

Editorial

Ce numéro est dense et riche en articles techniques mais aussi en invitations à découvrir les activités actuelles et à venir de la CWE PSS. Il comprend la **convocation à l'assemblée générale Statutaire 2023** de notre asbl : une AG importante qui doit adapter nos statuts pour les rendre conformes à la nouvelle législation.

Sprimont où se déroulera notre AG est d'ailleurs au centre de votre magazine, avec des articles qui ont directement trait à la géologie et au karst local :

- **La grotte du Noû Bleû** constitue un véritable laboratoire pour la recherche souterraine. L'étude géochimique des **enduits noirs** sur les parois, menée il y a quelques mois, est loin d'avoir percé le mystère de cette pellicule sombre. Les analyses des concentrations en manganèse, en fer et en matière organique laissent plusieurs hypothèses possibles quant à leur origine.
- La fin du 19^{ème} siècle fut l'âge d'or du développement des carrières de pierre à Sprimont, où l'on exploitait à la fois le calcaire et le grès. Ce passé industriel et les découvertes paléontologiques et archéologiques qui y sont associées sont présentées au **Centre d'Interprétation de la Pierre**. Rouvert en septembre 2022, il présente la pierre (en particulier le calcaire) de manière originale, ludique et participative.

Nous publions aussi la topographie inédite de la **Diaclase D5 de Loverval**, petit conduit karstique au patrimoine archéologique intéressant (ossements mésolithiques), mais dont la localisation exacte et l'état étaient mal documentés avant ces travaux du GSC.

Enfin, sécheresse oblige, nous vous proposons de découvrir les techniques de **recharge maîtrisée des aquifères** et leur possible adaptation aux nappes calcaires pour contribuer à une gestion quantitative et qualitative de la ressource en eau.

Bonne lecture à tous !

ENDUITS NOIRS DE LA GROTTE DU NOÛ BLEÛ (SPRIMONT)

De fins dépôts noirâtres enduisent parfois les parois des grottes ou la surface de galets roulés en zone inondable. Ils sont souvent attribués à la présence de films de dioxyde de manganèse (MnO_2), tout comme il est courant d'imputer la couleur ocre des concrétions aux oxydes de fer. Cependant, l'analyse chimique des concrétions rougeâtres montre souvent qu'elles ne contiennent pas de fer, mais de la matière organique incorporée à la calcite (Gascoyne, 1977 ; Ek et Gewalt, 1986).

Qu'en est-il exactement des dépôts noirs ? Contiennent-ils tous toujours des oxydes de manganèse ? Un récent guidage au Noû Bleû a relancé cette question en observant l'enduit noir, mince et collant recouvrant des dépôts de sédiments argileux sur les parois inondables de la grotte. Quelques prélèvements ont été réalisés à des fins d'analyses.



Fig. 1. La voûte de ce passage bas de la rivière Déom au Noû Bleû, parfois noyé, montre un enduit noir qui contribue à l'ambiance sombre de la galerie (photo Gaëtan Rochez).

Dans son mémoire traitant de la relation entre couleur et composition chimique des dépôts en grotte, Gwendoline Derwahl s'est intéressée aux concrétions et s'est également penchée sur ces fameux dépôts noirs (Derwahl, 2000). Sa synthèse bibliographique retrace l'histoire de l'étude déjà ancienne du « MnO_2 » en grotte :

- Van den Broeck, Martel et Rahir (1910, Vol. 2, p. 61) évoquent déjà les oxydes de manganèse teintant certaines concrétions à la noirceur inhabituelle dans la grotte de Rosée.
- Vandebosch (1929, 1939) reprend aussi l'idée pour expliquer non seulement la couleur sombre de concrétions mais aussi la patine lustrée de galets de silex à Spy et à Ramoul.
- Ek et Gewalt (1986) notent le lien entre le manganèse et les microorganismes dans certaines concrétions de coloration sombre.
- Hill et Forti (1986, 1997) consacrent tout un chapitre de leur ouvrage « Cave minerals of the world » aux oxydes de manganèse en grotte.
- Dans son mémoire, Derwahl (2000) observe au microscope électronique à balayage (MEB) des enduits noirs sur des galets roulés et détecte à leur surface (cartographie aux rayons-X) du manganèse.

Nous avons voulu vérifier et quantifier par nous-mêmes la présence de manganèse dans les enduits noirs du Noû Bleû en ayant recours aux seules analyses chimiques des éléments métalliques (spectrométrie d'émission atomique à la torche à plasma) et du carbone organique / inorganique. Cinq échantillons prélevés à la fin décembre 2022 ont été analysés, en y recherchant principalement trois constituants : le manganèse, le fer et la matière organique.

Résultats et interprétations

Dans les 5 échantillons prélevés, les concentrations en trois composants colorés (Mn, Fe, et carbone organique total, COT) susceptibles de contribuer à la noirceur des dépôts en paroi ont été mesurés. L'utilisation d'un élément trace (le baryum) comme indicateur d'un oxyde hydraté de manganèse (la psilomélane) a également pu être testée.

Composants majeurs colorés

La teneur en manganèse (Mn) des enduits noirs est comprise entre 1 et 8 % (masse sèche). Celle du fer (Fe) varie de 2 à 5 % m, tandis que celle du carbone organique total (COT) va de 0.075 à 3.2 % m. À côté du manganèse, il apparaît donc que le fer et la matière organique s'accumulent aussi dans les enduits noirs et que leur présence ne peut être négligée.

L'échantillon 4 (pellicules sèches collectées à l'entrée de la galerie Lafayette) se distingue nettement des trois autres prélevés sur une couche d'argile humide. Ce sont ces pellicules sèches qui contiennent le plus de manganèse et le moins de fer et de carbone organique (fig. 2). Pour les trois échantillons (5, 6 et 7) prélevés sur de l'argile humide, la concentration en manganèse est toujours inférieure à celle du fer et de la matière organique (COT).

Les concentrations en Mn ou Fe restent assez modestes en comparaison avec celles des concrétions d'oxydes amorphes hydratés de Mn-Fe baptisées « wads » en anglais, l'équivalent de la limonite pour le manganèse ($MnO_2 \cdot nH_2O$) où elles peuvent atteindre plusieurs dizaines de pourcents (Brunet, 2006, p. 13).

Les teneurs en Mn, Fe et matière organique (COT) mesurées dans les enduits noirs sont globalement du même ordre de

grandeur dans la fourchette des 1 – 8 % en masse sèche et relativement variables, et toujours nettement supérieures à celles de la roche calcaire.

Chacun de ces trois composants (Mn, Fe et COT) est susceptible de contribuer à la couleur sombre des enduits noirs, même à des concentrations de l'ordre de quelques pourcents. Sur base de ces résultats, hormis pour les pellicules sèches récoltées à l'entrée de la galerie Lafayette (échantillon 4), il est donc difficile d'attribuer l'origine de la couleur noire des dépôts à un composant en particulier. Bien que les échantillons contiennent tous du manganèse à des teneurs significatives, aucun n'est constitué de MnO_2 pur, comme on aurait pu être incliné à le croire.

Relation baryum – manganèse

La présence de baryum dans la psilomélane, $(Ba, H_2O)_2Mn_5O_{10}$, un oxyde hydraté de manganèse, nous a donné l'idée de vérifier s'il existait une corrélation entre baryum et manganèse dans les 5 échantillons analysés (fig. 3).

Ce graphique montre une évolution linéaire inattendue. La valeur très élevée du carré du coefficient de corrélation ($R^2 = 0.9968$) est-elle le fruit du hasard, ou de la dilution fortuite de l'enduit noir par de l'argile ? Nous ne disposons que de 5 points de mesure ; il en faudrait davantage pour vérifier cette corrélation, mais la piste mériterait d'être suivie.

Comportement chimique de Mn et Fe et de la matière organique

À l'état réduit (en absence d'oxygène, en présence de matière organique...), le fer et le manganèse sont présents dans leurs états d'oxydation les plus bas et les plus solubles sous forme d'ions divalents Fe^{2+} et Mn^{2+} très mobiles dans l'eau.

Lorsque ces ions s'oxydent au contact de l'oxygène atmosphérique ou après la disparition de la matière organique, leur charge électrique augmente et leur forme chimique change (Fe^{3+} et Mn^{3+} , ou Mn^{IV}) ce qui a pour effet de diminuer drastiquement la solubilité des hydroxydes correspondants. $Fe(OH)_3$ est ~100 fois moins soluble que $Fe(OH)_2$ et le contraste est encore plus marqué entre Mn^{2+} et Mn^{IV} . Ces ions précipitent alors sous forme d'hydroxydes ou d'oxydes insolubles ($Fe^{III}_2O_3$ et $Mn^{IV}O_2$) plus ou moins hydratés et deviennent immobiles (Brunet, 2006).

Si des conditions réductrices se rétablissent à nouveau, les oxydes de fer (III) et de manganèse (IV) seront remobilisés et la matière organique pourra former des complexes avec les ions Fe^{2+} et Mn^{2+} aug-

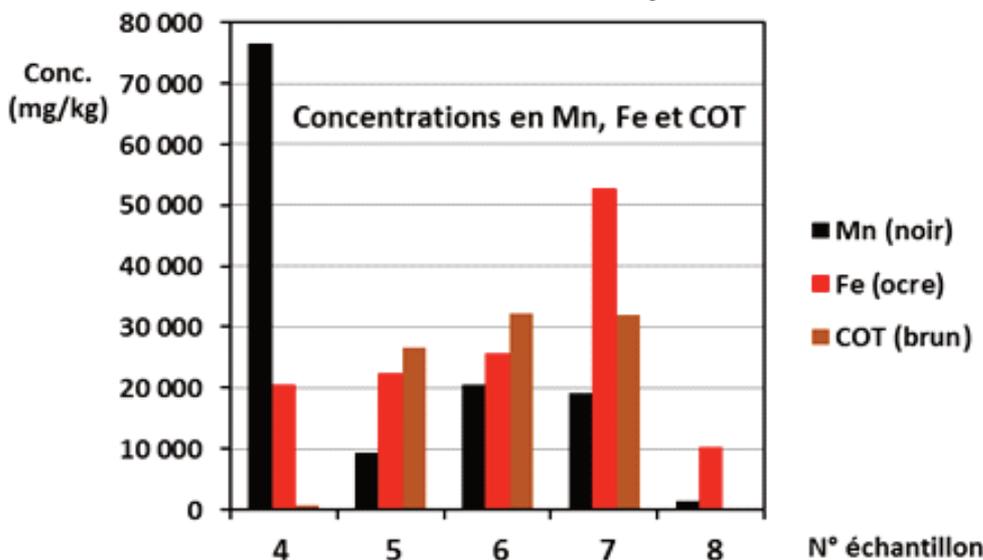


Fig. 2. Répartition des concentrations en manganèse (Mn, noir), fer (Fe, rouge ocre) et matière organique (COT, brun) dans les 5 échantillons analysés : 4 = pellicules d'enduit sec ; 5, 6 et 7 = enduits noirs sur dépôts d'argile humide ; 8 = roche calcaire pour comparaison. 10 000 mg/kg = 1 % (masse/masse).

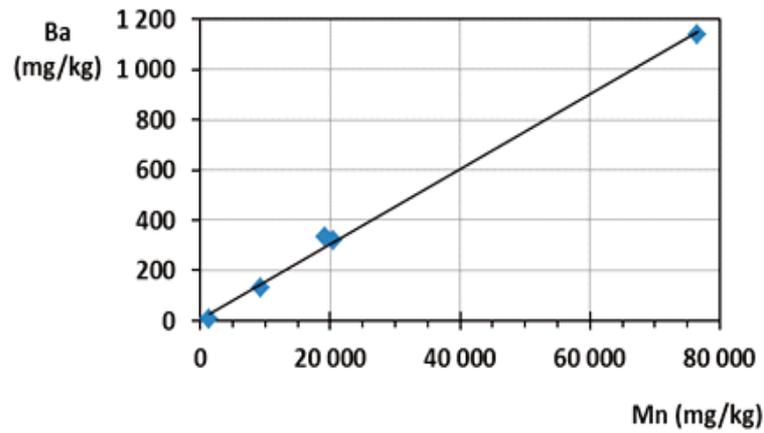


Fig. 3. Corrélation observée entre le baryum (Ba) et le manganèse (Mn) dans les cinq échantillons analysés. Le calcaire (N°8) se situe près de l'origine des axes tandis que l'échantillon N°4 (pellicules d'enduit sec) est situé dans le coin supérieur droit.

Bibliographie

- Allard, S., Gutierrez, L., Fontaine, C., Croué, J.-P., & Gallard, H. (2017). Organic matter interactions with natural manganese oxide and synthetic birnessite. *Science of the Total Environment*, 583, 487–495. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.120>
- Brunet, J. F. avec la collaboration de D. Artignan (2006). *Synthèse bibliographique sur l'élimination du manganèse dans les eaux d'origine minière*. Rapport final. 94 pp. Document public. BRGM/RP-54479-FR. Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), France. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-54479-FR.pdf>
- Chorover, J., & Amistadi, M. K. (2001). Reaction of forest floor organic matter at goethite, birnessite and smectite surfaces. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(1), 95–109. Sorption isotherm of natural organic matter (NOM): birnessite (limited retention capacity of only 2 g C/kg), goethite (10.5 g C/kg, with a steep initial isotherm slope) and smectite (10.5 g C/kg, with a more linear isotherm evolution). [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00511-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00511-1)
- Derwahl, Gwendoline (2000). *Dépôts en grottes. Relations entre couleur et composition chimique*. Mémoire présenté pour l'obtention du titre de licencié en sciences géographiques. Année académique 1999–2000. Université de Liège (ULg). 141 pp. UBS 3162.
- Ek, C., & Gewalt, M. (1986). Composition cationique de trois concrétions colorées de la grotte de Ramioul. *Bulletin de la Soc. Roy. Belge d'Etudes géologiques et archéologiques. Les Chercheurs de la Wallonie*, (27), 37–45.
- Gascoyne M. (1977). Trace element geochemistry of speleothems. Proceedings of the 7th International Speleological Congress, Sheffield, England, 205–207.
- Hill C.A., Forti P. (Eds) (1997) *Cave minerals of the world*, 2nd edition. National Speleological Society, Huntsville, AL, 463 pp.
- Hubart, J.-M., Xhaard P., Dumoulin P., Monsieur R., Roosens J.-P., et Detrier M. (2003). La grotte Nicole (Province de Liège, Belgique). *Bulletin des Chercheurs de la Wallonie XLII* (42): 97–110.
- Stroes-Gascoyne, S. (1983). *Adsorption behaviour of delta-manganese dioxide in relation to its use as a resin in trace metal speciation studies* (Doctoral dissertation). <https://macsphere.mcmaster.ca/bitstream/11375/8716/1/fulltext.pdf>
- Van den Broeck, E., Martel, É. A., & Rahir, E. (1910). *Les cavernes et les rivières souterraines de la Belgique* (Vol. 2, p. 61). Édité par les auteurs.

Merci à Georges Michel pour son soutien et sa relecture attentive de notre texte.

Pierre De Cannière,
Nicolas Graindorge &
Albert Briffoz

mentant leur solubilité. Cependant, la matière organique dissoute peut aussi venir simplement se fixer à la surface des particules insolubles d'oxydes de fer et de manganèse et ainsi s'immobiliser à son tour (Chorover et Amistadi, 2001 ; Allard *et al.*, 2017).

Les oxydes de manganèse, notamment la birnessite ($Mn^{IV}O_2 \cdot nH_2O$), peuvent aussi l'oxyder et la dégrader. Les oxydes de manganèse, surtout la birnessite, sont des solides très réactifs capables d'adsorber quantité d'ions de métaux de transition (Stroes-Gascoyne, 1983). Cependant, son affinité pour la matière organique est moindre que celle des oxydes de fer et des argiles (Chorover et Amistadi, 2001) en raison de ses propriétés de surface, comme on peut d'ailleurs l'observer à la figure 2 pour l'échantillon 4 (pellicules d'enduit sec) le plus riche en Mn et aussi le plus pauvre en matière organique.

Conclusion

Sur base de nos quelques analyses, il est difficile d'attribuer l'origine de la couleur noire des dépôts prélevés au Nouû Bleû à un composant en particulier car les échantillons plus riches en argile contiennent à la fois du manganèse, du fer et de la matière organique en concentration suffisamment importante que pour avoir une influence sur la coloration des dépôts.

La nature des enduits noirs observés en grotte peut donc s'avérer nettement plus complexe que celle de simples oxydes de manganèse, tel que nous l'imaginions au départ, car ils peuvent également contenir du fer et de la matière organique. Le manganèse apporte uniquement une contribution significative (~ 8 % masse sèche) dans le cas de l'échantillon (N°4) de pellicules sèches prélevées au début de la galerie Lafayette. La corrélation entre les concentrations de baryum et de manganèse dans les enduits noirs analysés nous incline cependant à ne pas négliger la piste des oxydes de manganèse, dont celle de la psilomélane riche en baryum.

À côté des aspects abiotiques, les seuls abordés dans cette brève étude, il y a lieu de ne pas négliger l'activité des micro-organismes et aussi le rôle joué par des organismes plus évolués comme les champignons dont les sclérotés (amas compacts, noirs et indurés de filaments de mycélium assurant leur reproduction après des conditions difficiles) noircissent parfois aussi les parois de cavités dans la zone de battement des eaux, comme observé à la grotte de Ramioul et à la grotte Nicole toute proche (Hubart *et al.*, 2003).



Fig. 4. Prélèvement par raclage de la surface noire de l'argile humide (photo : Albert Briffoz).

KARST ET GROTTES DES SARRAZINS (LOVERVAL). ACTUALISATION DES DONNÉES ET TOPOGRAPHIE INCULANT LA DIACLASE D5

Dans les *Eco Karst* n° 117 [1] et n° 126 [2], nous vous décrivions les phénomènes karstiques du bois du Prince, en évoquant le cours tant aérien que souterrain du ruisseau du Fond des Haies, à cheval sur les communes de Loverval (Gerpennes) et de Marcinelle (Charleroi), et la manière dont ce petit ruisseau avait été impacté par les crues majeures de juillet 2021.

La grotte des Sarrazins toute proche, est perchée sur le versant est du ruisseau du Fond des Haies. Son exploration spéléologique est terminée depuis bien longtemps, mais c'est à la faveur d'une actualisation des études archéologiques que nous avons pris plaisir à retourner dans les environs et à nous intéresser de près à une galerie voisine. Mentionnée dans la littérature (en particulier dans les écrits archéologiques, pour son gisement mésolithique), sous le nom de « Diaclase D5 de Loverval », cette dernière est très peu connue, et méritait pourtant de recevoir quelques honneurs...

Géologie des lieux

Sous couverture boisée, le ruisseau et ses affluents ont exploité une petite « écaille de calcaire » (chevauchement majeur lié à la Faille du Midi) située au sud de Charleroi, composée de calcaires carbonifères viséens (formation du Houyoux). On y trouve un système karstique complet, constitué de pertes, de résurgences et de phénomènes fossiles (dont quelques conduits pénétrables). Ainsi, le ruisseau du Courtilonnet et le ruisseau de la Ferrée évoluent de façon mi-aérienne, mi-souterraine. Ils se rejoignent sous la surface avant d'atteindre la résurgence des Sarrazins, au contact des schistes houillers du Carbonifère namurien qui sont imperméables et qui constituent un seuil hydrologique, forçant les eaux souterraines à remonter en surface (parfois même sous pression lorsque le débit est important).

La grotte (ou « les grottes » dans certaines littératures) des Sarrazins est située une dizaine de mètres au-dessus du cours d'eau actuel (où se trouve la résurgence des Sarrazins). La grotte est composée d'un ensemble de conduits souterrains qui correspondent à d'anciens

niveaux de résurgences, situés actuellement à flanc de coteau.

Ce réseau karstique se serait formé durant la seconde moitié du Tertiaire, selon Robert Fourneau [3]. Il aurait été grignoté

par l'élargissement et l'approfondissement du vallon pendant le Quaternaire pléistocène.

Ces vieilles résurgences ont fini par s'assécher et devenir fossiles à cause de l'approfondissement de la vallée. Les vestiges encore visibles de ce système hydrologique « perché » sont les quatre porches d'entrée des Sarrazins, bien connus des randonneurs qui parcourent les sentiers de promenade.

Des coups de gouge remarquables, sur le porche n° 1 (fig. 2), confirment bien le sens de l'ancien écoulement de l'eau « vers l'extérieur ». Les différents porches portent les signes d'éboulements qui ont marqué le recul du versant tandis que, vers l'intérieur du versant, les conduits se confondent en cavités remplies de colluvions.



Fig. 2. Vu depuis l'intérieur, le porche n° 1 de la grotte des Sarrazins laisse voir de beaux coups de gouge sur tout son pourtour.

Grotte des Sarrazins (Loverval) - Coupe projetée Est-Ouest

50,367499°N 4,459216°E

Octobre 2018 - Février 2023

GSC asbl et CWPSS asbl

Synthèse et dessin : D. Lefebvre

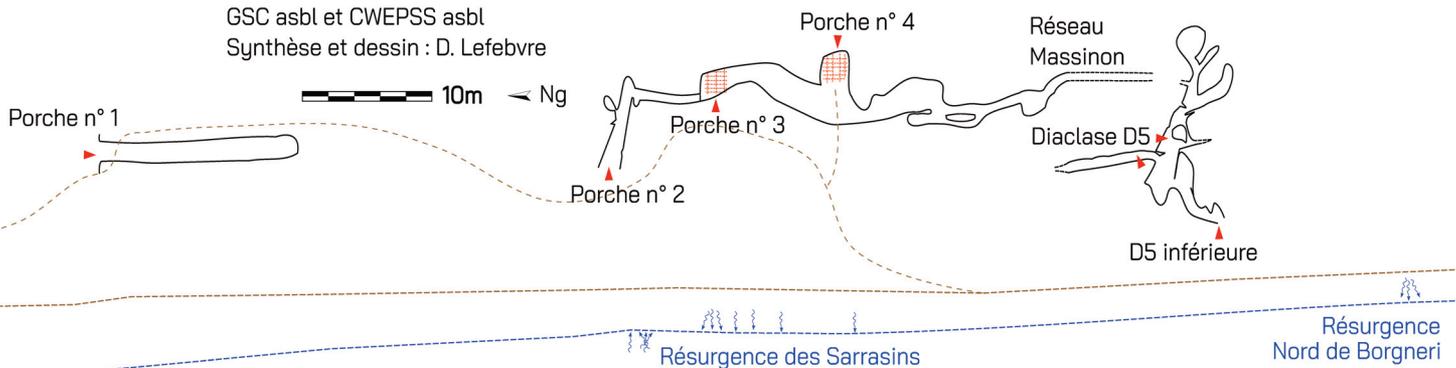


Fig. 1. Représentation en coupe des conduits karstiques alignés sur le versant de la Ferrée et qui correspondent à des résurgences fossiles.

D'anciens habitants de Loverval affirmaient également que, sous la galerie du premier porche, on en trouvait une autre plus longue encore (200 mètres ?), qu'un effondrement a rendue inaccessible. Cela est plausible ; cependant, une vérification sur le terrain nécessiterait de devoir dégager une trop grande quantité de déblais pour un résultat bien incertain. [4]

Découvertes archéologiques par le CASM

Des vestiges archéologiques trouvés en surface (essentiellement dans les champs) sur les hauts plateaux des environs, ont démontré que l'homme préhistorique occupait la région. Vu que la grotte des Sarrazins présente les caractéristiques d'habitat préhistoriques, le Cercle d'Archéologie et de Spéléologie de Marcinelle (CASM) y a débuté des fouilles en 1962. Ils y découvrirent des ossements d'ours des cavernes, de mammouth et d'autres animaux quaternaires. La voûte du porche n° 4 (fig. 3) s'est effondrée entre deux séances de fouille, ce provoqua le découragement de l'équipe et l'abandon du site à des prospections sauvages.

Entre 1971 et 1973, les recherches encadrées par Philippe Doumont ont repris et les artefacts collectés attribués au Paléolithique supérieur. On y a notamment découvert des bois de renne travaillés, des lames, raclettes et grattoirs en silex, ainsi que des esquilles d'os travaillées, des dents et des os de rhinocéros laineux. Les fouilles ont été arrêtées une nouvelle fois et le site a de nouveau été en proie aux pillards.

Quelques jours après la reprise des fouilles en 1978, les spéléologues du CASM ont constaté qu'une partie de la voûte s'est effondrée à l'intérieur de la grotte n° 4 des Sarrazins, laissant apparaître une fissure et deviner un vide par derrière. Une fois celle-ci élargie, un nouveau réseau, baptisé Massinon, a été découvert. L'intérieur présente draperies, excentriques, colonnes et autres spéléothèmes tandis qu'à même le sol, se trouvaient encore de nombreux fragments d'os de rhinocéros, dents de cheval et autres outils en silex.

Parmi les déblais rejetés par les fouilleurs clandestins, le CASM a encore trouvé de nouvelles pièces, dont un bois de renne gravé d'une tête de cheval.

À l'heure actuelle, une partie de ces vestiges peut être admirée au musée Marcel Collet, lié à la bibliothèque de Loverval. D'autres pièces sont probablement encore détenues par des particuliers.



Fig. 3. Le porche n° 4 des Sarrazins a connu un effondrement en 1962 ou 1963. Son accès est actuellement défendu par une grille, placée pour protéger les chauves-souris.

Fouilles de la diaclase D5

Le complexe souterrain des grottes des Sarrazins comprend une cinquième entrée, bien cachée dans le vallon, à laquelle aucun sentier balisé ne mène... Cette entrée était une simple diaclase de 4,5 mètres de longueur pour 1 mètre de largeur, couverte à moitié par un plafond à 4 mètres de haut (fig. 4). La cavité a été approfondie par Georges et Jacqueline Dubuis, marcinellois qui y ont entamé des fouilles en 1983 [6]. Couche après couche, les inventeurs ont creusé le sol de la diaclase. Dans la couche située entre 86 et 112 centimètres de profondeur, ils ont trouvé des ossements d'animaux : ours brun, cheval, loup, chat sauvage, blaireau, renard.

Plus important encore, dans la même couche, les inventeurs ont découvert plusieurs ossements humains (crânes, os post-crâniens, côtes, vertèbres, péronés, mandibules, fémurs, etc.) appartenant à deux défunts distincts. Les squelettes n'étaient pas entiers. Les os étaient fragmentés et abondamment bouleversés dans la sépulture, dispersés sur toute la longueur du gisement (probablement par l'action d'animaux fouisseurs comme les blaireaux, au cours des millénaires qui ont suivi les inhumations).



Fig. 4. Dans la barre rocheuse dominant le ruisseau de Ferrée, on distingue la Diaclase D5 (sur la droite) et une galerie horizontale annexe (sur la gauche).

L'étude des ossements a été réalisée par Michel Toussaint. Quelques années après la découverte, la datation des fragments humains a montré un écart de plusieurs centaines d'années, ce qui démontre que les inhumations, individuelles, furent successives. On sait également que les deux défunts étaient des adultes, vraisemblablement de sexe féminin. [7]

Georges et Jacqueline Dubuis ont poursuivi le creusement de la diaclase à la verticale jusqu'à atteindre une galerie inférieure débouchant sur une petite entrée secondaire du réseau, à la cote de 5,5 mètres. Parallèlement à cela, ils ont trouvé un accès à une autre galerie à la cote de 4,5 mètres face à la lèvre de la principale de D5. Cette partie était occupée par un éboulis, dans lequel de nombreux ossements ont encore été trouvés, principalement d'ours des cavernes, ours brun, rhinocéros laineux, hyènes, cervidés, loups, chevaux et panthères.

Notre revisite en 2022

En 2022, contactés par Michel Toussaint qui souhaitait visiter les lieux afin de pouvoir poursuivre son étude des ossements de la diaclase D5, nous y sommes retournés en sa compagnie. Nous avons alors topographié la diaclase pour étendre le travail réalisé trois ans plus tôt sur la grotte des Sarrasins.

La petite galerie qui débute au bas de la diaclase et se dirige vers l'intérieur du massif calcaire, presque perpendiculairement à l'axe du vallon, présente une pente montante de 25°. La galerie s'élargit en changeant légèrement d'orientation, puis la pente s'accroît et, pour atteindre la suite, il est nécessaire d'escalader le long d'une arche rocheuse. On arrive ensuite à un carrefour stratégique.

Une branche étroite vers le haut permet d'arriver dans une salle terminale de deux à trois mètres de diamètre, dont le plafond et les parois sont presque intégralement couverts d'argile. Il est très probable que cette salle ait été créée par un effondrement relativement récent. Elle est très proche de la surface et de nombreuses racines d'arbre peuvent y être observées. L'effondrement ne semble pas visible en surface.

Dans la partie médiane de la Diaclase D5, nous avons trouvé des sédiments argileux provenant de cette salle terminale, que nous avons d'ailleurs dû déblayer un peu pour pouvoir passer.

Les deux autres branches du carrefour sont colmatées soit par de gros blocs, soit

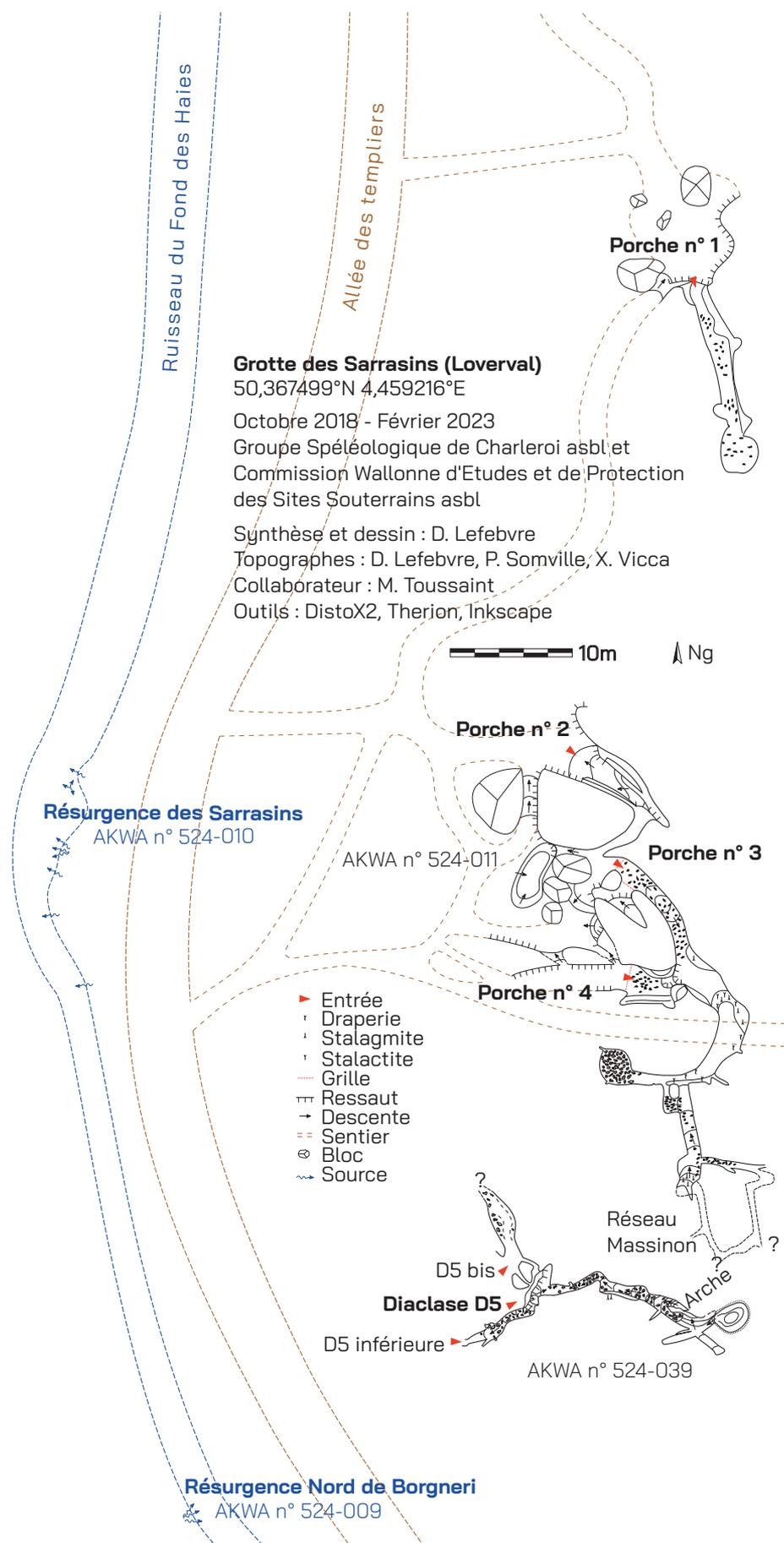


Fig. 5. Représentation en plan du complexe karstique constitué par les grottes des Sarrasins, avec coté sud la Diaclase D5.

par des cailloux emprisonnés dans de l'argile compacte (brèches).

De retour au carrefour, il est impossible de manquer, parmi d'autres blocs coincés au plafond, deux gros fragments de concrétions différentes d'une vingtaine de centimètres de diamètre chacune (fig. 7). Celles-ci laissent donc supposer que, au-dessus des vestiges karstiques actuels, se trouvait autrefois un grand vide et qu'un important processus de dissolution et de re-précipitation du carbonate de calcium avait lieu dans les environs.

La topographie, que nous avons complétée par des visées extérieures entre les différentes cavités de la grotte des Sarrazins, montre que la distance entre les réseaux D5 et Massinon est de quelques mètres à peine. Selon nos mesures topographiques, le réseau Massinon se situe à la même altitude que l'arche et l'étréouire montant à la salle argileuse terminale.

Dans la grotte des Sarrazins, il ne nous avait pas été possible de pénétrer l'un des accès à la boucle du réseau Massinon. Cette branche s'est manifestement obstruée postérieurement aux explorations du CASM, ce qui fait que nous avons donc représenté la boucle sur la topographie par des traits discontinus en nous basant sur les tracés de la topographie de l'ASAR [4].

Conclusion

Par cette étude, nous ajoutons une modeste pièce au puzzle incomplet de la grotte des Sarrazins. Les concrétions coincées au plafond confortent les remarquables coups de gouge du porche n° 1, montrant que le système karstique devait autrefois être intensément actif.

Mais aussi...

Si Michel Toussaint nous a demandé une visite, c'était également dans le but d'avoir une topographie qui, à notre connaissance, ne semblait pas exister pour le réseau D5.

Le plan et la coupe devraient permettre d'y reporter les positions des ossements trouvés par Georges et Jacqueline Dubuis...

Daniel LEFEBVRE &
Pascale SOMVILLE

Groupe Spéléologique de Charleroi

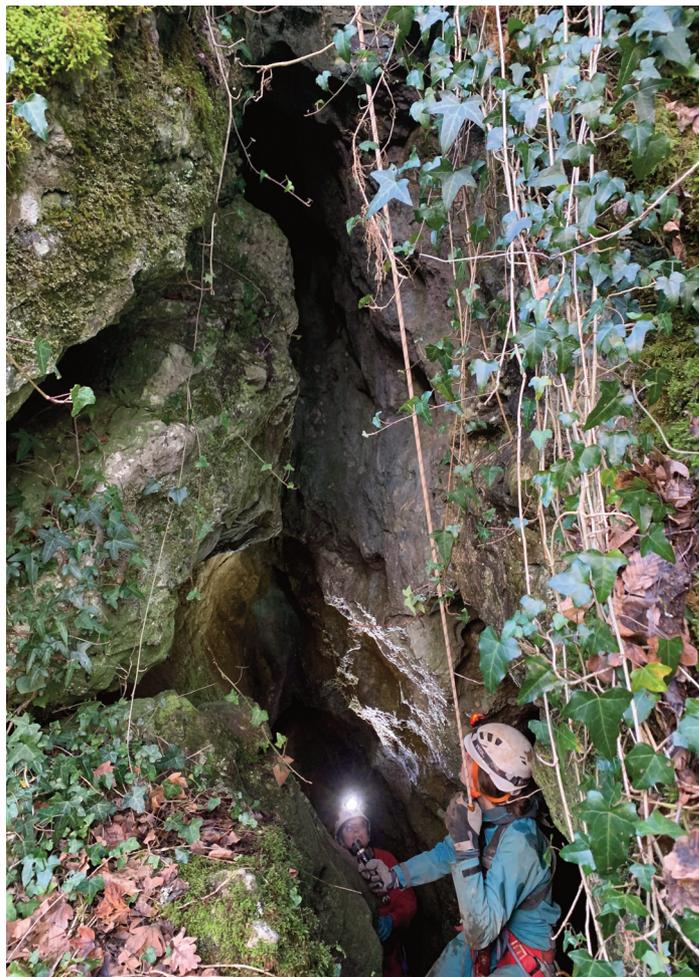


Fig. 6. L'accès à la Diaclase D5 (vue ici depuis sa lèvre) nécessite un peu descalade.

Bibliographie

- [1] Xavier Vicca, Itinéraire Karstique des Sarrazins, in Eco Karst n° 117, Commission Wallonne d'Etudes et de Protection des Sites Souterrains (CWEPSS) asbl, septembre 2019
- [2] Daniel Lefebvre, Le ruisseau du Fond des Haies, de la Discretion à la Dèmesure, in Eco Karst n° 126, Commission Wallonne d'Etudes et de Protection des Sites Souterrains (CWEPSS) asbl, décembre 2021
- [3] Robert Fourneau (Centre National de Recherches Géomorphologiques), Le Karst de la Région de Charleroi, in Revue Belge de Géographie, 106ème année, 1982, fascicule 1
- [4] Robert Fourneau, La Ceinture Boisée de Nalinnes-Marcinelle-Loverval : Aperçu Géomorphologique, in Natura Mosana, volume 27, n° 1-2, janvier-juin 1974, pp. 1-18
- [5] Guy Laurent, Grotte des Sarrazins, in Paléo-Contact n° 2, Association de Spéléologie, d'Alpinisme et de Recherche (ASAR) asbl, 1979
- [6] Gorges Dubuis et Jacqueline Dubuis-Legentil, La Sépulture Mésolithique de Loverval : 9.000 ans, collection Service Archéologique de la Région de Charleroi (SARC) asbl, 1.993/5.567/2
- [7] Michel Toussaint, Les sépultures mésolithiques du bassin mosan wallon : où en est la recherche en 2010 ?, in Bulletin des Chercheurs de la Wallonie, hors-série n° 2, 2010, pp. 69-86



Fig. 7. Restes de stalactites brisées et autres blocs coincés au plafond, à la fin du réseau D5.

LE CENTRE D'INTERPRÉTATION DE LA PIERRE (SPRIMONT) UN AUTRE REGARD SUR LA PIERRE



Le territoire de la commune de Sprimont est intimement lié à l'exploitation passée, mais également actuelle, de la pierre. La commune a été littéralement forgée par les carrières, qu'elles soient de grès ou de calcaire : elles ont permis le développement économique de l'entité, elles ont marqué les paysages sur les deux rives de l'Amblève ou de l'Ourthe et ont même parfois été à l'origine de découvertes de cavités remarquables (on pense ici en particulier aux grottes de la Belle Roche et du Noû Bleû, mais aussi au réseau Enfer-Fissure ou à la grotte Persévérance, explorée par le CRSOA dans la carrière Rondia).

La fin du 19^e siècle correspond à l'âge d'or des carrières à Sprimont. À cette époque, le nombre de sites d'exploitation se multiplie et on compte sur le territoire de cette seule commune plus de 1.000 ouvriers qui extraient, travaillent et taillent « le caillou ». Quelques années plus tard, le vicinal va grandement faciliter l'exportation des blocs de pierre. Les rails arrivent jusque dans les sites d'exploitation pour être emmenés vers Liège, où ils servent l'extension de la ville. Ils seront aussi exportés bien plus loin par voie d'eau à partir du port fluvial sur la Meuse.

L'entre-deux guerres marque une profonde mutation et une crise du secteur. Jusqu'alors la pierre est LE matériel de construction incontournable. Elle est progressivement remplacée par des substituts moins coûteux, tels que le béton, la brique, le verre ou le macadam. Les carrières ne vont pas toutes disparaître, mais celles qui poursuivront leur activité auront se réinventer à totalement en s'orientant vers la production de chaux ou de concassé. Ces matériaux étant très demandés par les travaux publics et le sous-bassement du réseau routier. Cette nouvelle production s'accompagne d'une réduction drastique du personnel et d'une mécanisation accrue de l'activité extractive. On estime aujourd'hui à une cinquantaine le nombre de carriers en activité sur le territoire de Sprimont, alors que les volumes de pierre extraits par ce petit nombre de travailleurs restent aussi importants que lors de l'âge d'or de cette industrie dans la région.

Un site emblématique

L'exploitation de la pierre a non seulement sculpté les paysages, mais aussi les hommes. C'est dans l'optique de présenter au mieux ce patrimoine industriel, économique, géologique, archéologique et humain qu'a été repensé le Musée de la Pierre de Sprimont, rebaptisé Centre d'Interprétation de la Pierre (CIP). Nous avons eu la chance de parcourir cet espace unique en compagnie de sa conservatrice, au début de ce mois de mars. Si le bâtiment à lui seul vaut déjà la visite, dans les salles, tout est fait en termes de médiation et d'interactivité pour accrocher les différents publics. Nous vous présentons quelques caractéristiques de ce musée et vous encourageons vivement à en pousser la porte à votre tour, pour partir à la découverte de la pierre.

Depuis 1985, le musée a élu domicile au sein de l'ancienne centrale électrique des carrières de Sprimont. Édifiée en 1905 sous l'impulsion du directeur de l'époque, Mathieu Van Roggen, la centrale fut dotée d'un équipement technologique de pointe. Conçue comme une vitrine de la carrière, elle mettait l'énergie électrique sur un véritable piédestal : les machines étaient posées sur un sol en granito ; deux statues en l'honneur de Zénobe Gramme encadraient la pièce maîtresse du bâtiment : un tableau électrique Art nouveau.

Un patrimoine à marquer d'une... pierre blanche

Classé en 1988 comme monument en raison de sa valeur architecturale, le bâtiment a fait l'objet d'importants travaux de rénovation. Ceux-ci ont notamment permis la création de nouveaux espaces dédiés à des événements culturels ou d'entreprise, mais ont aussi donné vie à un tout nouvel espace muséal au cœur de ce lieu chargé d'histoire, dans le plus grand respect de ses matériaux et de son ancrage industriel. Après 7 ans de travaux intenses, le Centre d'interprétation de la Pierre (CIP) a ainsi ouvert ses portes au public le 25 septembre 2022.

La pierre mise en lumière

L'ambition du CIP est d'offrir à tout un chacun un nouveau regard sur la pierre, au travers d'une exposition ludique, interactive et didactique. Ses 450 m², répartis sur plusieurs salles, abordent une multitude de thématiques : la géologie, les aspects historiques, scientifiques ou encore artistiques. C'est un véritable plongeon dans le temps au travers de l'histoire de la pierre sous toutes ses facettes, depuis l'apparition de la vie sur Terre jusqu'à nos jours.

Si au premier abord, le thème principal de la pierre peut sembler aride et quelque peu... « anguleux », lorsqu'on plonge au cœur de cet univers, on peut y faire des découvertes sensationnelles, qu'on soit grand ou petit. Les pierres regorgent de mille et un trésors et offrent une nouvelle vision du monde. Le slogan de l'espace muséal parle de lui-même : « Vous ne verrez plus jamais votre environnement de la même manière ».



Fig. 1. Le Quaternaire (dont les découvertes à la Belle Roche) et l'histoire des carrières, des techniques et des métiers qui y sont associés, sont présentés dans la salle des machines de l'ancienne usine électrique.

“Il faut le reconnaître, offrir un autre regard sur la pierre est un véritable défi. Pourtant, elles font pleinement partie de l’Histoire de la Terre, mais également de notre patrimoine qu’il convient de préserver. L’espace muséal a été mûrement réfléchi afin d’emmener les visiteurs au cœur d’un merveilleux voyage à la découverte des fossiles, de l’environnement géologique, de la paléontologie et l’archéologie, du fonctionnement d’une centrale électrique dans un lieu chargé d’histoire, au cœur d’une carrière toujours en activité”, souligne Céline Moureau, Conservatrice.

Loin des musées poussiéreux, le CIP a eu recours à l’agence Brainmade pour concevoir une scénographie d’exception. L’espace muséal se veut un lieu d’échange, de découverte, de sensibilisation, mais aussi d’encouragement à la curiosité dès le plus jeune âge (à partir de 2 ans).

La part belle est faite à l’expérimentation, à l’animation et l’observation, en faisant appel aux différents sens du visiteur tels que la vue ou le toucher.

Focus sur le karst et le site de la Belle Roche

La transmission du patrimoine est un des axes de développement du projet scientifique et culturel du CIP. Cette approche à la fois participative et centrée sur la découverte a également été adoptée pour parler du karst et du site archéologique et

paléontologique remarquable de la Belle Roche.

Pour le karst, les plus jeunes (mais ça marche AUSSI pour les adultes !) font face à un ensemble de cubes en mousse qui représente les multiples aspects d’un massif karstique, évoquant le travail de l’eau dans l’altération de la roche, la formation des grottes mais aussi l’alimentation de vastes nappes aquifères. Il leur faudra reconstituer un massif calcaire en remplaçant les blocs dans un ordre logique. Au delà de l’aspect ludique, ce dispositif permet de découvrir une vue du karst en trois dimensions (intégrant la profondeur) et d’y visualiser le trajet et l’action de l’eau.

La présentation de la **Grotte de la Belle Roche** et des études paléontologiques et archéologiques qui y ont été menées, bénéficie de plusieurs vitrines exposant non seulement des ossements et silex récoltés, mais aussi les approches scientifiques les plus récentes appliquées pour étudier un tel gisement. Une courte vidéo donne la parole est donnée aux scientifiques (archéologues, paléontologues / géologues) qui ont mené ces fouilles. Ils expliquent comment différencier un artefact (silex taillé par l’homme) d’un « géofact » (issu de l’action naturelle des éléments).

La coupe proposée de la grotte de la Belle Roche est particulièrement soignée et éclairante. On comprend toute la difficulté rencontrée par les fouilleurs qui ont dû tra-



Fig. 2. Chaque visiteur devient, le temps d’une visite, un détective-géologue découvrant, de manière ludique les fossiles, les différents types de roches et tous les usages qui en ont été faits dans la région.

vailer dans un karst totalement colmaté, où il a fallu déterminer différents niveaux stratigraphiques, afin de les dater et d’y associer une faune, un climat et les éventuels indices d’activités anthropiques.

En pratique

Situé Rue Joseph Potier 54, à 4140 Sprimont, le CIP est ouvert du mardi au vendredi de 9h à 17h (dernière entrée à 16h) et les dimanches de 10h à 17h. Parking gratuit.

Le lieu est entièrement accessible aux PMR. Un audioguide adapté aux malvoyants et malentendants est mis gratuitement à la disposition des personnes porteuses d’un handicap.

Prix d’entrée : 6€ pour les adultes, 5,5€ pour les 13-18 ans, étudiants et seniors (>65 ans), 5€ pour les 4-12 ans, gratuit pour les enfants de moins de 4 ans et le public scolaire. Comme dans les musées reconnus par la FWB, le premier dimanche de chaque mois est gratuit.

Animations et visites guidées pour les groupes, sur réservation.

Tél. : 04/382.21.95

E-mail : cip@sprimont.be

Site web : www.cip-sprimont.be

Georges MICHEL &
Laurence REMACLE

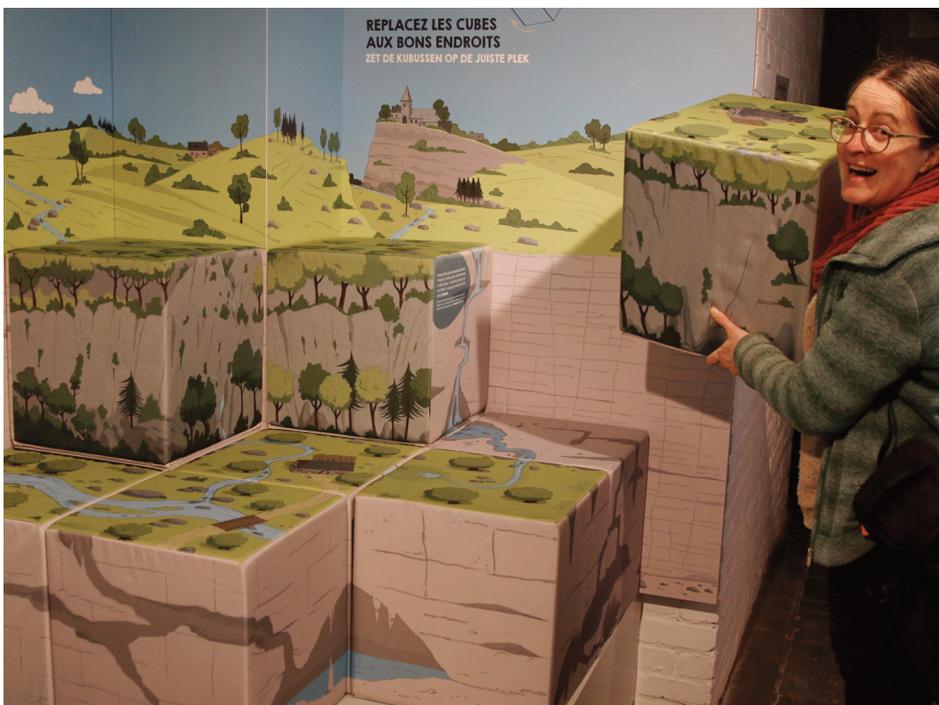


Fig. 3. À l’aide de cubes en mousse, un véritable puzzle karstique en 3D permet de plonger au cœur du massif calcaire pour y observer et comprendre le travail de l’eau.

CONVOCAATION À L'ASSEMBLÉE GÉNÉRALE STATUTAIRE 2023 DE LA CWPSS

Centre d'Interprétation de la Pierre (Sprimont), dimanche 23/04/2023

L'assemblée générale de la CWPSS se tiendra le **23 avril 2023 dès 10h** au Centre d'Interprétation de la Pierre (CIP), rue Joseph Potier, n° 54 à 4140 Sprimont.

Nous convions tous les membres effectifs en ordre de cotisation à cette réunion, qui revêt une importance particulière cette année car elle doit adopter les nouveaux statuts de l'ASBL, comme l'exige la loi sur les associations. Le quorum de présence requis étant élevé, nous demandons **impérativement** à ceux qui ne pourraient pas être présents de **se faire représenter via une procuration**. À défaut, une seconde AG devra être convoquée (au minimum 15 jours après la première) !

Les membres adhérents sont également invités à participer à la journée (mais sans droit de vote lors de l'AG).

Une réunion au cœur du calcaire !

Un environnement pittoresque et éminemment karstique a été choisi pour cette journée, dans un secteur où la CWPSS fut particulièrement active ces derniers temps avec :

- la mise à jour et la publication de l'Atlas du Karst de l'Ourthe Amblève (Ourthe "3") à paraître bientôt...
- l'étude Epu Karst, où les systèmes de Remouchamps et du synclinal calcaire de Sprimont font l'objet de nos attentions.

L'espace muséal qui nous accueille occupe l'ancienne usine électrique des carrières de Sprimont, un bâtiment industriel "Art Nouveau" des plus originaux. L'article qui précède devrait vous donner envie de le découvrir...

Exceptionnellement, la traditionnelle "visite de terrain" de l'après-midi n'arpentera pas les versants pentus d'un cours d'eau karstique, mais sera consacrée à une visite exceptionnelle du CIP, guidée par F. Tourneur, spécialiste de la pierre et conseiller scientifique de l'espace muséal.

Ordre du jour de l'Assemblée Générale

1. Appel des membres effectifs présents et représentés.
2. Approbation du procès-verbal de l'A.G. 2022 (tenue à Bohon le 01/05/2022).
3. Rapport d'activités de l'année 2022 et projets en cours.

4. Présentation et approbation des comptes 2022 et du budget 2023.

5. Décharge aux administrateurs pour l'année écoulée.

6. Approbation des nouveaux statuts (conformité avec le Code des Sociétés et des asbl). Le projet en est accessible via ce lien : <https://www.cwepss.org/newsCalcaire.htm>

7. Élection des Administrateurs.

8. Divers et présentation de la visite de l'après-midi.

Candidatures des administrateurs

Le mandat d'administrateur est de 3 ans. Selon les statuts actuels, est sortant cette année et rééligible : Charles Bernard.

Avec la modification des statuts, il a été prévu de faire débiter en 2023 un nouveau cycle de mandats **pour l'ensemble des administrateurs**. S'ajoutent dès lors les candidatures de : Gérald Fanuel (président), Laurence Remacle (secrétaire), Jean-Benoit Schram (vice-président), Jean Pierre Liegeois, François Maréchal, Claude de Broyer (vice-président), Ann-Mary Francken (trésorière) et Francis Polrot.

Les nouvelles candidatures sont à adresser au secrétariat de la CWPSS par e-mail (contact@cwepss.org) ou éventuellement par courrier (avenue G. Gilbert, 20 à 1050 Bruxelles), avant le 15/04/2023. Merci d'y mentionner vos coordonnées complètes, votre n° de registre national, votre motivation et vos domaines de compétences particuliers en regard de cette fonction de gestion de l'association.

Programme du reste de la journée

Lunch: chacun apporte son pique-nique et boisson (en espérant pouvoir manger à l'extérieur si le temps est de la partie).

Pour la visite guidée du CIP, nous tablons sur 2h à 2h30.

Nous espérons que vous trouverez cette proposition alléchante et que nous pourrions vous retrouver nombreux et en bonne forme sur place.

*Pour la CWPSS,
Gérald Fanuel, Président*



Le Centre d'interprétation de la Pierre a élu domicile au cœur d'une ancienne carrière, entre les blocs de "petit granit".

LA RECHARGE MAÎTRISÉE DES AQUIFÈRES (MAR)

Stratégie pour une gestion quantitative et qualitative des ressources en eau

Les eaux souterraines constituent une ressource essentielle pour l'approvisionnement en eau potable mais aussi pour des usages industriels et agricoles (irrigation) qui, à l'échelle européenne et mondiale, représentent de loin le plus grand volume prélevé dans les nappes. En Wallonie, plus de 70 % des eaux potables sont captés dans des aquifères majoritairement calcaires, garantissant aux consommateurs une eau abondante et globalement de bonne qualité. Jusqu'il y a peu, ces nappes très productives mettaient notre pays à l'abri des problèmes de pénurie. Les efforts des autorités et des acteurs de l'eau se sont donc centrés sur la qualité (physico-chimique et bactériologique) de la ressource, avec un focus particulier sur les pesticides, les nitrates et plus récemment les polluants émergents. Un réseau de surveillance de l'état des nappes (et des eaux de surface) offrant un maillage très dense de stations de contrôle a été mis en place à cette fin.

De nombreux modèles numériques représentant les écoulements dans les hydrosystèmes sont développés, en simulant différents usages ou projections climatiques. Ces modèles facilitent la discussion et la prise de décision dans la gestion des eaux ; en Wallonie ils sont fréquemment utilisés et mis à jour à l'échelle des masses d'eau souterraines, tels que les aquifères de la craie et du calcaire carbonifère. Par ailleurs, des investissements considérables ont été consentis dans l'épuration des eaux usées pour rattraper le retard pris en matière d'égouttage et améliorer tant la qualité des eaux souterraines que de surface.



Fig. 2. Système de recharge traditionnel par puits à Delhi (Inde) – Photo Wolfram Kloppmann

Problématique quantitative

Depuis quelques années cependant, les préoccupations quantitatives concernant la ressource en eau, omniprésentes depuis toujours dans bon nombre de pays dont tous ceux du pourtour méditerranéen, sont d'actualité chez nous. Des sécheresses prononcées (liées aux changements climatiques) sont de plus en plus fréquentes et précoces, empêchant en hiver une recharge optimale de la nappe et imposant en été des prélèvements croissants. Dans certaines communes wallonnes, depuis 5 ans, des restrictions d'eau sont imposées chaque année aux habitants et aux agriculteurs.

Parallèlement, on constate une intensification des phénomènes de crues, avec un

apport d'eau trop massif et soudain, provoquant débordements et inondations, comme celles de juillet 2021 qui restent encore tragiquement dans toutes les mémoires.

Les aquifères qui offrent de grandes capacités de stockage agissent heureusement comme un régulateur et un tampon face aux fluctuations des précipitations. Cette capacité de stockage des nappes est essentielle et de nombreux chercheurs et ingénieurs tentent d'optimiser cette fonction, en favorisant la recharge et en facilitant l'infiltration voire en « injectant » de l'eau dans le sous-sol.

Nous avons rencontré Madame Picot-Colbeaux, hydrogéologue au BRGM, en novembre dernier lors d'un colloque du CE-

BEDEAU sur la protection de la ressource. Elle a accepté de répondre à une série de questions au sujet du travail qu'elle mène depuis plusieurs années sur la "recharge artificielle" des nappes - qu'elle préfère qualifier de **recharge maîtrisée des aquifères**, un terme incluant la maîtrise des risques liée à cette pratique mais aussi un terme plus proche des solutions fondées sur la nature.

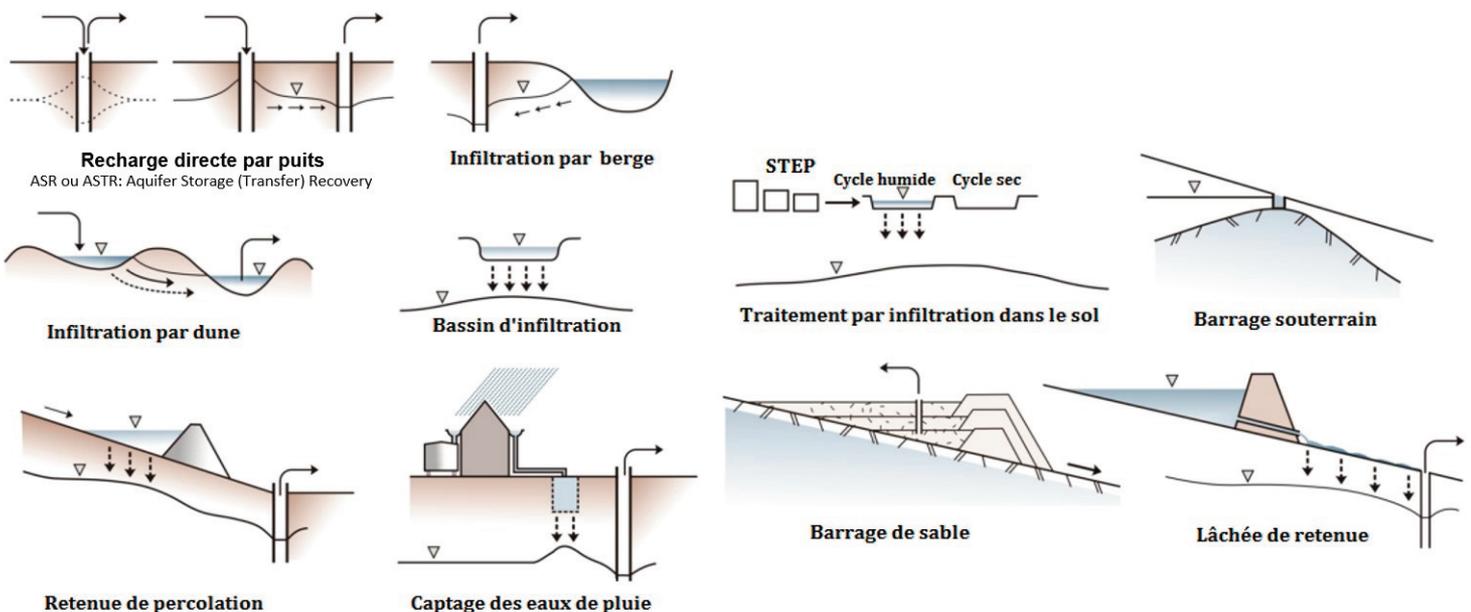


Fig. 1. Illustration des dispositifs de Recharge Maîtrisée des Aquifères d'après Dillon (2005) <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0413-6>



Fig. 3. Une des étapes de traitement des eaux usées par osmose inverse (Reverse Osmosis) de la station d'épuration GWRS d'Orange County (Californie, USA) – Photo Géraldine Picot-Colbeaux

Qu'est-ce que la stratégie de Recharge Maîtrisée des Aquifères ? Est-ce une pratique récente ?

Les aquifères dans lesquels les eaux souterraines s'écoulent relativement lentement par rapport aux vitesses d'écoulement dans les cours d'eau, ont des capacités considérables de stockage d'eau rendues possible par la porosité des roches aquifères (porosité de matrice, fissure, fracture et aussi par les cavités karstiques).

L'équilibre est extrêmement fragile entre les prélèvements d'eau souterraine, leur écoulement vers l'exutoire (cours d'eau, côtes...) et leur recharge naturelle par les précipitations qui s'infiltrent en profondeur. Les eaux souterraines sont en effet prélevées et utilisées en continue ou à des périodes restreintes dans l'année pour nos besoins en eau pour les secteurs de l'agriculture, l'industrie, l'énergie mais aussi pour nos besoins domestiques et de loisirs.

Les volumes prélevés peuvent parfois être supérieurs à la recharge naturelle des aquifères qui s'effectue à nos latitudes sur la période hivernale (de novembre à mars) lorsque les pluies ne sont pas interceptées par la végétation en dormance. Depuis le 20ème siècle, des déséquilibres locaux s'accroissent menant à des pénuries d'eau et à la pollution des eaux.

Une des solutions associée à la réduction de la consommation en eau et de l'usage de produits chimiques, est de recharger l'aquifère par des eaux complémentaires. Ce concept déployé depuis des millénaires (fig. 1) est celui de la recharge maîtrisée des aquifères (Managed Aquifer Recharge ou MAR, aussi Recharge Artificielle) et dont la mise en œuvre s'est accélérée au rythme de 5 % par an au cours des 60 dernières années, représentant actuellement environ 1 % des volumes d'eau souterraine prélevés dans le monde (Dillon *et al.*, 2019).

Les plus importants systèmes MAR sont encore actifs et durables (Zheng *et al.*,

2021) comme c'est le cas en Inde (Maharashtra, Maheshwaram, Chennai), en Australie (Perth, Adelaide), aux USA (Los Angeles, Phoenix, Floride), en Israël (Shafdan-Tel Aviv), en Europe (Royaume-Uni : Londres, France : Croissy-sur-Seine, Finlande : Turku, Pays-Bas : , Belgique : Koksijde, Allemagne : Berlin, Espagne : Caracillo, Italie : Suvereto , Suisse : Geneva, Lange Erlen), au Maroc (Marrakech), en Tunisie (Soukra, Cap-Bon, Kairouan), en Namibie pour ne citer que les sites les plus emblématiques.

Différentes stratégies existent pour restaurer en quantité et en qualité les eaux souterraines surexploitées et par conséquence les zones humides asséchées et les débits de base des cours d'eau indispensables au bon état des écosystèmes aquatiques.

Techniquement, cette recharge s'effectue par des bassins d'infiltration, des forages d'injection, des chicanes ou encore par la filtration par berges, etc. Un inventaire mondiale recense plus de 1100 des techniques appliquées (voir fig.1 et portail internet MAR-portal de l'IGRAC, 2022).

Comment sont rechargés les aquifères selon cette stratégie ?

Les eaux rechargées sont collectées depuis la surface (cours d'eau en crue ou non, lacs, mers ou océans), les réseaux d'eaux pluviales et d'assainissement, les eaux souterraines, les eaux d'exhaure de carrières ou de mines, etc... En fonction de leur qualité, elles doivent être épurées préalablement à leur infiltration ou injection vers le sous-sol (processus divers allant de la simple décantation jusqu'à l'ultra filtration ou à des processus ayant recours à l'osmose inverse - voir fig. 3).

Cependant, c'est aussi parce que le milieu souterrain et le fonctionnement de l'hydro-système apportent un pouvoir épurateur naturel par dilution des eaux, par filtration mécanique ou par réactivité biogéochimique, que les MAR sont utilisés pour améliorer la qualité des eaux rechargées.

L'épuration, qu'elle soit par berges, par bassins via la zone non saturée de l'aquifère ou encore par passage d'un puits à un autre au sein de l'aquifère, est un atout (économique et sécuritaire), même si elle est plus délicate à contrôler. L'épuration associée est dépend du contexte environnemental (géologique, géographique, ...) qui influe sur le temps de résidence des eaux dans l'aquifère.

Lorsque les eaux ont subi un traitement très poussé, le système de recharge apporte en plus du stockage sécurisé une re-minéralisation des eaux au sein de l'aquifère afin de satisfaire les critères de potabilité lorsqu'elles seront ré-exploitées.

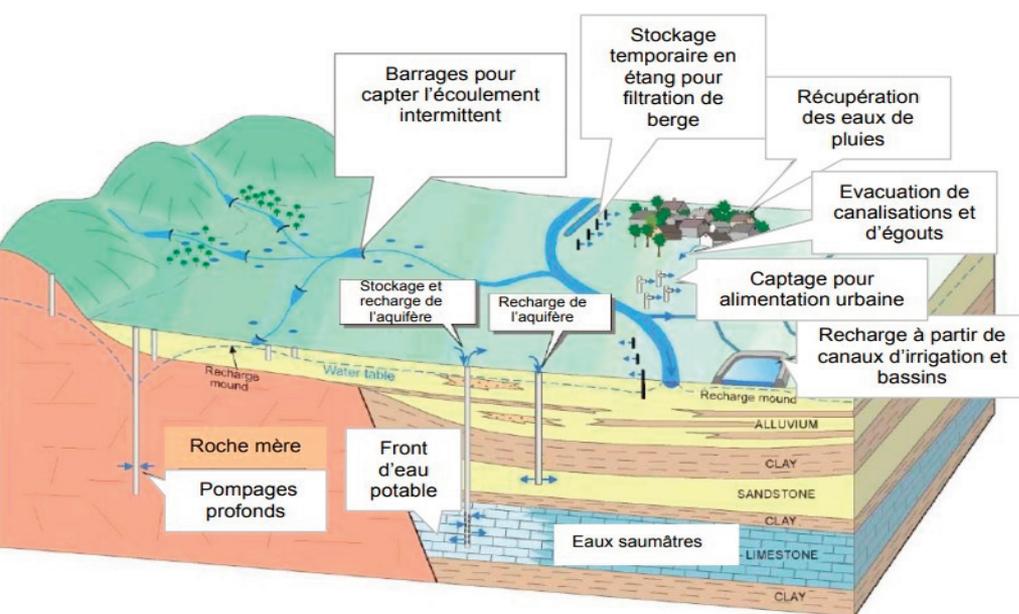


Fig. 4. Représentation des différents systèmes de Recharge Maîtrisée des Aquifères sur un même territoire – <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000143819> - Marie Pettenati, tiré de Gale (2005)

Que ce soit pour l'épuration ou la re-minéralisation, le processus doit s'accompagner de contrôles réguliers pour s'assurer de la constance de la qualité des eaux injectées ainsi que des eaux captées en sortie de ces nappes réalimentées. Il faut aussi s'assurer que :

- les réactions chimiques et bactériologiques soient celles recherchées
- ces réactions n'engendrent pas de dysfonctionnement du système par l'arrivée de substances "nocives" (métaux lourds, pesticides, pharmaceutiques, hydrocarbures...) qui s'accumuleraient dans les différents compartiments souterrains (sol, zone non saturée, nappe) du fait de ces injections
- la perméabilité de l'aquifère et du dispositif de recharge ne soient pas profondément modifiés amenant au colmatage.

Y a-t-il des risques liés à la stratégie de Recharge Maîtrisée des Aquifères ?

La conception d'un MAR repose sur une étude pluridisciplinaire approfondie de l'hydrosystème et des eaux collectées qui est indispensable à son bon dimensionnement mais surtout à la réduction des risques associés, qu'ils soient liés à l'exploitation ou à l'utilisation future des eaux rechargées (surpression, secousse, inondation, contamination, réaction biogéochimique).

Elle est facilitée dans les aquifères sableux (voir fig 5 & 6) et devient plus incertaine pour les aquifères fissurés et karstiques sans être pour autant impossible d'après les sites existants dans ces environnements comme ceux de Houle-Moule en France, Wala en Jordanie, Nardo en Italie, Vis en Croatie ou encore Dammour au Liban.

Pour l'aquifère surexploité des calcaires carbonifères de la région Lille-Tournai, des études de faisabilité de recharge par les eaux de l'Escaut ont été menées dans les années 70 sans être appliquées. Dans ces environnements karstiques, les risques sont accrus du fait de la possible dissolution de la roche carbonatée et de la méconnaissance des écoulements et des temps de résidence des eaux dans ces milieux très hétérogènes. Dans tous les cas, des réseaux de mesure et de suivi de la qualité et des niveaux d'eau doivent être mis en place en lien avec des modèles mathématiques dédiés à la compréhension du système.

Est-ce une pratique pertinente pour faire face aux changements climatiques ?

Une augmentation probable de la gravité des sécheresses est attendue aux fréquences pouvant augmenter de plus de 20 % (Prudhomme *et al.*, 2014) mais aussi favorisant le ruissellement plutôt que l'infiltration par assèchement des sols (qui deviennent imperméables comme du béton).

Pour éviter d'être à la merci de cette répartition des pluies et avoir de l'eau au moment où les besoins sont les plus imporé-



Fig. 5. Dispositif Aquaduin d'infiltration dans l'aquifère dunaire des eaux usées traitées de la station d'épuration Toreele à proximité de Koksijde (Belgique), contribuant à l'alimentation en eau potable pour la côte belge (ouest). Photo Géraldine Picot-Colbeaux.

tants, un intérêt croissant de ces techniques voit le jour. C'est particulièrement le cas pour les MAR sollicitant les eaux usées traitées abondantes toute l'année comme le MAR côtier de Wulpen-Torrelee (Aquaduin) aux environs de Koksijde, dédié à la production d'eau potable (fig. 5).

Par ailleurs et particulièrement en ville où l'imperméabilisation des sols et des cours d'eau a été rendue extrême, les techniques d'infiltration des eaux pluviales et des eaux de ruissellement à la parcelle ou via des bassins d'infiltration d'eau pluviale ou encore le long des cours d'eau par reméandrage, sont également de plus en plus étudiées pour limiter les crues voire les inondations.

Les collectivités sont de plus en plus actives sur ce point en lien étroit avec la gestion des réseaux d'assainissement et particulièrement la gestion intégrée des eaux pluviales qui s'oriente de plus en plus vers les solutions fondées sur la nature comme celles de recharge maîtrisée des aquifères.



Fig. 6. Dispositif d'infiltration dans l'aquifère dunaire des eaux usées traitées de la station d'épuration la Mare à Jorre d'Agon-Coutainville (France) – Photo Géraldine Picot-Colbeaux.

Un des exemples est celui de la métropole de Rennes qui cherche à cartographier le potentiel d'infiltration de son territoire, afin de l'intégrer dans son plan local d'urbanisme intercommunal (Pinson & Bault, 2019 rapport BRGM) ou de trouver la combinaison de plusieurs dispositifs ralentissant les écoulements de surface dans les bassins versants :

- restauration des zones humides,
- limitation des ruissellements par des constructions en dure,

- voiries infiltrantes et noues,
- déconnexion de réseaux,
- désimperméabilisation des zones à risque de crue, ...

Il est alors question de Ville "perméable" ou de Ville "éponge" comme c'est le cas de la ville de Wuhan en Chine pionnière pour faire face aux inondations. Dans ce cas la combinaison de solutions dépasse largement le cadre des techniques MAR.



Fig. 7. Inventaire de différents systèmes existant de Recharge Maîtrisée des Aquifères accessible via le portail internet de l'IGRAC (IGRAC, 2022) – Légende : Spreading methods : bassin d'infiltration - Induced Bank Filtration : filtrat de berges - Well, Shaft & Borehole Recharge : puits d'injection - In-Channel Modification : infiltration par chenaux - Rainwater & Run-Off Harvesting : infiltration d'eau pluviale et de ruissellement.

Nuances entre Recharge Maîtrisée d'Aquifère et réutilisation d'eaux usées traitées (re-use)

Les techniques de Recharge Maîtrisée des Aquifères sont, la plupart du temps, mises en place pour rendre durable l'exploitation en eau souterraine existante en parallèle d'autres stratégies, comme la réduction des besoins en eau (limitation des fuites dans les réseaux de transport des eaux, limitation des besoins en eau dans les processus industriels, l'irrigation ou l'usage domestique) ou la réutilisation des eaux usées (eaux usées domestiques, industrielles mais aussi eaux pluviales) après un traitement adéquat (Réutilisation des Eaux Usées Traitées – REUT - en français ou Reuse en anglais ou encore recyclage des eaux usées). En effet, la réutilisation propose une alternative aux prélèvements traditionnels dans le milieu naturel souterrain en recyclant les Eaux Usées Traitées (EUT) en sortie de Station de Traitement des Eaux Usées (STEU), et présentent un avantage conséquent d'un point de vue environnemental car elles permettent de limiter la consommation d'eaux douces très prisées par l'agriculture. Par ailleurs, les eaux usées traitées contribuent aussi à l'apport de nutriments indispensables aux bons rendements agricoles, réduisant alors les apports d'engrais souvent issus de l'industrie chimique qui participent au déséquilibre des cycles naturels de l'azote, du phosphore et du carbone.

Quel que soit l'objectif de réutilisation des eaux usées traitées, cette solution est strictement encadrée pour exclure tout risque sanitaire.

Pour réguler les débits d'eaux usées traitées produits souvent en continu aux usages plutôt saisonniers (comme l'irrigation ou l'arrosage en période estivale par exemple), des lieux de stockages sont parfois nécessaires : soit en surface par des citernes ou réservoirs déconnectés du milieu naturel, soit en souterrain par des aquifères connectés au milieu naturel (grand cycle de l'eau). En plus d'être un lieu de stockage protégeant les eaux des pollutions de surface, les aquifères apportent également un traitement complémentaire des eaux usées traitées infiltrées lors de leur passage dans la partie dite non saturée mais aussi dans la partie saturée (épuration par le sol et l'aquifère). Dans cette situation les impacts sur l'hydrosystème (en quantité et en qualité) doivent être rendus négligeables particulièrement entre le point d'infiltration et le point de prélèvement dédié aux futurs usages (Eme & Molle, 2013).

C'est dans cette situation, lorsque l'aquifère est le lieu de stockage des eaux usées traitées, que les notions de recharge maîtrisée des aquifères et de réutilisation des eaux usées traitées se télescopent. C'est alors d'autant plus difficile à démêler lorsque les retours d'expérience réels de réutilisation de ces eaux sont établis dans des pays à la réglementation et aux terminologies différentes (par exemple le site dit de réutilisation des eaux usées très connu en Israël pour l'irrigation, est un système de recharge maîtrisée des aquifères par des eaux usées traitées mis en place pour la production d'eau dédiée à l'irrigation - Voir fig. 8).

Pour distinguer le lieu de stockage sélectionné pour la réutilisation des eaux usées traitées il est souvent notion de réutilisation directe (sans stockage dans le milieu souterrain) ou indirecte (avec stockage et épuration complémentaire dans le milieu souterrain).

En Europe par exemple, les eaux usées traitées sont considérées comme un « déchet » et sont rejetées dans les cours d'eau après un traitement effectué par les stations d'épuration et vont être diluées par les eaux s'écoulant depuis l'amont. Par ailleurs les puits de prélèvements d'eau dédiés à l'eau potable sont souvent positionnés le long des cours d'eau profitant de l'alimentation de la nappe d'eau souterraine par les eaux du cours d'eau via le filtrat de berge. Il s'agit alors d'une technique de recharge maîtrisée d'aquifère par filtrat de berge qui utilise en partie les eaux usées traitées rejetées dans le cours d'eau. En période estivale sèche, il n'est pas rare de voir le débit des cours d'eau soutenu par ces rejets. Ainsi l'eau potable produite par ces puits dans cette situation amène alors à penser que de facto il s'agit de réutilisation indirecte des eaux usées traitées dont l'épuration est affinée par le milieu naturel. Finalement ne serait-ce pas une histoire de terminologie ?

Aujourd'hui de nombreux cas de réutilisation existent pour l'arrosage des espaces verts et pour l'irrigation des parcelles agricoles à partir d'eaux usées traitées sans passage par le milieu naturel (aquifère). Il est alors question d'un usage des eaux qui ont déjà été utilisées au moins une fois et qui devront subir une épuration préalable selon la réglementation en vigueur (en Europe le cadre réglementaire précise les critères de qualité d'eau à respecter pour une réutilisation directe concernant l'arrosage et l'irrigation, avec cependant une évolution actuellement en cours du cadre pour d'autres usages tels que l'hydrocurage, les systèmes de refroidissement en circuit ouvert ou fermé, le nettoyage, l'alimentation de chaudière, les eaux de process, les divers autres usages comme la protection contre l'incendie ...).

Pour les systèmes d'utilisation des eaux usées traitées avec un passage par le milieu naturel, la terminologie de réutilisation n'est pas appliquée tout le temps ce qui rend complexe le recensement de leurs pratiques, les prélèvements associés étant alors considérés comme ceux d'une eau naturelle souterraine et leur utilisation sera considérée comme celle d'un premier usage.

Quoiqu'il en soit, si l'on s'intéresse aux applications existantes de réutilisation en Belgique, deux cas désormais bien étudiés se distinguent selon la terminologie employée :

- le dispositif indirect de Reuse mondialement connu de Wulpen-Torreele (Aquaduin) aux environs de Koksijde qui produit de l'eau potable de façon indirecte à partir d'eaux usées traitées de façon très poussée puis stockées temporairement dans l'aquifère dunaire et dont le dispositif est aussi connu sous forme de recharge maîtrisée d'aquifère (<https://www.aquaduin.be>), voir fig. 5.
- le dispositif direct de réutilisation de la Transhennuyère de la région de Tournai qui produit de l'eau d'exhaure « minière » valorisée directement en eau potable par le mélange avec d'autres eaux, réduisant ainsi les prélèvements des champs captant dans les zones surexploitées (les carrières exploitant les roches de l'aquifère des calcaires du Carbonifère dont la nappe est exploitée pour l'eau potable) dont le dispositif ne pourrait être connu comme système de recharge maîtrisée des aquifères que si les eaux d'exhaure sont stockées en aquifère, ce qui n'est pas le cas.

Que ce soit la réutilisation des eaux usées traitées ou la recharge maîtrisée des aquifères, les caractéristiques des systèmes doivent être étudiés et décrits finement de façon à définir les modalités de suivi et de surveillance à mettre en place pour s'assurer que l'utilisation des eaux ou des eaux rechargées soient compatibles avec les exigences de protection de la santé humaine et de l'environnement.

Quoiqu'il en soit, le stress hydrique subit ces dernières décennies associé aux prévisions du GIEC sur les changements climatiques amène à une mobilisation des scientifiques pour étudier les panels de solutions, et pour partager les retours d'expériences via les plateformes présentant les cas réels comme "HOTSPOTREUSE" <https://www.hotspotreuse.com/> plateforme mondiale collaborative pour développer la réutilisation des eaux, mais aussi « MAR PORTAL » <https://ggis.unigrac.org/view/marportal> plateforme recensant les pratiques de Recharge Maîtrisée des Aquifères à travers le monde (voir fig.7).



Fig. 8. Le plus important système de recharge de nappe au moyen orient a été développé à Tel Aviv (Israël) – Photo Wolfram Kloppmann



Fig. 9. Ensemble des acteurs susceptibles d'être associés aux études de réutilisation des eaux usées traitées (ARPE PACA 2017) - https://www.gesteau.fr/sites/default/files/reut-arpe_paca.pdf

Conclusion

Pour conclure, les techniques MAR vont être de plus en plus mises en œuvre de façon combinées à d'autres solutions dont les nombreux retours d'expérience et de partage des bonnes pratiques seront nécessaires afin de limiter au maximum les risques.

L'approche pluridisciplinaire est indispensable entre scientifiques mais aussi entre acteurs du territoire pour la mise en œuvre d'une planification efficace et concertée.

Plusieurs groupements de scientifiques et d'acteurs s'organisent via les associations d'hydrogéologues, comme la Commission sur la Recharge Maîtrisée d'Aquifère de l'Association Internationale des Hydrogéologues (<https://recharge.iah.org/>) qui actualise le partage des documents de référence.

L'association Water Reuse Europe (<https://www.water-reuse-europe.org/>) joint les savoir-faire des acteurs industriels aux ana-

lyses scientifiques des instituts de recherche mais aussi les actions des gouvernements comme ceux de la Commission européenne qui poussent la réflexion concernant la réglementation (Common Implementation Strategy ou Joint Research Centre).

Ces solutions combinées associant de nombreux acteurs (fig. 9) peuvent apporter un ré-équilibre des milieux aquatiques tant en qualité qu'en quantité, mais aussi des co-bénéfices qu'il est important de mettre en avant pour rendre visible notre exploitation et notre usage de l'eau tout en créant des lieux de renaturation, autant vitaux que récréatifs, utiles à la flore et la faune sauvage à laquelle nous appartenons.

Géraldine Picot-Coleaux
Hydrogéologue - BRGM
g.picot@brgm.fr



CWEPSS asbl

Secrétariat : av. G. Gilbert 20, 1050 Bruxelles
Tél: 02/647.54.90 - contact@cwepss.org

Ce 1^{er} Eco Karst de 2023 est l'occasion de **renouveler votre cotisation annuelle !**

L'abonnement annuel (envoi de 4 n° en Belgique) s'élève à **15 €**. Si vous appréciez notre magazine, vous pouvez également offrir un abonnement à Eco Karst en indiquant l'adresse de l'heureux destinataire, en communication de votre virement bancaire.

Les paiements se font par virement. avec en communication **vos nom et la mention "cotisation 2023"**.

IBAN : BE68 0011 5185 9034 / BIC : GEABEBB

Pour devenir **membre effectif** (abonnement + droit de vote à l'assemblée générale), adressez votre candidature à l'attention du Conseil d'administration, par e-mail à contact@cwepss.org. La cotisation pour les membres effectifs s'élève à **20 €**.

Dons exonérés d'impôts

Notre association de protection de la Nature est également agréée pour les dons exonérés d'impôt. Une attestation fiscale vous parviendra pour **tout don annuel d'au moins 40 €** effectué avant le 31/12 de chaque année.

Les dons sont à effectuer par virement, en nous communiquant **vos coordonnées complètes et la mention "Don exonéré d'impôts"**.

Traitement des données

Conformément au RGPD, nous garantissons que vos coordonnées ne sont pas transmises à des tiers, et que vous disposez du droit de consultation, modification et suppression de celles-ci.

Si vous ne souhaitez plus recevoir notre périodique, merci de nous en informer par email (contact@cwepss.org).