau ils ne fournissent qu'un ordre de grandeur. En effet, le pourcentage de contribution dépend des facteurs géométriques suivants, toutes choses égales par ailleurs (cf. tableau de la Figure 7 et carte de la Figure 8) :

- la taille du bassin versant du cours d'eau à l'emplacement de la station hydrométrique : plus il est grand moins le pourcentage de contribution du débordement sera élevé ;
- la distance entre le point de débordement et la station hydrométrique : plus elle est grande moins le pourcentage de contribution du débordement sera élevé ;
- la position du couple « point de débordement – station hydrométrique » dans le bassin versant : plus elle est située en aval dans le bassin versant, moins le pourcentage de contribution sera élevé.

Le pourcentage de contribution pourra être calculé en d'autres points d'un cours d'eau récepteur à chaque fois qu'il sera possible à l'avenir de disposer de débits caractéristiques en ces points.

Nota bene : le pourcentage de contribution du débordement du réservoir Nord au débit de la Fensch avait été évalué en 2004 à 13 à 22 % dans un rapport de la Préfecture de la Région Lorraine. Cette estimation prévisionnelle, qui s'avère optimiste, avait été effectuée avant l'ennoyage du réservoir Nord (début de l'ennoyage en décembre 2005, premier débordement en mars 2008), donc avant l'établissement du nouveau régime hydrologique lié à l'ennoyage.

4.6. SYNTHÈSE DES RESULTATS POUR LES PERIODES DE RETOUR 10, 30 ET 100 ANS ET CARTE DU POURCENTAGE DE CONTRIBUTION

Ce paragraphe s'intéresse aux résultats du calcul de pourcentage de contribution pour les 3 périodes de retour 10, 30 et 100 ans, jugées les plus intéressantes sur la base d'une analyse préliminaire des « premiers dommages conséquents » effectuée par le Syndicat Mixte Moselle Aval : ces premiers dommages conséquents surviendraient lors de crues de « moyennes eaux à premiers dommages conséquents » de périodes de retour d'environ 10 ans pour le Woigot, et 30 ans pour l'Orne et la Fensch.

Le pourcentage de contribution des débits de débordement pour les crues de « **moyennes eaux à premiers dommages conséquents** » de périodes de retour de 10 et 30 ans est de :

- **Réservoir Sud** : 1,9 à 2,5 % du débit de l'Orne à la station hydrométrique de Rosselange ;
- **Réservoir Centre** : 2,8 à 4 % du débit du Woigot à la station hydrométrique de Briey ;
- **Réservoir Nord** : 37,8 à 59,7 % du débit de la Fensch à la station hydrométrique de Knutange.

Le pourcentage de contribution des débits de débordement pour les crues de « **très hautes eaux** » de périodes de retour de 100 ans est de :

- **Réservoir Sud** : 1,5 à 1,6 % du débit de l'Orne à la station hydrométrique de Rosselange ;
- **Réservoir Centre** : 2,4 à 2,6 % du débit du Woigot à la station hydrométrique de Briey ;
- **Réservoir Nord** : 29,8 à 31,8 % du débit de la Fensch à la station hydrométrique de Knutange.

Ces résultats sont résumés et illustrés par les graphiques de la Figure 26 et la carte de la Figure 27.

- **Contribution pour les périodes de retour 10 et 30 ans**
« moyennes eaux à premiers dommages conséquents » :
 - ✓ l'Orne à Rosselange : **1,9 – 2,5 %**
 - ✓ le Woigot à Briey : **2,8 – 4 %**
 - ✓ la Fensch à Knutange : **37,8 – 59,7 %**
- **Contribution pour les périodes de retour 100 ans**
« hautes eaux » et « très hautes eaux » :
 - ✓ l'Orne à Rosselange : **1,5 – 1,6 %**
 - ✓ le Woigot à Briey : **2,4 – 2,6 %**
 - ✓ la Fensch à Knutange : **29,8 – 31,8 %**

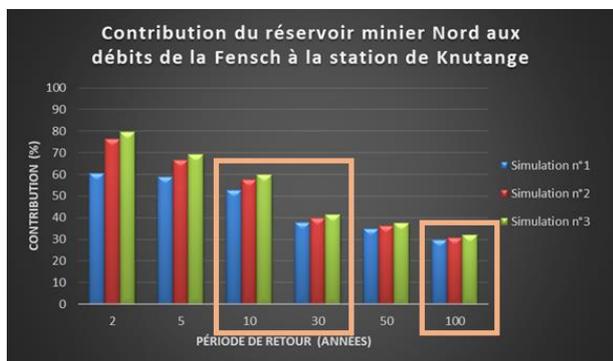
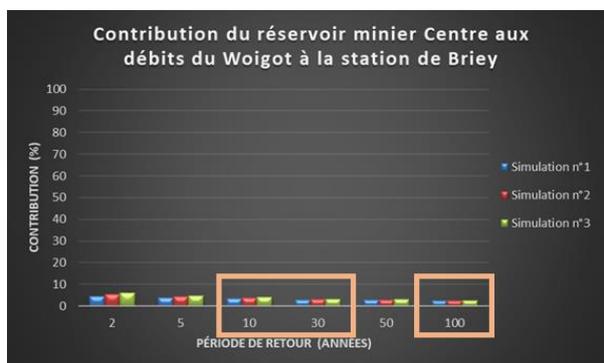
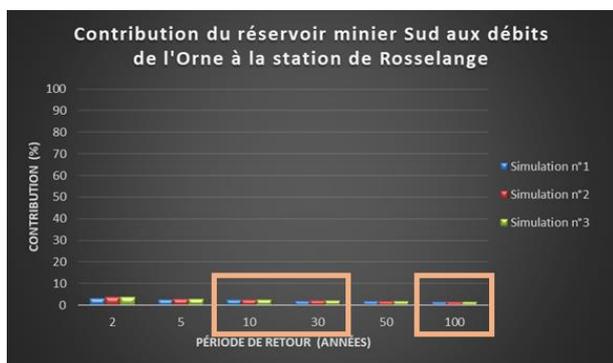
Pour mémoire : contribution évaluée en 2004 à 13 – 22 % du débit de la Fensch (Rapport de la Préfecture de Région Lorraine) → estimation effectuée avant le début du débordement du réservoir Nord en mars 2008.

Contribution des débordements des réservoirs miniers aux débits des cours d'eau : synthèse des 3 simulations			
Période de retour	Orne à Rosselange (AGREGEE)	Woigot à Briey (AGREGEE)	Fensch à Knutange (GRADEX)
	Années	%	%
2	3,1 - 3,7	4,5 - 5,9	60,5 - 79,5
5	2,6 - 2,9	3,8 - 4,6	58,8 - 69,2
10	2,3 - 2,5	3,4 - 4	52,7 - 59,7
30	1,9 - 2	2,8 - 3,2	37,8 - 41,2
50	1,7 - 1,8	2,7 - 3	34,8 - 37,6
100	1,5 - 1,6	2,4 - 2,6	29,8 - 31,8

Périodes de retour intéressantes choisies en copil n°2 :

10 et 30 ans : « moyennes eaux à premiers dommages conséquents »

100 ans : « hautes eaux » et « très hautes eaux »



- Simulation n°1** : scénario sans changement (situation actuelle)
- Simulation n°2** : scénario avec changement climatique
- Simulation n°3** : scénario avec changement climatique et aucun prélèvement

Figure 26 – Synthèse des résultats : contribution des débordements des réservoirs miniers aux débits des cours d'eau pour les périodes de retour 10, 30 et 100 ans.

Carte de la contribution des débits de débordement des réservoirs miniers au débit des cours d'eau en période de crue

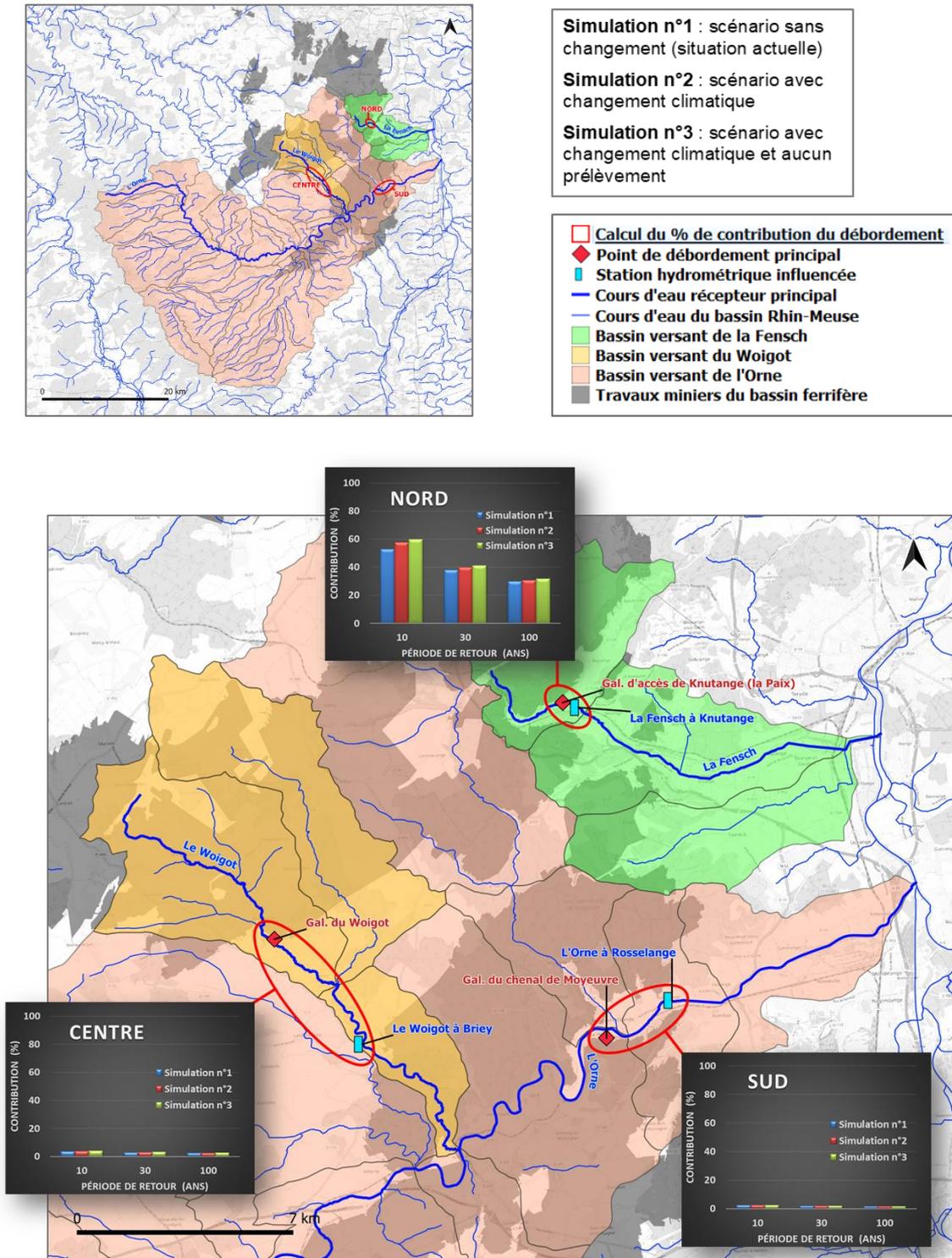


Figure 27 – Carte de la contribution des débits de débordement des réservoirs miniers au débit des cours d'eau en période de crue.

5. Conclusion

L'objectif de l'étude était d'évaluer, en période de crue, la contribution du débordement des réservoirs miniers au débit des cours d'eau du bassin ferrifère en intégrant, d'une part, l'effet des travaux relatifs aux réservoirs miniers (aménagement des points de débordement, arrêt et redémarrage des soutiens d'étiage, pompages) et, d'autre part, en prenant en compte l'effet potentiel à long terme du changement climatique.

Trois modèles hydrologiques globaux à réservoirs ont été construits et calibrés à l'aide du logiciel GARDÉNIA du BRGM. Ces modèles ont été utilisés pour réaliser des simulations de longues chroniques (60 ans) de débit de débordement selon différents scénarios d'évolution future des données météorologiques et des prélèvements dans les réservoirs. L'ajustement de lois de probabilité sur les maximums annuels extraits de ces chroniques de débit simulées a permis de calculer les débits caractéristiques de débordement des réservoirs miniers correspondant à différentes périodes de retour. Ces débits caractéristiques ont ensuite été comparés aux débits caractéristiques de 3 stations hydrométriques situées en aval des points de débordement des réservoirs.

L'analyse des résultats montre que la contribution des réservoirs miniers aux débits des cours d'eau à l'aval des points de débordement est faible pour l'Orne aval et le Woigot aval, et forte pour la Fensch amont.

Le pourcentage de contribution des débits de débordement pour les crues de « moyennes eaux à premiers dommages consécutifs » de périodes de retour de 10 et 30 ans est de :

- Réservoir Sud : 1,9 à 2,5 % du débit de l'Orne à la station hydrométrique de Rosselange ;
- Réservoir Centre : 2,8 à 4 % du débit du Woigot à la station hydrométrique de Briey ;
- Réservoir Nord : 37,8 à 59,7 % du débit de la Fensch à la station hydrométrique de Knutange.

Le pourcentage de contribution des débits de débordement pour les crues de « très hautes eaux » de périodes de retour de 100 ans est de :

- Réservoir Sud : 1,5 à 1,6 % du débit de l'Orne à la station hydrométrique de Rosselange ;
- Réservoir Centre : 2,4 à 2,6 % du débit du Woigot à la station hydrométrique de Briey ;
- Réservoir Nord : 29,8 à 31,8 % du débit de la Fensch à la station hydrométrique de Knutange.

Ces chiffres sont majorés du fait des conditions du calcul et des hypothèses prises pour les scénarios d'évolution future des données météorologiques et des prélèvements. Par ailleurs, ils ne sont valables que pour les 3 couples « point de débordement – station hydrométrique » pour lesquels le calcul a été possible, en d'autres points de chaque cours d'eau ils ne fournissent qu'un ordre de grandeur. Le pourcentage de contribution pourra être calculé en d'autres points d'un cours d'eau récepteur à chaque fois qu'il sera possible à l'avenir de disposer de débits caractéristiques en ces points.

6. Bibliographie

Collon P. (2003) – Evolution de la qualité de l'eau dans les mines abandonnées du bassin ferrifère lorrain, de l'expérimentation en laboratoire à la modélisation in situ. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 203 p., 84 fig., 57 tabl., 5 ann.

GISOS (2009) – Synthèse des travaux de recherche 2008. Rapport GISOS, 113 p., 99 fig.

GISOS (2010) – Synthèse des travaux de recherche 2009. Rapport GISOS, 92 p., 76 fig.

Ollagnier S. (2013) – Optimisation des réseaux de surveillance quantitative et qualitative des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain. Rapport BRGM/RP-60939-FR, 103 p., 41 ill., 3 ann.

Région Grand Est (en cours) – Etude du fonctionnement hydrologique global du bassin versant de la Moselle.

Thiéry D. (2014) – Logiciel GARDÉNIA, version v8.2, Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-62797-FR, 142 p., 76 fig., 2 ann.

Vaute L., Khiat 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., 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, version définitive approuvée par la Commission Locale de l'Eau le 5 mars 2007. Rapport BRGM/RP-55434-FR, 194 p., 96 fig., 15 tabl., 4 ann.

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, 65 p., 41 fig., 6 tabl.

Annexe 1 – Chroniques hors-séries 2014-2015



Chroniques semestrielles hors-série 2014-2015

Mines ennoyées du bassin ferrifère lorrain : du réseau de surveillance... ...au modèle numérique de prévision

Hors-série n°1 : Contexte de la création d'un réseau de surveillance

Hors-série n°2 : Définition d'un modèle conceptuel

Hors-série n°3 : Construction d'un modèle numérique de prévision

BRGM Grand Est – Mise à jour 2017



Chronique hors-série n°1 : introduction

L'arrêt progressif de l'exploitation minière dans le bassin ferrifère à partir des années 1990 a conduit à des 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.

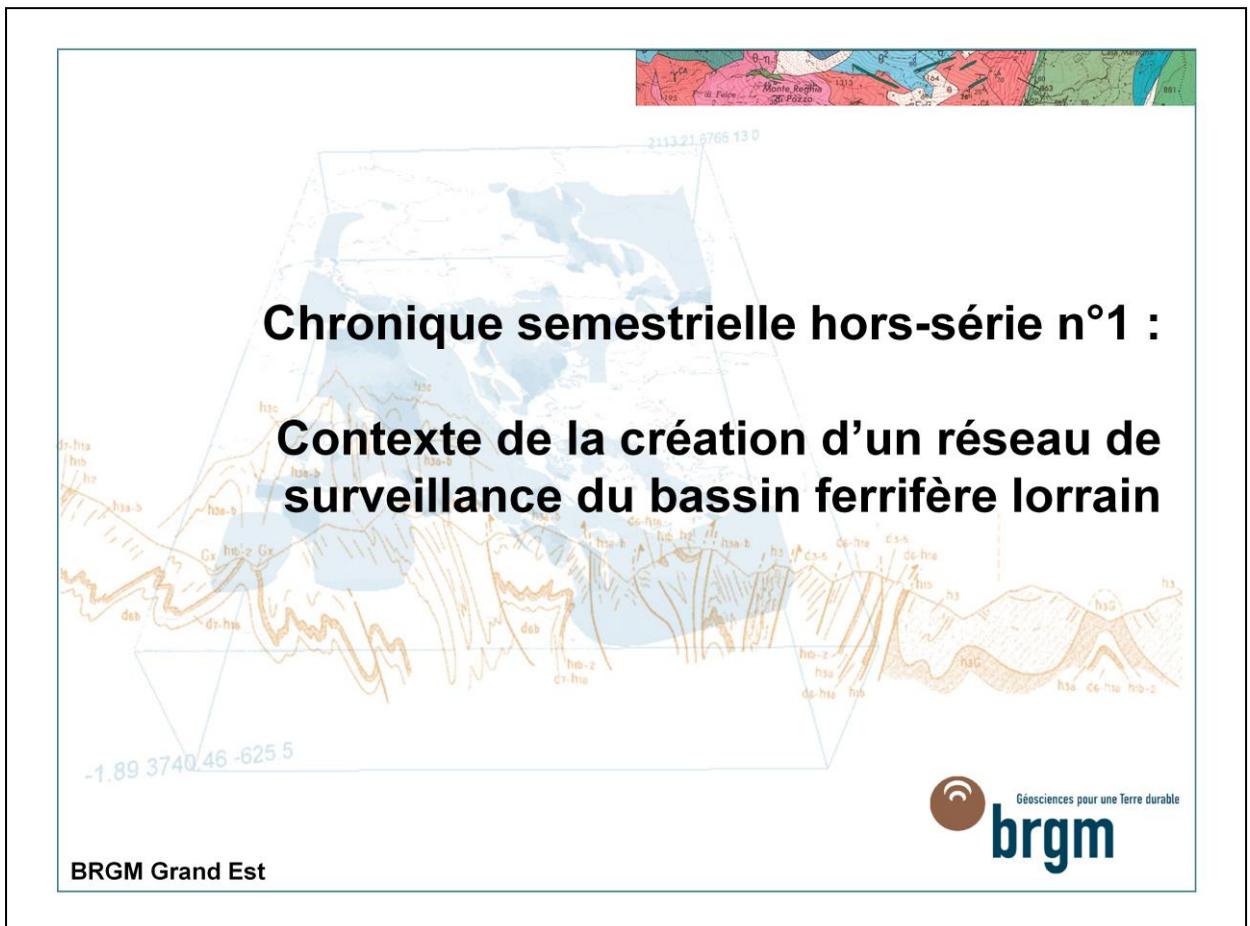
Ce constat a conduit les pouvoirs publics à initier en 2004 l'élaboration d'un SAGE du bassin ferrifère (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux. En 2005, le BRGM a été chargé par le Conseil Régional Lorrain, structure porteuse du SAGE du Bassin Ferrifère, de réaliser les deux premiers documents constitutifs de l'élaboration du SAGE : l'état des lieux et le diagnostic du SAGE du bassin ferrifère. Au terme de plus de 10 ans de travaux menés par la Commission Locale de l'Eau (CLE) du SAGE, ce dernier a été adopté en 2016 : il constitue désormais un fil conducteur pour toutes les actions menées sur le bassin pour la préservation de l'eau et des milieux aquatiques.

En parallèle, à partir de 1995, d'abord en complément puis en substitution de la surveillance prescrite aux anciens exploitants pendant une durée limitée, le BRGM, en partenariat avec l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, le Conseil Régional Lorrain et la

DREAL Lorraine, ont engagé des actions de connaissance et de protection de la ressource. Le BRGM assure depuis cette date la surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain, dans le cadre de ses activités de service public. En 2017, le réseau de surveillance est devenu un observatoire sous maîtrise d'ouvrage du BRGM, cofinancé par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, la Région Grand Est et le BRGM.

Par ailleurs, le BRGM a contribué aux travaux de recherche du GISOS, Groupement d'intérêt scientifique de recherche sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains, qui a eu pour objectifs entre 1999 et 2015 d'anticiper et de contribuer à résoudre les problèmes posés dans le cadre de l'après-mine en France. Les travaux menés par le BRGM dans le cadre du GISOS ont contribué au développement d'un modèle numérique de prévision.

Cette chronique hors-série n°1 présente le bassin ferrifère et le contexte de la création de son réseau de surveillance, dont les résultats ont permis la définition d'un modèle conceptuel de structure et de fonctionnement des réservoirs ennoyés (hors-série n°2) et la construction d'un modèle numérique de prévision de la qualité de l'eau (hors-série n°3).



Chronique semestrielle hors-série n°1 : Contexte de la création d'un réseau de surveillance du bassin ferrifère lorrain



Historique de l'exploitation

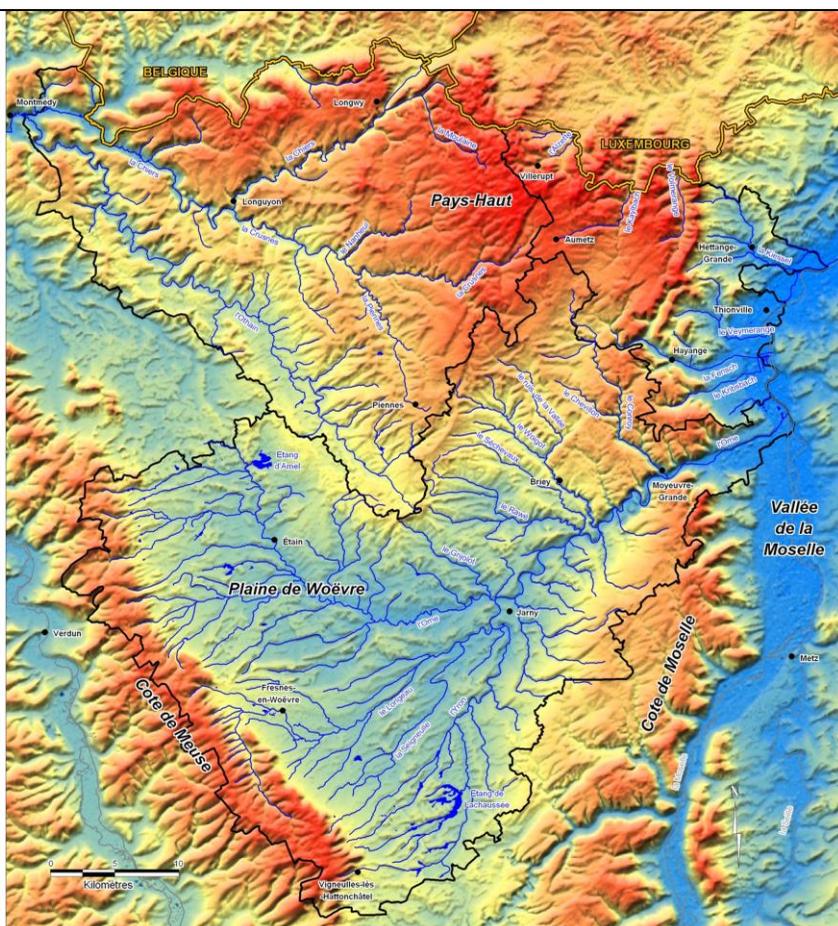
Le gisement lorrain a été exploité épisodiquement depuis le XIII^{ème} siècle, et régulièrement depuis le XVIII^{ème} siècle. Les mines de fer de Lorraine, qui produisaient un minerai assez pauvre et phosphoreux, ont été le support de la sidérurgie locale et ont connu leur heure de gloire tant que l'exploitation et le transport de minerais plus riches ne sont pas venus les concurrencer en Lorraine même. L'installation de sidérurgies portuaires, plus modernes et plus facilement approvisionnables en minerais, puis la crise générale de la sidérurgie, sont venues accélérer le déclin. Le processus de fermeture totale des mines est aujourd'hui achevé. Après avoir dépassé les 60 millions de tonnes de production annuelle de 1960 à 1962, les mines de fer ont connu un plateau de stabilisation de leur production autour de 50 millions de tonnes par an de 1968 à 1974, puis ont plongé pour descendre autour de 10 millions de tonnes par an après 1988. On estime que **trois milliards de tonnes ont été extraites** depuis l'origine.

Administrativement, le bassin a été morcelé en quelques centaines de concessions couvrant environ une centaine de km du nord au sud et une trentaine de km au maximum d'est en ouest, et s'étendant sur 3 départements (Meuse, Meurthe-et-Moselle, Moselle). Ces concessions étaient pour la plupart jointives (surtout dans le bassin Briey-Longwy), et la plupart du temps, les travaux d'une mine communiquaient avec ceux de la mine voisine. Les exploitants des différentes mines ont été multiples, au temps de la splendeur (mines marchandes, mines intégrées dans les grands groupes...). La crise de la sidérurgie les a fait disparaître ou se regrouper, et il n'en est resté finalement plus que deux : l'ARBED, qui a approvisionné la sidérurgie luxembourgeoise, et LORMINES, qui était la filiale du groupe USINOR-SACILOR ayant regroupé tous les intérêts miniers français.

Source : Rapport sur l'exhaure des mines de fer en Lorraine, Suzanne et Fournieret, 1996.

Le relief et les grandes régions naturelles

- > 2 grandes régions naturelles :
 - La plaine argileuse de la **Woëvre** (altitude : **220 à 230 m**)
 - Le plateau marno-calcaire du **Pays-Haut** (altitude : **230 à 450 m**)
- > Région limitée par les reliefs de la **côte de Meuse** à l'est, de la **côte de Moselle** à l'ouest, et la **frontière** avec la Belgique et le Luxembourg au nord



Relief et grandes régions naturelles

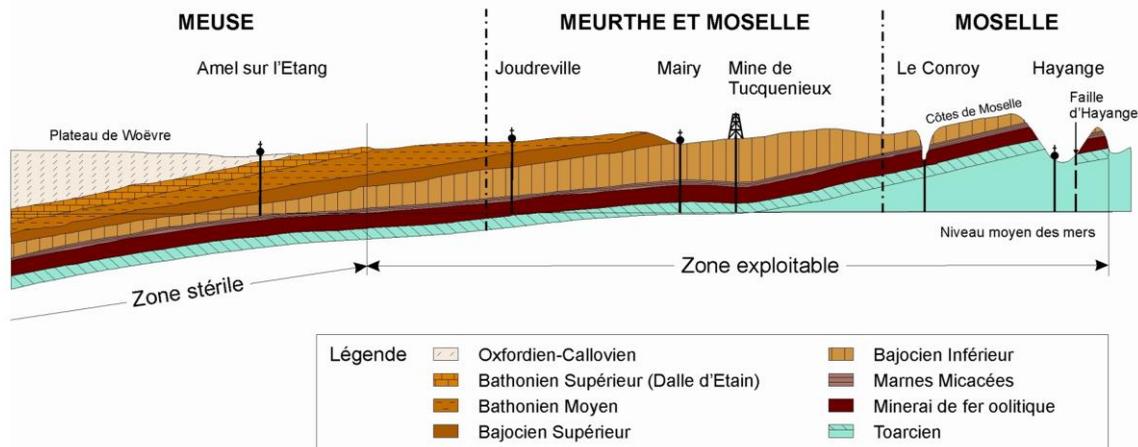
Le gisement de minerais de fer affleure le long de la côte de Moselle et s'interrompt sur près de 25 km en son centre, entre Pagny-sur-Moselle et Pont-à-Mousson. Cette discontinuité partage la région en deux zones distinctes, le bassin ferrifère de Nancy au sud (abandonné plus anciennement et non concerné par les études décrites ici) et le bassin ferrifère de Briey-Longwy au nord. Les exploitations minières se sont développées sous le plateau du revers occidental de la côte de Moselle. Le territoire du SAGE du bassin ferrifère (contour noir sur la carte ci-dessus) est situé entre les cours de la Meuse à l'ouest, et de la Moselle à l'est. Il est encadré par les grandes agglomérations de Verdun à l'ouest, Metz à l'est, Pont-à-Mousson au sud, tandis que sa limite nord est constituée par la frontière française avec la Belgique et le Luxembourg. Deux grandes régions naturelles, aux caractéristiques très différentes, peuvent être distinguées : la plaine de la Woëvre au sud du territoire, et le plateau du Pays-Haut au nord.

La plaine de la Woëvre, d'altitude comprise entre 220 et 230 mètres, occupe la plus grande partie de la moitié sud du territoire. Sur ses limites sud-ouest et sud-est, cette grande dépression

topographique s'appuie sur les reliefs calcaires des côtes de Meuse et de Moselle. La plaine de la Woëvre est constituée de terrains argileux imperméables, et caractérisée par la présence de nombreux terrains marécageux et de retenues telles que l'étang d'Amel et l'étang de Lachaussée.

Le plateau marno-calcaire du Pays-Haut, dans la partie nord du territoire, est limité à l'est par la vallée de la Moselle, à l'ouest par la confluence Chiers-Othain, au sud par la plaine de la Woëvre, tandis que sa limite nord correspond approximativement à la frontière avec la Belgique et le Luxembourg. La surface du plateau est légèrement inclinée du nord-est vers le sud-ouest, son altitude variant de 450 à 230 m. Le point culminant du Pays-Haut, situé à proximité d'Aumetz, est un point de partage des eaux vers les trois bassins versants du territoire (la Chiers, l'Orne, et les petits cours d'eau du bassin versant de la Moselle). Les cours d'eau parcourant le plateau calcaire s'y enfoncent rapidement, et coulent souvent dans des vallées encaissées.

Coupe géologique ouest-est du bassin ferrifère lorrain



- ☀ Couche du minerais de fer : âge aalénien
- ☀ Repose sur l'étage terminal du Lias : le Toarcien
- ☀ Recouverte par la série sédimentaire complète du Dogger
- ☀ Accidents tectoniques (NE-SO) : subdivision du bassin en trois sous-bassins (Nord, Centre et Sud)

Géologie et hydrogéologie

La couche de minerai de fer qui a été exploitée de manière industrielle pendant plus d'un siècle est d'âge Aalénien. Elle affleure à l'est au niveau des escarpements qui bordent la vallée de la Moselle, puis s'enfonce vers l'ouest avec un pendage moyen de l'ordre de 3 %, pour atteindre une profondeur d'environ 300 m à l'aplomb des limites de la zone exploitable et concédée (cf. coupe géologique ci-dessus).

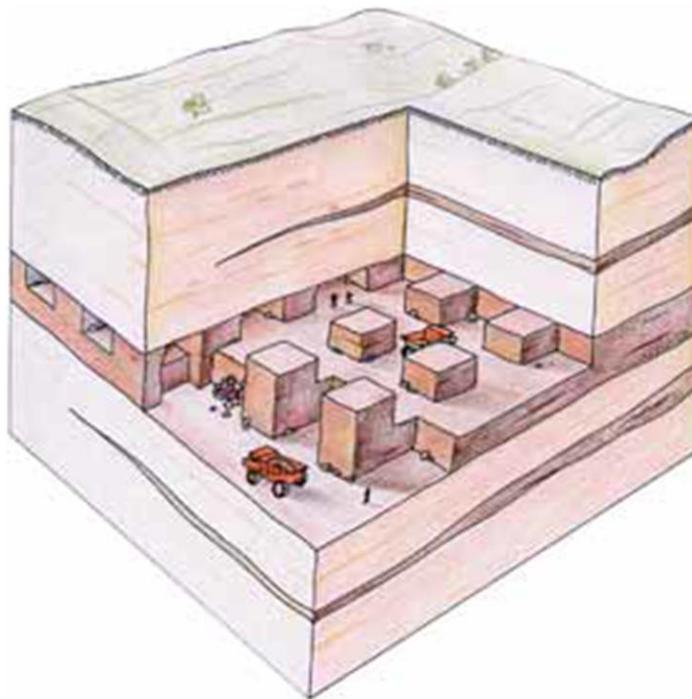
La **couche de minerai de fer** repose sur les marnes imperméables du Toarcien. Elle est progressivement recouverte d'est en ouest par la succession des formations calcaires et marneuses du Jurassique inférieur et moyen, constituant ainsi la série sédimentaire complète du Dogger. Plus à l'ouest, le Dogger est lui-même recouvert par les argiles de la Woëvre (Callovo-Oxfordien), puis par les calcaires oxfordiens formant le relief de la côte de Meuse.

D'un point de vue hydrogéologique, on peut distinguer, au droit des zones exploitées, trois ensembles aquifères superposés.

Du bas vers le haut, on trouve :

- **les nappes des réservoirs miniers**, dans la formation ferrifère : ces aquifères, modestes à l'état naturel, deviennent de véritables réservoirs d'eau souterraine artificiels, lorsqu'ils sont percés de galeries ; un réservoir peut être rempli ou non d'eau (il peut être ennoyé, partiellement ennoyé ou non ennoyé),
- **la nappe principale du Dogger** : contenue dans les calcaires à polypiers du Bajocien moyen et dans les calcaires du Bajocien inférieur,
- **plusieurs petites nappes perchées** et discontinues, les nappes des oolithes de Jaumont et de Doncourt, qui reposent sur des niveaux marneux,
- **quelques nappes alluviales** de faible importance : alluvions du Conroy, de l'Orne, de la Fensch.

Méthode d'exploitation



Source image : L'après-mine en France, BRGM, 2006



Méthode d'exploitation

Après une exploitation de type artisanale des couches minéralisées, qui s'est effectuée à partir des affleurements (du XVII^{ème} au XIX^{ème} siècle), une technique d'exploitation moderne par **chambres et piliers** est apparue en 1893, consistant à creuser dans la couche de minerai des galeries se recoupant perpendiculairement pour former un maillage carré ou rectangulaire de galeries interconnectées, en laissant en place de larges zones non exploitées (les piliers) qui soutenaient les terrains situés au-dessus. Avec cette méthode, les piliers étaient abandonnés, et on ne récupérait donc qu'une partie du gisement.

C'est pourquoi la méthode des chambres et piliers abandonnés a évolué vers la **méthode dite de traçage et dépilage**, qui s'est généralisée après la seconde guerre mondiale, et qui permettait un taux de récupération plus élevé grâce à la plus faible dimension des piliers résiduels (3 m x 3 m). Ces derniers étaient torpillés à l'explosif en fin d'exploitation, pour assurer la stabilité à long terme des terrains, entraînant l'effondrement des terrains sus-jacents.

L'exploitation se déroulait ainsi en trois phases principales :

- **phase de traçage** : après avoir divisé la zone à exploiter par le creusement de galeries principales, l'exploitant minier créait un réseau de galeries parallèles par creusement dans le minerai en place, en délimitant ainsi de longs piliers entre les galeries, donnant ainsi naissance à une « **zone tracée** » ;
- **phase de dépilage-foudroyage** : lorsque c'était possible sans risquer d'endommager des structures en surface (bâtiments, routes, voies ferrées), ces longs piliers étaient exploités par des creusements perpendiculaires successifs, jusqu'à ce que ne subsistent que de maigres piliers résiduels. Le dépilage se terminait alors par le torpillage des piliers résiduels à l'explosif, ce qui provoquait la chute du toit : c'était le foudroyage, qui donnait naissance à une « **zone dépilée** » (aussi appelée « **zone foudroyée** »). L'effondrement des terrains provoquait généralement la création d'une cuvette d'affaissement en surface.



Conséquences de l'exploitation minière

Durant plus d'un siècle d'exploitation dans le bassin ferrifère lorrain, 3 milliards de tonnes de minerai de fer ont été excavés, 40000 km de galeries ont été creusés, sur plusieurs niveaux (3 généralement). La surface des zones foudroyées (dépillées) représente en moyenne 40 à 50 % de la surface exploitée.

Les **venues d'eau d'infiltration** furent toujours un problème majeur pour l'exploitation, puisqu'il fallait sortir de 5 à 20 m³ d'eau pour une tonne de minerai extrait. Ce problème était très fortement lié à la méthode d'exploitation par traçage et dépilage. En effet, consécutivement à la pratique du foudroyage, l'écran imperméable constitué de marnes micacées sus-jacent à la formation ferrifère était fracturé sur une grande surface. Au droit des zones exploitées, la quasi-totalité de la nappe principale des calcaires du Dogger située au-dessus des travaux miniers a ainsi été drainée vers les exploitations minières par l'intermédiaire des zones foudroyées.

Le développement de l'activité minière, particulièrement depuis le milieu du XX^{ème} siècle, n'a alors pu s'effectuer que grâce à la mise en œuvre de **pompages permanents « d'exhaure minière »** destinés à maintenir les travaux miniers au sec. Des galeries de drainage et des albraques (bassins d'accumulation) ont dû être réalisés en fond de mine, ainsi que des puits d'exhaure en surface. De plus, des interconnexions hydrauliques entre les mines ont été créées au fur et à mesure des regroupements de sièges d'exploitation au sein de chaque bassin.

L'exhaure moyenne annuelle du bassin ferrifère est évaluée à 179 millions de m³ d'eau par an pour la période 1946-1993 (donc avant l'arrêt des exhaures des réservoirs Centre, Sud et Nord), pour un minimum de 70 (1946) et un maximum de 291 millions de m³/an (1981).

Une petite partie (10%) de l'eau d'exhaure était utilisée pour l'alimentation en eau potable et industrielle, tandis que l'essentiel du débit était déversé dans les cours d'eau, modifiant artificiellement le régime des cours d'eau du territoire.



L'ennoyage, après l'arrêt de l'exploitation
et de l'exhaure minière

L'ennoyage des mines

Un tel prélèvement d'eau souterraine a considérablement **bouleversé les équilibres naturels**, tant pour le milieu souterrain que pour les écoulements superficiels. C'est ainsi que des sources ont disparu ou que certains tronçons de cours d'eau se sont asséchés. Inversement, le rejet massif des eaux d'exhaure dans les rivières de la région a conduit par endroits à une artificialisation du débit des cours d'eau. La prolongation de cet état de fait pendant quelques dizaines d'années a rendu possible l'installation d'un **nouvel équilibre dynamique artificiel**, auquel la population s'est habituée.

La fermeture des exploitations minières a entraîné **l'arrêt des exhaures et la remise en cause de cet équilibre dynamique**. Les pompages d'exhaure des 3 plus grands bassins ont été arrêtés à partir de 1994 : février 1994 pour le bassin Centre, mars 1995 pour le bassin Sud, décembre 2005 pour le bassin Nord. L'arrêt des pompages a eu pour conséquence **l'ennoyage progressif des travaux miniers** et la création de « réservoirs miniers ».

Par convention, un **réservoir minier** est défini comme un **aquifère artificiel** constitué de l'ensemble des vides laissés par l'homme dans la formation ferrifère. Chaque réservoir est indépendant de ses voisins au point de vue hydraulique (pas ou peu d'échanges d'eau entre réservoirs). Au sein de chaque réservoir, on distingue :

- **la zone ennoyée** (qui n'est pas toujours présente) dans laquelle les anciennes galeries minières abandonnées sont remplies d'eau, et qui déborde généralement vers un cours d'eau par un ou plusieurs exutoires aménagés spécialement (points de débordement),
- **la zone non ennoyée** qui collecte et conduit l'eau qui s'y infiltre vers la zone ennoyée et/ou vers un ou plusieurs exutoires situés à une cote supérieure à la cote d'ennoyage (si cette dernière existe).

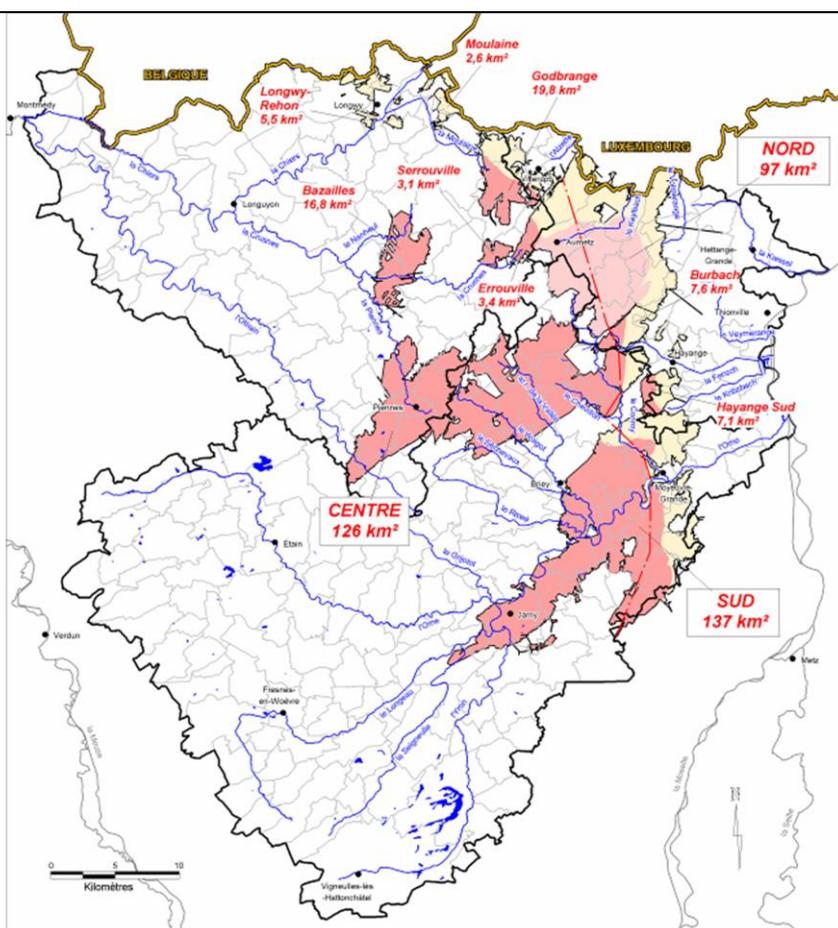
Les réservoirs miniers du Bassin ferrifère lorrain

> 11 réservoirs miniers :

- 430 km² de travaux miniers,
- ¾ de la surface est ennoyée
- Volume d'eau > 450 Mm³

> 3 grands réservoirs (< 97 km²) : Sud, Centre, Nord

> 8 petits réservoirs (> 20 km²)



Les bassins et réservoirs miniers

La formation ferrifère est affectée par de nombreuses failles orientées principalement nord-est / sud-ouest, qui subdivisent le bassin ferrifère de Briey-Longwy en 4 bassins géographiques de taille plus restreinte, au sein desquels un ou plusieurs réservoirs miniers sont individualisés.

On rappelle qu'un **réservoir minier** est défini, par convention, comme un aquifère artificiel constitué de l'ensemble des vides laissés par l'homme dans la formation ferrifère, après la fin de l'exploitation du minerai de fer, ce réservoir pouvant être ennoyé, partiellement ennoyé ou non ennoyé.

On distingue donc :

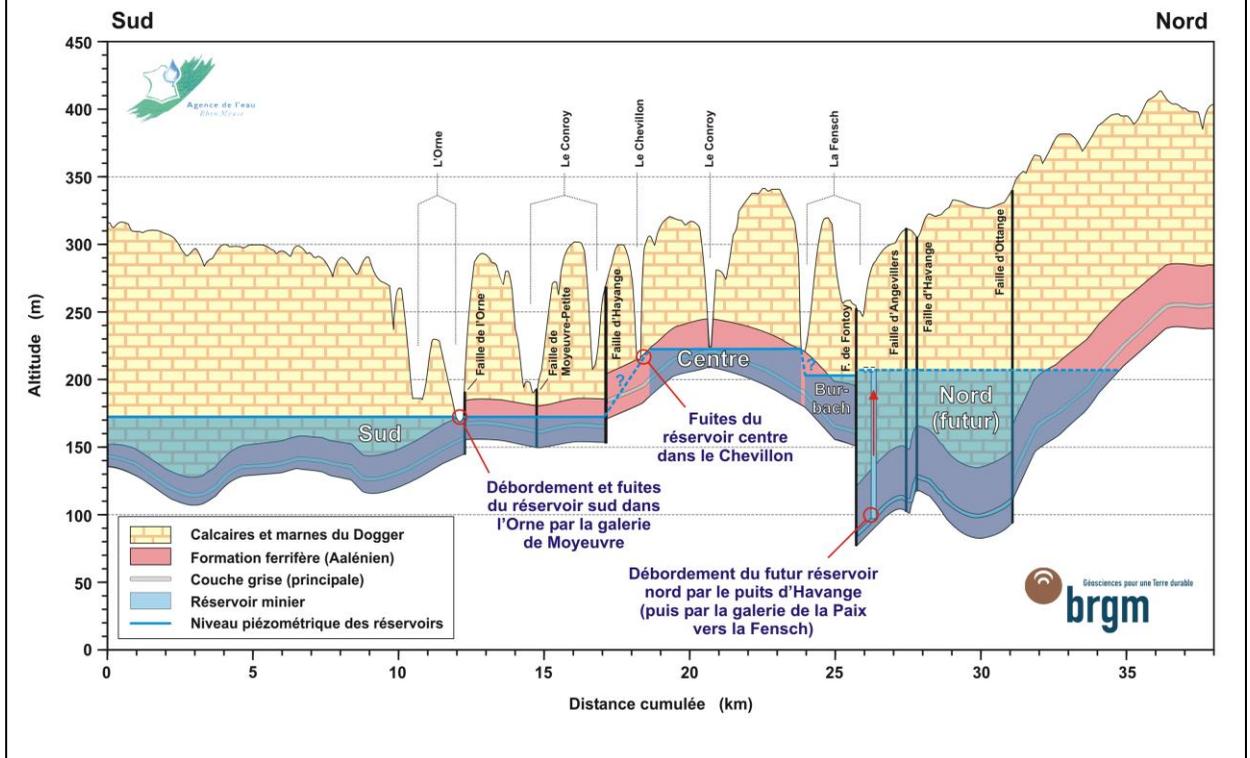
- **le bassin Sud**, avec les réservoirs Sud (137 km²) et Hayange Sud (7,1 km²), situé entre les failles d'Amanvillers au sud et d'Avril et de Hayange au nord,
- **le bassin Centre**, avec les réservoirs Centre (126 km²) et Burbach (7,6 km²), au nord-ouest des failles d'Avril et de Hayange, et au sud des failles de Fontoy et d'Ottange,

- **le bassin Nord**, avec les réservoirs Nord (97 km²) et Errouville (3,4 km²), limités au sud-est par la faille de Fontoy, et au nord-ouest par la faille de Mercy-Crusnes,
- **le bassin de Longwy**, avec les réservoirs Godbrange (19,8 km²), Bazailles (16,8 km²), Longwy-Rehon (5,5 km²), Serrouville (3,1 km²) et Moulaine (2,6 km²), situés au nord-ouest de la faille de Mercy-Crusnes.

Au total, **11 réservoirs miniers** sont donc identifiés dans le bassin ferrifère de Briey-Longwy, dont **3 grands réservoirs** de taille supérieure à 97 km² (Sud, Centre et Nord) et 8 petits réservoirs de taille inférieure à 20 km².

La surface totale de l'ensemble des travaux miniers du bassin ferrifère s'élève à près de **430 km²**, dont les ¾ sont ennoyés, ce qui représente un volume d'eau supérieur à **450 millions de m³**.

Coupe sud-nord passant par les points de débordement permanents des réservoirs miniers ennoyés



Relations entre les réservoirs miniers

La coupe hydrogéologique Sud-Nord ci-dessus passe par les principaux points de débordement permanents des réservoirs miniers ennoyés (cf. en rouge la trace de la coupe sur la carte de la page précédente). Elle permet de visualiser les réservoirs miniers Sud, Centre, Burbach et Nord (NB : coupe réalisée avant l'ennoyage du réservoir Nord, d'où la mention « futur » qui n'est plus d'actualité).

Les réservoirs miniers sont considérés comme **indépendants du point de vue hydraulique**, c'est-à-dire qu'ils n'échangent pas d'eau avec les réservoirs miniers voisins (ou suffisamment peu pour que ces échanges ne puissent pas être quantifiés). Cette indépendance hydraulique des réservoirs peut résulter de l'histoire de l'exploitation minière, qui a laissé par endroit des zones vierges de travaux entre deux réservoirs ; de la configuration géologique des terrains exploités (faille importante) ; ou encore de la mise en place de barrages souterrains dans les travaux miniers avant l'ennoyage permettant de diriger les eaux d'ennoyage vers les points de débordement choisis. La principale conséquence de cette indépendance hydraulique des réservoirs miniers est l'existence de **cotes d'ennoyage très**

différentes d'un réservoir à l'autre, même s'ils sont très proches géographiquement, puisque la cote d'ennoyage d'un réservoir est contrôlée par son point de débordement le plus bas. La coupe hydrogéologique simplifiée ci-dessus permet d'apprécier les différences significatives de niveau d'ennoyage des réservoirs : près de 53 m séparent les cotes d'ennoyage des réservoirs Sud et Centre, et plus de 15 m celles des réservoirs Nord et Centre.

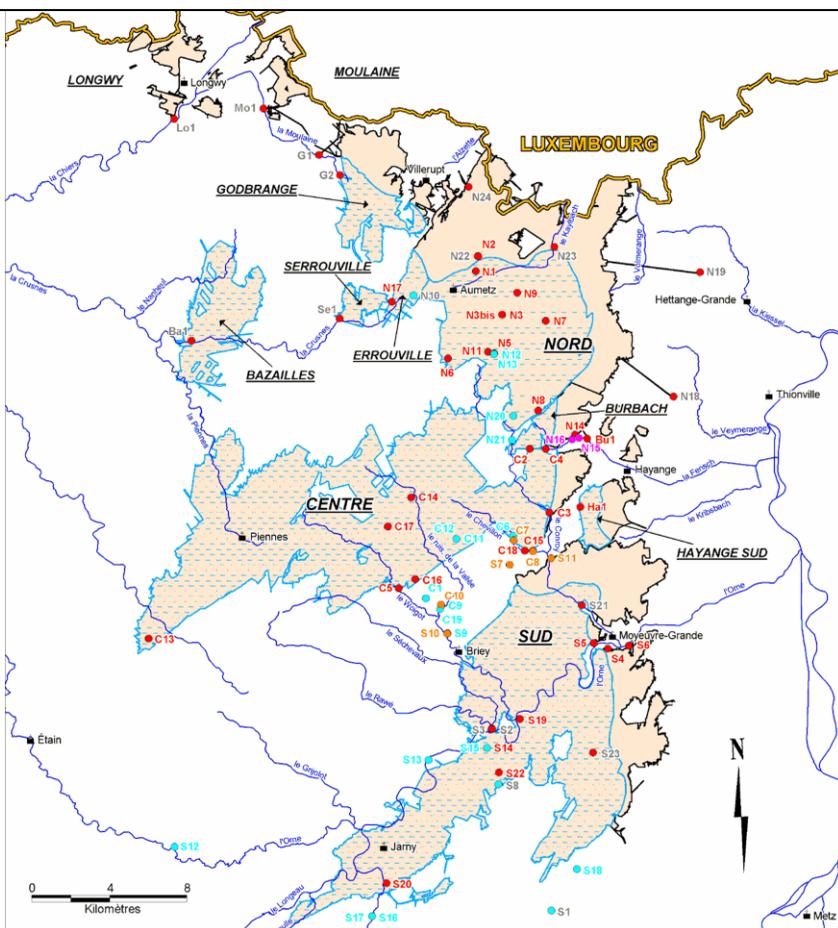
Ces différences d'altitude des niveaux d'ennoyage posent la question des transferts d'eau souterraine entre réservoirs (cf. les « ? » sur la coupe ci-dessus). A ce jour, **aucune donnée** concernant les niveaux piézométriques ou la qualité des eaux souterraines **n'indique l'existence de transferts d'eau** entre le réservoir Centre et ses voisins. Les seules relations hydrauliques entre réservoirs adjacents sont celles existant entre les réservoirs Errouville et Nord, à travers une zone foudroyée, ces deux réservoirs ne faisant plus qu'un depuis la fin de l'ennoyage du réservoir Nord.

Le réseau de surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère

> Depuis 1995, un réseau en constante évolution (41 points en 2017 + points appartenant à d'autres réseaux) pour surveiller :

- les réservoirs miniers,
- les nappes des calcaires du Dogger
- la formation ferrifère non exploitée
- certaines nappes alluviales

> Le réseau permet de surveiller les niveaux, les débits de débordement des réservoirs et la qualité de l'eau



La surveillance des eaux souterraines

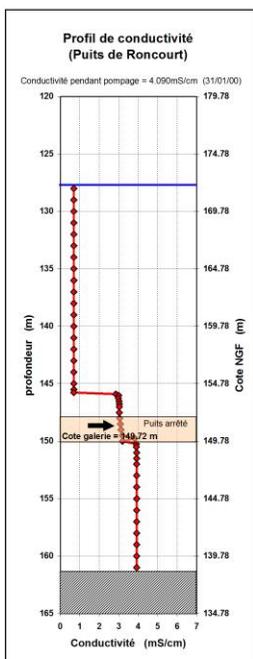
La surveillance de la quantité (niveaux, débits) et de la qualité des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain a pour premier objectif de **mieux comprendre le fonctionnement** de ce système, et notamment les relations entre les réservoirs miniers et les aquifères adjacents, ainsi que les éventuelles communications entre réservoirs miniers. Il s'agit en second lieu de **constituer un ensemble de bases de données** (géographiques, géologiques, minières, hydrodynamiques, chimiques) destinées à alimenter des modèles numériques de prévision et de gestion.

Un **réseau de surveillance** a ainsi été progressivement constitué depuis 1993, il comprend **41 points en 2017**. Les résultats de la surveillance sont présentés par des rapports publics téléchargeables sur le site du BRGM (www.brgm.fr), ainsi que par le biais de chroniques périodiques. Par ailleurs, les données de surveillance sont bancarisées dans la banque ADES (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines : www.ades.eaufrance.fr) où elles

peuvent être consultées et téléchargées. Le **Système d'information pour la gestion des eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse (SIGES)** fournit un accès simplifié à ces données ainsi qu'à un grand nombre de d'autres données relatives aux eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse (sigesrm.brgm.fr).

Les **niveaux piézométriques et les débits de débordement** des réservoirs sont mesurés en continu par des centrales d'acquisition. Les **échantillonnages et les analyses** sont effectués à des fréquences mensuelles à annuelles, et concernent les éléments majeurs (calcium, magnésium, sodium, potassium, sulfate, chlorure, bicarbonate), les composés azotés (ammonium, nitrite, nitrate), certains éléments caractéristiques de l'eau d'ennoyage des réservoirs miniers (strontium, fer, manganèse, bore), et les certains polluants potentiellement présents dans l'eau des réservoirs miniers (nickel, hydrocarbures totaux, indice phénol).

Conception d'un échantillonneur adapté aux contraintes des puits miniers, notamment en cours d'envoyage (BRGM)



Echantillonnage dans les puits miniers

Des profils de température et de conductivité électrique de l'eau réalisés dans tous les puits de grand diamètre (5 à 7 m) du bassin ferrifère permettent de constater l'existence dans les puits d'une tranche d'eau supérieure peu minéralisée de composition proche de celle de l'eau des calcaires du Dogger, séparée par un palier très abrupt d'une tranche d'eau inférieure minéralisée représentative de l'eau d'envoyage des mines.

Il a été démontré qu'un échantillon représentatif de l'eau circulant dans le réseau de galeries du réservoir minier ne peut être obtenu que par prélèvement dans la tranche inférieure d'eau minéralisée, et de préférence à la profondeur du débouché de la galerie dans le puits.

L'échantillonnage correct de l'eau des puits et des piézomètres d'un réservoir minier exige donc de mettre en œuvre des techniques adaptées aux profondeurs importantes en jeu (jusqu'à 260 m) et à l'absence de moyens de pompage dans la plupart des cas.

Pour répondre à l'ensemble de ces contraintes, le BRGM a conçu un système d'échantillonnage fixe « pneumatique » sans purge préalable qui a été installé dans un grand nombre de puits à partir de 2005.

Ce système d'échantillonnage fonctionne par l'application de cycles successifs de compression et de décompression d'azote gazeux dans un tube double au bout duquel se trouve un système de deux clapets anti-retour. Le jeu de ces clapets permet alternativement le prélèvement d'eau souterraine (phase de décompression) puis sa circulation vers le haut (phase de compression).

La rusticité et le coût relativement modeste de ce système a permis de le mettre en place à demeure dans tous les ouvrages qui le nécessitaient, à la profondeur requise pour prélever de l'eau représentative de chaque réservoir minier, c'est-à-dire en face des ouvertures de galeries (puits miniers) ou des crépines (piézomètres).



Chroniques semestrielles hors-série 2014-2015

Mines ennoyées du bassin ferrifère lorrain : du réseau de surveillance... ...au modèle numérique de prévision

Hors-série n°1 : Contexte de la création d'un réseau de surveillance

Hors-série n°2 : Définition d'un modèle conceptuel

Hors-série n°3 : Construction d'un modèle numérique de prévision

BRGM Grand Est – Mise à jour 2017



Chronique hors-série n°2 : introduction

L'arrêt progressif de l'exploitation minière dans le bassin ferrifère à partir des années 1990 a conduit à des 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.

Ce constat a conduit les pouvoirs publics à initier en 2004 l'élaboration d'un SAGE du bassin ferrifère (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux. En 2005, le BRGM a été chargé par le Conseil Régional Lorrain, structure porteuse du SAGE du Bassin Ferrifère, de réaliser les deux premiers documents constitutifs de l'élaboration du SAGE : l'état des lieux et le diagnostic du SAGE du bassin ferrifère. Au terme de plus de 10 ans de travaux menés par la Commission Locale de l'Eau (CLE) du SAGE, ce dernier a été adopté en 2016 : il constitue désormais un fil conducteur pour toutes les actions menées sur le bassin pour la préservation de l'eau et des milieux aquatiques.

En parallèle, à partir de 1995, d'abord en complément puis en substitution de la surveillance prescrite aux anciens exploitants pendant une durée limitée, le BRGM, en partenariat avec l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, le Conseil Régional Lorrain et la

DREAL Lorraine, ont engagé des actions de connaissance et de protection de la ressource. Le BRGM assure depuis cette date la surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain, dans le cadre de ses activités de service public. En 2017, le réseau de surveillance est devenu un observatoire sous maîtrise d'ouvrage du BRGM, cofinancé par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, la Région Grand Est et le BRGM.

Par ailleurs, le BRGM a contribué aux travaux de recherche du GISOS, Groupement d'intérêt scientifique de recherche sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains, qui a eu pour objectifs entre 1999 et 2015 d'anticiper et de contribuer à résoudre les problèmes posés dans le cadre de l'après-mine en France. Les travaux menés par le BRGM dans le cadre du GISOS ont contribué au développement d'un modèle numérique de prévision.

Cette chronique hors-série n°2 présente le modèle conceptuel de structure et de fonctionnement des réservoirs miniers ennoyés qui a été défini sur la base des résultats de la surveillance des eaux souterraines (hors-série n°1) et qui a permis la construction d'un modèle numérique de prévision de la qualité de l'eau (hors-série n°3).

Chronique semestrielle hors-série n°2 :

Définition d'un modèle conceptuel de structure et de fonctionnement des réservoirs miniers ennoyés

BRGM Grand Est

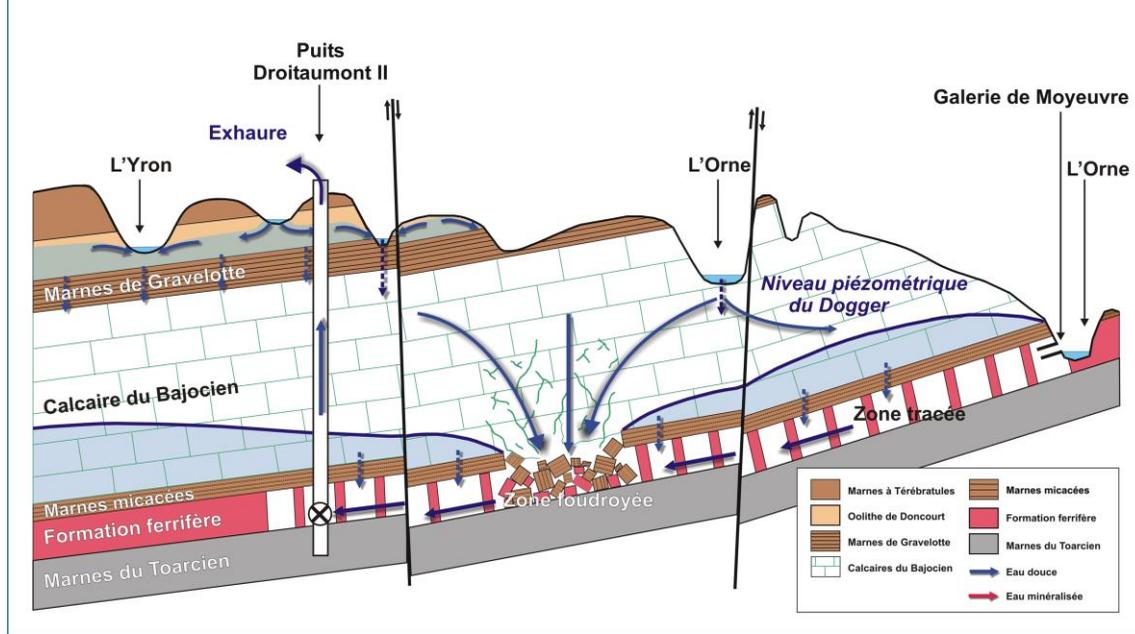


Pourquoi un modèle conceptuel ?

L'interprétation et la synthèse des résultats de mesure acquis depuis 1995 dans le cadre de la surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère, complétée par les résultats des expériences de laboratoire menés par le BRGM dans le cadre du GISOS, ont permis de décrire la structure et le fonctionnement hydrogéologique des réservoirs miniers, leurs relations hydrauliques avec la nappe des calcaires du Dogger sus-jacente, ainsi que les mécanismes géochimiques qui sont à l'origine de la minéralisation de de l'eau lors de leur ennoyage.

Les schémas de synthèse commentés présentés dans les pages suivantes condensent l'information disponible sous une forme graphique. Accompagnés des données de surveillance interprétées qui ont servi à les élaborer, ces schémas constituent ce que l'on appelle un modèle conceptuel. Un modèle conceptuel peut servir de base à l'interprétation de nouvelles données de surveillance, mais aussi et surtout à l'élaboration d'un modèle numérique permettant des prévisions.

Fonctionnement hydrogéologique pendant l'exploitation (exemple du bassin Sud)



Fonctionnement hydrogéologique pendant l'exploitation minière (exemple du réservoir Sud)

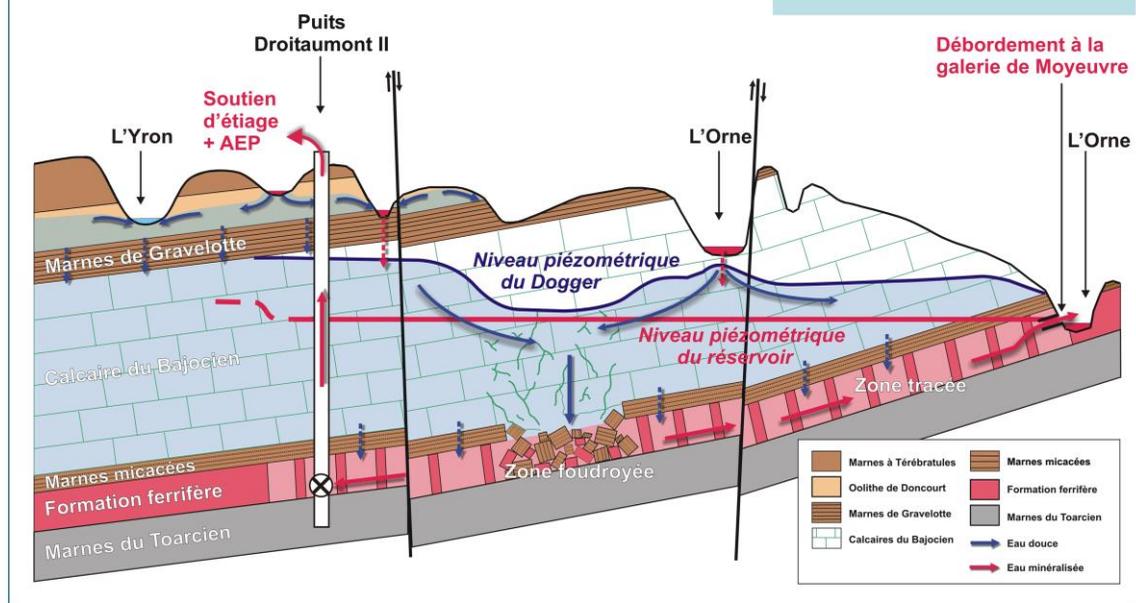
Pendant la période d'exploitation minière, au fur et à mesure que s'étendaient les travaux miniers, les foudroyages réalisés – ils concernent en moyenne 40 à 50 % de la surface des travaux miniers – provoquent la rupture de l'écran imperméable des marnes micacées qui supportait la nappe des calcaires 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. 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 la nappe de grande ampleur.

Fonctionnement hydrogéologique après l'ennoyage (exemple du bassin Sud)

Arrêt des exhaures minières :

- * Mai 1985 : Godbrange
- * Février 1994 : bassin Centre
- * Mars 1995 : bassin Sud
- * Décembre 2005 : bassin Nord



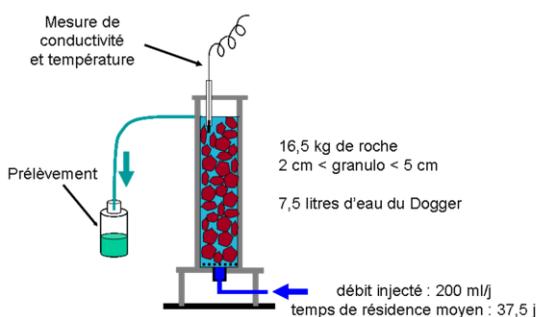
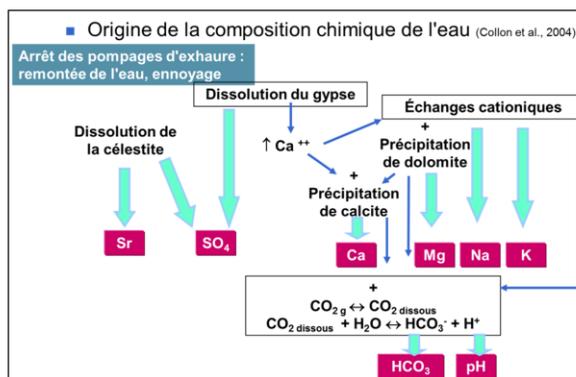
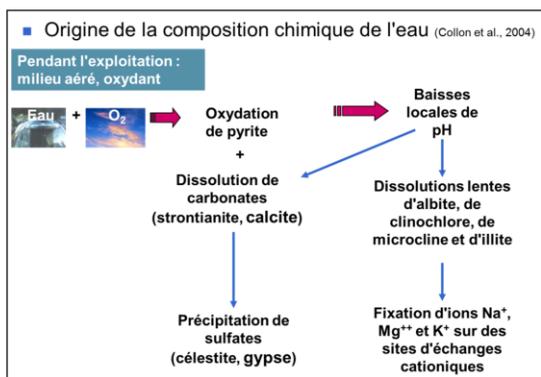
Fonctionnement hydrogéologique après l'ennoyage (exemple du réservoir Sud)

Après l'arrêt des exhaures, 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 dimension variée 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.** 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 :

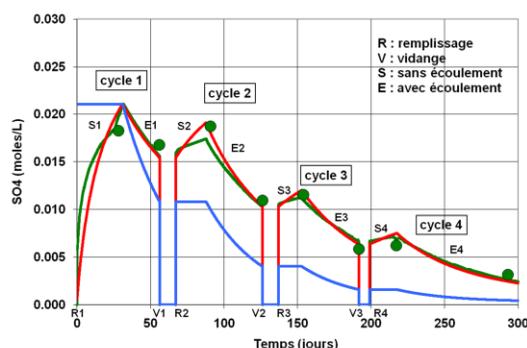
autrement dit, l'eau en mouvement dans les galeries n'est pas suffisamment «freinée» par les frottements sur les parois pour acquérir une «pente» importante (les pertes de charge à l'écoulement sont très faibles).

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).

Processus géochimiques de minéralisation de l'eau des réservoirs lors de leur ennoyage (travaux GISOS)



Source : Thèse P. Collon, ENSG, 2003



Les processus géochimiques de minéralisation de l'eau lors de l'ennoyage des réservoirs miniers

Lors de l'ennoyage des réservoirs miniers, **l'eau qui a rempli les galeries des anciennes mines de fer s'est minéralisée** en se chargeant très rapidement en sulfate, magnésium, sodium, calcium, potassium et bore, et, dans une moindre mesure, en strontium, manganèse, et chlorure. Son pH est resté compris entre 7 et 8. Si cette augmentation des concentrations a généralement rendu l'eau impropre à la consommation humaine au regard des concentrations maximales admissibles, ces éléments présents en excès ne sont, néanmoins, pas toxiques pour l'homme. De plus, 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.

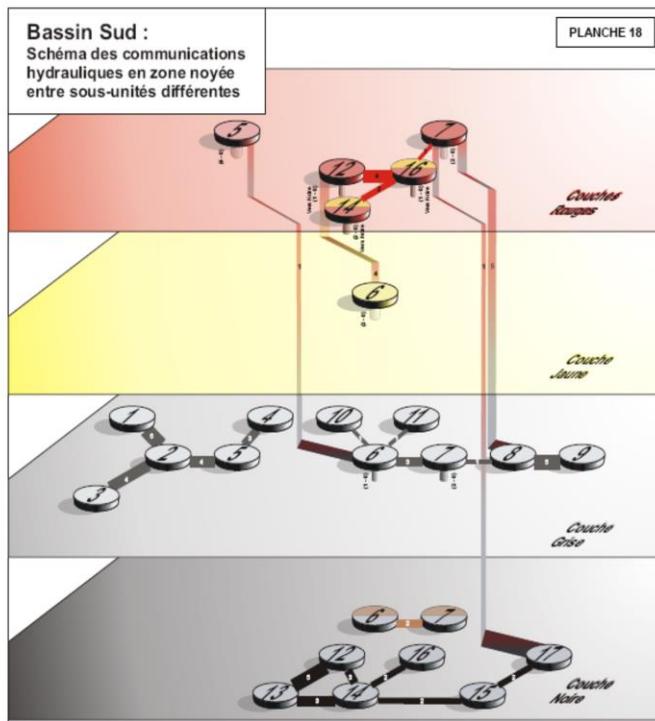
Les éléments chimiques en excès dans l'eau des réservoirs miniers du bassin ferrifère proviennent des réactions de mise en solution des sels minéraux (gypse notamment) issus de l'oxydation de la pyrite contenue dans les inter-bancs

marneux de la formation ferrifère (cf. les observations et expériences de laboratoire décrites en 2003 dans la thèse de doctorat de P. Collon et dans les publications associées, et illustrées ci-dessus). Ces sels se sont formés lors de l'exploitation minière, lorsque la pyrite a été mise en contact avec l'oxygène de l'air apporté par l'aération des mines. 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 ennoyé.

Ainsi, **cette situation est transitoire, jusqu'à ce que le stock d'eau minéralisée initial qui s'est formé lors de l'ennoyage soit évacué** par le jeu normal des circulations souterraines. Le temps nécessaire au renouvellement de l'eau du réservoir peut aller de quelques années à quelques dizaines d'années, si le temps de résidence de l'eau dans le réservoir est long.

Structure d'un réservoir ennoyé (exemple du réservoir Sud)

- > **L'analyse des plans miniers a permis de définir une structure simplifiée de chaque réservoir (sous-unités hydrogéologiques reliées par des galeries).**
- > **Ces sous-unités ont été regroupées en secteurs moins nombreux possédant au moins un point de surveillance.**
- > **Les secteurs peuvent ainsi être caractérisés par une tendance d'évolution de la concentration en sulfates.**



Structure des réservoirs et sectorisation

A partir de l'analyse cartographique des plans miniers, un modèle conceptuel détaillé de la structure de chaque réservoir minier ennoyé a été élaboré. L'analyse cartographique s'est déroulée en deux temps : dans un premier temps, l'analyse des plans d'exploitation de chaque couche a permis de délimiter des « sous-unités hydrogéologiques » dans la zone ennoyée des réservoirs, et de dénombrer les galeries de jonction entre sous-unités ; dans un deuxième temps, les communications verticales entre couches au sein d'une même sous-unité et entre les sous-unités ont été dénombrées aussi, afin de tenir compte de la configuration multicouche des exploitations minières. Les documents cartographiques produits permettent de visualiser l'ensemble des informations recueillies et analysées sous forme de cartes de synthèse (rapport BRGM RP53277-FR). A l'aide de ces informations, des schémas de synthèse ont été élaborés (cf. image ci-dessus) permettant la visualisation directe des communications

hydrauliques en trois dimensions. Ces schémas sont des outils précieux dans la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de chaque réservoir, ainsi que dans l'analyse comparée de leurs fonctionnements.

Sur la base de ce travail de détail sur la structure des réservoirs, et afin de préparer le travail de modélisation ultérieur (cf. chronique hors-série n°3), un travail de simplification de la structure a été mené sur chacun des réservoirs Sud, Centre et Nord, de manière à identifier des secteurs plus grands possédant chacun au moins un point de surveillance. C'est ainsi que 4 à 6 secteurs représentatifs des évolutions observées des concentrations en sulfates ont été identifiés au sein de chaque grand 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.



Chroniques semestrielles hors-série 2014-2015

Mines ennoyées du bassin ferrifère lorrain : du réseau de surveillance... ...au modèle numérique de prévision

Hors-série n°1 : Contexte de la création d'un réseau de surveillance

Hors-série n°2 : Définition d'un modèle conceptuel

Hors-série n°3 : Construction d'un modèle numérique de prévision

BRGM Grand Est – Mise à jour 2017



Chronique hors-série n°3 : introduction

L'arrêt progressif de l'exploitation minière dans le bassin ferrifère à partir des années 1990 a conduit à des 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.

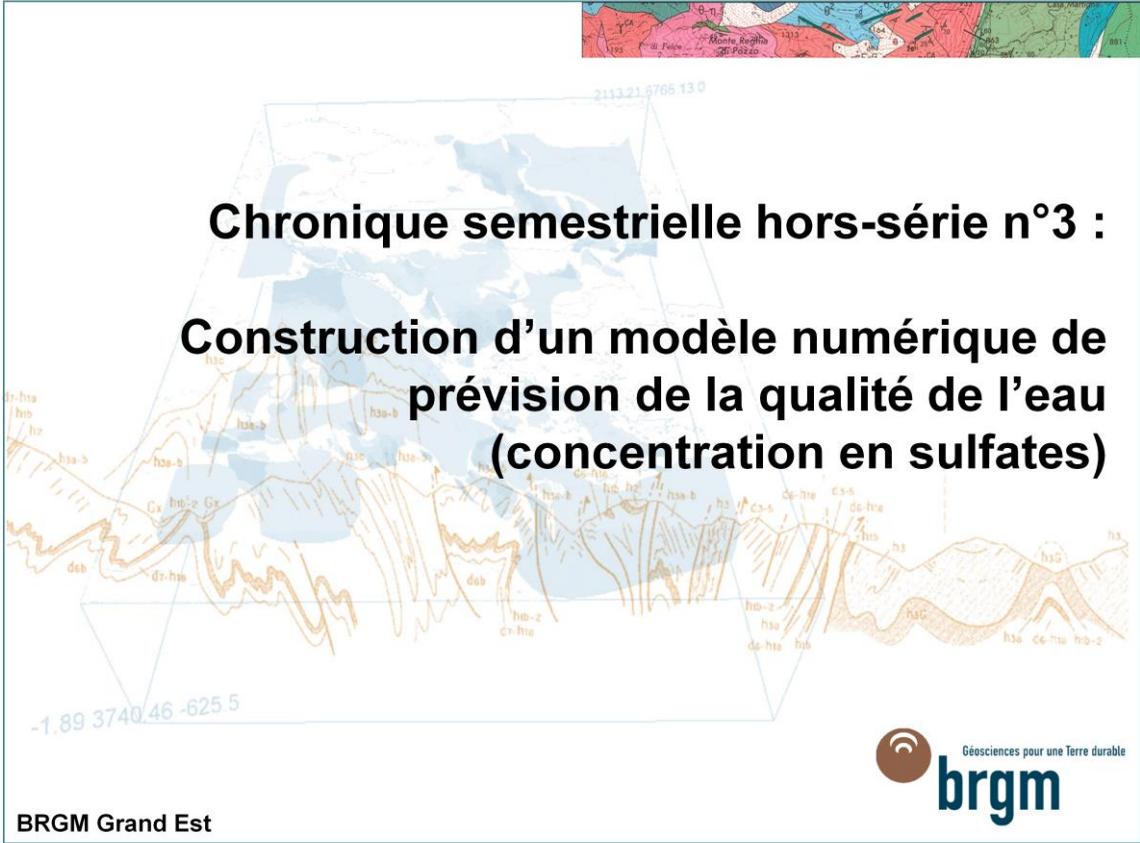
Ce constat a conduit les pouvoirs publics à initier en 2004 l'élaboration d'un SAGE du bassin ferrifère (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux. En 2005, le BRGM a été chargé par le Conseil Régional Lorrain, structure porteuse du SAGE du Bassin Ferrifère, de réaliser les deux premiers documents constitutifs de l'élaboration du SAGE : l'état des lieux et le diagnostic du SAGE du bassin ferrifère. Au terme de plus de 10 ans de travaux menés par la Commission Locale de l'Eau (CLE) du SAGE, ce dernier a été adopté en 2016 : il constitue désormais un fil conducteur pour toutes les actions menées sur le bassin pour la préservation de l'eau et des milieux aquatiques.

En parallèle, à partir de 1995, d'abord en complément puis en substitution de la surveillance prescrite aux anciens exploitants pendant une durée limitée, le BRGM, en partenariat avec l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, le Conseil Régional Lorrain et la

DREAL Lorraine, ont engagé des actions de connaissance et de protection de la ressource. Le BRGM assure depuis cette date la surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain, dans le cadre de ses activités de service public. En 2017, le réseau de surveillance est devenu un observatoire sous maîtrise d'ouvrage du BRGM, cofinancé par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, la Région Grand Est et le BRGM.

Par ailleurs, le BRGM a contribué aux travaux de recherche du GISOS, Groupement d'intérêt scientifique de recherche sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains, qui a eu pour objectifs entre 1999 et 2015 d'anticiper et de contribuer à résoudre les problèmes posés dans le cadre de l'après-mine en France. Les travaux menés par le BRGM dans le cadre du GISOS ont contribué au développement d'un modèle numérique de prévision.

Cette chronique hors-série n°3 présente le modèle numérique de prévision de l'évolution de la qualité de l'eau qui a été construit sur la base des résultats de la surveillance des eaux souterraines (hors-série n°1) et du modèle conceptuel de structure et de fonctionnement des réservoirs miniers ennoyés (hors-série n°2).



Chronique semestrielle hors-série n°3 :

Construction d'un modèle numérique de prévision de la qualité de l'eau (concentration en sulfates)

BRGM Grand Est



Pourquoi un modèle numérique de prévision ?

La seule surveillance des eaux souterraines (cf. chronique hors-série n°1) et des eaux de surface n'est pas un objectif en soi : les mesures ne sont utiles que pour permettre dans un premier temps la compréhension et la description des phénomènes sous la forme d'un modèle conceptuel (cf. chronique hors-série n°2), puis dans un deuxième temps pour alimenter des modèles numériques de comportement des réservoirs. Ces outils numériques sont des outils extrêmement utiles pour aider à la gestion de la ressource en eau.

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. Or, tant que le retour à une qualité de l'eau suffisamment bonne n'est pas réalisé, elles restent difficilement exploitables. La question principale est donc la suivante : à quelle date peut-on estimer que la concentration en sulfates s'approchera de la limite de potabilité de 250 mg/L ? Lorsque ce sera le cas, la minéralisation de l'eau, très corrélée à la concentration en sulfates, sera compatible avec l'exploitation habituelle des eaux souterraines.

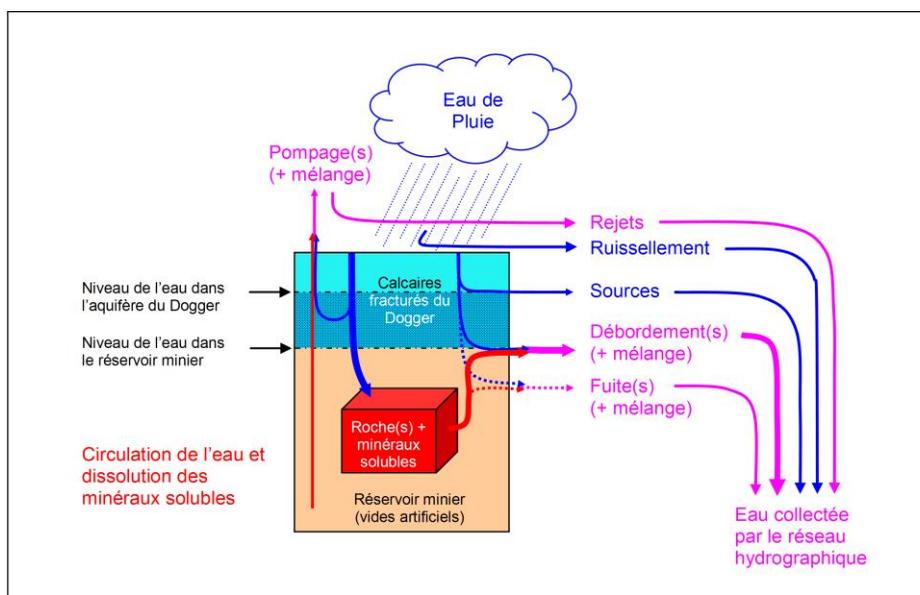
Suite aux travaux de modélisation réalisés par le BRGM entre 2000 et 2008 dans le cadre des travaux de recherche et développement du GISOS, l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, le Conseil Régional de Lorraine et le BRGM ont décidé de la construction et de la mise en œuvre d'un simulateur hydrogéologique et chimique des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain (rapport BRGM RP-62998-FR).

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 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.

Cette chronique hors-série n°3 présente la méthodologie de modélisation retenue, puis les résultats de la modélisation des 3 grands réservoirs Sud, Centre et Nord.

Approche de modélisation globale retenue pour chaque secteur de réservoir ennoyé : le « réacteur parfait »



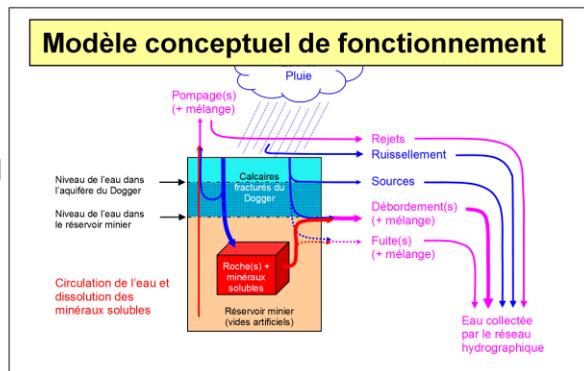
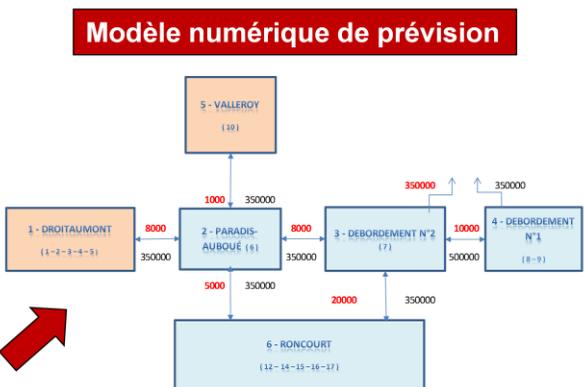
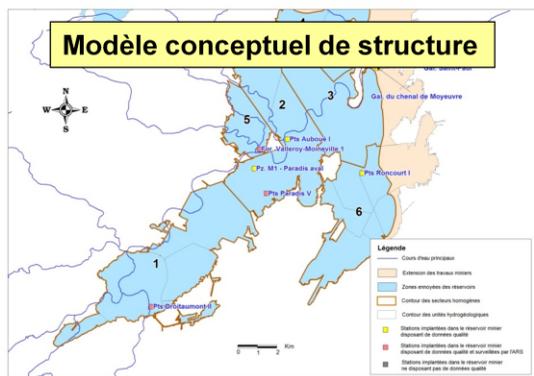
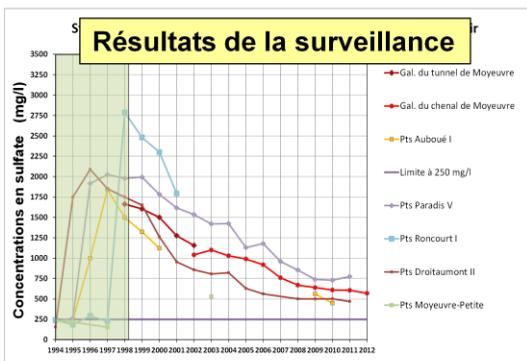
Approche de modélisation : le « réacteur parfait »

On rappelle que le bassin ferrifère lorrain a été exploité par la méthode de chambre et piliers, suivie fréquemment par le foudroyage des piliers résiduels 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 l'intermédiaire des zones foudroyées, et remplit enfin progressivement les vides laissés par l'homme dans les réservoirs miniers. On sait aussi grâce aux travaux de recherche et développement du GISOS que les zones foudroyées sont le siège des réactions géochimiques de dissolution du gypse qui libèrent notamment des sulfates dans l'eau du réservoir. Les zones de galeries assurent ensuite la dilution des eaux devenues minéralisées.

La complexité de la structure du système hydrologique à modéliser, ainsi que l'absence de

données spatialisées impose la mise en œuvre d'une approche de modélisation « globale », basée sur l'analyse des séries de données disponibles au démarrage de l'étude. Dans cette approche (cf. schéma ci-dessus), un secteur d'un réservoir minier ennoyé est considéré comme un « réacteur » au fond étanche, dans lequel l'eau de recharge pénètre par la limite supérieure perméable du réservoir, après avoir traversé l'aquifère des calcaires fissurés du Dogger. Lorsque l'eau de recharge pénètre dans le réacteur, elle entre en contact avec des roches contenant une masse de sulfate cristallisé sous forme de gypse soluble, qu'elle peut dissoudre. Le réacteur 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 secteur de réservoir. L'eau qui est entrée dans le secteur peut y être stockée ou ressortir par débordement(s), fuite(s), pompage(s) ou échange avec les secteurs voisins, en transportant avec elle hors du secteur le sulfate qu'elle a dissous. Par cette approche, un réservoir minier entier peut être modélisé sous la forme d'un « réseau de réacteurs ».

Construction des modèles numériques (« simulateurs »)



Construction des modèles numériques (« simulateurs »)

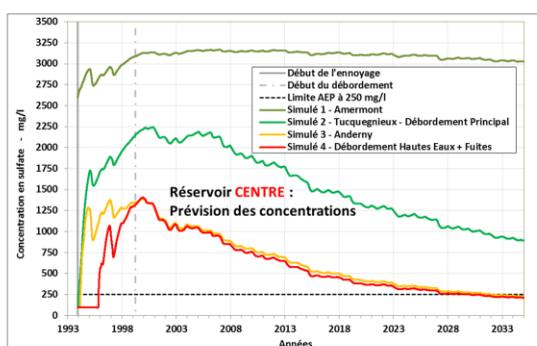
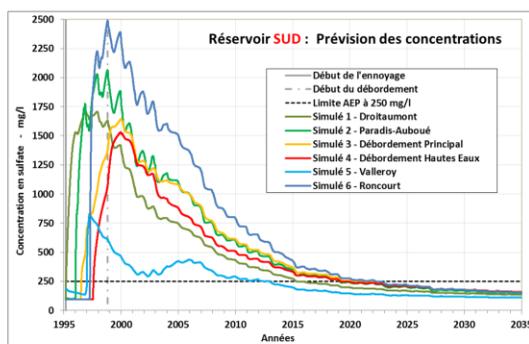
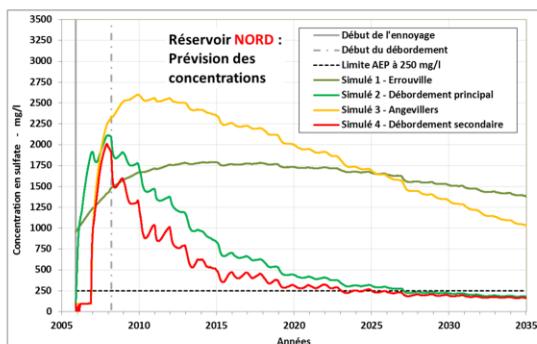
Trois modèles numériques de fonctionnement hydrologique et chimique (désignés par le terme « simulateurs » dans la suite) des trois grands réservoirs miniers envasés du bassin ferrifère lorrain (Sud, Centre, et Nord) ont été construits à partir des données disponibles entre 1993 et 2011 (rapport BRGM RP-62998-FR). Ces simulateurs sont basés sur l'approche globale de réacteurs en réseaux décrite précédemment, chaque réacteur représentant un secteur d'un réservoir minier envasé.

Le modèle numérique de prévision d'un réservoir est ainsi construit à l'aide des résultats de la surveillance, du modèle conceptuel de fonctionnement hydrogéochimique du réservoir, ainsi que de son modèle conceptuel de structure, ce que traduit en images l'illustration ci-dessus.

Les résultats du calage des 3 « simulateurs » de réservoirs sont présentés sur la page suivante. Le calage d'un modèle numérique consiste à reproduire avec le maximum de fidélité les observations disponibles. Lorsque cet objectif est atteint (avec une marge d'incertitude résiduelle inévitable), le modèle est considéré comme « calé » et apte à fournir des prévisions : il suffit d'alimenter le modèle avec des données estimées selon différents scénarios futurs (évolution future de l'infiltration d'eau de pluie et des débits de pompage par exemple) pour obtenir des prévisions.

Les graphiques présentés sur la carte page suivante permettent de visualiser sur la période 1993-2015 les concentrations mesurées (en rouge) dans les ouvrages représentatifs des différents secteurs, et de les comparer aux concentrations calculées (en noir) par les simulateurs sur la même période. On peut constater sur les graphiques que les nouvelles données acquises entre 2012 et 2015 valident les tendances prévues par les simulateurs sur l'ensemble des points de mesure.

Prévisions d'évolution de la concentration



Réservoir	Sud	Centre	Nord
Scénario Moyen (calage 1993-2011)	2015-2022	2030-2032	2025-2027



Résultats des prévisions

Les simulateurs ont été utilisés à titre prédictif afin d'estimer la date à partir de laquelle la concentration en sulfates dans chaque secteur des réservoirs pourrait être inférieure à la limite de potabilité de 250 mg/l.

En 2013, on prévoyait ainsi que selon un scénario moyen d'infiltration d'eau de pluie, cette limite serait atteinte entre 2015 et 2022 selon les secteurs pour le réservoir Sud ; entre 2030 et 2032 pour les 2 secteurs les mieux renouvelés en eau du réservoir Centre ; et entre 2025 et 2027 pour les 2 secteurs les mieux renouvelés en eau du réservoir Nord.

La marge d'erreur évaluée en 2013 était de +/- 4 ans sur la date. Ces dates pourront être réévaluées pour prendre en compte l'infiltration d'eau de pluie réelle depuis 2012.

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

Enfin, ces simulateurs sont modulables, il est possible 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.

Conclusion générale des chroniques hors-série n°1, 2 et 3

- > **Arrêt de l'activité minière** et des exhaures dans le Bassin Ferrifère Lorrain
- > **Mauvaise qualité des ressources en eau** qui ne sont plus exploitables : **comment les gérer et les valoriser ?**
 - **Surveiller l'évolution** de la quantité et de la qualité des eaux souterraines = **réseau de surveillance**
 - **Décrire le territoire** du bassin ferrifère : caractéristiques, fonctionnement hydrogéologique = **modèle conceptuel**
 - **Evaluer les tendances d'évolution** dans le futur, donc disposer d'un outil de prévision = **modèle numérique**



Conclusion

Depuis 1995, le BRGM a mené de nombreuses études et travaux sur le bassin ferrifère lorrain, en partenariat avec l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, le Conseil Régional Grand Est et la DREAL Grand Est.

Les objectifs de ces travaux étaient de :

- mettre en place un réseau de surveillance des eaux souterraines en définissant des méthodes d'échantillonnage adaptées ;
- définir un modèle conceptuel de structure et de fonctionnement hydrogéologique et hydrogéochimique, en s'appuyant notamment sur l'interprétation des données de surveillance ;
- sur la base du modèle conceptuel et des données de surveillance, construire un modèle numérique de prévision des niveaux piézométriques, des débits de débordement et de la qualité de l'eau (par le biais d'un indicateur représentatif : la concentration en sulfates).

L'effort de connaissance de ce milieu très complexe aura ainsi permis de disposer d'un outil de protection et de gestion de cette ressource aujourd'hui peu exploitée en raison de sa qualité insuffisante, mais qui sera précieuse à l'avenir.

La surveillance des eaux souterraines va se poursuivre pour que les parties prenantes puissent continuer de répondre aux enjeux du SAGE du Bassin Ferrifère et de la Directive Cadre européenne sur l'Eau.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale Grand Est – Site de Nancy

1 rue Jean Zay

54500 Vandœuvre-lès-Nancy

Tél. : 03 83 44 81 49

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm