

Les géoressources vaudoises - un patrimoine naturel, industriel et durable



RÉSEAU PATRIMOINES

Association pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud
www.reseaupatrimoines.ch



Sommaire

Avant-propos : un sous-sol insoupçonné par Gilles Borel	3
Un aperçu des ressources minérales vaudoises par Nicolas Meisser	5
Le rôle clé du sel vaudois dans le développement de l'industrie chimique et ses reliques patrimoniales par Nicolas Meisser	33
Des gravières et des carrières comme patrimoine? par Grégoire Testaz	67
Aperçu de la géothermie profonde dans le canton de Vaud par Robert Arn, avec la collaboration de G. Bianchetti	75
La sismique réflexion : un précieux patrimoine par Robin Marchant et David Giorgis	83
L'argile, une substance extraordinaire et omniprésente par Thomas Mumenthaler	95
Le charbon vaudois par Marc Weidmann et Nicolas Meisser	103
La production du ciment « Portland », une industrie lourde au coeur du développement de la Suisse romande par Gilles Borel	115
La géologie, base d'un urbanisme souterrain durable par Aurèle Parriaux	129
Les cartes et plans des Archives cantonales vaudoises : une mine patrimoniale qui ne manque pas de sel par Pierre-Yves Pièce	141
La connaissance du sous-sol, une « ressource » stratégique par David Giorgis	153

RÉSEAU PATRIMOINES



Association pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud
Case postale 5273 - 1002 Lausanne - www.reseaupatrimoines.ch



Avant-propos : un sous-sol insoupçonné

par Gilles Borel

Le canton de Vaud a la réputation d'avoir un sous-sol pauvre en ressources naturelles. Pourtant, on y trouve des ressources énergétiques (charbon, lignite, eau chaude, et même pétrole !), des matériaux pour la construction (sable, graviers, argile, calcaire, pierres de construction et décoratives...), mais aussi du sel en abondance, du soufre et quelques minerais, notamment du fer et de l'or alluvionnaire. Certaines de ces richesses ont été activement exploitées au cours des siècles, à des échelles se rapportant évidemment à la population du moment, et sont aujourd'hui presque oubliées. D'autres, comme les graviers à béton, le sel ou le sable, sont de plus en plus sollicitées par notre mode de vie actuel. Le sous-sol devient ainsi lui-même une ressource qui nous permet d'en apprendre davantage sur notre région. Et c'est aux géologues que revient la tâche d'investiguer le sous-sol, de comprendre sa composition et son histoire. La manière de procéder à l'investigation du sous-sol, ainsi que les outils utilisés dépendent de l'objectif recherché : ils vont du simple marteau pour détacher un morceau de roche en surface à la tour de forage pour explorer les profondeurs.

Ce document n°15 de RéseauPatrimoineS réunit une somme de regards experts sur notre sous-sol, un lieu finalement méconnu. Il reflète la diversité des enjeux qui le traversent, des aspects historiques aux défis contemporains et futurs.

Tout commence par un devoir de mémoire d'un passé pas si lointain, d'un patrimoine industriel qui s'estompe au fil du temps. Le sel, le charbon, l'argile, sont des matières premières qui auront marqué la vie de nos campagnes aux XIX^e et XX^e siècles : combien de quartiers, de lieux-dits « Les Tuileries », inscrits dans la toponymie de notre région, nous rappellent leur importance et nous renvoient à ces usages d'antan !

Creuser, c'est aussi ouvrir une fenêtre sur le passé géologique de la planète. C'est d'ailleurs tout le paradoxe du patrimoine géologique. Il n'est souvent découvert qu'à la suite d'une exploitation, d'une intervention humaine qui va parfois dégrader un autre patrimoine : le paysage. Toutefois, cette tension ne doit surtout pas freiner l'analyse de terrain, car la documentation du sous-sol est essentielle et il ne faut pas cesser de collecter des données. Les informations ainsi relevées sont nécessaires pour la compréhension de l'histoire de la Terre à l'échelle des temps géologiques ou comme témoin d'un passé bien plus récent. Outre leurs importances historiques et patrimoniales, elles sont également aujourd'hui essentielles pour un usage durable des ressources du sous-sol. Elles ont enfin pour avantage d'être pérennes à l'échelle de nos sociétés.

Le sous-sol est bien plus vaste que ces activités d'extraction, il recèle aussi ce que l'on y enfouit. En effet, nous avons tendance à oublier que le sous-sol commence juste sous nos pieds. Et pourtant, ne voyons-nous pas quotidiennement des tranchées pour des canalisations, pour des fouilles visant à réparer une conduite ou encore une excavation, signe avant-coureur d'un nouveau bâtiment ? Ces usages de la sub-surface sont un enjeu majeur des prochaines décennies, surtout si celles-ci se veulent durables. Que ne cherchons-nous pas à mettre dans ces quelques premiers mètres ? L'encombrement du sous-sol guette surtout les agglomérations. Et nous n'évoquons même pas les gazoducs, les chauffages urbains ou les métros qui prennent une place importante du sous-sol.

Enfin, l'évolution de la législation nous offre un point de vue intéressant sur la perception que nous avons de cette troisième dimension. Elle jalonne le changement d'usage du sous-sol, tout en encadrant l'exploitation de ses res-



sources - qui reste un enjeu crucial pour une transition énergétique. Elle institue également la connaissance du sous-sol comme une ressource en tant que telle.

L'ouvrage que vous tenez en mains est un instantané de ces dimensions historiques, mais aussi une prospective qui offre une place de choix à cette « Terra incognita », que nous foulons tout en ignorant sa richesse. ■

Gilles Borel est Président de l'Association
RéseauPatrimoineS.

Un aperçu des ressources minérales vaudoises

par Nicolas Meisser

Introduction

En 1998, le Musée cantonal de géologie présentait à l'Espace Arlaud à Lausanne une exposition temporaire intitulée « Les vaudois à la mine ». Ce fut l'occasion de

se plonger dans la riche histoire minière cantonale, de découvrir et de défricher les nombreuses archives, et surtout d'exhumer des collections cantonales, les échantillons géologiques ou les artefacts liés (fig. 1).

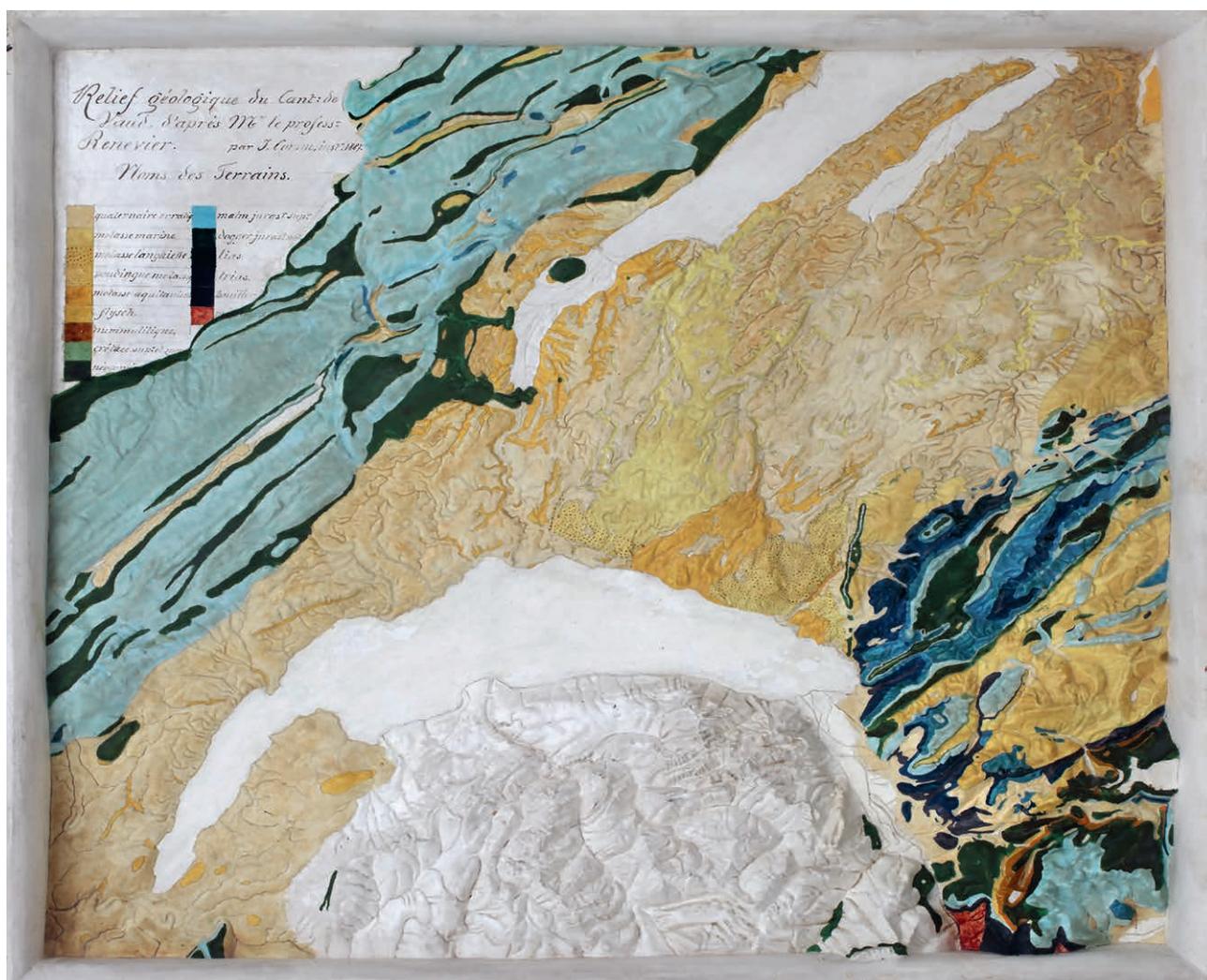


Figure 1. Plan relief du canton de Vaud en plâtre avec les formations géologiques peintes à l'aquarelle de couleur. Réalisé en 1887 par J. Cornu, instituteur, selon les indications du professeur Eugène Renevier, conservateur du musée. 48 x 48 cm. Photographie Stefan Ansermet. Collection Musée cantonal de géologie n°094292.



La situation financière de l'époque ne permettant pas de publier une plaquette en relation avec cette exposition, l'édition de ce cahier consacré aux géoressources vaudoises permet enfin de le faire, du moins en partie. Cet article, qui ne saurait être exhaustif, présente la grande variété des ressources géologiques vaudoises. Il va de soi que le texte de cet article a été mis à jour en prenant compte des publications notables, des recherches, et des découvertes faites entretemps. Comme certaines ressources sont déjà traitées individuellement dans cette édition, en particulier le sel et le charbon (Meisser, 2022 ; Weidmann et Meisser, 2022), nous n'y reviendrons pas.

Les pierres utiles, ornementales et à bâtir

Les découvertes archéologiques nous apprennent que les premières ressources minérales de nos régions sont recherchées pour leur résistance mécanique et leurs éclats tranchants. C'est le cas du quartz ou cristal de roche, du silex et des minéraux et roches vertes comme



Figure 2. Galet erratique de jade de l'espèce minérale omphacite et de la variété lémanite. Ce minéral du groupe des pyroxènes constitue des agrégats massifs, denses et très colorés au sein du métagabbro du massif de l'Allalin près de Mattmark dans la vallée de Saas en Valais. Amené et dispersé sur le Moyen Pays vaudois et au pied du Jura par les glaciations rhodaniennes, ce matériau très tenace a été utilisé au Néolithique pour la confection d'outils ou d'objets de prestige. 6 cm. Photographie Stefan Ansermet. Collection Musée cantonal de géologie n°002500. Ex-collection Doret de la Harpe.

le jade-omphacite (fig. 2), le jade-jadéite, la serpentinite et le métagabbro (Crivelli et al., 2007). Ces matériaux sont récoltés localement le long des cours d'eau ou des grèves des lacs, des sites riches en galets de roches exotiques qui sont les témoins des glaciations passées. Des centaines de blocs erratiques ont été dressés en mégalithes. D'autres ont servi de support à des gravures ou à des cupules dont l'âge et la signification nous sont encore inconnus.

Les pierres à bâtir ont été exploitées dans l'ensemble du Pays de Vaud et les sites d'extraction sont innombrables (Septfontaine, 1999 ; Testaz, 2022). Les roches cristallines, comme le granite du Mont Blanc ou le gneiss, sont extraites de grands blocs erratiques abattus sur place (fig. 3). Dans les régions viticoles vaudoises, les pressoirs en granite sont nombreux et de nos jours, de telles reliques décorent parfois les ronds-points routiers. Dans les localités, le granite erratique sert à la confection de bordures de trottoirs ou de marches d'escaliers inusables. Menacés par l'exploitation intensive ou par la destruction, les blocs erratiques sont protégés par la loi. Certains sont si exceptionnels par leur gigantisme qu'ils ont été acquis à titre de biens immobiliers par des sociétés savantes, comme la Société vaudoise des Sciences naturelles. Les grès et conglomérats de la molasse ont servi à la construction de nombreux bâtiments. Les restes de carrières sont nombreux, comme ceux de la grande place du Signal de Sauvabelin à Lausanne ou les carrières souterraines de Pendens à Servion ou du Bois de Châtel à Avenches. Exploité surtout dans la Basse-Broye, le grès coquiller de la molasse a aussi servi à la confection de meules à grains. Le calcaire est certainement la roche la plus utilisée dans la construction locale. En témoignent la centaine de kilomètres de murs en pierres sèches lardant le Jura vaudois ou l'antique ville d'Avenches construite essentiellement avec le calcaire de la carrière de La Lance sise au bord du lac de Neuchâtel, entre Concise et La Raisse. Aux Uttins près de Chamblon et à la Carrière Jaune de Ferreyres, le calcaire dit de Hauterive qui y a été extrait a servi dans les constructions de la région. Les bâtiments du XVIII^e siècle cernant la place centrale d'Yverdon-les-Bains ainsi que l'abbatiale de Romainmôtier doivent leur belle patine jaune mordorée à cette roche. Le calcaire urgonien blanc à gris affleure au pied du Jura et plus particulièrement dans la région d'Eclépens, La Sarraz, Croy, Agiez, Montcherand. Excellente pierre à bâtir, plus délicate que le calcaire jaune d'Hauterive mais plus étanche, ce calcaire a en particulier



Figure 3. Débitage d'un bloc erratique au bord du Léman (Saint-Prex) à la fin du XIX^e siècle. Les blocs erratiques amenés par le glacier du Rhône lors de la dernière période glaciaire furent intensément exploités et utilisés comme matériau de construction. Photographie anonyme. Original sur plaque de verre. Collection Photo Elysée.

servi à la confection de bassins essaimés dans l'ensemble du canton et toujours utilisés de nos jours comme fontaines (Septfontaine, 1999). Le site d'extraction principal se situe dans le bois du Grand Chaney entre Pompaples et Croy. C'est à l'ombre de cette pinède et chênaie que l'on découvre les fosses d'extractions laissées par les carriers et qui évoquent d'étranges sépultures de géants...

Dans la région lémanique et dans le Chablais ce sont les calcaires gris d'Arvel et de Saint-Triphon qui ont été massivement exploités pour la construction des grandes villes lémaniques. La résistance de ces roches les place à la base des grands édifices, là où les contraintes mécaniques sont importantes. Entre Aigle et Roche au lieu-dit Truchefardel, des calcaires ornementaux sont à l'origine de la plus flamboyante industrie de marbrerie de Suisse romande (Bisseger, 1980a) (fig. 4). Créé par de grands

noms du milieu, les familles Doret et Rossier, ce tissu industriel, constitué de carrières, usines et ateliers essaimés de Saint-Triphon à Genève, a existé pendant près de trois siècles (Bisseger, 1980b). On doit à ces dynasties de marbriers vaudois l'ornementation lithique de nombreux édifices lausannois tels que le palais du Tribunal fédéral à Mont-Repos, la Banque cantonale vaudoise et l'Hôtel des postes de la place Saint-François. Le grès gris du flysch, auparavant exploité à la carrière des Fayaux sur Blonay et dans les carrières entaillant le pied du massif de la Croix de Javerne non loin du Châtel près de Bex, a servi à la confection du pavage des zones centrales et historiques de nombreuses villes vaudoises. Cet artisanat vaudois du grès gris n'a pas pu résister à la concurrence des grandes carrières de Massongex et de Monthey à quelques jets de pierre de distance...

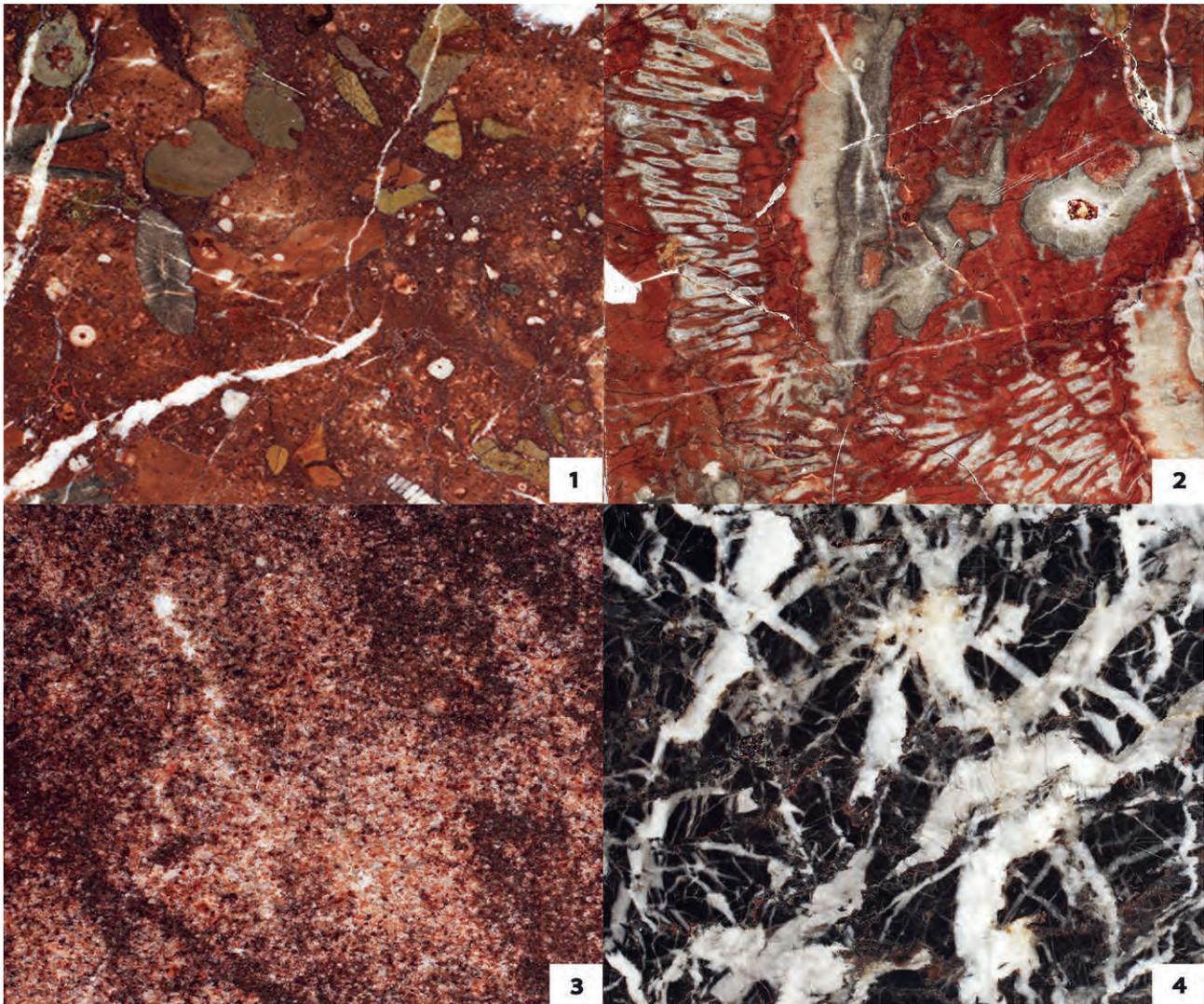


Figure 4. Calcaires ornementaux anciennement exploités dans le Chablais vaudois. 10 x 10 cm². 1 - calcaire de la Tinière, Villeneuve ; 2 - calcaire de Truchefardel, Yverne ; 3 - calcaire d'Arvel, Villeneuve ; 4 - calcaire de Chalex, Aigle. Photographies Stefan Ansermet. Collection Musée cantonal de géologie, n° : 001681 ; 001689 ; 001688 ; 001687. Ex-collection Doret.

On ne pourrait être complet sans citer les tufières, ces exploitations intermittentes de tuf calcaire, une roche beige, très poreuse et donc légère et qui se forme aux griffons des sources pétrifiantes froides et saturées en bicarbonate de calcium. Utilisé dans de nombreuses constructions historiques, en particulier les châteaux, le tuf calcaire a été intensément exploité dans toutes les grandes régions du canton de Vaud mais plus particulièrement au pied du Jura vaudois, dans de grands gisements en amont de La Rippe et de l'abbaye de Bonmont, dans le vallon

du Nozon, dans les gorges de l'Orbe et à La Mothe ainsi qu'au Scex que Plliau sur Brent.

De nos jours, les pierres à bâtir sous la forme de moellons ne sont plus guère extraites du territoire vaudois, même si un manque criant se fait souvent sentir à l'occasion de la rénovation d'anciens bâtiments historiques. Ces derniers sont souvent restaurés avec des roches exotiques, lointaines et qui immédiatement attirent l'œil du spécialiste. Dès lors ne peut-on pas imaginer des extractions locales, modestes, sur commande des restaurateurs de bâtiments historiques avec des équipes de carriers et

de marbriers itinérants dans l'ensemble du pays ? Par exemple, pour la molasse lausannoise deux sites potentiels ont été retenus dans une telle éventualité : la reprise des anciennes carrières de Montmeillan à Sauvabelin dans le vallon du Flon et de celle du Châtelard, sise un peu en dessus du Petit Flon à La Blécherette (Direction générale de l'environnement, 2013). Afin de minimiser les nuisances, l'exploitation de la pierre pourrait se faire de manière souterraine.

Les pierres concassées, galets, granulats, graves et sables

Les grandes carrières des Buis près de La Sarraz, d'Arvel près de Villeneuve et de Sous Vent à Bex extraient de la roche dure, concassée à des fins de terrassement, de préparation du béton ou de ballast ferroviaire. Aux Buis, les blocs de calcaire de l'Urgonien servent beaucoup dans le paysage pour la confection de rocailles et du calcaire moulu finement est même proposé comme complément

alimentaire dans l'aviculture afin de durcir les coquilles d'œufs. De très nombreuses gravières réparties dans l'ensemble du territoire vaudois fournissent des quantités considérables de granulats, qu'il s'agisse de sables, de grave (gravier) ou de galets concassés destinés essentiellement à la fabrication du béton. Des dizaines de telles exploitations s'essaient dans le canton de Vaud au gré des gisements et des possibilités économiques et environnementales permettant ou non leur exploitation. Les plus grands dépôts exploités se situent dans la vallée du Rhône entre Bex et Aigle, dans la vallée de la Broye entre Lucens et Granges-près-Marnand, dans l'épaulement morainique entre Senarclens et Dizy et enfin au pied du Jura avec de très nombreux gisements, de Chérerex jusqu'à Vuiteboeuf. Enfin, trois exploitations lacustres de sables, graves et galets sont actives : dans le lac Léman au large des Grangettes, dans l'extension lacustre du delta de la Promenthouse entre Prangins et Gland et dans le lac



Figure 5. La verrerie de Saint-Prex et sa sablière peu après sa création en 1911. Vue en direction de l'ouest. Photographie anonyme. Collection Photo Elysée.

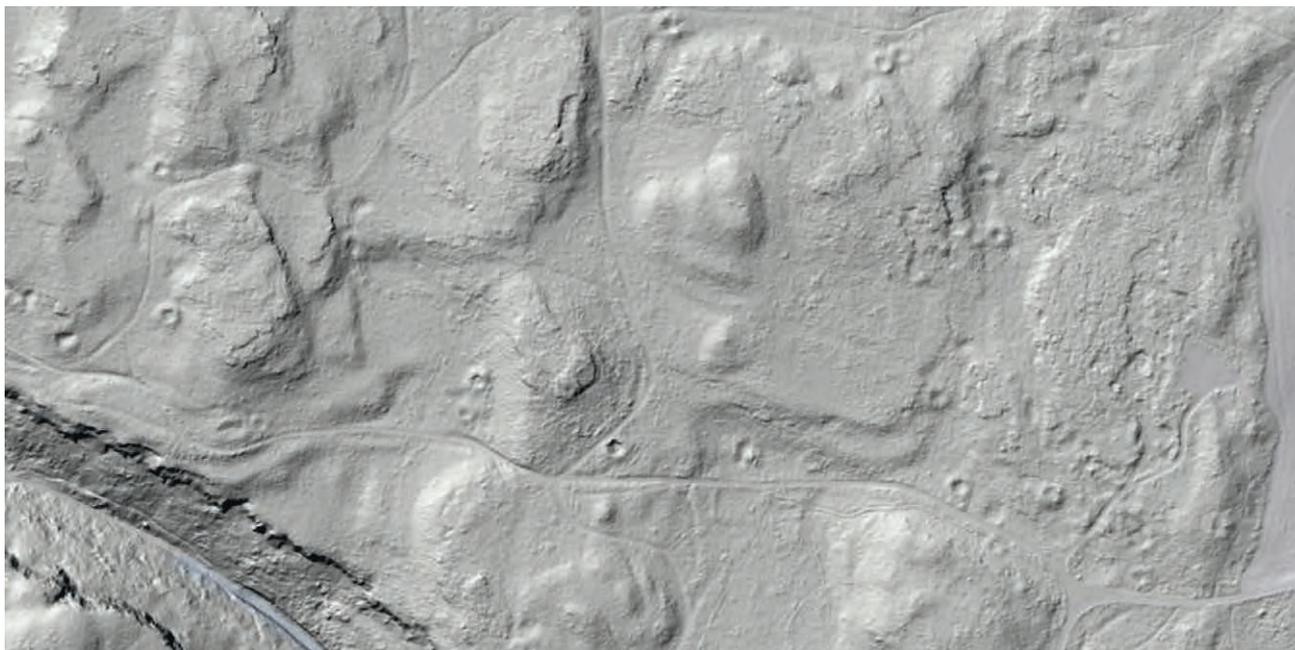


Figure 6. Image du modèle numérique de terrain (MNT) au NE du canal d'Entreroches (en bas à gauche de l'image) sur les communes d'Eclépens et d'Orny. Ce mode d'imagerie fait bien apparaître les formes circulaires en cratères des anciens fours à chaux ainsi que les affleurements rocheux exploités. Cette image reflète une extraction et une calcination du calcaire du massif du Mormont plus que millénaire. Extrait du Guichet cartographique cantonal (www.geo.vd.ch) ; 286 x 588 m².

de Neuchâtel entre Grandson et Concise (Kündig et al., 1997 ; Testaz, 2022).

Le sable de Saint-Prex mérite une attention particulière car il est à l'origine du développement d'une importante industrie verrière (fig. 5). Lors de travaux de forage dans les terrains au sud de la ferme de Beaufort à Saint-Prex, un grand gisement de sable quartzueux de qualité est découvert. En 1911, l'entrepreneur Henri Cornaz, propriétaire du site, met immédiatement à profit cette chance et construit une verrerie qui est toujours très active de nos jours dans le domaine du verre d'emballage (Vetropack). Actuellement elle utilise comme matières premières du verre recyclé ou du sable importé. La présence de ce gisement a eu un impact économique et sociétal considérable dans la région. Ainsi la problématique de la dispendieuse importation de bouteilles pour la mise en flacon du vin vaudois a été résolue. En 1915, à la suite de la fermeture de la verrerie de Semsales, Saint-Prex voit s'installer de très nombreux ouvriers et maîtres verriers fribourgeois. Cette communauté va quelque peu bouleverser et stimuler la vie locale avec la construction d'une église catholique, d'un quartier ouvrier au nord de la voie de chemin

de fer et avec le développement d'un véritable art verrier entre 1928 et 1964 : le verre artistique de Saint-Prex.

Les liants, enduits et terres

Afin d'assurer la bonne tenue mécanique des constructions il est nécessaire de recourir à des mortiers constitués primitivement d'un mélange de chaux et de sable. Depuis plus d'un siècle, ce sont essentiellement les ciments modernes fabriqués selon les recettes et procédés dits de Portland qui sont utilisés comme liants mécaniques mais aussi en mélange avec des granulats pour former du béton.

La préparation de la chaux par calcination du calcaire à haute température se pratique dans nos régions depuis l'Antiquité. Les restes de fours à chaux sont nombreux dans les régions calcaires du canton de Vaud, en témoigne seulement l'imagerie aérienne des environs du canal d'Entreroches près d'Eclépens où, sur moins d'un km² on peut décompter une cinquantaine de cratères qui sont en réalité des reliques de fours à chaux (fig. 6). A l'époque contemporaine, des fours à chaux modernes utilisant du charbon comme combustible ont fonctionné à l'usine des Grands-Crêts près de Vallorbe, à Baulmes et

à Roche. En plus d'être un constituant du mortier liant, la chaux sert également de revêtement mural, de correcteur d'acidité des sols et de désinfectant des étables, écuries et troncs d'arbres fruitiers par chaulage. Quant à la calcination d'un mélange de calcaire et d'argile, elle permet, selon la teneur croissante en argile, de produire de la chaux hydraulique ou du ciment dit de Portland, qui sont les ingrédients incontournables du monde de la construction moderne.

C'est l'ingénieur Louis Vicat (1786-1861) qui découvre qu'en calcinant une roche à la composition minéralogique bien particulière et affleurant au Gua près de Grenoble, on obtient un ciment artificiel aux propriétés mécaniques remarquables (fig. 7). Une des particularités géologiques du Jura-Nord vaudois est d'offrir des affleurements de cette même roche qui est à l'origine de la découverte de Vicat : les marnes d'Effingen ou de l'Argovien. Ces marnes contiennent du calcaire et de l'argile en proportions si parfaites et régulières qu'une simple calcination donne un excellent ciment. Par un heureux hasard, ces affleurements sont également traversés par deux lignes de chemins de fer, celle menant de Vallorbe au Brassus et celle allant d'Yverdon-les-Bains à Sainte-Croix. Gisements et moyens de transport étant réunis, il ne faut plus qu'un groupe d'entrepreneurs et de financiers pour mener à bien le développement de deux importantes usines historiques : celles des Grands-Crêts au-dessus de Vallorbe et celle de Baulmes. La seule difficulté réside dans l'exploitation souterraine de la marne par de larges galeries, qui rend le travail pénible, coûteux et dangereux.

De 1878 à 1933, aux Grands-Crêts l'exploitation produit à la fois de la chaux vive ou hydratée par calcination du calcaire et de la chaux hydraulique (fig. 8) ou « ciment naturel » par cuisson de la marne extraite en carrière (fig. 9). Dès 1898, l'exploitation se poursuit de façon souterraine dans les mines dites du Bébox. L'usine va connaître une période faste de 1890 à 1914 (fig. 10) avec une production journalière pouvant atteindre près de 100 tonnes. Ce ciment à prise lente va avoir une telle renommée qu'il va être employé dans des constructions majeures : le Palais Fédéral (1896-1902), le chemin de fer Glion-Rochers de Naye (1889-1892), le pont Chauderon à Lausanne (1904-1905) et surtout les tunnels du Simplon (1898-1921). Après le premier conflit mondial l'usine va souffrir de la concurrence et elle ferme en 1933 (Dutruit, 1994).



Figure 7. Appareil dit de Vicat, utilisé pour la mesure du temps nécessaire à la prise du ciment. Une aiguille de diamètre et de forme définie est posée à la surface d'un échantillon cylindrique de ciment frais qui est placé dans un anneau. Par gravité, l'aiguille va pénétrer le ciment en cours de prise. La profondeur de pénétration, qui est relative à la viscosité et au temps, se lit sur une échelle graduée. Photographie Stefan Ansermet. Collection Musée cantonal de géologie n°094152. Ancien laboratoire de la Société des chaux et ciments de Suisse romande d'Eclépens. Début XX^e siècle.

A Baulmes en 1895, les perspectives industrielles offertes par l'électrification de l'Orbe six ans auparavant et la mise en service du chemin de fer Yverdon-les-Bains - Sainte-Croix deux ans plus tôt incitent l'entrepreneur Emile Cachemaille à ouvrir une usine de chaux et ciments. La société est créée en 1897. On y produit d'abord de la chaux éteinte (hydroxyde de calcium) à partir du calcaire abattu en carrières puis, dès 1900, du ciment avec la marne extraite des mines. Gérée par la Société Anonyme des Chaux et Ciments de la Suisse Romande, les mines et les carrières (fig. 11) de même que l'usine, prennent un grand essor, et en 1920 elles occupent 300 ouvriers (fig. 12). Le village est même en permanence blanchi par la poussière calcaire de cette fiévreuse activité industrielle (Meisser, 2007). Baulmes est le plus grand site



Figure 8. Echantillons de diverses qualités de chaux produites à l'usine des Grands-Crêts près de Vallorbe ; 1^{er} juillet 1921. Photographie Stefan Ansermet. Collection Musée cantonal de géologie n°094176 à 094178.

d'extraction de marne et de calcaire du Jura vaudois. La cartographie de l'ensemble des travaux montre un développement de 17.2 km de galeries et chambres d'exploitation, ce qui représente le premier site minier vaudois en termes d'excavations souterraines, ceci avant les mines de sel de Bex avec environ 13.2 km (Deriaz et al., 2007 ; Weidmann, 2006). L'exploitation est réalisée par le biais d'un réseau de galeries réparties sur dix niveaux, de 670 à 800 m d'altitude, et par une succession de carrières à ciel ouvert localisées essentiellement au lieu-dit La Rochette au-dessus du village. La marne à ciment et le calcaire à chaux sont descendus à l'usine à l'aide d'une télébenne. Une petite exploitation, sise à mi-chemin entre l'usine et la grande carrière, produit de la marne moulue pour amender les sols acides, en particulier ceux de la plaine de l'Orbe. Malgré un abattage record journalier de l'ordre de 100 m³ de roche, l'exploitation est victime de l'onéreux travail en souterrain, du prix des combustibles et surtout de la mise en exploitation intensive de



Figure 9. (gauche) : Galette de chaux hydraulique de qualité supérieure utilisée pour des essais à l'usine des Grands-Crêts près de Vallorbe le 9 décembre 1920. Collection Musée cantonal de géologie n°094180. (droite) : Eprouvette de ciment utilisée pour des essais à l'usine des Grands-Crêts près de Vallorbe, 1^{er} juillet 1921. Collection Musée cantonal de géologie n°094181. Photographies Stefan Ansermet.



Figure 10. Publicité de l'usine des Grands-Crêts près de Vallorbe au début du XX^e siècle. On y voit l'importance des bâtiments le long de la ligne de chemin de fer Vallorbe-Le Brassus. De nos jours, seul le bâtiment locatif à gauche subsiste.

grandes carrières à ciel ouvert comme celles de Roche et d'Eclépens, deux sites décrits ci-après par Borel (2022). Ne pouvant faire face de façon concurrentielle à l'énorme demande de ciment pour la construction des barrages hydroélectriques, l'extraction cesse en 1957 et le site industriel ferme définitivement en 1962.

Dans l'Est lausannois, à Paudex, on ne peut guère aujourd'hui se représenter l'intense activité industrielle qui y a régné pendant près de deux siècles (fig. 13). Ainsi, au lieu-dit La Verrière, une vaste parcelle de terrain située de

part et d'autre de La Paudèze, comprenant l'actuel Centre patronal vaudois, la STEP et le port de Paudex, a été longtemps dévolue à des activités industrielles liées aux ressources minérales locales comme le charbon et la marne. A ce sujet, il faut rappeler que les premières mines de charbon de la région lausannoise ont été exploitées 400 m plus en amont, le long de la rivière. Cette manne thermique et hydraulique a été à l'origine du développement d'une verrerie au XVIII^e siècle (Claude, 1974). Par la suite, une industrie de briques et de liants a vu le jour en valorisant un charbon de piètre qualité car fortement souillé par sa matrice de marne et de calcaire. La combustion de ce mélange conduit à un ciment particulier dénommé « paudézite ». Parallèlement aux fours à ciment, une petite usine d'éléments préfabriqués s'est aussi établie sur ce site, en produisant entre-autres des dalles en granito (terrazzo). De nos jours, si on se promène sur la minuscule plage de Paudex, des restes de charbon, de béton à la paudézite et plus rarement de scories vitreuses sont les derniers et bien maigres témoins de cette fiévreuse industrie.

Le plâtre est issu de la cuisson du gypse à 150°C, puis de la pulvérisation du produit obtenu. De faible résistance mécanique et légèrement soluble dans l'eau, le plâtre gâché sert essentiellement d'enduit intérieur. Depuis au moins trois siècles le gypse est exploité dans le canton de Vaud et il l'est toujours de nos jours dans la grande carrière à ciel ouvert qui s'ouvre au sommet de la colline du Montet à Bex, et qui fournit une partie importante du gypse et de l'anhydrite utilisés dans le pays. Si les très maigres affleurements de gypse des gorges de l'Orbe et de la molasse de l'Aubonne près d'Allaman (Vionnet, 1869) ont pu faire l'objet d'extractions artisanales à des fins familiales, il n'en va pas de même dans les Préalpes et les Alpes vaudoises et en particulier dans le Chablais. Cette roche blanche, saccharoïde, y est localement fort abondante et elle se localise le plus souvent le long des grands cols vaudois : Pierre du Moëllé, col de la Croix et ses pyramides de gypse et col du Pillon. Mais c'est sur les communes d'Ollon et de Bex que les gisements sont de loin les plus importants et les plus facilement accessibles. Ils sont à l'origine d'une florissante industrie toujours active, aux nombreux restes patrimoniaux, décrite par Testaz (2014). Pour mémoire, rappelons l'existence de 1835 à 1929 d'une importante fabrique de plâtre aujourd'hui totalement disparue : l'usine de Grandchamp située entre Villeneuve et le château de Chillon, sur le petit delta de



Figure 11. Tas de blocs de calcaire, issus des silos à gauche, et prêts à être enfournés par des ouvriers appelés « chauffourniers » dans des fours à chaux à l'usine de chaux et ciment de Baulmes au début du XX^e siècle. Collection Musée du vieux Baulmes.



Figure 12. Ouvriers de l'usine de chaux et ciment de Baulmes au début du XX^e siècle. Collection Musée du vieux Baulmes.



Figure 13. Dès 1774, le charbon extrait des mines de La Paudèze fut utilisé entre autres à la fabrication de verre, de tuiles et de ciment. A la fin du XIX^e siècle, une grande usine située près du lac produisait la « paudézite » un ciment fabriqué avec le calcaire marneux extrait des mines de charbon. De nos jours, il ne subsiste que la grande maison visible tout à droite de l'image. Photo G. de Jong. Original sur plaque de verre. Collection Photo Elysée.

La Tinière (Borel, 2022). Cette usine a utilisé le gypse exploité par un réseau de galeries au hameau de Valleyre situé un peu plus à l'est.

Du Néolithique à nos jours, la fabrication des terres cuites est certainement l'activité liée aux ressources minérales la plus pérenne connue dans le canton de Vaud (Mumenthaler, 2022). L'abondance locale de niveaux argileux dans la molasse ou dans les dépôts quaternaires du Moyen Pays vaudois est à l'origine du développement de très nombreux sites de fabrications de poteries, briques, tuiles ou carreaux. L'exploitation de ces gisements de terre glaise - ou glaisières - a discrètement mais durablement modifié des paysages comme, par exemple, l'étang du Sépey près de Cossonay, qui est une ancienne glaisière noyée devenue un important biotope. Les traces de ces exploitations et usines de cuisson se marquent dans la toponymie locale avec des lieux-dits comme « Tuilerie, Tuilière, Thioleyres » et il n'est pas rare de voir se dresser à proximité de tels lieux une cheminée en briques, modeste mais

fier témoin d'une industrie passée qui comptait 30 usines au début du XX^e siècle dans le canton de Vaud (Letsch et al., 1907). Actuellement, la fabrication de briques ou de tuiles se poursuit à grande échelle dans les usines de Crissier avec l'imposante carrière de Bois-Genoud qui borde l'autoroute de contournement de Lausanne, mais aussi à Peyres-Possens et à Corcelles-près-Payerne.

Toujours dans le domaine des céramiques, la présence locale de gisements d'argile fortement mêlée à de grains de quartz a contribué à l'artisanat des poteries de grès. Un autre exemple d'importance culturelle notable est la manufacture de céramiques créée en 1781 à Nyon, qui a produit des faïences et des porcelaines. Bien que la fabrication de la porcelaine nécessite l'utilisation de kaolinite importée du Limousin, il est avéré que les quelques dépôts d'argile et de bentonite très pures des environs de la ville, en particulier le long de l'Asse, ont été exploités pour la production de faïences.



L'argile smectique pure - dénommée terre à foulon - que les fileurs et teinturiers emploient pour dégraisser les étoffes de laine a été extraite de la Grande Côte de Sermuz au sud d'Yverdon-les-Bains, là où s'engouffre l'actuel tunnel de l'autoroute en direction du nord du canton. L'étude des textes nous apprend l'existence d'un gisement d'argile exceptionnellement pure dans la Broye, dénommée « blanc de Moudon », utilisée comme pigment ou terre absorbante et dont on a perdu la trace de nos jours. Ainsi en 1803, Tingry dans son traité théorique et pratique sur l'art de faire et d'appliquer les vernis, cite : « *Depuis quelques années nous tirons de Suisse, dans le Pays-de-Vaud, une terre très-douce au toucher, d'un blanc argentin et soyeux, d'un grain très-fin, auquel nous donnons le nom de blanc de Moudon, ou blanc de Morat, parce que ces deux villes sont voisines de sa minière. C'est un vrai blanc d'Espagne, une argile pure qu'on employe avec succès dans nos fabriques de papier peints.* » Ce n'est donc pas un blanc de craie comme le fameux blanc de Meudon près de Paris.

Souvent placés à tort dans les matériaux combustibles, l'asphalte et le bitume, qui sont avant tout des liants, ont été exploités par intermittence du début du XVIII^e à la moitié du XIX^e siècle dans au moins trois sites vaudois. Ainsi l'asphalte a été extrait dans le secteur aux Epoisats sur le flanc occidental de la Dent de Vaulion où un puits de mine est encore bien visible (Audétat et al., 2002). Le bitume imprégnant la molasse ou le calcaire a été exploité, quant à lui, aux moulins de Chavornay dans la partie inférieure de la vallée du Talent ainsi qu'au Puisoir près d'Orbe (Weidmann, 1993).

Le fer

Il faut rendre hommage au professeur Paul-Louis Pellet (1920-2009) et à ses élèves de l'Université de Lausanne pour s'être penché sur l'histoire de la production minière et de la sidérurgie indigène (Pelet, 1993). Par un travail soutenu et surtout pluridisciplinaire, non seulement dans les archives mais aussi sur le terrain, les étranges et nombreux amas de scories perdus dans les bois du pied du Jura ont livré la plupart de leurs secrets. Il est ainsi démontré que les gisements de fer de la région de Ferreyres et de la Sarraz ont été intensément explorés et exploités déjà trois siècles avant notre ère et cela jusqu'au VI^e siècle. En témoignent les innombrables tas de scories, les ruines de bas fourneaux et les maigres restes de grat-

tages miniers du vallon du Nozon. Par la suite, cette sidérurgie artisanale semble cesser jusqu'au XII^e siècle puis elle reprend vie peu à peu les siècles suivants. On estime que dans le district sidérurgique de Ferreyres-La Sarraz il existe près de 5'000 tonnes de scories de réduction, réparties en une quarantaine d'amas, ce qui correspond à une production de 2'000 tonnes de fer (Pelet, 1973 ; Serneels, 1993). Le minerai était extrait de crevasses et de poches karstiques sous la forme d'un mélange d'argile rouge parsemée de grains bruns submétalliques appelés « pisolithes de limonite » et formés de goethite, un oxy-hydroxyde de fer. Il s'agit d'un minerai résiduel, d'une latérite bien nommée sidérolithique qui résulte du lessivage à l'air libre de couches de calcaire sous un climat subtropical au cours de l'Eocène, il y a 30 à 50 millions d'années. De nos jours, de telles formations rubéfiées, qui tranchent avec leur environnement de calcaire gris, s'observent dans les carrières des Buis à La Sarraz, du Mormont à Eclépens mais aussi dans les gorges de l'Orbe près de Montcherrand. Ailleurs dans le canton on connaît de tels petits gisements parfois modestement exploités à La Trélasse et à Combe Grasse près du col de la Givrine, le long du Talent en aval de Goumoens-le-Jux, mais aussi dans les Alpes, un peu au nord de Pont de Nant dans les pentes du Bertet, à la Corde et à la Tête Ronde dans la région d'Anzeinde. Bien que petits et très disséminés, ces gisements ont représenté des ressources de fer certainement fort appréciées en des temps reculés.

A partir du XV^e siècle, la sidérurgie quitte le piémont jurassien aux gisements et forêts épuisés, pour s'enfoncer dans les vallées et gagner de l'altitude, certainement à la recherche de minerais plus riches, de force hydraulique pour les soufflets des fourneaux et le martelage du fer brut et surtout de luxuriantes forêts indispensables à la production de charbon de bois. Des mines s'ouvrent au col du Mont d'Orzières, aux Charbonnières, à l'Abbaye, au Brassus, dans le massif du Risoux non loin du bien nommé Poste des Mines, à Gascon dans le haut vallon de la Jougnez derrière Le Suchet et aux environs de l'Auberson (Pelet, 1978).

Le minerai de fer exploité ici n'est pas du sidérolithique. Bien qu'il s'agisse aussi de grains de goethite riche en fer, ils ne sont pas dispersés dans une matrice d'argile, mais de calcaire bien plus dur à traiter : c'est la limonite du Valanginien, vieille de 134 millions d'années et dont l'origine est marine. Bien plus pauvre en fer que le minerai du

Sidérolithique, la limonite du Valanginien peut être enrichie par délitement naturel à l'air libre et lavage. L'épaisseur des gisements, jusqu'à deux mètres, et leur extension sur des centaines de mètres compensent la faible teneur en fer (Serneels, 2004 ; Serneels et al., 2004). C'est dans cette couche géologique rousse, appelée Limonite de Métabief et incluse de nos jours dans la formation dite du Vuache, que se localisent toutes les anciennes mines de fer des régions de Sainte-Croix, de Vallorbe et de la vallée de Joux, à l'exception notoire des Mines du Risoux (Rittener, 1902). Ces dernières, mentionnées dès 1651, ont exploité de la limonite issue cette fois de l'altération d'un filon de pyrite, dont l'origine reste mystérieuse, et qui souligne une faille affectant le calcaire du Kimméridgien vieux de 150 millions d'années (fig. 14).

Dans les Hautes-Alpes vaudoises, en plus des sites du Sidérolithique mentionnés plus haut, les archives et les échantillons géologiques des collections muséales mettent en évidence de petits gisements de fer dans le Valanginien de la Varre à l'est de Pont de Nant (fig. 15) ainsi que dans le Callovien, vieux d'environ 165 millions d'années, à Aufallaz dans les hauteurs et les éboulis du vallon de Nant. Les Préalpes vaudoises offrent très sporadiquement de riches mais très minces croûtes de minerai à près de 60 % de fer. Ce minerai se rencontre localement dans la couche dite des Cheneaux-Rouges, âgée d'environ 60 à 40 millions d'années, sur le flanc septentrional de la Gummfluh et à la Dent de Hautaudon, où une galerie a même été percée sur territoire fribourgeois à 50 m de la frontière vaudoise, le minerai extrait étant traité dans un haut-fourneau au fond de la vallée de l'Hongrin (Ginsberg, 1817 ; de la Harpe, 1817 ; Pelet, 1971). En revenant dans le Jura vaudois, on ne saurait passer sous silence les formations quaternaires, avec leurs galets de minéraux ferrifères amenés des Alpes lors des dernières glaciations. Il s'agit en effet des minerais les plus riches en fer connus sur le territoire vaudois, avec des galets d'hématite pure ou plus rarement de magnétite. Ainsi de nos jours, dans les gorges de l'Orbe les orpailleurs extraient une telle quantité de cet excellent minerai dans les alluvions, que l'on peut se demander si celui-ci, autrefois, a peut-être même exclusivement alimenté le haut fourneau des Clées.

Tout comme la cuisson des saumures pour obtenir le sel dans les Alpes vaudoises, la réduction des minerais de fer par le charbon de bois est grande consommatrice de



Figure 14. Minerai de fer granulaire constitué de cristaux de pyrite oxydée en limonite. Ce type de minerai, unique dans le canton de Vaud, a été anciennement exploité dans les Mines du Risoux mentionnées dès 1651. 15 x 14 cm. Photographie Stefan Ansermet. Collection Musée cantonal de géologie n°016056.

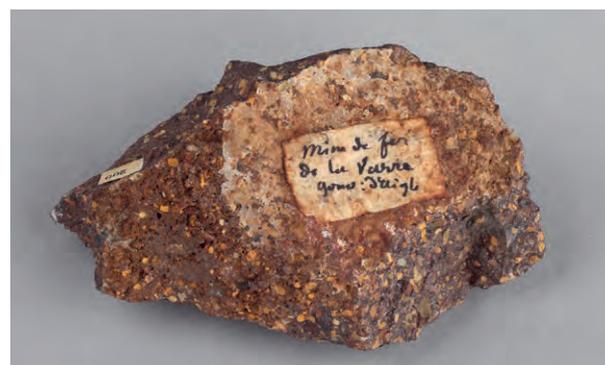


Figure 15. Minerai de fer du Valanginien (~134 millions d'années) qui affleure un peu à l'ouest de l'alpage de la Varre au-dessus de Pont de Nant. Issu de la collection Jean de Charpentier (1786-1855), cet échantillon porte un label avec l'inscription « mine de fer de la Varre gouv. d'aigle », qui pourrait attester de sa récolte lors de la présence bernoise. 10 x 6 cm. Photographie Stefan Ansermet. Collection Musée cantonal de géologie n°094438.

le gypse et l'anhydrite, est imprégné de soufre. L'histoire de la mine de soufre de Sublin a fait l'objet d'une étude très complète par Madame Lucienne Hubler, publiée en 1970. Les anciennes exploitations souterraines, dont l'accès en falaises est délicat, ont été retrouvées par Stefan Ansermet, du Musée cantonal de géologie, dans les décennies 1990 et 2000. De 1806 à 1814, afin de ruiner le Royaume-Uni en l'empêchant de commercer avec le reste de l'Europe, Napoléon I^{er} décrète le blocus continental. Immédiatement le soufre de Sicile ne parvient plus dans le Pays de Vaud. Or, ce métalloïde est indispensable à la fabrication de la poudre noire, un explosif déflagrant hautement stratégique et utilisé autant à des fins militaires qu'à l'exploitation des carrières et au génie civil (fig. 19). Ce blocus met à mal le bon fonctionnement



Figure 18. Soufre natif jaune vif dans sa matrice de calcite blanche et de dolomie grise. Mines du Sublin près de Bex. 12 x 7 cm. Photographie Stefan Ansermet. Collection Musée cantonal de géologie n°091497.

de la poudrerie cantonale d'Echandens et l'Etat attribue une concession minière pour le soufre de Sublin à Isaac-Augustin Joseph, salpêtrier en chef pour le compte des poudrières du canton. Ainsi un petit atelier, construit en contrebas des galeries de mines qui s'ouvrent dans les falaises, procède à l'extraction par grillage à l'abri de l'air et distillation. L'exploitation et la purification du soufre fonctionne jusqu'en 1820. Par la suite, sous l'impulsion de la famille des naturalistes Thomas de Bex, la mine de Sublin livre un grand nombre d'échantillons de soufre natif, que l'on trouve dans toutes les grandes collections minéralogiques mondiales (Hubler, 1970 ; Ansermet, 1995).

Des ressources pour mémoire

Un peu de plomb, associé à du zinc, est connu dès le XVIII^e siècle près de Bex, à proximité immédiate d'une mine de sel située à la confluence de la Gryonne et de la Petite Gryonne, la bien nommée mine d'Entre-Deux-Gryonnes. Ce chapelet d'indices métallifères, localisé dans les calcaires sombre du Lias, peut être suivi sur une centaine de mètres en surface. 80 mètres plus en profondeur, la minéralisation est recoupée par la galerie principale du Bouillet à proximité immédiate de la galerie de Sainte-Hélène (De la Harpe, 1861 ; Graf, 1994).

Les indices métallifères sont assez nombreux dans les seules roches cristallines affleurant sur 5 km² du territoire cantonal, sur la commune de Lavey-Morcles. Ainsi, au lieu-dit les Boitses, une tranchée de 2 m sur 3 a été ouverte directement dans un filon de quartz à mouchetures de minerai de plomb et, une vingtaine de mètres plus bas, une amorce de galerie de 5 m recoupe le même corps filonien avec des traces de perçages au foret et des coups de mine. Plus haut, non loin du chalet du Plan du Pré, une galerie d'une dizaine de mètres suit un mince filon irrégulier minéralisé en plomb. Enfin, encore plus haut, près de l'Alpage de L'Au de Morcles, c'est un filon décimétrique de barytine localement riche en plomb, cuivre et arsenic qui affleure sur plusieurs dizaines de mètres (fig. 20). Découverte en septembre 2010, cette minéralisation ne porte pas de traces d'exploitations ultérieures ; elle a certainement été recouverte par les névés quasi-permanents, issus d'avalanches. Les anciennes collections ou les collectes de blocs isolés dans les éboulis démontrent l'existence de minéralisations à plomb et baryum dans les environs du hameau d'Eslés et du chalet de Colatel mais leur emplacement précis n'est pas encore connu à ce jour. A notre connaissance, la seule référence historique pouvant rappeler les maigres travaux de prospection de ce secteur est une demande de permis de prospection, datée du 22 janvier 1807, faite par Jean François Oyon de la Posse afin «...de travailler dans une mine sous les rocs de Morcle...contenant à ce qui paroît Or, argent...(sic) » et qui est conservée aux Archives cantonales vaudoises (cote KXC 2003). Le procès-verbal d'une séance de la municipalité de Lavey-Morcles en 1853 indique : « *Le citoyen Jean Pernet s'adresse par lettre à la Municipalité pour lui demander l'autorisation de faire des fouilles pour découvrir une mine de plomb argentifère, qu'il croit devoir exister sur les montagnes de Morcles, au Sud de Plan Essert.*



Figure 19. Mondialement réputée pour sa qualité, la poudre noire vaudoise est produite d'abord à la poudrerie cantonale d'Echandens avec parfois du soufre de Sublin, puis dès 1853 à la poudrerie fédérale d'Aubonne jusqu'à nos jours. La poudre noire fut intensément utilisée dans les mines et carrières du canton de Vaud avant l'arrivée de la dynamite puis des explosifs de sécurité actuels. Photographie de P. Vionnet, vers 1870. Collection Photo Elysée.

Avant de se prononcer la Municipalité exige de connaître la partie des montagnes sur laquelle il se propose de faire des fouilles et les limites qu'il lui assigne. ».

Les Couches Rouges sont des marnes calcaires d'âge Crétacé à Tertiaire recelant très sporadiquement de petites minéralisations de cuivre comme à Sonchoux, aux cols d'Ayerne et de la Pierre du Moëllé, au barrage de l'Hongrin, à la Roche Rouge près de Leysin (Martini, 1971 ; Bertrand et Weidmann, 1979). Comme dans ces indices le cuivre se trouve très souvent sous sa forme métallique dite native, ce qui est particulièrement remarquable car son extraction ne nécessite pas de métallurgie complexe, il n'est pas exclu qu'il ait fait l'objet d'exploitation à l'âge du Bronze. Toutefois, à ce jour aucun indice issu d'observations de terrain ou d'analyses de géochimie isotopique, tant sur les minerais que sur les corpus archéologiques antiques

locaux, ne permet de le dire avec certitude (Ansermet et Meisser, 1997 ; Cattin et al., 2011).

L'étain sous la forme de son oxyde, la cassitérite, se retrouve systématiquement dans la fraction lourde des sables extraits des cours d'eau du Moyen Pays vaudois. Un plan des frontières du bailliage de Moudon de 1725, conservé aux Archives cantonales vaudoises (cote GB 207/b), indique la présence d'une « mine d'Étin » le long de La Lembaz vis-à-vis du moulin de Combremont, aux confins du territoire vaudois, entre Combremont-le-Grand et Cheiry dans la Broye (fig. 21). Une prospection récente n'a pas permis de découvrir les traces d'une ancienne exploitation minière, mais l'étude du sable de la rivière a confirmé la présence habituelle de cassitérite.

Au moins sept sites vaudois ont fait l'objet de prospections plus ou moins effrénées pour l'or sans que le pré-



Figure 20. Galène grise métallique et chalcopyrite dorée dans une matrice de barytine blanche. De telles minéralisations polymétalliques à plomb, cuivre et baryum se rencontrent sporadiquement sur le territoire de la commune de Lavey-Morcles. Elles ont fait parfois l'objet de prospections en courtes galeries. L'Au de Morcles. 8 x 5 cm. Photographie Stefan Ansermet. Collection Musée cantonal de géologie n°094458.

cieux métal jaune n'ait été trouvé (Gonet, 1978). Ainsi, la Dent de Vaulion a été l'objet d'une intense prospection au moins dès le XVIII^e siècle, comme nous le prouve un magnifique plan conservé à la Bibliothèque cantonale et universitaire. Le début du siècle suivant nous livre à ce sujet des archives riches en demandes de permis de recherche, refus et rapports de gendarmerie (Weidmann, 1973). Quoiqu'il en soit, des restes de galeries et de déblais existent un peu au-dessous du sommet de la Dent de Vaulion.

Néanmoins de l'or natif (fig. 22) existe bel et bien dans le canton de Vaud où une dizaine de rivières roulent le précieux métal sous la forme de paillettes ou plus rarement de pépites d'or natif et d'argent natif aurifère appelé

aussi « électrum ». L'origine de cet or est à rechercher dans les dépôts sableux issus des dernières glaciations : l'or présent dans des Alpes a été dispersé dans les sables des moraines, puis transporté par le glacier du Rhône jusqu'au Moyen Pays vaudois et dans l'Arc lémanique. Grâce à sa densité très élevée - l'or est 19 fois plus dense que l'eau - il se concentre au fond du lit des rivières d'où on peut l'extraire par gravité. Ainsi, dans les rivières de la Côte, entre Morges et Nyon ainsi que dans celles de la région d'Orbe et de Payerne, il est relativement aisé de récolter quelques parcelles du précieux métal (Mader, 1983 ; Meisser, 2013). Depuis une trentaine d'années, une modeste mais continue « ruée vers l'or » a lieu dans les gorges de l'Orbe où des paillettes d'or natif sont récoltées dans le sable et les graviers lourds accumulés dans

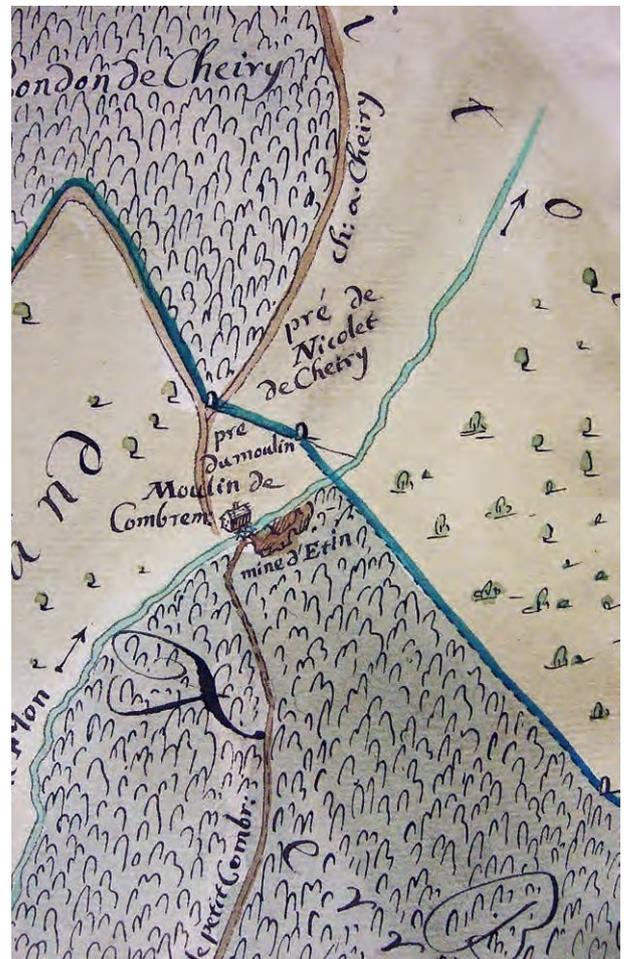


Figure 21. Plan des frontières du bailliage de Moudon de 1725. On note la présence d'une « mine d'Etin » le long de La Lembaz vis-à-vis du moulin de Combremont. Archives cantonales vaudoises (cote GB 207/b).



les marmites ou dans les fissures des calcaires du lit de la rivière (Meisser et Brugger, 2000 ; Meisser, 2013).

Associées au microgranite de Morcles, vieux de 303 millions d'années (Bussien-Grosjean et al., 2018), quelques anomalies radioactives naturelles marquent la présence d'uranium. Ces indices ont été détectés en 1972 lors d'une campagne de prospection de la fédérale et discrète « Arbeitsausschuss für die Untersuchung schweizerischer Mineralien und Gesteine auf Atombrennstoffe und seltene Elemente » (Labhart et Müller, 1972). La plus importante minéralisation uranifère actuellement connue dans le canton de Vaud se situe non loin des bains de Lavey, dans la forêt très raide de la rive droite du Torrent Sec, qui délimite la frontière avec le canton du Valais (Meisser, 2012). Découvert en mai 1989, il s'agit d'un filon qui affleure sur près de 50 m : il est recoupé au sud par une grande faille qui suit le lit du torrent et disparaît au nord sous une couverture d'éboulis. L'uranium, dont la teneur peut atteindre près de 6 kg par tonne, est associé au vanadium, au zinc et à l'yttrium. De légères anomalies radioactives naturelles, toujours liées à la présence d'uranium, sont également signalées dans des bois ou des os fossiles de la molasse lausannoise (Martini, 1961 ; Weidmann, 1977).

Jamais prospecté ni exploité, le plus important gisement vaudois de baryum et de fluor se localise dans des pentes



Figure 22. Un gramme de paillettes d'or natif récolté dans le lit de l'Orbe, non loin du village des Clées. Photographie Stefan Ansermet. Collection Musée cantonal de géologie n°093297. Don de M. Michel Gratier.

très raides en contrebas du village de Morcles. La barytine et la fluorite constituent à part égales près de 9 % d'une arkose du Trias qui affleure sur plusieurs centaines de mètres de part et d'autre du vallon de l'Avançon de Morcles, un peu au-dessus de sa grande cascade (Cavalli et al., 2002 ; Meisser, 2012).

La dolomite recèle du magnésium, un métal léger intensément produit par les industries électrométallurgiques valaisannes jusqu'en 1953. L'essentiel de cette production se faisait à Martigny, qui reste encore de nos jours un centre renommé pour les produits semi-finis en magnésium importé. Lors de la Seconde Guerre mondiale, la pénurie de minerai amena à évaluer les affleurements de dolomie de Chamby et du Chablais vaudois dans le vallon de La Tinière au-dessus de Villeneuve, dans les carrières d'Arvel, au Clos du Rocher près d'Yvorne, à la colline du Plantour et au Fahy près d'Aigle (Oulianoff, 1941a, b, c).

Le phosphore, indispensable à la préparation des engrais, a été prospecté lors des deux Guerres mondiales. Le gisement le plus important de Suisse se situe à l'Auberson, dans le Jura, où les prospections évaluent le gisement à près de 80'000 tonnes d'oxyde de phosphore (Mayor et Cie, 1943 ; Hasler, 1948).

Les pierres de collection

Le cristal de roche ou quartz, en fragments taillés ou en cristaux isolés intacts, est omniprésent dans le mobilier lithique de nombreux sites archéologiques vaudois du Mésolithique jusqu'à l'âge du Fer, qu'il s'agisse de lames, grattoirs, pointes de flèches ou amulettes. Déjà citée par Pline le Jeune, la tradition des cristalliers, à savoir les chercheurs de cristaux de roche dans les Alpes, est un patrimoine immatériel encore à reconnaître. Si cette tradition est fortement implantée dans les massifs de l'Aar, du Gothard et du Mont Blanc, elle reste plus confidentielle ailleurs. Dans les Alpes vaudoises quelques mentions ténues remontent au XVIII^e siècle (Gruner, 1760 ; Gruner, 1775). Dans sa monographie des Hautes-Alpes vaudoises, Renevier (1890) cite les chevriers de Taveyenne qui s'attellent à la récolte de cristaux. En 1884, les plus grands cristaux de quartz du canton de Vaud connus à ce jour sont découverts lors du percement d'une galerie d'amenée d'eau à la Tour de Duin, près de Bex. Mesurant jusqu'à 23 cm, ces cristaux montrent d'étranges formes fenêtrées et squelettiques. Exceptionnellement, certains cristaux se parent d'une teinte violet pâle digne

de la variété améthyste. A l'occasion de travaux de fouille diligentés par le Musée d'histoire naturelle de Berne, ce sont près de 400 cristaux noyés dans de la glaise, elle-même remplissant les fractures d'un grès, qui sont récoltés. Cette découverte fit sensation dans les milieux de la minéralogie (Von Fellenberg, 1885 ; Poty et al., 1974). De nos jours, les cristalliers amateurs récoltent toujours des cristaux de quartz dans les grès du Flysch du massif de la Croix de Javerne (fig. 23), à Aigremont près du Sépey et dans les environs des Diablerets (Meisser, 1995).

La calcite (fig. 24) est certainement le minéral le plus abondant du canton de Vaud ; ce minéral est en effet le constituant majeur des roches sédimentaires qui forment les Alpes vaudoises, les Préalpes ainsi que le Jura. Les sites où des cristaux isolés de calcite se récoltent sont innombrables, toutefois les gisements les plus célèbres sont les carrières des environs de La Sarraz et d'Eclépens. Une récente étude de la morphologie des cristaux de calcite récoltés dans ce secteur en décrit une grande variété, ce qui est tout à fait unique à l'échelle nationale (Andermatt et al., 2019).

Les cristaux bleus de célestine (fig. 25) se rencontrent plus sporadiquement dans les roches sédimentaires vaudoises. C'est surtout dans le Jura que ce minéral est récolté le long des gorges de l'Orbe et surtout dans les carrières souterraines de Baulmes. Du fait de sa couleur bleu céleste, ce minéral emblématique du Jura suisse fait l'objet d'un vif intérêt de la part des cristalliers et des collectionneurs de minéraux (Meisser, 2007 ; Andermatt et Meisser, 1999 ; Andermatt et al., 2008).

Les superbes cristaux gemmes de gypse découverts lors de l'exploitation des mines de sel de Bex ont une réputation mondiale du fait de leur pureté et de leur morphologie parfaite (fig. 26). De nombreux spécimens ont été diffusés dans les grandes collections muséales ou privées. Nés de conditions génétiques particulières, les cristaux de gypse bellerins sont à l'origine d'études cristallographiques ayant abouti à une meilleure description de cette espèce minérale. C'est la famille des naturalistes Thomas du hameau des Dévens près de Bex qui a contribué à la diffusion mondiale de ces cristaux de gypse (Meisser, 2014).

La découverte et la valorisation très récente de pierres précieuses dans certains cours d'eau du pied du Jura vaudois est la conséquence directe de la recherche de pail-



Figure 23. Cristal de quartz avec des faces creuses comme des fenêtres, un habitus typique du Chablais romand. Les Monts-de-Bex. 18 x 8 cm. Photographie Stefan Ansermet. Collection Musée cantonal de géologie n°092268.



Figure 24. Etranges cristaux de calcite aux formes lancéolées et uniques dans le canton de Vaud. Aiguilles de Baulmes. 16 à 25 mm. Photographie Stefan Ansermet. Collection Musée cantonal de géologie n°094068.

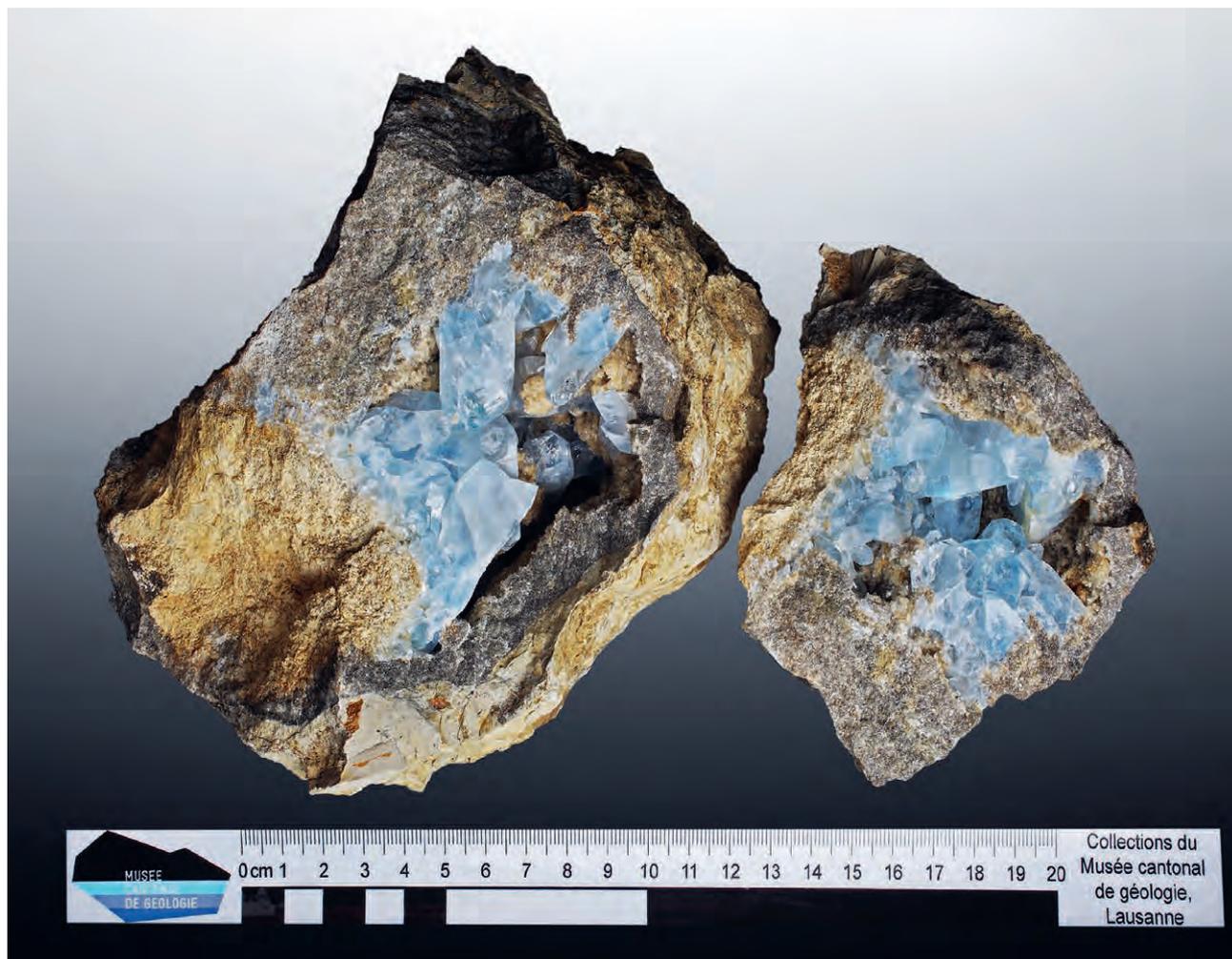


Figure 25. Une géode ouverte de cristaux de célestine bleu cèleste dans un calcaire des gorges de l'Orbe. Le plus grand cristal mesure 4.2 cm. Photographie Stefan Ansermet. Collection Musée cantonal de géologie n°093330 - Découverte de M. François Mouron.

lettres d'or natif par des passionnés. En extrayant sable et gravier des alluvions afin d'en séparer le métal jaune, nombre d'orpailleurs ont été attirés par les couleurs vives de certains galets ou graviers : vert menthe du jade-omphacite (fig. 27), vert lichen du très rare jade-jadéite, rose à lilas du rubis ou gris bleuté du saphir (fig. 28). Ces véritables trésors naturels ont été arrachés aux Alpes par l'érosion et amenés en terre vaudoise par le glacier du Rhône lors des multiples glaciations qui ont affecté la région.

Conclusions

Selon les usages et depuis près de 9'000 ans, le territoire vaudois a fourni à ses habitants une partie non négligeable des matériaux lithiques nécessaires à ses besoins, de l'éclat de silex mésolithique au béton actuel. Au gré de l'histoire, ces richesses, qui nous paraissent parfois totalement anecdotiques dans notre monde globalisé, ont été mises à contribution et ont constitué un apport bienvenu, parfois même salvateur en périodes de crises.

En 2020, 41 sites bénéficient d'un permis d'exploitation pour des matières premières minérales dans le canton de Vaud. Toujours la même année, la production de matériaux pierreux, destinés avant tout à la construction,

avoisine les 2 millions de m³ et celle de sel atteint 28'401 tonnes.

La transition écologique, et plus particulièrement la stratégie énergétique adoptée par les Autorités fédérales nécessite l'emploi incontournable de matières premières minérales. Dans le domaine du bâtiment, ces minéraux sont indispensables aux constructions nouvelles (béton, plâtre, céramiques, métaux, pigments) ou à la rénovation énergétique (fibres de verre ou de pierre). Le stockage et la production électrique par le biais du Soleil ou du vent font appel à des minéraux plus exotiques. Ce sont des sources de terres rares et de lithium, des éléments à la géostratégie complexe mais qui sont indispensables au développement de ces nouvelles technologies. Guère prospectées dans le canton de Vaud, de telles ressources existent peut-être sans avoir jamais été quantifiées et il n'est pas exclu qu'elles soient récupérables comme sous-produits d'exploitations déjà existantes ou à venir. Ainsi,

les minéraux recelant des éléments de terres rares sont des constituants très mineurs mais ubiquistes du million de m³ de sable et de graviers extraits annuellement du territoire cantonal. Lors des processus de criblage, tamisage et lavage de ces matériaux, il est possible d'en extraire la fraction des sables lourds et enrichie en terres rares, titane, zirconium et même or, comme le démontre une exploitation en cours dans le canton voisin de Genève (Erard, 2021). Les argiles extraites de nos jours sont potentiellement elles aussi des ressources possibles de terres rares et de lithium à étudier. Les différents projets de forages géothermiques profonds dans le canton de Vaud vont amener en surface des fluides hydrothermaux pouvant contenir des métaux dissous, tel le lithium. Si dans une économie globalisée et donc très concurrentielle, il est peu probable qu'à court terme de tels éléments soient produits régionalement, il n'est pas exclu qu'une politique de gestion des matières premières minérales, basée sur des circuits courts et résilients, permette



Figure 26. Agrégat de cristaux gemmes de gypse récolté au XIX^e siècle dans les mines de sel de Bex (à gauche). Les formes souvent uniques de ces cristaux ont fait l'objet de publications scientifiques. Mine du Coulat. 10 cm. Photographie Stefan Ansermet. Collection Musée cantonal de géologie n°002503. Paradoxalement, les cristaux de sel ou halite (à droite) sont très rares dans les mines de Bex qui produisent annuellement près de 28'000 tonnes de ce minéral. Mine des Vaux. 10 cm. Photographie Stefan Ansermet. Collection Musée cantonal de géologie n°032246.



Figure 27. Ce bijou dont la forme est inspirée de l'art des Maoris de Nouvelle-Zélande a été réalisé à partir d'un galet découvert dans l'Orbe par M. Michel Gratier. Apporté par le glacier du Rhône lors de la dernière glaciation, il provient à l'origine du Valais, de la région de l'Allalinhorn, au fond de la vallée de Saas. Son analyse a montré qu'il s'agit de jade-omphacite, avec des impuretés de chrome qui lui confèrent cette couleur exceptionnelle et rarissime, vert épinard à vert menthe, en tout point semblable au célèbre jade impérial de Birmanie. La dureté et la ténacité extrême de cette roche ont exigé un véritable tour de force technique nécessaire afin de tailler cette forme particulière, appelée « Pikorua twist ». Les quelques points rouges ou bleutés visibles dans la masse de la pierre sont constitués de rutile ou de kyanite. 58 x 38 mm. Photographie Stefan Ansermet. Collection Musée cantonal de géologie n°094068. Sculpture de M. Jean-Claude Vannay.

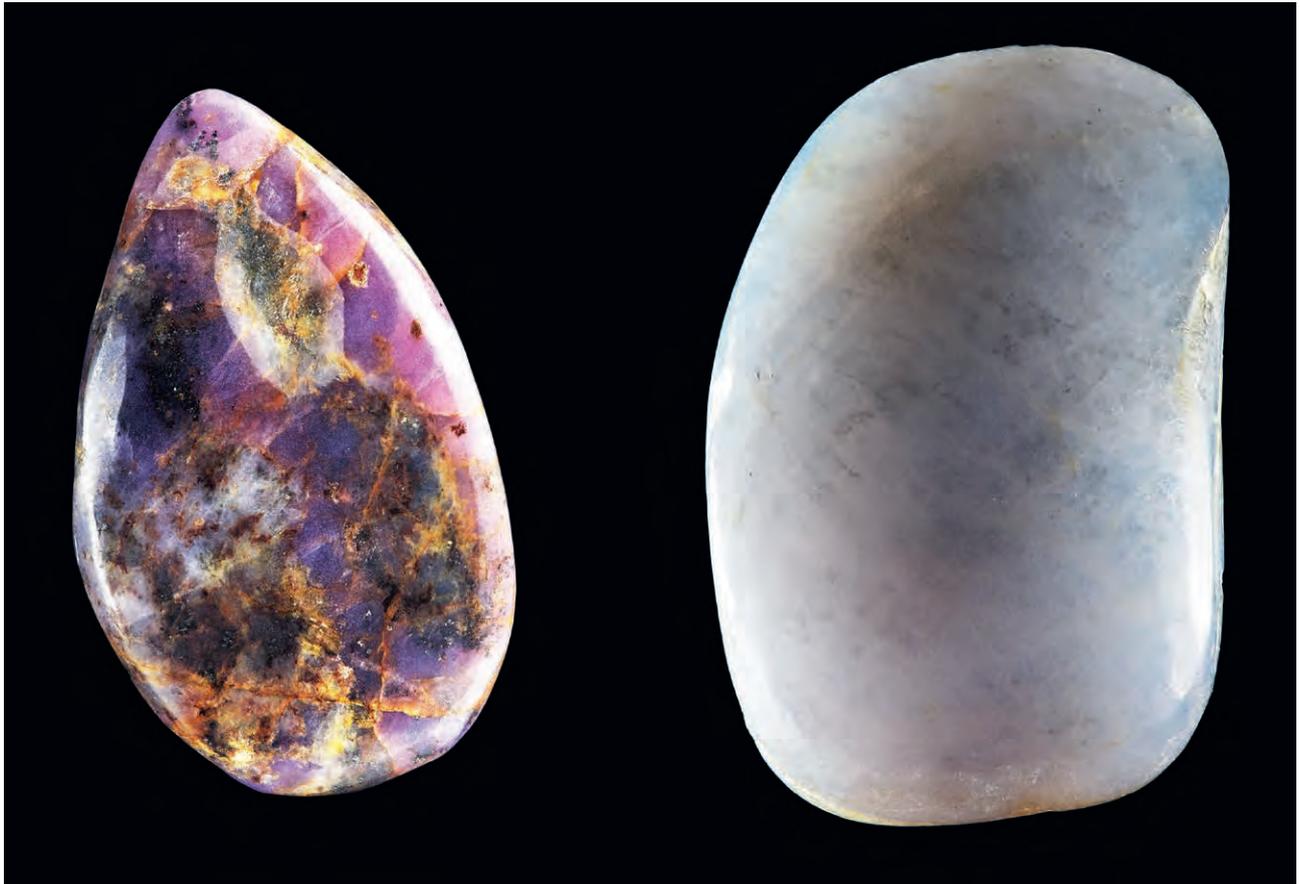


Figure 28. Deux pierres précieuses récoltées dans le lit de l'Orbe : un galet rose et lilas de rubis, 3,4 cm (à gauche) et un gravier de saphir bleu pâle, 1,4 cm (à droite). La présence inédite de ces trésors minéraux a été confirmée par des analyses en laboratoire en mai 2009. Photographie Stefan Ansermet. Collection Musée cantonal de géologie n° 093132 et 092982. Découverte de M. Michel Gratier.

de telles extractions locales à plus long terme. Dans cette perspective, le patrimoine, issu de deux siècles d'observations et d'échantillonnages géologiques archivés et préservés dans les collections cantonales du Musée de géologie, est plus que jamais une source inestimable d'informations stratégiques pour de tels projets.

Remerciements

Mme Monica Constandache pour la relecture du texte, la mise en page et le suivi de cette édition.

Mme Monique Fontannaz et M. Aurèle Jean Parriaux, pour les informations sur la mine d'étain de Combremont.

M. Paul Andermatt pour ses observations inédites sur les mines de fer du Jura vaudois.

M. Stefan Ansermet pour ses photographies et son accompagnement lors de nombreuses prospections sur le terrain.

M. Michel Gratier pour ses innombrables observations, son accompagnement lors de prospections dans les alluvions des rivières du Moyen Pays et du pied du Jura vaudois.

M. François Mouron pour son accompagnement lors de prospections de surface ou souterraines dans les gisements minéraux vaudois.

M. Pierre-Yves Pièce pour ses recherches archivistiques sur les concessions minières de la commune de Lavey-Morcles.

M. Antoine Pictet pour ses observations et recherches bibliographiques sur les dépôts de fer et de phosphore du Jura vaudois.

M. Jean-Claude Vannay pour ses analyses et recherches bibliographiques sur les jades vaudois.



Le Musée du Vieux Baulmes, Photo Elysée et les Archives cantonales vaudoises pour les reproductions photographiques. ■

Nicolas Meisser est conservateur au Musée cantonal de géologie.

Bibliographie

- ANDERMATT, P. ET MEISSER, N. (1999) : Mineralien aus dem Westschweizer Jura. *Lapis*, 24/2, 13-21.
- ANDERMATT, P. J., GRAF, H.-W., MEISSER, N., GRAESER, S., RICHARD, P. R. ET BUSSY, F. (2008) : La morphologie et la couleur des cristaux de célestine du Jura vaudois. *Bull. Soc. Vaud. Sci. Nat.* 91, 1, 15-31.
- ANDERMATT, P. J., RICHARD, P. R. ET MEISSER, N. (2019) : La morphologie des cristaux de calcite du Jura vaudois. *Bull. Soc. Vaud. Sci. Nat.* 98, 5-34.
- ANSERMET, S. ET MEISSER, N. (1997) : Découverte de trois nouvelles occurrences d'argent natif en Suisse. *Le Cristallier suisse*, 11/1, 7-12.
- ANSERMET, S. (1995) : La soufrière de Sublin près de Bex (VD). *Le Cristallier suisse*, 10, 228-236.
- AUDÉTAT, M., HEISS, G., CHRISTEN, D., DERIAZ, P., HEISS, C., LUETSCHER, M., MOREL, P., PERRIN, J. ET WITTWER, M. AVEC LES CONTRIBUTIONS DE BLANT, M., CHAIX, L., PERRIN, B., ET PIGNAT, G. (2002) : Inventaire spéléologique de la Suisse, IV, Jura vaudois, partie ouest. Société suisse de spéléologie, 535 p.
- BERTRAND, J. ET WEIDMANN, M. (1979) : Les nodules minéralisés de la Jointe (Vallée de l'Hongrin, Crétacé inférieur de la nappe des Préalpes médianes). *Arch. Sci. Genève*, 32/1, 43-66.
- BISSEGER, P. (1980) : Noir, brun, rouge, violet et jaspé : les marbres du Chablais vaudois. *Farbe und Farben, Albert Knöpfler zum 70. Geburts., Ver. Inst. Denkmalpflege ETH Zürich* (Zürich Manesse Verlag), Band 4, 79-84.
- BISSEGER, P. (1980) : Une dynastie d'artisans vaudois : les marbriers Doret. *Revue suisse d'Art et d'Archéologie*, vol. 37, 97-122.
- BOREL, G. (2022) : La production de ciment « Portland », une industrie lourde au cœur du développement de la Suisse romande. *Documents de l'Association pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud*, 15, 115 -127.
- BUSSIEN-GROSJEAN, D., MEISSER, N., MAY-LERESCHE, S., ULIANOV, A. ET VONLANTHEN, P. (2018) : The Morcles microgranite (Aiguilles Rouges, Swiss Alps) : geochronological and geochemical evidences for a common origin with the Vallorcine intrusion. *Swiss J. Geosci.* 111, 35-49.
- CATTIN, F., GUÉNETTE-BECK, B., CURDY, P., MEISSER, N., ANSERMET, S., HOFMANN, B., KÜNDIG, R., HUBERT, V., WÖRLE, M., HAMETNER, K., GÜNTHER, D., WICHSE, A., ULRICH, A., VILLA, I.M. ET BESSE, M. (2011) : Provenance of Early Bronze Age Metal Artefacts in Western Switzerland Using Elemental and Lead Isotopic Compositions and their Possible Relation with Copper Minerals of the Nearby Valais. *Journal of Archaeological Science*, 38/6, 1221-1233.
- CAVALLI, D., HALDEMANN, E. G., JAFFE, F., ROUILLER, J.-D., CRESTIN, D., MEISSER, N. ET TISSIÈRES, P. (2002) : Notice explicative partielle (Valais et régions limitrophes vaudoise et piémontaise) de la carte des matières premières minérales de la Suisse 1: 200'000, feuille 2, Valais - Oberland bernois. CRSFA Sion.
- CLAUDE, A. (1974) : Un artisanat minier-charbon, verre, chaux et ciments au Pays de Vaud. *Bibliothèque historique vaudoise*, 54, 272 p.
- CRIVELLI, C., ANSERMET, S., MEISSER, N., CURDY, P. ET BESSE, M. (2007) : Armatures en pierre polie du Valais et du plateau suisse au Néolithique : inventaire et détermination minéralogique. *Bulletin d'études préhistoriques et archéologiques alpines*, XVIII, 108-113.
- DERIAZ, P., BOURRET, F., JEANNIN, P.-Y., LALOU, J.-C., LAMBELET, J., PAULI, C. SPRING, D. ET THÉVOZ, P.-Y. AVEC LES CONTRIBUTIONS DE : BLANT, M., CHAIX, L., CHRISTE, P., GLAIZOT, O., MAEDERR, A., OPPLIGER, J., PIGNAT, G., RENAUDIN, P. ET STRINATI, P. (2007) : Inventaire spéléologique de la Suisse, V, Nord vaudois. Société suisse de spéléologie, 520 p.
- DIRECTION GÉNÉRALE DE L'ENVIRONNEMENT (2013) : Plan directeur des Carrières-PDCar 2013. Département de la sécurité et de l'environnement (DSE), 358 p.
- DUTRUIT J. (1994) : Les mines de Bébox (Vallorbe). - *Le Trou*, 57, 16-31.

- ERARD, L. (2021) : Le géologue déniché de l'or dans les graviers genevois. *Terre & Nature*, 21 octobre 2021, 2p.
- FELLENBERG, E. VON (1885) : Fenster- und Zepterquarze vom Tour de Duin bei Bex. *Mitt. Naturforsch. Ges. Bern*, 99-110.
- GINSBERG, A. (1817) : Rapport d'une course faite dans les montages de Naye, Jaman, Hautaudon, Audon et le long de la vallée du Longrain, en recherche d'une mine de fer, par ordre de la Direction des Mines et Salines, par Albert Ginsberg, du 3 jusqu'au soir du 6 septembre 1817. Archives cantonale vaudoises, K XC 2002.
- GONET, P.-A. (1978) : Histoire et actualité des chercheurs d'or en Suisse. Ed. P. M. Favre, Lausanne, 102 p.
- GRAF, M.-A. (1994) : Géologie et métallogénie de la région de Bex-Ollon-Villars (VD). Diplôme inédit, Inst. Géol. Univ. Lausanne, 1-82 + annexes.
- GRUNER, G. S. (1760) : Die Eisgebyrge des Schweizerlandes, mit allen dabey vorkommenden Mineralien. Bern, Carte.
- GRUNER, G. S. (1775) : Die Naturgeschichte Helvetiens in der alten Welt. Typographischen Gesellschaft, Bern, 183 p.
- DE LA HARPE, L.-P. (1817) : Relation d'une course faite dans les montagnes de la paroisse de Montreux, dans le but de rechercher les traces d'une ancienne exploitation de mine de fer, du 9 au 11 août 1817. Archives cantonales vaudoises, K XC 2002.
- DE LA HARPE, P. (1861) : Galène du Bévieux près de Bex. Séance du 2 janvier 1861. *Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat.*, 7, 48, 18.
- HASLER, A. (1948) : Über das Vorkommen schweizerischer Rohphosphate und deren Wirkung als Phosphorsäuredünger. *Landwirtschaftliche Vorträge*, 15, 60-65.
- HUBLER, L. (1970) : La soufrière de Sublin 1803-1845. *Revue historique vaudoise*, 78, 131-185.
- KÜNDIG, R., MUMENTHALER, T., ECKARDT, P., KEUSEN, H.-R., SCHINDLER, C., HOFMANN, F., VOGLER, R. ET GUNTLI, P. (1997) : Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz. Hrsg. GTK, 521 p.
- LABHART T.P. ET MÜLLER W.M. (1972) : Radioaktivitätsmessungen im Aiguilles-Rouges-Massiv. Arbeitsausschuss für die Untersuchung schweizerischer Mineralien und Gesteine auf Atombrennstoffe und Seltene Elemente, inédit.
- LETSCH, E., ZSCHOKKE, B., ROLLIER, L. ET MOSER, R. (1907) : Die Schweizerischen Tonlager. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, 4, 680 p + 7 tables.
- MAEDER, F. (1983) : Goldspuren in den Sanden einiger Bäche des Einzugsgebietes der Broye. *Bull. Soc. Frib. Sc. Nat.*, 72, 56-74.
- MARTINI J. (1971) : Un horizon à métallisations cuprifères dans les Préalpes médianes romandes et chablaisiennes. *C. R. des séances Arch. Sci., Genève*, 6, 33-46.
- MARTINI, J. (1961) : Note préliminaire sur les éléments-traces de quelques lignites régionaux. *Arch. Sci., Genève*, 14, 1.
- MAYOR ET CIE (1943) : Phosphates de l'Auberson. Rapport pour le compte du Bureau des Mines de l'Office de guerre pour l'Industrie et le Travail, Berne, 31 p. + 18 annexes.
- MEISSER, N. (1995) : Die Fensterquarze des Val d'Illice und der Region Bex (Westschweiz). *Lapis*, 20/12, 25-30.
- MEISSER, N. (1997) : La célestine de Baulmes (Jura vaudois). *Le Cristallier suisse*, 11/1, 1-5.
- MEISSER, N. (2007) : Un géotope et biotope unique : les mines et carrières de Baulmes. Documents de l'Association pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud, 9, 13-15.
- MEISSER, N. (2012) : La minéralogie de l'uranium dans le massif des Aiguilles Rouges. *Matér. Géol. Suisse, Ser. géotech.* 96, 183 pp + 1 carte. Confédération suisse, Office fédéral de topographie Swisstopo.
- MEISSER, N. (2013) : Die Goldvorkommen in der Westschweiz. In : Pfander, P. & Jans, V. (Red.), *Gold in der Schweiz*. Ott Verlag, Thun. ISBN 978-3-7225-0130-7. 5., überarbeitete Auflage 2013, 116-137.
- MEISSER, N. (2014) : Les découvertes historiques de cristaux de gypse dans la mine du Coulat à Bex, en 1790 et 1817. *Minaria Helvetica*, 34, 54-61.
- MEISSER, N. (2022) : Le rôle clé du sel vaudois dans le développement de l'industrie chimique et ses reliques patrimoniales. Documents de l'Association pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud, 15, 33-66.



- MEISSER, N. ET BRUGGER, J. (2000) : Alluvial native gold, tetraauricupride and AuSn_2 from Western Switzerland. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt. 80, 291-298.
- MUMENTHALER, TH. (2022) : L'argile, une substance extraordinaire et omniprésente. Documents de l'Association pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud, 14, 95-102.
- OULIANOFF, N. (1941a) : Rapport préliminaire concernant les roches dolomitiques dans la région de Montreux (Lac Léman). Archives du Musée cantonal de géologie, Lausanne, 2 p.
- OULIANOFF, N. (1941b) : Rapport préliminaire concernant les roches dolomitiques dans les limites des carrières d'Arvel, près Villeneuve (Vallée du Rhône). Archives du Musée cantonal de géologie, Lausanne, 5 p. + annexe.
- OULIANOFF, N. (1941c) : Rapport préliminaire concernant les gisements des roches dolomitiques dans la région d'Aigle (Vallée du Rhône). Archives du Musée cantonal de géologie, Lausanne, 4 p. + complément.
- PELET, P.-L. (1971) : La politique du fer des autorités "helvétiques" et vaudoises, 1798-1833. Publication Ecole Sciences sociales et politiques de l'Université de Lausanne, 3, 9-55.
- PELET, P.-L. (1973) : Fer Charbon Acier dans le Pays de Vaud, Les sources archéologiques, vol 1. Bibliothèque historique vaudoise, 49, 270 p.
- PELET, P.-L. (1978) : Fer Charbon Acier dans le Pays de Vaud. La lente victoire du haut fourneau, vol. 2. Bibliothèque historique vaudoise, 59, 354 p.
- PELET, P.-L. (1983) : Fer Charbon Acier dans le Pays de Vaud. Du mineur à l'horloger, vol. 3. Bibliothèque historique vaudoise, 74, 491 p.
- PELET, P.-L. (1993) : Une industrie reconnue: Fer Charbon Acier dans le Pays de Vaud. Cahiers d'Archéologie Romande, 60, 142 p.
- PIÈCE, P.-Y. (2022) : Les cartes et plans des Archives cantonales vaudoises: une mine patrimoniale qui ne manque pas de sel ! Documents de l'Association pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud, 15, 141-152.
- POTY, B., STALDER, H.A. ET WEISSBROD, A.M. (1974) : Fluid Inclusions Studies in Quartz from Fissures of Western and Central Alps. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt., 54, 717-752.
- RENEVIER, E. (1890) : Monographie des Hautes-Alpes vaudoises. Matériaux pour la carte géologique de la Suisse, 16, 562 p.
- RITTENER, TH. (1902) : Etude géologique de la Côte-aux-Fées et des environs de Ste-Croix et Baulmes. Matériaux pour la carte géologique de la Suisse publiés par la commission géologique de la Société helvétique des sciences naturelles, 116 p.
- SEPTFONTAINE, M. (1999) : Belles et utiles pierres de chez nous. Musée cantonal de géologie, Lausanne, 48 p.
- SERNEELS, V. (1993) : Archéométrie des scories de fer. Recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale. Thèse de doctorat Université de Lausanne, 2 volumes. 302 p.
- SERNEELS, V. (2004) : La limonite du Valanginien, aspects minéralurgique et métallurgique. Minaria Helvetica, 24b, 32-40.
- SERNEELS, V., FOLLETETE, C. ET JACQUEMEIN-VERGUET, C. (2004) : Aperçu du district sidérurgique du Mont d'Or. Minaria Helvetica, 24b, 7-19.
- TESTAZ, G. (2014) : Gypse, anhydrite...et vins : les autres ressources de la région de Bex. Minaria Helvetica. 34, 9-26.
- TESTAZ, G. (2022) : Des gravières et des carrières comme patrimoine ? Documents de l'Association pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud, 15, 67-73.
- TINGRY, P.F. (1803) : Traité théorique et pratique sur l'art de faire et d'appliquer les vernis. Tome second. G.J. Manget libr. Genève, 313 p.
- VIONNET, P. (1869) : Notes sur quelques affleurements de la molasse d'eau douce inférieure dans les vallées de l'Aubonne, du Boiron, etc. Bull. Soc. Vaud. Sci. Nat., 10, 329-330.
- WEIDMANN, M. (1973) : «Une ruée vers l'or» vaudoise : les mines de la Dent de Vaulion. Bulletin des Laboratoires de géologie, minéralogie, géophysique et du Musée géologique de l'Université de Lausanne, 206, 89-100.
- WEIDMANN, M. (1977) : Minéralisations uranifères dans des ossements de vertébrés de la molasse. Bull. Soc. vaud. Sc. nat., 351, 73, 305-308.



WEIDMANN, M. (1993) : Histoire de la prospection et de l'exploitation des hydrocarbures en Pays vaudois. Bull. Soc. vaud. Sc. nat. 80, 4, 365-402.

WEIDMANN, M. (2006) : Mines de sel de Bex, données 1991-2004. Matériaux pour la géologie de la Suisse, Série géotechnique, 94, 1-31.

WEIDMANN, M. ET MEISSER, N. (2022) : Le charbon vaudois. Documents de l'Association pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud, 15, 103-113.



Le rôle clé du sel vaudois dans le développement de l'industrie chimique et ses reliques patrimoniales

par Nicolas Meisser

« [- Bex rend fou.] ... [Des sages parlent d'influences telluriques.] ... [D'autres mettent en cause les Salines dont les miasmes et les labyrinthes exercent sur les glandes thyroïdes et les psychés un effet pernicieux qui agite les nerfs et gonfle les imaginations.]

Jacques Chessex, Portrait des vaudois.

Cahiers de la Renaissance vaudoise, 1967

Introduction

Du fait de sa longue histoire tant géologique qu'humaine, son omniprésence dans les foyers, son lot de souvenirs à l'occasion de visites de ses mines, le sel vaudois est plus que jamais marqué du sceau identitaire.

A travers le temps, les emballages du sel bellerin de nos cuisines restent de discrets mais omniprésents objets de la vie quotidienne. Ainsi l'austère parallélépipède aux couleurs cantonales, vert à points blancs, de la Société vaudoise des Mines et Salines de Bex a fait place à la nouvelle marque « Sel des Alpes », avec sa représentation de la ville de Bex à l'horizon barré par la Cime de l'Est, trônant tel un véritable Cervin romand. Enfin plus récemment, sur le conditionnement cartonné figure un petit pâtre et ses chèvres dominés par des pics montagneux acérés et stylisés.

Ce sel, c'est également le souvenir d'hivers fort neigeux et les soucis du Service cantonal des routes presque à court de sel de déneigement, inquiétudes souvent relayées par les médias.

Le sel vaudois, c'est surtout ses mines souterraines, celles de Bex et plus exactement celle du Bouillet, que nombre d'enfants et d'adultes ont visité lors d'une excursion touristique, souvent pour échapper à une journée pluvieuse de vacances, ou à l'occasion d'une course d'école (Collectif, 2009).

L'histoire de l'extraction, du raffinage et de la transformation du sel vaudois est passionnante de par les différents sites exploités, les acteurs savants ou aventuriers et le

développement de techniques d'extraction appliquées à un minerai bien spécifique qu'est le « roc salé ». L'impact économique, politique et stratégique du sel vaudois, avant et après la création de l'Etat de Vaud, est puissant. Nombreux sont les auteurs qui se sont penchés et se passionneront encore sur ces aspects bien cachés dans les riches archives, mémoires de quatre siècles et demi d'exploitation (Pièce, 2022).

Afin de conduire au mieux l'exploitation, des générations de savants et d'ingénieurs ont étudié et valorisé les gisements vaudois de sel. Ainsi la genèse et la géologie extraordinairement complexe du dépôt de sel de Bex fait l'objet de descriptions, d'interprétations et même de controverses dans plus de 200 publications et ouvrages scientifiques. Sans prétendre à l'exhaustivité, nous citerons les travaux de Wild (1788), de Charpentier (1818), Payot (1921), Badoux (1966), Collectif (1986), Graf (1994), Weidmann (2006), Cornaz (2007), Angéloz (2014), Meisser (2014), Pièce et Weidmann (2014), Pièce (2020) et Vernez et Hubler (2020) couvrant les domaines généraux de l'exploration, de l'exploitation, de l'histoire minière, de la géologie et de la minéralogie des sites salifères.

Sur un plan scientifique « plus dur », celui de la chimie, le sel de Bex n'est en fin de compte que du sodium et du chlore, deux éléments indispensables à la vie et au développement de la chimie industrielle en terres vaudoise et valaisanne (fig. 1). Deux éléments qui, une fois extraits puis combinés, se retrouvent dans une multitude de substances, dont certaines ont eu des succès commerciaux au retentissement mondial. Ainsi, la



préparation et l'utilisation de tous ces produits dérivés du sel de Bex nous livrent parfois nombre de récits, rapports ou anecdotes inédits ou consternants.

La Révolution industrielle et le sel de Bex

Parler du sel vaudois seulement comme un additif de sapidité et de conservation ou comme une source minérale pour le bétail et un agent de déglacage des routes est un peu court. De mai 1898 à janvier 2005, le sel bellerin est l'incontournable ingrédient à l'origine de l'implantation et du développement d'une industrie chimique régionale extraordinairement riche en découvertes, en procédés et en brevets d'importance mondiale. Dans une économie globalisée, le gisement de Bex, avec ses basses teneurs en sel et sa complexité géologique, ne peut guère rivaliser avec les autres dépôts d'Europe centrale, constitués parfois de couches de sel gemme pur, épais d'une dizaine de mètres et s'étendant sur plusieurs km². Toutefois, sa position dans le relief alpin représente un atout majeur de par sa proximité immédiate avec une autre richesse, elle aussi liée au relief : l'hydroélectricité, la fameuse « houille blanche », dont le développement va de pair avec l'exploitation contemporaine du gisement. L'électricité permet la rationalisation technique et la rentabilité de l'extraction du sel vaudois au travers de l'exploitation par sondages, injection, pompage, concentration et cristallisation des saumures. Cette même électricité est aussi le moteur du développement de deux sites industriels majeurs, qui utilisent le sel comme matière première essentielle : les usines chimiques de Monthey et du Day, près de Vallorbe. Enfin, la situation géographique de ces lieux extractifs et chimiques le long de l'axe de communication Paris-Milan représente un autre atout. Dès le milieu du XIX^e siècle, de multiples compagnies ferroviaires s'attèlent à construire des sections de voies ferrées le long de cet axe, un effort couronné en 1906 avec l'ouverture totale de la ligne suite au percement du tunnel du Simplon. A l'origine de vives inquiétudes, car facilitant la diffusion du sel bon marché, cet axe ferroviaire se révèle au final un avantage certain qui permet la diffusion internationale des spécialités chimiques dérivées du sel bellerin.

Le sel

Les mouvements de marchandises facilités par l'ouverture progressive de lignes de chemin de fer d'abord régionales, puis nationales et internationales, rendent l'exploitation du sel bellerin de moins en moins rentable

face à la concurrence, en particulier celle du sel suisse bon marché exploité à Schweizerhalle et à Riburg, près de Bâle, qui inonde le pays. La concurrence est trop grande, à Bex l'exploitation doit absolument changer ses techniques car il est bien trop cher d'abattre à la main le « roc salé », ce minerai contenant seulement 30 % de sel, pour le dessaler ensuite.

En 1865, le Grand Conseil Vaudois décide d'abandonner les mines et salines de Bex. Le salut vient d'une considération simple : suivant le modèle des concurrents bâlois, il faut extraire *in situ* le sel dans la roche en le dissolvant avec de l'eau douce puis en pompant la saumure ainsi formée. Fondée par quatre citoyens courageux et ingénieurs, la Compagnie des Mines et Salines de Bex voit le jour en novembre 1866. C'est un soulagement pour les habitants de cette région du Chablais vaudois, où les mines et les salines constituent la seule industrie majeure. Immédiatement, des essais de dessalaison ont lieu. Ainsi, certaines salles et galeries des anciens travaux sont noyées d'eau douce qui se charge progressivement en sel. La saumure ainsi obtenue et qui est bien plus dense que l'eau douce, s'écoule au bas de l'exploitation d'où elle est extraite par simple soutirage ou par pompage. C'est déjà un grand succès, mais les fondateurs ne vont pas en rester là : il faut absolument améliorer et rentabiliser les procédés d'évaporation de la saumure, la « cuite du sel » ou salinage, qui est très énergivore. Profitant du chemin de fer, on remplace le bois par la houille importée, tout en se penchant sur une autre ressource locale facilement disponible : la force hydraulique. Auparavant, lors du salinage, à savoir le chauffage de la saumure afin d'évaporer l'eau et libérer ainsi le sel solide, pour chaque tonne de sel extraite il était nécessaire de brûler près d'une tonne et demie de bois. Cette exploitation massive des forêts du Chablais vaudois pour du bois de chauffe provoque nombre de conflits depuis plusieurs siècles. L'attribution d'une concession d'exploitation pour une durée de 50 ans, de 1867 à 1917, est signée avec l'Etat de Vaud. Fort d'une base juridique saine et durable, les fondateurs étudient les techniques de cristallisation utilisées dans d'autres salines, dans les sucreries et dans l'industrie chimique. C'est l'ingénieur vaudois Paul Piccard, spécialiste des turbines et des pompes hydrauliques et par ailleurs pionnier de l'automobile avec L. Pictet et leurs fameux modèles Pic-Pic, qui est appelé à se pencher sur cette problématique. Dix ans plus tard, en 1877, il met en fonction un premier évaporateur basé sur le principe de la thermocompres-



Figure 1. L'étiquette d'un vieux flacon indique : « Echantillon du premier sel gemme trouvé dans la galerie de la Barmaz 14 9bre 1881. BOREL PHARMACIEN A BEX ». Lors du percement de la galerie de la Barmaz, longue de 1500 m, entre 1879 et 1883, une poche de sel gemme a été découverte à 200 m de l'entrée de la galerie. Photographie Stefan Ansermet. Musée cantonal de géologie n° 093795 ; 148 x 53 x 48 mm.

sion, en somme celui des pompes à chaleur. La vapeur d'eau du salinage, autrefois perdue avec ses calories, est maintenant comprimée : la chaleur ainsi concentrée est à nouveau utilisée dans la phase d'évaporation. Seul un faible apport calorifique, obtenu en brûlant de la houille est nécessaire pour maintenir le système à l'équilibre. Quant à la principale énergie mécanique qui est engloutie pour la compression de la vapeur d'eau, elle est issue du turbinage de l'eau de l'Avançon (Grenier, 1888). Amélioré sans cesse aux Salines de Bex, qui deviennent un véritable laboratoire de thermodynamique appliquée, puis commercialisé par Faesch & Piccard & Cie de Genève, ce procédé de thermocompression essaime dans le monde entier. En 1894, une seconde turbine est mise en service à Bex afin d'augmenter la production. Une autre étape majeure est franchie en 1923, avec la réalisation des premiers forages de prospection, puis d'exploitation par injection d'eau douce et dessalaison du massif de « roc salé » (fig. 2).

Quelque peu modifié, ce mode d'exploitation perdure encore de nos jours.

L'hydroélectricité

La seconde moitié du XIX^e siècle voit fleurir nombre de chantiers hydroélectriques. On prévoit très vite grand, au risque avéré de produire un surplus d'électricité inutilisé. En effet, comme l'électrification des industries, villes, ménages et lignes de chemin de fer tarde, de l'électricité est donc massivement disponible pour l'industrie locale. Cette fin du XIX^e et le début du XX^e siècles voient ainsi l'apparition dans l'arc alpin, du Dauphiné à la Styrie, de grandes industries électrochimiques et surtout électrométallurgiques produisant massivement du chlore, de la soude, du sodium, de l'aluminium, du magnésium, du graphite synthétique, du carbure de calcium, du phosphore, de la fonte électrique, etc.

Le record d'antériorité de production de houille blanche dans le Chablais romand revient à Monthey où, en 1893 déjà, une usine électrique, turbinant l'eau de la Vièze au débouché de ses gorges est mise en service au profit de la sucrerie Helvetia. En 1910, la Basler Chemische Fabrik,



Figure 2. Carotte de sondage de « roc salé » extraite en 1998 à partir de la galerie de l'Espace dans la mine du Bouillet à Bex. Le sondage a percé le minerai de sel à -453 m dissolvant en partie ce dernier. 190 x 48 mm. Photographie Stefan Ansermet. Musée cantonal de géologie n° 065611.



qui deviendra par la suite Ciba, construit, toujours à Monthey, une nouvelle et puissante centrale électrique.

Dans le Chablais vaudois, l'usine électrique de Sublin, construite par les Forces motrices de l'Avançon, permet une électrification partielle des mines et des salines dès 1897, mais il faut attendre 1943, avec la mise en service d'une turbine hydroélectrique aux salines de Bex pour voir la disparition totale de la houille comme source de chaleur pour le salinage. Dès lors, du forage à l'ensachage du sel en passant par l'éclairage de la mine, l'électrification complète des moyens de production est ainsi réalisée. Toujours en 1897, l'ingénieur Anthelme Boucher mène à son terme le chantier de la centrale électrique de Vuargny près d'Aigle.

A l'autre extrémité du territoire cantonal, un autre grand projet hydroélectrique a déjà vu le jour au Day, non loin de Vallorbe, sur le cours de l'Orbe, qui est le plus important cours d'eau du Jura vaudois : l'usine électrique du Saut du Day est inaugurée en 1889 afin d'alimenter la première usine électrochimique au monde. Cet événement marque le début de la grande exploitation de l'Orbe, cette rivière qui, de nos jours, alimente pas moins de six centrales hydroélectriques (Leresche, 2007).

Les transports

La Compagnie de l'Ouest des chemins de fer Suisse inaugure le 10 juin 1857 la ligne de train Bex-Villeneuve. En 1860 la ligne est prolongée jusqu'à Lausanne, et enfin en 1878, la ligne Lausanne-Brigue, dite du Simplon, est finalisée. A l'ouest du canton de Vaud, la construction de la ligne de chemin de fer qui relie Vallorbe à Dailens est réalisée entre 1866 et 1870 par la Compagnie des chemins de fer Jougne-Eclépens. Le développement du train permet ainsi l'expansion économique de ces régions qui voient affluer les voyageurs et facilite les exportations de biens manufacturés.

Le sel, la saumure, l'électricité, le rail sont disponibles - place dès lors aux ouvriers, ingénieurs, entrepreneurs et financiers afin que l'aventure de l'électrochimie industrielle puisse commencer (fig. 3).

L'électrochimie industrielle

La chimie industrielle moderne se base sur quelques centaines de substances essentielles qui, combinées entre elles, produisent les centaines de milliers de composés aux innombrables applications que l'on rencontre dans

la vie de tous les jours. Parmi ces substances de base, quelques dizaines d'origine minérale sont absolument incontournables ; ce sont surtout des acides, des bases ou des gaz comprimés qui peuvent être produits par des procédés électrochimiques, dont un en particulier : l'électrolyse.

Pour mémoire, rappelons que l'on peut définir l'électrolyse simplement comme étant la décomposition chimique d'une substance ou d'un mélange de substances sous l'effet d'un courant électrique. L'électrolyse industrielle est pratiquée dans un récipient, généralement une cuve ou un creuset, dans lequel plongent deux électrodes alimentées par du courant continu. L'électrode de signe positif est appelée anode, celle de signe négatif, cathode. Le récipient contient un liquide, l'électrolyte, qui est un conducteur électrique dans lequel se produisent les réactions de décomposition. Dans le cas des sites industriels de Monthey et du Day, cet électrolyte est soit de la saumure, soit du sel liquéfié par fusion à 800°C. L'électrolyse est surtout utilisée dans les nombreux procédés de traitement de surface des métaux afin de les préserver de la corrosion : chromage, galvanoplastie, dorage, anodisation, etc. L'électrolyse pratiquée dans les deux sites mentionnés est une électrolyse dite de synthèse dont le but est de produire des substances différentes.

Le site chimique de Monthey

Les premiers pas de la chimie industrielle montheysane débutent dans la mélasse... avec l'ouverture en 1894 de la sucrerie Helvetia fondée par l'entrepreneur colonel Adolphe Fama. Les procédés d'extraction et de purification du sucre extrait de la mélasse de betterave sont bien maîtrisés depuis le milieu du XIX^e siècle. L'abolition de l'esclavagisme dans les colonies européennes entraîne une forte augmentation du prix du sucre tiré de la canne sucrière d'outre-mer, ce qui rend concurrentiel le sucre issu de la betterave indigène. La correction du lit du Rhône dans le Chablais libère de nouvelles terres agricoles, idéales pour la culture de la betterave sucrière. Mais les agriculteurs se tournent vers des productions plus rentables, comme le tabac ; pour faire tourner l'usine il faut importer la matière première de bien loin. Trois ans après son ouverture, la sucrerie Helvetia est liquidée (Weissbrodt, 1997). Les précieuses machines sont vendues et servent aux premières productions de la sucrerie d'Aarberg, inaugurée en 1898. Les grands bâtiments

de la sucrerie sont achetés par la Société des Usines de Produits chimiques de Monthey (Ciba, 1954). Cette entreprise se propose d'effectuer l'électrolyse de la saumure des mines de Bex en utilisant le courant électrique de l'usine de la Vièze. En 1898, des garanties sur les concessions hydroélectriques sont obtenues. Il reste à amener la saumure des mines de Bex jusqu'aux réservoirs de l'usine : le défi est plutôt politique que technique et c'est avec grande peine que l'Etat de Vaud cède une partie de son monopole sur le sel et la saumure de Bex au profit d'une société installée en Valais. Par convention, le tiers du bénéfice de l'opération va à l'Etat de Vaud, qui le met à disposition pour les travaux d'exploration et d'exploitation des mines de sel. Pour transporter la saumure d'un canton à l'autre il est nécessaire de construire en 1898 un saumoduc, à savoir une conduite en fonte de près de

9 km qui enjambe le Rhône au pont de Massongex. Bien plus tard, en mai 1974, un nouveau saumoduc plus court sera mis en service, qui franchit cette fois le fleuve sur la passerelle du gazoduc à la hauteur du site chimique. A Monthey, les premières cellules d'électrolyse de la saumure bellerine produisent chlore, soude caustique et hydrogène. La vague hygiéniste qui déferle à cette époque promeut l'utilisation massive de désinfectants. Ce seront les premières productions de l'usine de Monthey où l'on obtient de l'eau de Javel ménagère par l'action du chlore sur la soude. De même, par la réaction du chlore sur la chaux éteinte produite dans la carrière de calcaire voisine du Muguet, on prépare du chlorure de chaux ou hypochlorite de calcium impur, qui sert essentiellement à la désinfection et au blanchiment.



Figure 3. Employés de la Fabrique chimique de Monthey en 1904. A cette époque il n'existe pas encore de formation spécialisée, hormis les chimistes et laborantins en complets et cravates qui posent de part et d'autre d'un appareil de titrage analytique. Très polyvalente, une entreprise chimique d'antan s'appuie sur de nombreux corps de métiers comme les chauffagistes, chaudronniers, plombiers, tonneliers, ferblantiers, verriers, électriciens, etc. Archives CIMO.



En 1904, après des tumultes financiers insurmontables, l'usine est vendue à la Société pour l'Industrie Chimique à Bâle, qui deviendra par la suite la fameuse Ciba en 1945. Les Bâlois comprennent très vite qu'il faut profiter de cette manne locale, saumure, électricité et main d'œuvre à bas coûts, pour produire des produits à forte valeur ajoutée, essentiellement des colorants, dont ils maîtrisent déjà la synthèse à petite échelle en laboratoire. Le programme est ambitieux et, pour consolider les bases de l'usine, une centrale électrique nouvelle et plus puissante est construite sur la Vièze entre 1907 et 1909. Parallèlement, les électrolyseurs de saumure à diaphragmes selon le procédé dit de Griesheim (fig. 4), hérités de l'ancienne usine, sont progressivement remplacés par des électrolyseurs à électrodes mobiles dites « extractives », inventés à Monthey, et qui livrent du chlore, de la soude caustique et de

l'hydrogène très purs (Pietsch et Steinbuch, 1910 ; Luib et Steinbuch, 1920). Par ailleurs, d'autres fours d'électrolyse sont construits afin de décomposer le sel fondu en chlore et en sodium métallique ; leur développement à Monthey fait l'objet de dépôts de brevets (Steinbuch, 1913 ; Steinbuch et Fullemann, 1931) (fig. 5). Pendant quelques dizaines d'années, cette succession de brevets fera rayonner mondialement le savoir-faire des chimistes et ingénieurs montheysans devenus les maîtres incontestés de l'optimisation des procédés d'électrolyse du sel.

En 1916, la capacité de production mensuelle issue de l'électrolyse du sel de Bex, en saumure ou fondu, est de 300 tonnes de soude caustique solide, 270 tonnes de chlore et 90'000 m³ d'hydrogène (Ciba, 1954).

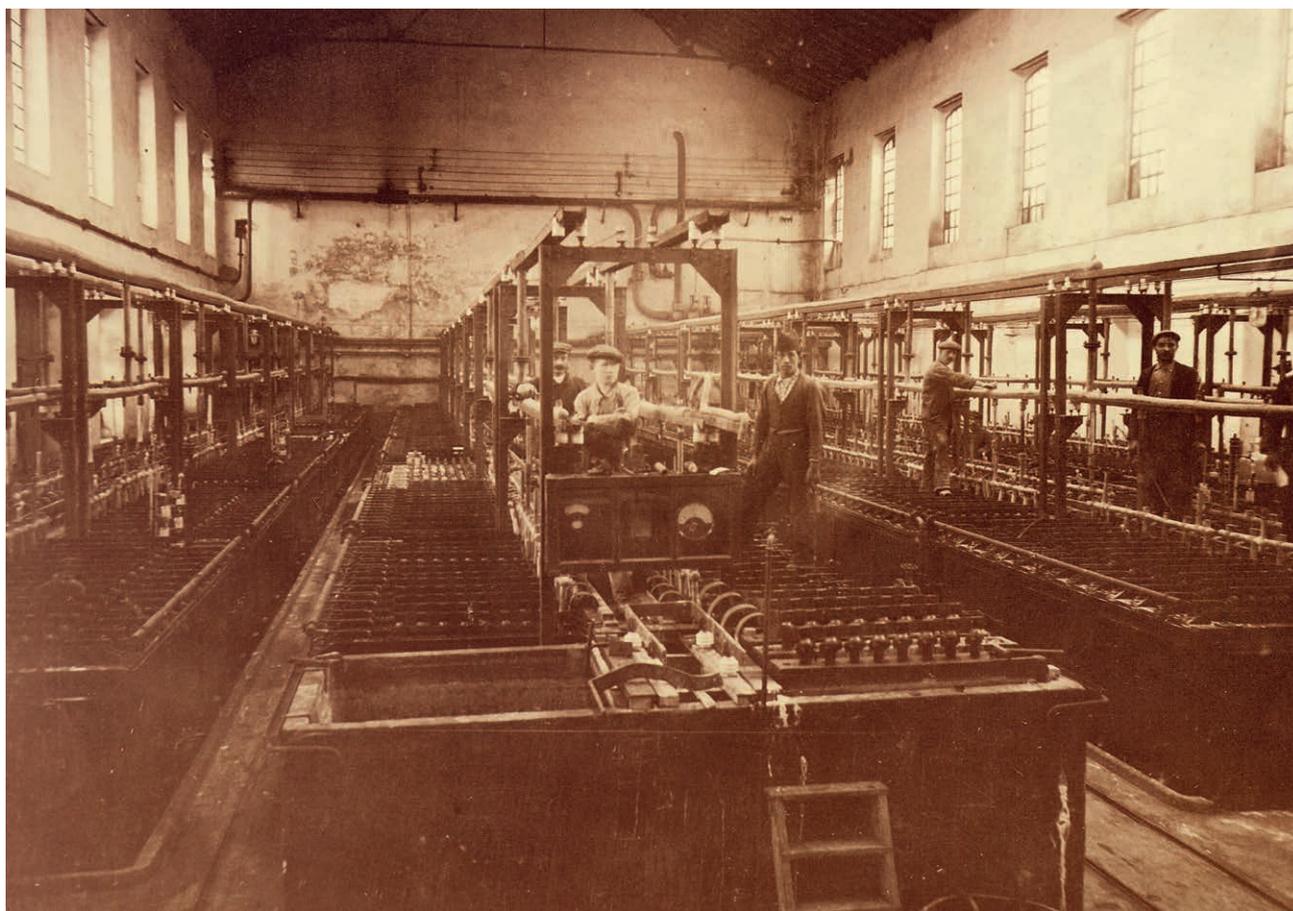


Figure 4. Electrolyseurs de saumure à diaphragmes selon le procédé Griesheim hérités de l'ancienne usine et qui furent les premiers à produire du chlore, de la soude caustique et de l'hydrogène issu des saumures de Bex sur le site de Monthey. Ce premier atelier est à la base du développement de la chimie chablaisienne dès 1898. Archives Ciba.



Figure 5. Indispensable à la synthèse de l'indigo, le sodium métallique est produit par électrolyse du sel de Bex fondu dans des fours à 800°C. Pétraradant au contact de l'eau, ce métal sera à l'origine de nombreuses farces entre les ouvriers. Pour la fabrication de l'indigo les ouvriers spécialisés dans l'emploi du sodium métallique étaient respectueusement appelés les « canonniers ». Archives Ciba.

Le sel de Bex : précurseur de l'indigo synthétique, le colorant des blues jeans

En ce début de XX^e siècle, l'air de Monthey ainsi que celui d'une grande partie de cette région du Chablais se parfume souvent d'une légère odeur de chlore et d'eau de Javel. Ces émanations sont les désagréments de cette grande industrie qui produit ces désinfectants indispensables à l'hygiène des ménages et des fosses d'aisance, ceci à une époque où les égouts n'existent pas partout et encore moins les stations d'épuration. A cette odeur « de piscine » va s'ajouter, dès 1911, une couleur bien plus tenace, celle du bleu indigo synthétique (Weissbrodt, 1997) (fig. 6).

Rappelons que l'indigo est à la base un colorant naturel extrait par macération de plantes tinctoriales comme le pastel (*Isatis tinctoria* L.) en Europe et jusqu'à la Renaissance, puis l'indigotier (*Indigofera tinctoria* L.) cultivé essentiellement en Inde britannique, et ceci jusqu'à ce que l'indigo synthétique détrône presque totalement cette activité au début du XX^e siècle. Lors de la Révolution industrielle, la mécanisation des filatures permet de produire des surfaces considérables de tissus mais la production de matières colorantes naturelles ne suit pas la demande et leur prix reste élevé. Les empires coloniaux, qui disposent de main d'œuvre corvéable à merci sont les grands producteurs de ces teintures. Alors que l'Empire allemand aux maigres possessions outre-mer, et dans une moindre mesure la Suisse souffrent de leur



Figure 6. A des fins publicitaires, souvent lors d'événements commerciaux telles que la foire aux échantillons de Bâle et le Comptoir suisse à Lausanne, l'entreprise Ciba a diffusé d'innombrables échantillons de différentes fibres textiles, teintés avec ses colorants, dont les fameux bleus indigo, et présentés sur des feuilles soit isolées soit reliées en catalogues de nuanciers. Photographie Stefan Ansermet. Musée cantonal de géologie n° 094208 et 094203.

dépendance à ces produits coloniaux, un effort considérable est porté sur l'identification des colorants, drogues et parfums naturels et sur leurs synthèses. Ce minutieux travail stimulera grandement le développement de la chimie organique moderne.

C'est en 1880 que le chimiste allemand Adolf von Baeyer et ses chercheurs réussissent une première synthèse de l'indigo à partir de produits tirés du goudron de houille. D'autres chemins de synthèse se succèdent mais restent toutefois coûteux et d'un rendement global trop faible pour leur garantir un avenir industriel. Une avancée significative de la synthèse de l'indigo est réalisée en 1890 par Karl Heumann, professeur à l'École polytechnique fédérale de Zurich, en utilisant des précurseurs fort communs :

- l'aniline, un sous-produit de la distillation de la houille dans les usines à gaz ;
- l'acide acétique, extrait du vinaigre issu de la fermentation des jus sucrés ;
- le chlore et le sodium métallique, tous deux produits par l'électrolyse du sel.

Bien que ce procédé soit génial dans sa simplicité, sa mise en œuvre à l'usine de Monthey prend des années et démontre la difficulté du passage du laboratoire à la production industrielle. L'étape cruciale de la condensation, protégée par un brevet déposé par le chimiste allemand Johannes Pfleger au profit de la Gold & Silber Scheide Anstalt, est modifiée à Monthey en utilisant du sodium métallique issu du sel de Bex.

Dans un article de la Murithienne en 1914, le docteur Frédéric Reverdin donne quelques informations sur le procédé et la production montheyane d'indigo synthétique en cinq étapes, qui utilisent les substances suivantes (Reverdin, 1914) :

1. acide chloracétique par l'action du chlore sur l'acide acétique anhydre.
2. aniline-sodium par l'action du sodium métallique sur l'aniline.
3. *n*-phénylglycine par l'action de l'acide chloracétique sur l'aniline-sodium.
4. indoxyle par auto-condensation de la *n*-phénylglycine fondue en présence d'aniline-sodium.

5. indigo par condensation et oxydation à l'air de l'indoxyle.

La quatrième étape de synthèse, celle de « la fusion de l'indigo » est particulièrement délicate à cause de l'utilisation d'aniline-sodium très réactif : les déflagrations sont fréquentes en cas de présence inopportune d'eau et les ouvriers chargés de ce travail sont à juste titre surnommés les « canoniers ».

Le succès de la chimie montheyane est enfin au rendez-vous. La « période bleue », celle de l'indigo, celle de la septième couleur de l'arc en ciel selon Newton (fig. 7), provoque un incroyable bond économique à Monthey. Ce sont près de 350 ouvriers qui s'affairent spécialement à cette synthèse. En 1911, lors de la première année de production, on vend pour 375'000 francs d'indigo, l'année suivante pour un million de francs et en 1914 pour quatre millions de francs. En 1912, la moitié de la production est exportée en Chine et une grande partie est livrée aux Etats-Unis d'Amérique où Levi Strauss & Co a besoin d'être massivement approvisionné en colorant pour teindre la toile denim de ses jeans (Weissbrodt, 1997) (fig. 8, fig. 9).

Après la Première Guerre mondiale, la production d'indigo synthétique est de moins en moins concurrentielle, les brevets des géants de la chimie allemande étant repris à leur compte par les vainqueurs à titre de réparation de guerre. Ainsi la production américaine, devenue massive, fait baisser dangereusement les cours. Le brevet allemand de la Gold & Silber Scheide Anstalt étant tombé dans le domaine public, à Monthey on en profite pour remplacer l'aniline-sodium par l'amidure de sodium, ce qui augmente sensiblement les rendements lors de la synthèse de l'indigo. Surtout, on se diversifie en modifiant la molécule d'indigo par des ajouts de soufre, de brome ou de chlore afin d'obtenir des bleus d'une meilleure solidité, les fameux « bleus Ciba » ou des rouges et pourpres comme la très précieuse « pourpre de Tyr » ou « pourpre antique », autrefois extraite du mollusque *Murex brandaris* L. et qui n'est, en somme, que de l'indigo di-bromé.

On poursuit la synthèse de l'indigo et de ses dérivés jusque en 1958 sur le site montheyan. Parallèlement et par la suite, Ciba se lance massivement dans la synthèse d'autres types de colorants basés sur l'anthraquinone (de la gamme Cibane), des pigments diketopyrrolopyrroles ou DPP, dont le très fameux et exclusif « rouge Ferrari »



Figure 7. Lors des deux premières décennies du XX^e siècle, l'énorme production d'indigo à Monthey n'est pas sans conséquences : usine, véhicules, habits et ouvriers sont très souvent teintés de bleu par le puissant colorant qui s'infiltrait partout au gré des vents. C'est la fameuse « période bleue » qu'a vécue cette région du Chablais et qui est artistiquement représentée sur ce tableau de 1913, réalisé par le peintre bâlois Burkhard Mangold, et où l'on voit l'usine de Monthey trôner au pied des sommets des Alpes vaudoises. Archives Ciba.

ou d'azurants optiques, présents en particulier dans les lessives et qui sont toujours produits de nos jours, contribuant ainsi à la renommée du site (Weissbrodt, 1997).

Le sodium du sel de Bex : du blanchiment à la conquête de l'or sud-africain par le cyanure

L'électrolyse de la saumure ou du sel fondu de Bex produit continuellement des quantités considérables de soude caustique (3'600 t en 1953) et de sodium métallique (300 t en 1953). Si la soude caustique ou hydroxyde de sodium est facilement absorbée par des procédés de synthèse ou vendue à des fins industrielles (pâtes à papier, savonneries, métallurgie de l'aluminium, etc.) il n'en va

pas de même du sodium métallique utilisé comme agent de condensation dans la synthèse de l'indigo. La haute réactivité du sodium avec l'eau et l'air rend son stockage en grandes quantités fort délicat et, de plus, ce métal ne possède pas de débouchés commerciaux intéressants. Lors de la Première Guerre mondiale, l'acide acétique et l'aniline importés de l'étranger manquent cruellement à la synthèse du colorant. Corollaire à cette baisse de production d'indigo : un stock de sodium métallique qui s'accumule dangereusement. Reprenant les travaux et brevets du chimiste américain Hamilton Kastner, on se met à produire tout d'abord du peroxyde de sodium par combustion dans un excès d'oxygène (fig. 10). Ce



Figure 8. Avant l'utilisation de barils métalliques standardisés, le conditionnement à des fins d'expédition de l'indigo se faisait avec des tonneaux en bois cerclés d'acier. Le tarage, le pesage du produit et surtout la fermeture et l'étanchéisation des tonneaux étaient des opérations salissantes, longues et délicates, utilisant une nombreuse main d'oeuvre souvent très jeune. Archives Ciba.



Figure 9. Alep, Bagdad, Aden, Bombay, Madras...une partie importante des ventes d'indigo synthétique de Ciba a été faite à destination du Proche- et de l'Extrême-Orient où ce colorant est traditionnellement très utilisé pour la teinture des textiles depuis des millénaires. Archives Ciba.

peroxyde, qui au contact de l'eau livre de l'eau oxygénée, est un agent de blanchiment très prisé des industries du textile et du papier. Par réaction du sodium métallique, de l'ammoniac et du carbone sous l'effet d'un arc électrique, on produit également du cyanure de sodium en quantités importantes. Ce dernier, une fois purifié puis fondu en lingots, est mis en caisses et expédié essentiellement en Afrique du Sud (fig. 11). C'est ainsi que le cyanure issu du sel de Bex se retrouve dans les mines des environs de Johannesburg où il est un réactif indispensable à l'extraction de l'or dans les minerais aurifères à basse teneur. Toutefois, une petite partie du cyanure produit à Monthey sert sur place à la préparation d'un colorant minéral bleu intense et utilisé comme agent azurant optique dans les lessives : le bleu de Prusse ou ferrocyanure ferrique (Ciba, 1954).



Figure 10. Flacon de peroxyde de sodium en perles et synthétisé par la combustion contrôlée du sodium métallique dans un fort excès d'oxygène. La préparation de cette substance, très utilisée comme décolorant dans l'industrie textile, a permis de trouver un débouché à la surproduction de sodium métallique issu du sel de Bex lors de la première moitié du XX^e siècle. Photographie Stefan Ansermet. Musée cantonal de géologie n° 094140 ; 185 x 65 mm.

Le chlore du sel de Bex : de l'échec des armes chimiques fédérales au succès mondial de l'Araldite®

Le chlore

Voici un nom qui suscite la crainte : chlore. On imagine ce puissant toxique gazeux, dont les sournoises nappes rampantes foudroient et décolorent toute vie sur leur passage. Réminiscences cauchemardesques des tranchées de la Grande Guerre ? Pourtant la légère odeur chlorée émanant de l'eau du robinet ou des piscines n'est-elle pas gage de salubrité ?

Indispensable à la vie, le chlore, ce gaz verdâtre à l'état élémentaire est, avec le sodium solide et métallique, le

second élément constituant le sel. Lorsqu'il est présent dans les molécules organiques (composés organochlorés), le chlore leur confère une réactivité ouvrant ainsi la voie à d'innombrables synthèses, comme nous l'avons vu plus haut avec le cas de l'acide chloracétique dans la préparation de l'indigo. Cette réactivité est à l'origine même de l'agressivité aigüe de nombreuses substances chlorées, comme l'acide chlorhydrique corrosif, le phosgène suffocant, l'ypérite vésicante ou les chlorocétones lacrymogènes. A contrario, d'autres molécules organiques fortement chlorées sont très peu réactives et donc très lentement dégradées en milieu naturel. Bien que leur toxicité aigüe soit généralement faible, leur toxicité chronique est avérée, c'est le cas par exemple du DDT, du lindane et des polychlorobiphényles ou PCB. Enfin, comme polymères plastiques, les composés organochlorés se retrouvent dans la vie courante sous la forme d'objets à base de PVC (tuyaux, bâches, emballages transparents), de PVDC (films étirables alimentaires) ou de résines époxydes (colles et vernis).

Ainsi, de 1898 à 2005, la production de chlore issu du sel de Bex sert à la synthèse de très nombreux produits qui accompagnent nos sociétés dans les périodes de crise ou de développement. Difficilement stockable, car très corrosif en présence d'humidité, l'excès de chlore monthey-san qui n'est pas absorbé par la fabrication de l'indigo et des désinfectants comme l'eau de Javel ou le chlorure de chaux, pose problème. Comme on l'a vu lors de la Première Guerre mondiale, la baisse de la production d'indigo entraîne un fort excès de sodium métallique mais aussi de chlore. En 1917-1918 on crée le département des produits chlorés avec un atelier de liquéfaction qui permet de stocker et de disposer aisément de chlore sec pour les chlorations (fig. 12). Les synthèses de plusieurs chlorures minéraux sont dès lors mises en œuvre : d'hydrogène (acide chlorhydrique), de carbone (phosgène), d'aluminium, de soufre, de phosphore, d'antimoine et d'étain. De nombreux composés organochlorés sont aussi produits : chloroforme, hydrate de chloral, chlorobenzène, chlorure de benzyle, chloronaphtalènes, etc. Ces substances sont utilisées comme précurseurs de synthèse d'insecticides comme le DDT ou de médicaments, comme le fameux analeptique nicéthamide ou Coramine® produit sur le site de la société mère à Bâle, ou des colorants à base d'antraquinone. Dans les années 1930, on synthétise également de l'oxychlorure de cuivre, un composé phytosanitaire antifongique plus efficace que la

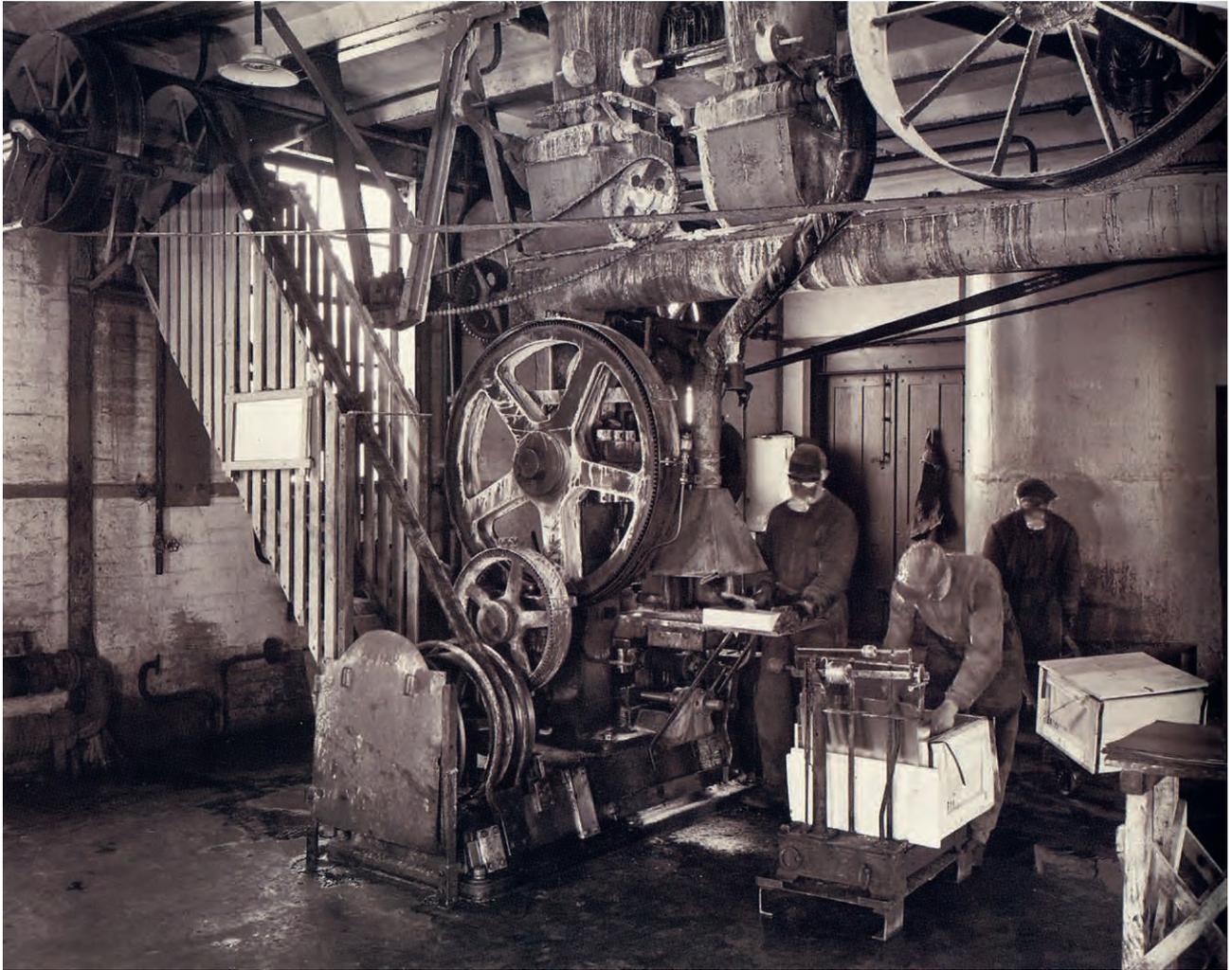


Figure 11. Ouvriers occupés à la confection et à la mise en caisse de briquettes de cyanure de sodium obtenu par réaction à haute température de sodium métallique, d'ammoniac et de carbone. Ramollis par chauffage, les cristaux de cyanure contenus dans des trémies au plafond de l'atelier sont déversés dans une lingotière, puis pressés à chaud sous ventilation. Il en résulte des briquettes qui sont emballées dans des caisses en bois étanches en vue de leur expédition vers les grandes mines d'or, essentiellement en Afrique du Sud. Archives Ciba.

bouillie bordelaise et destiné à la vigne et aux cultures maraîchères (Ciba, 1954).

L'intensification de la demande de produits chlorés nécessite une augmentation des capacités d'électrolyse, mais un problème majeur se pose : celui de la faible production électrique en hiver, les cours d'eau étant à leur plus bas débit. Idéalement l'usine devrait pouvoir disposer de son propre barrage hydroélectrique. Les ingénieurs projettent alors de construire un tel ouvrage de 20 millions de m³ juste au pied de Champéry, au lieu-dit Bêtre, où coule la Vièze, noyant ainsi une partie de la haute vallée d'Illiez.

Jugé irréaliste par les géologues, le projet sera finalement abandonné. En 1938, la société mère Bâloise vole alors au secours de l'usine de Monthey, avec un investissement de plus d'un million de francs pour la construction d'une unité de fabrication des masses plastiques à base de résines mélaminées. C'est un succès, et lors de la mauvaise saison, les ouvriers des ateliers d'électrolyse et de chloration sont assurés d'avoir un travail continu dans la nouvelle unité. Pressées à chaud dans des moules, les résines mélaminées, colorées ou non, se transforment par magie en interrupteurs, prises électriques, combinés de téléphone, assiettes, bols, cuillères, boutons, lunettes

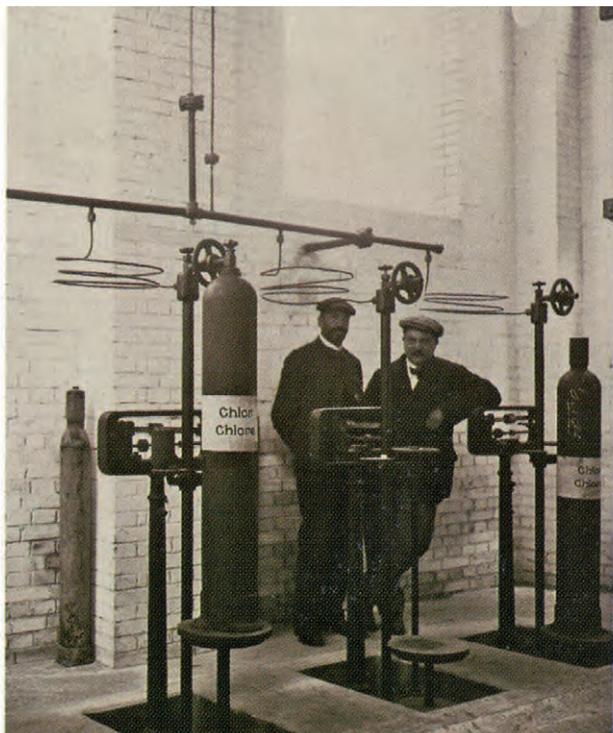


Figure 12. Autrefois conservé dans des gazomètres, le chlore doit être utilisé très rapidement car les traces d'humidité le rendent fortement corrosif pour les installations. Sur le site de Monthey en 1917-1918, on crée le département des produits chlorés avec un atelier de liquéfaction qui permet de stocker et de disposer aisément de chlore sec pour les chlorations. Archives Ciba.

de WC, plateaux de formica, etc. Le succès de ces premiers plastiques est saisissant et assure la prospérité de l'usine (Ciba, 1954).

L'épopée des toxiques de combat

A la veille de la Seconde Guerre mondiale et face à la montée des périls en Europe, le chlore extrait du sel de Bex va à nouveau revêtir son manteau diabolique de tueur, celui-là même qu'il avait déjà porté sous d'autres cieus lors du premier conflit mondial.

Depuis 1918, la politique fédérale consistant à rogner chaque année les crédits militaires met peu à peu la défense nationale en péril. En cette seconde moitié des années 1930, l'existence même de la Suisse est en jeu, mais grâce au dynamisme de Rudolf Minger, le chef du Département militaire fédéral, le pays se réveille et les antimilitaristes baissent pavillon.

Ainsi le 2 février 1937, le premier conseiller fédéral agrarien décide de lancer un programme de production de toxiques de combat afin d'en doter l'Armée et ceci sans en informer ses collègues du Conseil fédéral (Hug, 1997). Les toxiques considérés étant tous des produits organochlorés, un partenariat est naturellement établi avec l'usine de Monthey qui dispose de chlore en abondance et qui possède et maîtrise les moyens et procédés de chloration. (fig. 13). Le programme prévoit la production des substances suivantes :

- l'ypérite ou « gaz moutarde », un liquide huileux vésicant désigné secrètement par le code RN1 ;
- la chloroacétophénone, ou chlorure de phénacyle, un solide cristallin volatil, lacrymogène, irritant pour la peau et désigné secrètement par le code RN2 ;
- le perchloronaphtalène, un solide d'aspect cireux qui n'est pas un toxique de combat à proprement parler mais qui entre dans la composition de fumigènes.

L'usine montheysane se met au travail. Elle dispose déjà de l'expertise nécessaire et des réacteurs de chloration pour produire la chloroacétophénone et le perchloronaphtalène, par contre pour l'ypérite tout est à faire. Utilisée massivement par les belligérants de la Première Guerre mondiale, les conditions idéales de production, purification et de stockage du « gaz moutarde » sont connues d'eux seuls et ce sont des secrets bien gardés. A Monthey, comme on maîtrise déjà la préparation des chlorures de soufre depuis une vingtaine d'années, on choisit dès lors la voie de synthèse selon Levinstein-Depretz, qui consiste à faire réagir l'éthylène gazeux sur les chlorures de soufre. Cette voie de synthèse facile conduit toutefois à l'obtention d'une ypérite impure avec une forte odeur alliagée, difficile à rectifier, réactive à l'humidité et qui a tendance à se polymériser en un goudron ambré tout en libérant de l'acide chlorhydrique hautement corrosif. Un atelier de production d'éthylène est mis en fonction et l'ensemble des installations est prévu pour produire quatre tonnes d'ypérite par jour.

A l'éclatement de la Seconde Guerre mondiale, le colonel Rudolf Minger informe ses collègues du Conseil fédéral des travaux en cours et le programme d'armement chimique est officiellement entériné et financé. L'appui de l'Etat-major de l'Armée et du général Henri Guisan fraîchement nommé est total. En octobre 1940, 35 tonnes d'ypérite préparées avec le chlore issu du sel vaudois

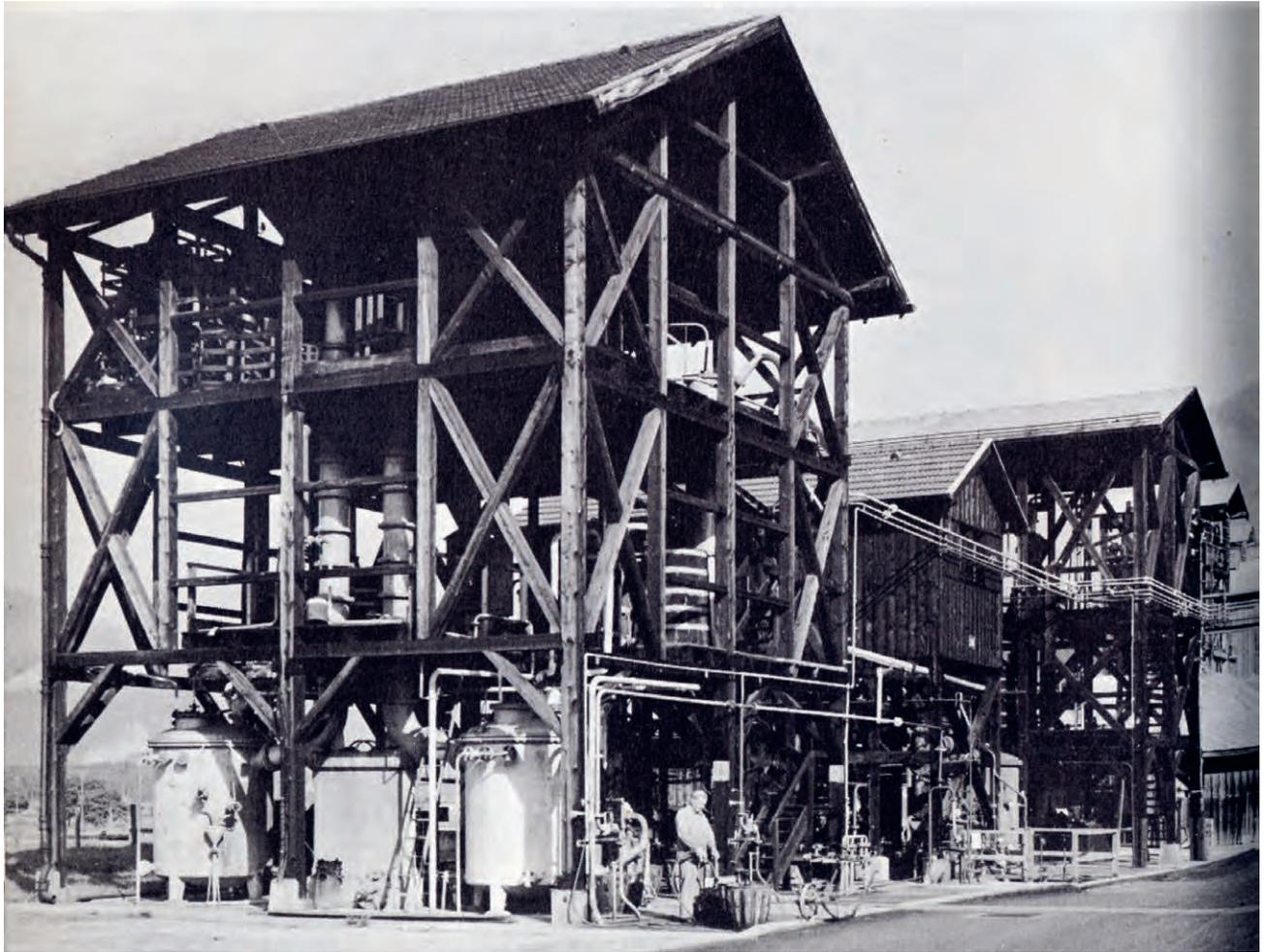


Figure 13. L'utilisation principale du chlore extrait par l'électrolyse de la saumure de Bex est la chloration de produits organiques ou minéraux. L'agressivité du chlore gazeux et des sous-produits des réactions de chloration comme le chlorure d'hydrogène sont à l'origine de fuites inévitables et dangereuses dans un milieu clos. Lors de la première moitié du XX^e siècle, ces problèmes sont résolus en effectuant ces chloration dans des ateliers à ciel ouvert, ou plutôt à murs ouverts, le vent emportant les gaz délétères. Archives Ciba.

sont livrées au laboratoire et centre d'essais de Lattingen près de Wimmis, créé en 1923. La production d'ypérite se poursuit jusqu'en octobre 1941 et en tout, c'est un stock de 330 tonnes de ce puissant toxique qui est constitué (Hug, 1997). Mais le prix humain est considérable, l'usine montheysanne déplore de nombreux accidents tant avec l'ypérite qu'avec ses précurseurs, les chlorures de soufre. Rien qu'entre janvier 1940 et octobre 1941, 68 accidents occasionnent la perte de 2'030 jours de travail. Six ouvriers devenus invalides, souvent par cécité, ne retrouveront jamais leur poste en usine. Le matériel subit lui aussi des dégâts considérables par la forte corrosivité du produit impur. L'usine fait ses comptes et rechigne à

continuer la synthèse de l'ypérite. Malgré la discrétion entourant cette production, les incidents qui alimentent le bouche à oreille dans le Chablais et dans le milieu de la chimie industrielle helvétique, ternissent l'image de l'entreprise. De plus, les éventuelles retombées commerciales liées au transfert technologique sont nulles. Pendant des dizaines d'années encore, le souvenir de cette production émaillée de drames marquera de nombreux chablaisans (Weissbrodt, 1997). Dans sa plaquette publiée en 1954 à l'occasion de son 50^e anniversaire, l'usine parlera pudiquement et sans les nommer de « *divers produits de fâcheuse mémoire destinés à la défense nationale* » (Ciba, 1954).



Nettement moins toxique et plus facile à manipuler et à stocker, ce sont 25 tonnes de chloroacétophénone (RN2) qui sont produites à Monthey et livrées à la Fabrique fédérale de munitions de Thoune. L'Armée utilise alors cette substance solide, volatile, à la légère odeur fruitée et fortement lacrymogène dans de très nombreux exercices de combat ou de vérification d'étanchéité des moyens de protection (Hug, 1997) (fig. 14).

Paradoxalement, de toutes les substances chlorées produites à Monthey à des fins de défense, ce sera celle considérée à l'époque comme la moins dangereuse, car presque inerte, qui sonnera le glas du programme chimique militaire helvétique : le perchloronaphtalène issu de la réaction de la naphthaline, un sous-produit des usines à gaz du pays et du chlore issu du sel de Bex. Mélangé à du zinc, ce composé organochloré bon marché sert à produire des compositions pyrotechniques fumigènes ou nébulogènes. De nombreux exercices utilisant ces formulations ont lieu dans divers cantons alpins lors de l'été 1940, le but étant avant tout de créer d'immenses nappes de brouillard artificiel afin de dissimuler les installations stratégiques et les protéger ainsi des bombardements aériens. Dans le but de soustraire à la vue de potentiels aviateurs ennemis la Fabrique fédérale de munitions d'Altdorf, des essais massifs d'enfumage sont réalisés dans ce secteur et les aérosols se déposent sur l'herbe des pâturages. Mais le perchloronaphtalène produit à Monthey est impur, les mélanges pyrotechniques ont des compositions variables, en conséquence la combustion incomplète des pots fumigènes produit des quantités notables de phosgène et de dioxines chlorées. Les effets sur les animaux de pâture sont impressionnants, les génisses, les taureaux et les veaux sont émaciés jusqu'à l'os. La production laitière s'effondre, le foin est jeté, le bétail abattu. En 1941, l'Armée admet sa responsabilité et les paysans sont indemnisés. A des fins d'euthanasie, l'Armée rachète ainsi 14'848 animaux malades dont 13'962 dans le seul canton d'Uri. Mais le poison intimement logé dans le sol continue inexorablement son œuvre pendant sept années encore. Pour la population, apprendre que des moyens de subsistance si précieux en période de rationnement sont menacés est un choc. Relayé et cruellement imagé dans la presse, le scandale, celui des « Nebelkühe », les vaches du brouillard, devient national et le 20 mars 1943, le général Guisan annonce finalement au nouveau chef du Département militaire

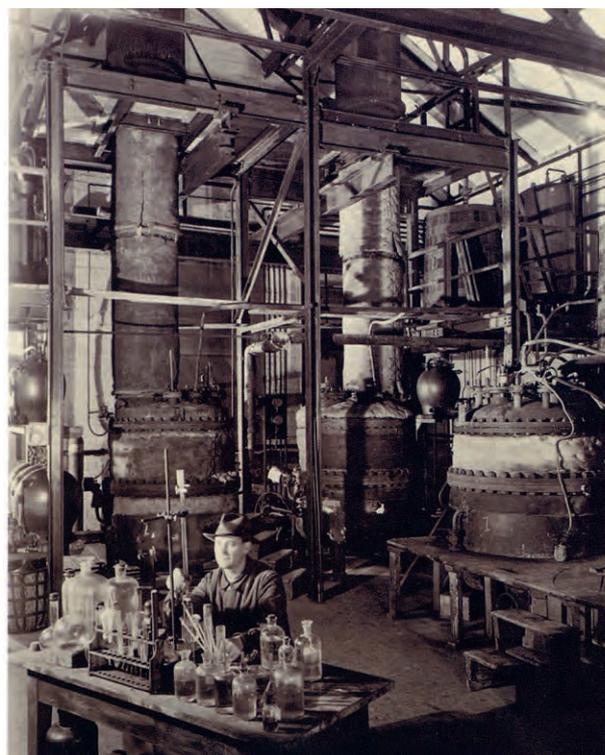


Figure 14. Atelier de production de chlorure de benzyle à Monthey lors de la première moitié du XX^e siècle. Ce composé, très proche de la chloroacétophénone résulte de la chloration incomplète du toluène, lui-même issu de la distillation du pétrole, du charbon ou d'huiles végétales aromatiques. Liquide fortement lacrymogène mais ne pouvant pas être militarisé à grande échelle à cause de sa faible persistance sur le terrain, le chlorure de benzyle est un précurseur incontournable à la synthèse de médicaments et de parfums. Tout au long de la délicate chloration, l'opérateur soutire un peu de mélange réactionnel des réacteurs à l'arrière-plan à des fins d'analyses par titrage, dans le but d'évaluer l'avancée ou le rendement des chlurations en cours. Archives Ciba.

fédéral Karl Kobelt qu'il renonce au programme d'armement chimique de l'Armée (Hug, 1997).

A la fin de la Seconde Guerre mondiale, les fumigènes inutilisés à base de perchloronaphtalène sont immergés en mer du Nord en 1946 et le stock d'ypérite est incinéré à Altdorf de 1948 à 1949. Quant au reliquat de chloroacétophénone, il sert à la fabrication de grenades lacrymogènes qui, mises à la disposition des polices cantonales, feront pleurer et tousser bien des manifestants jusque dans les années 1980.

L'Araldite® et autres spécialités agrochimiques chlorées

En 1945, afin de renforcer l'impact publicitaire, les actionnaires rebaptisent l'entreprise. Ainsi, la Société pour l'Industrie Chimique à Bâle devient la Ciba, acronyme de « Chemische Industrie Basel ». Développées et utilisées largement lors du second conflit mondial, les matières plastiques se banalisent et leurs prix baissent. Consciente qu'elle ne pourra pas rivaliser avec la concurrence pétrochimique étrangère sur la production de polymères comme les acryliques ou le PVC, Ciba se lance alors dans des spécialités à forte valeur ajoutée : les résines de la gamme des Araldites, dont la réputation est devenue mondiale. Ce type de résines, dites époxydes, s'obtient par réaction de deux composants : le bisphénol A et l'épichlorhydrine. Tant pour la préparation de la résine proprement dite que pour la synthèse de l'épichlorhydrine, le chlore et la soude caustique sont massivement utilisés, or comme nous l'avons déjà vu, ces deux précurseurs de synthèse sont abondamment produits à Monthey avec le sel de Bex. A la fin des années 1980, c'est près de 100'000 tonnes de ce type de résine qui sont fabriquées à Monthey, soit le tiers de la production annuelle mondiale (Weissbrodt, 1997) (fig. 15). En plus des divisions colorants et polymères, il se développe sur le site de l'usine Ciba de Monthey, dès les années 1960, une importante division agrochimique livrant des produits quasiment tous issus de synthèses utilisant du chlore. A la suite du succès dans les années 1940 de son insecticide organochloré phare, le DDT, succès couronné par un prix Nobel récompensant la découverte de l'efficacité de ce produit, la chimie bâloise s'est retrouvée dans une situation particulièrement délicate dès que la toxicité à long terme et la faible biodégradabilité du DDT ont été révélés après 20 années d'utilisation massive. Il a donc fallu s'atteler à découvrir et à produire de nouveaux remplaçants et c'est ainsi que les produits des gammes Néocid et Géral voient le jour. Sans exhaustivité, citons quelques productions montheysanes de cette seconde moitié du XX^e siècle, de réputation mondiale et recelant toutes du chlore issu du sel de Bex:

- les puissants insecticides organophosphorés phosphamidon (Dimecron®), dichlorvos (Nogos®), profenofos (Curacron®) et diazinon (Néocidol®) ;
- l'anthelminthique triclabendazole (Fasinex®) contre la douve du foie ;
- le fongicide propiconazole (Tilt®).

L'hydrogène, sous-produit de l'électrolyse de la saumure de Bex et précurseur de pierres précieuses synthétiques

En plus du chlore et de la soude, l'électrolyse de la saumure des mines de Bex offre des volumes considérables d'hydrogène. Ce gaz brûlé en présence de chlore donne du chlorure d'hydrogène qui, dissous dans l'eau, conduit à l'acide chlorhydrique, un produit très utile dans l'industrie, l'artisanat et le ménage. Tout au long du XX^e siècle, avec l'évolution des techniques, l'usine de Monthey utilise aussi cet hydrogène pour effectuer de nombreuses réductions catalytiques conduisant à du camphre synthétique, de la décaline, de la tétraline ainsi que de nombreux précurseurs de médicaments. Une utilisation importante de l'hydrogène est la réduction de l'indigo bleu en leuco-indigo incolore et soluble, ce qui permet de teindre en profondeur les fibres textiles. Par oxydation ultérieure à l'air, le leuco-indigo se transforme à nouveau en indigo.

Dès 1914, un important consommateur d'hydrogène s'installe à Monthey : l'entreprise Hrand Djevahirdjian SA (Djeva) qui produit des cristaux de synthèse destinés à l'industrie et à la bijouterie (Collectif, 2002). Après des installations peu concluantes sur deux sites français, le choix final d'implantation à Monthey est motivé par la présence des larges excédents d'hydrogène produits par l'usine chimique, d'électricité et de terrains à bas coûts, ainsi que par la proximité de la ligne ferroviaire du Simplon.

La méthode de production utilisée est celle développée par le chimiste Auguste Verneuil, à savoir l'introduction d'une poudre réfractaire dans la flamme à 2'700°C d'un chalumeau brûlant de l'oxygène et de l'hydrogène. Les particules de l'aérosol ainsi obtenu se condensent sur une tige rotative où le monocristal croît, au centre d'un four réfractaire.

La production phare de l'entreprise Djeva est le corindon pur ou diversement coloré par des oxydes métalliques ouvrant ainsi la voie aux variétés polychromes rubis ou saphir (fig. 16). Les 60 à 100 tonnes de corindon produites annuellement font de Djeva, pendant de nombreuses années, le premier producteur mondial utilisant le procédé Verneuil. Des cristaux de spinelle polychrome et de rutile incolore sont aussi fabriqués dans une moindre mesure. Historiquement, cette entreprise a également synthétisé des succédanés du diamant, à savoir des cristaux de titanate de strontium (Fabulite®) et surtout, dès 1975, de

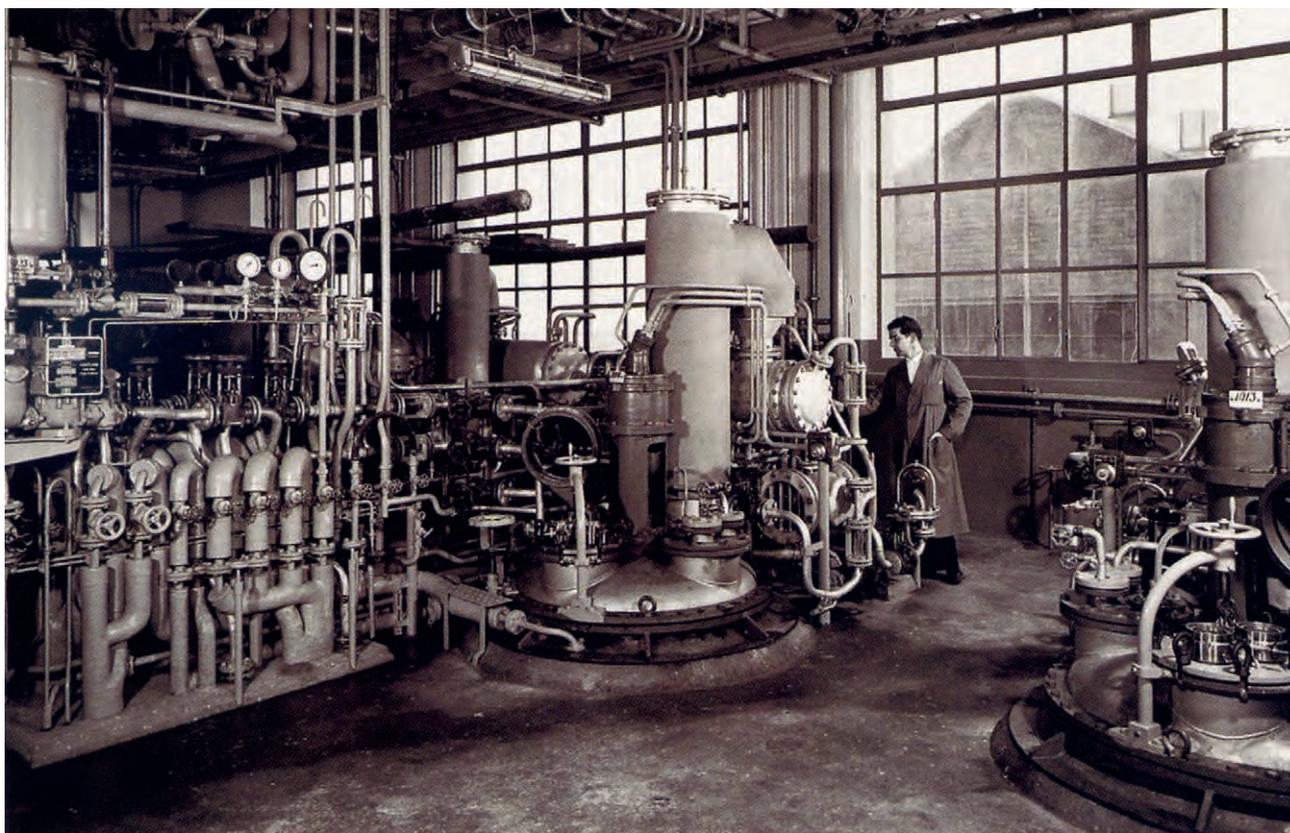


Figure 15. Dès la fin de la Seconde Guerre mondiale, l'usine de Monthey se lance dans la production de résines époxydes sous la marque Araldite[®], dont la réputation est mondiale. La production des substances de base comme le bisphénol A et l'épichlorhydrine, produite à partir de l'électrolyse des saumures de Bex, se fait dans de nouvelles installations automatisées. A la fin des années 1980, c'est près de 100'000 tonnes de résines époxydes qui sont produites à Monthey, soit le tiers de la production annuelle mondiale. Archives Ciba.

l'oxyde de zirconium cubique stabilisé et commercialisé sous la marque déposée Djevalite[®].

Epilogue monthey-san

Alors que les besoins de la chimie monthey-sane en saumure bellerine sont passés de 6'000 m³ par an au début du XX^e siècle à 55'000 m³ par an un siècle plus tard, le début de l'année 2005 voit la fin brutale des activités d'électrolyse. L'entretien, la mise en conformité aux normes environnementales des cellules d'électrolyse qui utilisent du mercure font que la production de chlore sur le site de Monthey n'est plus rentable. Fabriqué dès lors près de Grenoble ou de Lyon, il est désormais livré liquéfié chaque semaine, à hauteur de près de 20'000 tonnes annuelles, par citernes de chemin de fer aux entreprises chimiques valaisannes de Monthey et de Viège. Les risques liés à de tels transports ferroviaires font réguliè-

rement l'objet d'interrogations et de polémiques. De plus, fin juin 1994, l'incident lié au basculement nocturne de wagons d'un train de marchandises en gare de Lausanne reste dans la mémoire des Romands. Les deux wagons citernes incriminés contenaient de l'épichlorhydrine, toxique et inflammable, produite dans le nord de l'Europe et destinée à la synthèse de résines époxydes sur le site chimique de Monthey. La question de la sécurisation des importations ferroviaires de chlore ou la production *in situ* par un circuit court dans les usines régionales est toujours pendante.

L'entreprise Djeva fait d'importants investissements dans les années 1990 afin de produire elle-même l'hydrogène nécessaire à son bon fonctionnement et de ne plus dépendre de l'électrolyse de la saumure de Bex. Mais au XXI^e siècle, face à la mondialisation économique et à la concurrence implacable de nouveaux acteurs du domaine



Figure 16. Poires monocristallines et polychromes de corindon synthétique. L'électrolyse de la saumure de Bex produit en plus du chlore et de la soude caustique des volumes considérables d'hydrogène très pur dont bénéficie l'entreprise Hrand Djevahirdjian SA (Djeva) implantée dès 1914 à Monthey. Saupoudrée dans la flamme d'un chalumeau oxyhydrique (oxygène-hydrogène), l'alumine additionnée d'éléments chromogènes fond et les fines gouttelettes se coagulent pour former une poire monocristalline de corindon qui peut-être rubis dans les tons rouge ou saphir pour les autres couleurs ou incolore. Photographie Stefan Ansermet. Musée cantonal de géologie n° 094145 ; 85 à 55 mm.

des pierres précieuses de synthèse, la société connaît des difficultés grandissantes et annonce la fin de ses activités en juillet 2021.

Le site du Day près de Vallorbe et sa première usine électrochimique au monde

L'usine électrochimique au fil de l'Orbe

La découverte de l'allumette à friction au début du XIX^e siècle conduit à une forte demande de chlorate de potassium mais c'est une substance rare, dont la production par électrolyse reste confinée à l'échelle du laboratoire. En 1889 à Paris, la Société d'électrochimie est fondée par Anthelme Boucher, Henri Gall et Amaury de Villardy de Montlaur. La constitution de cette société est le fruit de nombreuses expérimentations à petite échelle réalisées à compte d'auteurs, d'abord dans l'usine de Salindres dans le Gard, appartenant au grand industriel Alfred Rangod

Pechiney, puis à Villers-Saint-Sépulcre dans l'Oise, où la présence d'un petit cours d'eau permet à Henri Gall de poursuivre ses travaux personnels, parallèlement à ses fonctions de directeur. A l'époque, le petit monde industriel francophone de la production d'électricité et de l'électrochimie est balbutiant et les ingénieurs se connaissent. Or Henri Gall, qui inlassablement poursuit ses essais nocturnes, voire durant ses jours de congé, se trouve rapidement confronté à des problèmes avec son générateur électrique. A ce sujet, il faut en effet relever que la production de chlorates par l'électrolyse d'une saumure chaude nécessite un fort ampérage ; or le générateur qu'utilise Gall ne supporte pas de telles intensités et tombe souvent en panne (Dony-Hénault et al., 1914). L'effet de ces problèmes techniques sur les visiteurs, les experts d'autres sociétés chimiques et, par là même, sur les investisseurs potentiels sont catastrophiques. Du reste, ailleurs en Europe, la seule voie électrochimique promise à un relatif avenir est celle de l'électrolyse des saumures à froid, selon le procédé « chlore-alcali » afin de produire du chlore, de la soude et de l'hydrogène, comme nous l'avons vu plus haut avec le cas du site de Monthey. Au sujet de la production de chlorates, malgré un séduisant brevet déposé en 1886 par Gall et de Montlaur, aucun entrepreneur ou investisseur n'est prêt à franchir le pas de l'étape industrielle. Pourtant Henri Gall n'abandonne pas et sa ténacité est récompensée à la suite de la visite d'un jeune et brillant ingénieur suisse : Anthelme Boucher (fig. 17). Né à la Haye mais originaire de Paudex, Boucher est considéré comme un véritable « génie électrique ». Fort de son diplôme de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne, lointain ancêtre de l'EPFL, il doit sa réputation à la construction de l'usine hydroélectrique de Vuargny près d'Aigle en 1896, comme nous l'avons déjà vu plus haut. Puis, en 1894, de celle d'Orelle en Savoie et surtout de celle de Fully de 1912 à 1915. Incontournable directeur ou administrateur d'usines hydroélectriques en Suisse et en France, Anthelme Boucher, peu avant sa disparition en 1936, pose en précurseur les bases techniques de l'énorme projet de la Grande Dixence. Mais revenons en 1889 où, avec une facilité déconcertante, Anthelme Boucher résout le problème d'Henri Gall en lui fournissant un générateur électrique adapté. Les soucis techniques franchis, les essais réussis, le 7 juin 1889 la Société d'électrochimie est fondée à Paris.

L'industrialisation du procédé peut commencer à condition de trouver des investisseurs. Malgré le triomphe de



l'exposition universelle de Paris, la France est en plein marasme, minée par une forte instabilité politique et sociale peu propice à des investissements dans une industrie électrochimique balbutiante. Pire encore, l'ancien employeur d'Henri Gall, le capitaine d'industrie Alfred Rangod Pechiney ne croit pas du tout à l'électrochimie pour produire des chlorates et le fait savoir dans les cercles industriels et bancaires français. Le salut vient une fois de plus d'Anthelme Boucher qui persuade facilement des banquiers helvétiques de la pertinence du procédé. L'ingénieur voit tout de suite un site d'implantation idéal pour y construire à la fois une usine hydroélectrique et une usine d'électrochimie : Le Saut du Day près de Vallorbe (fig. 18). Les avantages du lieu sont nombreux : un fort débit, une chute d'eau de près de 100 m de dénivelé, la proximité immédiate d'une voie de chemin de fer internationale facilitant l'approvisionnement en matières premières et l'expédition des produits finis et une main d'œuvre qualifiée, héritière de la longue tradition métallurgique de la région de Vallorbe. Les travaux sont menés avec célérité et le jeudi 26 juin 1890, après quelques



Figure 17. Portrait d'Anthelme Boucher à 25 ans. Ce brillant ingénieur est à l'origine de la construction de nombreuses usines électriques dans le monde, mais sa contribution décisive fut la mise au point et la construction de la première usine électrochimique à l'échelle industrielle au monde au Day, près de Vallorbe. Photographie anonyme.

jours d'électrolyse, la première usine électrochimique au monde livre son premier lot de cristaux de chlorate de potassium. Après une période d'optimisation, la production de ce sel atteint déjà 600 tonnes en 1892 (Dequier, 1992). Le monde de la chimie industrielle se presse pour visiter l'usine modèle du Day et ses remarquables résultats. Ainsi, en chimie, il ne s'agit plus d'utiliser la houille blanche comme source d'énergie thermique pour chauffer un mélange réactionnel ou concentrer des solutions, mais de l'utiliser comme source d'électrons directement dans des synthèses et ceci à l'échelle industrielle. Or c'est justement ce transfert d'électrons qui est à la base même des réactions chimiques. Rapidement affinée au cours du temps, l'électrochimie permet ainsi d'accéder à un nombre considérable de composés ou d'éléments très purs, comme l'aluminium et le cuivre par exemple.

A l'étranger, lors de la dernière décennie du XIX^e siècle, stimulé par le succès de l'usine du Day, on se lance aussitôt dans la construction d'usines électrochimiques. Ainsi en Allemagne, la Chemische Fabrik Griesheim-Elektron inaugure en 1892 une première usine à Griesheim, un quartier de Francfort-sur-le-Main, puis en 1893 et en 1894 deux autres usines à Bitterfeld et Greppin, non loin de gisements de sel. Le monde anglo-saxon n'est pas en reste avec la Castner-Kellner Alkali Company qui règne en maîtresse et qui ouvre une usine en 1896 à Saltville en Virginie, puis en 1897 à Runcorn en Angleterre. Cependant, toutes ces usines étrangères procèdent à l'électrolyse selon le procédé « chlore-alcali » qui ne produit pas de chlorates, or la demande pour la fabrication d'allumettes et d'amorces est considérable et la production du Day est limitée. De plus, l'utilisation de chlorates comme vecteurs d'oxygène dans des explosifs industriels se précise de plus en plus et ces substances deviennent ainsi stratégiques. Après son succès au Day, la Société d'électrochimie envoie aussitôt Anthelme Boucher prospecter des sites en Savoie afin d'implanter une nouvelle usine. Là aussi l'ingénieur vaudois démontre son talent en menant les travaux tambour battant, et en 1894, une usine de chlorates s'ouvre à Prémont près d'Orelle dans la vallée de la Maurienne (Dequier, 1992). Mais dans le monde francophone, la Société d'électrochimie et Boucher font désormais face à un concurrent digne de leur génie : l'ingénieur polytechnicien Paul Corbin, passionné de topographie et de géologie, qui crée la Société des forces motrices de l'Arve avec une grande usine de chlorates située à Chedde près de Passy (Haute-Savoie),



Figure 18. Le saut du Day près de Vallorbe. Vue depuis la rive droite de l'Orbe, l'usine électrique de 1889 alimente en courant continu l'usine électrochimique située plus haut. Photographie : info@richesses-patrimoniales.ch

inaugurée en 1896. Ailleurs aussi, toujours durant cette dernière décennie du XIX^e, les sites produisant des chlorates fleurissent, avec une autre usine en Suisse, à Turgi, en 1895, deux usines en Suède : Månsbo en 1894 et Alby-Ånge le long du fleuve Ljungan en 1899 et deux autres aux Etats-Unis d'Amérique : Niagara Falls en 1896 et en 1897 (Vogt, 1981). Face à une telle concurrence, le site savoyard d'Orelle de la Société d'électrochimie se tourne vers d'autres productions, comme l'aluminium.

Aux côtés des fameuses Usines métallurgiques, de la Société des matières plastiques isolantes Clématéite et de la Société des Usines des Grands-Crêts de chaux et ciment, le discret fleuron de l'industrie vallorbière qu'est l'usine électrochimique du Day produit des chlorates de manière continue pendant 82 ans et emploie jusqu'à une centaine d'ouvriers contribuant ainsi au développement et à la prospérité de la région (fig. 19). Elle

bénéficie de la mise en fonction, de 1926 à 1955, d'une nouvelle usine électrique reliée par un funiculaire à l'usine électrochimique en 1925 (fig. 20, fig. 21).

En 1948, un sombre nuage se profile : inquiet par la pléthore de sociétés électriques en mains privées sur son territoire et entraîné dans le mouvement des nationalisations de l'après-guerre, le gouvernement vaudois institue une nouvelle loi sur la production électrique devenue stratégique. Ainsi en 1954, les nombreuses usines en mains privées ou municipales sont réunies au sein de la seule Compagnie vaudoise d'électricité (CVE), devenue la Romande Energie Holding en 2006. Ne disposant plus de courant continu issu de sa propre production mais débarrassée des frais et des investissements nécessaires à la bonne marche de sa propre centrale électrique, l'usine électrochimique du Day est donc dépendante de la Compagnie vaudoise d'électricité et de son barrage du Day,



Figure 19. Ouvriers de l'usine électrochimique du Day dévolus aux travaux d'électrolyse et de fonte. En plus des lunettes de protection, le bonnet-cagoule est de mise pour se protéger contre la chaleur ou les émanations. Notez les tabliers de fortune taillés dans des sacs de potasse d'Alsace. Début du XX^e siècle. Photographie : info@richesses-patrimoniales.ch

inauguré en 1955, mais produisant de l'électricité jusqu'à huit fois plus cher qu'auparavant.

Déjà habituée à s'adapter à la production saisonnière fluctuante d'hydroélectricité, l'usine doit faire preuve de souplesse dans sa production selon l'évolution du marché et du prix du courant électrique. Ainsi, en plus de ses produits phares, les chlorates de potassium, de sodium et, dans une moindre mesure, de baryum, elle fabrique épisodiquement du carbure et du siliciure de calcium, du ferrosilicium (fig. 22), de la potasse caustique ainsi que d'autres composés fortement oxygénés comme les perchlorates, les persulfates et le permanganate de potassium. Ses fours électriques permettent la production d'alliages à base de cuivre qui sont recherchés par les industries de précision de l'Arc jurassien (Atochem, 1886-1984).

La Société d'électrochimie disparaît en 1922 et après de multiples fusions, elle se retrouve englobée dans le

giron du groupe Ugine-Kuhlmann en 1964 sous le nom de « Société d'Electro-Chimie d'Electro-Métallurgie et des Acières Electriques d'Ugine », puis du géant de la chimie Pechiney-Ugine-Kuhlmann en 1971. Toujours tributaire des fluctuations du prix de l'électricité, le petit site de production du Day est désormais en concurrence directe avec d'autres usines du même groupe, la « Société des Usines Chimiques Ugine Kuhlmann », sises en France et qui produisent des chlorates meilleur marché. Le coupe-ret tombe irrémédiablement et, en 1972, l'usine d'électrochimie du Day qui occupe 38 personnes, ferme ses portes définitivement. Une page de l'histoire industrielle vaudoise et électrochimique mondiale se tourne dès lors. Une fois débarrassé de son mobilier, le site est acheté puis transformé en place d'armes de l'Armée suisse. Actuellement, la Place de tir et d'exercice du Day, dont l'accès est strictement réservé, est dévolue à l'instruction au combat en zone urbaine. Différents systèmes élec-

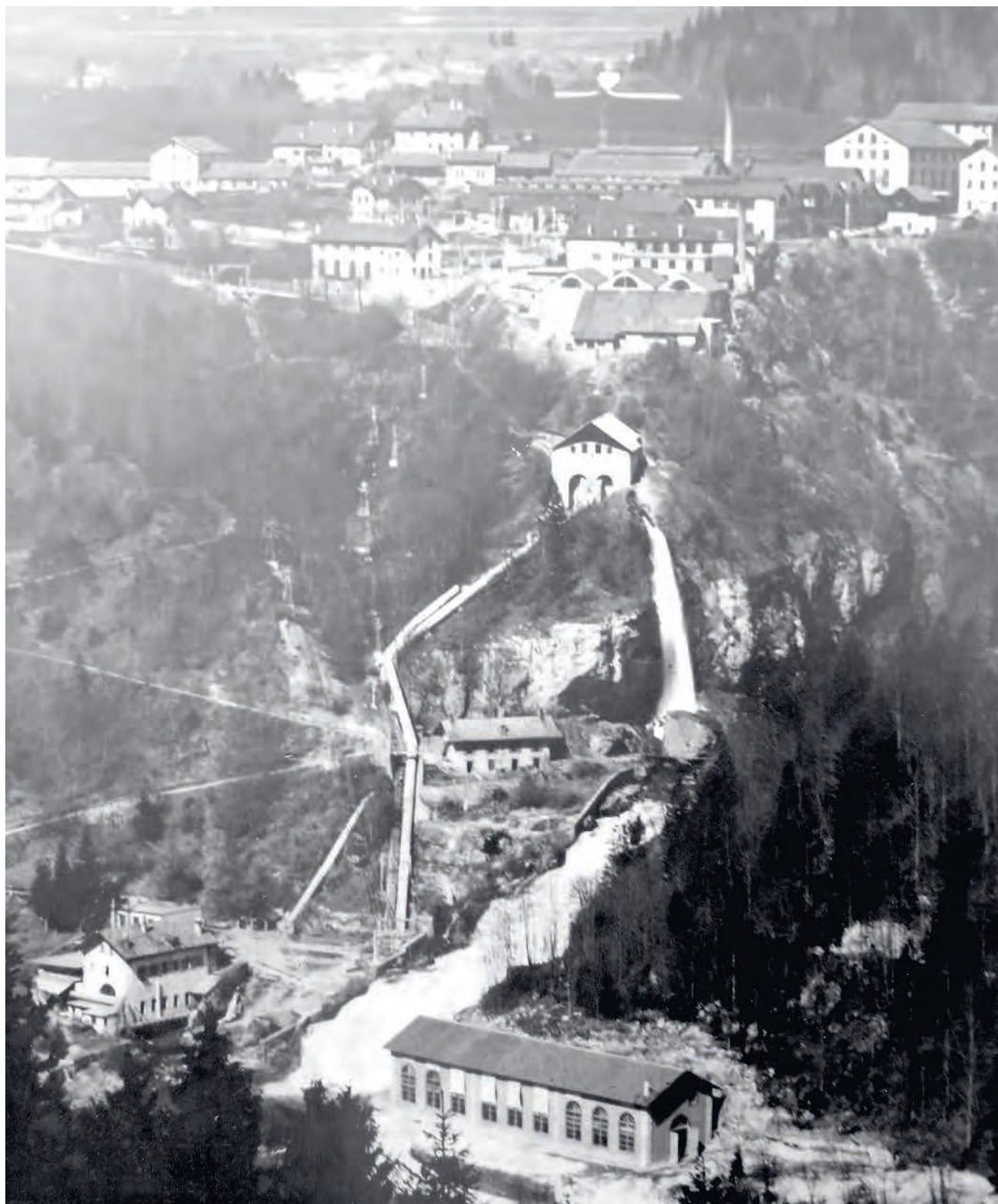


Figure 20. Vue en direction du nord-ouest du complexe électrochimique du Saut du Day avec l'usine électrochimique sur le plateau et trois usines hydroélectriques construites dans la gorge de l'Orbe au Saut du Day. Photographie anonyme de 1925.



Figure 21. En fonction de 1926 à 1956, le funiculaire de l'usine du Day permettait de relier l'usine électrochimique aux usines électriques sises au pied de la cascade de l'Orbe ou Saut du Day.

troniques permettent une simulation optimale indispensable à l'entraînement des troupes d'élite et des forces spéciales de l'Armée et de la Police.

Les chlorates issus du sel de Bex : de l'allumette au dés-herbant en passant par l'explosif

L'électrolyse de la saumure en vue de la production de chlorate diffère du procédé « chlor-alcali » dont nous avons parlé plus haut à propos de Monthey, essentiellement par le fait que l'opération s'effectue à une température élevée, de l'ordre de 70°C, obtenue par l'énergie électrique utilisée pour l'électrolyse. Cette température augmente ainsi drastiquement la réactivité du chlore produit *in situ* dans le bain de saumure lors de l'électrolyse : le chlore réagit avec l'eau et le sel pour former du chlorate de sodium et de l'hydrogène gazeux. Le chlorate de so-

dium est ensuite séparé par concentration puis cristallisation de la saumure électrolysée. Pour obtenir du chlorate de potassium, qui est le produit majoritairement manufacturé au Day, on profite de sa faible solubilité dans l'eau à froid. Il suffit ainsi d'ajouter une solution concentrée et bouillante de chlorure de potassium naturel, appelé aussi sylvite, à la saumure d'électrolyse enrichie en chlorate de sodium (de l'ordre de 660 g/l de chlorate de sodium et 100 g/l de chlorure de sodium), ce qui produit une double décomposition. Après refroidissement, le chlorate de potassium cristallise et précipite et il est récupéré par essorage, rinçage et séchage (fig. 23). Les eaux de lavage, appauvries en chlorate et enrichies en chlorure de sodium,



Figure 22. Fragment de ferrosilicium produit à l'usine du Day. Disposant d'énergie électrique en abondance, cette usine a procédé à l'électrolyse des saumures en chlorate ainsi qu'à la fonte de métaux et à la production d'alliages spéciaux. Photographie Stefan Ansermet. Musée cantonal de géologie n° 094172 ; 50 x 40 mm.

sont ensuite renvoyées au bain d'électrolyse pour subir un nouveau cycle. Les archives nous apprennent que le chlorure de potassium tout d'abord utilisé au Day vient de l'immense gisement de Stassfurt en Saxe-Anhalt, puis des mines de potasse d'Alsace au début du XX^e siècle. Quant au chlorure de sodium servant à la production de saumure en vue de leur électrolyse, monopole cantonal du sel basé sur le droit régalien oblige, il vient bien évidemment des Mines et Salines de Bex. L'électrolyse directe d'une saumure de chlorure de potassium en chlorate de potassium est aussi possible mais elle est très rapidement abandonnée car très vorace en énergie du fait de la faible solubilité dans l'eau du chlorure de potassium (Vogt, 1981).

Fortement mises à contribution lors de l'électrolyse, les anodes en platine utilisées au Day font l'objet d'importantes recherches au sein de l'entreprise afin d'en dimi-

nuer l'usure et de récupérer le précieux métal disséminé dans les boues des saumures (Brochet, 1901). Afin de se passer du coûteux platine, des essais portent sur des anodes de magnétite, un minéral naturel réduit en poudre puis fritté à haute température, mais sans grand succès (Atochem, 1886-1984).

Les allumettes

Le principe de l'allumette enflammée par friction est découvert au début du XIX^e siècle mais il faut attendre 1844 pour voir apparaître l'allumette de sûreté, ou « allumette suédoise » qui ne prend pas spontanément feu dans la poche ou lors de secousses et qui surtout ne contient ni plomb ni phosphore blanc toxiques. Le composant principal de la pâte de la tête de l'allumette est le chlorate de potassium mélangé à des substances combustibles et à de la colle (fig. 24). Ce mélange possède une température



Figure 23. Manutentionnaires à l'usine électrochimique du Day en charge du broyage, pesage et conditionnement du chlorate de potassium. Le stock de chlorate est visible dans un bassin en arrière-plan un peu à droite. Tout à gauche, une meule sert à sa pulvérisation. Afin d'éviter au mieux toute impureté combustible pouvant se mélanger au chlorate et constituer dès lors une source d'inflammation, la propreté est de rigueur. Fin du XIX^e siècle. Photographie : info@richesses-patrimoniales.ch



d'inflammation particulièrement basse, caractéristique des compositions pyrotechniques chloratées et qui fait leur dangerosité. Au contact du frottoir, constitué majoritairement de phosphore rouge amorphe, l'inflammation se produit par simple friction. Cette invention est révolutionnaire dans l'histoire de l'humanité : il est enfin possible d'obtenir du feu immédiatement, partout et à très bas prix. Dans cent allumettes il y a environ un gramme de chlorate de potassium. Il est donc très facile de concevoir l'énorme demande de ce produit, moteur du succès de la Société d'électrochimie et de son usine du Day. Du reste, une partie importante de la production est livrée à la fabrique d'allumettes Diamond SA, sise au nord de la gare de Nyon. Inaugurée en 1901, cette usine assure la plus grande production du pays avec des marques comme les boîtes « Soleil » et les pochettes « Chamois ». Au plus fort de la fabrication, la consommation journalière de chlorate de potassium de l'entreprise est de l'ordre de 250 à 300 kg. Mais face à la concurrence étrangère et surtout à l'apparition du briquet jetable, l'usine ferme à la fin de l'année 1982.

Les explosifs et les amorces d'armes à feu

Comme nous l'avons vu plus haut, on peut s'étonner de la vitesse à laquelle les usines électrochimiques produisant des chlorates se sont développées à la suite de celle du Day. L'invention des allumettes de sûreté chloratées en est une explication, mais il en existe une autre : la préparation d'explosifs et d'amorces déflagrantes.

En 1871, le chimiste Hermann Sprengel brevète des mélanges d'oxydants solides et cristallins, comme les nitrates, chlorates ou perchlorates, imprégnés par un liquide ou un solide organique et qui explosent par la stimulation d'un détonateur. Bien que sensibles à la flamme, de telles compositions sont une concurrence directe à la fameuse dynamite d'Alfred Nobel majoritairement composée de nitroglycérine mais à la préparation délicate, sensible au choc, volatile, gélique et dont le transport et la conservation sont limités. Nettement moins brisants que la dynamite, les explosifs chloratés rencontrent toutefois rapidement un vif succès. Comme ils sont constitués par une cartouche cartonnée poreuse remplie de chlorate et que l'on imprègne par trempage dans un liquide organique peu avant l'utilisation, la loi les classe sous le régime des poudres et leur accessibilité en est



Figure 24. Entourant une boîte d'allumettes de marque « LE SOLEIL » et dans leurs flacons d'époque, une série d'échantillons des produits minéraux, végétaux ou animaux utilisés pour la fabrication des allumettes à l'usine Diamond S.A. de Nyon. Tout à gauche, un flacon de chlorate de potassium produit au Day. Photographie Stefan Ansermet. Musée cantonal de géologie n° 094154 à 094169 et n° 084171 ; flacons de 80 x 36 mm.

ainsi facilitée, en particulier dans les domaines agricoles et sylvicoles pour l'arrachage des souches, par exemple. Mais c'est dans l'usine de chlorates concurrente de Paul Corbin, à Chedde dans la vallée de l'Arve en Haute-Savoie, qu'en 1897 on met au point une série de mélanges détonants, déjà prêts à l'emploi et d'utilisation sûre. Ces explosifs, les bien nommés « cheddites » selon leur lieu de découverte, vont connaître rapidement un vif succès, tant civil que militaire, lors du premier conflit mondial (Tavernier, 1975). L'implantation d'usines de chlorates devient dès lors une nécessité stratégique (fig. 25).

En Suisse, comme la production de l'usine du Day est insuffisante pour faire face à la demande, la « Gesellschaft für elektrochemische Industrie AG » est fondée en 1895, qui est aussitôt suivie de la construction d'une usine de chlorates le long de la Limmat, près de Turgi en Argovie : en 1908, la valeur à l'exportation des chlorates produits en Suisse se monte à 1'352'000 Fr., soit presque autant que celle de l'aluminium (De Coppet, 1909). Les mélanges explosifs chloratés sont donc produits dans divers sites de Suisse. Au Day, leur fabrication se base sur une formule suédoise commercialisée sous la marque « Imatrex » de 1962 à 1973 (Atochem, 1886-1984). De par leur prix de revient minime, ils sont utilisés essentiellement pour le pétardement, une opération de minage consistant à disloquer et fragmenter les sols meubles ou rocheux par des grosses charges internes, souvent allongées. A de telles fins et jusqu'au début des années 1960, l'Armée suisse utilise comme explosifs d'ordonnance des pétards constitués de cartouches prismatiques de 6 kg à base de chlorate de potassium ou de 6.5 kg à base de chlorate de sodium. Leur utilisation principale est la confection de charges de 500 kg en vue de la destruction de routes par la création de cratères (Armée suisse, 1957). Depuis une cinquantaine d'années, à l'échelle mondiale, les explosifs chloratés ont été totalement remplacés par des explosifs dits de sûreté, à base de nitrate d'ammonium bon marché et entièrement gazéifiable à la détonation.

Dès le milieu du XIX^e siècle, le chlorate entre aussi dans la composition pyrotechnique des capsules d'amorçage à percussion qui sont massivement utilisées pour l'allumage des poudres propulsives des munitions de tous calibres (Gallusser et al., 2002). Remplaçant l'amadou ou le silex, ce mode d'ignition est une véritable révolution dans le domaine de l'armement. Ainsi une partie du chlorate de potassium produit au Day prend le chemin de la Fabrique

fédérale de munitions M+F de Thoune. De telles compositions d'amorçage sont utilisées jusqu'au premier conflit mondial, mais les propriétés corrosives des produits de décomposition du chlorate sur le métal des armes conduisent rapidement à l'élimination de ce dernier.

Le chlorate, bras armé contre la viticulture valaisanne illégale

La décennie des années 1920 sonne presque le glas de l'usine électrochimique du Day. La crise économique de l'après-guerre, l'abandon du chlorate corrosif dans les amorces de munitions et son remplacement progressif dans les explosifs par du nitrate d'ammonium plus stable, plongent le site dans le marasme. C'est la mise en évidence des propriétés herbicides des chlorates, une dizaine d'années plus tôt, qui va relancer et stabiliser la production de l'usine pour les 50 années à venir. En effet, les chlorates sont des désherbants très efficaces, en particulier le chlorate de sodium qui est 30 à 50 fois plus puissant que le sel de cuisine, le chlorure de sodium. Or le développement de l'agriculture intensive nécessite l'emploi massif d'herbicides, en particulier pour le défanage des pommes de terre afin d'améliorer le rendement. A cette époque, l'acide sulfurique dilué est utilisé à cette fin mais sa dangerosité et sa corrosivité lors de sa brumisation le font détester des agriculteurs. Le chlorate de sodium, neutre, peu toxique et facile à stocker apparaît donc comme un substitut idéal. De plus, son impact environnemental est limité par son utilisation plutôt modeste pour l'époque, de l'ordre de 100 kg par hectare, et surtout sa rapide transformation dans le sol en simple sel de cuisine non toxique (fig. 26). A l'usine électrochimique du Day le chlorate de soude est fabriqué en toute autarcie vaudoise avec l'eau et l'électricité de l'Orbe et bien sûr, le sel de Bex. Cette utilisation agricole pendant près d'un demi-siècle ne résistera toutefois pas aux herbicides organiques chlorés de synthèse plus sélectifs, comme les auxines, et dont certains seront même produits à Monthey, avec une fois de plus le sel de Bex comme matière première, et commercialisés à grand renfort publicitaire dès la seconde moitié du XX^e siècle. Mais revenons au chlorate de sodium et à une opération hautement polémique qui marqua les esprits. C'est donc couronné de trois atomes d'oxygène que le chlorure de sodium, NaCl, de Bex devenu chlorate de sodium, NaClO₃, par la magie de l'usine vaudoise du Day, va participer à l'une des pages



Figure 25. Photographie aérienne de l'usine électrochimique du Day, prise le 5 octobre 1931 en direction du nord par l'aviateur Walter Mittelholzer. Bibliothèque de l'ETHZ.

les plus sombres de la viticulture valaisanne (Thurre, 2000).

Au lendemain du second conflit mondial, la viticulture suisse est en surproduction et la qualité des vins s'en ressent. Les législateurs fédéraux édictent des mesures strictes afin que la plantation de nouveaux parchets de vigne se fasse en toute légalité selon les modalités des plans des zones viticoles et sous la surveillance des cantons. Mais dans le Vieux Pays il n'en est rien, des prairies séchées à flanc coteau ou en plaine du Rhône sont défrichées et de la vigne y est plantée sans aucune auto-

risation. Le Conseil d'État valaisan essaye tant bien que mal de remédier à cela par la médiation, des visites, des courriers, mais rien n'y fait. Une région sise entre Martigny et Sion fait front, elle regroupe des viticulteurs de Fully, Saxon, Saillon et Vétroz... la patrie de Farinet. En 1953, lors d'émeutes en gare de Saxon, ce secteur a déjà fait part de sa colère face aux dirigismes fédéraux et cantonaux lors de la crise des productions fruitières locales, péjorées par les importations étrangères. Echaudé par ce précédent, le sang bouillonne chez les viticulteurs et les émissaires de l'Etat, venus s'enquérir de l'arrachage de

ces « vignes maudites » sont reçus par des insultes et des menaces de mort. Impossible d'envoyer des huissiers ou des gendarmes arracher les vignes, ce serait risquer de les exposer à la vindicte populaire. L'Autorité est bafouée, elle va réagir impitoyablement. Comme une opération terrestre est écartée, elle se fera par les airs avec l'épandage de chlorate de sodium en solution concentrée. Les hélicoptères pulvérisateurs sont à disposition à l'aéroport de Sion avec leurs deux fameux pilotes, Hermann Geiger et Fernand Martignoni. Mais impossible pour les autorités du canton de se fournir en chlorate en Valais, l'achat

d'une telle quantité pour détruire 40 hectares de vigne fuitera inmanquablement ; il faut donc l'acquérir en toute discrétion chez son voisin. A l'aube naissante du vendredi 2 juin 1961, lendemain de la Fête-Dieu, le secteur est verrouillé par la gendarmerie, le téléphone est coupé et l'opération de pulvérisation aéroportée débute. Menée de main de maître, deux heures plus tard à 6 heures, l'opération est terminée. Seul un propriétaire de Vétroz a le temps de se saisir de son mousqueton militaire et faire feu sur un hélicoptère de retour à sa base mais sans le toucher. L'individu est aussitôt neutralisé. Une fois

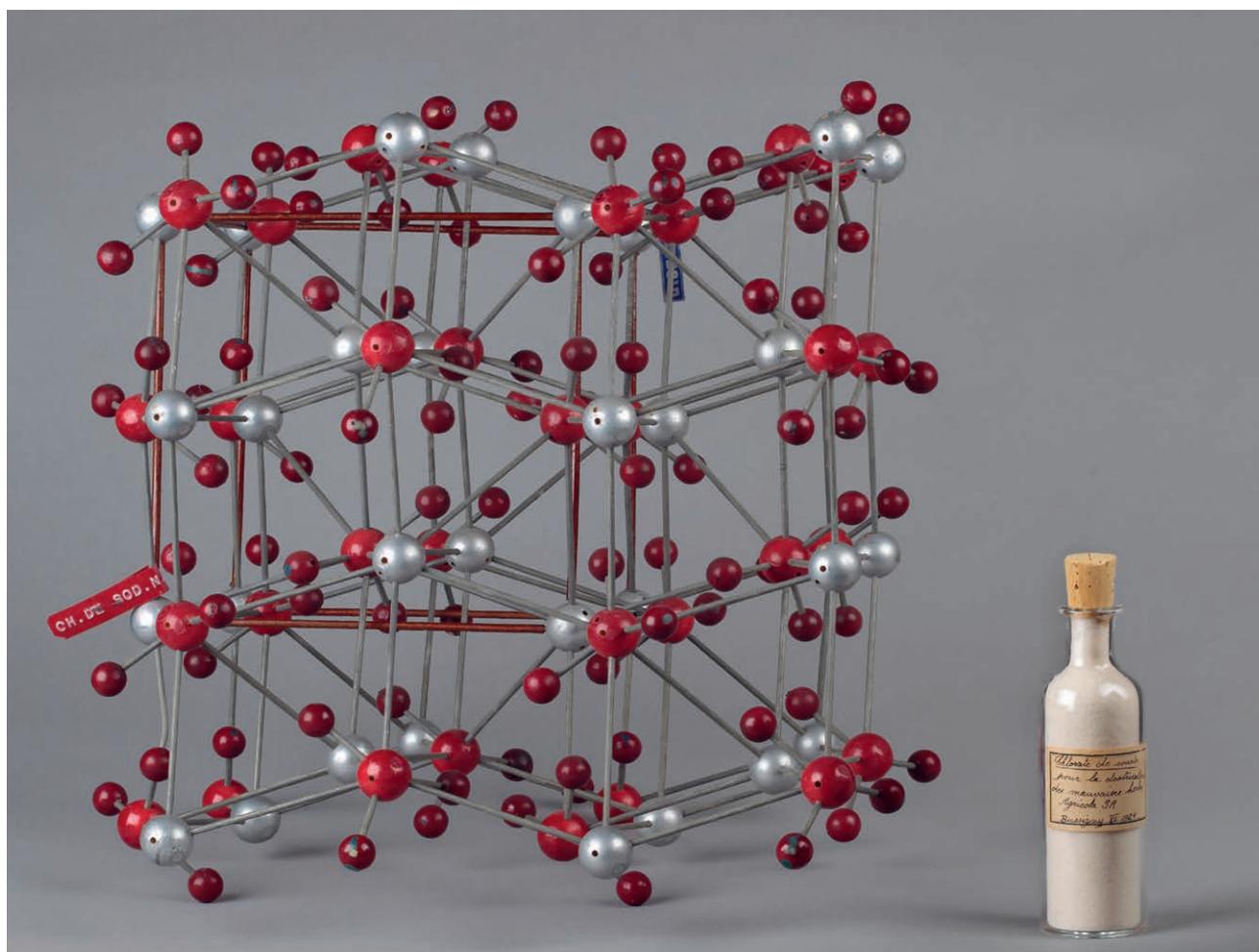


Figure 26. A gauche : modèle en acier et bois peint de la structure cristalline du chlorate de sodium : boules grises atomes de sodium, boules rouges atomes des chlore et boules bordeaux atomes d'oxygène. Fabriqué par Leybold en Allemagne et utilisé par le Professeur Louis Déverin (1886-1969) lors de ses cours de minéralogie et de cristallographie à l'UNIL afin de familiariser les étudiants avec les minéraux et les productions industrielles régionales. Musée cantonal de géologie n° 094150 ; 32 x 32 x 32 cm.

A droite : échantillon en flacon de chlorate de sodium employé comme dés herbant, fabriqué au Day et commercialisé par l'entreprise Agricola S.A. à Bussigny : « Chlorate de soude pour la destruction des mauvaises herbes Agricola 9A Bussigny XI 1924 ». Photographie Stefan Ansermet. Musée cantonal de géologie n° 094129 ; 14,5 x 4 cm.



les vignes brûlées par le chlorate, commencera alors le temps de la colère, des manifestations, des procès, du drapeau valaisan brûlé... et de la Pravda, organe du Parti communiste de l'Union des républiques socialistes soviétiques qui, de bonne « Guerre froide », se fera l'écho de ces événements quelque peu dérangeants pour le havre de paix sociale qu'est la Suisse.

Epilogue : que reste-t-il de ce patrimoine et le rôle du Musée cantonal de géologie ?

Histoires, écrits, images s'archivent et se transmettent plutôt bien, mais qu'en est-il de toutes ces productions industrielles passées, car il est notoire que les échantillons relevant de la chimie et des industries extractives sont rarement conservés. De tels biens sont aux frontières des patrimoines naturels, scientifiques et techniques et souvent les connaissances nécessaires à leur conservation, inventaire et valorisation font défaut (Gmür et al., 1997 ; Moret et Sartori, 1997 ; Bonnard Yersin, 1997). Il n'en va pas de même pour le patrimoine immobilier ou mobilier d'une certaine importance, comme certaines machines ou les fonds d'archives. La Fondation des mines de sel de Bex conserve et fait découvrir son patrimoine immobilier et mobilier au travers de visites publiques et d'un petit musée souterrain qui présente les machines et les instruments relatifs à l'exploitation du sel. Quant aux précieuses archives des mines et des salines, elles ont été transférées aux Archives cantonales vaudoises en juillet 2002 où elles sont sécurisées et disponibles aux chercheurs. A Monthey, c'est la Compagnie industrielle de Monthey SA (CIMO) qui est essentiellement dépositaire des archives manuscrites et photographiques. Dans ces deux sites industriels encore actifs, une préservation du patrimoine est donc effective. Par contre, à la fermeture définitive de l'usine électrochimique du Day, mis à part les aménagements immobiliers repris par la Place d'Armes, les archives manuscrites et photographiques ont été, dans leur majorité, transférées dans une autre usine du groupe, à Prémont en Savoie. A la fermeture de cette dernière, le fonds a été versé aux Archives départementales de Savoie, à Chambéry.

Le patrimoine naturel lithique, sous-produit de l'exploitation des mines de Bex, que constituent les roches, fossiles, minéraux et carottes de sondages, dont la valeur scientifique ou patrimoniale est avérée, est conservé depuis près de deux siècles au Musée cantonal de géologie

à Lausanne, souvent par l'entremise des directeurs et des conservateurs respectifs, parfois chargés du suivi géologique de l'exploitation. Par une succession d'heureux concours de circonstances, cette institution conserve également une partie des produits dérivés du sel de Bex et manufacturés dans les usines de Monthey et du Day.

Suite à la fermeture de l'usine électrochimique du Day en 1973, les machines sont démantelées, ferrailées ou envoyées en France, où la production se poursuit. Les échantillons, réactifs et produits sont donnés à l'Institut de chimie minérale et analytique (ICMA) de l'Université de Lausanne, où ils sont stockés dans les sites de la Cité, au centre-ville de Lausanne puis du Collège propédeutique à Dorigny. Une petite partie de cette donation sera consommée lors des travaux pratiques avec les étudiants mais l'ensemble du corpus est stocké, car inutilisable à cause de l'absence d'indications sur la pureté des substances. L'exiguïté des dépôts et surtout le déménagement de l'ICMA dans un nouveau bâtiment à Dorigny en 1995 met en péril ce fond inévitablement voué à la décharge chimique. Il n'en est rien, car plus soucieux de la préservation des contenants des produits, à savoir de grands flacons anciens avec souvent un bouchon en verre rodé ou en liège, les préparateurs de l'ICMA confient alors ce mobilier au Musée cantonal de géologie pour préservation, le tout accompagné d'une série de roches, minéraux, métaux et de produits industriels semi-finis d'intérêt historique (fig. 27).

Débutée lors du professorat de Louis Déverin (1886-1969), minéralogiste et cristallographe à l'Université de Lausanne, la collaboration avec l'entreprise Djéva a elle aussi amené son lot d'échantillons dans les collections du Musée cantonal de géologie. A l'occasion de tests de laboratoires relatifs à l'optique et au polissage, et surtout lors des nombreuses visites dans le cadre des cours de minéralogie appliquée, l'entreprise Djéva a régulièrement approvisionné de ses productions les collections d'études et d'enseignement (fig. 28).

Dès l'inauguration du collège de Vallorbe en 1915, des professeurs constituent des collections de sciences naturelles et techniques, tout comme, dans une moindre mesure, au Gymnase de Beaulieu à Lausanne.

A l'époque, la diffusion d'échantillons industriels est une carte de visite maîtresse des entreprises. Débutées dès l'organisation des premières expositions universelles au



Figure 27. Issus de l'ancien laboratoire de contrôle et de développement de l'usine du Day, trois flacons recelant des substances utilisées pour les analyses de routine par titrimétrie : cristaux de sulfate de fer et d'ammonium, acide borique en paillettes et du cuivre métallique en râpures. Les étiquettes témoignent du changement des raisons sociales de l'usine : « Société des Usines Chimiques UGINE KUHLMANN CH-1349 Le Day » et « Société d'Electro-Chimie, d'Electro-Métallurgie et des Acières Electriques d'Ugine LE DAY (Vaud, Suisse) ». Photographie Stefan Ansermet. Musée cantonal de géologie n° 094141, n° 094142 & n° 094143 ; flacons env. 20 x 10 cm.

XIX^e siècle, ces gracieuses distributions prennent une telle importance au lendemain de la Première guerre mondiale que des foires régionales s'en font l'écho. Ainsi, entre 1915 et 1919 Lausanne accueille le Comptoir vaudois d'échantillons, devenu le Comptoir suisse dès 1920. A Bâle, en avril 1917, on inaugure la première Foire suisse d'échantillons (Schweizer Mustermesse Basel ou « Muba ») véritable vitrine nationale des productions artisanales et industrielles de la Suisse. A Vallorbe, ville industrielle, il s'agit avant tout de présenter aux élèves et futurs apprentis un large éventail des productions. A Beaulieu, la collection s'adresse aux élèves de l'Ecole supérieure de commerce de Lausanne. Avec le temps, devenus désuets et hors cadre, ces objets vont peu à peu rejoindre les combles de ces établissements. Depuis près d'une décennie, la mise aux normes relatives à la protection incendie et l'isolation thermique des bâtiments pose le problème de la survie de ces collections scolaires, avec des options simplistes d'élimination totale ou partielle. Fort heureusement, les contacts établis avec les musées cantonaux a permis la sauvegarde de l'essentiel des collections de ces deux établissements scolaires et c'est ainsi que le Musée cantonal de géologie est devenu

donataire, en plus des collections naturelles géologiques (roches, minéraux et fossiles), de collections d'échantillons industriels issus de matériaux naturels. Parmi ces derniers, citons d'innombrables flacons de colorants ou d'essais de teintures produits par Ciba sur le site de Monthey, dont les fameux indigos.

Depuis sa création, le Musée cantonal de géologie collectionne de tels objets, qui sont pour l'essentiel des échantillons issus de la métallurgie et de la verrerie (minerai traité, scories, fontes, alliages, métaux purs, sels, verres, etc.). L'avènement de la chimie industrielle, tant minérale qu'organique, a fait littéralement exploser le nombre de substances naturelles transformées ou totalement synthétiques et issues des géoressources que sont les minéraux, la houille, le gaz ou les huiles minérales. Cependant, dans leur grande majorité, ces matériaux et substances industriellement transformées s'avèrent rapidement obsolètes après seulement quelques dizaines d'années d'utilisation. Souvent, afin de protéger l'humain ou son environnement, leurs usages et même leurs productions

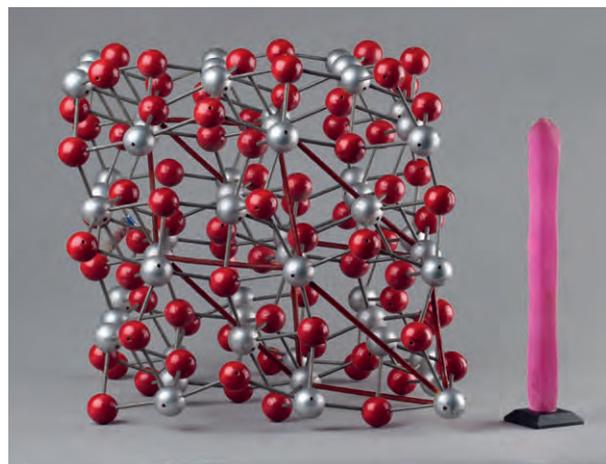


Figure 28. A gauche : modèle en acier et en bois peint de la structure cristalline du corindon. Les boules grises symbolisent les atomes d'aluminium et les boules rouges les atomes d'oxygène. Fabriqué par Leybold en Allemagne et utilisé par le Professeur Louis Déverin (1886-1969) et ses assistants lors de ses cours de minéralogie et de cristallographie à l'UNIL afin de familiariser les étudiants avec les minéraux et les productions industrielles régionales. Musée cantonal de géologie n° 094151 ; 25 x 25 x 25 cm. A droite : monocristal de corindon variété rubis, en prisme hexagonal exceptionnellement long, fabriqué par l'entreprise Hrand Djehahirdjian SA (Djeva) à Monthey et utilisé dans les premiers lasers à rubis. Photographie Stefan Ansermet. Musée cantonal de géologie n° 094144 ; 19.5 x 2.2 cm.



peuvent être interdites par des lois, comme c'est le cas pour l'amiante, le goudron de houille, le DDT, les colorants cancérigènes ou de nombreuses substances pharmaceutiques.

Les progrès réalisés dans le domaine des analyses des polluants environnementaux et de la conservation-restauration des biens patrimoniaux montrent plus que jamais l'importance de disposer de collections de référence de ces matériaux obsolètes, méprisés et mis au ban de la société. Par le biais d'analyses comparatives, les mécanismes liés à certaines pollutions peuvent ainsi être mieux compris ; l'analyse des isotopes ou des impuretés permettent le traçage de productions métallurgiques historiques ; la connaissance des pigments et des colorants anciens facilite la conservation et la restauration d'œuvres ou de textiles ; l'étude de cristaux synthétiques préparés il y a des dizaines d'années offre la possibilité de découvrir des propriétés électroniques ou optiques jusqu'alors insoupçonnées.

Ainsi, dans le cadre de ses missions de préservation des biens patrimoniaux relatifs à la géodiversité, fort de ses compétences en géochimie, au regard des enjeux et applications actuelles ou futures décrites ci-dessus, le Musée cantonal de géologie se doit plus que jamais d'étendre son champ d'action à la conservation d'objets naturels ou dérivés en relation directe avec les géoresources régionales.

Remerciements

Ce travail est le fruit d'une collecte au long cours, d'observations, de lectures, de rencontres avec des personnes liées de près ou de loin au sel de Bex et à ses applications technologiques - même les plus exotiques ou anecdotiques - mais toujours en relation avec le patrimoine industriel et scientifique régional. Bien que soutenue par des références bibliographiques, la trame de cet article a bénéficié des témoignages et de la générosité des personnes et des institutions suivantes à qui j'adresse ma plus sincère gratitude :

MM. Lucien Fournier et Pierre Goin, respectivement anciens directeur-adjoint et directeur de la Société vaudoise des mines et salines de Bex, ainsi que monsieur Philippe Benoit, directeur du site touristique des Mines de Sel de Bex, Fondation des Mines de Sel de Bex pour l'accessibilité facilitée aux sites miniers et industriels.

M. Jean-Claude Rouge, alias « Ponpon », ancien contremaître des mines, pour toute sa confiance lors de multiples explorations des sites.

Mmes Jacqueline, Nicole et Anita pour leur accompagnement fidèle et professionnel lors des explorations et visites des galeries du réseau minier de Bex.

M. Marc Weidmann, géologue et ancien directeur du Musée cantonal de géologie, qui, lors du suivi géologique des prospections dans les mines de Bex, a toujours minutieusement veillé à approvisionner les collections du musée avec des échantillonnages pertinents et dûment répertoriés.

Mme Sandrina Cirafici et M. Pierre-Yves Pièce, véritables chevilles ouvrières de l'histoire du sel chablaisien qu'ils font vivre avec énergie et passion au travers de l'association « *Cum grano salis* ».

M. Maurice Nantermod, ancien préfet du district de Monthey, qui m'a conté les vicissitudes et anecdotes de la chimie montheyenne.

M. Gérald Dessauges, ancien directeur sur le site chimique de Monthey et ancien président de la Société vaudoise des sciences naturelles, pour ses éclaircissements au sujet de la production de chlore et de ses dérivés organiques.

Mlle Katia Djevahirdjian, directrice de Djevahirdjian Production SA, à Monthey, qui m'a accueilli avec bienveillance lors de visites universitaires de l'usine de pierres scientifiques.

La Compagnie industrielle de Monthey SA (CIMO) pour les photos historiques du site industriel.

M. Pierre-André Vuitel de l'Association Développement 21 - Patrimoine au fil de l'eau (www.richesses-patrimoniales.ch) pour les photos historiques de l'usine électrochimique du Day.

M. Raymond Durnat, ancien préparateur à l'Institut de chimie minérale et analytique de l'Université de Lausanne, qui a su préserver le fond du laboratoire de l'ancienne usine du Day, au travers de son don au Musée cantonal de géologie.

Mme Liliane Dufresne, ancienne laborante à l'Institut de minéralogie et de pétrographie de l'Université de Lausanne et dernière apprentie à l'usine électrochimique du Day, qui m'a rapporté les techniques et incidents au sein du site peu avant sa fermeture.

M. le colonel EMG Daniel Escher, ancien commandant des Ecoles de grenadiers de chars 21/221 et qui, à l'occasion de rigoureux entraînements, m'a fait découvrir les tréfonds et les secrets de l'ancienne usine électrochimique du Day.

M. Alain Gallusser, chef de l'Office central des armes à l'Office fédéral de la police à Berne, chargé de cours à l'École des Sciences criminelles de l'Université de Lausanne et ancien président de la Société vaudoise des sciences naturelles, pour ses éclaircissements pyrotechniques.

M. Charles-Marie Crittin, ancien président du Grand Conseil valaisan, qui m'a conté avec gravité, vivacité et malice l'affaire des « vignes maudites » du Valais.

Les directions de l'Établissement secondaire de Vallorbe et du Gymnase de Beaulieu à Lausanne, qui ont permis la sécurisation des collections géologiques et techniques par un transfert au Musée cantonal de géologie en 2009 puis en 2011.

MM. Aymon Baud et Gilles Borel, respectivement ancien directeur et actuel directeur du Musée cantonal de géologie pour leur soutien aux recherches sur le terrain, dans les collections et archives, en rapport avec le sel de Bex et son historique géologique et industrielle.

MM. Stefan Ansermet et Jean-Claude Vannay, mes actuels collègues au Musée cantonal de géologie et anciens collègues guides touristiques dans les mines de Bex pour leur aide indéfectible et leurs pertinentes observations lors de nos nombreuses et mémorables excursions bellerines.

Mme Monica Constandache, mon estimée collègue du Musée cantonal de géologie, à qui est revenu le rude travail de relecture, de correction, de mise en page et de publication de cet ouvrage. ■

Nicolas Meisser est conservateur au Musée cantonal de géologie.

Bibliographie

ANGÉLOZ, A. (2014) : Mines de sel de Bex. Analyse paléo-environnementale des sédiments triasiques et liasiques et analyse statistique des émanations de gaz. Travail de Master inédit, Université de Lausanne, 178 p.

ANONYME (1936) : Anthelme Boucher, nécrologie. Bulletin technique de la Suisse romande, 62, 118-119.

ARMÉE SUISSE (1957) : Emploi des explosifs, règlement 57.13f, 296 p.

ATOCHEM (1886-1984) : Fonds d'archives en provenance de l'usine du Day/Vallorbe (Vaud-Suisse), déposé à Prémont. Archives départementales de Savoie, Chambéry, 97F, 315-353.

BADOUX, H. (1966) : Description géologique des mines et salines de Bex et de leurs environs. Matériaux pour la géologie de la Suisse, Série géotechnique, 41, 1-56.

BONNARD YERSIN P. ET J.-M. (1997) : Le patrimoine technique. In : Le patrimoine vaudois existe, nous l'avons rencontré. Etats généraux du 6 décembre 1997. Association pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud, Lausanne, 43-48.

BROCHET, A. (1901) : La préparation industrielle des chlorates et hypochlorites par voie industrielle. Revue de physique et de chimie et de leurs applications industrielles, 1, 15-21.

CHARPENTIER, J. de (1818) : Mémoire sur la nature et le gisement du gypse de Bex et des terrains environnants. Annales des Mines, Paris, 4, 535-560.

CIBA (1954) : Cinquantenaire de l'usine de Monthey (1904-1954). Ciba-Geigy, Bâle, 54 p.

COLLECTIF (1986) : Les Mines et Salines de Bex, une grande aventure humaine. Association pour la mise en valeur de l'histoire et du site des Mines et Salines de Bex-Aminsel, 72 p.

COLLECTIF (2002) : Djeva, industrie de pierres scientifiques. Brochure d'entreprise, éd. Industrie de pierres scientifiques Hrand Djevahirdjian S.A. Monthey, 11 p.

COLLECTIF (2009) : Mines et Salines de Bex, le sel de la mine à l'assiette. Document Ecole Musée, Service des activités culturelles, DFJC, Etat de Vaud, 30, 36 p.

CORNAZ, C. (2007) : A la Mine ! Employés des mines et salines de Bex au XIX^e siècle. Document du Musée cantonal d'archéologie et d'histoire, Lausanne, 80 p.

DE COPPET, M. (1909) : L'industrie électro-chimique en Suisse. La Houille Blanche, Revue internationale de l'eau, 12, 313-316.

DEQUIER, D. (1992) : Maurienne : la vallée de l'aluminium. Ed. La Fontaine de Siloë, Les Marches, 245 p.



- DONY-HÉNAULT, O., GALL, H. ET GUYE, PH.-A. (1914) : Principes et applications de l'électrochimie. Encyclopédie de Science Chimique appliquée aux arts industriels, tome IV. Ed. C. Chabrié, 183 p.
- GALLUSSER, A., BONFANTI, M. ET SCHÜTZ, F. (2002) : Expertise des armes à feu et éléments de munitions dans l'investigation criminelle. Collection sciences forensiques, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 193 p.
- GMÜR, PH., HUNKELER, P. ET MORET, J.-L. (1997) : Le patrimoine naturel. In : Le patrimoine vaudois existe, nous l'avons rencontré. Etats généraux du 6 décembre 1997. Association pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud, Lausanne, 23-35.
- GRAF, M.-A. (1994) : Géologie et métallogénie de la région de Bex-Ollon-Villars (VD). Diplôme inédit, Inst. Géol. Univ. Lausanne, 1-82 + annexes.
- GRENIER, Ch. (1888) : Notice sur les Salines de Bex et leur exploitation par la Compagnie des Mines et Salines. Bex, 43 p.
- HUG, P. (1997) : Biologische und chemische Waffen in der Schweiz zwischen Aussen-, Wissenschafts- und Militärpolitik. Revue des Archives fédérales suisses, Berne, Etudes et sources n°23, 15-120.
- LERESCHE, S. (2007) : L'énergie hydraulique au fil de l'Orbe. Association Développement 21, 88 p.
- LUIB, A. ET STEINBUCH, E. (1920) : Process for continuous electrolysis of aqueous solutions by means of propulsive electrodes. US Patent 1,354,498, Jan. 29, 1913.
- MEISSER, N. (2014) : Les découvertes historiques de cristaux de gypse dans la mine du Coulat, à Bex, en 1790 et 1817. Minaria Helvetica, 34, 54-61.
- MORET, J.-L. ET SARTORI, M. (1997) : Le patrimoine scientifique. In : Le patrimoine vaudois existe, nous l'avons rencontré. Etats généraux du 6 décembre 1997. Association pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud, Lausanne, 37-41.
- PAYOT, ED. (1921) : Mines et Salines de Bex, au point de vue historique, technique et administratif. Société de l'imprimerie et lithographie, Montreux, 340 p.
- PIÈCE, P.-Y. (2020) : Le sel de l'exil : sur les traces des mineurs Hans et Joseph Schaitberger de Dürrnberg (A). Minaria Helvetica, 41, 4-31.
- PIÈCE, P.-Y. (2022) : Les cartes et plans des Archives cantonales vaudoises : une mine patrimoniale qui ne manque pas de sel ! Documents de l'Association pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud, 15, 141-152.
- PIÈCE, P.-Y. ET WEIDMANN, M. (2014) : Albert Ginsberg (1782-1837), mineur, ingénieur des mines et géologue. Minaria Helvetica, 34, 26-53.
- PIETSCH, A. ET STEINBUCH, E. (1910) : Process for continuous electrolysis of aqueous solutions. US Patent 978,934 ; Nov. 17, 1909.
- REVERDIN, F. (1914) : Coup d'œil général sur le développement des industries chimiques dans le Valais et plus spécialement sur la fabrication de l'indigo synthétique. Bulletin de la Murithienne, 39, 356-375.
- STEINBUCH, E. ET FULLEMANN, G. (1931) : Apparatus for obtaining light metals by electrolysis. US Patent 1,820,844, Oct. 14, 1929.
- STEINBUCH, E. (1913) : Apparatus for electrolysis of fused alkali chlorides. US Patent 1,074,988, Aug. 23, 1910.
- TAVERNIER, P. (1971) : Poudres et explosifs. Presses Universitaires de France, Paris, 2^e édition, 128 p.
- THURRE, P. (2000) : Les vignes maudites. Editions Monographic SA, Sierre, 104 p.
- VERNEZ, M. ET HUBLER, L. (2020) : Une pincée de sel. Les débuts de l'exploitation saline dans le Chablais vaudois 1554-1685. Bibliothèque historique vaudoise, n°148, 288 p.
- VOGT, H. (1981) : Electrosynthesis of Chlorate in the Nineteenth Century. Journal of the electrochemical Society ; 128, 2, 29-32.
- WEIDMANN, M. (2006) : Mines de sel de Bex, données 1991-2004. Matériaux pour la géologie de la Suisse, Série géotechnique, 94, 1-31.
- WEISSBRODT, P. (1997) : Ombres et lumières au pays de Monthey. Edité par Ciba pour les 100 ans de chimie à Monthey. CIMO Compagnie industrielle de Monthey, 178 p.
- WILD, F. S. (1788) : Essai sur la Montagne salifère du Gouvernement d'Aigle situé dans le Canton de Berne. Genève, 349 p.

Des gravières et des carrières comme patrimoine?

par Grégoire Testaz

1. Une « matière première » abondante et très demandée

Chaque année en moyenne, le canton de Vaud extrait et consomme 1'200'000 m³ de graviers terrestres, 300'000 m³ de graviers lacustres et de cours d'eau, 220'000 m³ de calcaires concassés, sans compter le calcaire à ciment, les marnes et argiles pour briqueteries et tuileries. Mentionnons encore le gypse de la colline du Montet à Bex, et l'on aura un aperçu de notre dépendance pour ces produits du sous-sol que l'on dédaigne, ou sur lesquels l'on peste derrière un camion dégoulinant de sable et d'eau. Le canton de Vaud compte actuellement 31 gravières, 15 carrières, 2 concessions de dragage en exploitation ... et plus de 200 sites d'extraction réaménagés !

Un impact certain sur le paysage, des oppositions nombreuses et fermes à presque toute nouvelle ouverture d'exploitation, des dangers objectifs, des problèmes hydrogéologiques, des « remises en état » problématiques : carrières et gravières sont les mal aimées de la société, alors que nous sommes dans le peloton de tête mondial

en termes de consommation par habitant pour le béton, le ciment et autres dérivés des matériaux de base de la construction ...

Importer les agrégats à béton, le ballast ferroviaire pour préserver paysages, ressources et tranquillité ? A quel prix ? Avec quelles incidences sur le trafic, l'économie locale ? « On a le sel » disait Ramuz, mais nous avons aussi ces géoressources indispensables, en quantité limitée toutefois, qui assurent une autonomie bienvenue au bilan économique du canton.

De plus, carrières et gravières peuvent révéler des objets d'intérêt scientifique de grande valeur, mais si le cadre de la découverte disparaît, comment expliquer et comprendre les conditions naturelles à l'origine de ces objets ? Jadis on extrayait les trouvailles archéologiques du sol sans s'occuper de leur contexte. Aujourd'hui l'environnement de l'objet a autant d'importance que l'objet lui-même. Il devrait en être de même pour les « objets géologiques », au titre d'un patrimoine scientifique global formant une entité, dont la destruction ou la disparition coupe la découverte de son cadre originel.

Type de matériaux	m ³	%
Graviers terrestres	1'210'300	42
Graviers lacustres et rivières	300'000	10.5
Calcaires concassés pour cimenterie	485'600	17
Calcaires concassés y. c. « roches dures »	225'500	8
Marnes (cimenterie)	110'000	3.8
Marnes (briqueterie – tuilerie)	53'600	1.8
Gypse (cimenterie – plâtre)	43'000	1.5
Graviers et roches concassées importés	440'000	15.3
Total consommation 2011	2'868'000	100

Tableau 1. Production et consommation de matériaux pierreux dans le canton de Vaud en 2011 (DSE).



2. Les gravières, témoins des époques glaciaires et post-glaciaires

Depuis fin 1973, le mammouth de Praz-Rodet (Vallée de Joux) trône dans une galerie du Musée cantonal de géologie, au Palais de Rumine, star de la paléontologie du Quaternaire vaudois. Le vénérable fossile a fait l'objet d'une seconde restauration complète de 2005 à 2008, ayant presque autant souffert durant les 30 ans de son exposition au musée que durant les 16'000 ans passés dans les graviers humides jurassiens¹ (Riond, 2012). La mort, probablement violente, du jeune animal (15 ans) est datée à 16'300 ans BP (Before Present) par les datations par le ¹⁴C. Son environnement et la cause de sa mort ont été révélés par une analyse fine des sédiments dans lesquels reposait la dépouille, grâce à la continuité de l'exploitation de la gravière de Praz Rodet et sa voisine du Carré. Une chute entraînée par un « jökulhaup » (terme islandais : crue subite d'un torrent sous-glaciaire), puis une courte exposition à des prédateurs, enfin une fossilisation partielle dans des alluvions fluvio-glaciaires, voilà ce qu'une étude sédimentologique des dépôts des gravières a permis de proposer (Fiore et al., 2002). La présence de sédiments lacustres a aussi confirmé l'existence d'un lac de Joux plus étendu (et plus élevé) que l'actuel, au bord d'un glacier local en voie de retrait.

Les nombreuses trouvailles de restes de mammouths « vaudois » (défenses, vertèbres, molaires) sont étroitement liées aux exploitations de gravier réparties sur tout le territoire : Saint-Légier, Crissier, Dizy, Bioley-Orjulaz, Lavigny ... (fig. 1). Mais ces nombreuses gravières, productrices d'agrégats à béton, de grave de fond de routes, de remplissage pour gabions de stabilisation de talus ne sont pas seulement des sites potentiels de trouvailles paléontologiques² ; on l'a vu avec les reconstitutions paléogéographiques de paysages disparus : avancées et retraits glaciaires, anciens lits de cours d'eau, rivages lacustres élevés, etc. On peut qualifier les gravières de

véritables « conservatoires », exemplaires de dynamique sédimentaire à l'usage des chercheurs, des étudiants et du grand public.

L'étude complexe, largement pluridisciplinaire des gravières du Duzillet (Ollon, Chablais vaudois), de leurs troncs d'arbres fossiles, des forages dans toute la région, des sédiments lacustres et fluvio-glaciaires, des nombreux restes animaux et végétaux a permis la reconstitution du remplissage de cette partie de la vallée du Rhône, et de la succession des paysages tardi- et postglaciaires (Becker et al., 1999).

Mais depuis peu l'on s'intéresse aux ressources plus cachées des sables, graviers, alluvions et moraines mis à jour lors des grands travaux (tunnels, tranchées couvertes). Ainsi, par tri sélectif (concentrations granulométrique, gravimétrique et magnétique) il serait possible de récupérer pièces de monnaies anciennes, bronze, or, monazite (terre rare), magnétite, zircon, rutile, plomb, mercure, cadmium, arsenic et autres métaux lourds polluants.

Les gravières, mines de demain ? Elles resteront en tout cas une ressource naturelle d'avenir, à condition d'être gérées rationnellement, jusqu'à leur remise en état, et aussi en restant accessibles aux chercheurs, au moins durant leur exploitation.

3. « Fin de carrières »... la décadence des pierres ornementales vaudoises.

Eriger le gros œuvre d'un bâtiment en « pierre naturelle », en roche pour utiliser le mot propre ? Une utopie, une folie hors de prix aujourd'hui. Béton, brique, parpaings de ciment, issus pourtant de géomatériaux naturels, sont la norme : techniques, standards, coûts, rationalisation, tout concourt au succès de ces substituts à la pierre traditionnelle, désormais réservée à la réhabilitation ou la restauration de constructions anciennes à valeur monumentale élevée.

Les Romains ont apprécié les roches du sous-sol vaudois et des territoires voisins : Avenches en témoigne. Les carrières de La Raisse (ou La Lance) près de Concise, ou la carrière de meules de Chavannes-le-Chêne sont encore visibles. La Lance est même la seule carrière vaudoise classée monument historique, depuis 1945. Elle fut exploitée, par intermittence, jusqu'en 1953. La carrière de grès coquilliers de La Molière, près d'Estavayer, est tou-

1 Cette restauration a montré tout l'intérêt de la démarche en réseau entre musées, ici le Musée cantonal de géologie et le Musée cantonal d'archéologie et d'histoire.

2 Il faut 30'000 tonnes de granulats (et non pas de « gravats », qui sont des plâtres cassés !) pour 1 km d'autoroute, 2 tonnes pour 1 m³ de béton, 16'000 tonnes de ballast pour 1 km de voie ferrée, 100 à 300 tonnes pour une villa.



Figure 1. Gravière « La Caroline », Tolochenaz, aujourd'hui comblée. Ancien delta du Boiron, terrasse lacustre de 10 m, sables et graviers, paléosol, site de découvertes de fossiles du Quaternaire. Photographie G. Testaz.

jours en activité ; ses produits se retrouvent un peu partout, en bassins de fontaine, marches d'escaliers, etc.

Arvel, Saint-Triphon, Roche, sans parler du Mormont, sont les lieux qui évoquent la « roche » aux Vaudois d'aujourd'hui. Mais qui se souvient du marbre d'Arzier, de Truchefardel, du Châble Rouge, de la Tinière ? Bien sûr, il ne s'agit pas de vrais marbres au sens pétrographique, terme réservé à un calcaire métamorphique comme celui de Carrare. Avant le ciment et le béton, les carrières de pierres ornementales vaudoises ont fourni la matière à maints monuments, escaliers, autels d'églises, cheminées de salon. Les niveaux inférieurs de grands bâtiments publics lausannois de la fin du XIX^e ou début du XX^e siècle utilisent fréquemment des blocs de calcaire noir de Saint-Triphon, les étages supérieurs étant en molasse plus facile à travailler et déplacer. A Saint-Triphon justement,

la grande carrière du Lessus est en phase finale de comblement. Quant à celle voisine des Andonces, recelant plusieurs particularités géologiques de grand intérêt, elle est dévolue parfois à des spectacles s'intégrant bien au site. L'ancien front d'exploitation a recoupé ce fameux conduit de cavité karstique, preuve, entre autres, du renversement de la série du Trias moyen de la nappe des Préalpes Médiannes dont sont constituées les étranges collines de St Triphon, détachées de leur cadre tectonique (fig. 2). Des bassins de fontaines aux mausolées, socles de statue, rampes d'escaliers, le « marbre » de Saint-Triphon reste un fleuron de la « pierre naturelle » vaudoise. La « formation de Saint-Triphon » et les « membres des Andances et du Lessus » font référence dans le Lexique stratigraphique de la Suisse pour ces calcaires de l'Olénénien – Anisien moyen (247 Ma (millions d'années)).



Figure 2. Carrière des Andonces, Saint-Triphon. Section de conduite karstique avec remplissage, série renversée des calcaires du Trias, stylolithes (niveaux argileux fins, écrasés) et traits de sciage. Photographie G. Testaz.

Arvel marque comme une blessure le paysage du bout du lac. Aujourd'hui productrices de précieux ballast ferroviaire de calcaire siliceux du Lias (env. 190 Ma) et dépôt de matériaux pierreux de toutes sortes, ces carrières trop spectaculaires furent réputées pour leur « marbre » rougeâtre, visible à la villa Mon-Repos à Lausanne par exemple, ou à l'hôtel de ville de Villeneuve.

On peut citer ici les nombreux blocs erratiques alpins déposés par le glacier du Rhône dans le Chablais, sur le bassin molassique et jusque sur les flancs du Jura : granite du Mont Blanc, conglomérats permo-carbonifères de Collonges-Dorénaz, « roches vertes » du Pennique (Alpes valaisannes) ont été débités et taillés en meules de pressoir, bornes, bassins de fontaine, bordures de trottoirs, et peut-être dès la fin du Paléolithique pour façonner outils et armes.

Et la molasse vaudoise ? Si chaque village du Plateau, ou presque, avait sa carrière, on ne retrouve qu'avec les plus

grandes difficultés les traces de grandes exploitations qui ont fourni, par exemple, les matériaux d'origine de la cathédrale de Lausanne. Quelques sites ont heureusement été entretenus, voire exploités temporairement, comme la spectaculaire carrière du Pendens à Mézières. Celle de Servion a servi à la construction de l'ex - Crédit Foncier de Lausanne (place Chauderon). On a aussi trouvé des traces de carrières « lacustres », dans les endroits où les bancs de molasse sont à faible profondeur, et non recouverts de sédiments récents.

Les « Grès de la Cornalle » et ceux de Jongny et Attalens (Molasse d'eau douce inférieure, d'âge Oligocène, 30 Ma) ont été très utilisés pour ériger murs et escaliers des vignobles de Lavaux. Des carrières ont aussi exploité le flysch préalpin aux Fayaux, sur les pentes des Pléiades, mais de nombreuses petites carrières oubliées ont fourni un peu partout (Jura, Préalpes) pierre de construction, matériau de recharge des routes et matière première pour les fours à chaux.

La molasse, ce grès abondant, facile à travailler, élément fort du paysage naturel et construit, subit mal les affronts du temps et des agents d'altération. Rouvrir les anciennes carrières qui ont fourni les matériaux de la cathédrale de Lausanne, ou chercher des roches plus résistantes, voire utiliser des « roches synthétiques », voilà les perspectives³. Quelles nouvelles « durabilité » attendre de ce matériau, partie intégrante de l'histoire du patrimoine vaudois ?

4. Carrières, gravières, géotopes : des ressources en réseau

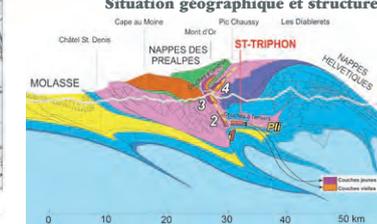
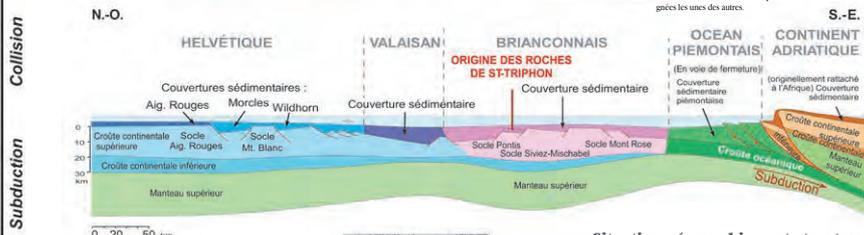
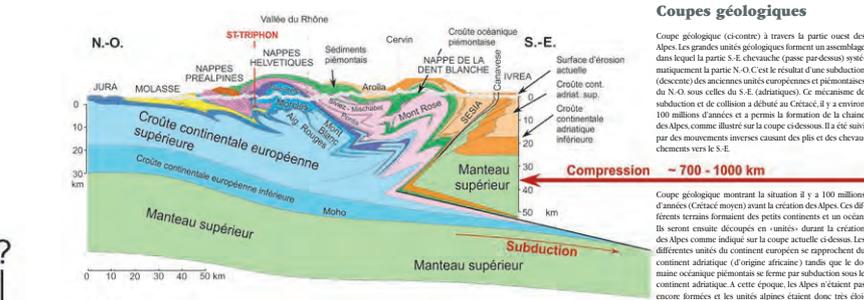
Depuis deux ou trois décennies fleurissent les études générales ou ponctuelles sur la réhabilitation, la « renaturalisation », l'aménagement des sites d'exploitation des géomatériaux, que ce soit les mines (du moins les ouvrages de surface entendus comme patrimoine industriel), les carrières comblées de matériaux divers, gravières aménagées en lacs bizarres ou parcs de loisirs, ou parfois en réserves de flore et faune. Les interactions avec les nappes phréatiques conditionnent d'ailleurs les nouvelles affectations de ces sites et requièrent des études d'impact sur les risques de pollution. Les comble-

3 Colloque « Déontologie de la pierre : stratégies pour la cathédrale de Lausanne ». Dpt. Infrastructures, Serv. immeubles, patrimoine et logistique. Lausanne 2012, 66 p.

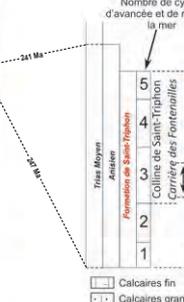
La géologie des collines de St-Triphon

Echelle des Temps géologiques

Echelle des temps géologiques illustrant les grands traits de l'évolution de la vie à la surface du globe (dans les mers et sur terre). Cette évolution est caractérisée de grandes extinctions (jusqu'à 90 % de disparition des animaux marins et terrestres) et sont marquées en rouge sur l'échelle des temps géologiques.

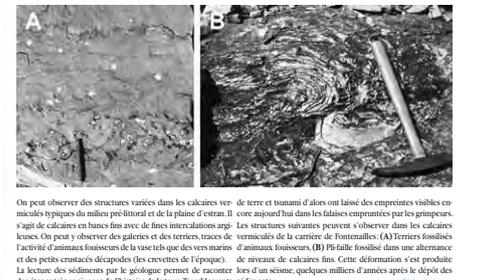


Les roches et leurs âges



Environnement	Unités
Margino-littoral	T4 Calcaires noirs et dolomie beige (Anisien)
Plaine pré-littorale	T3 Niveau à Silex (Anisien)
Plaine d'estran	T2 Calcaire gris (Anisien)
Plaine d'estran	T1 Calcaire granuleux et vermiculé (Anisien)
Margino-littoral	Dolomies
Margino-littoral	Niveaux de silex
Margino-littoral	Calcaires vermiculés
Margino-littoral	Dolomie bréchiques

Paléo-environnement (ancien environnement)



On peut observer des structures variées dans les calcaires... (A) Terriers fossilisés... (B) Fossiles fossilisés dans une alternance de niveaux de calcaires fins... Cette déformation est produite par les sédiments...

Les collines de Saint-Triphon font partie de l'unité ou nappe... (couches dont l'origine géographique lors du dépôt sont les marges, mais qui sont dans la situation actuelle en continuité les unes avec les autres) des Préalpes médianes rigides.



Les couches calcaires qui constituent les collines de Saint-Triphon se sont déposées il y a plus de 215 millions d'années sur les bords d'une mer tropicale... (1) plaine margino-littorale; (2) plaine d'estran ou de balancement des marées; (3) barrière constituée de sables carbonatés; (4) plaine pré-littorale.



Modèle général des paléo-environnements... (1) plaine margino-littorale; (2) plaine d'estran ou de balancement des marées; (3) barrière constituée de sables carbonatés; (4) plaine pré-littorale.

Contenu réalisé par A. Baud, A. Fischer, J.-L. Epard, M. Joboyedoff et H. Masson

Visitez notre site www.escalade-st-triphon.ch





ments par des « matériaux inertes » (produits de démolition, béton avec armatures métalliques, brique, plâtre, etc.) modifient la géologie locale, et doivent être dûment répertoriés sur les cartes géologiques et géotechniques afin de prévenir risques de tassement ou de pollution lors d'utilisations ultérieures. Le dépôt d'ordures en vrac est désormais interdit, mais la pratique ancestrale (le « ruclo » vaudois traditionnel) a induit la prise en charge de ces « sites pollués » par les autorités responsables de l'environnement.

Localisation et usages des gravières et carrières en fin d'exploitation sont répertoriés et surveillés au motif des impacts possibles, mais ce suivi pourrait être étendu à la valeur patrimoniale scientifique. Le classement en « géotopes » de certains sites d'exploitation garantit leur pérennité, mais l'on connaît des stratotypes (lieu de définition d'un étage stratigraphique) d'intérêt mondial qui ont

pratiquement disparu sous les remplissages divers ou la construction d'immeubles.

On peut aussi imaginer (à Saint-Triphon, à Roche...) des « sentiers de découverte » sécurisés, permettant de conduire les curieux sur les anciens sites d'exploitation, avec panneaux didactiques, voire animations avec d'anciens professionnels des métiers de la pierre. A Saint-Triphon, un panneau didactique sur la géologie de cette particularité géologique des Préalpes vaudoises marque l'entrée dans l'ancienne carrière des Fontenailles, un site d'escalade réputé (fig. 3). Le gypse de la colline du Montet, sur Bex est intégré depuis 2019 dans un parcours didactique, en relation avec le châtaigner... et la vigne !

Des villes, par exemple Fribourg (Nickel 1981, Bollin 1996), ont mis en valeur leur patrimoine de « roches ornementales » intégrées dans les constructions des diverses époques. Lausanne a mis en évidence son Palais



Figure 4. Carrière de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) du Montet, Bex. Du gypse pour le plâtre, des minéraux des évaporites (anhydrite, ammoniojarosite, bassanite). Photographie S. Ansermet.

de Rumine à ce sujet⁴, à l'occasion de son 100^e anniversaire, mais un guide général de la ville sur cet aspect du patrimoine serait bienvenu, tout comme pour d'autres villes du canton.

Tout conserver ? Non bien sûr, mais relever, enregistrer dans la mémoire collective sous toutes les formes de conservation durable les témoins les plus vulnérables de l'histoire géologique est un devoir citoyen, tout comme celui de classer et protéger les monuments historiques. Les géotopes sont les monuments historiques de la géologie, et à ce titre doivent demeurer au patrimoine scientifique du canton (fig. 4). ■

Grégoire Testaz, géographe, est enseignant retraité.

Bibliographie

BECKER, B. ET AL. (1999) : Les troncs d'arbres fossiles des gravières du Duzillet (Ollon, VD, Suisse) et l'évolution du Chablais au tardi- et postglaciaire. *Mém. Sté Vaudoise des Sc. Nat.*, 19, 3, 269-347.

BOLLIN, P. (1996) : Pierres naturelles à Fribourg. *Musée d'hist. nat. Fribourg*, 108 p.

BOREL, G., BONZON, J. (2012) : Retour sur 200 ans de témoins sciés et polis. La collection de roches ornementales du Musée cantonal de géologie à Lausanne. In : *Kunst + Architektur* 3, 10-18.

FIGE, J., PUGIN, A., BEERES, M. (2002) : Sedimentological and GPR studies of subglacial deposits in the Joux Valley : backset accretion in an esker followed by an erosive jökulhaup. *Géogr. Phys. et Quatern.*, 56, 1, 19-32.

KUNDIG, R., et al. (1997) : Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz. Zürich, Schweiz. Geotechnische Kommission.

NICKEL E. (1981) : Matériaux naturels de décoration. Appareillage des pierres de taille au Boulevard de Pérolles. *Musée d'hist. nat. Fribourg*, 71 p.

RIOND, M. (2012) : La deuxième restauration du squelette du mammoth de Praz Rodet. *La Gazette du Laboratoire de conservation-restauration du Musée cant. d'archéol. et d'histoire*, 7, 35-44.

SEPTFONTAINE, M. (1999) : Belles et utiles pierres de chez nous. Lausanne, Musée cant. de géologie.

TESTAZ, G. (2014) : Gypse, anhydrite ... et vins : les autres ressources de la région de Bex. In : *Minaria Helvetica* 34/2014, 9-26.

Etat de Vaud, Dép. du territoire et de l'environnement. Plan directeur des carrières 2014.

Etat de Vaud, Dép. du territoire et de l'environnement. Programme de gestion des carrières 2016.

Les Géotopes. Curiosités méconnues du patrimoine vaudois. De l'inventaire à la mise en valeur. Ass. pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud, n° 9, 2007.

4 « Les entrailles du Palais de Rumine », Musée cantonal de géologie, Lausanne, 2006.



Aperçu de la géothermie profonde dans le canton de Vaud

par Robert Arn avec la collaboration de Gabriele Bianchetti

1. Introduction

La planète Terre est constituée à raison de 99.9 % par des roches et magmas dont la température dépasse 100°C. Cette chaleur rayonne à un flux moyen de 0.065 Watt par m². La terre ne se refroidit pas pour autant de façon significative. Les réactions exothermiques profondes de certains éléments radioactifs (potassium-40, uranium, thorium) maintiennent en effet ce flux et font de cette énergie terrestre une ressource considérée comme inépuisable.

Rapporté à sa surface, le potentiel représenté par le flux de rayonnement atteint une puissance de près 2700 MW pour la Suisse et de 210 MW pour le canton de Vaud. Produite en ruban, cette puissance correspond à une quantité d'énergie de 84'600 TJ, ce qui représente environ 10 % de la consommation énergétique annuelle de la Suisse. La masse thermique de la terre est toutefois telle qu'il est possible de puiser bien davantage dans cette réserve profonde durant des siècles sans que le moindre signe d'épuisement se manifeste. Elle offre donc une opportunité de relais intéressante dans la phase de transition énergétique que la Suisse et le monde sont en train d'aborder.

2. Cadre légal - Soutien de la Confédération et de l'Etat de Vaud

Sur le plan suisse, la géothermie fait l'objet d'un encouragement prévu par l'Ordonnance sur la réduction des émissions de CO₂ du 30 novembre 2012 et par la nouvelle Loi sur l'énergie (entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2018). Des projets visant à utiliser directement la géothermie pour la production de chaleur peuvent ainsi recevoir des contributions fédérales atteignant jusqu'à 60 % des coûts d'investissement. Les projets de géothermie de haute énergie permettant de produire de l'électricité sont également soutenus, de même que la prospection d'eau

chaude lorsqu'elle engage de la recherche fondamentale ou appliquée, ou de nouvelles technologies énergétiques.

Sur le plan cantonal, la géothermie profonde fait partie des ressources mentionnées par la Loi sur les ressources naturelles du sous-sol du 11 décembre 2018 (LRNSS, Vaud, entrée en vigueur le 01.04.2019). Ce bien naturel profond appartient à l'Etat, qui a seul le droit d'en disposer. Les recherches en surface et en sous-sol destinées à sa connaissance font ainsi l'objet de permis et l'exploitation est réglée par concession.

La LNRSS stipule l'obligation de transmission au département en charge du Musée cantonal de géologie de toutes les informations géologiques obtenues lors des recherches. Ces données peuvent être requises gratuitement et en tout temps et, sauf exception motivée d'une durée maximum de 5 ans, sont mises à disposition du public par le Musée.

L'Etat de Vaud (DGE – DIREN) s'est très tôt intéressé au potentiel géothermique de son territoire. Avec l'appui de la Confédération (programme SuisseEnergie), il a publié en 2003 une étude du potentiel géothermique de son territoire, distinguant les géostructures énergétiques, les aquifères profonds et la géothermie haute énergie. Plus récemment, il a publié un Cadastre de géothermie profonde qui fournit une synthèse cartographique des zones propices au chauffage à distance, avec les températures attendues dans les couches du Dogger. Ce document désigne 43 communes dont les besoins thermiques peuvent être couverts jusqu'à 50 %.

3. Moyens d'exploitation de la géothermie profonde

On distingue deux types d'exploitation de la chaleur des profondeurs : la production d'eau chaude disponible naturellement dans des couches ou structures perméables (Aquifères profonds, géothermie hydrothermale) et la



création artificielle d'un échangeur de chaleur dans des roches pas ou peu perméables (Systèmes géothermiques stimulés = EGS, géothermie pétrothermale). En fonction des conditions géologiques rencontrées, des solutions intermédiaires peuvent être appliquées. Il est ainsi possible de développer par fracturation hydraulique ou par acidification la perméabilité de réservoirs profonds existants pour en augmenter la productivité.

Dans les deux cas, l'exploitation est réalisée par doublet de puits. L'eau chaude ou la vapeur est extraite par un puits de pompage, puis est restituée au sous-sol par un second puits après valorisation de la chaleur. Les techniques actuelles de forages dirigés permettent d'exécuter ces deux puits à partir d'une seule plateforme tout en distançant les segments de captage et de restitution de plusieurs centaines de mètres, voire de kilomètres.

L'exploitation au moyen d'un seul puits est aussi envisageable dans le cas des aquifères profonds. Mais elle implique un rejet dans les eaux de surfaces (rivières, lacs) et par conséquent le respect d'exigences légales sur le plan chimique et thermique. Or les eaux profondes sont souvent trop chaudes, minéralisées et réduites pour respecter ces exigences.

3.1 Aquifères profonds (géothermie hydrothermale)

En Suisse, la plupart des aquifères profonds sont situés à moins de 3'000 m de profondeur et les couches favorables se rencontrent pour l'essentiel dans les séries sédimentaires marines de l'ère secondaire. Avec un gradient géothermique moyen de $32 \pm 2^\circ\text{C}$ par kilomètre, leur température ne dépasse ainsi guère 100°C . Cette ressource naturelle peut être utilisée pour le chauffage à distance traditionnel de bâtiments, puis, par cascade, de quartiers Minergie, de centres thermaux, de serres agricoles et de piscicultures. Elle est aussi désignée par Géothermie de moyenne énergie (fig. 1).

Le gradient géothermique accuse localement des variations positives qui permettent d'obtenir des températures élevées à plus faibles profondeurs. De telles anomalies peuvent atteindre plus de 45°C par km. Elles ont été mesurées dans la région de Bâle, en relation avec le fossé rhénan, dans la vallée inférieure de l'Aar et ponctuellement dans des zones de roches fracturées jusqu'en profondeur, caractérisées par des remontées d'eau chaudes (pied du Jura, région de Lavey-les-Bains).

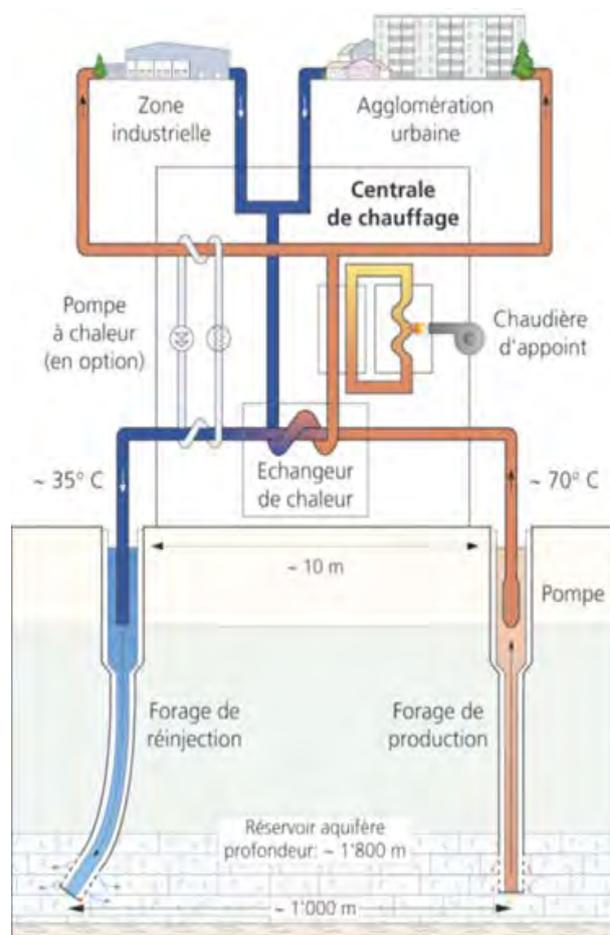


Figure 1. Schéma d'un doublet géothermique (Infos-Géothermie n°3, 2002).

3.2 Systèmes géothermiques stimulés (géothermie pétrothermale)

Les échangeurs artificiels de chaleur peuvent être créés à toutes les profondeurs. En pratique, ils sont réservés à des formations rocheuses suffisamment profondes pour contenir de l'eau à plus de 100°C et produire de l'électricité au moyen de fluides binaires à température d'évaporation plus faible que celle de l'eau (Organic Rankine Cycle – ORC) et de turbines à vapeur. Les rendements sont toutefois faibles, de l'ordre de 8 à 13 % pour des températures de 100 à 150°C . Pour un gradient géothermique normal, les profondeurs de forage sont ainsi comprises entre 3'000 et 5'000 m. A ces profondeurs, il est rare de rencontrer des roches suffisamment perméables

pour produire des débits assurant la rentabilité de l'opération. Aussi faut-il appliquer des techniques de fracturation hydraulique destinées à développer la perméabilité.

Désignée également par Géothermie de haute énergie, la méthode est délicate. Elle doit toucher un volume maximum de rocher tout en évitant la création de circuits de faible impédance susceptibles d'amener un retour rapide vers le puits de pompage des eaux froides restituées dans le second puits. Par ailleurs, la fracturation hydraulique engendre inévitablement de petits séismes qu'il s'agit de contrôler par un ajustement constant des pressions et des volumes d'injection en fonction des réactions sismiques. La méthode rencontre ainsi des difficultés à se développer dans les régions habitées.

4. Cibles géothermiques

Dans le domaine des aquifères profonds, la cible idéale est une roche possédant une porosité d'interstices. De telles conditions sont rencontrées, par exemple, dans le Dogger du bassin parisien et dans certaines couches du Malm de la Bavière. En Suisse, elles sont présentes localement dans le Jura mais rares ou du moins encore inconnues en profondeur sous le Plateau. La cible visée par les projets actuels est dès lors celle caractérisée par une porosité de fractures, soit un volume qui associe une zone de failles à une roche suffisamment dure pour conserver ouverte la fracturation du massif rocheux.

Par conséquent, la prospection se concentre d'abord sur les accidents tectoniques (failles, décrochements), puis s'applique à localiser, au voisinage de ces accidents, la position des couches calcaires qui sont les plus dures.

4.1 Accidents tectoniques

Dans le canton de Vaud, les accidents tectoniques présentant de l'intérêt ont tous un caractère décrochant (déplacement principalement horizontal, fig. 2). Ce sont, d'ouest en est :

- la faille de Divonne-les-Bains, faille aquifère qui touche la commune de Bogis ;
- la faille de Bonmont, qui, de la Dôle, se développe jusqu'à Nyon ;
- le grand décrochement de St-Cergue identifié jusque dans le Léman au large de Rolle, accident connu pour son caractère aquifère ;

- le décrochement majeur de Vallorbe-Pontarlier, dont la zone fracturée atteint près d'un kilomètre de largeur au sud d'Aubonne ;

- le grand décrochement de la Sarraz associé à l'éminence du Mormont ;

- la grande faille d'Yverdon-les-Bains, qui alimente les bains thermaux ;

- et la faille de la Lance, à l'origine de la source homonyme.

4.2 Mésozoïque

Les couches d'origine marine gisant sous la molasse du Plateau et affleurant sous forme plissée dans la chaîne jurassienne comprennent plusieurs séries de calcaires possédant des propriétés aquifères (fig. 3).

Ces propriétés sont étroitement dépendantes du développement du karst et des fractures. Elles sont particulièrement productrices dans les étages supérieurs en raison d'une longue période de régression marine exposant les calcaires à la dissolution de la fin du Crétacé jusqu'à la fin de l'Eocène. Les couches les plus perméables sont ainsi rencontrées dans le Crétacé inférieur, en particulier dans les étages du Barrémien et de l'Hauterivien supérieur. Toutefois, ces couches sont le plus souvent insuffisamment profondes pour produire de l'eau chaude.

Constituée par une série homogène de calcaires d'environ 400 m d'épaisseur, la partie supérieure du Malm (Tithonien, Kimméridgien) est sans doute la cible la plus productive sur le plan géothermique lorsqu'elle est prospectée en profondeur sous la molasse. Elle alliera alors une certaine température et un débit élevé. La température peut toutefois s'avérer insuffisante pour une utilisation directe, si bien qu'il faudra recourir à une pompe à chaleur pour gagner les degrés manquants.

La cible du Dogger est celle qui retient actuellement le plus d'attention dans le Canton. Sous le plateau molassique, cette série géologique présente l'avantage de garantir une température comprise entre 60 et 90°C. Sa séquence médiane (Bathonien – Bajocien) contient des calcaires potentiellement perméables. Une première tentative de prospection par forage réalisée en 1998 à Yverdon-les-Bains au travers de la faille de Pipechat-Chamblon-Chevressy n'a pas abouti à des débits suffisants.

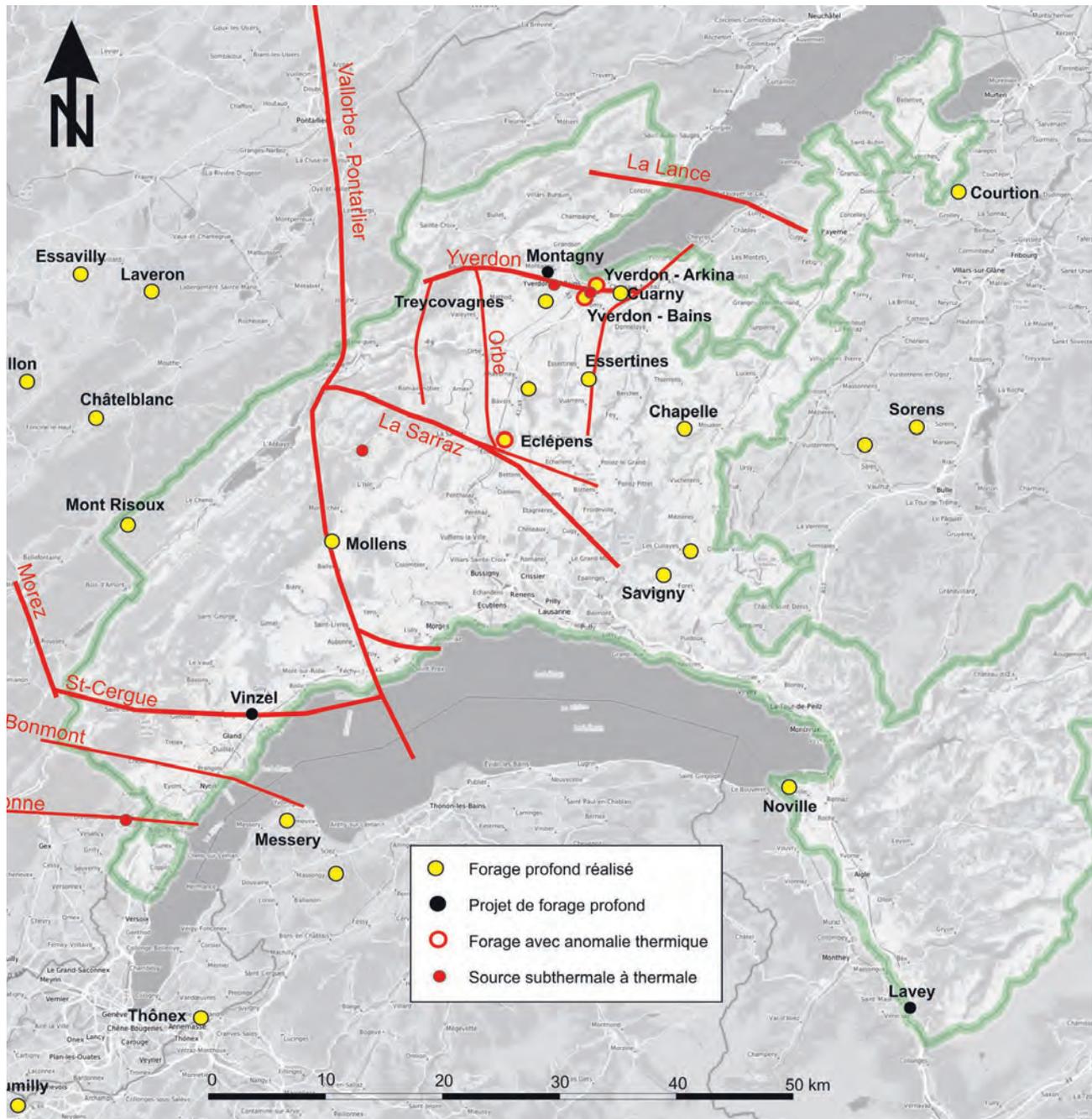


Figure 2. Principaux accidents tectoniques affectant le Mésozoïque de l'Avant-Pays vaudois.

Le Dogger présente d'importantes variations lithologiques paléogéographiques. Connu comme bon aquifère dans le Jura grâce à ses niveaux franchement calcaires, il tend à devenir plus marneux sous le Plateau, ce qui affecte sa productivité.

Les dernières cibles aquifères considérées dans le Mésozoïque sont celles du Muschelkalk (Trias moyen) et du Buntsandstein (Trias inférieur). Ces couches sont profondes, puisque gisant sous l'épaisse série d'évaporites du Trias supérieur. La température y dépasse ainsi 100°C.

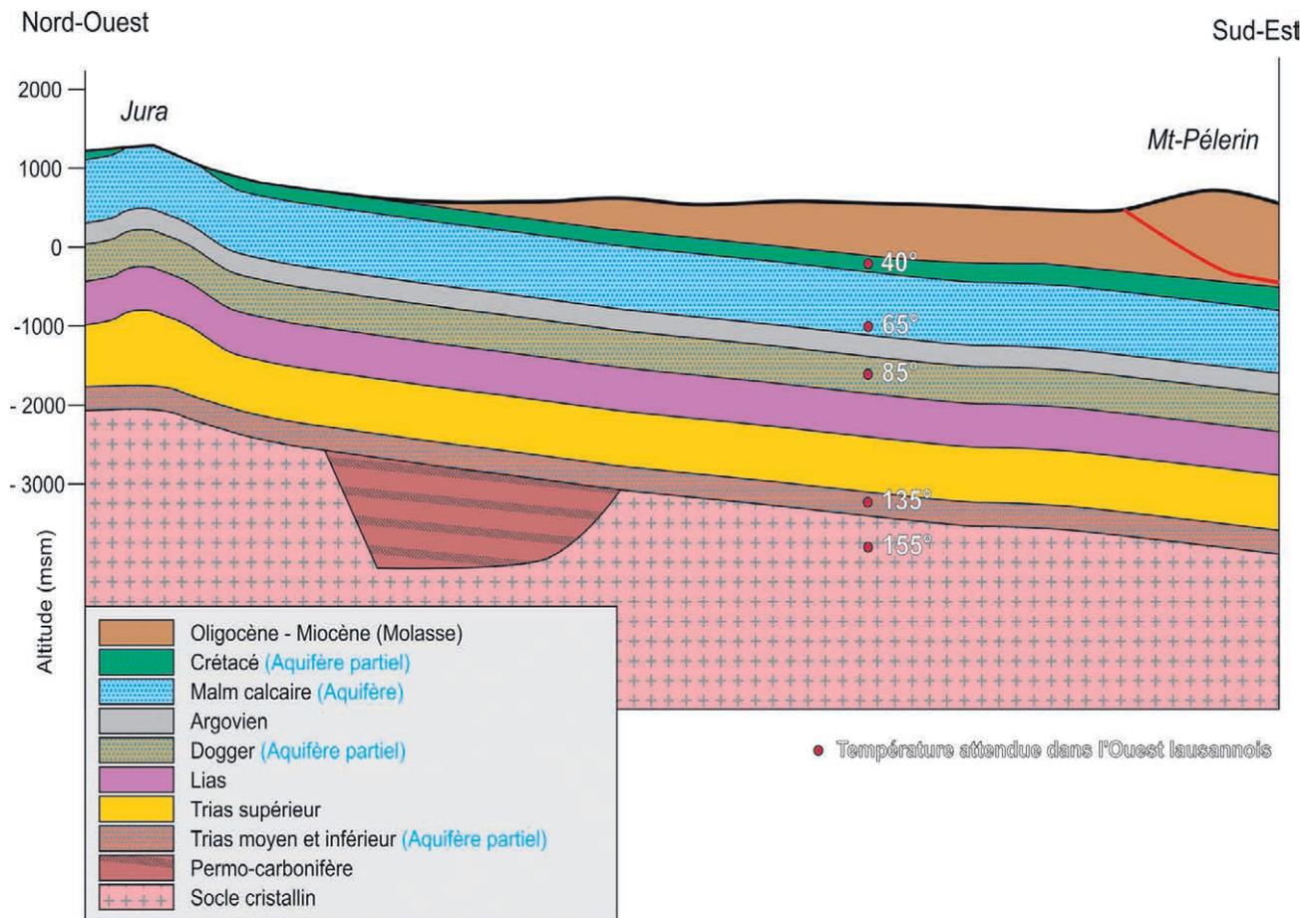


Figure 3. Coupe géologique schématique du Plateau vaudois.

Le Muschelkalk s'est révélé productif à Riehen (Bâle) mais son eau est assez minéralisée. Son potentiel est inconnu dans le Canton de Vaud. La présence de gaz naturel y est possible.

4.3 Permo-Carbonifère

Présent sous-forme d'encaissement (grabens ?) dans le socle cristallin, le Permo-Carbonifère présente surtout de l'intérêt dans sa partie supérieure détritique. On y trouve des conglomérats très durs et des grès quartzeux propices à la fracturation. Contrairement au socle sous-jacent, ces roches présentent l'avantage d'être stratifiées, ce qui les rend un tant soit peu identifiables sur les images de sismique réflexion (méthode d'exploration qui utilise des ondes sismiques pour déterminer la position en profondeur des couches géologiques).

4.4 Socle cristallin

Le socle cristallin est partout présent en profondeur. Généralement très chaud et constitué de roches dures telles que des granites, gneiss et quartzites, ce socle est la cible idéale pour les systèmes géothermiques stimulés et la production d'électricité. Il avait été retenu par le projet Deep Heat Mining conduit par l'OFEN dès 1996. Mais le premier forage réalisé en 2006 à Bâle a été abandonné suite aux séismes engendrés par la stimulation hydraulique.

L'eau des sources thermales de Lavey-les-Bains chemine dans le réseau de fractures naturelles du socle cristallin. Le projet Alpine Geothermal Power Production (AGEPP) vise le même aquifère.



5. Etat des projets dans le canton de Vaud

5.1 Sud-Ouest Lausannois

En 1987 déjà, un projet de géothermie a été conduit dans les communes de Crissier, Ecublens, Bussigny, Chavannes et Renens (Roux et Büchi, 1987). L'étude désignait les cibles du Crétacé et du Malm. Ce projet a fait l'objet d'une expertise rendant attentif au déficit de données sur la fracturation des étages ciblés.

Une suite a été donnée plus récemment à l'instigation de la Commune de Lausanne. La connaissance du sous-sol profond a été améliorée au moyen d'une campagne de sismique réflexion réalisée en 2016. Une importante faille offrant des perspectives intéressantes a ainsi été identifiée.

5.2 AGEPP

Initié en 2005 par un consortium de producteurs et de distributeurs d'énergie, le projet AGEPP a pour objectif de produire de l'électricité et de l'eau chaude en forant un puits profond dévié jusqu'à 2'500 m, voire 3'000 m de profondeur, dans le socle cristallin sous le massif de la Dent de Morcles. Il fait suite à un premier forage réussi réalisé en 1997 avec le soutien de l'Etat de Vaud, qui peut produire constamment 22l/sec à une température de 64°C en tête de puits. Dans ce cas, les gneiss sont suffisamment fracturés par la tectonique alpine pour produire de l'eau sans stimulation hydraulique.

La température attendue en tête de puits pour le projet AGEPP est de 110°C et le débit de 40 l/sec. L'application de la technologie ORC devrait permettre de produire 4.2 GWh électriques et de valoriser ensuite la chaleur résiduelle de l'eau pour chauffer les Bains de Lavey (16 GWh thermiques). Les travaux de perforation ont débuté en janvier 2022.

5.3 ENERGEO

Le projet Energieo est également porté par un groupement de producteurs et de distributeurs d'électricité. Né en 2008, il a pour ambition de produire avec un doublet de l'eau chaude pour satisfaire les besoins des quartiers d'habitation de la région de Gland. La cible est ici le Dogger moyen, à 2'200 m de profondeur, visé à proximité de Vinzel sur le tracé du grand décrochement de St-Cergue. La température attendue est de 80°C, à un débit de 60 l/sec. Une production de 20 GWh thermique est espé-

rée et la première phase de forage est planifiée pour le quatrième trimestre 2022.

5.4 GP Eclépens

Porté par deux grands producteurs alémaniques d'électricité, le projet d'Eclépens visait à produire de l'énergie en ciblant des couches productrices le long du grand décrochement de la Sarraz. Mené jusqu'au stade de la prospection sismique et de l'interprétation géologique, ce projet a été interrompu en 2011 suite à des restrictions budgétaires. Il a récemment été relancé par d'autres investisseurs.

5.5 Yverdon-les-Bains

La Commune d'Yverdon-les-Bains s'est également intéressée à exploiter les ressources géothermiques de son sous-sol. C'est ici la grande faille de Pipechat-Chamblon-Chevressy qui est visée. Des études préliminaires portant sur l'interprétation des lignes sismiques existantes et sur le pronostic lithostratigraphique et hydrogéologique ont été conduites de 2012 à 2014. Le projet est actuellement suspendu.

5.6 Montagny-près-Yverdon

Un autre projet positionné aux environs du même accident tectonique a plus récemment été lancé par la société Malménergie Naturelle SA. Visant l'aquifère du Malm, il est destiné à chauffer des serres. Deux lignes sismiques à haute résolution ont été réalisées en 2019 pour compléter les données existantes de sismique pétrolière. L'exécution du forage est planifiée en 2023.

6. Perspectives

Le sous-sol du canton possède un potentiel important d'énergie naturelle renouvelable. En attendant des résultats probants du projet de système géothermique stimulé de Haute-Sorne (Canton du Jura), les efforts de prospection sont à concentrer sur les aquifères profonds. C'est sous la molasse du Plateau, mais aussi dans la plaine chablaisienne du Rhône, que les perspectives sont les plus intéressantes. Associées à de grandes failles, les couches calcaires du Mésozoïque y constituent des aquifères suffisamment profonds pour fournir de l'eau chaude. Les étages les plus productifs sont ceux du Crétacé et du Malm, situés immédiatement sous les couches grésomarneuses de la molasse. Les couches plus profondes et moins bien connues du Dogger forment une cible pro-

metteuse sur laquelle le Canton de Vaud s'est basé pour établir son Cadastre de géothermie profonde.

Les années 2022 et 2023 seront déterminantes pour l'avenir de la géothermie dans le Canton. Elles verront se concrétiser au moins trois projets visant des cibles lithologiques différentes : le Malm à Montagny, le Dogger à Vinzel et le socle cristallin à Lavey-les-Bains. ■

Robert Arn est géologue.

Gabriele Bianchetti est hydrogéologue, directeur d'Alpgeo Sàrl à Sierre.

Bibliographie

BURGER A. ET GORHAN H. L. (1986) : Rapport NEFF 165 : prospection géothermique le long du pied sud du Jura. Bull. Centre hydrog., Neuch. 6.

BURKHARD M. ET SOMMARUGA A. (1998) : Evolution of the western Swiss Molasse basin : Structural relations with the Alps and the Jura belt. In : Foreland Basins of the Western Alpine Thrust Belts, A. Mascle (ed.), Geol. Soc. Spec. Publ., 134, 279-298.

GEISTER-FRANTZ M. (1987) : Données géothermiques des Aquifères du Dogger au pied sud du Jura suisse. Bull. Centre Hydrog., Neuch. 7.

GORIN G. E., SIGNER C. ET AMBERGER G. (1993) : Structural configuration of the western Swiss Molasse Basin as defined by reflection seismic data. Eclog. geol. Helv., 86/3.

HOMWOOD P., RIGASSI D. & WEIDMANN M. (1988) : Le bassin molassique suisse. In : Livre jubilaire en l'honneur de Madame Y. Gubler. Purser, B. (ed.), Assoc. Sédim. Français, Paris.

JENNY J., BURRI J.-P., MURALT R., PUGIN A., SCHEGG R., UNGEMACH P., VUATAZ F.-D. ET WERNLI R. (1995) : Le forage géothermique de Thônex ; aspects stratigraphiques, tectoniques, diagénétiques, géophysiques et hydrogéologiques. Eclog. geol. Helv., 88/2.

LAVANCHY Y. (1990) : Les circulations d'eau profondes et froides en relation avec un accident majeur du Jura vaudois (Suisse). In : Parriaux A. (ed.) : Mem. 22nd Congr. IAH, Lausanne, part 1, 662-669. EPFL / GEOLEP Lausanne.

ROUX D. ET BÜCHI U.P. (1987) : Avant-projet d'installation-pilote de géothermie SW de Lausanne. Rapport final pour l'OFEN et l'Etat de Vaud, env. 100 pp., inédit.

SIGNER C. ET GORIN G. (1995) : New geological observations between the Jura and the Alps in the Geneva area, as derived from reflection seismic data. Eclogae geol. Helv. 88/2, 235-265.

SOMMARUGA A. (1997) : Geology of the central Jura and the Molasse basin. Mém. Soc. neuch. Sc. nat., 12.

SOMMARUGA A., EICHENBERGER U. ET MARILLIER F. (2012) : Seismic Atlas of Swiss Molasse Basin. Swisstopo.

VOLLMAYR TH. (1983) : Temperaturmessungen in Erdölbohrungen der Schweiz. Bull. Ver. Schweiz., Petroleum-Geol. u. Ing 49.

VUATAZ F.-D., GUSSET R., RODRIGUEZ A. et Schoenborn G. (1999) : Le forage géothermique F5 à Yverdon-les-Bains: rapport final. OFEN.

WILHELM J., BIANCHETTI G. ET VUATAZ F.-D. (2003) : Evaluation du potentiel géothermique du Canton de Vaud. Groupement PGV. Etat de Vaud, DSE, SEVEN.



La sismique réflexion : un précieux patrimoine

par Robin Marchant et David Giorgis

Introduction

Vu sous l'angle des coûts d'acquisition, le patrimoine le plus précieux du Musée cantonal de géologie à Lausanne n'est pas notre rarissime dodo ou le mammoth du Brassus, ni notre grosse pépite d'or des Grisons ou une pierre précieuse, mais notre fonds d'archives pétrolières. Ces archives, liées à la prospection d'hydrocarbures dans notre sous-sol, sont principalement de deux types : les forages et les données géophysiques. Le coût d'un forage est exorbitant et croît de manière exponentielle avec la profondeur. Le dernier en date (2011) et le plus profond du canton (3'535 m), le forage de prospection gazière de Noville, a coûté 36 millions de francs à la société Petrosvibri (24 Heures du 16 avril 2013).

Avant de consacrer de telles sommes à un forage, une compagnie de prospection va tenter d'obtenir autant d'informations que possible sur le sous-sol afin de choisir un site potentiel. C'est dans cette phase qu'intervient la géophysique, une discipline importante des sciences de la Terre qui utilise des techniques de mesures indirectes pour tenter de connaître au mieux la configuration des roches dans le sous-sol. Ainsi, la gravimétrie, qui mesure de manière très précise la pesanteur terrestre, permet de mettre en évidence la présence de roches plus denses ou plus légères, comme par exemple les sédiments post-glaciaires qui remplissent la vallée du Rhône ou le fond du lac Léman (Rosselli et Olivier, 2003). Le géomagnétisme mesure le champ magnétique terrestre et permet de détecter la présence de roches riches en minéraux aimantés, comme un corps encore mystérieux enfoui à quatre kilomètres de profondeur sous le Jorat (Meyer de Stadelhofen et al., 1973). Mais la discipline reine de la géophysique est la sismique réflexion, explicitée ci-dessous et qui est l'objet principal du présent article. Son but est de montrer le grand rôle que cette méthode a joué pour la connaissance de notre sous-sol profond et l'intérêt d'archiver ces données.

La sismique réflexion

La méthode géophysique la plus performante est la sismique réflexion (fig. 1) qui permet une imagerie du sous-sol utilisant une technique très semblable aux échographies pratiquées en médecine. C'est de loin la méthode la plus utilisée pour la prospection pétrolière mais elle est aussi la plus onéreuse (de l'ordre de quelques dizaines voire centaines de milliers de francs par campagne). Développée au début des années 1920, la sismique réflexion implique une importante mise en œuvre sur le terrain, avec toute une équipe de techniciens qui va disposer des géophones le long d'un profil, afin de capter des ondes réfléchies dans le sous-sol. Initialement la source d'ondes était une explosion effectuée au fond d'un forage mais depuis les années 70, ce sont surtout des camions vibrateurs qui sont utilisés pour l'acquisition terrestre et des canons à air comprimé pour l'acquisition marine ou lacustre.

Les enregistrements de terrain (données brutes) ne sont pas directement interprétables et nécessitent tout un traitement afin d'obtenir des images représentatives des différentes couches du sous-sol (données traitées). Ce traitement était réalisé essentiellement de manière graphique et manuelle jusque dans les années 60. Avec le développement de l'informatique dans les années 70, ce traitement est devenu numérique et de plus en plus sophistiqué. Les compagnies pétrolières sont ainsi devenues parmi les plus grands utilisateurs de super-ordinateurs. Les résultats de ces traitements étaient ensuite imprimés sur d'immenses bandes de papier sur lesquelles les géologues reportaient leur interprétation à l'aide de crayons de couleurs. Avec l'avènement des stations de travail dans les années 80, l'interprétation est devenue réalisable directement sur les écrans d'ordinateurs avec les sections sismiques numérisées (généralement dans un format appelé SGY).

L'archivage des données sismiques brutes est important pour pouvoir effectuer un retraitement des sections quand des innovations technologiques permettront

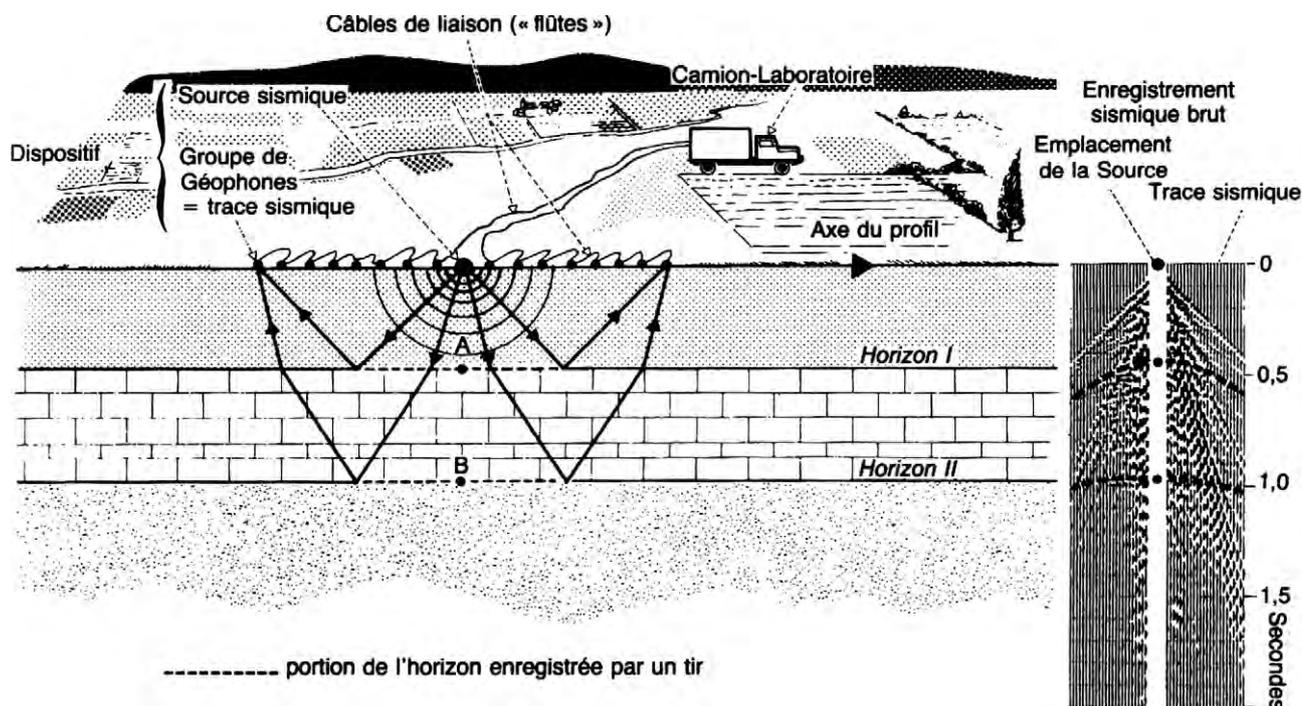


Figure 1. Principe de la sismique réflexion (modifié d'après Métivier 2009). Une source d'ondes, comme des camions vibreurs ou une petite explosion dans un forage, est émise dans le sous-sol. Une partie des ondes sera réfléchiée aux interfaces de roches présentant un contraste de vitesse de propagation. Ces ondes réfléchies seront captées à la surface à l'aide de géophones qui enregistrent la durée de parcours. Les enregistrements bruts doivent ensuite être traités pour établir une image du sous-sol qui soit interprétable.

d'améliorer la qualité des sections. Malheureusement un tel archivage n'est pas systématiquement effectué par les compagnies privées ni par les institutions universitaires. Le Musée cantonal de géologie et la Direction générale de l'environnement (DGE) tentent actuellement de combler cette lacune pour les données vaudoises.

La résolution de l'imagerie sismique dépend étroitement de la source d'ondes utilisée : plus la fréquence est élevée, plus la résolution verticale sera fine. Mais la fréquence des ondes réfléchies s'atténue fortement avec la profondeur. Ainsi, dans le cadre de la sismique pétrolière qui s'intéresse à des cibles situées à quelques kilomètres de profondeur, la résolution verticale est de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Dans le cadre de la sismique à ultra-haute résolution, la résolution verticale peut être inférieure à 10 centimètres mais dans ce cas son pouvoir de pénétration ne dépasse guère quelques dizaines de mètres.

La sismique réflexion en terres vaudoises

D'excellents historiques de la prospection et de l'exploitation d'hydrocarbures vaudois ont été rédigés par Weidmann (1991) et Gisler (2016). Ils présentent en détails les vicissitudes de ces recherches jusqu'en 1935 pour l'article de Weidmann et jusqu'aux alentours des années soixante pour l'article de Gisler. Cette prospection s'est faite par à-coups au gré des enjeux énergétiques et de la conjoncture économique (fig. 2). Entre 1957 et 1965, plusieurs campagnes sismiques effectuées à l'explosif ont été réalisées, ainsi que quatre forages. Une nouvelle vague de prospection sismique effectuée avec des camions vibreurs commence en 1972 suite au choc pétrolier qui a vu flamber le prix du baril de pétrole. La vague retombe en 1990 avec le cours du brut. Entretemps 179 profils ainsi que trois forages ont été effectués. Parmi les compagnies actives à cette période, on retrouve la SADH (Société anonyme des Hydrocarbures), active sur le canton depuis sa création en 1934 et d'autres acteurs comme, par exemple, British Petroleum (BP), Shell ou Petrosvibri SA.

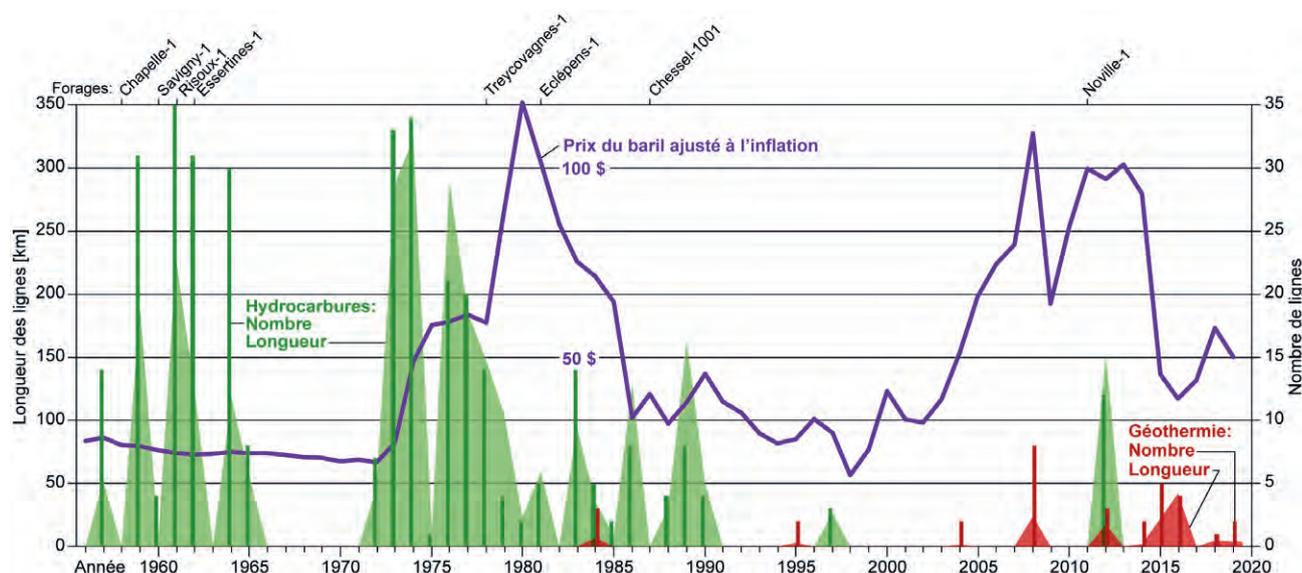


Figure 2. Prospection sismique et forages pétroliers réalisés dans le canton de Vaud depuis 1956. Cette figure illustre entre autres le nombre de lignes sismiques et leur longueur cumulées par année d'acquisition.

La dernière vague de projets de prospection d'hydrocarbures débuta vers 2006 avec une nouvelle flambée du prix du baril. Quatre permis de recherche étaient en vigueur simultanément, couvrant plus de 76 % du territoire vaudois avec, entre autres, la réalisation du forage de Noville en 2011 et une douzaine de profils sismiques. Ce faible nombre de profils est dû au fait qu'au lieu de tirer de nouveaux profils sismiques, les anciennes données ont été réétudiées avec notamment un intérêt pour les hydrocarbures non conventionnels. Mais en 2011, un moratoire sur les gaz de schiste fut promulgué par le gouvernement, qui donna un coup de frein à cet engouement. Finalement, la nouvelle loi sur les ressources naturelles du sous-sol (LRNSS) adoptée en 2018, a mis un terme définitif à toute prospection d'hydrocarbures dans le canton de Vaud (cf. plus bas).

La figure 3 présente les lignes sismiques du canton de Vaud, dont une version numérique existe dans les archives du Musée cantonal de géologie. La densité des lignes sismiques est la plus élevée de Suisse mais la couverture est inégale suivant les régions du canton. Elle est faible dans les régions montagneuses, où, par ailleurs, les structures liées au plissement des couches rendent l'interprétation difficile. Les grands lacs ont une bonne densité de profils à haute résolution mais ceux-ci n'imagent que les couches relativement superficielles. Les profils sismiques de type pétrolier du lac Léman sont le plus

souvent de médiocre qualité, ce qui rend leur interprétation incertaine. Par contre, le Plateau a été la cible principale de la prospection pétrolière : la densité de lignes est élevée et la qualité généralement bonne, sauf pour les profils antérieurs à 1970.

Au total, ce sont plus de 350 profils pétroliers totalisant une longueur de l'ordre de près de 3'000 km qui ont été acquis dans le canton. Sur la base d'un coût actuel d'acquisition et de traitement de 10'000 Fr/km, cela représente un investissement d'environ 30 millions de francs. Quant aux forages pétroliers réalisés, leur coût actuel serait de l'ordre de plusieurs centaines de millions de francs. Ces chiffres soulignent l'importance d'archiver ces précieuses données, dont le canton a pu bénéficier sans bourse délier.

La sismique pétrolière dans le canton de Vaud

Sans la prospection pétrolière, la connaissance de notre sous-sol profond serait dérisoire. Dans les régions montagneuses comme le Jura ou les Alpes, la topographie et l'orientation des couches en surface permet de se faire une idée de la configuration des roches jusqu'à des profondeurs de quelques centaines de mètres et, dans des cas très favorables, de quelques kilomètres. Mais sous le Plateau ou sous les Préalpes, de telles projections sont bien plus hypothétiques. Pourtant ces connaissances

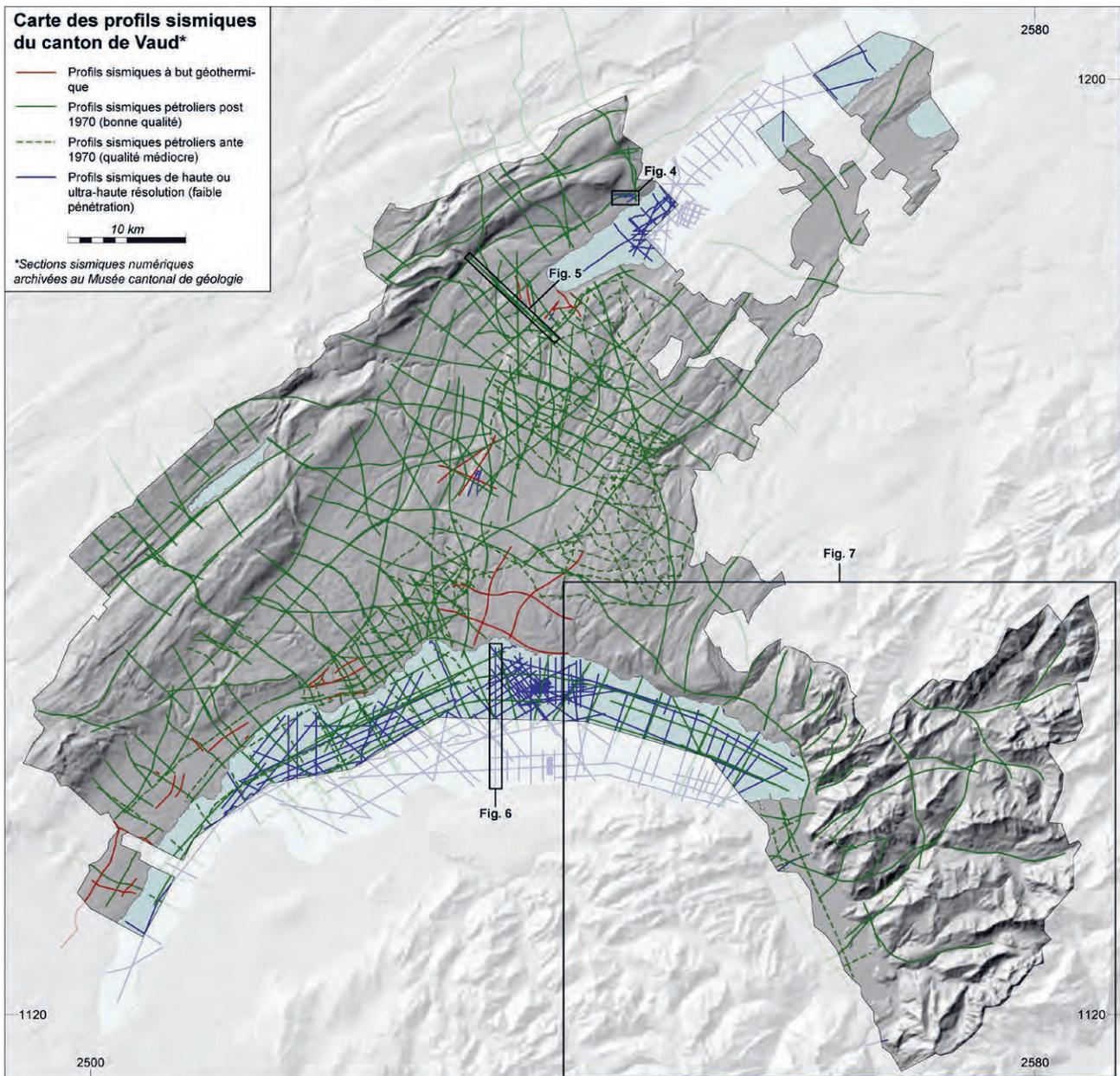


Figure 3. Carte des profils sismiques du canton de Vaud archivés sous format numérique au Musée cantonal de géologie.

sont indispensables, non seulement pour déterminer un éventuel potentiel en réserves d'hydrocarbures mais aussi pour la gestion des eaux souterraines, pour estimer le potentiel de géothermie profonde (Arn et Bianchetti, 2022, ce volume) ainsi que pour la possibilité de stockage de déchets radioactifs ou de CO₂.

Les premiers profils de sismique réflexion effectués dans le canton de Vaud sont ceux de Concise, tirés en 1927 par la société Prospektion de Göttingen, pour la « The Val-de-Travers asphalt paving company limited » de Londres (Weidmann, 1991 ; Archives du MCG). Le but était de détecter la profondeur des calcaires de l'Urgonien susceptibles de contenir de l'asphalte. Comme le montre la figure 4, les résultats de la campagne de 1927 sont tout

à fait fiables en comparaison avec une imagerie récente effectuée par Alleman en 1996. Cette étude à haute résolution apporte plus de détails mais le résultat global concernant la profondeur de l'Urgonien et la présence de failles reste tout à fait comparable. Cela démontre la validité des données sismiques de campagnes anciennes, effectuées avec des méthodes qui aujourd'hui paraissent rudimentaires. Il est donc important d'archiver ces données anciennes, qui peuvent encore apporter des informations utiles.

Dans le même secteur, un profil de prospection pétrolière (fig. 4C) a été acquis en 1972 avec des camions vibreurs. Les paramètres d'acquisition ont été définis pour cibler des couches situées à plusieurs kilomètres de profondeur, couches qui sont ici bien imagées. Par contre, à proximité de la surface, ce type de sismique ne permet pas de distinguer autant de détails que la haute résolution (fig. 4B). Ces deux types de méthodes sont donc très complémentaires.

Un autre exemple de prospection pétrolière est montré sur la figure 5 qui représente une coupe NW-SE passant par la colline de Chamblon à l'est d'Yverdon. La figure 5A représente une projection basée sur la géologie de surface cartographiée en 1927 par Custer. Au-delà de quelques centaines de mètres de profondeur, l'auteur s'est abstenu de poursuivre la coupe en raison de trop grandes incertitudes. La figure 5B montre sur le même tracé une section sismique qui passe à proximité du forage de Trey-covagnes. L'imagerie sismique permet d'identifier les réflecteurs avec une très grande fiabilité grâce aux corrélations avec le forage, jusqu'à des profondeurs supérieures à trois kilomètres. Cette figure illustre à quel point nos connaissances du sous-sol profond seraient restées très superficielles sans les apports de l'exploration d'hydrocarbures.

La sismique académique dans le canton de Vaud

De nombreux profils sismiques ont également été acquis dans le canton de Vaud dans le cadre de recherches universitaires. Il s'agit essentiellement de campagnes à haute ou même ultra-haute résolution, pour la plupart réalisées sur le lac Léman par les universités de Genève et Lausanne (eg. Vernet et Horn, 1971 ; Girardclos, 2001 ; Scheidhauer, 2003 ; Fiore, 2007 ; Dupuy et al., 2014 ; Kremer et al., 2015). Comme le montre la figure 6, de tels profils à haute résolution permettent d'obtenir des

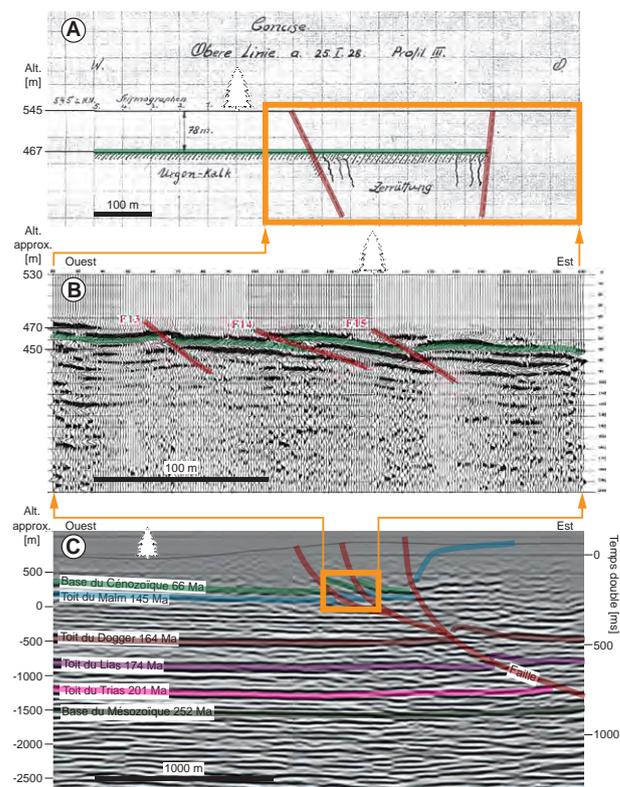


Figure 4. Profils sismiques tirés un peu au Nord de Concise. Pour la localisation, cf. fig. 3. A) Le profil III de la campagne de 1927 dont le traitement des données a été effectué à la main sur du papier millimétré. Cette section met en évidence la présence de calcaires de l'Urgonien (en vert) à une altitude de 467 m sous une couche de molasse épaisse de 78 m ainsi que la présence de failles (en rouge) dans la partie est. B) Profil de sismique réflexion à haute résolution tiré en 1996 le long de la moitié est du profil précédent (Alleman, 1996). Le traitement des données a été effectué à l'ordinateur puis imprimé sur papier. Les secousses enregistrées par les géophones sont représentées sous forme de petites sinusoïdes verticales, mettant en évidence un important réflecteur (le sommet des calcaires de l'Urgonien, en vert) découpé par quelques petites failles (en rouge) à des profondeurs situées entre 450 et 470 m. C) Profil de sismique de prospection pétrolière (partie est de 72-VD-02) tiré en 1972, imageant des couches jusqu'à des profondeurs de plusieurs kilomètres. Les amplitudes des réflexions sont présentées en densité variable (niveaux de gris).

images très détaillées du remplissage glaciaire et post-glaciaire du bassin lémanique. Ils imagent également les premières centaines de mètres du soubassement rocheux, comme les différentes formations molassiques et leurs structures. Outre leurs intérêts académiques, les connaissances ainsi acquises sont utiles pour la gestion

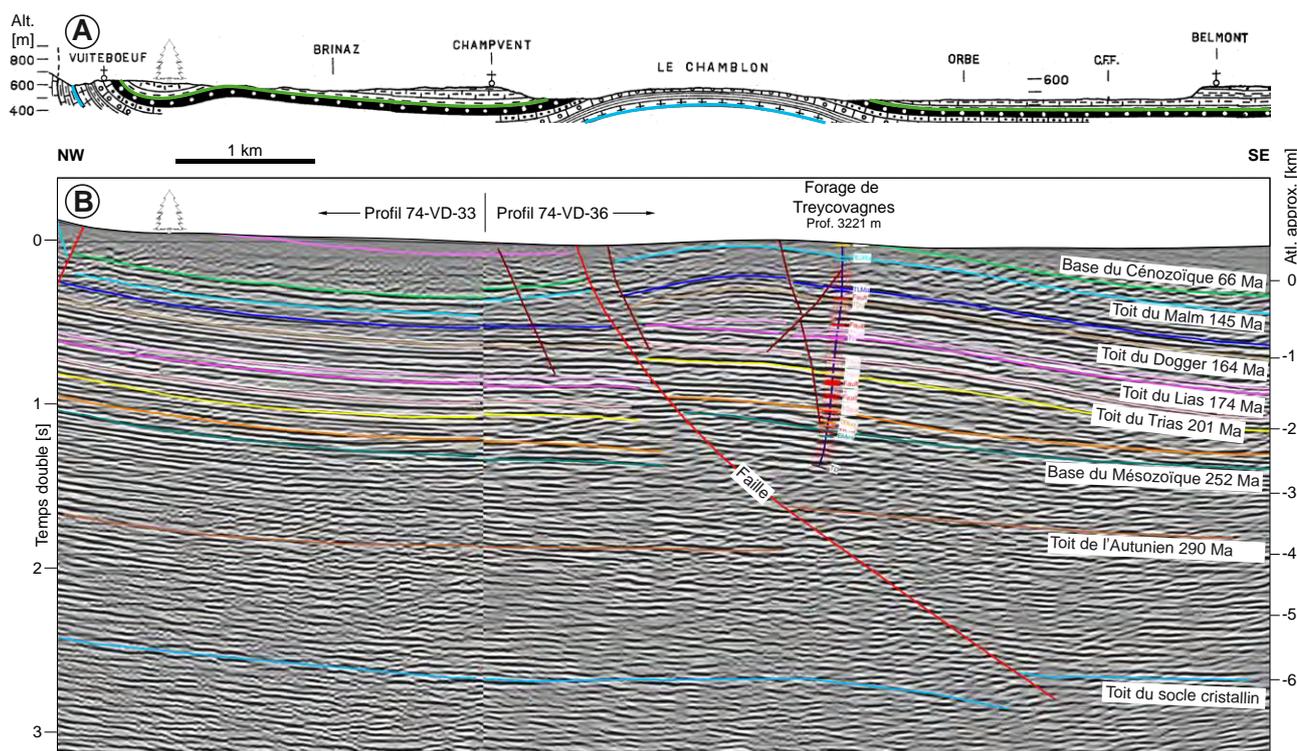


Figure 5. A) Coupe géologique entre Vuitebœuf et Belmont-sur-Yverdon, passant par la colline de Chamblon un peu au sud d'Yverdon. Elle a été établie en 1927 par Custer (1928) sur la base de ses observations de terrain. Ces dernières ne permettent d'extrapoler en profondeur la géologie que sur quelques centaines de mètres. B) Profils sismiques 74-VD-33 & 74-VD-36 situés sur le même tracé que la coupe de Custer. On peut y interpréter les structures géologiques jusqu'à plus de cinq kilomètres de profondeur. De plus, le forage pétrolier de Treycovagnes permet d'identifier avec précision les différents réflecteurs jusqu'à une profondeur de plus de trois kilomètres. Cette figure illustre bien l'apport important de la sismique dans notre connaissance du sous-sol profond. Pour la localisation, cf. fig. 3.

des nappes phréatiques ainsi que pour la géothermie de basse température (chauffage de maisons individuelles).

Il est impossible de passer en revue ici tous les résultats auxquelles ces recherches académiques ont abouti, aussi nous arrêtons-nous sur l'éboulement du Tauredunum. Brièvement mentionné dans deux textes du Haut Moyen-Âge, cet éboulement qui remonte à l'an 563 aurait enseveli le village du Tauredunum dans le Chablais et provoqué une importante inondation à Genève (Schoeneich et al., 2015). Cet événement a pu être étudié en détail grâce à la sismique d'ultra-haute résolution, où des couches de seulement 10 cm d'épaisseur peuvent être distinguées. L'éboulement a déstabilisé les sédiments du delta du Rhône sous la forme d'une avalanche sous-marine (turbidite), qui a provoqué un tsunami avec des vagues de 13 m de haut à Lausanne et de 8 m à Genève, provoquant des dégâts considérables (Kremer et al., 2012).

Sur la figure 4, ces sédiments ont pu être identifiés au centre du Haut-Lac, où ils forment une couche d'environ 5 m d'épaisseur (Kremer et al., 2015). D'autres événements catastrophiques ont pu être identifiés avec cette méthode, comme une autre turbidite liée au fort séisme de la région d'Aigle en 1584.

Une autre étude académique très différente a eu lieu dans le cadre du projet national PNR-20 (Pfiffner et al., 1997) : des profils de sismique réflexion dite profonde, visant à imager les structures alpines jusqu'à la base de la croûte terrestre, soit des profondeurs de l'ordre de 60 km. Deux de ces profils passent à proximité du canton de Vaud, permettant de se faire une bonne idée des structures tectoniques du sud-est du canton jusqu'à des profondeurs de plusieurs dizaines de kilomètres. Ces profils ont nécessité un cortège de cinq camions-vibrateurs et une soixantaine d'hommes pour disposer les géophones sur le terrain. Les

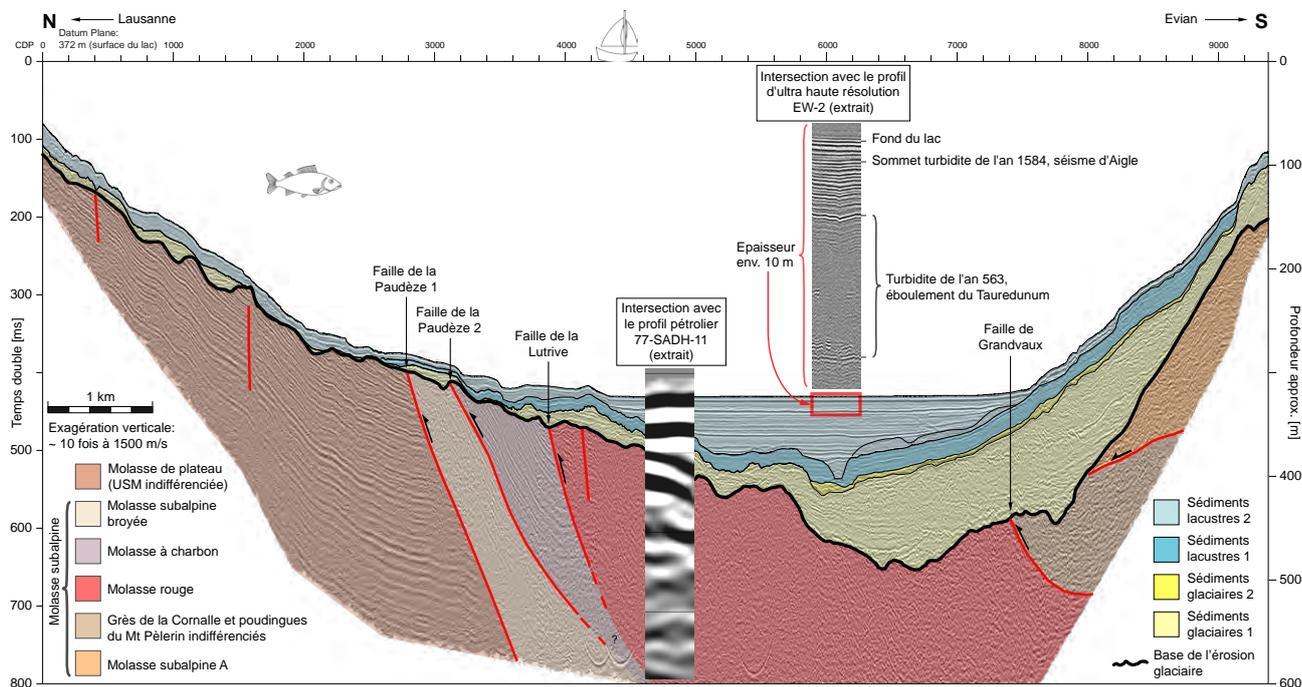


Figure 6. Profil de sismique haute-résolution (EVO) traversant le Grand-Lac entre Lausanne et Evian (modifié de Dupuy 2006). L'échelle verticale est fortement exagérée (10 x) ; pour la localisation, cf. fig. 3. Différents sédiments glaciaires (comme des moraines) et lacustres (comme des turbidites) peuvent être distingués au-dessus de la surface d'érosion du glacier rhodanien, qui occupait le bassin lémanique il y a 20'000 ans. Sous cette surface, on trouve les mêmes failles et formations de molasse que celles qui affleurent dans les coteaux de Lavaux. Un extrait d'une section de sismique pétrolière (77-SADH-11) qui recoupe ce profil est figuré pour montrer la différence de résolution entre ces deux méthodes. Un autre extrait, cette fois de sismique d'ultra-haute résolution, permet de distinguer de très fines couches de sédiments (profil EW-2 de Kremer et al. 2015). Cette section a imagé la turbidite (avalanche sous-marine) de l'an 563 causée par l'éboulement du Tauredunum dans le Chablais.

données ont été traités par l'ETHZ et par l'Université de Lausanne sur le plus puissant ordinateur de l'époque, le CRAY-2 de l'EPFL (Frei et al., 1997).

Vaud, un canton pionnier à plus d'un titre

Le canton de Vaud peut s'enorgueillir d'être un pionnier en Suisse en matière de prospection pétrolière et de gestion de leurs données. Le premier forage pétrolier exécuté en Suisse a été celui de Chavornay en 1912 (Weidmann, 1991) et la première acquisition de sismique réflexion sur le sol helvétique a été effectuée à Concise en 1927 (fig. 4A). C'est aussi dans le canton de Vaud que la prospection d'hydrocarbures se professionnalise avec la création en 1934 de la Société anonyme des hydrocarbures (SAdH) fondée à Lausanne (Weidmann, 1991 ; Gisler, 2016).

Mais c'est surtout par sa législation que le canton de Vaud se démarque avec la promulgation de la loi du 26 novembre 1957 sur les hydrocarbures (LHydr), des décennies avant que d'autres cantons suisses ne lui emboîtent le pas (cf. Giorgis, 2022, ce volume). Deux articles méritent d'être mentionnés ici :

Chapitre II : Du permis de recherches en surface

Art. 16 Obligation de permissionnaires a) Exécution des recherches

[...]. Tous les six mois, le permissionnaire remettra au département un rapport d'activité détaillé avec cartes géologiques et géophysiques, coupes de sondages géologiques et autres documents décrivant le résultat des recherches.

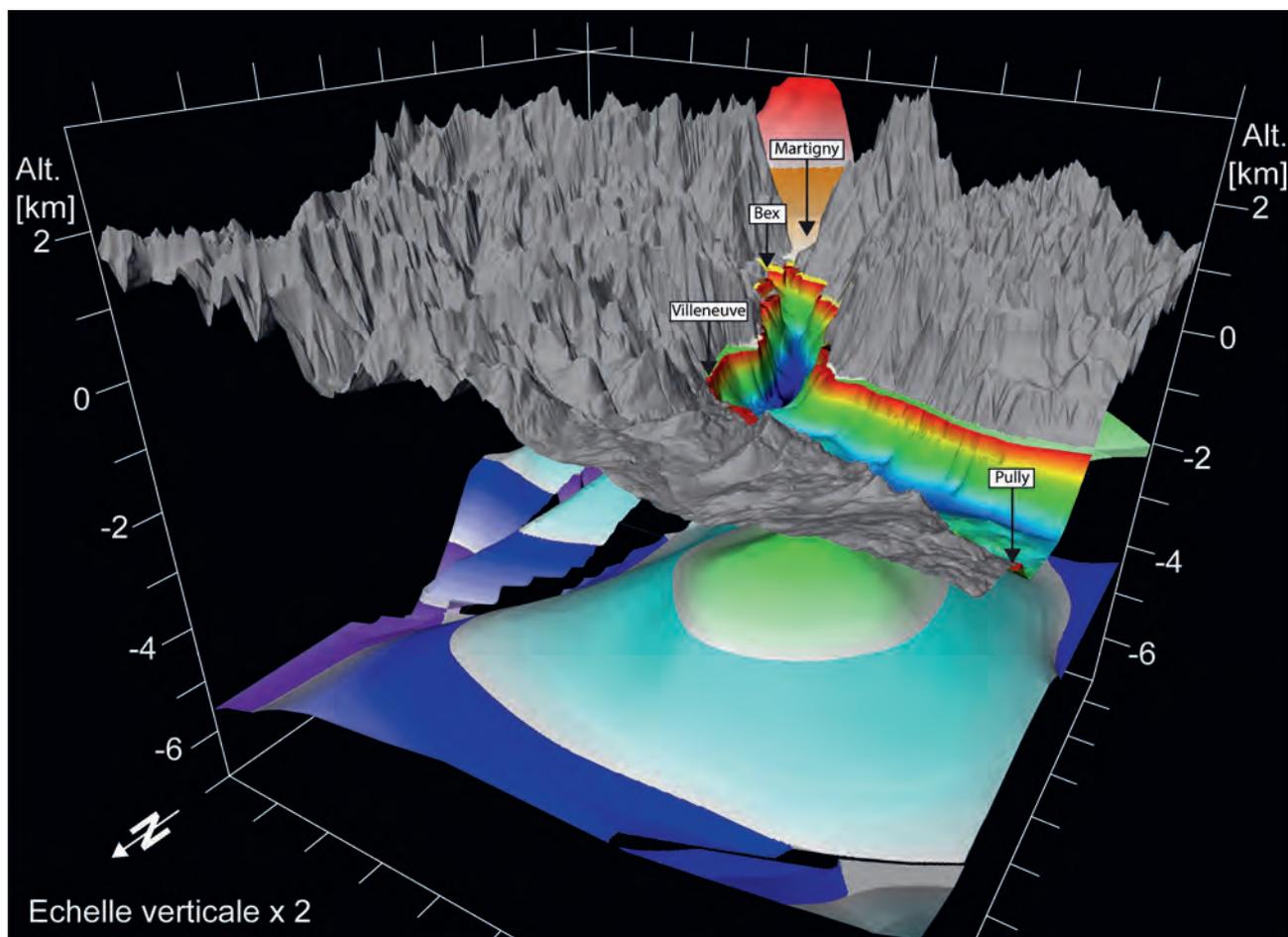


Figure 7. Vue 3D vers le sud-est du canton de Vaud (logiciel IHS-Kingdom). Pour la localisation, cf. fig. 3. La surface grisée représente la topographie avec une forte exagération verticale (x 2). Les couleurs « arc-en-ciel » dans le bassin lémanique et la vallée du Rhône représentent l'altitude du toit du rocher, soit la base de l'érosion glaciaire ; autrement dit, la morphologie du paysage suite à la fonte du glacier rhodanien qui était à son maximum il y a 20'000 ans. Par la suite des sédiments glaciaires (moraines, etc.) et lacustres (alluvions, etc.) ont comblé la vallée du Rhône et une partie du bassin lémanique. Cette morphologie a pu être déterminée principalement sur la base de profils sismiques à haute résolution ainsi que sur quelques profils issus de l'exploration pétrolière. La surface inférieure représente l'altitude de la base des couches du Mésozoïque (ou ère secondaire, -252 millions d'années) basée sur des sections sismiques liées à l'exploration pétrolière ainsi que sur deux profils de sismique profonde. Cette surface forme un vaste dôme sous le Haut-Lac (en turquoise et en vert), puis elle s'enfonce en profondeur vers le sud-est avant d'émerger sur les pentes du Catogne derrière Martigny (en orange et rouge). Cette modélisation a été réalisée au Musée cantonal de géologie dans le but d'évaluer le potentiel géothermique profond de cette région (Projet RCV de la Direction générale de l'environnement).

Ces documents resteront secrets à l'égard du public pendant dix ans, puis ils tomberont dans le domaine public.

Chapitre III : Du permis d'exploration profonde

Art. 29 e) Rapports et renseignements à fournir

A la fin de chaque année, le permissionnaire remettra au département un rapport détaillé sur les recherches effec-

tuées, sur leur résultat et sur son programme de l'année suivante.

Le département pourra exiger du permissionnaire qu'il lui remette des échantillons ou carottes des couches rencontrées en cours de forage.

Les renseignements ainsi fournis par le permissionnaire resteront secrets à l'égard du public jusqu'à l'expiration

définitive du permis, mais au plus pendant dix ans, puis ils tomberont dans le domaine public.

Les derniers alinéas de ces deux articles, qui rendent tous les renseignements et résultats publics après dix ans de confidentialité, sont d'une importance capitale. En l'absence d'une telle loi dans les autres cantons suisses, tous les résultats et les données de prospection pétrolière restent en main des compagnies permissionnaires. Ces dernières monnaient ensuite chèrement l'accès à ces informations et les démarches administratives pour les obtenir peuvent être fastidieuses et ne pas aboutir.

Pour harmoniser et moderniser ce cadre législatif, une nouvelle loi est venue abroger la LHydr (cf. Giorgis, 2022, ce volume). Entrée en vigueur le 1^{er} avril 2019, la loi sur les ressources naturelles du sous-sol (LRNSS) « *a pour but de favoriser une exploitation des ressources du sous-sol rationnelle, économe, durable et respectueuse de l'environnement* » et elle « *régit la recherche en surface et en sous-sol ainsi que l'exploitation des ressources naturelles du sous-sol* » (Art. 1). Son champ d'application est ainsi élargi (non plus limité aux hydrocarbures), permettant entre autres de donner un cadre pour le développement de la géothermie profonde (cf. Arn et Bianchetti, 2022, ce volume). D'ailleurs, cette loi interdit la recherche et l'exploitation des hydrocarbures (Art. 4). Autres innovations, elle prévoit une absence de redevance pour la géothermie profonde, réduit la confidentialité à une durée maximale de cinq ans et renforce le rôle de l'État en matière de récolte et d'archivages des données et informations géologiques.

En rendant les données publiques et en facilitant l'accès à ces données, le canton favorise le développement de projets comme la géothermie ou le stockage de CO₂. Dans le cadre du projet fédéral GeoMol (Swisstopo 2017), le canton avait élaboré un modèle géologique 3D du plateau molassique qui servit à établir une évaluation du potentiel géothermique de cette région (Marchant et Bauer, 2016 ; CSD, 2017). L'essentiel de ces résultats constitue le cadastre de géothermie profonde et figure sur le guichet cartographique cantonal que tout un chacun peut consulter (www.geo.vd.ch ; thème : Géologie) : profondeurs des différentes cibles géothermiques potentielles avec les températures attendues, communes ayant un potentiel géothermique valorisable, profils sismiques interprétés et convertis en profondeur, forages profonds avec leurs fiches techniques et leurs mesures détaillées, ...

En plus des informations consultables sur internet, le canton met à disposition gratuitement des porteurs de projets un vaste dossier contenant des milliers de fichiers : rapports, atlas sismique vaudois, forages, interprétations, ainsi qu'un projet informatique complet utilisable par les spécialistes disposant de logiciels d'interprétation sismique pouvant contenir toutes les données précitées. Les porteurs de projet peuvent ainsi se mettre directement au travail sans avoir besoin de passer des semaines à obtenir les données et à les charger dans un tel logiciel.

Cet ensemble d'informations géophysiques et géothermiques va prochainement être étendu à l'Est du canton avec le projet RCV de la Direction générale de l'environnement (DGE), soit l'évaluation du potentiel géothermique profond exploitable dans les régions de la Riviera et du Chablais vaudois (fig. 7).

Comme mentionné plus haut, l'essentiel de nos connaissances du sous-sol profond du canton provient de la prospection d'hydrocarbures, où des sociétés privées ont investi plusieurs centaines de millions de francs sans pour autant découvrir de gisement exploitable. Cependant, malgré la densité élevée de profils sismiques dont le canton dispose, plusieurs incertitudes sur les structures géologiques profondes demeurent, comme l'extrapolation en profondeur de certaines failles ou la présence de sédiments datant du Permo-Carbonifère (-323 à -252 millions d'années). Ces sédiments peuvent localement être riches en matières organiques et ainsi générer des poches de gaz qui nécessitent des mesures adéquates en cas de forage. Pour tenter de réduire ces incertitudes et les risques associés, la DGE souhaite retraiter certains anciens profils sismiques et en acquérir de nouveaux, d'ampleur régionale, avec des dispositifs permettant d'imager ces structures profondes.

Conclusions

La sismique réflexion a permis de grandement améliorer la connaissance du sous-sol profond du canton grâce principalement à la prospection d'hydrocarbures. Les données publiques et gratuites qu'elle a permis d'obtenir apportent une énorme contribution à la recherche de sites potentiels d'exploitation géothermique ou de stockage de CO₂, ouvrant la perspective d'un développement durable et respectueux de l'environnement pour notre sous-sol. Malgré le point final donné à la recherche d'hydrocarbures dans le canton de Vaud avec l'entrée en vi-



gueur de la LRNSS, la prospection du sous-sol se poursuit et les connaissances continuent à évoluer avec un transfert des efforts allant des hydrocarbures vers la géothermie profonde. ■

Robin Marchant est conservateur de géologie et géophysique au Musée cantonal de géologie à Lausanne.

David Giorgis est responsable du cadastre géologique, Division géologie, sol et déchets (GEODE) à la Direction générale de l'environnement (DGE).

Bibliographie

ALLEMAN G. (1996) : High resolution seismic profiling applied to a heterogeneous area imaging and to cavity detection in Switzerland. Thèse Université de Lausanne.

ARN, R. ET G. BIANCHETTI (2022) : Aperçu de la géothermie profonde dans le canton de Vaud. Documents de l'Association pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud, 15, 75-81.

CSD (2017) : Évaluation du potentiel géothermique exploitable des nappes superficielles et des aquifères de moyenne et grande profondeur dans le canton de Vaud. Rapport VD07037, 77 p.

CUSTER W. (1928) : Etude géologique du Pied du Jura vaudois. Thèse. Mat. pour la Carte géologique de la Suisse, 59/89.

DUPUY D. (2006) : Etude des sédiments quaternaires, de la Molasse et de sa tectonique dans le Grand Lac (Léman) à partir de données sismiques 2D et 3D. Thèse Inst. Géophys. Univ. Lausanne, 253 p.

DUPUY, D., MARILLIER, F., PLANCHEREL, R. ET WEIDMANN, M. (2014) : Analyse structurale de la région lémanique basée sur la sismique réflexion dans le Léman (Grand Lac et Haut Lac) et la géologie des rives nord et sud. Matér. carte géol. suisse [n.s.] 170, 49 p.

FIORE, J. (2007) : Quaternary Subglacial Processes in Switzerland : Geomorphology of the Plateau and Seismic Stratigraphy of Western Lake Geneva. In : Terre et Envi-

ronnement, vol. 69. Université de Genève, Switzerland, 169 p.

FREI, W., LEVATO, L. ET VALASEK P. (1997) : Processing of seismic reflection data. In : Pfiffner O.A. et al. (1997) : Deep structure of the Swiss Alps - Results from NRP 20. Birkhäuser Verlag Basel, 15-21.

GIORGIS, D. (2022) : La connaissance du sous-sol, une « ressource » stratégique. Documents de l'Association pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud, 15, 153-156.

GIRARDCLOS, S. (2001) : Sismostratigraphie et structure sédimentaire en 3D d'un bassin lacustre, du retrait glaciaire à nos jours (Lac Léman, Suisse). In : Terre et Environnement (Section des Sciences de la Terre, Uni. Genève) 33, 196 p.

GISLER, M. (2016) : Exploration pétrolière précoce dans le canton de Vaud, entre œuvre pionnière et interdépendance industrielle (1910-1960). Revue historique vaudoise 124, 129-147.

KREMER, K., SIMPSON, G. ET GIRARDCLOS, S., (2012) : Giant Lake Geneva tsunami in AD 563. Nature Geoscience 5, 756-757.

KREMER, K., CORELLA, J.-P., ADATTE, T., GARNIER, E., ZENHÄUSERN ET G., GIRARDCLOS, S., (2015) : Origin of turbidites in deep Lake Geneva (France-Switzerland) in the last 1500 years. J. Sediment. Research 85, 1455-1465.

MARCHANT, R. ET BAUER, R. (2016) : GeoMol-Vaud final report. Rapport inédit, Archives Musée cantonal de géologie, Lausanne, 79 p.

MÉTIVIER, L. (2009) : Une méthode d'inversion non linéaire pour l'imagerie sismique haute résolution. Thèse Université de Paris XIII. 270 p.

MEYER DE STADELHOFEN, C., SIGRIST, W. ET DONZÉ, A. (1973) : L'anomalie magnétique du Jorat. Bull. soc. vaud. sc. nat. 71, 365-372.

PIFFNER, O. A., LEHNER, P., HEITZMANN, P., MUELLER, ST. ET STECK, A. (1997) : Deep structure of the Swiss Alps - Results from NRP 20. Birkhäuser Verlag Basel, 380 p.



ROSSELLI, A. ET OLIVIER, R. (2003) : Modélisation gravimétrique 2.5D et cartes des isohypses au 1: 100'000 du substratum rocheux de la Vallée du Rhône entre Villeneuve et Brig (Suisse). *Eclogae geol. Helv.* 96, 399-423.

SCHEIDHAUER, M. (2003) : Development of a 3-D very high resolution seismic reflection system for lacustrine settings. A case study over a thrust fault zone in Lake Geneva. Thèse Inst. Géophys. Univ. Lausanne, 287 p.

SCHOENEICH, PH., WEIDMANN M. ET BLOMJOUS, C. (2015) : L'écroulement du Tauredunum en 563 apr. J.-C. : une

énigme historique, toponymique et géologique. *Cahiers de Vallesia* 29, pp. 153-174.

VERNET J.-P. ET HORN, R. (1971) : Études sédimentologique et structurale de la partie occidentale du lac Léman par la méthode sismique à réflexion continue. *Eclogae geol. Helv.* 64 / 2, 291–317.

WEIDMANN, M. (1991) : Histoire de la prospection et de l'exploitation des hydrocarbures en Pays vaudois. *Bull. soc. vaud. sc. nat.* 80/4, 365-402.



L'argile, une substance extraordinaire et omniprésente

par Thomas Mumenthaler

Introduction

Dès la nuit des temps, alors que l'homme essayait péniblement de se dégager d'un environnement menaçant mais aux ressources infinies, l'argile est devenue peu à peu un matériau indispensable au développement de l'humanité. Substance partout présente dans les sols, malléable à l'état humide donc permettant la création de formes les plus diverses, solide mais encore fragile à l'état sec, d'une résistance et d'une durabilité tout à fait remarquables à l'état cuit, c'est le matériau phare de l'*Homo sapiens* et des premières civilisations. C'est à travers l'argile que le génie de l'homme s'est pleinement exprimé et nous restons confondus encore aujourd'hui devant la perfection et la beauté des objets en terre cuite des anciennes civilisations chinoises ou précolombiennes, par exemple.

Parallèlement aux objets utilitaires ou rituels, l'homme a développé à partir de sols argileux toute une technique de fabrication de briques, éléments de construction tout d'abord renforcés de fibres végétales et simplement séchés, puis, avec le développement de fours de plus en plus grands, cuits à des températures avoisinant les 1000°C. Ainsi furent inventés, quelques millénaires avant J.-C., les premiers matériaux composites et la préfabrication ! Aujourd'hui, ces principes de fabrication n'ont pas fondamentalement changé mais les outils de production de plus en plus performants ont permis une explosion de la productivité et de la palette des produits. Curieusement, avec les préoccupations environnementales actuelles, une ancienne technique redevient d'actualité, celle de la fabrication de briques en terre crue, production décentralisée et peu gourmande en énergie mais demandant des techniques de construction alternatives que l'homme moderne a de la peine à accepter.

Des secrets bien gardés

Jusqu'au début du XX^e siècle, les scientifiques considéraient l'argile comme une substance amorphe. Ce n'est qu'avec l'avènement des rayons X et la possibilité d'ex-

plorer les structures cristallines les plus fines que la vraie nature de l'argile s'est révélée : ce n'était pas une substance mal définie mais une véritable famille, aux propriétés physico-chimiques semblables mais présentant des variations considérables. L'étude des minéraux argileux a alors connu un développement fulgurant, à la mesure de leur importance pratique et scientifique. Les représentants les plus connus de ce groupe d'alumino-silicates hydratés, dont la taille des particules en feuillets se situe en dessous de 0.002 mm, sont la kaolinite, l'illite, la chlorite et la montmorillonite. Les figures 1 et 2 montrent d'une part les structures cristallines de ces types de minéraux argileux et d'autre part certaines de leurs propriétés. A remarquer la différence de surface spécifique entre la kaolinite (1-40 m²/g) et la montmorillonite (600-800 m²/g) montrant une corrélation positive avec leur capacité d'échange d'ions. Ces différences s'expliquent par la différence de taille des particules et surtout par leur structure cristalline ; ainsi la kaolinite, minéral argileux relativement grossier et stable, se distingue nettement de la montmorillonite, à particules nettement plus fines, capable d'intégrer de manière réversible des molécules d'eau dans sa structure cristalline, une propriété qui en fait une argile dite « gonflante ».

L'importance des minéraux argileux dans les sols est unanimement reconnue et c'est à juste titre que H. Deuel (1916-1962), professeur à l'Institut d'Agrochimie de l'Ecole polytechnique de Zurich, a donné à l'argile le qualificatif imagé de « protoplasme du sol ». L'affinité des minéraux argileux avec la matière organique est élevée et se traduit par la formation de complexes argilo-humiques, éléments stabilisateurs du sol. Certains chercheurs vont jusqu'à émettre l'hypothèse que les minéraux argileux ont été à l'origine de l'apparition des premiers composés organiques sur notre Terre ! Encore un secret sur l'origine de la vie qu'il sera difficile de déchiffrer.

Un autre secret, beaucoup plus concret celui-là, a été pendant longtemps la formule de fabrication de « l'or blanc », la porcelaine fine, que les marchands venus de Chine

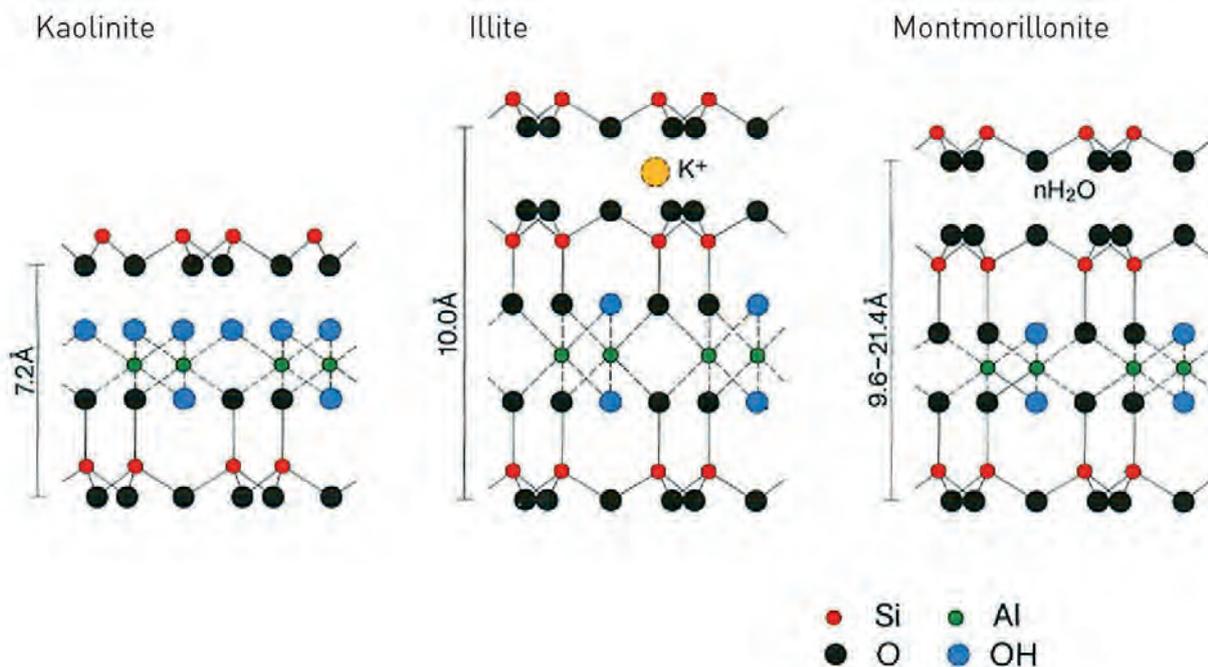


Figure 1. Structure cristalline de quelques minéraux argileux.

Minéral argileux	Diamètre des particules en nm (10^{-9} m)	Surface spécifique (m^2/g)	Capacité d'échange d'ions (mval/100g)*
Kaolinite	100 - 5'000	1 - 40	3 - 15
Illite	100 - 5'000	50 - 200	20 - 50
Montmorillonite	30 - 300	600 - 800	70 - 130

*Quantité d'ions échangeables en milliéquivalents par 100 g de substance

Figure 2. Surface spécifique et capacité d'échange d'ions de quelques minéraux argileux.

vendaient à prix d'or à toutes les cours d'Europe. Celles-ci essayaient frénétiquement de percer ce secret que les Chinois gardaient jalousement : c'était le temps des alchimistes du XVII^e siècle où l'obsession de changer le plomb en or stimulait tout un foisonnement de recherches en laboratoire. Finalement, ce fut à la cour du roi de Saxe Auguste le Fort que J.F. Böttger et E.W. von Tschirnhaus trouvèrent en 1708 la formule de la première porcelaine européenne basée sur l'emploi de kaolinite blanche, donc très pauvre en fer, associée à des proportions bien définies de quartz et de feldspath. Et c'est aussi en Saxe, à Meissen, que la première manufacture de porcelaine européenne a vu le jour, marquant le début d'une indus-

trie florissante dans toute l'Europe, avec l'établissement d'autres manufactures renommées et la découverte de gisements de kaolin de très bonne qualité, que les Anglais nommeront « China Clay ». Dans le canton de Vaud, Nyon a connu une brève période de célébrité (1781-1813) pour sa production de porcelaine. Les produits de la manufacture de cette ville sont rares et très recherchés. A noter qu'il n'existe aucun gisement de kaolin pur en Suisse.

La fabrication de tuiles et briques sur sol vaudois

Avec des hauts et des bas, la terre cuite a fidèlement accompagné le développement du Pays de Vaud. Nous distinguerons cinq phases successives :

- La période gallo-romaine dans les premiers siècles après J.-C., pendant laquelle la technique et la diversité des produits en terre cuite atteint un premier sommet.
- De la chute de l'Empire romain à l'aube du second millénaire, période peu documentée où la terre cuite ne joue pratiquement plus aucun rôle.
- Renaissance de la terre cuite sous l'impulsion des ordres monastiques et la fondation des premières villes au début du second millénaire.
- Accélération de la production de terre cuite lors de la révolution industrielle dès le milieu du XIX^e siècle avec de très nombreux sites de production.
- Dès les années 1950, rationalisation et automatisation des productions. Concentration de la production dans quelques sites.

Lors de la période gallo-romaine, le Pays de Vaud constituait le centre de l'Helvétie, entité dépendant directement de Rome, avec Avenches comme capitale. Les fouilles y ont mis au jour les fondements d'un four pour terre cuite d'une certaine importance (fig. 3).

Les débris de terre cuite sont omniprésents dans cette cité. Citons les tuiles plates (*tegula*) avec les éléments coniques recouvrant les joints de 2 tuiles adjacentes (*imbrex*), divers types de briques, des conduits de chauffage, des tuyaux de conduite d'eau et des carreaux pour le sol (fig. 4). Toute cette production est probablement locale et la matière première devait certainement se trouver à proximité (produits argileux et sableux, très souvent décalcifiés, provenant de la décomposition de la molasse). La chute de l'Empire romain marque la fin abrupte de la production de terre cuite pour près d'un millénaire. Les conquérants venus du Nord, guerriers, aventuriers, de nature plutôt nomade, n'avaient aucun intérêt pour



Figure 3. Avenches, En Chaplix. Restes d'un four romain pour terre cuite, datant probablement du deuxième siècle après J.-C. Photographie Archéodunum, Gollion.



Figure 4. Produits en terre cuite romains provenant d'Avenches (I^{er}/II^e siècles après J.-C.). Photographie Musée romain d'Avenches.

les habitations des gallo-romains sédentaires. Pendant toute cette période, pas de grands monuments, pas de grandes cités, toutes les habitations sont en bois, donc éphémères.

Le début du second millénaire voit l'émergence des ordres monastiques et de cités qui, peu à peu, se libèrent de la lourde tutelle des seigneurs. Par leur côté excessif dû au fanatisme religieux, les Croisades bouleversent l'ordre établi mais, par les confrontations et les contacts avec le monde arabo-musulman, permettent un renouveau des connaissances. C'est dans ce contexte que la terre cuite fait sa réapparition et prend de l'importance au fur et à mesure du développement des villes. La densification de l'habitat dans les localités, alors essentiellement construites en bois, provoque des incendies gigantesques et catastrophiques, ce qui mène les autorités à édicter des lois faisant obligation de construire « en dur » ; les murs en briques et les toits de tuiles se font alors de plus en plus fréquents. Parmi les bâtiments de plus grande im-

portance construits en briques, il faut signaler le château Saint-Maire à Lausanne et celui de Vufflens-le-Château (fig. 5), érigés à peu près à la même époque (XIV^e-XV^e siècles).

Au cours des siècles qui suivent et jusqu'au début de l'industrialisation, la production de briques et tuiles est décentralisée et essentiellement artisanale, le plus souvent liée à des gisements d'argile locaux ; elle constitue souvent une activité complémentaire des paysans. Certaines de ces petites productions ont même subsisté jusqu'au début du XX^e siècle, comme le témoigne C.-F. Ramuz dans *Découverte du monde* : « Il y avait tout à côté la forêt de Rovéréaz. Mais surtout il y avait la tuilière (nous disons tuilière et non tuilerie) qui était en pleine activité et où on fabriquait encore en abondance, non pas tellement des tuiles, malgré son nom, que des briques, de celles qui servent à construire les murs ».

Dès le milieu du XIX^e siècle, la machine à vapeur révolutionne les moyens de production et de véritables

fabriques voient le jour, supplantant peu à peu les productions artisanales. Face à des investissements élevés, la nécessité se fait sentir de disposer de réserves en matières premières abondantes et de bonne qualité : ce sera le début de la prospection et de l'analyse des matériaux argileux en Suisse. Cet effort est documenté par la publication en 1907 d'un ouvrage très complet sur les sites de production de terre cuite de Suisse et sur leurs exploitations d'argile ainsi que sur les compositions chimiques et les propriétés technologiques des matières premières (Letsch et al., 1907). Nous apprenons ainsi, que 27 points de production d'une certaine importance existent sur sol vaudois. Les matières premières sont essentiellement locales et les exploitations se limitent à des formations argileuses superficielles (molasse marneuse remaniée et en partie décalcifiée, argiles varvées quaternaires, argiles fluviales récentes).

La période actuelle débute dès la fin de la Seconde Guerre mondiale. Elle est caractérisée par une rationalisation progressive de la production avec l'introduction des ordinateurs et de la robotique, amenant ainsi une réduction significative du personnel. L'épuisement des gisements d'argile superficiels a conduit les entreprises à exploiter directement les dépôts molassiques les plus riches en couches argileuses et marneuses. L'exploitation ne se fait plus en continu mais généralement au cours d'une campagne annuelle effectuée par une entreprise spécialisée, disposant d'un parc de machines de chantier performantes. Ainsi sont constitués des dépôts de matière première homogène et de composition optimale pour la production de produits de qualité voulue. Il va sans dire que ce genre d'exploitation nécessite une connaissance approfondie du gisement avec, si possible, des analyses granulométriques et minéralogiques des différentes couches de marne, argile et grès.



Figure 5. Le château de Vufflens, magnifique exemple d'architecture militaire en briques d'inspiration lombarde, dresse son imposante silhouette dans l'arrière-pays de Morges. La couleur claire des briques donne à penser que leur fabrication s'est faite à partir d'argiles relativement riches en calcaire, probablement d'origine locale. Photographie Th. Mumenthaler.



Quand la minéralogie détermine la couleur des produits en terre cuite

Concernant la couleur, les produits en terre cuite peuvent se diviser en 3 groupes :

- Produits non modifiés, la couleur du tesson dépend directement de la composition du mélange de matière première. C'est le cas des briques non apparentes et de tuiles non engobées, rustiques et le plus souvent destinées à la rénovation de monuments historiques.
- Produits colorés dans la masse au moyen d'ajouts minéraux (le plus souvent ce sont des oxydes de fer et de manganèse). Ces ajouts permettent d'offrir une palette plus importante de couleurs à partir d'un seul mélange de base (briques apparentes et tuiles non engobées).
- Tuiles engobées, c'est-à-dire pourvues à la surface visible d'une très mince couche d'enduit céramique, le plus souvent mat. Ce procédé permet lui aussi de pro-

duire toute une palette de couleurs sur un tesson de base éprouvé et résistant au gel.

La couleur du tesson de base est avant tout dépendante de la composition minéralogique du mélange de matières premières et joue un grand rôle dans les tuiles plates couvrant les monuments anciens. En règle générale, plus un mélange est riche en carbonates (calcaire) plus la terre cuite qui en découle aura une couleur claire. Ainsi, un mélange dépourvu de calcaire ou avec un pourcentage de calcaire très bas donnera des produits rouges à rouge-brun, 20 % de calcaire donnera des teintes saumonées et 40 % un jaune clair. L'explication de ce phénomène est à chercher dans les réactions qui se produisent lors de la cuisson. Dans le mélange avec très peu ou pas de calcaire, les hydroxydes de fer se transforment en hématite (Fe_2O_3) responsable de la coloration rouge. La situation est tout autre lorsque la masse contient du calcaire : ce dernier perd tout d'abord son CO_2 entre 700° et 900°C, le CaO (+MgO) qui en découle va avoir tendance à migrer



Figure 6. Carrière de Bois-Genoud à Crissier. La succession des couches de marnes, grès et argiles y est bien visible à l'arrière-plan, avec en premier plan les différentes surfaces d'eau, plus ou moins colonisées par la végétation. Photographie Th. Mumenthaler.

et à se combiner aux silicates, en particulier aux minéraux argileux, en donnant de nouveaux minéraux comme la géhlénite ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_7$), la wollastonite (CaSiO_3) ou l'anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Tous ces minéraux peuvent intégrer le fer dans leur réseau cristallin et empêcher ainsi la formation d'hématite. Cette décoloration du tesson est cependant sujette à des variations considérables, en fonction de la finesse du calcaire (à noter ici que le calcaire grossier - grains au-dessus de 0.5 mm - ne réagit que peu avec les silicates et provoque un défaut nommé « éclat de chaux » à la surface du produit) et surtout de l'atmosphère de cuisson (plus ou moins oxydante, présence d'halogènes comme le chlore et le fluor). En général, plus l'atmosphère est confinée, donc pauvre en oxygène et riche en halogènes, plus la réaction CaO/silicates et la décoloration sont intenses. Ces conditions de cuisson étaient réunies dans les fours anciens, les courants faibles et irréguliers donnant un aspect flammé aux tuiles, conditions beaucoup plus difficiles à réaliser dans le four-tunnel moderne.

Les marnières, fenêtres sur le passé géologique et biotopes d'importance nationale

Les exploitations de matière première, et en particulier les marnières, sont souvent perçues par le grand public comme des atteintes au paysage. La réalité est bien plus complexe et autant les pouvoirs publics que les organisations de protection de l'environnement leurs reconnaissent de plus en plus des fonctions importantes, ceci en plus de leur valeur économique. Ainsi, ces exploitations ont souvent pris place dans la liste des géotopes et dans l'inventaire national des places de reproduction des batraciens à protéger.

Grâce à ces excavations, le géologue a la possibilité d'étudier des séquences continues de couches, qui, à cause de leur friabilité, ne sont que rarement visibles en surface. Un bon exemple est fourni par la carrière de Bois-Genoud à Crissier (fig. 6) qui alimente en matière première la briqueterie du même nom (Tuileries de Fribourg et Lausanne SA).

Grâce à ses trouvailles paléontologiques, le géologue Marc Weidmann a pu dater cette molasse d'eau douce inférieure (âge environ 22-24 millions d'années, Aquitaniens moyen) et un groupe de chercheurs y a décrit un niveau de bentonite, une argile gris-clair essentiellement constituée de smectite/montmorillonite (fig. 7). La présence de

cette argile est remarquable, car elle est rare. C'est la plus ancienne de Suisse et sa charge en cations échangeables est essentiellement constituée de sodium (Na) et non pas de calcium (Ca), comme c'est le cas pour toutes les autres bentonites suisses. La bentonite étant le résultat de la décomposition en milieu aqueux de cendres volcaniques, la question de l'emplacement du volcan s'est posée et n'a malheureusement pas trouvé de réponse. Encore un mystère !

Les marnières présentent généralement une diversité biologique bien supérieure à celle du paysage qui les entoure. Ceci est dû au puzzle de niches écologiques constitué par la juxtaposition de milieux humides, de parties chaudes et sèches dénuées de végétation et de terrains où se déploie toute une association de plantes pionnières. En fait, ces exploitations en continuels changements favorisent la flore et la faune pionnières, dont les représentants sont particulièrement menacés dans l'environnement surexploité du Plateau suisse. Les plaines inondables d'antan ont disparu et avec elles les milieux favorables à ces espèces. La dynamique des exploitations de matières premières offre donc une alternative, certes modeste, à la disparition de ces zones. A l'heure actuelle, la planification à long terme des zones d'exploitation demandée par l'Etat tient compte des intérêts de chacun et garantit la conservation partielle des zones humides favo-



Figure 7. Bentonite de Bois-Genoud. A noter la désagrégation de la bentonite en petits éléments d'environ 1 cm, à surface lisse conchoïdale suite à son séchage, conséquence d'un très important retrait au séchage. Photographie Th. Mumenthaler.



rables aux batraciens, même à la fin de l'exploitation. A ce moment-là, ce seront les organisations écologiques qui seront les mieux placées pour préserver la dynamique de ces zones, en intervenant régulièrement afin d'éviter un reboisement naturel qui aurait pour conséquence la disparition des biotopes favorables aux batraciens. ■

Thomas Mumenthaler, géologue, est ancien responsable qualité et matières premières dans l'Industrie de la Terre cuite à Zürich.

Bibliographie

KÜNDIG, R., MUMENTHALER, TH., ECKHARDT, P., KEUSEN, H. R., SCHINDLER, C., HOFMANN, F., VOGLER, R. ET GUNT-
LI, P. (1997) : Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz. Schweizerische Geotechnische Kommission.

LETSCH E., ZSCHOKKE, B., ROLLIER, L. ET MOSER, R. (1907) : Die schweizerischen Tonlager. Beiträge zur Geologie der Schweiz, geotechnische Serie 4.

MATILE, CH. ET WEIDMANN, D. (1978) : Tuiles anciennes du Pays de Vaud, Chantier 4.

MEYER-FREULER, Ch. (2009) : Das römische Ziegelwesen in der Schweiz – Neue Forschungen. Ziegelei-Museum, 26. Bericht der Stiftung Ziegelei-Museum Cham.

MUMENTHALER, Th., PETERS, Tj. ET WEIDMANN, M. (1981) : Niveau de bentonite dans la Molasse grise de Lausanne. Eclogae geol. Helv. 73/3, 639-650.

MUMENTHALER TH., SCHMITT, H. W., PETERS, Tj., RAMSEYER, K. ET ZWEILI, F. (1995) : Verfolgung der Reaktionsvorgänge beim Brennen von karbonathaltigen Ziegelmischungen mit Hilfe der Kathodenlumineszenz. Ziegelindustrie International, 5/95.

RIEBEN, H. ET AL. (1972) : Encyclopédie illustrée du Pays de Vaud, vol 3 : Les artisans de la prospérité.

Le charbon vaudois

par Marc Weidmann et Nicolas Meisser

Généralités

Le canton de Vaud ne manque pas de gisements de combustibles solides (anthracite, lignite, tourbe) qui furent exploités avec plus ou moins de succès, de profits et de continuité, dès le XVIII^e siècle et jusqu'au milieu du XX^e (fig. 1). L'histoire de ces exploitations et le cadre géologique des gisements ont été présentés à maintes reprises ; citons les synthèses de Früh et Schröter (1904), Wehrli (1919), Fehlmann (1919, 1947), Jeannet (1923), Raymond (1940), Kündig et de Quervain (1953), Morel (1979), Kündig (2005). L'histoire économique et sociale a été moins abordée et fut traitée plus particulièrement par Givel (1945), Pelet (1962, 1970, 1981), Buffat (1976), Cantini (1983 a, 2016) et surtout par Claude (1974), dont la thèse demeure indispensable.

Ces gisements seront visités en suivant leur âge géologique, du plus ancien au plus récent.

Pays-d'Enhaut (Nappe des Préalpes médianes)

La présence du charbon au Pays-d'Enhaut ne fut publiée qu'au début du XIX^e siècle (Bridel, 1807), mais des gisements étaient connus de longue date et avaient fait l'objet de quelques grattages par les forgerons locaux. Deux sites ont été plus particulièrement prospectés, mais n'ont jamais été sérieusement exploités : dans le flanc SE du Rocher des Rayes (ou Dent de Combette) au N de Rougemont et sous Les Borsalets près du pont de Gérignoz sur la Sarine, à deux km à l'E de Château d'Oex. Dans les deux cas, le charbon se trouve inclus dans les Couches à Mytilus, une formation géologique datant du Jurassique moyen (Plancherel et al., 2012 ; Genoux 1989), (fig. 2, haut).

En 1889, H. Schardt avait étudié le gisement du Rocher des Rayes où une courte galerie avait été pratiquée, mais l'irrégularité de la couche de charbon, son altitude et le manque de voies d'accès ont fait renoncer à une tentative d'exploitation. Nouvelles fouilles et galeries, suivies

d'expertises par Schardt en 1917, puis par B. Campana et E. Gagnebin en 1942-1944 qui débouchent sur la même conclusion : abandon des recherches (Fehlmann, 1947 ; Claude, 1974).

Le gisement des Borsalets-Gérignoz fut exploré par plusieurs galeries en 1917-1918, puis en 1942-1943 ; la « Compagnie minière du Pays d'Enhaut » concessionnaire a alors voulu à tout prix l'exploiter sans tenir compte de l'avis négatif des géologues : 355 t de schistes charbonneux inemployables (plus de 70 % de cendres !) furent extraites avant que cessent les travaux (Fehlmann, 1947).

Massif des Diablerets (Nappe des Diablerets)

Un des sommets de ce massif, Tête-Ronde, était autrefois nommé Pointe de la Houille, car un peu en-dessous (coord. 579.900/127.730/2700) affleurerait une couche d'anthracite pyriteux et argileux (30-40 % de cendres !), épaisse de près de 5 m. Le gisement est signalé par une étoile sur la carte géologique de Badoux et al. (1991). Les chasseurs de chamois le connaissaient depuis longtemps lorsqu'il fut publié par Wild en 1789. Pour l'étudier commodément, Renevier (1890, 1891) a ensuite fait pratiquer par ses guides et pourvoyeurs de fossiles une profonde tranchée qui a dégagé le charbon de sa couverture d'éboulis et permis la récolte de nombreux fossiles. Wehrli (1919), puis Fehlmann (1947) décrivent à nouveau le gisement d'après les rapports du Bureau fédéral des Mines. L'âge de ces couches est l'Eocène supérieur, plus précisément le Ludien moyen-supérieur, environ 40 millions d'années (Weidmann et al., 1991), (fig. 2, milieu). Visité en juillet 2003, le gisement est partiellement recouvert d'éboulis mais la tranchée de prospection est encore bien visible ainsi que des restes de planches (S. Ansermet, comm. orale).

Tant l'altitude du gisement que la piètre qualité du combustible ont exclu toute éventualité d'une exploitation raisonnable.

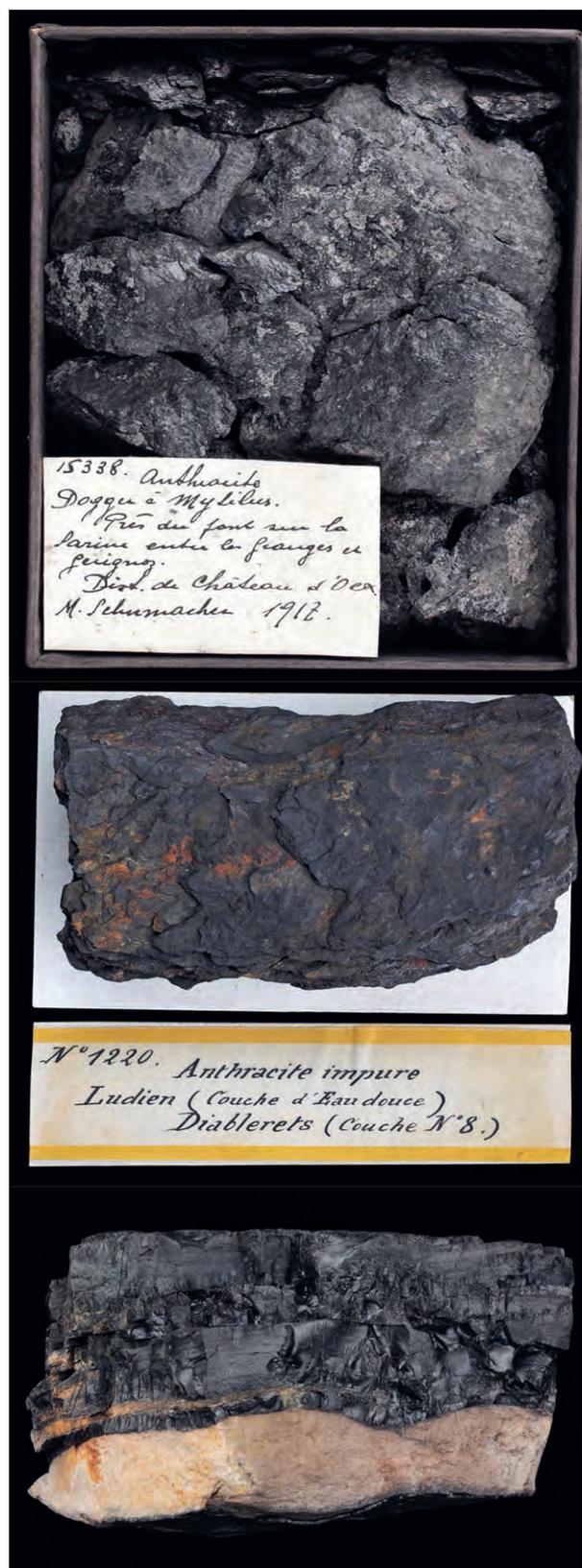


Figure 1 (page précédente). Les mines du canton de Vaud en 1944 : 1 - Sondage géologique dans la région de Châtillens à la recherche de charbon ; 2 - La mine d'Oron ; 3 - Vue générale de la mine de la Possession près de Châtillens avec son puits d'accès et les déblais. Au premier plan, on aperçoit les troncs destinés au boisage des galeries. Le grand déblai est encore visible actuellement ; 4 - Vue générale de la mine des Ecaravez près de Belmont en direction de la Tour de Gourze ; 5 - Vue générale des silos à charbon avec un camion en cours de chargement à la Mine du Flonzel à la Conversion (exploitée de 1942 à 1944) - collection Emile Gos, Photographie Elysée. Images 1 à 4 : Archives photographiques du Musée cantonal de géologie.

Les charbons molassiques

Ce sont les seuls dont l'exploitation a laissé des traces, actuellement bien effacées, sur le terrain et dans les mémoires. On les rencontre principalement dans deux secteurs, celui de Pully-Lutry-Belmont et celui d'Oron-Palézieux, et aussi en trois autres points isolés : Rivaz, Les Monts-de-Corsier et Chailly-sur-Clarens. Tous appartiennent à la Molasse dite subalpine, plissée et faillée, qui caractérise la partie interne (ou SE) du Bassin molassique de Suisse occidentale, plus proche des Alpes que du Jura (fig. 2, bas). La présence de plusieurs couches ou filons de charbon (plus précisément un lignite) dans cette molasse indique un milieu de sédimentation bien particulier : forêts marécageuses en eau douce et sous un climat subtropical plus ou moins humide (Fasel, 1986). L'épaisseur des filons exploités est toujours très modeste (entre 10 et 30 cm) et la qualité du combustible n'est pas optimale, notamment en raison de sa teneur en soufre trop élevée. L'âge de ces couches est le Chattien supérieur, environ 24-25 millions d'années. On y a récolté au cours des périodes successives de l'exploitation de nombreux fossiles d'animaux et de végétaux. La synthèse de Morel (1979) détaille les chiffres de production de chaque mine et esquisse les très éventuelles possibilités d'une exploitation future.

Figure 2 (ci-contre). Echantillons de charbon du canton de Vaud: Blocs d'antracite pure produit en 1917, mine de Gériгноz près de Château d'Oex. 10 x 14 cm. Coll. du MCG, n°015338 (haut) ; Fragment d'antracite très impure issu de la Tête Ronde, massif des Diablerets, env. 2700 m d'altitude. 11 x 7 cm. Coll. du MCG, n°001220 (milieu) ; Couche de houille noir de jais sur matrice de calcaire. Mine de Belmont-sur-Lausanne (1935). 14 x 8 cm. Collection du MCG, n°094120 (bas).





Claude (1974) a magistralement brossé la longue histoire mouvementée des mines vaudoises de charbon molasique, laquelle a commencé tout au début du XVIII^e siècle et s'est terminée en 1946-1947. Il en a décrit les succès et les fréquentes faillites, ainsi que les acteurs principaux, entrepreneurs et actionnaires, mais aussi mineurs. Ces derniers ont toujours travaillé dans des conditions d'insécurité et d'insalubrité aujourd'hui inadmissibles et des grèves se sont spontanément déclenchées pour les améliorer et aussi pour obtenir de meilleurs salaires. De nombreux mineurs ont laissé leur vie dans la mine lors d'accidents de travail ; si on ne dispose pas de statistiques fiables sur la mortalité au cours des périodes d'exploitation anciennes, on sait par contre qu'il y a eu plus de 25 accidents mortels de 1942 à 1947 (Buffat, 1976) et probablement bien davantage de décès si on avait décompté tous les anciens mineurs qui furent victimes de la silicose au cours des années suivantes (fig. 3).

Dans le bassin de Pully-Lutry-Belmont, les premières études géologiques décrivant une mine sont celles de Razoumowsky (1789) et de Necker (1841), qui furent suivies par beaucoup d'autres : voir notamment la synthèse de Bersier (1945) et un résumé par Weidmann (1988, p. 27). Seules deux couches de charbon étaient productives, bien que leur épaisseur ne dépasse pas 25 cm. L'histoire des exploitations a été souvent racontée : on consultera, en plus de l'indispensable travail de Claude (1974), les récits souvent très vivants et bien illustrés de Servion (s. d.), de l'ancien préfet A. Foscale (Bersier, 1943, 1971), Buffat (1976), Erne (1991), Akribas-Liardet (1995), et enfin surtout Perret (2011). D'après Claude (1974), la production totale du bassin, toutes périodes confondues, fut d'environ 150'000 t. On relèvera pour l'anecdote qu'on n'y a pas échappé aux accidents classiques de l'exploitation charbonnière : le coup de grisou (de la Harpe et Dufour, 1855) et l'incendie des terrils (Jaccard, 1937 ; Bersier, 1940).

La géologie du bassin d'Oron-Palézieux fut plus particulièrement décrite par Bersier (1951), Fasel (1986), Weidmann et al. (1993), Gabus et al. (2000). Une dizaine de couches de charbon ont été identifiées, mais toutes n'ont pas été exploitées ; l'épaisseur des filons augmente sensiblement en allant vers le NE dans la vallée de la Mionnaz, sur territoire fribourgeois, où s'ouvriraient aussi plusieurs mines (Ritter, 1946 ; Vial, 1988). L'exploitation a débuté dès le XVIII^e siècle, dans de nombreuses petites

mines artisanales (chiffres de production mal connus), et ensuite beaucoup plus activement au cours de la Seconde Guerre mondiale avec une production de 51'500 t pour la partie vaudoise du bassin, où les exploitations principales étaient les mines des Tavernes (ou de la Dausaz), de Possession (ou de Châtillens) et la mine d'Oron. Rappelons pour la petite histoire que même des communes se sont alors lancées dans l'« aventure minière » (Cantini, 1983 a). Le Groupement ou Amicale des mineurs du Bassin d'Oron fut fondé en 1943 et comptait encore sept membres à la fin de 1988 (Marguerat, 1988) (fig. 4). En l'an 2000, les derniers survivants ont raconté leurs souvenirs aux écoliers d'Oron qui en ont tiré, avec l'aide de leurs enseignants, une émouvante et précieuse plaquette (Candaux et al., 2000).

La petite mine de Rivaz (fig. 5) fut ouverte au bord du Léman, au-dessous du village, par le citoyen Rittener qui y a exploité de 1809 à 1816 le médiocre charbon d'une petite couche irrégulière sise sous un épais banc de poudingue. Production de quelques dizaines de tonnes (Claude, 1974). Comme dans les charbonnages anglais contemporains, c'étaient deux petits garçons qui y étaient chargés de transporter à l'air libre le charbon abattu par un mineur.

Aux Monts-de-Corsier, dans le flanc E du Mont-Vuarat, une tentative d'exploitation en 1942-1943 a rapidement dû être abandonnée à cause de la piètre qualité du charbon et des rapides variations d'épaisseur du filon. Production 1040 t (Badoux, 1944).

Figure 3 (page suivante). Les conditions de travail dans les mines en 1944 : 1 - Pour diminuer les frais d'extraction, les tailles descendantes pour l'exploitation n'ont que la hauteur nécessaire au passage des mineurs. Bassin houiller d'Oron ; 2 - La dynamite est poussée au fond des trous de mine au moyen d'une baguette en bois appelée bourroir. On aperçoit les mèches Bickford qui serviront à l'allumage des charges. Bassin houiller d'Oron ; 3 - Mêlé à des fragments de roche stérile lorsqu'il sort de la mine, le charbon doit être trié à la lumière du jour par une main d'oeuvre féminine. Mine d'Oron ; 4 - Un mineur pousse le wagonnet plein de charbon ou de roche stérile vers la sortie. Bassin houiller d'Oron ; 5 - Au moyen d'une luge, un mineur placé dans un travers-banc évacue la roche stérile provenant des fronts de taille. Bassin houiller d'Oron ; 6 - Le géologue Héli Badoux chargé de la surveillance de l'exploitation évalue l'ampleur du tassement du terrain sus-jacent et les dégâts subis par le boisage. Bassin houiller d'Oron. Archives photographiques du Musée cantonal de géologie.





Figure 4. Drapeau du Groupement des mineurs du bassin d'Oron (1940-1945), recto et verso. Conservé et exposé dans la salle du Conseil communal de l'Hôtel de ville de Moudon. Photo : Musée cantonal d'archéologie de d'histoire.

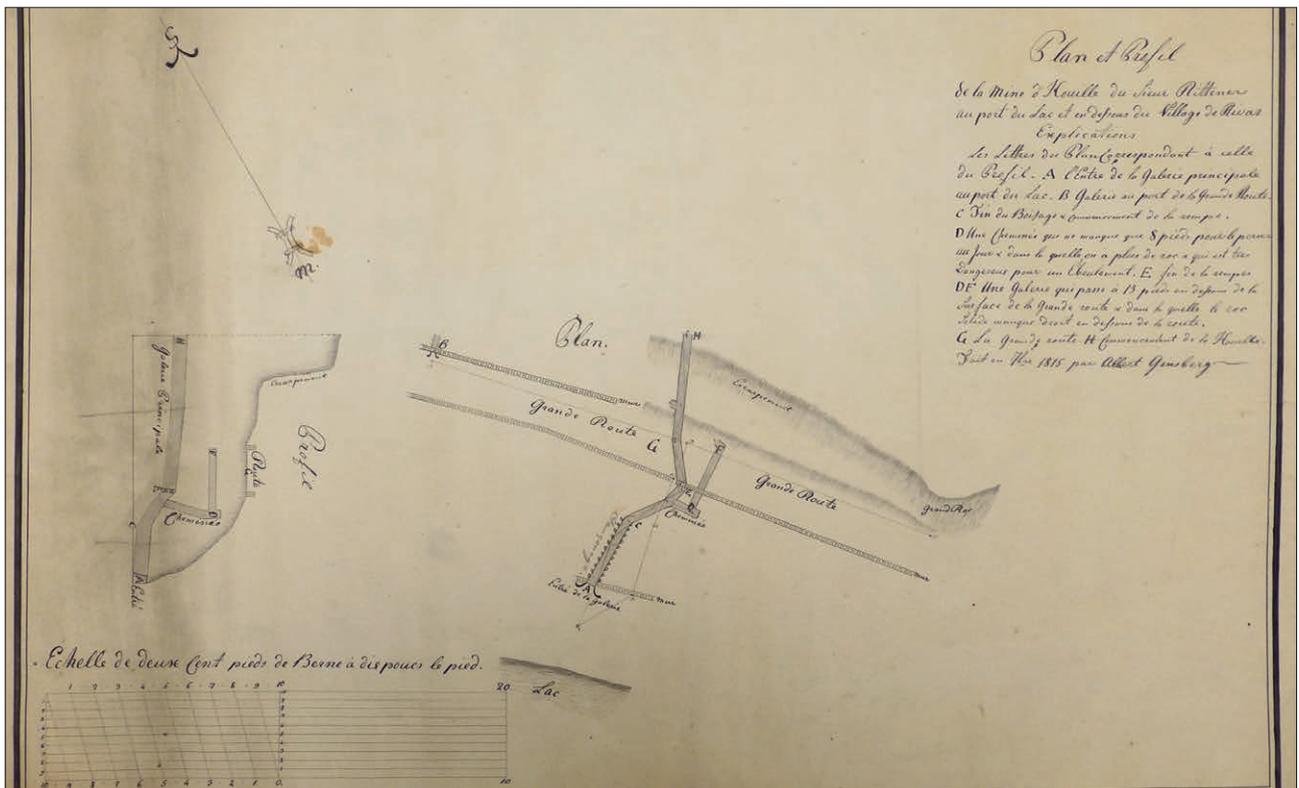


Figure 5. Plan et profil de la mine de houille de Rivaz en 1815 par Albert Ginsberg. Cette mine inaccessible de nos jours se situait sous la route cantonale, entre l'entrée occidentale du village de Rivaz et l'actuel Lavaux-Vinorama. Elle fut exploitée par « le Sieur Rittener » entre 1809 et 1816. Deux petits enfants étaient chargés de transporter à l'extérieur le charbon abattu par un mineur. Archives cantonales vaudoises (ACV GC 150 A Rivaz).

Enfin, une autre tentative d'exploitation a eu lieu à la fin du XVIII^e siècle près de Chailly-sur-Clarens. Elle fut décrite par Razoumowsky (1783), puis par Chuard (1969), avant d'être « remise au jour » lors des travaux de construction de l'autoroute A9 (Weidmann et al., 1982). Le charbon exploité ici est un peu plus ancien que les autres charbons molassiques vaudois, puisqu'il se rattache à la Formation de Vaulruz, d'âge rupélien, environ 30 millions d'années.

Un des ultimes épisodes de l'« épopée » des mines de charbon molassique eut lieu le 1^{er} février 1946, entre Oron et Lausanne, avec le grand cortège « d'environ mille travailleurs du sous-sol vaudois » (Buffat, 1976 ; Cantini, 2006), dont beaucoup étaient venus à Lausanne à pied, dans la neige, pour protester contre l'annonce de leur proche licenciement. Le 7 décembre, il y avait encore 250 mineurs pour fêter la Sainte-Barbe et c'est la mine de Possession-Châtillens qui fut la dernière à fermer en avril 1947.

Le lignite feuilleté de Grandson

Ce gisement situé entre Grandson et l'autoroute n'affleurerait pas en surface lorsqu'il fut découvert par hasard alors que l'on creusait une galerie à la recherche d'eau potable (Renevier, 1894 ; Jeannet, 1923). Sous une épaisse moraine déposée lors de la dernière glaciation gisent des sédiments lacustres interglaciaires qui comprennent trois couches de lignite atteignant 1.5 m d'épaisseur, lesquelles furent exploitées en galerie de 1942 à 1946 et ont livré 22'400 t de combustible (Fehlmann, 1947). L'emplacement de cette mine est indiqué sur la carte géologique (Rigassi et al., 2006) et la publication de Jordi (1996) donne une description du gisement, ainsi qu'une bibliographie complète des études qui lui furent consacrées. Ce lignite feuilleté est attribué à l'Interglaciaire Mindel-Riss (environ 300'000-350'000 ans, Welten, 1988) et on y a trouvé un intéressant assemblage de fossiles, tant animaux que végétaux.

Les exploitations de tourbe

Dès la période postglaciaire, de très nombreuses tourbières s'étaient développées dans toutes les régions vaudoises (Früh et Schröter, 1904 ; Lüdi, 1946, 1950 ; Gaillard, 1984) et elles ont presque toutes disparu, ayant été drainées et mises en culture au cours du XX^e siècle. Auparavant, de la tourbe était exploitée un peu partout par de modestes extractions paysannes et aussi de fa-

çon plus intensive dans les meilleurs gisements (Claude, 1974, p. 8) pour alimenter des feux industriels, tels que les fonderies à Vallorbe, les fours des tuileries ou les fours à chaux, comme au Tronchet sous la Tour de Gourze (Neccker, 1841, p. 288 ; Cantini, 1982), ou pour être transportée dans les villes et vendue pour le chauffage domestique.

Pendant les deux guerres mondiales du XX^e siècle et parfois jusque vers la fin des années 1960, les exploitations ont repris sur une plus grande échelle dans des sites choisis permettant une mécanisation efficace de l'extraction et aussi un transport facile allant jusqu'aux clients ; la tourbière de La Rogivue en est un bon exemple (Cantini, 1983 b ; Weyeneth, 1989).

On ne possède pas de chiffres précis sur les tonnages extraits au cours des diverses périodes. ■

Marc Weidmann est géologue retraité, ancien directeur du Musée cantonal de géologie.

Nicolas Meisser, géologue, est conservateur au Musée cantonal de géologie.

Bibliographie

AKRIBAS-LIARDET, N. (1995) : La reprise de l'exploitation du bassin charbonnier de La Paudèze au cours du XX^e siècle. Mémoire de licence, Inst. Géographie UNIL, Lausanne, 75 p. + annexes.

BADOUX, H. (1944) : Mine des Monts de Corsier, rapport final. Archives géologiques suisses, n° 3563, swisstopo, Wabern.

BADOUX, H., GABUS, J.-H., MERCANTON, C.-H. (1990) : Atlas géol. de la Suisse 1: 25'000, feuille 1285 Les Diablerets. Notice explicative par H. Badoux et H. Gabus (1991). Service hydrol.-géol. national, Berne.

BERSIER, A. (1940) : Le « feu souterrain de Belmont ». Bull. Soc. vaud. Sci. nat., 61, 243-250.

BERSIER, A. (1943) : Souvenirs sur les mines de La Conversion, recueillis auprès de M. Antoine Foscale-Bron le 10 juin 1943. 3 p. manuscrites, ACV Fonds Foscale et Archives du Musée cantonal de géologie. Sur A. Foscale-Bron, voir Perret (2011, p. 347).



- BERSIER, A. (1945) :** Sédimentation molassique : variations latérales et horizons continus à l'Oligocène. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 38, 452-458.
- BERSIER, A. (1951) :** Les possibilités d'exploitation du charbon dans la région vaudoise d'Oron et de Palézieux. Rapport inédit, 47 p., Archives géologiques suisses, n° 7348, swisstopo, Wabern.
- BERSIER, A. (1971) :** Le charbon vaudois. In : *Encyclopédie illustrée du Pays de Vaud*, t. 2 : Une Terre, ses origines, ses régions, 14-15.
- BRIDEL, P.-S. (1807) :** Statistique du district du Pays-d'Enhaut romand. *Notices d'utilité publique*, t. 2, Lausanne.
- BUFFAT, A. (1976) :** L'épopée des mines vaudoises de charbon, 1942-1947. F.O.B.B., Lausanne, 8 p. photocopiées, + annexes et 4 pl. de photographies.
- CANDAUX, O. ET CLASSE 8DS2 (2000) :** Mines de la région d'Oron : interviews de mineurs. 33 p. photocopiées, Etablissement scolaire d'Oron-la-Ville.
- CANTINI, C. (1982) :** Les tourbières de Gourze, une industrie extractive paysanne du XIX^e siècle. *Rev. hist. vaud.*, 90, 149-171.
- CANTINI, C. (1983 a) :** Histoire de chez nous : l'aventure minière de Forel. *Chronique de Lavaux*, 4 mars, p. 6.
- CANTINI, C. (1983 b) :** Les tourbières de La Rogivue. *Le Courrier de la Broye et du Jorat*, 33, 2 sept.
- CANTINI, C. (2006) :** Grèves ! Cahiers d'histoire du mouvement ouvrier, 22, 154-163, Ed. d'En Bas, Lausanne.
- CHUARD, J.-P. (1969) :** Du charbon à Chailly-sur-Clarens. *Rev. hist. vaud.*, 67, 149-151.
- CLAUDE, A. (1974) :** Un artisanat minier. Charbon, verre, chaux et ciments au Pays de Vaud. *Bibl. hist. vaud.*, 54, 272 p.
- ERNE, I. (1991) :** Lavaux gueule noire. *Le Sillon romand*, 14 février, p. 14.
- FASEL, J.-M. (1986) :** Sédimentologie de la Molasse d'eau douce subalpine entre le Léman et la Gruyère. Thèse Univ. Fribourg, Impr. Quick-Print, Fribourg.
- FEHLMANN, H. (1919) :** Der schweizerische Bergbau während des Weltkrieges. Bergbaubureau, Abt. für industrielle Kriegswirtschaft, Schw. Volkswirtschaftsdepartement, Bern.
- FEHLMANN, H. (1947) :** Der schweizerische Bergbau während des zweiten Weltkrieges. Document photocopié, 252 p., Büro für Bergbau, Eidg. Kriegsindustrie- und Arbeitsamt, Bern.
- FRÜH, J. ET SCHRÖTER, C. (1904) :** Die Moore der Schweiz. *Beitr. Geol. der Schweiz, geotechn. Ser.*, 3.
- GABUS, J.-H., BOEGLI, J.-C., MORNOD, L., ET PARRIAUX, A. (2000) :** Atlas géol. de la Suisse 1: 25'000, feuille 1224 Moudon. Notice explicative par J.-H. Gabus, Service hydrol.-géol. national, Berne.
- GAILLARD, M.-J. (1984) :** Etude palynologique de l'évolution tardi- et postglaciaire de la végétation du Moyen-Pays romand (Suisse). *Dissertationes Botanicae*, 77, 322 p.
- GENOUX M. (1989) :** Les mines de charbon du Pays d'Enhaut. *Niphargus*, 2, 11-13.
- GIVEL, R. (1945) :** Le marché charbonnier suisse sous l'influence de la guerre 1939-1945. Impr. Ere Nouvelle, Lausanne, 255 p.
- HARPE, PH. DE LA ET DUFOUR, L. (1855) :** Coup de grisou à Lutry. *Bull. Soc. Vaud. Sci. nat.*, 6, 14.
- JACCARD, H. (1937) :** Des mines en feu à Belmont. Feuille d'Avis de Lausanne, 8, 11 et 13 novembre.
- JEANNET, A. (1923) :** Die diluviale Schieferkohlen der Schweiz. *Mat. Géol. de la Suisse, Sér. géotechn.*, 8.
- JORDI, H. A. (1996) :** Ältere glaziale und interglaziale Ablagerungen in der Gegend von Grandson und Les Tuileries. *Bull. Angew. Geol.*, 1, 145-168.

- KISSLING, E. (1903) : Die schweizerischen Molassekohlen westlich der Reuss. Beitr. Geol. der Schweiz, geotechn. Ser., 2.
- KÜNDIG, E. ET DE QUERVAIN, F. (1953) : Fundstellen mineralischer Rohstoffe in der Schweiz. 2. Ausgabe, Kümmerly & Frey, Bern.
- KÜNDIG, R. (2005) : Kohlevorkommen in der Schweiz. *Minaria helvetica*, 25b, 37-47.
- LÜDI, W. (1946 et 1950) : Moore im Kanton Waadt. Rapports inédits, Bibliothèque du Musée botanique cantonal, Lausanne.
- MARGUERAT, E. (1988) : Nos anciennes mines vaudoises : les années passent, les souvenirs restent. Feuille d'Avis du district d'Oron, novembre 1988.
- MOREL, F. (1979) : Le charbon de la Molasse. Inventaire des matières minérales de la Suisse : cantons de Vaud, Genève et Fribourg. Document inédit, Commission géotechnique suisse, 18 p. photocopiées + cartes.
- NECKER, L. A. (1841) : Etudes géologiques dans les Alpes. Tome 1, Ch. Pitois, Paris.
- PELET, P.-L. (1962) : La Feuille d'Avis, miroir de l'économie vaudoise, 1762-1850. *Bibl. hist. vaud.*, 33.
- PELET, P.-L. (1970) : Ressources minières et politique vaudoise 1798-1848. *Rev. hist. vaud.*, 78.
- PELET, P.-L. (1981) : Bibliographie de base sur les mines vaudoises. *Minaria helvetica*, 1, 26-28.
- PERRET, L.-D. (2011) : L'exploitation de la houille à Lutry au 19^e siècle ou la naissance d'un capitalisme artisanal local. In : Histoire de Lutry et des Lutriens 1799-1918, 237-254. Commune de Lutry.
- PLANCHEREL, R., DALL'AGNOLO, S. ET PYTHON, C. (2012) : Atlas géol. de la Suisse 1: 25'000, feuille 1245 Château d'Oex. Avec notice explicative. Cartographie géologique, Office fédéral de topographie swisstopo, Wabern.
- RAZOUKOWSKY G. DE (1783) : Voyage aux environs de Vevey, et dans une partie du Bas-Vallais. Mémoires de la Société des Sciences physiques de Lausanne, 1, 76-94 (publié en 1784).
- RAZOUKOWSKY, G. DE (1789) : Histoire naturelle du Jorat et de ses environs ; Et celle des trois Lacs de Neufchatel, Morat et Bienné ; Précédée d'un Essai sur le Climat, les Productions, le Commerce, les Animaux de la partie du Pays de Vaud ou de la Suisse Romande, qui entre dans le plan de cet Ouvrage. 2 vol., J. Mourer, Lausanne.
- RENEVIER, E. (1890) : Monographie des Hautes-Alpes vaudoises. *Mat. Carte géol. de la Suisse*, 16.
- RENEVIER, E. (1891) : Envahissement graduel de la mer éocène aux Diablerets. *Bull. Soc. Vaud. Sci. nat.*, 27, 41-44.
- RENEVIER, E. (1894) : Sur un gisement de lignite interglaciaire au NW de Grandson. *Bull. Soc. Vaud. Sci. nat.*, 30, XXVIII.
- REYMOND, M. (1940) : L'industrie minière au Pays de Vaud. Feuille d'Avis de Lausanne, 7 et 14 septembre.
- RIGASSI, D., JORDI, H. A., ARN, R. (2006) : Atlas géol. de la Suisse 1: 25'000, feuille 1183 Grandson. Cartographie géologique, Office fédéral de topographie swisstopo, Wabern.
- RITTER, E. A. (1924) : Stratigraphie und Tektonik der kohlenführenden Molasse zwischen Genfersee und Saanetal. *Eclogae geologicae Helveticae*, 18, 387-411.
- RITTER, E. A. (1946) : Karte des Grubengebietes Mionnaz-Palézieux, 1: 10'000. Document manuscrit datant de 1919, complété par E. Ritter en février 1946, puis par W. Hubacher en janvier 1982. Archives du Musée cantonal de géologie, Lausanne.
- SCHARDT, H. (1889 et 1917) : Gisement de houille situé au Rocher de la Raye (Pays d'Enhaut). Rapports inédits, ETH-Bibl. Zürich, Handschriften und Autographen, cote Hs 389/219.
- SERVION, J.-P. (s. d., vers 1890) : Une heure dans les mines de la Paudèze. Texte manuscrit, Archives Cantonales Vaudoises, KXC 2010 ; publié dans le Journal de Pully, nos 44, 45, 46, décembre 1981.



VIAL, J.-C. (1988) : Historique des mines de St-Martin - Progens. *Minaria helvetica*, 8a, 6-18.

WEHRLI, L. (1919) : Die postkarbonischen Kohlen der Schweizeralpen. *Beitr. Geol. der Schweiz, geotechn. Serie*, 7.

WEIDMANN, M. (1988) : Atlas géol. de la Suisse 1: 25'000, feuille 1243 Lausanne. Avec notice explicative de 44 p., Service hydrol.-géol. national, Bâle et Berne.

WEIDMANN, M., FRANZEN, J., BERGER, J.-P. (1991) : Sur l'âge des Couches à Cérites ou Couches des Diablerets de l'Eocène alpin. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 84, 893-919.

WEIDMANN, M., HOMEWOOD, P. ET FASEL, J.-M. (1982) : Sur les terrains subalpins et le Wildflysch entre Bulle et Montreux. *Bull. Soc. Vaud. Sci. nat.*, 76, 151-183.

WEIDMANN, M., HOMEWOOD, P., MOREL, R. ET AL. (1993) : Atlas géol. de la Suisse 1: 25'000, feuille 1244 Châtel-St-Denis. Notice explicative par M. Weidmann, Service hydrol.-géol. national, Berne.

WELTEN, M. (1988) : Neue pollenanalytische Ergebnisse über das Jüngere Quartär des nördlichen Alpenvorlandes der Schweiz (Mittel- und Jungpleistozän). *Beitr. z. geol. Karte d. Schweiz, N. F.* 162, 1-38 + annexes.

WEYENETH, M. ET E. (1989) : Regard vers le passé. *Bulletin de l'Assoc. vaudoise du Tourisme pédestre*, 1, 18-22.

WILD, F. S. (1789) : Lettre de M. Wild à M. van Berchem fils, le 7 septembre 1789. *Mémoires de la Société des Sciences physiques de Lausanne*, 3, 53.



Cette lampe à acétylène, de marque « Etoile » à feu central et de modèle « tunnel » a accompagné les mineurs vaudois au XX^e siècle. Mise au point et brevetée par la société Mercier à Nancy, elle a été distribuée par l'entreprise suisse d'engins et de matériel de chantier Robert Aebi & Cie. Don de M. F. Mouron – 2020. Photographie Stefan Ansermet. Collection du Musée cantonal de géologie, n°094464.



La production de ciment « Portland », une industrie lourde au coeur du développement de la Suisse romande

par Gilles Borel

Cet article ne se veut pas un historique complet de la prospection et de l'exploitation des carrières pour le ciment ou encore une revue des tonnages produits dans leurs usines attenantes sises en Pays de Vaud. Pour cela, le lecteur se penchera avantagement sur les ouvrages de Jenny (1978), Mangold (1932), Rieben, Nathusius et al. (1980), Spicher, Marfurt et al. (2013) ou encore Rudhardt (1914). Son but est d'éclairer les circonstances qui ont conduit à la situation actuelle, qui est de n'avoir plus que deux exploitations en Suisse romande au XXI^e siècle, dont une en terres vaudoises alors que, dans le dernier quart du XIX^e siècle, elles se comptaient en dizaines.

Nous verrons que cette industrie lourde, une des seules de Suisse, a toujours été régie par les lois du marché, alors qu'elle concerne des matériaux stratégiques pour l'économie du pays. Nous illustrerons notre propos avec les cas emblématiques des usines de Grandchamp, de Baulmes, de Vouvry, de Roche et finalement d'Eclépens.

Qu'est-ce que le ciment ?

Le ciment est un liant sous forme de poudre, qui, mélangé à de l'eau, se transforme en pâte homogène permettant d'agrèger du sable ou des graviers pour produire du mortier ou le plus souvent du béton. Ses principaux constituants sont le calcaire (env. 80 %) et l'argile (env. 20 %). La révolution technologique et industrielle qui aura bouleversé notre habitat est l'invention du ciment dit « Portland artificiel », dont un premier brevet est déposé en 1824 par Joseph Aspdin. Il faut toutefois noter que sa composition évoluera encore beaucoup au cours des décennies suivantes.

Les enjeux liés à la construction, au développement urbain et aux infrastructures

En Suisse romande comme dans le reste de l'Europe, la fin du XIX^e siècle voit une accélération du développement urbain mais aussi des infrastructures ferroviaires

ou routières. Il n'en demeure pas moins que l'usage du béton devient de plus en plus omniprésent et en arrive à remplacer la pierre de taille. Ce nouveau matériau offre aux architectes des options techniques qui vont définitivement l'imposer dans le premier quart du XIX^e siècle. Son utilisation sera décuplée dès les années 1950 avec la réalisation des barrages alpins. Il est aujourd'hui encore incontournable.

Les clés de son succès sont à trouver dans sa facilité de transport, sa résistance mécanique à la compression - idéale pour les barrages-voûtes - et sa malléabilité qui permet de nombreuses audaces architecturales. Enfin, armé, il allie sa résistance à la compression à la résistance de traction, caractéristique de l'acier.

Tout est à créer : du besoin à la production, de la recherche au développement

Très vite des entrepreneurs locaux se lancent dans l'aventure mais tout est à créer. En premier lieu : le besoin. Il faut vanter les mérites de ce nouveau composé et en parallèle réfléchir à la production locale. Celle-ci commencera à proximité ou sur les lieux même de la production de la chaux.

Ces usines, massives et « modernes », sont présentées comme formant un complexe important, relié au chemin de fer, au transport par la route et par l'eau. L'ensemble garde néanmoins un côté bucolique (fig. 1).

Du côté du produit, la « recette » initiale du ciment « Portland artificiel » évoquée dans le brevet de 1824 est, semble-t-il, assez sommaire. Surtout, le ciment étant un mélange de composés naturels, il est difficile d'en contrôler l'exacte composition. Les calcaires utilisés contiennent plus ou moins d'impuretés sous forme de magnésium, de fer, de silice ou encore de résidus argileux. De même, la composition chimique et minéralogique des marnes présente une large variabilité, reflet des conditions de sédimentation d'il y a quelques millions ou centaines de millions d'années. Cette variabilité a des



Figure 1. Les premières publicités rivalisent de références bucoliques pour vendre un tout nouveau produit, symbole de modernité.

implications sur la qualité du produit. Produire, même à partir de la même carrière, un ciment standardisé, aux propriétés physico-chimiques calibrées reste aujourd'hui encore une prouesse. La nécessité d'une « recherche et développement » active est une condition *sine qua non* de la survie des sites de production.

Afin qu'une telle entreprise soit rentable un ensemble de facteurs doivent jouer de concert. Tout d'abord, les calcaires et les marnes ne se trouvent pas n'importe où dans la région : leur présence contiguë est plutôt une rareté. Leur accès doit être facile ou à tout le moins proche. Ensuite, il faut une source d'énergie thermique importante. Enfin, au vu des volumes en jeu, tant en ce qui concerne les constituants que le combustible, implémenter l'usine à proximité immédiate d'une ligne de chemin de fer est une condition impérative. Ces facteurs, prépondérants il y a 140 ans le sont encore aujourd'hui (fig. 2).

De Baulmes à Eclépens

Le besoin en ciment explose dans le dernier quart du XIX^e siècle. L'avènement du béton qui permet des prouesses architecturales et une grande rapidité de construction en est évidemment la raison. Les usines se multiplient pour faire face à la demande. Ainsi cette nouvelle industrie attire de nombreux entrepreneurs et investisseurs. C'est dans les années 1880, plus précisément en 1884, que démarre la production dudit ciment « Portland artificiel » à l'usine de Grandchamp. C'est la première usine moderne et d'envergure dans notre région. Elle est construite le long du Léman sur la commune de Veytaux (Jenny, 1978). L'usine est coincée entre la voie de chemin de fer nouvellement construite et la route cantonale (fig. 3). Les matières premières viennent des Préalpes toutes proches. Le calcaire des niveaux exploités sont datés du Jurassique supérieur (-145 millions d'années). Les marnes, quant à elles, proviennent de niveaux plus anciens situés à environ 3 km à l'est de l'usine.

Le succès rencontré par ce ciment encourage le propriétaire, dès 1895, à créer une nouvelle usine à Roche (Du Pasquier et Carrard, 1895) (fig. 4). Celle-ci est construite quelques centaines de mètres à l'ouest du village avec un accès direct à la ligne ferroviaire du Simplon. Elle entre en production en 1896. De par ses dimensions et ses quatre fours elle finit par supplanter l'usine de Grandchamp qui, elle, cessera son activité vers 1907. Pour maintenir sa rentabilité, l'usine de Roche engage un processus de constante amélioration (Anonyme, 1971 ; Kraege et al., 1991 ; de Chastenay, 2002). Notons en particulier l'installation du four rotatif en 1913 qui permet de faire passer la production annuelle entre 1896 et 1913 de 6'000 t à 35'000 tonnes. La production atteindra 200'000 t en 1972. L'usine cesse sa production avec l'arrêt de son four en 1994 (collectif, 1996 ; Sartori et al., 1996). Les installations seront rasées en 2002 (fig. 5).

La longévité de cette exploitation réside notamment dans une exploitation à ciel ouvert, moins chère et plus souple qu'une exploitation en souterrain et dans l'utilisation d'une source d'énergie mixte, combinant l'électricité pro-

duite par le turbinage de l'Eau-Froide (la rivière canalisée qui longe le village de Roche en direction du Léman) associée à du charbon comme source d'appoint.

Les matières premières sont extraites juste au-dessus du village. Leurs qualités géochimiques sont bien supérieures à celles exploitées à Grandchamp. Ce sont des calcaires d'âge Jurassique supérieur et des marnes du Crétacé supérieur. Coup de chance, le plissement tectonique des Préalpes a mis en contact, à cet endroit, les calcaires et les marnes, facilitant ainsi leur exploitation. L'ancienne carrière est encore bien visible en 2021.

Parallèlement à ce développement dans l'Est vaudois, d'autres acteurs entrent en scène à Baulmes dans le Jura vaudois en 1898 (Collectif, 1972). Profitant de la proximité du chemin de fer Yverdon - Ste-Croix, l'usine est construite à l'est du village et commence la production de ciment Portland en 1900 (Morel, 2013). Les roches sont très majoritairement extraites en souterrain. Il s'agit de calcaires d'âge Jurassique supérieur. Les propriétaires de l'usine de Baulmes, à l'instar de ceux de celle de Grandchamp, cherchent très vite à s'agrandir, ce qui se traduira



Figure 2. Si le transport par rail est une nécessité pour les grandes distances, le camion n'est pour autant pas négligé pour le trafic de proximité. Roche, années 20. Archives Holcim.

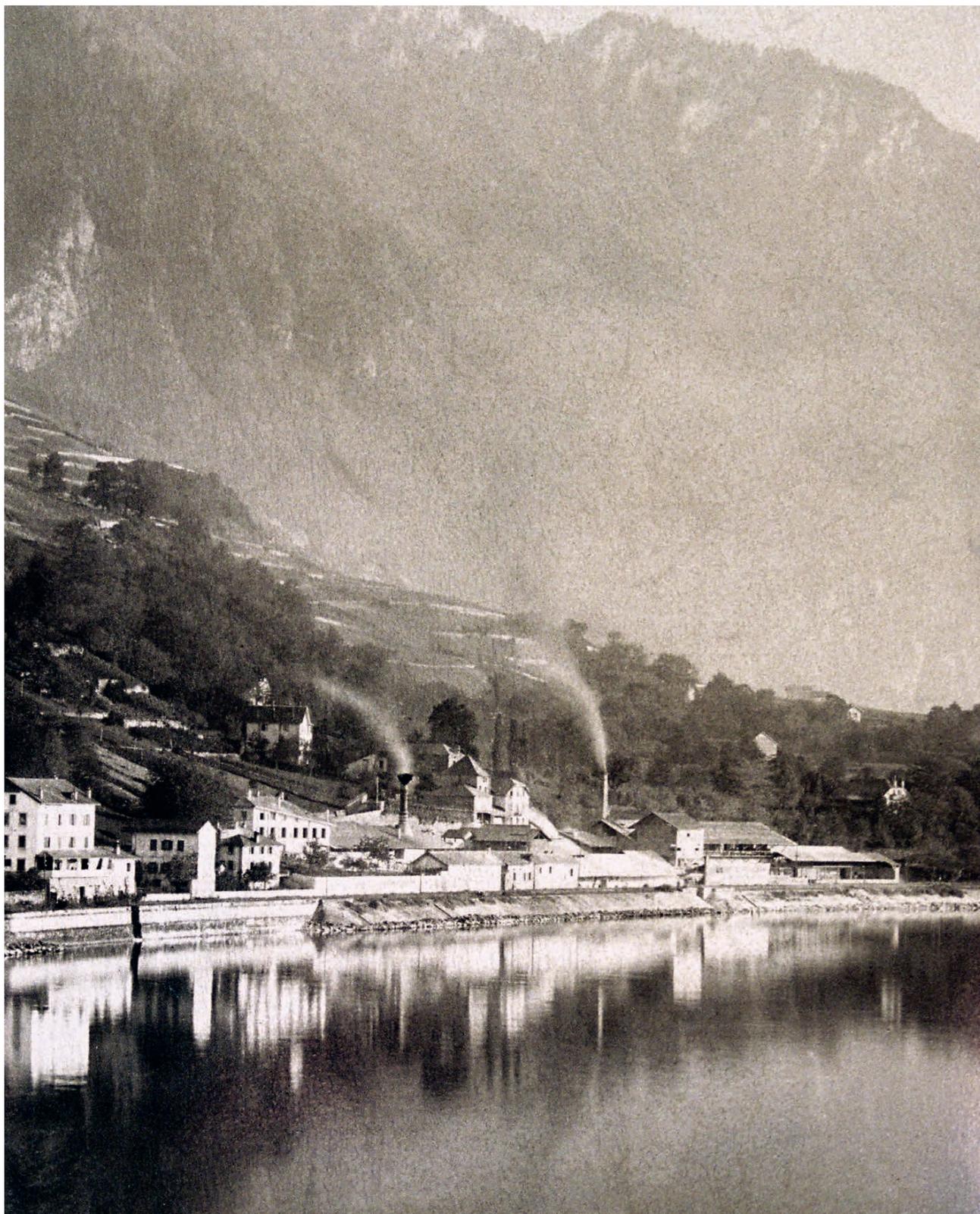


Figure 3. L'usine de Grandchamp le long du Léman au plus fort de son exploitation, vers 1900. Archives Holcim.

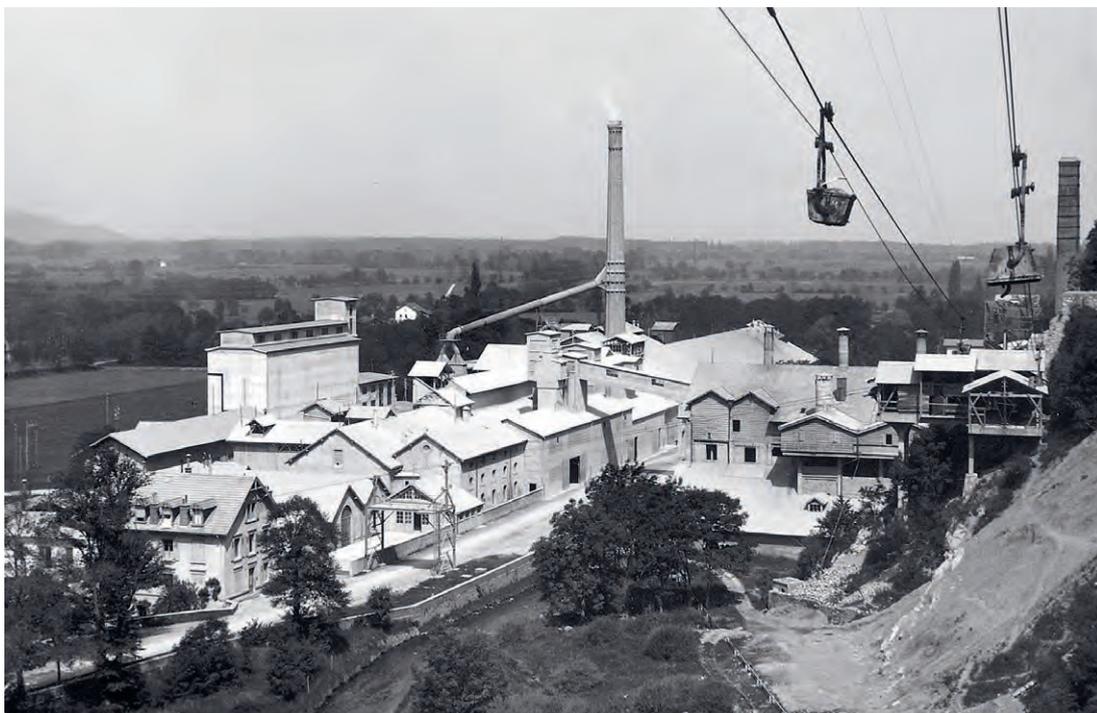


Figure 4. La cimenterie de Roche vers 1950. A noter sur la droite du cliché les bennes qui permettent de transférer la matière première sur les quelques centaines de mètres qui séparent la carrière de la cimenterie. Archives Holcim.



Figure 5. Cimenterie de Roche, fin d'une époque. Les bâtiments industriels sont complètement rasés au début du XXI^e siècle. Archives Holcim.



par la construction d'une usine à Vouvry en 1911, dont la production commence en 1912 (Anonyme, 1971). Là aussi, l'usine est établie à proximité de la voie de chemin de fer. Cette localisation rend nécessaire un téléphérique pour acheminer calcaires et marnes depuis la carrière de Pierre-à-Perret, située à 2 kilomètres au sud-ouest, sur le flanc gauche de la vallée du Rhône (fig. 6). Les roches exploitées ont le même âge que celles de Roche. Le point faible de cette installation sera sa source d'énergie, le charbon : l'usine devra fermer en 1943 faute de combustible. A la reprise de l'activité après-guerre, sa production atteindra quelques 40'000 tonnes. Sa rentabilité n'étant toutefois pas assurée, elle sera arrêtée en 1959 principalement à cause du coût de production de l'énergie, suivant en cela le destin de celle de Baulmes en 1957.

Ces deux usines seront démolies par étapes entre 1961 et 1972 pour Baulmes et en 1980 pour Vouvry.

Eclépens, ses atouts et ses découvertes inattendues

La colline du Mormont forme un promontoire rocheux qui ferme la plaine de l'Orbe au sud. Elle est constituée de roches calcaires du Crétacé inférieur (-135 millions d'années), similaires à celles rencontrées quelques kilomètres à l'ouest dans le Jura. Cette colline est aussi bien connue par la présence du canal d'Entreroches, un des ouvrages essentiels de la tentative de connexion du Rhône au Rhin par le plateau suisse au XVIII^e siècle.

Géologiquement, la colline est lacérée par un système complexe de grandes failles qui la découpent en de multiples compartiments comme les touches d'un piano, tantôt surélevées, tantôt enfoncées. Lors de l'exploitation, ces contraintes géotechniques sont prises en compte pour assurer la stabilité des versants et la sécurité de l'exploitation. La technique retenue est de travailler sur plusieurs fronts étagés, rendant possible une extraction sélective qui permet de tenir compte de la variabilité géochimique des calcaires (Girod, 2014). L'épaisseur de calcaires exploitée est de quelques 130 m.

La marne d'âge Chattien (Tertiaire, -25 millions d'années) est, quant à elle, exploitée 3 kilomètres à l'est sur le flanc de la plaine en direction d'Oulens.

La cimenterie d'Eclépens, en service depuis 1953, est la plus grande en Suisse romande (Pignat et Mercier, 1978). Les techniques d'exploitation, notamment en matière de

valorisation énergétique et de gestion de combustible alternatif, ainsi que la recherche en nouveaux produits qui est faite en son sein la place à la pointe dans l'industrie du ciment. Sa production annuelle est destinée essentiellement à la Suisse romande (fig. 7).

Concrètement, la fabrication du ciment telle que réalisée à Eclépens passe par les étapes suivantes : après extraction, les roches sont concassées puis transportées dans l'usine. Le calcaire et la marne sont mélangés de manière homogène, séchés et réduits en farine dans un broyeur. Cette matière est préchauffée, puis décarbonatée avant de passer dans un four rotatif chauffé à 1'450°C. A sa sortie, la matière se présente sous forme de granules appelées clinker. Pour produire le ciment, le clinker est encore broyé avec du gypse. L'usine d'Eclépens produit six types de ciment caractérisés par l'ajout de différents minéraux (Girod, 2014). Comme pour les usines qui ont précédé l'actuelle dans le paysage suisse romand, ici aussi le transport ferroviaire est essentiel. Il représente 60 % du volume transporté.

Aux soucis de rentabilité économique viennent s'ajouter ces dernières années les préoccupations environnementales. Combinant ces deux contraintes, un chauffage à distance récupérant la chaleur du four a été mis en fonction pour alimenter les villages environnants, ainsi que la zone industrielle à proximité immédiate de la cimenterie. Le site produit même depuis peu sa propre électricité, grâce à une turbine qui valorise plus de 90 % de la chaleur résiduelle du four et à une installation solaire de 3'650 m². Des projets en cours permettront en outre prochainement d'utiliser jusqu'à 95 % de combustibles alternatifs, l'un des ratios les plus élevés du monde.

L'inattendu est venu s'associer à l'exploitation industrielle de la colline du Mormont en 2006, par l'incroyable découverte archéologique de quelque 200 fosses circulaires, excavées profondément dans le sous-sol. Elles étaient comblées par des objets divers et des ossements animaux et humains. Elles ont été datées d'un peu avant 100 av. J.-C. et sont attribuées aux Celtes. Cette découverte a bien évidemment modifié la planification d'exploitation pour permettre aux fouilles archéologiques de se dérouler dans de bonnes conditions.

Nuisances, biotopes et géotopes

Dès 1913, les fumées sont les premiers désagréments relevés par la population à Roche, ce qui n'est pas étonnant,



Figure 6. L'usine de Vouvry avec son blondin (à droite du cliché) pour acheminer les matériaux depuis le site d'extraction. Archives Holcim.

l'usine étant située à proximité immédiate du village. Bien heureusement, la mise au point de filtres performants a réglé le problème - les clichés ci-dessous se passent de commentaires (fig. 8).

Aujourd'hui, comme il ne reste qu'une cimenterie en activité, elle cristallise toutes les critiques. Parmi celles-ci, la sensibilité au paysage est devenue dominante. Sans minimiser la problématique et les émotions que peuvent susciter la présence d'une carrière, il faut bien relever que l'on construit encore en béton et que ses composants doivent bien venir de quelque part. La Suisse n'est pas un pays minier et la plupart des citoyens n'ont aucune idée des dimensions que prennent les exploitations minières d'importance mondiale. A titre de comparaison, la seule consommation mondiale annuelle de minerai de fer s'élève à près de deux milliards et demi de tonnes (USGS, 2021). Ne nous leurrions pas : que ce soit le pétrole, le cuivre ou encore le fer utilisés en Suisse, toutes ces matières ont bien dû être extraites du sous-sol. Il n'y a pas qu'en Suisse que des paysages sont modifiés pour satisfaire nos besoins de consommation.

Du point de vue de la biodiversité, il faut rappeler que les escarpements des carrières représentent une opportunité pour toute une faune qui recherche des habitats en falaise comme les faucons pèlerins, les hiboux grands-ducs ou les chamois. Ces biotopes uniques sont en train de se développer. De même pour un géologue, faire un trou, c'est offrir une fenêtre sur le passé de la Terre, une chance unique d'en reconstituer l'histoire. Les carrières comme celle d'Eclépens ont mis à jour un patrimoine géologique tout à fait remarquable, que l'on identifie et préserve sous la notion de géotope.

Industrie connexe : l'exploitation des graviers

Le lecteur se rapportera avec bonheur à la contribution de Grégoire Testaz (2022) *Des gravières et des carrières comme patrimoine ?* dans le présent numéro, pour avoir une vision complète des enjeux liés à l'exploitation du sous-sol vaudois. Si les enjeux économiques sont perçus comme prépondérants, ils ne sauraient taire les extraordinaires trouvailles minéralogiques et géologiques que ces excavations ont permises.

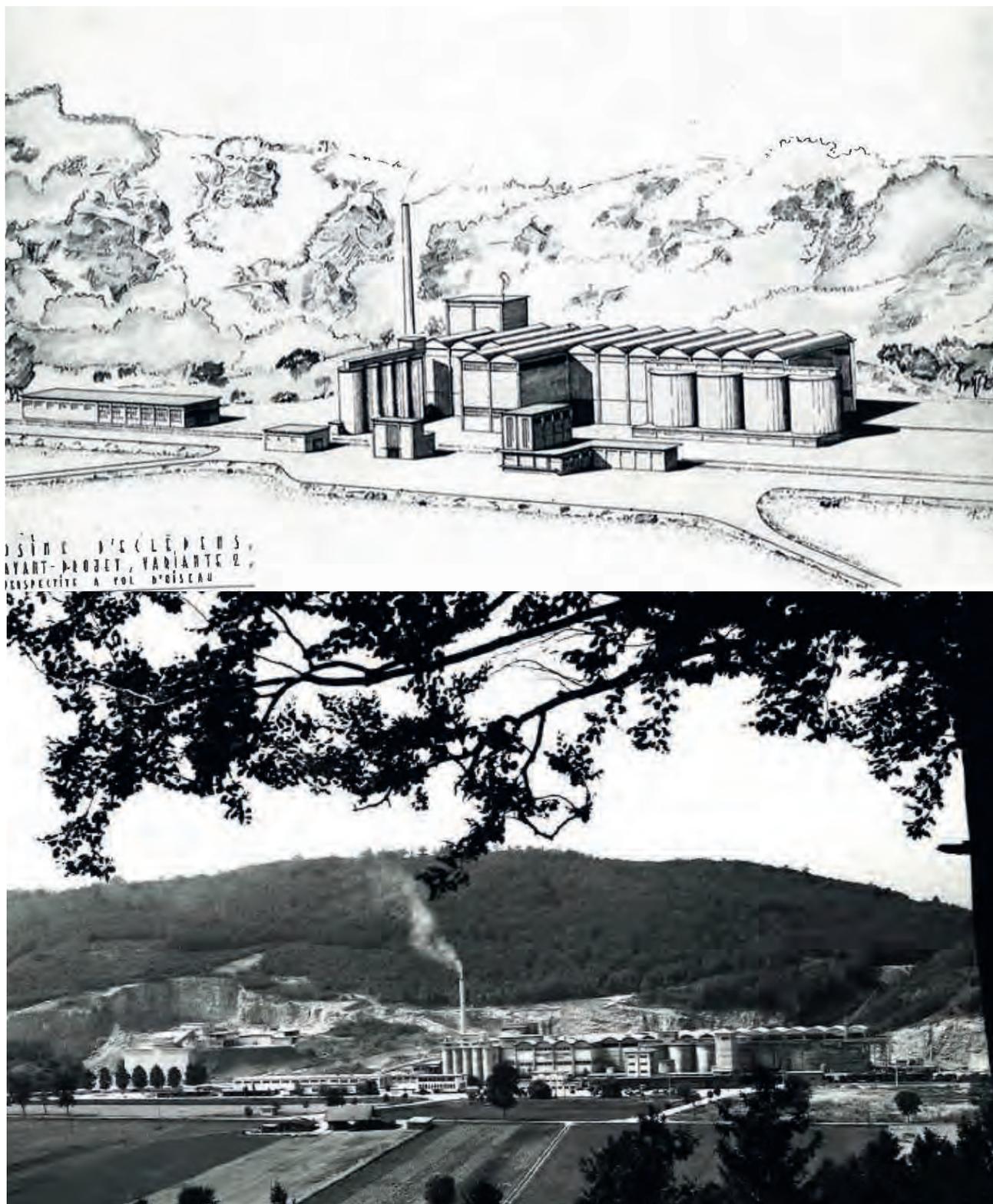


Figure 7. La cimenterie d'Eclepens – avant-projet. Archives Holcim (haut). La cimenterie d'Eclepens en 1963, dix ans après sa mise en activité (bas). Archives Holcim.



Figure 8. L'usine de Roche quand les filtres à poussières sont en panne (haut) et quand ils fonctionnent (bas). Archives Holcim.



Ressource stratégique

La succession dans le temps des usines s'accompagne d'un remodelage permanent du paysage administratif des sociétés exploitantes. Les soucis de rentabilité au vu des investissements consentis sont permanents. Ils sont tels qu'ils ont conduit les entreprises concurrentes à envisager tout d'abord des ententes cartellaires, puis des regroupements et enfin des fusions, jusqu'à la situation qui prévaut aujourd'hui avec seulement trois acteurs au niveau suisse. On peut s'étonner que seules les forces du marché aient été à l'œuvre pour guider la dynamique de cette industrie, alors que le ciment est clairement un matériau stratégique. Il convient de saluer l'initiative des autorités politiques, qui viennent de reconnaître l'importance de cette industrie par la publication d'un Guide de planification pour l'extraction de roches et de terres destinées à la production de ciment (DTAP, 2021). Pour mémoire, la production annuelle en Suisse était de 1'000 tonnes en 1883, de 90'000 tonnes en 1893 et de 4'215'000 tonnes en 2020 ! (Valeur publiée par l'Association suisse de l'industrie du ciment cemsuisse).

En guise de conclusion

Avec notre sensibilité contemporaine qui refuse la dénaturation de l'environnement, avec notre réticence à ériger la moindre éolienne, mais aussi avec notre amour et notre redécouverte du patrimoine industriel, il est étonnant de prendre conscience, au vu des anciennes photos, de l'immensité et de l'importance en termes d'emprise au sol de ces usines - aujourd'hui totalement rasées et dont il ne subsiste plus aucun témoin physique sur le terrain. R. Jenny écrit, à propos de la démolition de l'usine de Grandchamp pendant l'hiver 1928-1929 : « *Ainsi a disparu un témoin historique, un corps de bâtiment de l'usine (qui) avait été construit sur les bases de la porte-tour du poste avancé du Château de Chillon. Cependant, il faudra encore attendre bien après la Seconde Guerre mondiale pour voir disparaître les constructions restantes situées en aval et surtout pour pouvoir admirer le Château de Chillon et ses abords, dégagés de ces bâtisses peu esthétiques* ». Seuls les vestiges de la carrière qui a permis l'exploitation du calcaire, et parfois les bâtiments administratifs, comme à Roche ou Vouvry, rappellent ce passé industriel. Ces usines ont aussi été de fantastiques moteurs de croissance dans des régions excentrées. Enfin, il faut aussi relever le fort attachement des hommes (fig. 9) à leur

usine et leur fierté d'être acteurs du « progrès », dont les barrages alpins de la Grande Dixence ou de Mauvoisin sont d'incontournables symboles des Trente Glorieuses.

L'exploitation et la production de ciment impliquent que l'usine soit à proximité de la ressource, à savoir les calcaires et les marnes : en effet, le coût du transport peut devenir prohibitif au vu des volumes dont il est question, des centaines de milliers de tonnes aujourd'hui. Dans un marché concurrentiel, comme nous l'avons vu, le seuil de rentabilité n'est pas garanti. La rentabilité à long terme passe par l'innovation technologique dont l'avantage provoque la plupart du temps la fermeture d'une usine concurrente. Ainsi, le sort de l'usine de Grandchamp sera scellé par le développement de celle de Roche. De même, l'usine de Baulmes sera évincée par celle de Vouvry. Enfin, l'usine de Roche fermera ses portes devant la concurrence de la nouveauté portée par la cimenterie d'Eclépens. Cette succession de fermetures mais également de rachats conduira à la position dominante actuelle de l'usine d'Eclépens en Suisse romande. Celle-ci possède tous les atouts. Elle est proche d'une voie ferrée et la ressource minérale est littéralement à ses portes. Enfin, comme dernière arrivée sur le marché - le début de sa mise en exploitation date de 1953 - elle a profité régulièrement d'innovations technologiques tout au long de ses bientôt septante ans d'existence, ce qui en a garanti la rentabilité. Il n'en demeure pas moins qu'elle est soumise aux mêmes règles du marché et qu'elle pourrait fermer pour les mêmes raisons que ses devancières.

Quelles sont les perspectives à long terme ? Si l'on tient compte des fondamentaux qui ont permis la rentabilité des cimenteries, il faut convenir que celle d'Eclépens profite de la meilleure localisation possible. La lecture des cartes géologiques est très claire. Sur le territoire vaudois, les sites regroupant les conditions optimales ont déjà été exploités au cours des 140 dernières années. On peut donc faire l'hypothèse qu'à moins que les prix du ciment augmentent vertigineusement, à la fin de l'exploitation de la carrière d'Eclépens, il n'y aura plus de cimenterie « traditionnelle » dans le Canton de Vaud. A cette échéance, si la volonté de conserver cette activité industrielle sur le sol vaudois se manifeste, une solution serait de conserver l'usine pour la production et de rechercher la matière première ailleurs. Cette hypothèse se heurtera, toutefois, à la réalité des coûts générés par le transport du calcaire depuis un site, à définir, au pied du Jura distant certaine-



Figure 9. La fierté des hommes, Roche 1896. Archives Holcim.



ment de plusieurs kilomètres. L'avenir de cette industrie passera certainement plutôt par l'exploitation d'anciens matériaux de construction recyclés.

Remerciements

L'auteur remercie François Girod, géologue et directeur de la cimenterie Holcim d'Eclépens, pour les échanges fructueux, ainsi que pour l'accès aux archives photographiques de l'entreprise. ■

Gilles Borel, géologue, est directeur du Musée cantonal de géologie.

Bibliographie

ANONYME (1971) : L'usine de Roche fête le 75^e anniversaire de sa construction 1896-1971. *Ciment et nous*, 12.

DE CHASTENAY, H. d. (2002) : Roche, un siècle de ciment. Notes non-publiées.

Collectif (1972). Les artisans de la prospérité. Encyclopédie vaudoise. B. Galland. Lausanne, 24 Heures, 3, 1373138.

COLLECTIF (1996) : Commémoration du 100^e anniversaire de l'usine de Roche. Souvenirs des journées du 5, 21 et 22 juin 1996.

DTAP (2021) : Guide de planification pour l'extraction de roches et de terres destinées à la production de ciment. Conférence suisse des directeurs cantonaux des travaux publics, de l'aménagement du territoire et de l'environnement (DATP) l'ARE, l'OFEV, swisstopo et cemsuisse, 72.

GIROD, F. (2014) : Géologie du Mormont. Du calcaire au ciment. *Archéothéma* hors série 7, 10-11.

JENNY, R. (1978) : Il y a cinquante ans disparaissait à Veytaux l'usine de chaux qui avait élaboré la fabrication du ciment "portland" artificiel. *Journal "Chablais"*, 3.

KRAEGE, C., HAHLING, A., GREMION, A., DUROUX, M.-A., ET GIRARD, W. (1991) : Roche : un passé bien présent. Commune de Roche.

MANGOLD, M. F. (1932) : L'industrie suisse des ciments, chaux et gypse. Bâle, Schweizerische Verlags-Druckerei G. Boehm.

MOREL, C. (2013) : <https://arnexhistoire.blogspot.com/2013/03/lancienne-usine-des-chaux-et-ciments-de.html>, 2021.

DU PASQUIER, L. ET CARRARD C. (1895) : Notice relative à un projet d'extension à donner à la fabrication du ciment portland artificiel de l'Usine de Grandchamp à Veytaux par la création d'une nouvelle usine à Roche, 6.

PIGNAT, J.-P. et MERCIER, L. (1978) : L'usine d'Eclépens fête son 25^e anniversaire 1953-1978. *Ciment et nous*, 14.

RIEBEN, H. ET NATHASIVUS, M., (1980) : Portraits de 250 entreprises vaudoises, Fondation Jean Monnet pour l'Europe, Centre de recherches européennes, Lausanne, 24 Heures.

RUDHARDT, P. (1914) : Mines et Carrières, Les industries d'extraction en Suisse. Genève, Edition Atar.

SARTORI, G., BEDWANI, M. ET WICHSSER, F. (1996) : D'esprit, de sel et... de roche : l'histoire d'une cimenterie : HCB Roche 1896-1996. HCB Ciments et bétons «Holderbank» (Eclépens).

SPICHER, G., MARFURT, H. A., STOLL, N. ET POZZY, G. (2013) : Sans ciment rien ne marche : histoire de l'industrie suisse du ciment. Zürich, Neue Zürcher Zeitung (ed).

USGS (2021) : National Minerals Information Center, <https://www.usgs.gov/centers/nmic/iron-ore-statistics-and-information>.

Quelques chiffres importants sur les usines évoquées dans cet article :

	Année de construction	Années d'exploitation	Durée d'exploitation	Années de démolition	Production de ciment (en tonnes)
Grandchamp	1884	1884-1897	13	1929	
Baulmes	1898	1900-1957	57	1961-1972	
Roche	1895	1896-1994	98	2002	6'000 en 1896, 200'000 en 1972
Vouvry-Neuve	1911	1912-1959	47	1980	40'000 après-guerre
Eclépens	1951	1953-	68		800'000 en 2015



La géologie, base d'un urbanisme souterrain durable

par Aurèle Parriaux

La situation d'hier et d'aujourd'hui

Si vous demandez à un urbaniste de quoi est fait le sous-sol de la ville dont il s'occupe, la plupart du temps il vous avouera qu'il n'en a aucune idée. Cet état de fait s'explique par plusieurs raisons. Parmi elles, mentionnons :

- le sous-sol est perçu par les gestionnaires de la ville comme un milieu hostile, mal connu, un milieu qui ne peut que vous causer des ennuis, donc où il faut aller le moins possible ;

- lorsqu'on doit tout de même y implanter des ouvrages, on s'empresse d'oublier cette phase ingrate de la construction ;

- les urbanistes sont généralement des architectes qui n'ont pas eu le moindre cours de géologie durant leur formation universitaire ;

- les réflexions sur le développement de la ville portent essentiellement sur une approche bidimensionnelle.

On ne sera donc pas très étonné que les réalisations effectuées dans le sous-sol des villes aient souvent donné lieu à des conséquences fâcheuses sur la ville et son en-

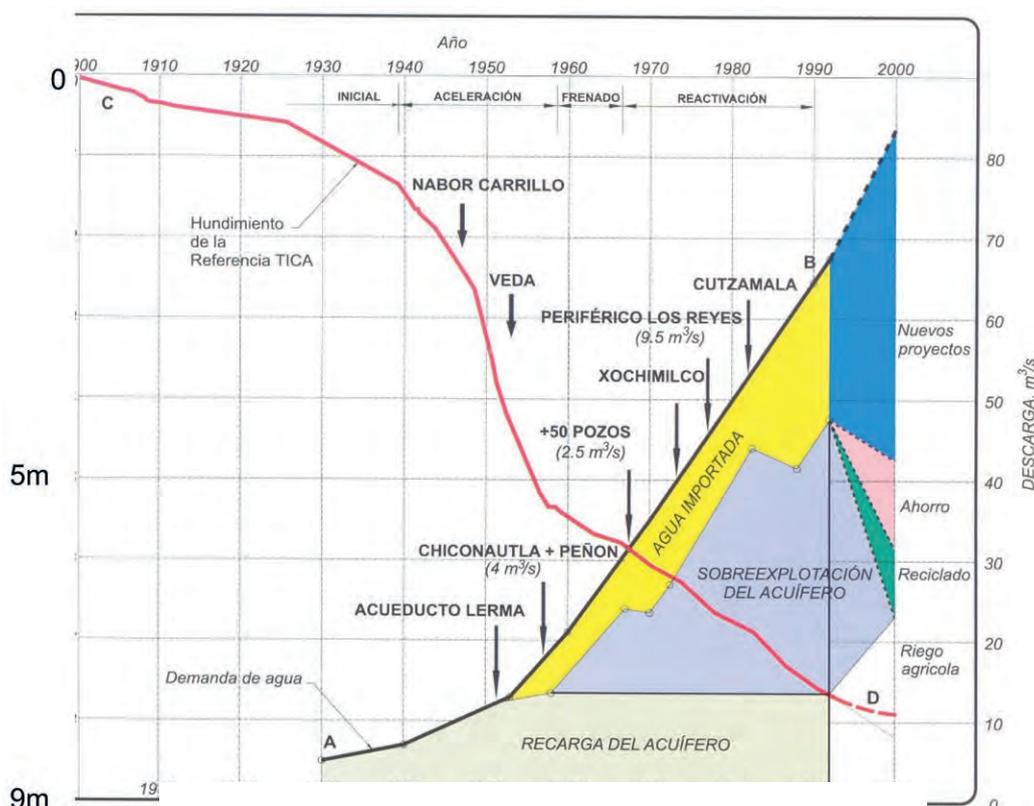


Figure 1. En rouge, courbe de l'affaissement de la surface topographique du centre de Mexico-City. En noir, courbe de l'exploitation des eaux souterraines dans les aquifères sous la ville (González-Morán et al., 1999).



vironnement. Il suffit de mentionner à titre d'exemple la ville de Mexico qui a subi un abaissement de la surface du sol de 9 mètres suite à la surexploitation des aquifères et à la construction du métro (fig. 1).

Le sous-sol au service de la ville durable

La recherche effectuée par le GEOLEP-EPFL dans le cadre du programme PNR54 s'était fixé comme objectif de changer cette perception négative du sous-sol urbain en présentant ce milieu comme un volume riche en ressources utiles pour le développement durable de la ville. Plus précisément, le sous-sol urbain contient quatre ressources principales utiles à la ville (fig. 2) :

- l'espace pour construire
- les géomatériaux extraits lors des constructions souterraines
- l'énergie géothermique
- les eaux souterraines.

Les auteurs de cette recherche, baptisée « DEEP CITY », ont développé une méthodologie devant optimiser l'usage de ces ressources et servir d'outil aux urbanistes pour introduire la composante souterraine dans l'aménagement (Parriaux et al., 2010).

La recherche DEEP CITY a d'abord identifié les raisons de l'usage souvent peu adéquat du sous-sol. La principale cause est l'approche sectorielle des projets (fig. 3).

Synergies ? Oui. Conflits ? Non.

La méthodologie DEEP CITY a défini la notion d'usage multiple des ressources. En d'autres termes, comment un volume géologique sous la ville peut être utilisé pour plusieurs usages à la fois, au contraire de ce qui s'est fait jusqu'alors, où un usage à un moment donné condamne tout autre usage ultérieur.

Lorsqu'un usage multiple est possible, par exemple espace et géothermie au moyen de géostructures énergétiques, on obtient une synergie d'usages (fig. 4).

Lorsqu'un usage inhibe d'autres usages, on est en situation de conflit où il est nécessaire de prioriser l'usage le plus fondamental pour le développement durable. Pour reprendre l'exemple évoqué dans la figure 3, on va choisir d'implanter un tunnel au-dessus d'une nappe d'eau potable plutôt que dans l'aquifère, comme cela a été choisi dans le cas du franchissement de l'Arve par le train CEVA à Genève (fig. 5, expertise pour le compte du Service géologique du Canton de Genève).

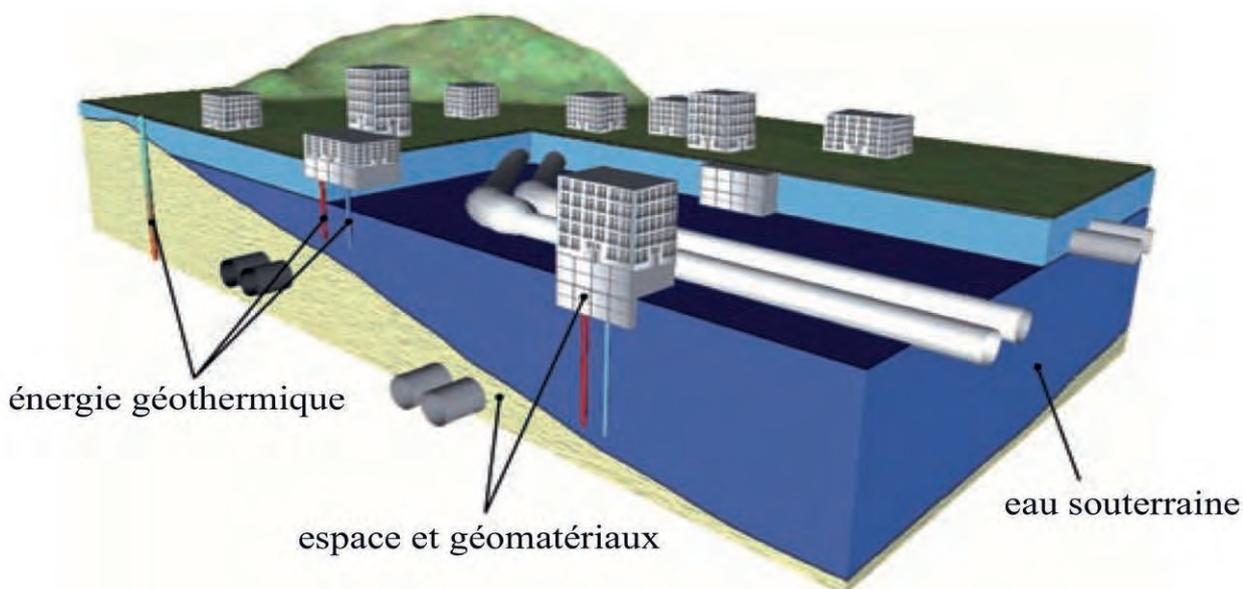


Figure 2. Les quatre ressources principales du sous-sol urbain (Parriaux et al., 2010).

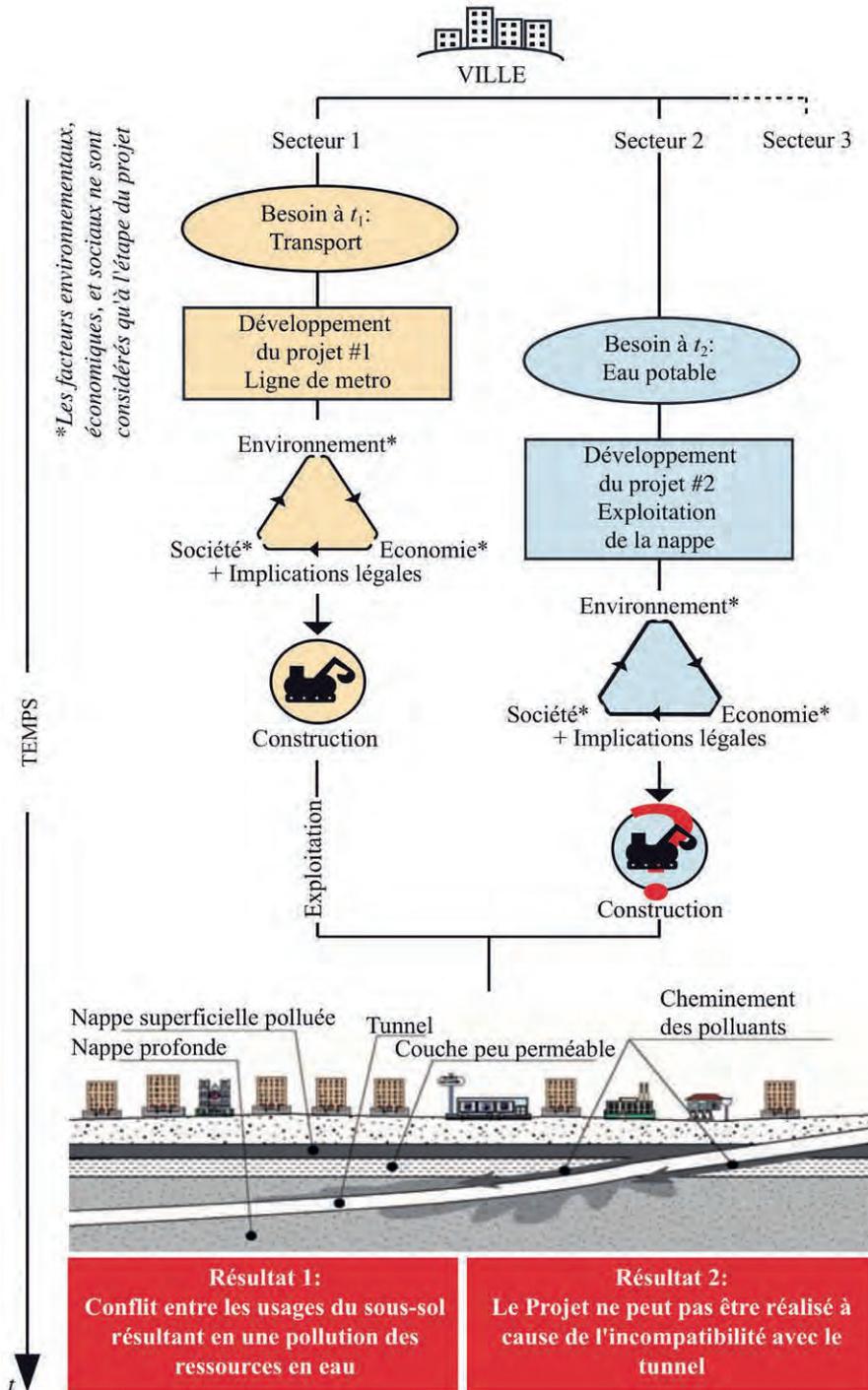
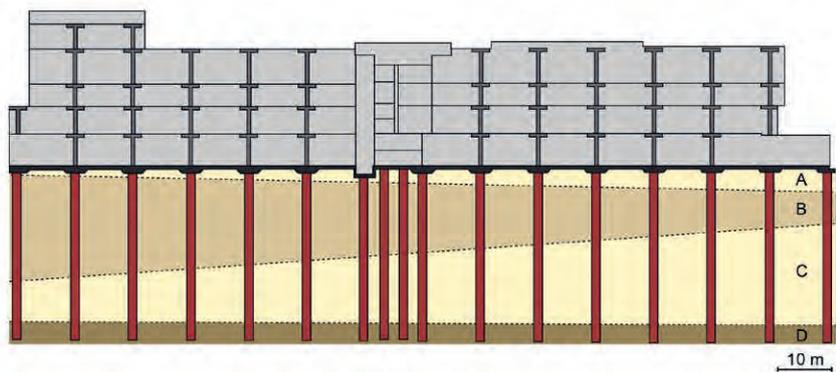


Figure 3. Exemple d'utilisation du sous-sol urbain selon l'approche sectorielle. Au temps t_1 , la ville a besoin d'une infrastructure de transport. Elle crée un réseau de métro en optimisant les conditions propres à ce besoin. Au temps t_2 , elle a besoin d'augmenter son alimentation en eau potable. Un aquifère présent en profondeur sous la ville permettrait a priori de répondre à ce besoin. Cependant, on constate que cette réserve en eau a été péjorée par la construction du métro. Le rôle de by-pass des tunnels entre un aquifère superficiel pollué et des ressources profondes constitue un cas typique (schéma au bas de la figure). L'usage de ce réservoir naturel devient difficile, voire impossible. Un usage du sous-sol a dans un tel cas prétérité d'autres usages possibles de ce volume géologique (Parriaux, 2009).



2^e année de mesure (1.10.2005 - 30.9.2006)

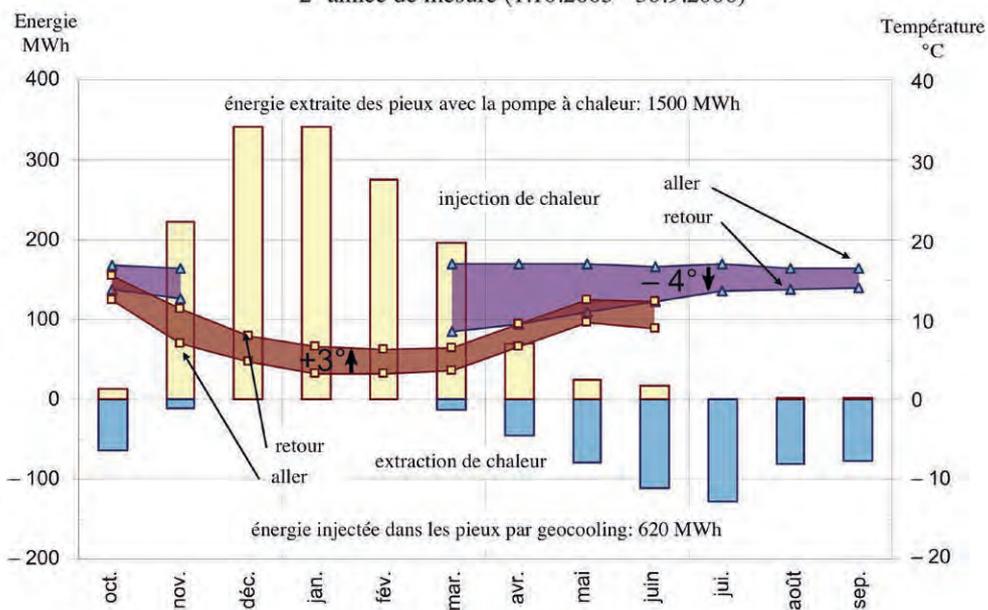


Figure 4. (page précédente) (a) Le terminal E de l'aéroport de Zurich possède plusieurs centaines de pieux en raison de conditions de fondation difficiles sur des sédiments lacustres (A et C : limon et sable fin. B : limon argileux. D : moraine). Une partie de ces pieux est équipée d'échangeurs de chaleur. (b) Pieu géothermique avec tubes échangeurs fixés à l'armature qui seront moulés dans le béton. (c) Le sous-sol est utilisé pour chauffer le bâtiment en hiver et le refroidir en été par geocooling, donc en puisant des frigories dans le sous-sol. Le graphique montre le bilan énergétique de la 2^e année de fonctionnement. Les barres beiges décrivent l'énergie thermique extraite des pieux durant la saison froide ; cette chaleur est produite en prélevant 3°C sur le fluide caloporteur dans les pieux (graphe rouge). Les barres bleues correspondent à l'énergie de refroidissement durant l'été ; ce froid entraîne un réchauffement de 4°C dans le circuit primaire (graphe violet). On constate que la température dans les pieux en fin d'hiver reste bien au-dessus de 0°C, évitant ainsi tout risque de gel de terrain contre les pieux. L'efficacité du système est excellente : le rapport entre l'énergie produite (chaud et froid) et l'énergie électrique pour la pompe à chaleur et les pompes de circulation est de 5. Ceci permet d'amortir le surcoût d'installation par rapport à un système conventionnel en 6 ans (Parriaux, 2009).

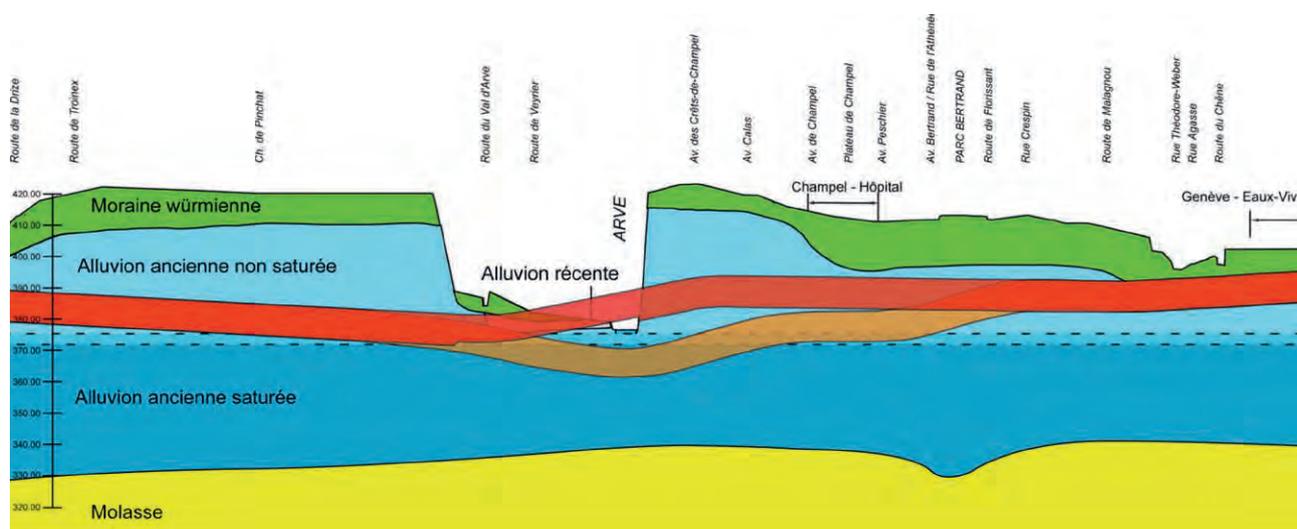


Figure 5. Deux variantes de franchissement de la vallée de l'Arve à Genève par la ligne de train CEVA. La variante rouge, qui ne pénètre pas dans la Nappe fluvioglaciaire du Genevois, a été préférée à la variante orange.

Une matrice des synergies et des conflits potentiels a été rédigée à l'issue du projet DEEP CITY, permettant de rendre attentif le gestionnaire aux différentes interactions entre les ressources, positives et négatives (fig. 6). Deux doctorats ont été effectués à l'EPFL dans le cadre du PNR54 :

sur la partie géologique et ingénierie (Blunier, 2009).

sur le volet perception du sous-sol (Maire, 2011).

Le géologue chef d'orchestre

Tant dans la phase de constitution du modèle géologique tridimensionnel sous la ville et dans la paramétrisation des propriétés du sous-sol, que dans l'identification des synergies d'usage, le géologue joue un rôle central par sa connaissance du sous-sol et des usages possibles de celui-ci. Autour de lui s'articulent les spécialistes des dif-

férents domaines sectoriels, urbanistes, ingénieurs civils, énergéticiens, hydrogéologues etc.

La géologie est l'intrant principal qui va guider la gestion optimale des ressources. Il faut être conscient qu'il y a autant de géologies diverses que de villes sur la Planète. La rédaction du modèle géologique 3D joue donc un rôle majeur pour toute la suite des opérations. En Suisse, par exemple, rien n'est comparable entre Bâle, Zurich, Genève et Lausanne. Les conditions changent donc dans chaque cas mais la méthodologie DEEP CITY est applicable dans tous les cas.

L'aménagement du territoire : du 2D au 3D

L'introduction de la troisième dimension dans l'urbanisme n'est pas incompatible avec la philosophie de l'aménagement du territoire. Au contraire, elle apporte un complé-



		AGENT IMPACTÉ			
		 Espace	 Eau Souterraine	 Géothermie	 Géomatériaux
AGENT IMPACTANT	Espace	<ul style="list-style-type: none"> -Conflit d'espace -Subsidence +Mise en réseau 	<ul style="list-style-type: none"> -Concurrence hydrogéologique -Effet barrage -Pollution des eaux¹ -Court-circuits entre aquifères +Captages dans les ouvrages souterrains 	<ul style="list-style-type: none"> +Géostructures énergétiques +Valorisation thermique des flux techniques 	<ul style="list-style-type: none"> -Élimination des matériaux d'excavation +Valorisation des géomatériaux
	Eau Souterraine	<ul style="list-style-type: none"> -Infiltration dans les ouvrages -Poussée d'Archimède -Subsidence et soulèvement -Corrosion et détérioration des ouvrages 	<ul style="list-style-type: none"> -Concurrence hydrogéologique 	<ul style="list-style-type: none"> -Dessaturation des terrains 	
	Géothermie	<ul style="list-style-type: none"> -Conflit d'espace -Modifications thermo-mécaniques -Gel du terrain -Impact des prélèvements 	<ul style="list-style-type: none"> -Concurrence hydrogéologique -Effet barrage -Pollution des eaux¹ -Modifications de l'activité biologique -Modification des paramètres physico-chimiques 	<ul style="list-style-type: none"> -Interaction des plumes de froid ou de chaud -Surexploitation du flux thermique 	
	Géomatériaux	<ul style="list-style-type: none"> +Coordination extractions-constructions 	<ul style="list-style-type: none"> -Modifications du bilan hydrogéologique -Effet barrage -Court-circuits entre aquifères -Pollution des eaux¹ 		

¹Pollution des eaux = infiltration d'eau de ruissellement, pollution par les matériaux d'injection, mobilisation de polluants, fuite de liquide caloporteur

Figure 6. Matrice des synergies (vert) et conflits (rouge) pour des différents usages du sous-sol urbain retenus pour le projet DEEP CITY (tiré de Parriaux et al., 2010).

ment indispensable pour un développement harmonieux de la ville. Elle implique toutefois un rattrapage urgent. Cela fait des décennies que l'on rédige des plans d'aménagement. En revanche, on n'a pas encore commencé à intégrer cette dimension souterraine. Dans quelques cantons, dans quelques pays, on a organisé la sauvegarde des informations géologiques, notamment des sondages. On a donc une information de base fort complète, mais qui est sous-exploitée.

La prise en compte du potentiel souterrain de la ville ne se fait pas indépendamment de l'aménagement du territoire surfacique. Tous deux doivent se raccorder. A l'issue d'une étude DEEP CITY, l'affectation potentielle de volumes géologique à tels ou tels usages doit s'intégrer dans la structure urbanistique de la ville en tenant compte des flux de population, des affectations de zones, des potentiels de développement économiques.

Sur le plan légal, le Code civil suisse rend possible l'application de la méthodologie, puisqu'il limite la propriété privée d'un fond d'une manière souple. L'article 667 al. 1 dit : *La propriété du sol emporte celle du dessus et du dessous, dans toute la hauteur et la profondeur utile à son exercice.*

L'auteur a collaboré avec l'Office fédéral du développement territorial pour déterminer comment introduire un article dans une nouvelle version de la Loi fédérale sur l'aménagement du territoire (LAT), article stipulant que le sous-sol fait partie intégrante du territoire et qu'il doit être intégré dans les projets d'aménagement. Cet article devrait être introduit dès que possible.

Trop compliqué ? Trop long ? Trop cher ?

Le rattrapage selon la méthodologie DEEP CITY, depuis l'établissement du modèle géologique jusqu'à l'affectation des différents volumes géologiques à tels ou tels

usages, est réalisable par des bureaux d'études possédant une large multidisciplinarité, comme c'est le cas déjà pour d'autres types d'étude, ainsi des impacts sur l'environnement, par exemple.

Une telle étude pour une agglomération urbaine de taille moyenne est de l'ordre d'une année. Lorsque des villes possèdent déjà un modèle géologique, on peut réduire encore cette durée.

Le coût, toujours pour une ville de taille moyenne, est de l'ordre de 100 à 200'000 Fr. En comparaison avec les coûts de l'établissement des plans ordinaires d'aménagement, on réalise bien que cette opération est économiquement supportable. Elle l'est d'autant plus qu'elle évite

de coûteux dégâts, qui ne manqueront pas de se produire à terme si elle n'est pas appliquée.

Une fois le rattrapage effectué, le secteur public de la ville en tire plusieurs bénéfiques :

- par une série d'incitations et quelques limitations, les gestionnaires de la ville arrivent à guider le développement selon les objectifs à long terme ;
- les conditions de construction étant plus claires à la base, les tâches de contrôle administratifs des projets de construction s'en trouvent allégées.

Par voie de conséquence, le secteur privé bénéficie aussi de cette introduction :

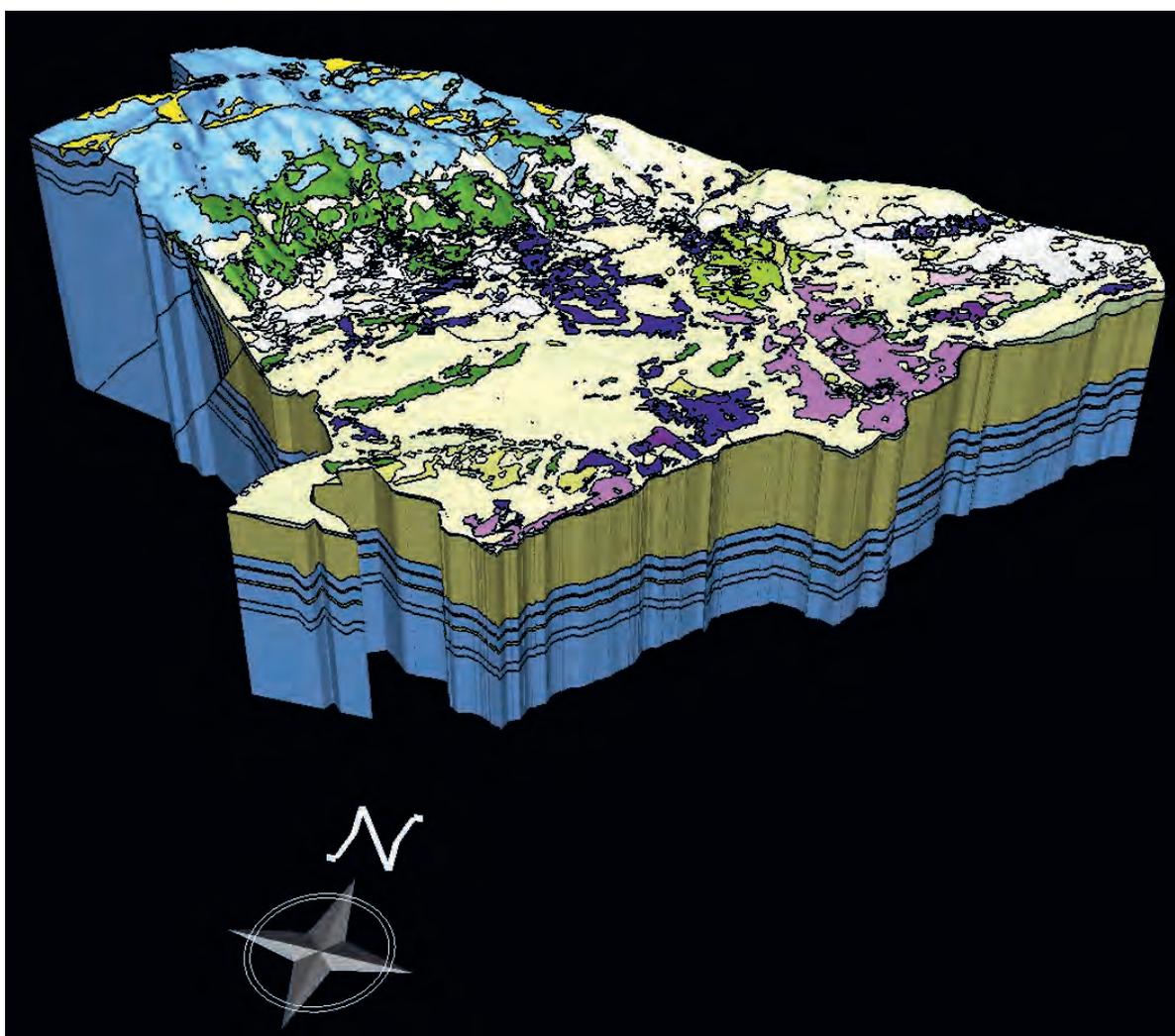


Figure 7. Modèle tridimensionnel en géotypes de la feuille au 1: 25'000 Nyon. Projet APOGEE.



- par la clarté de ce qui est permis ou non, le constructeur peut établir un projet qui présente peu de risque d'être refusé au niveau des autorisations ;

- les incitations vers des synergies permettent des économies substantielles, par exemple en énergie.

En pratique, le futur a déjà commencé

Nous avons mentionné le projet CEVA à Genève qui a même précédé le projet PRN54 où l'auteur a appliqué déjà ses thèses. Ensuite, le Canton de Vaud a organisé le projet APOGEE (Atlas du POTentiel GEothermique très basse Energie) où le potentiel géothermique a été cartographié de manière tridimensionnelle en tenant compte de la protection des aquifères (fig. 7) (Jolimet et al., 2010). C'est une sorte de DEEP CITY à deux paramètres au lieu de quatre. Il a utilisé pour cela une base géologique simplifiée sous la forme de géotypes (Parriaux et Turberg, 2007) qui permet une cartographie homogène et cohérente pour tout le territoire cantonal.

En 2014, la Ville de Lausanne, en cofinancement avec le Canton de Vaud, a procédé à une étude DEEP CITY sur son territoire, afin d'introduire la dimension souterraine dans sa révision du plan d'aménagement communal. Cette étude a été menée par le bureau CSD Lausanne (CSD Ingénieurs SA, 2014).

A l'étranger, la Ville de Paris a lancé son projet Ville-10D, qui reprend la philosophie de la méthodologie DEEP CITY (Projet National « Ville 10D – Ville d'idées », 2012) et Li Huanqing, dans son doctorat à l'EPFL, a appliqué la méthode à la ville de Souzhou, à propos d'un projet DEEP CITY CHINA, financé par un projet de collaboration avec l'Université de Nankin (Li, H. et al., 2013). En mettant en évidence les zones de conflit et de synergie, elle a pu développer une approche économique des espaces souterrains (fig. 8).

Le doctorat de Michael Doyle a prolongé la méthodologie, en testant celle-ci sur d'autres villes sur d'autres continents et en mettant l'accent sur la relation entre le

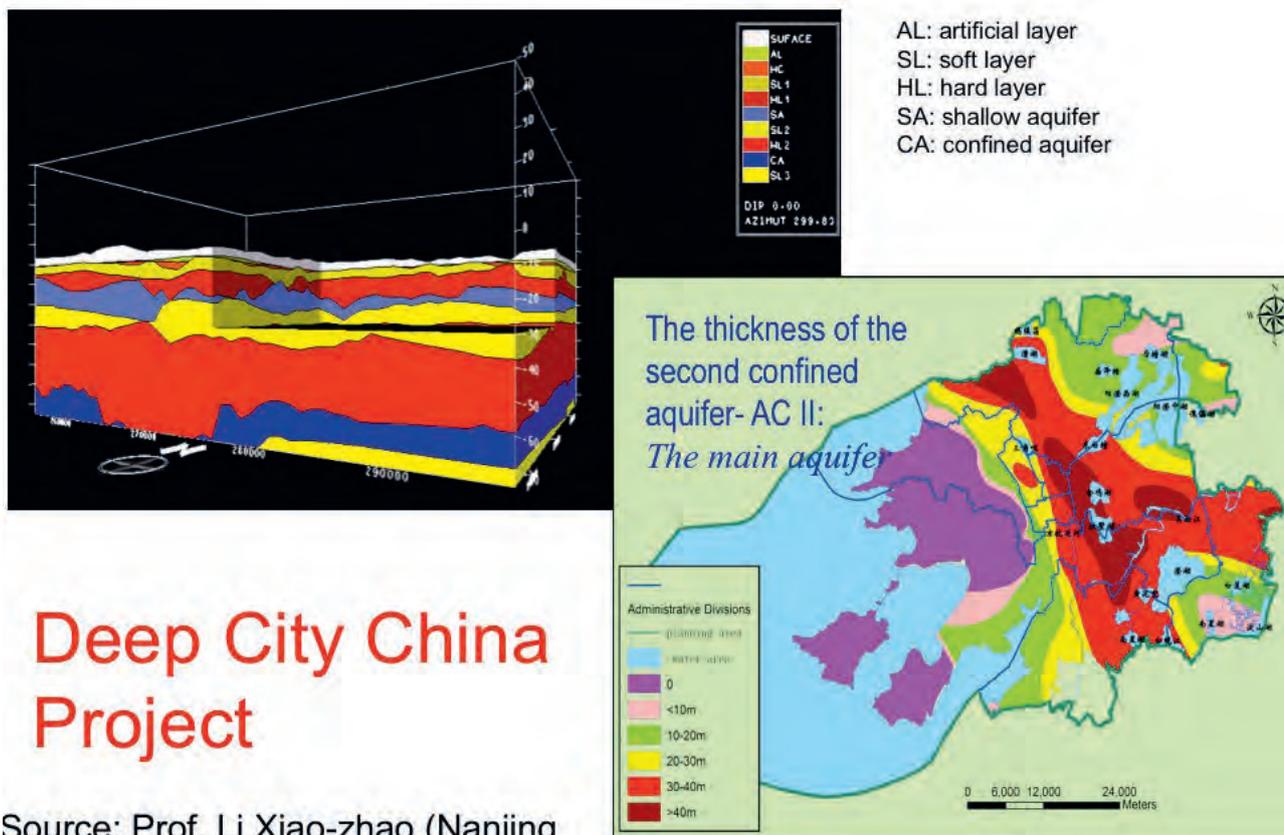


Figure 8. Application de la méthode Deep-City à la ville de Souzhou dans le delta du Jantse. Carte des isopaques du second aquifère sableux. Projet Deep-City China (Li et al., 2013).

Projet Deep City Verbier

Dépôts quaternaires meubles et substratum rocheux

Légende

	Alluvions et cônes actuels
	Alluvions de plaines actuelles
	Colluvions / Eluvions
	Eboulis / Eboulements / Ecoulements
	Fluvio-glaciaire
	Glacio-lacustre
	Terrain glissé
	Glacier rocheux
	Moraines latérales
	Dépôts palustres (marais)
	Remblais artificiels
	Rocher

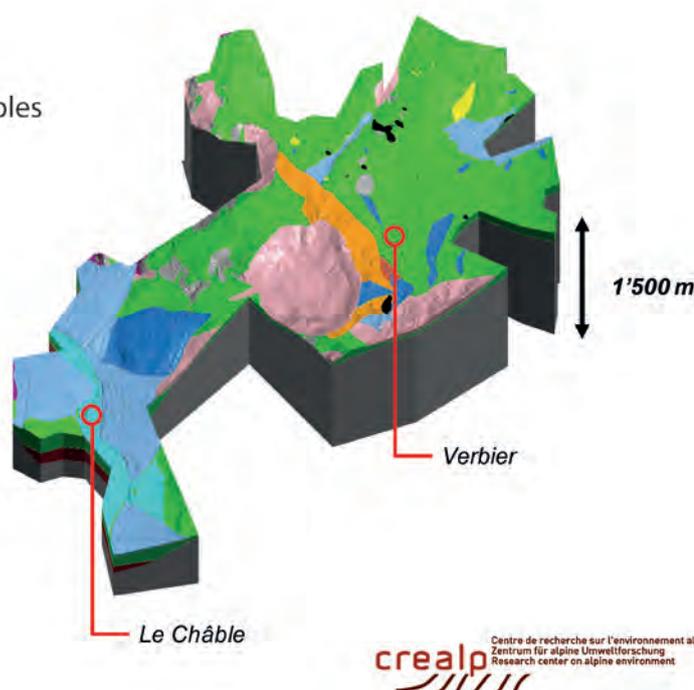


Figure 9. Modèle géologique 3D de Deep City Verbier-Curala. Légende des géotypes du Quaternaire. Extrait du rapport intermédiaire du consortium Deep City Verbier.

potentiel de ressources souterraines et la structure urbaine de la ville en surface (Doyle et al., 2016). C'est ainsi qu'ont été traitées les villes de San Antonio (Texas), Montréal, Hong-Kong et Dakar.

Plus récemment, la Commune de Bagnes a entrepris une démarche similaire pour la station de Verbier, confrontée à des problèmes de gestion de l'espace urbain en période de forte fréquentation (50'000 habitants). Le projet est mené par un consortium de bureaux privés valaisan en collaboration avec le CREALP. Ce cas est très intéressant en raison de son contexte topographique et géologique particulièrement complexe (fig. 9). Il a été présenté à la réunion de l'ACUUS à Wuhan en 2019 (Parriaux, 2019).

Construire en souterrain : est-ce écologique ?

La construction souterraine en milieu urbain souffre de nombreux préjugés négatifs, tant pour ce qui est des coûts que de la performance environnementale globale, notamment en termes de consommation énergétique. Récemment, les scientifiques de DEEP CITY ont repris les comparaisons faites dans le projet PNR54 en développant une réponse détaillée à cette question (fig. 10 et Tab. 1). Un premier article a été publié dans la revue internationale Building (Doyle, M. R. et al., 2019). Une version en

français est parue dans la revue Tracés de la SIA (Doyle et al., 2020).

Cette étude démontre que ces idées préconçues sont des idées fausses. Premièrement, les études géologiques requises pour tout projet de construction peuvent réduire de façon significative l'incertitude a priori liée au sous-sol, révélant d'éventuels problèmes d'état du sol ou la présence de polluants. L'absence ou l'insuffisance de telles études préliminaires constituerait une erreur professionnelle de la part de l'ingénieur. Deuxièmement, l'augmentation possible des coûts de construction varie, dans le cas étudié ici, entre 10 et 25 %, selon les conditions géologiques, et ce, sans tenir compte des économies possibles grâce aux systèmes géothermiques ou aux travaux conjoints surface-souterrain. Enfin, la performance énergétique sur la durée de vie du bâtiment est similaire à celle d'un équivalent bien isolé en surface, même quand on prend en compte l'énergie nécessaire pour l'excavation, l'évacuation des matériaux excavés et la production des matériaux de construction.

Il est malheureux que de telles idées fausses influencent l'urbanisme et la conception architecturale en défaveur d'une solution permettant d'augmenter la densité de construction tout en respectant les limites de hauteur

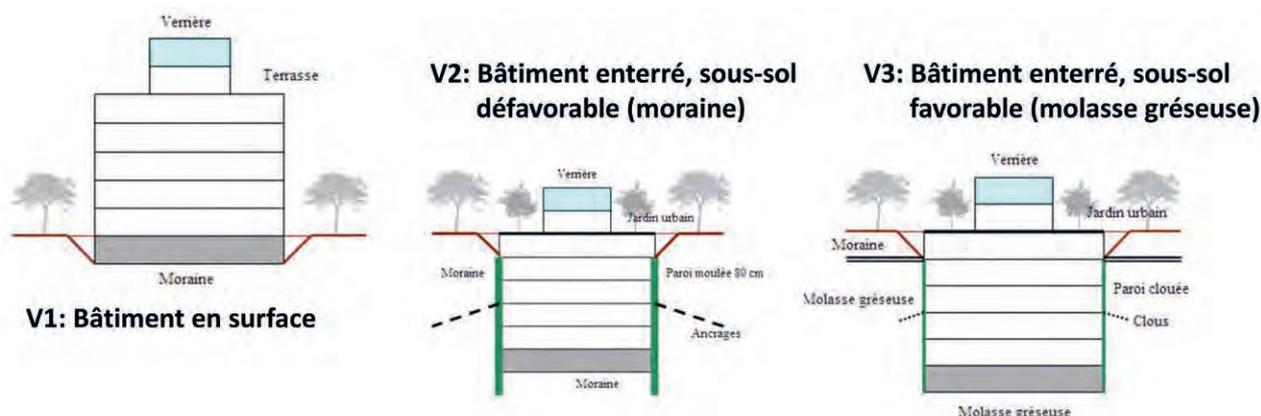


Figure 10. Trois configurations de centre commercial (Doyle et al., 2020)

	V2/V1 (variante en moraine comparée à celle en surface)	V3/V1 (variante en molasse gréseuse comparée à celle en surface)	V2/V3 (variante en moraine comparée à celle en molasse gréseuse)
Uniquement bâtiment	1,23	1,1	1,12
Bâtiment + terrain avantageux	1,21	1,09	1,11
Bâtiment + terrain moyen	1,19	1,08	1,1
Bâtiment + terrain cher	1,15	1,06	1,08

Tableau 1. Comparaison des prix de revient (terrain + construction) des trois variantes (Doyle et al., 2020).

locales, en préservant les espaces verts urbains et les espaces publics ouverts, ainsi qu'en favorisant la biodiversité urbaine.

Conclusion

La géologie et le géologue, qui jouaient les premiers rôles du temps des Lugeon, au début du XX^e siècle, ont progressivement passé au second plan durant ces dernières décennies, venant en appui à l'ingénieur civil en cas de nécessité. Le développement de la méthodologie DEEP CITY montre qu'en fait le géologue est le partenaire idéal pour initier et piloter des grands projets urbains faisant appel aux ressources souterraines. Cela nécessite cependant qu'il s'intéresse de près aux technologies de l'ingénieur et à l'urbanisme, afin d'être capable d'être la plaque tournante qui relie les nombreux intervenants aux compétences fort diverses. Ce rôle-clé dans le développement de la ville est également très valorisant sur le plan social.

Pour l'urbaniste, l'intégration du sous-sol dans ses projets est d'abord un peu désécurisant, vu l'absence de maîtrise qu'il a de ce milieu. La pratique montre cependant que l'élargissement de la notion de territoire permet de concevoir un urbanisme plus conscient des enjeux de la durabilité. C'est donc un partenariat finalement gagnant-gagnant. ■

Aurèle Parriaux, géologue et hydrogéologue conseil, est professeur émérite EPFL.

Bibliographie

BLUNIER, M. (2009) : Méthodologie de gestion durable des ressources du sous-sol urbain. Thèse No 4404, EPFL, Lausanne.

CSD ingénieurs SA (2014) : Commune de Lausanne, révision du Plan directeur communal, Prise en compte des ressources du sous-sol.

DOYLE, M. R., THALMANN, PH. ET PARRIAUX, A. (2016) : Potentialities of the urban volume mapping underground resource potential and deciphering spatial economies and configurations of multi-level urban spaces. Thèse, EPFL, Lausanne.

DOYLE, M. R., THALMANN, PH. ET PARRIAUX, A. (2019) : Embodied Energy and Lifecycle Costs : Questioning (Mis) conceptions about Underground Construction. Buildings, 9 (8), 188.

DOYLE, M. R., PARRIAUX, A. ET THALMANN, PH. (2020) : Construire en sous-sol : Un bilan économique. In : TRACÉS, 14 (décembre), 8-14.

GONZÁLES-MORÁN, T., RODRIGUEZ, R. ET CORTES, S. A., (1999) : The Basin of Mexico and its metropolitan area : Water abstraction and related environmental problems. Journal of South American Earth Sciences, 12, 607-613.

JOLIMET, TH., TACHER, L., PARRIAUX, A., WEIDMANN, M. ET GIORGIS, D. (2010) : Première étape de la modélisation géologique 3D du canton de Vaud : la feuille de Nyon. In : Abstract Volume 8th Swiss Geoscience Meeting, vol. 14, Geoscience and Geoinformation - From data acquisition to modelling and visualisation, p. 290, Swiss Academy of Sciences.

LI, H., THALMANN, PH. ET PARRIAUX, A. (2013) : An integrated Strategy for Sustainable Underground Urbanization. Thèse, EPFL, Lausanne.

MAIRE, P. (2011) : Étude multidisciplinaire d'un développement durable du sous-sol urbain. Aspects socio-économiques, juridiques et de politique urbaine. Thèse, EPFL, Lausanne.

PARRIAUX, A. ET TURBERG G, P. (2007) : Les géotypes, pour une représentation géologique du territoire. In : Tracés, Bulletin technique de la Suisse romande, 15/16, 11-17.

PARRIAUX, A. (2009) : Géologie : Bases pour l'ingénieur. 2^e édition revue et augmentée. PPUR Lausanne, ISBN 978-2-88074-810-4.

PARRIAUX, A., BLUNIER, P., MAIRE, P., DEKKIL, G. ET TACHER, L. (2010) : Projet Deep City – Ressources du sous-sol et développement durable des espaces urbains. Rapport de recherche PNR 54, Fonds national suisse FNS/ETHZ.

PARRIAUX, A. (2019) : Application of the DEEP-CITY methodology to the Tourist Resort of Verbier (Swiss Alps). Key-note conference, meeting of ACUUS (Associated Research Centers for the Urban Underground Space), Wuhan.

Projet national « Ville 10D – Ville d'idées » Différentes Dimensions pour un Développement urbain Durable et Désirable Décliné Dans une Dynamique « Dessus / Dessous » : Etude réalisée dans le cadre des opérations soutenues par le MEEDDM et le RGCU. M. le Nir, M. Labbé, M. Defayot, P. Duffaut, M. Gérard, MC. Barré. Avec la collaboration de Laboratoires d'Universités, Etablissements Publics, Collectivités, Aménageurs, entreprises, Bureaux d'études, Experts, intéressés par le Projet national.



Les cartes et plans des Archives cantonales vaudoises : une mine patrimoniale qui ne manque pas de sel!

par Pierre-Yves Pièce

Les Archives cantonales vaudoises (ACV) conservent un important fonds de cartes historiques et de plans cadastraux. Cette collection, l'une des plus anciennes et des plus complètes de Suisse (Coutaz, 2014), s'échelonne de la période bernoise au début du XX^e siècle. Réparti dans deux séries distinctes, Gb pour les registres de plans visuels ou géométriques, puis plans cadastraux dès 1803, et Gc pour les cartes et plans isolés dès la fin du XVI^e siècle¹, ce fonds présente un intérêt certain pour l'étude de l'histoire des ressources minières du canton, et particulièrement pour celle de l'exploitation du sel dans l'actuel Chablais vaudois. Depuis près de cinq siècles, la quête ininterrompue de l'or blanc a laissé de nombreuses traces, tant sur le terrain que dans les archives.

Les travaux les plus connus sont évidemment ceux des différents directeurs des mines qui établissent, dès le XVIII^e siècle, des cartes géologiques de première importance : en 1788, François Samuel Wild², capitaine des Mines, publie son *Essai sur la montagne salifère du gouvernement d'Aigle* (Wild, 1788) accompagné d'une carte géologique, basée sur celle de Gruner³, elle-même établie à partir des relevés topographiques d'Isaac Gamaliel de Rovéréa⁴. Au XIX^e siècle, Jean de Charpentier⁵ publie

différentes cartes, dont celle du gisement de gypse de Bex, très proche de celle que l'on pourrait représenter aujourd'hui. L'hommage de Maurice Lugeon, professeur ordinaire de géologie, paléontologie et géographie physique à l'Université de Lausanne, résume l'effervescence de cette époque : « *C'est autour de ces sombres entrailles que nos premiers géognostes apprirent à bégayer la géologie, les Haller, les Rovéréa, les Struve, les Wild, les de Charpentier, les Lardy. Et voilà pourquoi je suis ému chaque fois que je passe là-bas* »⁶. Lugeon oublie Charles-François Exchaquet, l'auteur du relief du gouvernement d'Aigle « *comprenant tous les détails intéressants pour les ouvrages des Mines* », cas unique dans notre pays d'utilisation de tels reliefs pour des motifs économiques et industriels (Pièce, 2012).

Avant la fin du XVII^e siècle, on ne trouve pas de documents cartographiques relatifs à nos mines de sel. Il faut attendre la reprise de l'exploitation par Leurs Excellences de Berne, en 1685, pour voir apparaître les premiers relevés topographiques. Ils se trouvent actuellement aux Archives cantonales vaudoises, mais pas forcément dans les séries mentionnées ci-dessus. Il faut en effet se plonger dans la série Bv consacrée à la période bernoise des mines et salines, rapatriée de Berne entre 1798 et 1848⁷, pour les découvrir. Enfin, un fonds important conservé dans les locaux de la Société vaudoise des Mines et Salines de Bex a été versé aux ACV en 2002. Il est désormais consultable sous la cote N6. Composé de

sel de Bex dès 1813, auteur du fameux *Essai sur les glaciers* publié en 1841.

⁶ LUGEON, Maurice, « *L'Origine des Alpes vaudoises* », Conférence faite à Lausanne, le 15 novembre 1913, dans la séance solennelle du Cinquantenaire de la Section des Diablerets du Club Alpin Suisse.

⁷ Différentes archives concernant les mines et salines se trouvent encore à Berne, tant aux Archives d'État qu'à la Bibliothèque de la Bourgeoise de Berne.

¹ DAVEL, « *G Cadastre et plans* », in Inventaire des Archives cantonales vaudoises, url: <http://www.davel.vd.ch/detail.aspx?ID=274>, consulté le 01.09.2014.

² WILD, François Samuel (1743-1802) capitaine général des salines à l'époque bernoise, puis directeur après la révolution vaudoise.

³ GRUNER, Gottlieb Sigmund (1717-1778) proposa la première théorie générale des glaciers dans son ouvrage *Die Eisgebirge des Schweizerlandes* (3 vol., 1760-1762).

⁴ DE ROVÉREA, Isaac Gamaliel (1695-1766), ingénieur des mines et cartographe, auteur de la carte du gouvernement d'Aigle levée de 1734 à 1744.

⁵ DE CHARPENTIER, Jean (1786-1855), directeur des mines de



six rubriques principales, il contient de nombreux plans et cartes couvrant la période du XVIII^e au XX^e siècles.

Afin de démontrer l'apport des cartes et plans à l'histoire des mines et salines, quatre cas concrets sont étudiés ci-après :

- Retour aux sources : le site emblématique de Salins sur Ollon
- Le sel de Bex n'est pas si vieux : les débuts de la saline du Bévieux
- Fontaine salée, Dard, Entre deux Gryonnes : les mines oubliées
- Technique et géologie : les percées des Anciens

Ils mettent en lumière l'intérêt de ces documents riches en informations et soulignent la nécessité d'en garantir la bonne conservation.

Retour aux sources : le site emblématique de Salins sur Ollon

L'on pense communément que la production de sel indigène trouve son origine à Bex. Cependant, c'est bien dans les hauts de la commune voisine d'Ollon que débute la quête de l'or blanc dans notre pays. En janvier 1554, le gouvernement bernois octroie une concession à Nicolas de Graffenried, pour l'exploitation d'une source salée située dans la région de Panex. Rapidement, de riches bourgeois d'Augsburg obtiennent à leur tour des concessions et développent le site de Salins. De ces premières constructions, seul un pilier de bâtiment de graduation – système permettant de concentrer la saumure avant son évaporation par le feu – est encore visible. D'autres vestiges, tels que l'entrée des premières galeries et l'ancienne maison factorale, ont pu être localisés grâce aux anciennes cartes.

Le « *Plan du Terroir des Dixains Darveye et Villard* »⁸, dressé par le commissaire Pierre Grevoulet entre 1708 et 1710, permet de se faire une excellente idée du complexe salifère tel qu'il se présentait au début du XVIII^e siècle (fig. 1). On y distingue clairement la maison du facteur des sels, la maison où l'on cuit le sel, la forge, les auges (bâtimens de graduation) et la fosse de la source salée. La localisation de l'emplacement de l'ancienne maison fac-

torale, souvent confondue avec l'actuel beau bâtiment de Salins construit en 1727 seulement, a été possible grâce à un repérage sur le terrain. Elle se trouvait plus haut, dans un virage du chemin menant à Plambuit. Sur place, on distingue encore quelques traces de murs recouverts par la végétation, ainsi que les plates-formes sur lesquelles se dressaient à l'époque les granges et le jardin.

Un plan, celui du « *Fondement de Panex* »⁹ dressé par Isaac Gamaliel de Rovérea en 1721, confirme la présence de la maison du facteur et de l'écurie. Une maison du sel, une grange ainsi qu'un « *cartier* » des mineurs sont également représentés. De plus, le réseau des galeries avec la localisation des sources salées est minutieusement documenté (fig. 2).

Le recoupement de ces cartes avec des cartes modernes a permis de localiser très précisément l'emplacement des premiers ouvrages sur le site de Salins. D'autres investigations sont encore en cours et permettront d'affiner la compréhension de l'ensemble.

La documentation d'un objet remarquable, classé à l'inventaire des monuments historiques vaudois, a également été richement étoffée grâce à l'étude de différents plans conservés aux ACV. Il s'agit du réservoir à saumure de Sanfins, creusé au cœur même de la montagne dans les années 1750. D'une capacité de 2'600 m³ environ – le



Figure 1. « *Plan du Terroir des Dixains Darveye et Villard* » par Pierre Grevoulet (entre 1708 et 1710). ACV Gb 9/c : « Plans du terroir des dixains d'Arveyes et Villars ».

<http://www.davel.vd.ch/detail.aspx?ID=337166>

⁸ ACV Gb 9/c

⁹ ACV Gc 1959

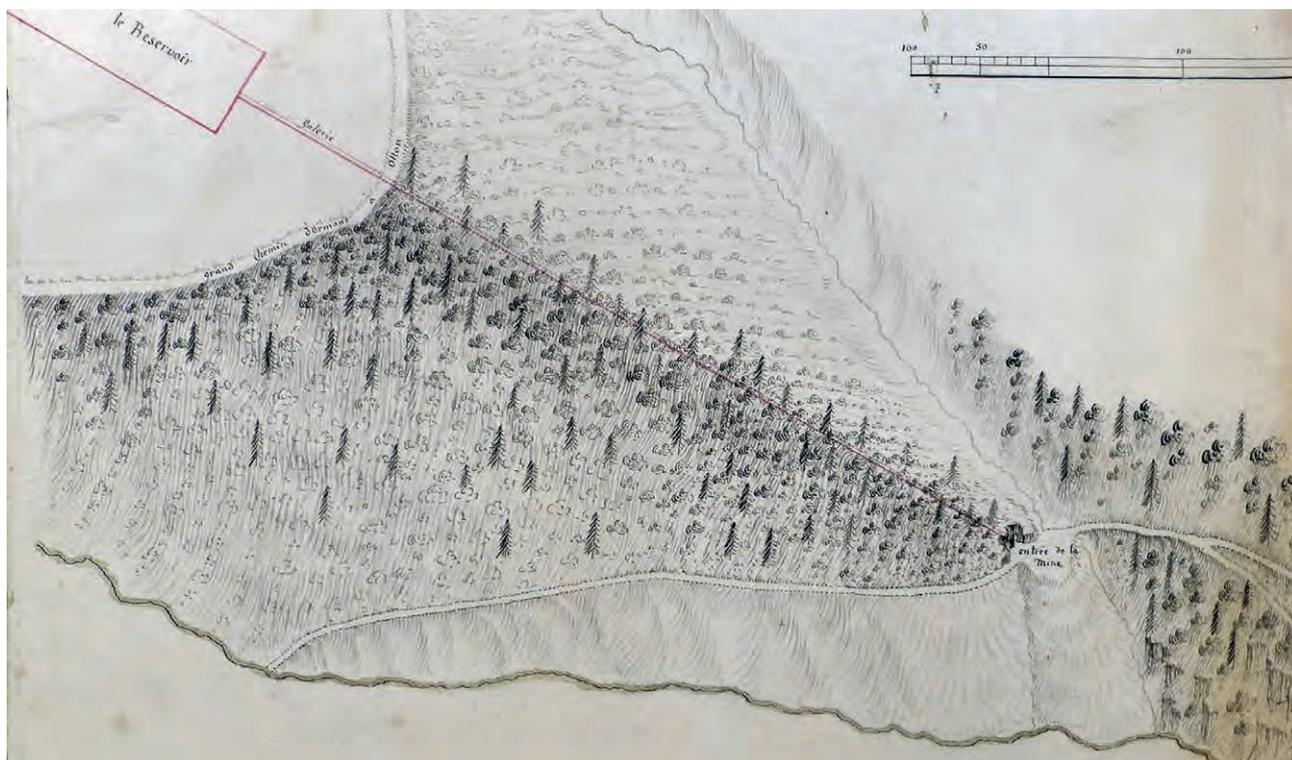


Figure 3. « Le Réservoir », plan dessiné par François Gamaliel de Rovéréa (1768).

ACV N 6/414 : « Plan géométrique de l'espace de terrain depuis le Réservoir de Panex jusque vers le luisel du Crosex, où il faudra nécessairement creuser une tranchée pour le passage des eaux dudit Réservoir au Bévieux, par Isaac Gamaliel de Rovéréaz » Note : Isaac Gamaliel de Rovéréa est décédé le 6 mars 1766, il s'agit donc bien du plan dressé par son fils François Gamaliel de Rovéréa.

<http://www.davel.vd.ch/detail.aspx?ID=220572>

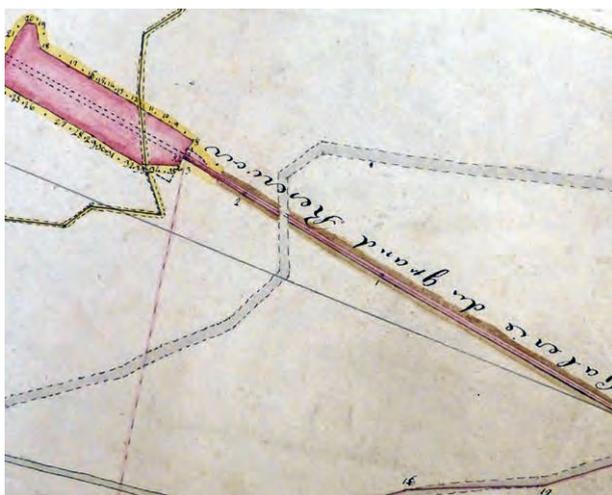


Figure 4. « Le Réservoir » de Salins par un auteur inconnu (environ 1815).

ACV Gc 2406 : « Plan des mines de Salins, avec les galeries principales et celle du grand réservoir, Plambuit et la mine du Dard ».

<http://www.davel.vd.ch/detail.aspx?ID=329901>



Figure 5. Petit barrage en madriers qui contient encore une petite source d'eau douce. Photographie Ph. Goy (2012).

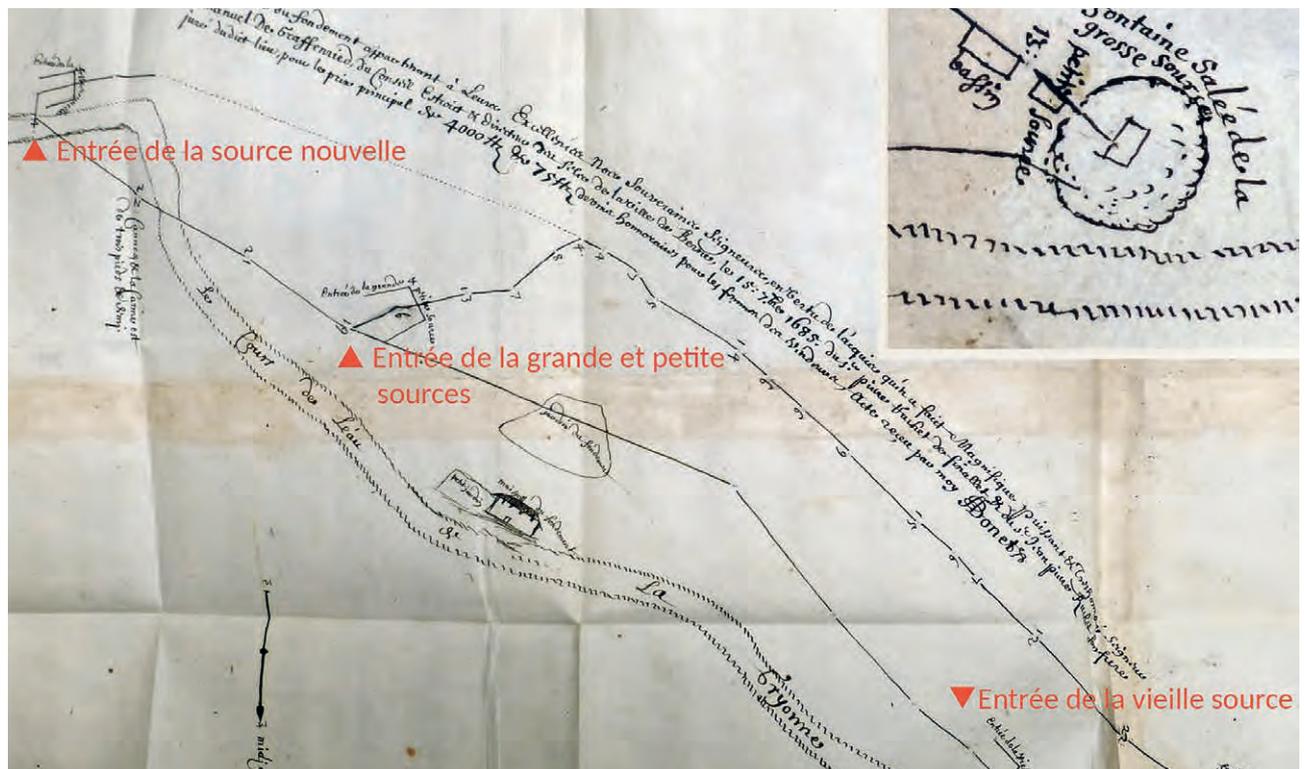


Figure 6. Plan des premières galeries du Fondement dessiné en 1685, à l'occasion de la reprise de l'exploitation par Berne. ACV Bv 602 : « Contrats et acquisitions avec des plans en annexe ». <http://www.davel.vd.ch/detail.aspx?ID=336186>

l'exactitude du plan de 1815 et de découvrir, comme relevé dans les archives, un petit barrage en madriers vieux de 260 ans, lequel permet aujourd'hui encore de contenir une petite source d'eau douce (fig. 5).

Cet exemple confirme qu'il est nécessaire de recouper les sources (!) et de se rendre sur le terrain pour confronter les archives à la réalité. Le recours à différentes compétences permet d'enrichir le contenu de la documentation et profite à chacun.

Le sel de Bex n'est pas si vieux : les débuts de la saline du Bévieux

On attribue habituellement le titre de « plus ancienne représentation des salines du Bévieux » (Rosis, 1993) à la carte de Johann Scheuchzer intitulée « *Exquisita Salarium Bernensium Delineatio* » et publiée en 1723 dans son ouvrage *Itinerae per Helvetiae alpinas regiones*. On trouve cependant des documents antérieurs aux ACV, en

particulier des plans établis à l'occasion de la reprise de l'exploitation par Berne en 1685 (fig. 6).

Les premières mentions de cuite de la saumure au Bévieux apparaissent vers 1680 (Pièce, 2012). Cinq ans plus tard, le site comporte – comme à Salins – une « maison où l'on cuit l'eau », une « auge » (bâtiment de graduation), « une forge », une « maison » (factorale) et une « grange ». Un « estang » et un « ratelier » destinés à récupérer le bois flotté sur la rivière de l'Avançon complètent le dispositif. Un pré, « tout en glarier et en ruïne », est également réservé pour y construire un nouveau râtelier. Leurs Excellences font encore l'acquisition, lors de cette même année 1685, d'un mas de montagne situé au lieu appelé Au Fondement, d'où « les sources d'eau sallées sortent & descendent jusqu'au Bévieux ». Le plan dressé en septembre 1685 permet de connaître avec exactitude l'avancée du percement des premières galeries du Fondement. A cette époque, deux galeries sont en service : celle qui mène à la vieille source et celle qui permet de rejoindre la grande et



Figure 7. Plan de la troisième galerie. ACV Gc 1961/9 : « Plan de galeries ». <http://www.davel.vd.ch/detail.aspx?ID=674427>

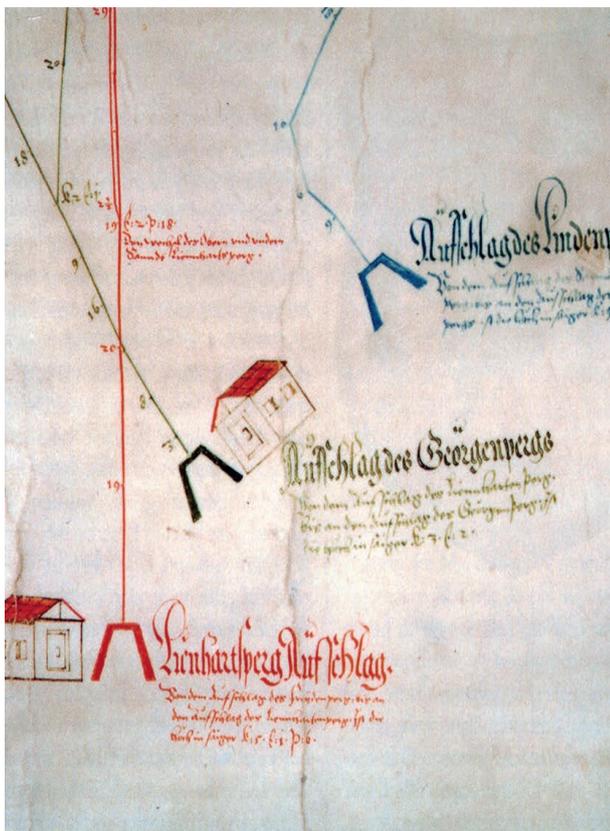


Figure 8. Plan des mines de sel de Dürnbreg, Autriche (1554). Tiré de SALZ, Salzburger Landesausstellungen, 1994.



Figure 9. Plan des mines du Fondement dans la vallée de la Groyne (1693).

ACV Gc 1961/9 : « Plan de galeries 1693, avril ». <http://www.davel.vd.ch/detail.aspx?ID=674427>

la petite sources. Le creusement d'une troisième galerie en direction de la nouvelle source a également débuté en aval des deux premières. Toutes ces galeries se trouvent sur la rive droite de la Gryonne, et partant, sur le territoire d'Ollon. Un plan un peu plus tardif¹⁰ indique que la troisième galerie a été achevée en moins de 8 ans (fig. 7). La toute première galerie n'y figure plus, probablement a-t-elle été abandonnée. Il est intéressant de noter que l'unité de mesure de longueur des galeries est la canne¹¹ en 1685 et le klafter¹² en 1693.

Relevons encore que la comparaison d'un plan de 1554 des mines de sel de Dürrnberg¹³ (Autriche) (fig. 8) avec celui de 1693 (fig. 9) permet de mettre en évidence la similitude du graphisme, ce qui n'est pas surprenant, de nombreux spécialistes d'origine germanique ayant été sollicités dès les débuts de l'exploitation minière (Pièce, 2020).

Cet exemple démontre que les documents cartographiques recèlent de nombreuses informations utiles à la

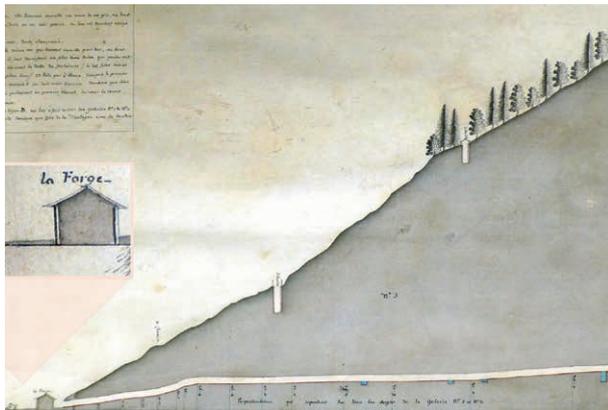


Figure 10. Plan et profil des souterrains de la mine de Fontaine Salée, par François Gamaliel de Rovéréa (1761). ACV Gc 834 : « Plan et profil des Souterrains commencés en 1755 pour la recherche des sources salées En Fontannaz Salliaz. Plan géométrique du val-lon où se trouve la source un peu salée au lieu dit En Fontannaz Salliaz ». <http://www.davel.vd.ch/detail.aspx?ID=329804>

¹⁰ ACV Gc 1961/9

¹¹ Selon l'indication reportée sur le plan, une canne vaut 3,5 pieds (de Berne), soit environ 1 m.

¹² Le klafter fait 6 pieds (de Berne), soit environ 1,80 m.

¹³ Bergbaukarte Dürrnberg von 1554. Salzburg, Landesarchiv. SLA Grubenkarte Dürrnberg 1554.

compréhension de l'avancement des travaux durant les premières années d'exploitation des sources salées du Fondement par Leurs Excellences de Berne. Les plans, rigoureusement datés, confirment que la première saline du Bévieux a bien été construite dans les années 1680... et non en 1554 comme le laissent supposer les paquets de sels disponibles sur nos étals !

Fontaine salée, Dard, Entre deux Gryonnes : les mines oubliées

Au cours des XVIII^e et XIX^e siècles, plusieurs sources salées secondaires sont exploitées. Albert de Haller mentionne celle de Fontaine salée dans son ouvrage intitulé *Description courte et abrégée des salines du gouvernement d'Aigle* (Von Haller, 1776). Les travaux de creusement ont lieu de 1755 à 1761, et, une fois terminés, de Rovéréa fils en trace un plan et profil¹⁴ très détaillé (fig. 10). Sur le terrain, il est difficile de retrouver les traces de cette mine. Pierre-Jean Baron (1996), malgré « des heures de prospection », n'a rien localisé lors de sa visite de 1993. Un repérage en décembre 2010 a permis de se faire une idée des lieux, mais seul un recoupement des anciens plans avec une carte actuelle permettrait de définir si les quelques bâtiments et ruines repérés appartenaient à l'ensemble minier de Fontaine salée.

Sur le même versant, mais plus près du hameau de Plambuit, la galerie du Dard a également complètement disparu. Conçue par François Samuel Wild, elle devait rejoindre les galeries des Vaux et d'Arveyes, situées sur l'autre versant du Chamossaire. Les travaux ont duré de 1790 à 1799, sans toutefois aboutir. Struve en donne l'emplacement « dans un endroit appelé par M. Wild le Dard au Nord-Est du village de Plambuit, à un angle rentrant que la montagne offre de ce côté, dans une gorge formée par un torrent, dans un lieu très sauvage, à la droite du bord occidental de ce torrent » (Struve, 1804). Il précise également qu'elle est élevée de 255 pieds au-dessus de celle des Vaux, soit vers 1'167 m. Le repérage effectué par l'auteur de cet article en septembre 2011 en compagnie de Nicolas Meisser, conservateur du Musée cantonal de géologie, n'a pas permis de retrouver la trace de cette mine. Cependant, un endroit situé en dessus du hameau Plambuit, à 1'180 m d'altitude, près d'un ruisseau, d'une

¹⁴ ACV Gc 834.

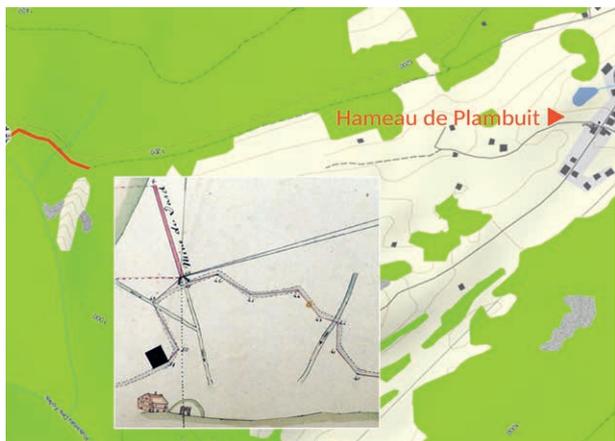


Figure 11. La galerie du Dard se trouvait en dessus du hameau de Plambuit. Détail du plan de l'entrée de la mine du Dard par Albert Ginsberg, ACV Gc 2406, <https://davel.vd.ch/detail.aspx?ID=32990>



Figure 12. Plan de la mine d'Entre deux Gryonnes par François Samuel Wild (1784).

ACV Gc 852 « Plan des ouvrages entre les deux Gryonnes ». Signé François-Samuel Wild. Avec couleur. <http://www.davel.vd.ch/detail.aspx?ID=331963>

gorge et d'un « angle rentrant » constitue un bon candidat¹⁵ (fig. 11).

La troisième mine abandonnée, mentionnée dans le Manuel du voyageur en Suisse et dans le Tyrol (Audin et Ebel, 1836), est celle d'Entre deux Gryonnes, située sur la rive droite en amont du Bouillet. Héli Badoux (1966) en donne une bonne description en se basant sur les écrits de Struve, Grenier, Schardt et Payot, les entrées des galeries ayant été condamnées avant 1966. Le géologue estime la longueur des travaux souterrains avec leurs ramifications à 780 m. Il précise encore qu'un escalier permet d'accéder au sommet d'un puits de 10 m, car c'est au fond de la mine que la pente est la plus raide. En 1784, date à laquelle François Samuel Wild dresse son plan¹⁶, la jonction entre les galeries supérieure et inférieure est alors impossible, l'escalier de liaison n'étant pas encore réalisé (fig. 12). Selon les mesures de Wild, la longueur du réseau atteint 500 mètres environ, ce qui, compte tenu des extensions ultérieures, semble compatible avec le chiffre avancé par Badoux. A noter que les 3 puits mentionnés figurent déjà sur le plan de 1784. Le regain d'intérêt récent pour cette mine permettra peut-être un jour de pénétrer dans l'ancienne galerie et de découvrir de nouveaux éléments, tant géologiques qu'historiques (Pièce, 2018).

Grâce aux documents d'archives, les mines aujourd'hui absolument impraticables peuvent – partiellement tout au moins – se visiter virtuellement.

Technique et géologie : les percées des Anciens

Les cartes et plans conservés aux Archives cantonales vaudoises apportent aussi des éléments intéressants aux niveaux géologique et technique, comme en témoignent ces quelques exemples. Un dessin de M. de Diesbach représentant « la face des sources aux fondements du 9me aust 1729 »¹⁷ permet de comprendre comment les eaux salées sont récupérées au cœur de la montagne, avant d'être conduites à l'extérieur au moyen de tuyaux en bois (fig. 13). Un escalier taillé dans le roc donne accès à un espace plus amplement excavé. Les filets d'eau salée qui sourdent de la montagne sont collectés au pied de la paroi de cette excavation au moyen d'un petit bassin, qui

¹⁵ Coordonnées 569.587 / 130.444.

¹⁶ ACV Gc 852. Pas cité dans BADOUX ni dans BARON.

¹⁷ ACV N 6 536/e.

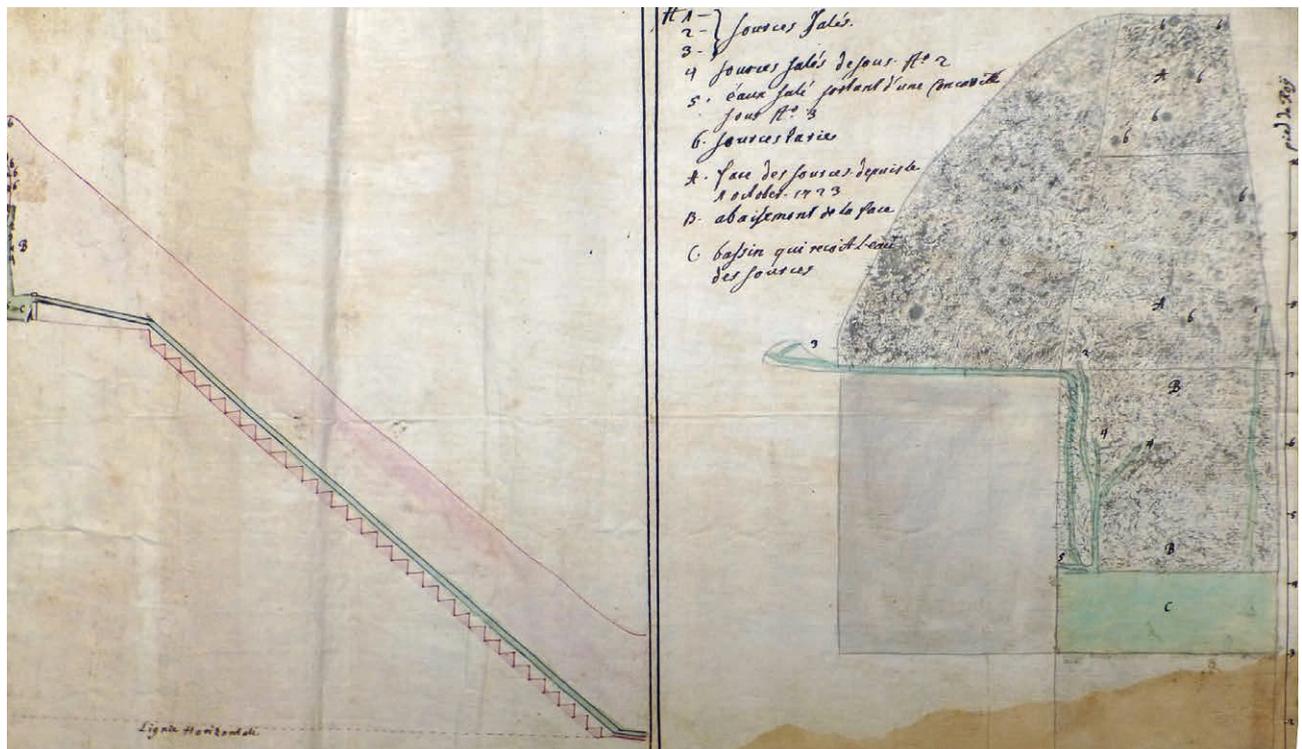


Figure 13. Plan « de la face d'où l'eau salée sort » réalisé par M. de Diesbach en 1729. ACV N 6/536/e : « Plans majoritairement toilés, montés en grande partie sur onglet concernant la région du Bévieux et portant un numéro d'ordre dont le détail est donné sur le registre ongleté: profils des galeries, plan des sources, grand bassin du flottage des bois ». <http://www.davel.vd.ch/detail.aspx?ID=220271>

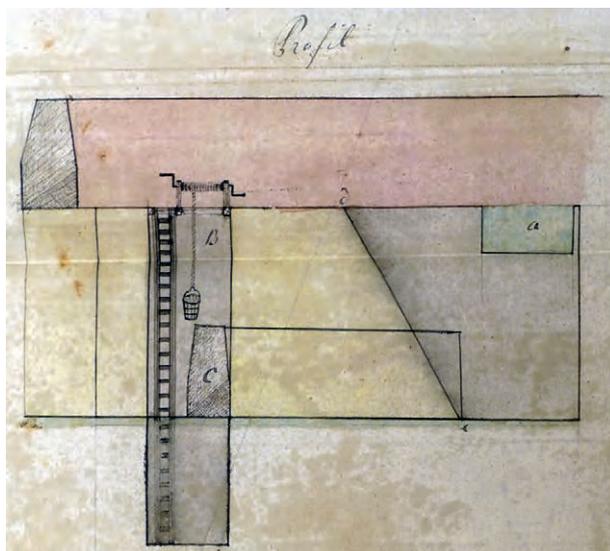


Figure 14. Eléments géologiques et techniques dans un plan conservé aux ACV. ACV Gc 1957/6 : « Plan et profil des galeries et du puits vers la source du Bon succès No 2 ». <http://www.davel.vd.ch/detail.aspx?ID=674355>

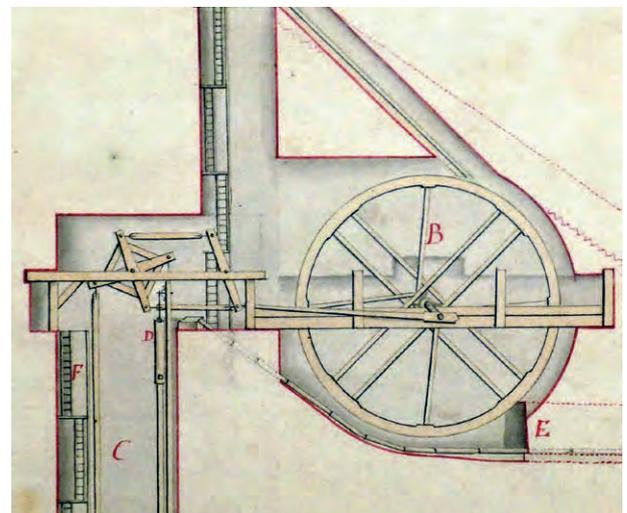


Figure 15. Machine hydraulique construite à l'intérieur de la montagne pour remonter les eaux salées du Puits de Providence. ACV N 6/517 : « Profil de la machine qui servira à remonter les eaux de la source salée lorsqu'on l'aura abaissée plus profond que le niveau de la grande galerie inférieure des souterrains du Fondement, par Isaac Gamaliel de Rovéréaz ». <http://www.davel.vd.ch/detail.aspx?ID=220286>

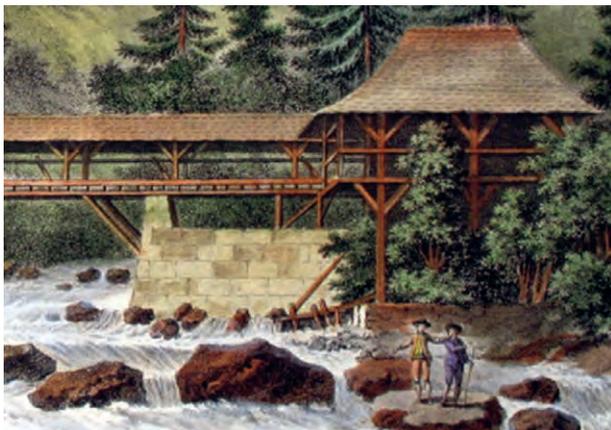


Figure 17. Détail de la roue hydraulique permettant d'actionner les pompes des bâtiments de graduation de la Saline du Bévieux, vers 1785. Viatimages : « *Vue de la saline de Bevieux, dans le Mandement de Bex, gouvernement d'Aigle, Canton de Berne.* » Illustrateurs Barbier (le), Jean Jacques François (1738-1826), Dessinateur Maillet, Joseph C. (1751-1811).
<https://purl.org/viatimages/fr/image/722>



Figure 18. Vestiges du bâtiment de la roue hydraulique de la saline du Bévieux. Photographie P.-Y. Pièce.

à son tour alimente un saumoduc posé sur les marches de l'escalier. Le plan montre que la « face » ruisselle en différents endroits et laisse supposer que les mineurs devaient faire face à une certaine porosité de la mine.

Sans eau, pas de sel ! Impossible en effet d'extraire le sel de la roche sans utiliser d'eau. Non seulement elle permet de lessiver le roc, mais elle est également utilisée comme force motrice. Avant l'introduction des pompes hydrauliques par le baron de Beust dans les années 1730, les eaux salées devaient être pompées ou puisées manuel-

lement (fig. 14). Grâce à cette innovation, de nombreuses installations sont réalisées, tant à l'intérieur même des mines, qu'aux salines. L'ingénieur Isaac Gamaliel de Rovéréa a laissé d'excellents plans de ces mécanismes¹⁸, dont l'un des plus célèbres est sans doute la grande roue construite dans les entrailles de la terre (fig. 15). Les guides du voyageur de l'époque en vantaient les mérites : « *On voit aussi la roue verticale de 36 pieds de diamètre qui, mise en mouvement par un courant d'eau douce tombant du haut de la montagne, fait agir les pompes destinées à extraire l'eau salée et l'eau sulfureuse des puits très-profonds dans l'intérieur desquels elles s'accumulent, et à les élever au niveau des rigoles qui les conduisent au dehors* » (Martin, 1835). La représentation de cette roue publiée dans la version illustrée des Impressions de voyage en Suisse d'Alexandre Dumas s'écarte clairement de la réalité (fig. 16, page suivante), mais témoigne de l'effet produit sur les visiteurs...

De Rovéréa a également établi les plans de la machine hydraulique permettant d'actionner les pompes des bâtiments de graduation de la saline du Bévieux¹⁹. De l'installation située sur la rive de l'Avançon (fig. 17), il ne reste aujourd'hui que quelques pans de murs enfouis dans la végétation²⁰ (fig. 18). On distingue cependant encore très bien le canal d'amenée d'eau à la roue à aubes.

Conclusion

Ce bref survol des témoins visuels des mines et salines met en évidence l'intérêt de ces sources pour l'étude de leur histoire. Des détails inattendus surgissent parfois au coin d'une carte ou au dos d'un plan, et permettent de confirmer une hypothèse ou de lever un doute. L'étendue spatiale et temporelle de l'exploitation du sel dans l'actuel Chablais se retrouve dans la variété des documents consultés. Ils complètent donc très utilement les sources écrites et les indispensables repérages sur le terrain. ■

Pierre-Yves Pièce, ingénieur, est co-fondateur de l'Association Cum Grano Salis et animateur du Sentier du Sel.

¹⁸ ACV N 6 517.

¹⁹ ACV N 6 507.

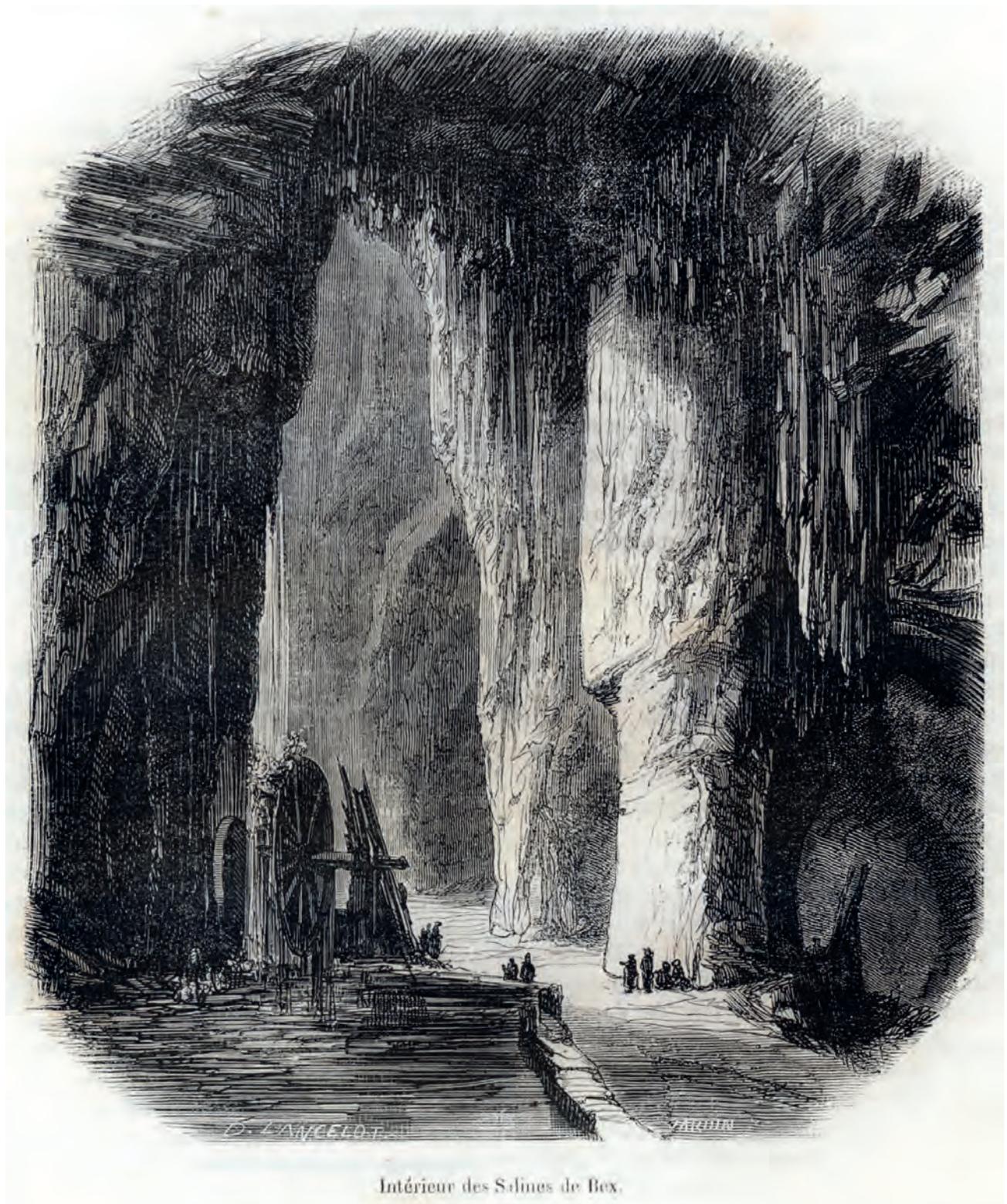


Figure 16. La machine hydraulique servant à remonter les eaux salées du Puits de Providence, illustrant les Impressions de voyage en Suisse d'Alexandre Dumas. Voir : <https://www.letemps.ch/suisse/alexandre-dumas-tordu-verite-voyages-suisse>



Bibliographie

AUDIN, J.-M.-V., EBEL, J. G. (1836) : Manuel du voyageur en Suisse et dans le Tyrol. Maison, Paris.

BADOUX, H. (1966) : Description géologique des Mines et Salines de Bex et de leurs environs. Kümmerly et Frey, Berne.

BARON, P.-J. (1996) : Cavités artificielles de l'Est vaudois. Groupe spéléo, Lausanne.

COUZAZ, G. (2014) : L'importante collection de cartes historiques des Archives cantonales vaudoises. Forum PCB, 22, 38-44.

MARTIN, A. (1835) : La Suisse pittoresque et ses environs. H. Souverain, Paris.

PIÈCE, P.-Y. (2012) : Révélations autour d'un relief commandé au 18^e siècle par la haute Direction des Sels. Le Saumoduc – Bulletin de l'Association Cum Grano Salis, 7, 8-9.

PIÈCE, P.-Y. (2012) : Des révélations qui ne manquent pas de relief ! Le Saumoduc – Bulletin de l'Association Cum Grano Salis, 8, 7-10.

PIÈCE, P.-Y. (2012) : La Saline du Bévieux se vieillit pour rajeunir ! Le Saumoduc – Bulletin de l'Association Cum Grano Salis, 9, 11-14.

PIÈCE, P.-Y. (2018) : Mine d'Entre deux Gryonnes. Le Saumoduc - Bulletin de l'Association Cum Grano Salis, 23, 4-5.

PIÈCE, P.-Y. (2020) : Le sel de l'exil : sur les traces des mineurs Hans et Joseph Schaitberger de Dürrnberg (A). Minaria Helvetica - Bulletin de la société suisse d'Histoire des Mines, 41, 4-31.

PIÈCE, P.-Y., WEIDMANN, M. (2014) : Albert Ginsberg (1782-1837), mineur, ingénieur des mines et géologue. Minaria Helvetica – Bulletin de la Société suisse d'Histoire des Mines, 34, 26-53.

ROSIS, O., (1993) : Inauguration de la Fondation Strasser-Anex. Journal du Chablais.

STRUVE, H. (1804) : Description abrégée des salines du ci-devant Gouvernement d'Aigle. chez Henri Vincent, Lausanne.

VON HALLER, A. (1776) : Description courte et abrégée des salines du gouvernement d'Aigle. De l'Impr. de la Soc. litt. & typo, Yverdon.

WILD, F. S. (1788) : Essai sur la montagne salifère du gouvernement d'Aigle. aux dépens de l'auteur, Genève.

La connaissance du sous-sol, une « ressource » stratégique

par David Giorgis

Connaissances du sous-sol et géodonnées

Il existe différentes manières d'obtenir des informations géologiques. Les plus faciles à mettre en œuvre dérivent d'observations de surface (cartographie géologique). Il existe également des méthodes indirectes comme celles appliquées par les spécialistes en géophysique, qui analysent depuis la surface le comportement ou la propagation de certaines ondes (p. ex. via des campagnes de prospection sismique) dans le sous-sol afin d'en déduire sa structure et sa composition. Mais la méthode la plus directe (et parmi les plus coûteuses) pour connaître la constitution de notre sous-sol consiste à effectuer des sondages mécaniques (forages) afin de prélever des échantillons à différentes profondeurs.

Le support de base pour la représentation des connaissances du sous-sol a toujours été la carte géologique permettant de synthétiser sur un seul document un nombre considérable d'informations sur la nature, l'histoire et la géométrie des terrains qui composent le sous-sol. Depuis quelques années, avec l'essor de nouvelles technologies et le mariage de l'informatique et des géosciences, les connaissances du sous-sol sont converties en informations géologiques ou plus précisément en géodonnées permettant, entre autres, l'analyse et la simulation de phénomènes complexes et leur représentation en trois et en quatre dimensions.

En Suisse, les informations géologiques sont définies comme suit dans l'article 2a de l'ordonnance sur la géologie nationale (OGN) : « *données et informations concernant le sous-sol géologique, relatives notamment à sa structure, sa nature et ses propriétés, à son utilisation passée et présente et à sa valeur économique, sociale et scientifique, ainsi qu'à des processus géologiques passés, présents et potentiels* ».

De par leur nature, les informations géologiques sont un type de géodonnées particulier, puisque contrairement aux géodonnées qui décrivent la surface de la terre, les géodonnées sur le sous-sol (à l'exception des forages et

des tunnels) doivent parfois être acquises par des méthodes indirectes, nécessitant une interprétation et donc une attention particulière afin de respecter un éventuel droit d'auteur (cf. Kettiger, 2016). On distingue donc les données géologiques brutes et les données géologiques interprétées.

Les données brutes consistent généralement en données de forage ou en résultats de méthodes géophysiques (gravimétrie, méthodes sismiques, etc.). Etant des résultats bruts de mesures et d'autres investigations, elles ne peuvent pas faire l'objet de droits d'auteur. Toutefois, l'analyse de certaines données brutes (p. ex. les données sismiques) permettent souvent une assez grande marge d'interprétation et par conséquent d'incertitude, malgré l'application de méthodes reconnues et parfois standardisées. L'interprétation de données sismiques est donc habituellement une création de l'esprit dont la perception est rendue possible par une réalisation concrète. L'interprétation de données géologiques peut ainsi parfois être protégée par le droit d'auteur. Ce qui est déterminant pour cette protection, c'est la prestation intellectuelle de la personne qui réalise l'interprétation. Il n'existe aucun droit d'auteur lorsque des données brutes géologiques sont interprétées uniquement à l'aide de méthodes mathématiques reconnues, c'est-à-dire lorsque des données brutes sont traitées par de seuls algorithmes.

Cette spécification propre aux données géologiques, entre données brutes et données interprétées, revêt une certaine importance puisqu'elle peut dans certains cas limiter les possibilités des collectivités publiques pour la publication et la mise à disposition des données.

Un cadre légal pour gérer les ressources et les connaissances du sous-sol

En Suisse, le statut du sous-sol géologique est réglementé par l'article 667 du code civil. Ainsi, au-delà de la profondeur utile à chaque propriétaire foncier, le sous-sol ainsi que ses ressources dépendent du domaine public cantonal (sous réserve de droits acquis des communes).



Dans le canton de Vaud, la première base légale relative à l'exploitation des ressources du sous-sol a été la loi sur les mines (LMines datant de 1891). Elle devait fixer les règles liées à la recherche et à l'exploitation de l'ensemble des matières premières minérales qui, à l'époque de l'élaboration de cette loi, étaient principalement ciblées sur le sel et le charbon (houille) (cf. Meisser, 2022 ; Weidmann et Meisser, 2022 ; Pièce, 2022, ce volume). Par la suite, une loi réglant l'occupation et l'exploitation des eaux souterraines dépendant du domaine public cantonal (LESDP) a été adoptée en 1948 et la loi sur les hydrocarbures a vu le jour en 1957 (loi sur les hydrocarbures, LHydr). Cette dernière permettait de retirer les hydrocarbures du champ d'application de la L Mines pour y appliquer un cadre légal spécifique et correspondant aux pratiques en vigueur pour la recherche et l'exploitation de pétrole ou de gaz. Cette loi a joué un rôle important pour accompagner les différents projets de prospection d'hydrocarbures dans le canton de Vaud et elle contenait la particularité de pouvoir récolter les renseignements, rapports de prospection et échantillons mis en évidence par les différentes sociétés exploratrices. Grâce à cette loi, le canton (par son Musée cantonal de géologie) pouvait ainsi constituer un socle de connaissance non négligeable sur son sous-sol profond à partir des résultats des campagnes sismiques et de forages profonds réalisés. Plus tard, en 1967 et 1988, deux

versions successives de la loi sur les carrières (LCar) ont été adoptées pour considérer certaines ressources qui ne figuraient ni dans la L Mines ni dans la LHydr, comme par exemple les gisements de pierre, gravier, sable ou marne qui, contrairement aux autres ressources du sous-sol, appartiennent au propriétaire du sol. Les ressources concernées par la LCar sont aujourd'hui régulièrement présentées sous la dénomination de géomatériaux.

Les lois mentionnées ci-dessus (fig. 1) sont des lois orientées sur les ressources et permettant de récolter des données uniquement pour les projets qui sont encadrés par ces lois. Ainsi, les données obtenues lors de travaux dans le domaine des mines, de l'eau, des carrières et gravières, de la recherche pétrolière ou gazière sont des sources importantes de renseignements sur le sous-sol. Toutefois, les informations obtenues lors de travaux de construction ou lors d'utilisation du sous-sol sortant des domaines mentionnés ci-dessus n'étaient pas récoltées. La collecte des données était donc lacunaire.

Récemment, le canton de Vaud a élaboré deux nouvelles lois relatives au sous-sol. La loi sur le cadastre géologique (LCG adoptée en 2007) visait à garantir la récolte systématique de toutes les données géologiques obtenues par sondages, en s'affranchissant des lois qui permettent de récolter des données uniquement si elles sont obtenues

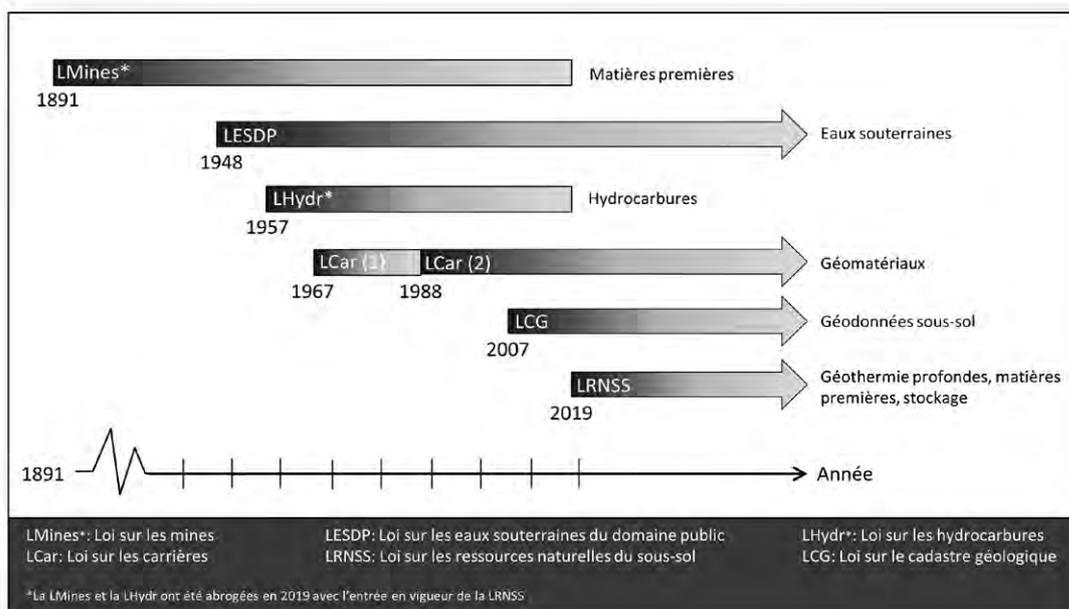


Figure 1. Années d'entrée en vigueur des différentes lois relatives au sous-sol.

pour des besoins spécifiques. La loi sur les ressources naturelles du sous-sol (adoptée en 2018) visait, d'une part, à favoriser le développement de la géothermie profonde, ressource qui jusqu'ici ne bénéficiait d'aucun cadre légal spécifique et, d'autre part, à regrouper sous une même procédure les permis de recherche et de concession pour l'utilisation de l'ensemble des ressources concernées par la LMiner et la LHydr. Ce nouveau cadre légal englobant l'ensemble des ressources du sous-sol (à l'exception des ressources liées à la LCar et à la LESDP) a donc succédé à la LMiner et à la LHydr qui ont, toutes deux, été abrogées. D'autre part, afin de permettre une documentation précise du sous-sol, cette loi prévoit l'obligation, pour les titulaires d'un permis de recherche ou d'une concession, de remettre à l'Etat toutes les informations géologiques et les échantillons en relation avec une activité dans le sous-sol, permettant ainsi d'assurer la récolte de toutes les données et la mise à jour des connaissances du sous-sol.

La gestion actuelle des données géologiques du canton

Aujourd'hui les bases légales relatives au sous-sol permettent de donner un cadre à l'exploitation des ressources et elles permettent également de veiller à la collecte et à la diffusion des connaissances obtenues. Le canton de Vaud possède un « arsenal » d'outils permettant d'assurer la collecte, la pérennisation et la diffusion des données du sous-sol. Mais cela n'est pas le cas de tous les cantons suisses et « paradoxalement », on constate des pratiques et une accessibilité aux informations géologiques bien différentes entre les cantons romands et alémaniques (un « Röstigraben » de l'accès aux connaissances du sous-sol) (fig. 2).

La LCG, ainsi que les autres lois spécifiques aux ressources du sous-sol, permettent notamment de fournir des informations sur plus de 30'000 ouvrages (forages, fouilles, puits) et plusieurs milliers de kilomètres de lignes sismiques réalisés depuis plusieurs décennies. Des investissements colossaux (dépassant les 100 millions de francs) ont été nécessaires pour acquérir ces informations géologiques. Mais la valeur de l'information dépend de sa qualité et pas uniquement de sa quantité. Il est nécessaire de les pérenniser et de les valoriser. Le cadastre géologique (www.geocad1.vd.ch) et le guichet cartographique cantonal (<https://www.geo.vd.ch/theme/>

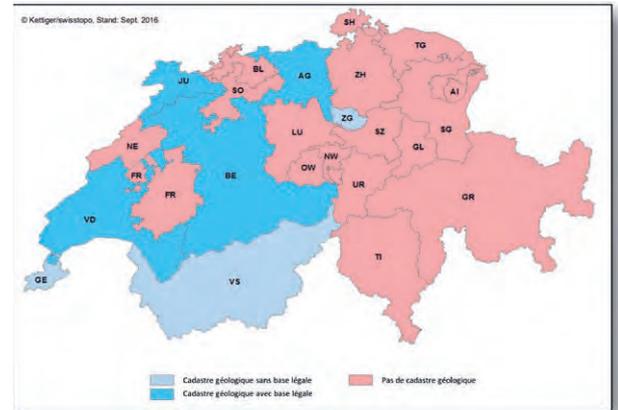


Figure 2. Carte représentant la disparité des pratiques cantonales en ce qui concerne la récolte et l'accès aux données géologiques avec un cadastre géologique (d'après Kettiger, 2016).

geologie_thm) sont des outils permettant de publier et consulter ces géodonnées (fig. 3).

On distingue toutefois une forte inégalité entre les connaissances du sous-sol peu profond (ayant fait l'objet de nombreuses investigations pour répondre aux besoins de la construction et du développement du territoire) et les connaissances du sous-sol profond auquel on s'intéresse de plus en plus mais dont on ne connaît pas grand-chose, comparé à d'autres régions du monde qui ont fait l'objet d'investigations approfondies, notamment pour la recherche intensive et l'exploitation d'hydrocarbures. Dans le canton de Vaud, par exemple, on dénombre à peine une dizaine de forages allant au-delà d'un kilomètre de profondeur (en Suisse il y en a environ une quarantaine !).

Heureusement, la collecte se poursuit grâce à la recherche et à l'exploitation des ressources du sous-sol (eau, géothermie, géomatériaux), aux travaux d'infrastructures et de développement du territoire ou à la recherche scientifique (visant à mieux comprendre les processus et les mécanismes à l'origine de différents phénomènes géologiques).

Conclusion

Comme illustré par les différents articles de ce bulletin, le sous-sol contient de nombreuses ressources, lesquelles suscitent un intérêt croissant. Le recours à ces ressources va se révéler particulièrement utile pour répondre aux enjeux actuels de notre société. Cela concerne l'augmen-



Figure 3. Représentation de différents guichets cartographiques permettant de consulter des données géologiques du canton de Vaud. A) Cadastre géologique (www.geocad1.vd.ch) ; B) Guichet cartographique cantonal 2D Thème Géologie (www.geo.vd.ch/theme/geologie_thm) ; C) Guichet cartographique 3D – Projet GeoMol (<https://viewer.geomol.ch/>).

tation démographique et le besoin en géomatériaux, le changement climatique et le besoin d'assurer une utilisation durable des ressources en eau, la volonté de densifier le territoire et d'occuper plus d'espace dans le sous-sol ou encore la volonté de développer les énergies renouvelables et notamment la géothermie profonde.

La gestion des ressources et des différents usages du sous-sol implique des prises de décision, des arbitrages et des priorisations. Pour cela il est indispensable de bénéficier des meilleures connaissances possible. L'information, utilisée à bon escient, diminue le risque d'incertitude et permet d'anticiper les décisions à prendre. Il est dès lors impératif d'assurer la collecte, la pérennisation et l'accessibilité à ces données pour le public et les générations futures.

La connaissance du sous-sol et le volume important de données qui y sont associés font naître de nouveaux métiers, capables de valider et de gérer l'information devenue pléthorique, en structurant et organisant les données, en approvisant les nouveaux outils numériques et en

mettant à jour nos représentations et nos modèles à l'aune des nouvelles informations acquises continuellement. Il s'agit d'un gisement d'information à exploiter de manière optimale. L'ère du « datamining » géologique ne fait que commencer... ■

David Giorgis est responsable du cadastre géologique, Division géologie, sol et déchets (GEODE) à la Direction générale de l'environnement (DGE).

Bibliographie

KETTIGER, D. (2016). Cadre légal de la saisie, la mise à jour et la gestion de données géologiques. Rap. Serv. géol. nat. 9 FR (uniquement en pdf).

MEISSER, N. (2022) : Le rôle clé du sel vaudois dans le développement de l'industrie chimique et ses reliques patrimoniales. Documents de l'Association pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud, 15, 33-66.



PIÈCE, P.-Y. (2022) : Les cartes et plans des Archives cantonales vaudoises : une mine patrimoniale qui ne manque pas de sel ! Documents de l'Association pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud, 15, 141-152.

WEIDMANN, M. ET MEISSER, N. (2022) : Le charbon vaudois. Documents de l'Association pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud, 15, 103-113.

© RÉSEAU PATRIMOINES

Association pour le patrimoine naturel et culturel du canton de Vaud, 2022

Reproduction autorisée avec mention de la source

Avec le soutien de la



et de la

FONDATION VAUDOISE, JEREMINE,
LUGEON ET RABOT POUR LA
GEOLOGIE