

Zeitschrift: Actes de la Société jurassienne d'émulation

Herausgeber: Société jurassienne d'émulation

Band: 123 (2020)

Rubrik: Cahier des sciences

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 11.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Cahier des sciences



Swiss Academy of Sciences
Akademie der Naturwissenschaften
Accademia di scienze naturali
Académie des sciences naturelles

Introduction

DAMIEN BECKER

Pour débuter ce cahier des sciences, un hommage est rendu à Jean-Claude Bouvier (1932-2020), membre fondateur du Cercle d'études scientifiques de la Société jurassienne d'émulation, qui nous a malheureusement quittés en fin d'année 2020. Cet infatigable naturaliste a œuvré pendant plus de 50 ans pour les sciences naturelles dans le Jura. Sa trace restera présente encore longtemps dans les mémoires de notre cercle et de notre société.

L'année 2020, je ne vous apprendrai rien, a été compliquée, très compliquée. Il a fallu s'adapter continuellement à l'évolution de la crise sanitaire, reporter ou même annuler bien des activités, des projets, des missions de terrain et j'en passe. Qu'à cela ne tienne, l'investissement et la passion des chercheurs et autres naturalistes n'a pas fléchi et quatre articles vous sont proposés dans ce nouveau cahier des sciences. Du diagnostic fonctionnel du bas-marais En Pratchie à la réintroduction des fritillaires en passant par une présentation des poissons jurassiques par une approche du développement des connaissances en paléoichtyologie et une rétrospective historique du laboratoire du Mont-Terri, cette édition 2020 est diversifiée et très fortement marquée par le patrimoine et la richesse naturelle jurassienne, comme l'a toujours souhaité notre Cercle d'études scientifiques.

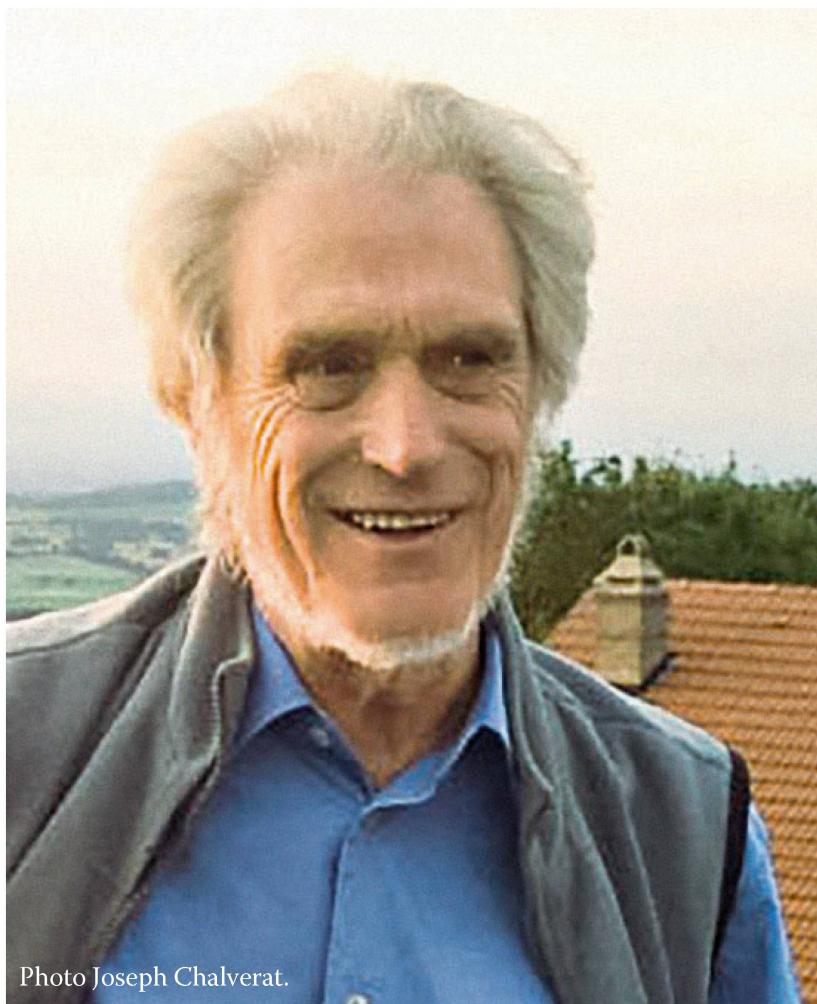
Je vous souhaite une excellente lecture et ose espérer prochainement des jours meilleurs où nous saurons prendre des décisions judicieuses pour l'avenir de notre planète.

Hommage à Jean-Claude Bouvier

(1932 – 2020)

JEAN-PIERRE SORG, JO CHALVERAT

Jean-Claude Bouvier nous a quittés au mois de décembre 2020, en pleine pandémie, trois semaines seulement après le décès de son épouse Lucienne. Le Cercle d'études scientifiques de la Société jurassienne d'émulation (CES) lui doit beaucoup.



Jean-Claude Bouvier compte au nombre des fondateurs du cercle en 1972 ; il ne l'a plus quitté depuis lors. Membre du comité dès le début, il en a assuré la présidence de 1999 à 2005, succédant à Pierre Reusser. Magnifique exemple de fidélité désintéressée à une cause, il a encore participé à une séance du comité du cercle le 24 août 2020. C'est peu dire que le cercle a tiré profit de sa très grande expérience scientifique et professionnelle. Plus encore, Jean-Claude a profondément marqué cette association, composée d'individualités si variées, de sa forte empreinte, ne ménageant ni son temps, ni son énergie, ni ses idées, ni ses relations pour faire du CES ce qu'il est aujourd'hui : un outil de vulgarisation scientifique efficace au service du Pays jurassien.

On ne compte pas, car ce serait faire œuvre de bénédicte, les manifestations de toute nature dans le domaine des sciences naturelles auxquelles Jean-Claude a participé au nom de la S.J.É. tout d'abord, depuis les années 1960, puis du cercle dès sa création, organisant des conférences, menant des réunions et conduisant des excursions, assistant à des manifestations dont, on ne le savait pas toujours, il était souvent l'initiateur ou l'inspirateur. Ses origines ajoulotes expliquent sans doute son inclination pour l'hydrologie des milieux karstiques jurassiens, domaine de compétence dans lequel il était le spécialiste reconnu loin à la ronde. Répondant à l'invitation de la Société des sciences naturelles du Pays de Montbéliard, le CES avait saisi l'opportunité de se présenter à la Fête de la Nature de Seloncourt en 2008. Lors de cette manifestation, Jean-Claude avait pu rendre publique une synthèse de l'hydrographie et géomorphologie karstique couvrant 800 km² de territoire franco-suisse. Par ailleurs, un projet de publication qui l'avait accompagné jusqu'à la fin de sa vie témoignait de cet intérêt constant pour l'observation de la circulation de l'eau dans le sous-sol...

Son passé de haut fonctionnaire au service de l'État jurassien explique, peut-être, que Jean-Claude savait composer, dans le domaine des sciences naturelles aussi. Ainsi, pour comprendre et expliquer la circulation de l'eau dans le sous-sol, il n'hésitait pas à élargir le champ et à tirer parti d'autres savoirs, issus par exemple de la géologie, de la spéléologie, de la paléontologie, de la climatologie, de la botanique. Dans ces disciplines, il s'était non seulement perfectionné mais avait également tissé des liens scientifiques précieux.

Le cercle et la S.J.É. doivent à Jean-Claude Bouvier le rapprochement opéré entre le CES et la Société des sciences naturelles du Pays de Montbéliard, devenu lien d'amitié au fil des années. Deux associations similaires poursuivant le même but : Jean-Claude avait perçu l'intérêt de

Hommage à Jean-Claude Bouvier

cette communauté d'idées et, inlassablement, s'était engagé en faveur de la promotion des échanges transfrontaliers.

Le Cercle d'études scientifiques et la Société jurassienne d'émulation témoignent leur reconnaissance à Jean-Claude Bouvier pour son engagement inlassable en faveur des sciences naturelles et de la vulgarisation scientifique dans le Jura durant largement plus d'un demi-siècle. Il restera présent dans nos mémoires.

Renforcement des populations de Fritillaire pintade au bord du Doubs jurassien — Compte rendu des actions 2011-2019

VIVIANE FROIDEVAUX, RAFAEL MOLINA

La Fritillaire pintade (*Fritillaria meleagris* L.) est une espèce rare et fragile, protégée en Suisse, caractéristique des bords du Doubs. La construction de barrages, le changement des pratiques agricoles au bord du Doubs et sa cueillette parfois intensive ont entraîné une raréfaction importante de cette plante. Le long du Doubs jurassien, elle ne subsiste que dans quelques populations isolées, vouées à disparaître sans une gestion adaptée des lieux et un renforcement des populations.

Depuis 2011, le Parc naturel régional du Doubs coordonne le renforcement des populations de fritillaires. La planification des travaux prévoit la récolte de graines de fritillaires dans des populations importantes des bords du Doubs neuchâtelois puis leur mise en culture dans les jardins botaniques de Porrentruy (JU) et de Neuchâtel (NE). Des bulbes issus de ces cultures sont ensuite réimplantés dans des sites naturels dans lesquels des fritillaires sont encore présentes ou l'étaient il y a encore quelques années. Ces sites sont suivis chaque printemps afin de dénombrer les plantes en fleur ou non et suivre les progrès de ces renforcements de population. Ce suivi permet d'observer, dans le site le plus important, une augmentation notable du nombre de fritillaires fleurissant au printemps.

Introduction

La Fritillaire pintade (*Fritillaria meleagris* L., fig. 1) est présente en Suisse principalement le long du Doubs. Elle peuplait abondamment ses berges et ses affluents jusqu'au début du xx^e siècle. La construction de

barrages, qui ont isolé les populations et réduit fortement la propagation des graines, le changement des pratiques agricoles (drainages, labours et cultures, précocité de la première fauche, hersage) ainsi que la cueillette parfois importante ont causé une très forte régression de cette plante rare et fragile, typique des prairies inondables des rives du Doubs (Druart 2008). Très sensible aux conditions météorologiques, à la qualité du sol et au type d'exploitation de la surface, la fritillaire ne fleurit généralement pas chaque année. De même, le nombre de graines produites fluctue en



Fig. 1: fleur de
Fritillaire pintade.
(© Pierre Boillat)

La Fritillaire pintade

fonction des facteurs météorologiques. La cueillette de la fleur péjore grandement la survie du bulbe, l'empêchant de pouvoir reconstituer ses réserves fortement entamées par la croissance de la plante. S'il survit, il faudra plusieurs années pour pouvoir espérer une nouvelle floraison.

Contexte

En 2008, afin de conserver et développer les dernières populations de cette plante protégée et inscrite sur la Liste rouge des plantes vasculaires menacées, l'Office de l'environnement du canton du Jura a établi un plan de renforcement des populations de fritillaire et de réintroduction dans des sites favorables. L'objectif est d'établir le long du Doubs jurassien des stations à fritillaires capables de maintenir un effectif de population stable et de ressemer par elles-mêmes les berges en aval du cours d'eau. Dans le cadre du plan de renforcement, il a été choisi de fixer à 200 pieds la taille à partir de laquelle les efforts de renforcement d'un site via des réimplantations ne sont plus poursuivis, ce dernier devant se maintenir naturellement. En outre, autant pour les sites ayant atteint ce seuil que pour l'ensemble du territoire où la fritillaire est présente, des efforts de protection et de sensibilisation doivent être promus et maintenus, car ils sont dans tous les cas essentiels à la préservation de l'espèce sur le long terme. Dans ce but, le Parc du Doubs installe chaque année des panneaux d'information et de sensibilisation sur la fritillaire dans trois sites de présence de la plante, dont deux dans le canton du Jura. Ils restent en place durant la floraison de la plante et sont ensuite enlevés. Le jardin botanique de Porrentruy a également créé des panneaux d'information sur la fritillaire dans le cadre de Botanica 2016. Ces panneaux ont été repris par le Parc et exposés au Bois du Petit Château (La Chaux-de-Fonds) en 2017, à Saignelégier en 2018 et à Saint-Ursanne en 2019.

Matériel et méthode

Une première récolte de graines a été effectuée en 2008, suivie de leur transfert au Jardin botanique de Porrentruy pour leur mise en culture. En 2011, des bulbes de fritillaires ont été récupérés lors de travaux d'agrandissement de l'EMS «Les Fritillaires» au Locle et transférés également au jardin botanique. Ensuite, les sites de renforcement correspondant aux exigences de la fritillaire ont été définis et, en collaboration avec les exploitants agricoles et le conseiller du réseau

écologique de la vallée du Doubs, des mesures d'entretien adéquates ont été définies. Le Parc naturel régional du Doubs a organisé les premières plantations de bulbes en automne 2011. Une période d'observation des résultats a suivi durant trois ans, qui a permis également de consolider la collaboration avec le groupe de travail dédié à ce projet et de déterminer la suite des tâches.

Depuis 2015, des graines sont récoltées chaque année dans des populations importantes des bords du Doubs neuchâtelois; une partie sont stockées pour leur conservation et une autre partie sont mises en culture dans les jardins botaniques de Porrentruy et de Neuchâtel (ce dernier a rejoint le projet en 2016). Des bulbes issus de ces cultures (fig. 2) sont ensuite réimplantés dans les sites naturels de présence



Fig. 2 : bulbes de fritillaires issus de la culture de graines au jardin botanique de Porrentruy.

« historique » de fritillaires, cultivés de manière extensive. Chaque site de réimplantation est suivi une à deux fois par année, au début du printemps. On y compte le nombre de pieds de fritillaires et, parmi eux, le nombre de plantes en fleur.

Résultats

Entre 2011 et 2019, sept sites ont fait l'objet de réimplantations, pour un total de plus de 3300 bulbes. Tous sont situés le long du Doubs jurassien. Un site, dans le Clos du Doubs, voit les efforts de renforcement récompensés. Le peuplement de fritillaires est passé d'une vingtaine de plantes observées chaque année jusqu'en 2014 à environ 140 en moyenne entre 2017 et 2019. Cette tendance encourageante permet d'espérer que le site puisse atteindre à court terme le seuil fixé de 200 plantes chaque année.

Les autres sites de renforcement ne conservent toujours qu'un tout petit nombre de fritillaires et ne présentent pas de signe de récupération des populations. L'un d'eux voit des plantes pousser presque chaque année, mais à raison de 1 à 4 pieds seulement. D'autres sites connaissent des situations encore plus aléatoires, avec une quantité de fritillaires oscillant entre 0 et 5 annuellement (exceptionnellement 21 sur un site, mais plus aucune depuis lors). Pour certains, des pratiques agricoles non adaptées à la présence de fritillaires ont été observées de façon répétée, et pour d'autres les facteurs influents sont moins évidents. Néanmoins, les résultats du projet sont globalement positifs: sur le site du Clos du Doubs, davantage de fritillaires ont été observées annuellement depuis 2016 par rapport à l'ensemble des sites suivis du canton du Jura de 2011 à 2015.

Bien que ne faisant pas partie des sites de renforcement, d'autres lieux connus avec présence de fritillaires ont été ponctuellement visités. Ces suivis ont montré une tendance globale à la régression des populations. Certains de ces sites ont été inclus dans le projet de renforcement ou font l'objet d'une révision des conditions d'exploitation et de gestion pour leur adéquation aux besoins de la fritillaire.

Un rapport, à usage interne seulement, récapitule les travaux menés et les résultats obtenus de 2012 à 2019 (Molina 2020). Il explique aussi l'importance de la poursuite du projet, par la récolte de graines, leur mise en culture et le renforcement des populations existantes. L'effort doit se poursuivre pour essayer de sauver à terme les fritillaires le long

du Doubs jurassien et permettre d'y établir au moins deux populations capables de s'auto-reproduire à long terme (Druart 2008).

Remerciements

Ce projet de renforcement des populations de Fritillaire pintade a permis de rassembler les forces de nombreux acteurs autour de la préservation de cette espèce menacée de disparition en Suisse. Ainsi, une bonne collaboration s'est établie entre l'Office de l'environnement du canton du Jura, le Service des forêts, de la faune et de la nature du canton de Neuchâtel, le jardin botanique de Porrentruy, le jardin botanique de Neuchâtel, le botaniste Philippe Druart et le Parc naturel régional du Doubs. Tous ces acteurs œuvrent ensemble pour le maintien de la Fritillaire pintade dans ses habitats naturels le long du Doubs.

Viviane Froidevaux (viviane.froidevaux@parcdoubs.ch) est géographe et cheffe de projets au Parc naturel régional du Doubs depuis 2011. Elle est responsable de projets dans le domaine de la nature et de l'agriculture. Elle est responsable du projet de renforcement des populations de fritillaires depuis 2020.

Rafael Molina (rafael.molina@parcdoubs.ch) est scientifique de l'environnement et chef de projets au Parc naturel régional du Doubs depuis 2015. Il a coordonné entre 2015 et 2019 le projet de réimplantation et est depuis 2020 responsable des projets de renforcement de l'infrastructure écologique dans le Parc.

BIBLIOGRAPHIE

- Druart P., 2008 : *Plan de renforcement des populations existantes et de réintroduction sur des sites historiques de la Fritillaire pintade (Fritillaria meleagris L.) dans le canton du Jura (Suisse)*.
Office de l'environnement de la République et Canton du Jura, Saint-Ursanne.
- Molina R., 2020 : *Renforcement des populations de Fritillaire pintade dans le canton du Jura — Rapport de synthèse pour la période 2012-2019*. Parc naturel régional du Doubs, Saignelégier.

En Pratchie — diagnostic fonctionnel du bas-marais d'importance nationale n° 3901

CÉLIEN MONTAVON,
PHILIPPE GROSVERNIER

L'approvisionnement en eau et sa qualité sont les facteurs déterminant le bon fonctionnement d'un marais. En Pratchie est un bas-marais d'importance nationale situé dans une combe, entouré de terres agricoles et alimenté par de nombreuses petites sources et suintements. Au cours des dernières années, un assèchement et une eutrophisation ont été constatés.

Un diagnostic fonctionnel du marais a été effectué à l'aide de la méthode *Espace Marais*. Les perturbations quantitatives et qualitatives de l'approvisionnement en eau ont été investiguées. La mise en place de résines échangeuses d'ions a permis d'évaluer l'efficacité de la zone tampon trophique (ZTT).

Les résultats montrent que l'assèchement est dû à la concentration et à l'accélération de l'évacuation de l'eau du biotope et de son bassin versant par les drains et les routes, le tout aggravé par les conséquences du changement climatique. Quant à l'eutrophisation, elle est en partie due à des apports d'eaux souterraines chargées en nutriments court-circuitant la ZTT.

Le plan de gestion prévoit le ralentissement des flux hydriques au sein du marais. Les eaux chargées en nutriments et court-circuitant la ZTT (via drains, sources et suintements) devraient être épurées avant d'entrer dans le biotope. Pour certaines, leur provenance doit être identifiée.

Introduction

Par définition, un marais est un écosystème caractérisé par un approvisionnement en eau excédentaire. Le mode d'approvisionnement et la qualité de l'eau diffèrent selon le type hydrologique du marais en

question (Steiner & Grünig 2002). En Suisse, la protection des marais est ancrée dans la Constitution depuis l'initiative de Rothenthurm en 1987. Les Ordonnances sur les hauts-marais (OHM), sur les bas-marais (OBM) et sur les sites marécageux (OSM) en fixent le cadre légal. Cette protection se matérialise sous la forme d'inventaires des objets marécageux cartographiés sur la base de critères de végétation. Or, en matière de protection des marais, la seule considération de la végétation n'est pas suffisante pour assurer la pérennité d'un écosystème. C'est l'ensemble de la biogéocénose qu'il faut considérer (Grosvernier *et al.* 2018).

De par leur situation géographique en plaine (426 m) au nord de la chaîne du Jura, les marais de Damphreux (JU, CH) représentent un patrimoine naturel unique en Suisse qu'il faut absolument préserver.

En Pratchie, le bas-marais d'importance nationale n° 3901 (fig. 1), occupe le fond d'un petit vallon rendu imperméable par une couche de limons d'altération de l'Holocène. De nombreuses petites sources et

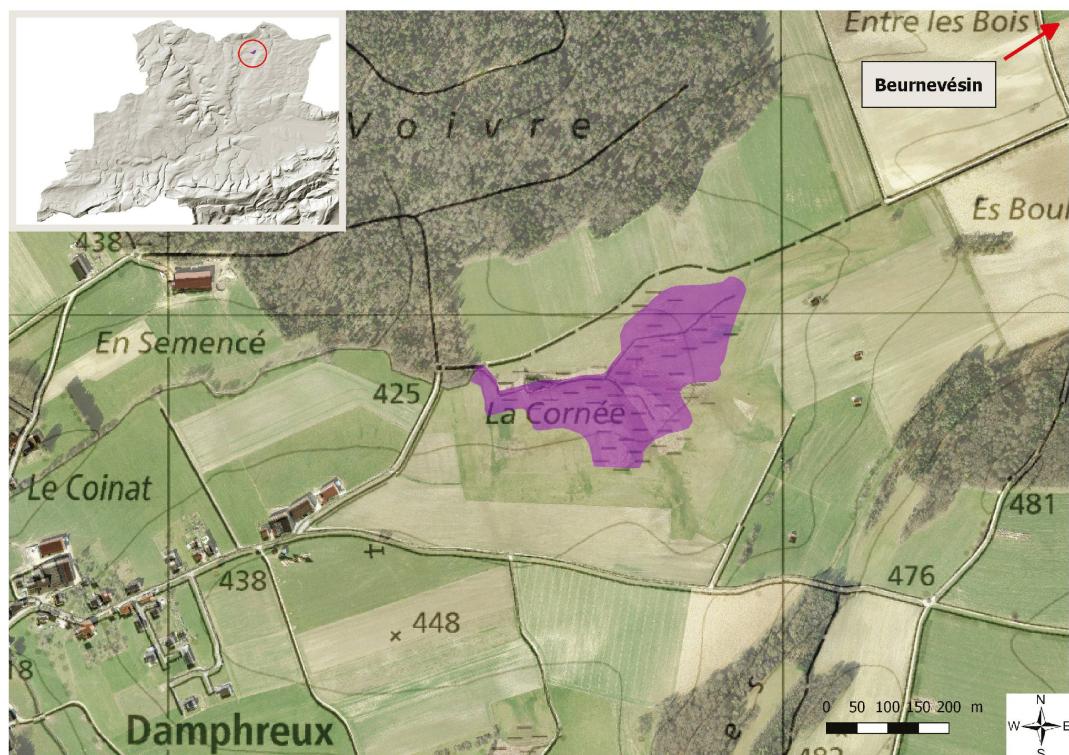


Fig. 1. Situation du bas-marais d'importance nationale n° 3901 sur la commune de Damphreux en Ajoie (JU), au nord de la chaîne du Jura. Le bas-marais se trouve à l'est de la commune. Le périmètre de l'objet au sens de l'inventaire fédéral des bas-marais est représenté en violet sur la carte. Relief dans l'encart: © SIT-Jura – Swisstopo DV 5704000630-5704000640 – Openstreetmap. Orthophoto utilisée dans cette figure et les suivantes: SWISSIMAGE©2017 Swisstopo (57040006965). Source orthophoto utilisée dans cette figure et les suivantes ainsi que carte nationale: Office fédéral de topographie.

suintements approvisionnent le marais en eau. Cette petite combe, dite « la Cornée », est marquée par l'activité agricole qui fait peser une pression importante sur le biotope qui collecte également les eaux de ruissellement issues des parcelles exploitées (Bassin 2019). Cette pression s'est matérialisée au cours des dernières décennies par un assèchement, une eutrophisation et un enrichissement du milieu visible du point de vue de l'évolution de la végétation (Grosvernier comm. pers.).

La Fondation des Marais de Damphreux (FMD), propriétaire de plusieurs parcelles hébergeant le marais, est active depuis près de 30 ans pour la préservation du site. De nombreuses mesures de conservation ont été prises pour assurer au biotope un approvisionnement en eau adéquat: mise en place de zones tampon trophiques (2010), restitution des eaux de drainage de Beurnevésin détournées du vallon lors du remaniement parcellaire à la fin des années 1990 (2017), réhabilitation de l'ancien chemin de la Cornée, qui longe le biotope au nord, constituant jusqu'alors une barrière hydrologique détournant les eaux du versant nord (2018). Ces mesures étant relativement récentes, il est difficile d'évaluer leur effet à l'heure actuelle. Un diagnostic du fonctionnement actuel du site aboutissant sur un plan de gestion a été réalisé entre 2018 et 2019. Les résultats de cette expertise sont présentés ici.

Matériel et Méthodes

Étude du fonctionnement hydrologique du site

Approche Espace Marais

L'approche *Espace Marais* est une méthode développée récemment afin de déterminer une zone tampon hydrique (ci-après ZTH) nécessaire à chaque marais telle qu'exigée par la loi. Une ZTH comprend les surfaces adjacentes aux biotopes marécageux dans lesquelles toute modification du régime local des eaux doit être soumise à un examen de ses conséquences sur la conservation du biotope marécageux. La méthode est décrite sur le site marais.ch. La phase I est basée sur une approche par système d'information géographique (SIG) en suivant plusieurs étapes (Grosvernier *et al.* 2018):

1. Le périmètre du marais en tant que biogéocénose est déterminé en intégrant les données de cartes de végétation, des sols et de la géologie locale.

2. Le bassin versant topographique (BV) du marais est calculé sur la base d'un modèle numérique de terrain (MNT) et corrigé sur la base d'informations géologiques et hydrogéologiques.

3. Le produit de cette analyse est confronté aux types hydrologiques du marais, les marais dépendant plus ou moins de leur bassin versant en fonction de leur mode d'approvisionnement. À titre d'exemple, les hauts-marais ombratropes dépendent principalement des eaux de pluie alors que les marais de pente dépendent essentiellement des eaux de versant.

4. Les perturbations compromettant l'approvisionnement en eau du biotope (drainage, routes) au sein du périmètre défini sont étudiées.

Étude de terrain (Phase II)

Le site a été parcouru à plusieurs reprises afin d'observer la végétation, de noter l'état des sources et suintements en période pluvieuse et de sécheresse et de vérifier les hypothèses soulevées dans l'approche *Espace Marais* (effet des drains, aménagement des routes, etc.).

Suivi hydrologique

Un tube piézométrique muni d'une sonde enregistreuse du niveau d'eau a été installé en juillet 2018 dans le plan d'eau créé en 2007. La sonde enregistre les données tous les quarts d'heure. Le site a également été équipé d'un pluviomètre en amont du bassin versant. Cet équipement a permis de caractériser, d'une part, le comportement limnimétrique du plan d'eau et, d'autre part, la réponse hydrologique du bassin versant lors d'événements pluvieux.

Hydrochimie

33 résines échangeuses d'ions ont été installées par triplicata à l'interface entre le biotope et la ZTT dans les principales zones d'approvisionnement du biotope ainsi que dans les principales sources et suintements. Les résines simulent l'effet des racines des plantes et fixent les nutriments. Cette méthode donne une bonne indication de l'offre en nutriments disponible sur une certaine période. Les résines ont été installées le 11 avril 2019 et ont été retirées le 9 septembre. Il était initialement prévu de les laisser jusqu'à la fin octobre et d'obtenir ainsi une idée de l'offre sur toute une saison de végétation, mais un test a

révélé que les résines les plus exposées aux nutriments étaient déjà saturées à 70 % début août. Les résultats sont comparés à des résines de référence situées sur une parcelle du site préservée des activités agricoles (Bridgham *et al.* 2001).

Résultats

Espace Marais

Étape 1 : définition du complexe de biotopes marécageux (biogéocénose)

Le périmètre du marais en tant que biogéocénose est le résultat de l'intégration d'une carte de végétation réalisée par l'Université de Neuchâtel (Poupon & Gobat 2008) et de la carte des sols de l'Agroscope de Reckenholz (Bonnard 1996). Il est matérialisé en rose sur la figure 2.



Fig. 2. En rose, le périmètre du marais en tant que biogéocénose défini sur la base de la carte de végétation et de la carte des sols. L'orthophoto de 2017 utilisée comme fond de carte laisse apparaître les traces d'humidité des sols. En violet, le biotope au sens de l'inventaire fédéral des bas-marais.

Étape 2 : délimitation des bassins versants du biotope et caractérisation

Selon les cartes géologique et hydrogéologique, une partie du BV topographique, représentée en rouge sur la figure 3, est située sur des limons d'altération imperméables favorisant le ruissellement de surface. Cette couche imperméable est cependant discontinue et permet à l'eau de la nappe captive d'émerger et d'approvisionner le site sous forme de suintments et de sources. Cet approvisionnement semble tributaire du niveau de la nappe phréatique (cf. chap. hydrologie). La partie du BV topographique schématisée en bleu sur la figure 3 repose sur les cailloutis du Sundgau, couche géologique dans laquelle les eaux peuvent s'infiltrer. Ces eaux ne sont cependant pas perdues pour le marais puisqu'elles contribuent à alimenter la nappe souterraine alimentant les sources. Les surfaces schématisées en jaune n'appartiennent pas au BV topographique mais correspondent à un périmètre sensible où les perturbations peuvent affecter le marais. Pour cela elles devraient être exemptes de tout

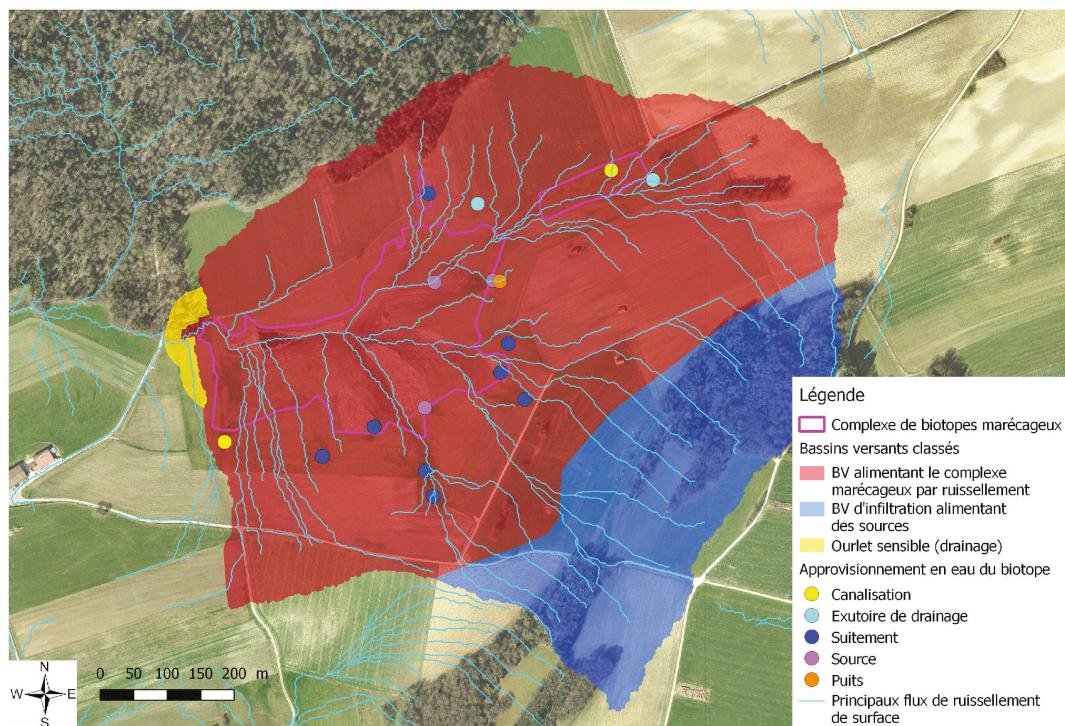


Fig. 3. Bassins versants classés en fonction de leur mode d'approvisionnement du biotope. La signification des codes couleur est mentionnée dans la légende. Le périmètre ainsi défini représente un périmètre de prévention hydrologique. Ce périmètre n'a pas de valeur légale en tant que tel. Il doit faire l'objet d'une procédure de légalisation pour être reconnu comme zone tampon hydrique. Modèle numérique de terrain (MNT) utilisé pour calculer les bassins versants ainsi que les flux présentés dans cette figure et les suivantes: © MNT/MNS Laser du canton du Jura, édition 2001-2008.

drainage et captage selon les principes définis dans la méthode *Espace Marais*.

Étape 3 : détermination des types hydrologiques du biotope

La carte géologique montre la présence d'alluvions témoignant d'un fonctionnement fluviogène du marais là où coulent encore aujourd'hui des cours d'eau dont le tracé rectiligne indique une correction d'origine anthropique (fig. 4). Ces cours d'eau naissent de sources. Cette partie fluviogène du marais a besoin de cours d'eau pouvant déborder et inonder. Sur le reste du site, la végétation marécageuse dépend des eaux de pentes sous forme de ruissellements diffus et dépend donc largement du bassin versant.



Fig. 4. Le marais présente un fonctionnement hydrologique mixte : fluviogène dans l'emprise historique des cours d'eau (en bleu clair) et soligène de ruissellement dans le reste du biotope (vert). Les cours d'eau dépendent des sources et doivent pouvoir divaguer librement dans le terrain alors que les surfaces de marais de pente nécessitent un ruissellement diffus.

Étape 4 : identification des perturbations dans le périmètre de prévention hydrologique

L'existence et la situation des nombreux drains représentés sur la figure 5 ont été données par différentes sources (Poupon & Gobat 2008,

Flury 2006, BTB 2002, BTB 2016, M. Claude Noirjean et M. Philippe Bassin comm. pers.). La cartographie du système de drains au sein du biotope issu du rapport de Ch. Poupon a été faite par photo-interprétation. Une vérification de terrain s'est donc avérée nécessaire.

Dans le biotope, les drains tirés au boulet (en rouge sur la figure 5; figure 6a) sont très peu marqués topographiquement. Leur effet est visible en période de fortes pluies où l'eau se rassemble préférentiellement dans leur emprise et est rapidement évacuée vers le plan d'eau. C'est dans cette emprise qu'on retrouve les Laîches alors que les secteurs plus secs alentour sont colonisés par la Reine des prés.

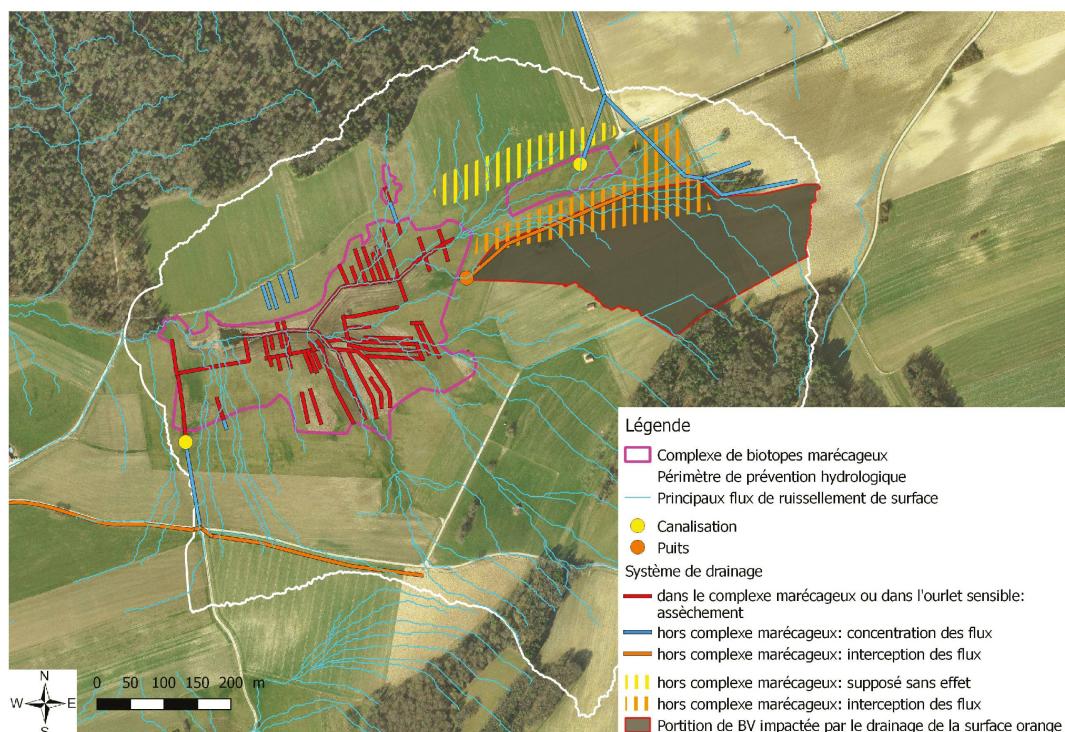


Fig. 5. Système de drainage en place sur le site En Pratchie. La présence de la plupart de ces infrastructures a été décelée par photo-interprétation ou est basée sur des témoignages. Leur présence effective et leur effet ont dû être vérifiés sur le terrain. L'effet supposé des drains est mentionné dans la légende.

Le ruisseau situé au nord du site, incisé et rectiligne (fig. 6b), présente davantage une morphologie de fossé drainant que de cours d'eau. Il collecte les eaux issues de la petite combe en direction de Beurnevésin, intercepte les ruissellements du versant nord et draine les surfaces marécageuses. L'eau est rapidement évacuée vers l'exutoire.

En direction de l'est, de larges surfaces ont été drainées. Les eaux des surfaces en orange hachuré (fig. 5) ainsi que toute la portion de bassin



Fig. 6. (a) Les drains tirés au boulet au sein du biotope sont très superficiels. Ils captent tout de même l'eau lors des événements pluvieux et contribuent à son évacuation rapide vers l'exutoire. (b) Le ruisseau situé au nord du site est incisé et rectiligne. Il a l'effet d'un fossé qui draine le marais et intercepte les ruissellements issus du bassin versant.

versant (13.2 % du BV de ruissellement) en noir transparent (fig. 5) sont captées par un tuyau qui débouche sur un puits perdu. Les eaux de drainage infiltrées dans le puits ressortent directement dans le biotope quand le niveau de la nappe dans le puits est suffisamment élevé (fig. 7c). Plus à l'est, les eaux de drainage de Beurnevésin (fourche bleue sur fig. 5) sont rapatriées via une tête d'aqueduc depuis fin 2017 en amont de la combe, directement sur des surfaces présentant un potentiel pour la végétation marécageuse (fig. 7b). La concentration spatiale de ces eaux chargées en nutriments ne permet pas l'approvisionnement par ruissellement diffus des surfaces marécageuses ni l'épuration par les zones tampon trophiques.



Fig. 7. Les eaux ramenées dans le marais depuis la route au sud-ouest (a) et depuis le système de drainage de Beurnevésin (b) sont très chargées en nutriments comme en témoigne la vigueur de la végétation. En période de hautes eaux, les eaux de drainage infiltrées dans le puits se frayent un chemin souterrain et ressortent dans le biotope (c).

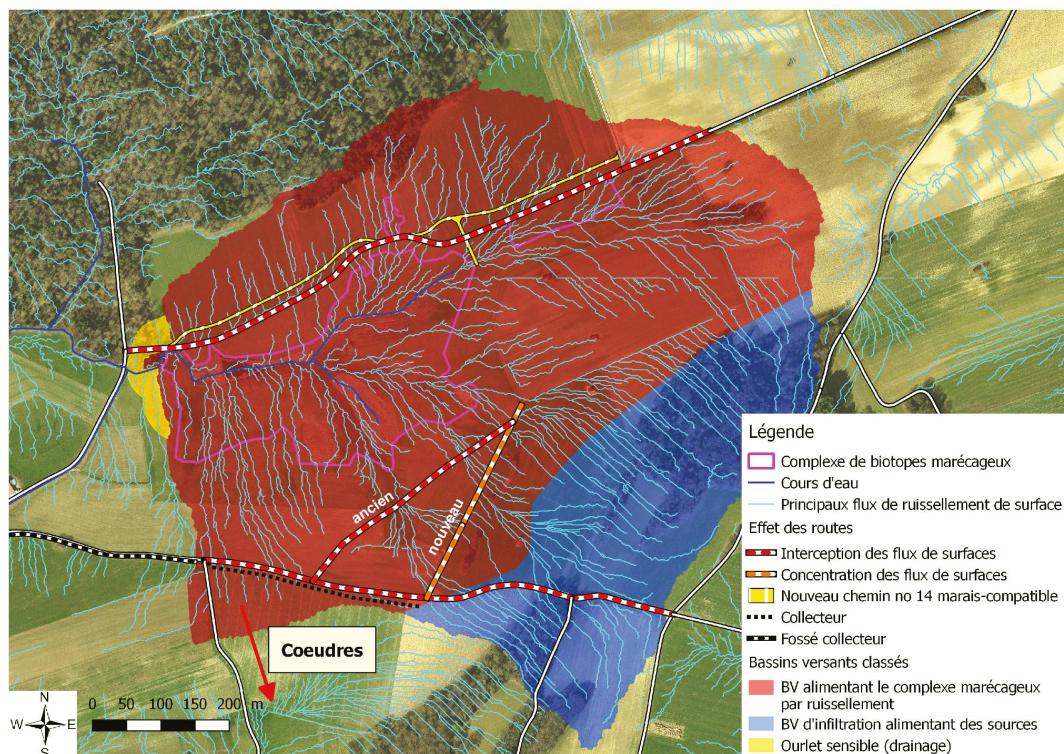


Fig. 8. L'effet des routes et chemins présents dans le périmètre de prévention hydrologique a été évalué sur la base de la circulation des flux. Cet effet a ensuite été vérifié sur le terrain. Le chemin n° 14 situé au nord du biotope a été réhabilité en 2018 avec une structure marais-compatible.

L'effet des routes et des vestiges de chemin sur les eaux de ruissellement a été mis en évidence sur la base de flux simulés (fig. 8), mais a également nécessité une vérification de terrain. L'effet du chemin n° 14, situé au nord du marais, était cependant déjà connu de la FMD et des services cantonaux: l'ancien chemin, dont le tracé est schématisé en rouge et blanc au nord du biotope, a été démantelé en 2018 et une nouvelle infrastructure marais-compatible a été construite sur le tracé illustré en jaune et blanc. Une étude de la perméabilité hydraulique a été réalisée par le Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie de l'Université de Neuchâtel (CHYN) avant et après réhabilitation (Berdat *et al.* 2019). Les résultats ont prouvé l'effet de barrière hydrologique de l'ancienne infrastructure ainsi que le libre passage des flux de surface et de subsurface par-dessus et à travers le nouveau chemin.

Le site est ceinturé de 2 autres routes et du vestige (reste de coffre) d'un ancien chemin qui desservait les loges.

Le nouveau chemin vers les loges (situé au sud du marais, en traitillé orange sur la figure 8, avec inscrit «nouveau» au-dessus) est illustré sur les figures 9a et 9b. Il est composé de deux tronçons: un très pentu et

réalisé avec des dalles de béton et l'autre plat fait en groise. Le premier tronçon pourrait poser problème, mais le BV qui le concerne est restreint (la plupart de l'eau s'infiltre). Le second n'est pas problématique de par sa topographie et les alpines aménagées ponctuellement facilitent le passage de l'eau.

Le chemin au sud du site a également une structure en dalles de béton et est très pentu (fig. 10a). La partie amont est située sur une partie du bassin versant où l'eau s'infiltre. Sa partie moyenne (entre l'intersection avec le «nouveau» chemin menant aux loges et celle avec le chemin menant en direction des Cœudres au sud) est longée par un collecteur (fig. 5 et 8). Plus bas encore en direction de Damphreux, c'est un fossé qui collecte les eaux (fig. 5, 8, et 10b). Les eaux de ces deux aménagements

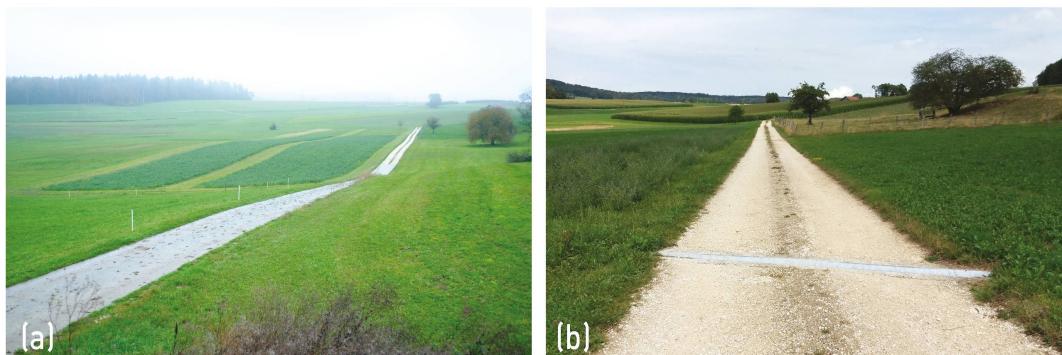


Fig. 9. «Nouveau» chemin menant aux anciennes loges En Pratchie et En Varret. (a) une vue d'ensemble du chemin avec en premier plan un tronçon pentu et fait de dalles de béton sur un coffrage. (b) un deuxième tronçon plat et réalisé en groise avec des alpines pour laisser passer l'eau.



Fig. 10. (a) Le chemin longeant le sud du marais est pentu et fait de dalles en béton sur un coffrage. (b) Sa partie aval est bordée d'un fossé qui collecte les eaux. Les eaux sont redirigées vers le marais par un tuyau sous la route, donc de manière concentrée (cf. figures 5 et 7a).

sont redirigées vers le marais de manière concentrée par un tuyau sous la route (fig. 5 et fig. 7a).

D'après les flux de ruissellement simulés, les vestiges de l'ancien chemin en direction des loges (situé au sud du marais, en traitillé rouge sur la figure 8, inscrit « ancien ») représentaient un barrage dans le bassin versant. Une vérification de terrain lors d'une période pluvieuse nous permet d'affirmer que l'eau n'est pas retenue par cette infrastructure.

Hydrologie

Les mesures faites à l'aide du piézomètre implanté dans le plan d'eau témoignent du comportement saisonnier du niveau d'eau de l'étang, mais également de la recharge qui se fait par les apports du bassin versant (fig. 11). En effet, le plan d'eau n'a pas été creusé et n'est pas connecté à la nappe souterraine: une digue a été érigée sur les limons imperméables (BIOTEC 2005; P. Bassin comm. pers.).

En 2018, année très sèche avec 750 mm de précipitations contre 1 035 mm en moyenne sur la période 1961-1990 pour la station de Fahy, le plan d'eau s'est complètement vidé à partir de septembre. Il a été remarqué que les sources et suintements n'étaient plus émissives à partir de cette période.

2019 fut une année plus humide avec 922 mm de précipitations. Le plan d'eau ne s'est pas asséché malgré les pertes liées à l'évaporation et aux fuites constatées. En effet, en période estivale, le niveau de l'eau continue à baisser même de nuit. Les sources sont restées émissives cette année-là.

Situé à l'exutoire du bassin versant, le plan d'eau, par les fluctuations de son niveau, reflète l'hydrologie du site d'En Pratchie. La pente de la courbe caractérisant la vitesse avec laquelle le plan d'eau se vide est restée la même d'une année à l'autre, quand bien même les sources sont restées émissives durant toute la saison de végétation 2019.

Cela témoigne du fait que les sources ne suffisent pas à maintenir le niveau de l'étang. C'est davantage la quantité et la fréquence des précipitations, qui ruissent sur le terrain et permettent le maintien d'un bilan d'eau excédentaire pour le marais.

La réponse du bassin versant à un événement pluvieux en période d'étiage est illustrée sur la figure 12. On remarque que le niveau du plan d'eau atteint son maximum à peine une heure après la pluie. Ce maximum perdure pendant environ six heures puis le niveau recommence à descendre quand le BV se ressouie progressivement. Une grande partie de

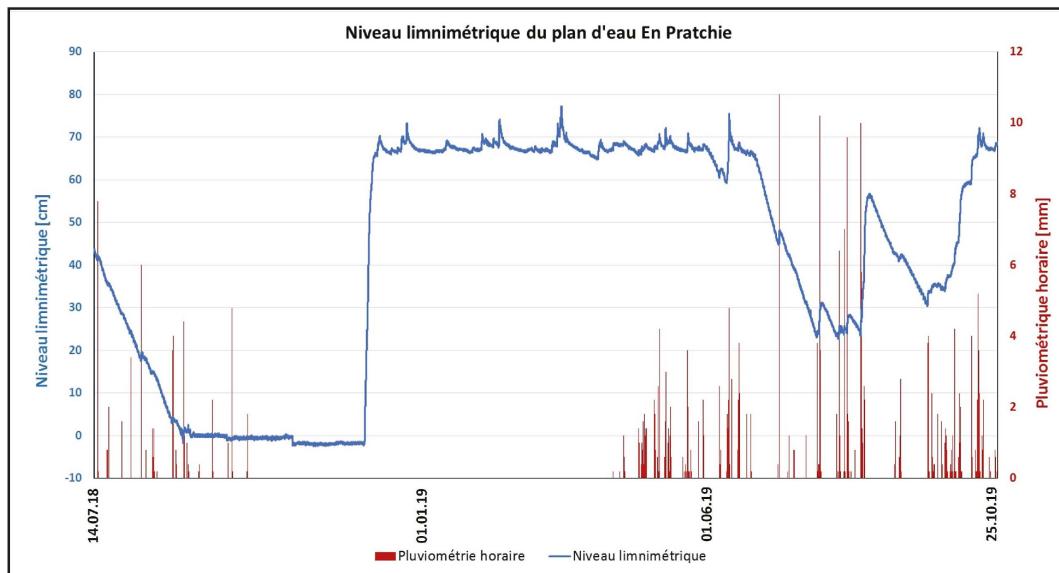


Fig. 11. Le graphique illustré ci-dessus représente l'évolution du niveau limnimétrique de l'étang (courbe bleue) entre mi-juillet 2018 et fin octobre 2019. Le comportement du plan d'eau reflète l'hydrologie du site et de son bassin versant. L'histogramme (en rouge) illustre les précipitations horaires de 2018 et 2019 mesurées avec un pluviomètre. Celui-ci a été retiré du site entre novembre 2018 et avril 2019.

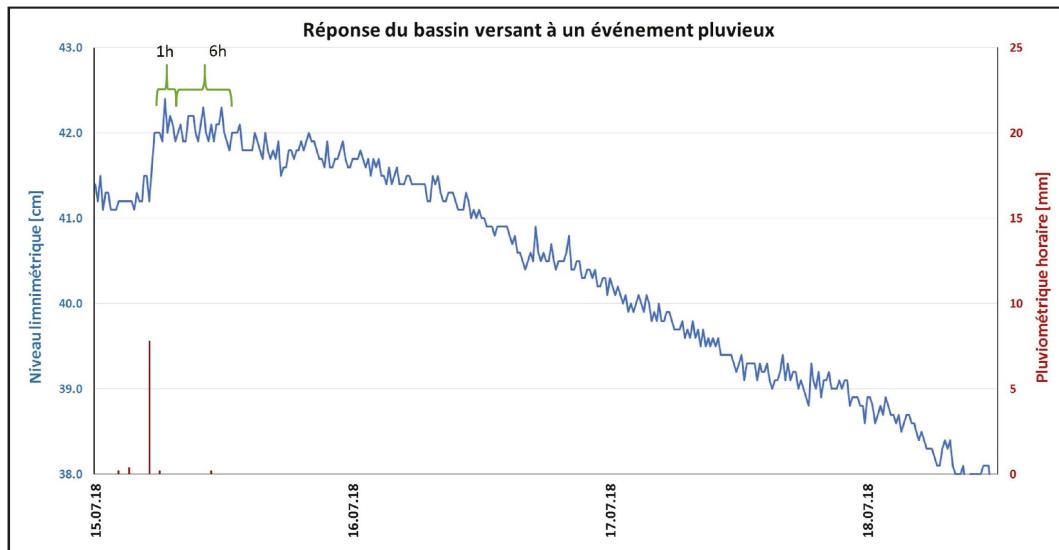


Fig. 12. Variation du niveau d'eau de l'étang suite à un événement pluvieux en période d'étiage. Le maximum est atteint une heure après l'événement et perdure pendant six heures. Les apports du bassin versant compensent alors les pertes liées à l'évaporation et aux fuites du système.

l'eau arrive donc rapidement à l'exutoire du système et fait monter le niveau de l'étang. L'eau qui arrive ensuite progressivement ne compense plus les pertes.

Le point signalé par la flèche sur la figure 13 est un puits d'où il était possible de pomper 3000 L d'eau en quelques minutes selon le témoignage

de l'exploitant agricole. Ceci pourrait indiquer que nous sommes en contact avec la nappe souterraine. Le puits a été nivelé (433,85 m) et la profondeur de la nappe sous le niveau du sol a été mesurée à l'étiage au mois d'août 2019 (-122 cm) et après une période pluvieuse fin octobre de la même année (-72 cm).

Comme nous pouvons l'observer sur la figure 13, la plupart des sources et suintements se situent à une altitude plus ou moins égale ou supérieure à celle du puits, vraisemblablement là où la couche de limons imperméables est moins continue, à proximité d'une faille géologique. Seule une altitude de nappe suffisamment élevée permettrait ainsi à ces suintements d'approvisionner le biotope en eau.

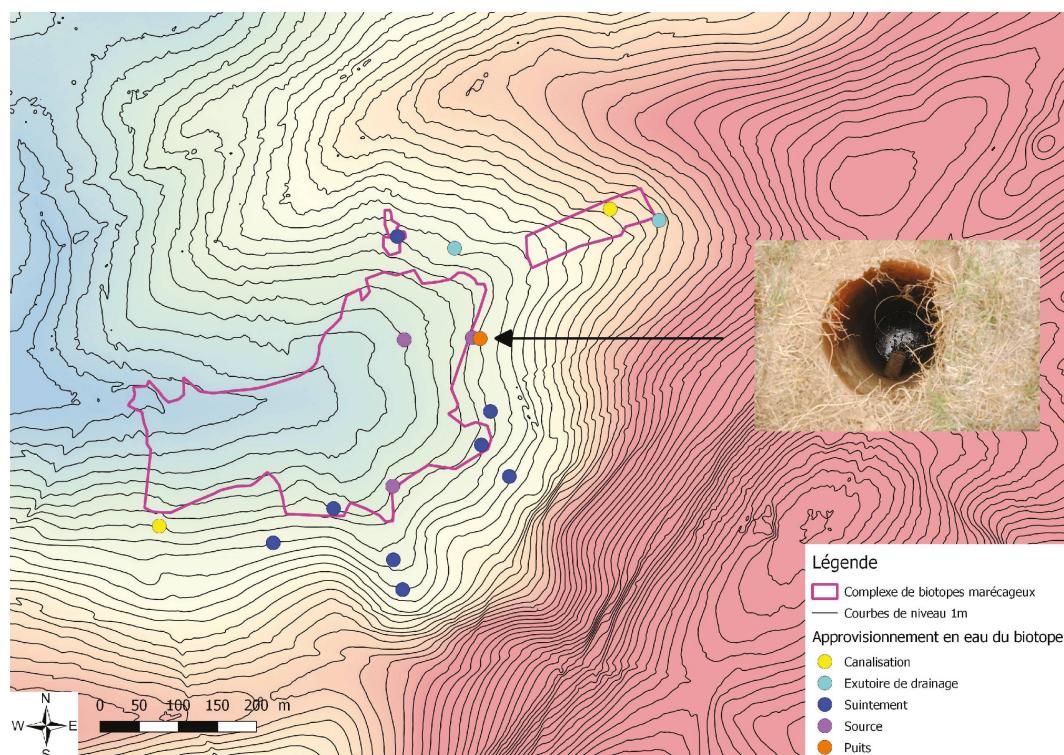


Fig. 13. Position des sources et suintements dans la topographie du site. La flèche indique la position du puits d'où il est possible d'observer la profondeur de la nappe phréatique par rapport au niveau du sol. On observe sur la photo l'arrivée des eaux de drainage de la zone hachurée en orange sur la figure 5. Courbes de niveaux: © Géodonnées de la République et Canton du Jura.

Hydrochimie

Les teneurs en nitrates des principaux flux de ruissellement de surface à l'interface entre la ZTT et le biotope au sens de l'inventaire, ainsi que dans les sources et suintements sont représentées sur la figure 14. Le

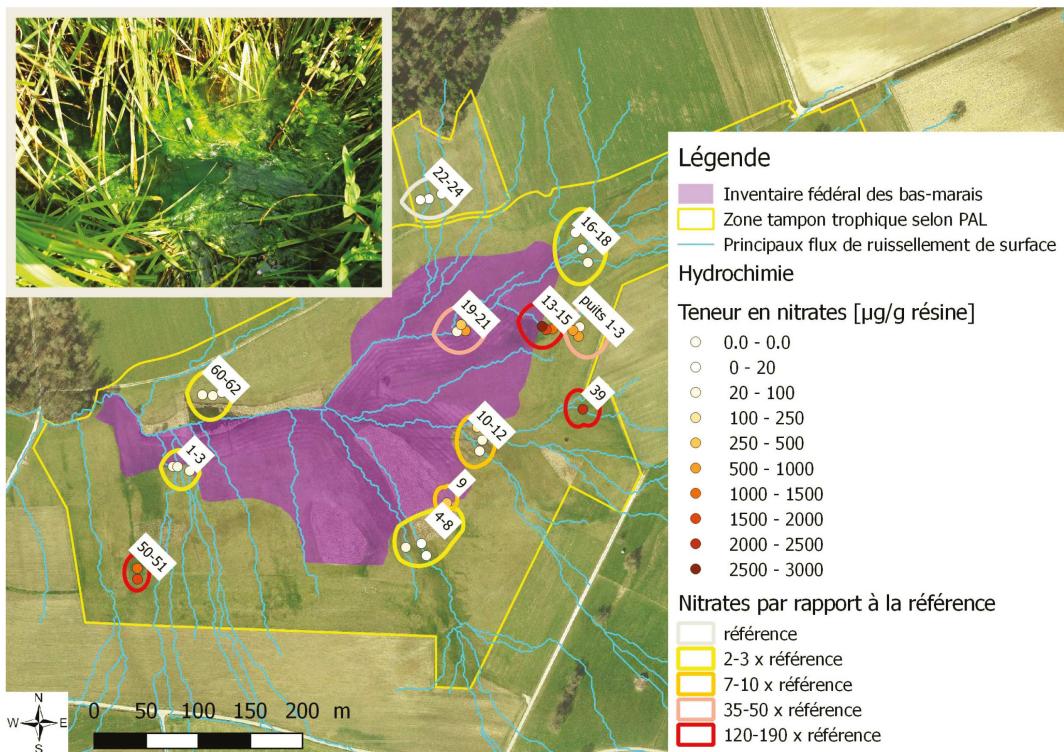


Fig. 14. Situation et valeurs mesurées des triplicatas de résines échangeuses d'ions sur les principales lignes de flux ainsi que les sources et canalisations approvisionnant le biotope en eau. Le triplicata 22/23/24 fait office de référence. Les résines individuelles sont groupées selon leur concentration de nitrates par rapport à la référence. La photo en encart montre la prolifération d'algues dans la source sud (triplicata 7/8/9).

triplicata 22/23/24 situé sur une parcelle exploitée extensivement à l'orée de la forêt fait office de référence.

Globalement les teneurs en nitrates sont peu élevées dans les eaux de ruissellement de surface, prouvant que la ZTT est efficace. La différence de concentration mesurée entre les résines 39 (2153.2 $\mu\text{g/g de résine}$) et 12 (148.1 $\mu\text{g/g de résine}$), situées sur la même ligne de flux, mais respectivement à l'entrée de la ZTT vers un dépôt de fumier et à proximité du biotope, montre l'effet d'épuration.

Les eaux de source des triplicatas 19/20/21 et 13/14/15 ainsi que les embouchures de canalisation (résines 50/51, puits-1/puits-2/puits-3) affichent des concentrations en nitrates plus importantes. Ces teneurs élevées se matérialisent par la végétation qui est très vigoureuse en ces différents points. L'orthophoto de 2017 utilisée ici comme fond de carte donne un bon rendu de la vigueur de la végétation en fonction des nuances de vert et laisse apparaître d'autres secteurs d'apport en nutriments qui n'ont pas été mesurés. Le triplicata 7/8/9 (source sud)

présente des teneurs en nitrates moins élevées (excepté le 9). Les observations de terrain ont cependant montré que la source était polluée de manière intempestive comme en témoigne la prolifération d'algues sur la photo en encart de la figure 14.

Discussion

En Pratchie, le bas-marais d'importance nationale n° 3901, est un marais dont les types hydrologiques sont fluviogène et soligène. Les surfaces fluviogènes sont aux abords de deux ruisseaux qui naissent de sources. Ces surfaces devraient être tributaires des divagations des ruisseaux à travers la microtopographie. Le reste des surfaces marécageuses est de type soligène, elles dépendent donc d'un approvisionnement en eau qui devrait se faire par ruissellement diffus. Ces parties peuvent être sujettes à des ressuyages fréquents.

La végétation actuelle du site est une mosaïque de *Magnocaricion*, de Mégaphorbiaie à Reine des prés et de faciès humide de l'*Arrhenatherion* tous très vigoureux. La Mégaphorbiaie à Reine des prés a colonisé la végétation typique (le *Calthion* et les prairies à petites laîches) qui était encore représentée quelques années en arrière (Grosvernier 2006; Poupon & Gobat 2008). C'est ce type de végétation typique que la Fondation des Marais de Damphreux, propriétaire du site, souhaitait favoriser en confiant à l'entreprise LIN'eco la tâche d'établir un diagnostic fonctionnel et un plan de gestion.

L'hydrologie est la clé de voûte du bon fonctionnement des écosystèmes marécageux. Leur exploitation joue également un rôle prépondérant pour certains bas-marais. Si l'hydrologie n'est pas perturbée, les prairies à petites laîches ont besoin de très peu d'entretien : une fauche annuelle en automne avec exportation de la litière permet de les maintenir.

Les perturbations hydrologiques identifiées sont la concentration et l'accélération de la sortie de l'eau dans le biotope et dans son bassin versant ainsi qu'une charge en nutriments trop élevée.

Recommandations

Afin d'atteindre les objectifs fixés par les gestionnaires du site, la première mesure à prendre est de restaurer l'hydrologie en ralentissant les flux. Pour ce faire, il est nécessaire de combler le lit du cours d'eau nord et le laisser par la suite se frayer son propre chemin. Le cours d'eau

sud doit être barré d'une succession de seuils forçant l'eau à s'écouler sur un front plus large.

La deuxième mesure est de prévenir l'introduction d'intrants supplémentaires dans le biotope. Les eaux chargées en nutriments et infiltrées dans le puits doivent être restituées au marais après avoir été épurées par les ZTT. Ainsi le puits et le système de drainage à l'est devraient être supprimés. De la même manière, les eaux introduites de manière concentrée par des canalisations devraient être étalées en amont de la ZTT. De plus, il faut veiller à avoir une faible charge en bétail dans la ZTT et les tas de fumier déposés juste à la limite de la ZTT sont à proscrire et sont non conforme à la directive OEPN EA07 (2006).

La provenance de l'eau alimentant les sources devrait être déterminée par un hydrogéologue. Nous émettons l'hypothèse que cette eau est tributaire de la nappe souterraine sous les limons, dans quel cas la qualité de l'eau de cette nappe devrait être testée. En Suisse, près de 15 % des eaux souterraines montraient des teneurs en nitrates supérieures aux normes et cette proportion passe à 40 % en zone de grandes cultures selon les dernières données disponibles (OFEV, 2019).

La troisième mesure est une amélioration de la flore par la fauche. Le biotope est actuellement exploité comme pré à litière, soit fauché dans son ensemble une fois tous les deux ans après le 1^{er} septembre. Un tel régime d'entretien ne permet pas d'exporter les nutriments présents dans la biomasse, ni d'éviter l'enrichissement. En effet, les ressources sont rapatriées par les plantes dans leur système racinaire à leur sénescence et il est ainsi trop tard lorsqu'on fauche en fin d'été. Deux fauches annuelles du biotope en juin/juillet et en septembre pendant 2 à 3 ans sont préconisées (Bressoud *et al.* 2002).

Enfin la dernière mesure concerne des aménagements spécifiques pour des espèces cibles que l'on souhaite favoriser.

Célien Montavon (celien.montavon@lineco.ch), titulaire d'un master en biogéosciences travaille depuis quatre ans au sein du bureau LIN'eco.

Philippe Grosvernier (ph.grosvernier@lineco.ch), titulaire d'une thèse de doctorat sur la régénération des tourbières jurassiennes, est fondateur du bureau LIN'eco.

LIN'eco, Clos-Girard 110, 2854 Bassecourt, est spécialisé dans le diagnostic fonctionnel et la restauration de marais en Suisse et collabore avec des partenaires actifs dans ce domaine en Europe.

ACTES 2020 | SCIENCES

BIBLIOGRAPHIE

- Bassin P. 2019: *Pratchie-La Cornée, un bas-marais d'importance nationale situé sur la Commune de Damphreux*. Fondation des Marais de Damphreux.
- Berdat E., Descloux A., Costa R., Hunkeler D. & Brunner P. 2019: *Influence des routes sur les écoulements de subsurface des marais de pente. Rapport final, site de Damphreux*. Centre d'hydrogéologie et de géothermie de Neuchâtel (CHYN). Script, 17 p. et annexes.
- BIOTEC Biologie appliquée SA. 2005: *Revitalisation des prairies humides «En Pratchie».* Rapport technique et estimation des coûts. Script, 8 p. et annexes.
- Bonnard L.-F. 1996: *Les sols de Damphreux. Étude régionale*. FAL Zürich Reckenholz. Script, 10 p. et annexes.
- Bressoud B., Charlier P., Egloff T. B. 2002: Exploitation et entretien de différents groupements végétaux de bas-marais. In: OFEV (Eds). *Manuel de Conservation des marais en Suisse*. Série L'environnement pratique. Volume 2. Chapitre 2.1.3., 3-21
- Bridgman S. D., Updegraff K. & Pastor J. 2001 : à Comparison of nutrients availability indices along an ombrotrophic-minerotrophic gradient in Minnesota Wetlands. *Soil Sci. Soc. Am. J* 65, 259-269.
- Bureau Technique Brunner Sàrl (BTB) 2002: *Extrait annoté du plan des travaux exécutés dans le cadre du remaniement parcellaire. 1^{re} étape: 2000-2002*.
- Bureau Technique Brunner Sàrl (BTB) 2016: *Projet d'exécution de remaniement parcellaire. 3^e étape de construction des travaux collectifs*. Annexe B et F. Script.
- Carte géologique 1:25 000. Cartes de la Suisse. [Consultée le 13 décembre 2019]. Disponible à l'adresse: map.geo.admin.ch
- Carte hydrogéologique 1:100 000. Cartes de la Suisse. [Consultée le 13 décembre 2019]. Disponible à l'adresse: map.geo.admin.ch
- Directive OEPN EA07 2006: Office des Eaux et de la Protection de la Nature. République et Canton du Jura. 1 p.
- Flury F. 2006: *Bas-marais de Pratchie — La Cornée à Damphreux. Déficit de l'alimentation en eau du bas-marais. Caractérisation et proposition de mesures techniques: rapport hydrogéologique*. MFR Géologie-Géotechnique SA. Script, 7 p.
- Grosvernier P., Montavon C., Urech M., Gsteiger P. & Staubli P. 2018: «Espace Marais» : un outil d'aide à la définition de zones tampon hydriques pour les biotopes marécageux d'importance nationale. *N + L INSIDE* 4, 10-14.
- Grosvernier P. 2006: *Évaluation de l'importance nationale/régionale des Marais de Damphreux*. Notice de terrain.
- Oertli B. & Frossard P.-A. 2013: *Mares et étangs. Écologie, gestion, aménagement et valorisation*. Ingénieurs de l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes. 48op.
- OFEV (éd.) 2019: État et évolution des eaux souterraines en Suisse. Résultats de l'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA, état 2016. Office fédéral de l'environnement, Berne. État de l'environnement n° 1901: 144p.
- Poupon C. & Gobat, J.-M. 2008: *Inventaire floristique et cartographie phytosociologique du marais de Pratchie—La Cornée(Damphreux, JU)*. Rapport de mandat, Fondation des Marais de Damphreux. Laboratoire Sol & Végétation, Université de Neuchâtel. Script, 48 p. et annexes.
- Steiner G. M., Grünig A. 2002: les types hydrologiques de marais suisses. In: OFEV (Eds). *Manuel de Conservation des marais en Suisse*. Série L'environnement pratique. Volume 1. Chapitre 3.1.1., 3-21

Crédits: Fig. 7c, Philippe Bassin; autres photographies et illustrations, LIN'eco.

Les lépidotes, des poissons broyeurs du Jurassique jurassien

LIONEL CAVIN¹

Avec plus de 30 000 espèces, les poissons osseux à nageoires rayonnantes représentent plus de la moitié du nombre total d'espèces de vertébrés. « Poissons osseux à nageoires rayonnantes » est une expression barbare qui définit l'ensemble des poissons connus aujourd'hui, auxquels on retire un millier d'espèces de raies et de requins (qui ne sont pas osseux mais cartilagineux) ainsi qu'une poignée d'espèces de dipneustes (6) et deux espèces de coelacanthes (les nageoires de ces huit espèces ne sont pas rayonnantes mais charnues). La diversité des formes, des tailles et des modes de vie est énorme au sein des actinoptérygiens. Nous nous intéressons ici à un groupe écologique particulier d'actinoptérygiens durophages, c'est-à-dire des poissons qui se nourrissent de proies dures telles que des invertébrés couverts d'une carapace (les crustacés et les oursins par exemple) ou d'une coquille (les coquillages et les escargots). Aujourd'hui, les poissons rangés dans cette catégorie sont, parmi bien d'autres, la dorade, le loup de l'Atlantique, les poissons perroquets. Dans le passé, d'autres espèces occupaient cette niche alimentaire. Il est question dans cet article d'un groupe bien particulier de poissons durophages du Mésozoïque, plus précisément du Jurassique, que l'on nomme de manière informelle les lépidotes.

Le Mésozoïque, appelé parfois ère Secondaire, est une ère géologique qui s'étend de -252 à -66 millions d'années. Le début du Mésozoïque est défini par une extinction de masse, une des plus importantes que notre planète ait connues, et se termine par une autre extinction de masse, celle qui vit disparaître les dinosaures non-aviens et les ammonites, entre autres animaux. Le Mésozoïque se divise en trois périodes, le Trias, le Jurassique et le Crétacé. Nous nous intéressons ici aux fossiles trouvés dans des roches du Jurassique qui, comme on peut facilement l'imaginer, sont des roches très communes dans la chaîne jurassienne.

Les poissons fossiles dans un monde préscientifique

Les fossiles, les restes de plantes et d'animaux, voire les traces de leurs activités, transformés en roche ont depuis très longtemps attiré l'attention des humains. Des fossiles collectés par des hommes de Néandertal, probablement en raison de leur aspect inhabituel, ont été découverts dans le site archéologique d'Arcy-sur-Cure, en Bourgogne, âgé de près de 50 000 ans (Buffetaut 1991). Dans un premier temps, ces fossiles n'étaient pas considérés comme des restes de véritables organismes ayant vécu dans un passé lointain, mais on leur octroyait des pouvoirs magiques, un attribut qu'ils ont conservé jusqu'à une période très récente dans certaines régions du monde. Les glossopètres, par exemple, sont des dents de requins fossiles dont la racine bifide les a fait se confondre avec des langues bifides de serpents pétrifiées (sur l'île de Malte, où ces fossiles sont abondants, la légende raconte que saint Paul aurait maudit les serpents, par trop abondants, en les transformant en pierre). La vertu des glossopètres était pour les uns de faciliter les accouchements et pour les autres d'annihiler les effets des poisons introduits subrepticement dans les boissons. On connaît ainsi des languiers, nom donné à des pièces d'orfèvrerie parfois très finement travaillées qu'on plaçait au centre des tables de banquet. Un languier supportait, comme un petit sapin de Noël minéral, des dents de requins fossiles que les convives détachaient, puis plongeaient dans leur boisson pour en purifier le contenu.

Plus en lien avec le thème de cet article sont les bufonites, appelées également crapaudines. Ces « pierres de crapaud », selon leur étymologie, étaient des petits objets hémisphériques, généralement sombres et brillants, qui étaient supposés se développer à l'intérieur de la tête des crapauds (fig. 1). Le célèbre naturaliste zurichois du XVI^e siècle, Conrad Gessner, illustra une bufonite dans son *De Rerum Fossilium, Lapidum et Gemmarum* en 1565, et William Shakespeare y fit allusion dans la pièce *Comme il vous plaira* lorsqu'il fait dire au duc Frederick : « le crapaud, laid et venimeux, porte pourtant un bijou précieux dans sa tête » (Duffin 2008). Comme pour les glossopètres, les bufonites étaient supposées soigner quantité de maux par un effet de magie sympathique (le venin devient médicament par un transfert de pouvoir entre un objet minéral et un organe vaguement ressemblant chez un animal, ici la langue du serpent et les glandes parotoïdes du crapaud). Chris Duffin

Les lépidotes



Fig. 1.
Un crapaud et quatre bufonites, ou crapaudines, des pierres aux vertus magiques supposées naître dans la tête des crapauds. Il s'agit en réalité de dents fossilisées de certains poissons, les lépidotes. (photo : P. Wagener in Cavin 2009).

(2010) cite Albert Magnus qui recommande d'avaler une bufonite pour se nettoyer le tube digestif. Le médicament peut être récupéré à sa sortie du corps et réutilisé, un exemple unique de médicament recyclable! Les bufonites étaient souvent montées en bijoux, sur des bagues par exemple, et possédaient le statut de pierres précieuses. On en connaît qui accompagnent les gemmes de la couronne que le roi de Bohême Charles IV coiffa lors de son sacre à Aix-la-Chapelle en 1349 pour devenir roi des Romains (Gregorová & Duffin 2019, Gregorová *et al.* 2020). Ces dents hémisphériques appartiennent en fait à des poissons broyeurs assez communs durant la période Jurassique et le début du Crétacé et dont on retrouve les fossiles dans les roches du Jura, les lépidotes.

Pourtant, le fait de reconnaître dans des fossiles de poissons (et d'autres animaux) les restes d'organismes ayant réellement existé dans le passé, plutôt que des organes pétrifiés de crapauds et de serpents ou encore de simples jeux de la nature ou du démon, est assez ancien. Au début du XVIII^e siècle, Johann Jakob Scheuchzer a écrit un ouvrage étonnant, presque humoristique, dans lequel des fossiles de poissons se plaignent de la mauvaise conduite des hommes qui, en provoquant le courroux divin, sont responsables du déluge à l'origine de leur mort (le déluge est une cause de mort surprenante pour des poissons, mais ce serait le trouble des eaux boueuses qui les aurait étouffés). Il s'agit du *Piscium Querelae et Vindiciae* (1708). L'explication biblique de Scheuchzer semble bien naïve pour nous, bien que des créationnistes y adhèrent aujourd'hui encore. Pourtant, elle présentait au début du XVIII^e siècle une certaine modernité car elle admettait une origine

animale pour ces fossiles, alors que la majorité des contemporains de Scheuchzer croyaient encore à l'origine magique ou diabolique des fossiles (Gaudant 2008). Mais ce savant si cultivé, formé à la scholastique, était déjà en retard par rapport à des auteurs plus anciens, tel que l'autodidacte Léonard de Vinci qui avait décrit deux siècles auparavant, avec une acuité étonnante, comment des cadavres de poissons recouverts de sédiment pouvaient, avec le temps, se pétrifier, mais sans pour autant faire référence au déluge biblique (Cavin 2009).

La naissance de la paléoichtyologie

Le naturaliste suisse Louis Agassiz est considéré comme le fondateur de la science qui s'intéresse aux poissons fossiles, la paléoichtyologie. Ce personnage est aujourd'hui très critiqué pour ses prises de positions sur l'inégalité des races humaines lorsqu'il vivait aux États-Unis, dans la deuxième partie de sa carrière. Mais dans la première moitié de sa vie, jusqu'en 1842, Agassiz s'est concentré sur des questions strictement scientifiques en s'intéressant à la période glaciaire, un épisode qui venait d'être identifié, aux poissons d'eau douce d'Europe et surtout aux poissons fossiles. Sous l'impulsion du célèbre anatomiste et paléontologue Georges Cuvier, du Muséum national d'histoire naturelle à Paris, Agassiz entreprit dans les années 1830 l'étude de la quasi-totalité des collections de poissons fossiles connues à son époque. Parmi tous les spécimens qu'Agassiz eut entre les mains, certains provenaient du

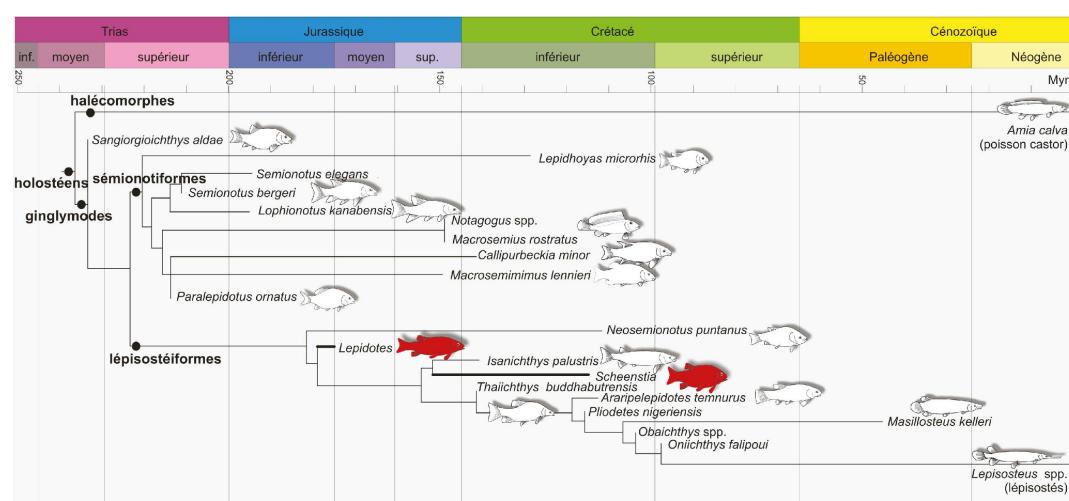


Fig. 2. Phylogénie simplifiée des holostéens modifiée d'après Cavin et al. (2020). Les deux genres avec une dentition très broyeuse, *Lepidotes* et *Scheenstia*, sont en rouge.

Jura. Agassiz a notamment nommé un poisson fossile *Lepidotes*, un des poissons pourvoyeurs de bufonites. Les fossiles complets des *Lepidotes* sont rares, mais leurs dents massives et fortement minéralisées sont, elles, propices à la fossilisation. Récemment, la paléoichtyologue Adriana López-Arbarello du musée d'histoire naturelle de Munich a identifié parmi les différentes espèces formant le genre *Lepidotes* certaines qui présentaient suffisamment de caractéristiques propres pour être regroupées dans un nouveau genre qu'elle nomma joliment *Scheenstia* (qui est dérivé du dialecte Bavarais signifiant « joli animal ») (López-Arbarello & Sferco 2011). L'étude des lépidotes (*Lepidotes*, *Scheenstia* et quelques autres genres) a une histoire complexe qui s'étale sur deux siècles, et leurs affinités supposées sont très discutées. Disons simplement qu'ils sont considérés comme des poissons appartenant au groupe des holostéens (fig. 2). Aujourd'hui, ce groupe n'est représenté que par le poisson castor (*Amia calva*) vivant dans les eaux douces d'Amérique du Nord et par les gars, ou lépisostés, des poissons d'eau douce plus proches évolutivement parlant des lépidotes. Les lépisostés sont carnassiers et également présents en Amérique du Nord et Centrale où ils sont représentés par deux genres, *Atractosteus* et *Lepisosteus*. Au début de leur histoire évolutive, les lépidotes étaient initialement marins, puis ils se sont installés dans les eaux douces. Certains, comme *Lepidotes* et *Scheenstia*, portent de fortes dents broyeuses mais beaucoup d'autres espèces du groupe ont des dents pointues, adaptées à un régime alimentaire moins spécialisé, ou alors elles ne portent pas de dents du tout.

Dans ses *Recherches sur les poissons fossiles*, Agassiz (1833-1843) a décrit de nombreuses espèces de *Lepidotes* sur la base de fossiles parfois relativement complets et souvent très fragmentaires. Beaucoup de ces dernières espèces ne survivront pas aux révisions ultérieures effectuées par d'autres paléontologues (on dit qu'elles sont mises en synonymie avec d'autres espèces, ou elles sont simplement considérées comme non valides car indéterminables). Peu d'espèces proviennent de la chaîne du Jura, à l'exception de *Lepidotes laevis* connu par une écaille et une partie de rayon de nageoire en provenance des calcaires à tortue (Portlandien) des environs de Soleure.

Tout paléontologue qui s'intéresse à l'étude des poissons fossiles se base, à un moment ou à un autre de sa carrière, sur les travaux de Louis Agassiz. Jules Thurmann, célèbre naturaliste bruntrutain, est l'un d'eux, bien que l'étude paléontologique des restes de poissons ne fût pas sa priorité ; il est d'ailleurs très peu prolix à leur sujet. Dans sa publication

posthume (Thurmann & Etallon 1861), il signale simplement des dents de *Lepidotus* (un synonyme de *Lepidotes* couramment utilisé dans le passé) trouvées près de Porrentruy, La Chaux-de-Fonds, Soleure, Montbéliard, etc. Desor et Gressely, dans leurs études géologiques sur le Jura neuchâtelois de 1859, ne font, eux aussi, qu'une rapide mention de ce type de poissons. Idem pour Tribolet (1873) et bien d'autres géologues et paléontologues travaillant sur la géologie du Jura au XIX^e siècle.

François-Jules Pictet, paléontologue au Muséum d'histoire naturelle de Genève, a, de son côté, étudié plus en détail des fossiles de lépidotes en provenance du Massif jurassien. Dans un article au titre peu attractif, *Description de quelques débris de reptiles et poissons fossiles trouvés dans l'étage jurassique supérieur (Virgulien) du Jura neuchâtelois* publié en 1860, Pictet signale que des fossiles sont découverts dans

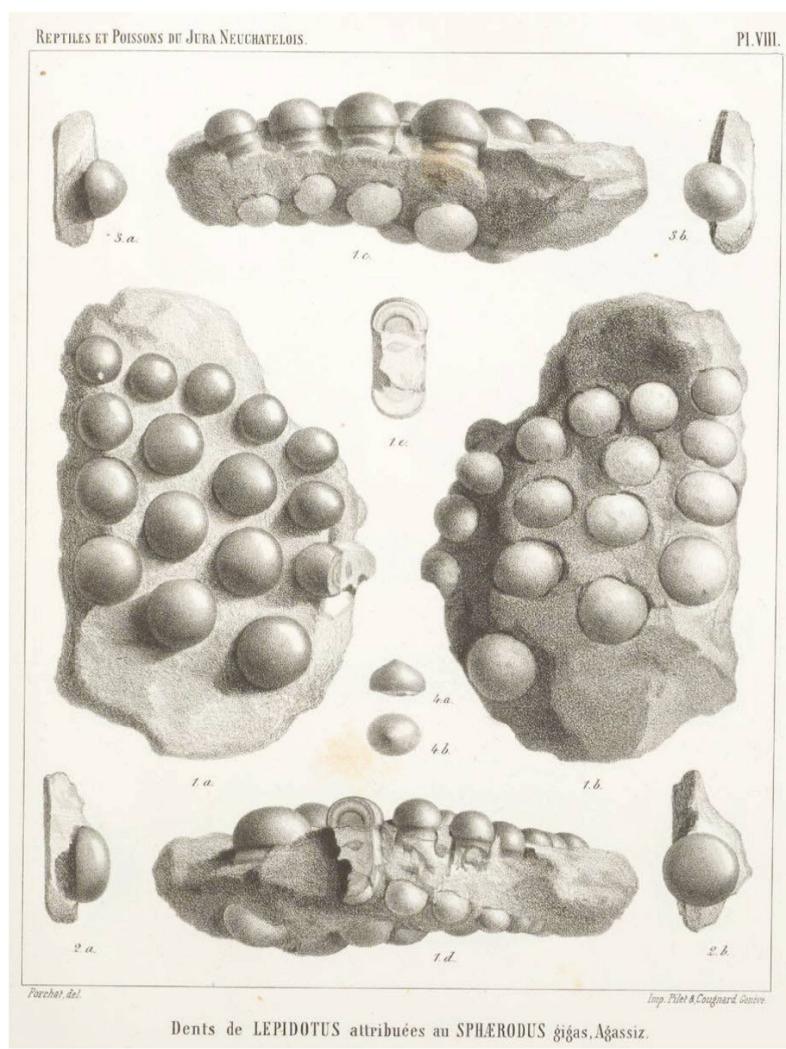


Fig. 3.
Dentition de
Scheenstia sp. du
Jurassique supérieur
du Jura neuchâtelois
étudiée par F.-J.
Pictet. En 1860, ce
spécimen appartenait
à la collection de M.
Montmollin (Pictet,
1860, pl. VIII).

diverses carrières ouvertes dans les calcaires jurassiens (Pictet 1860). Il est vrai que l'exploitation manuelle des carrières au XIX^e siècle était beaucoup plus propice à la découverte de fossiles par les ouvriers que ne l'est actuellement l'exploitation mécanisée qui laisse peu de chances aux objets rares d'être repérés par un œil attentif, puis prélevés avant leur destruction. Selon Pictet, les ouvriers connaissaient bien les dents broyeuses de ces poissons qu'ils trouvaient assez souvent et qu'ils nommaient « fèves » ou « yeux ». En plus des dents isolées, des fragments de mâchoires et des portions de corps avec le crâne ont été trouvés dans le Jura neuchâtelois. Comme le souligne Pictet lui-même, les pièces les plus intéressantes sont des morceaux de mâchoires portant encore leurs dents de remplacement. Il décrit un de ces fossiles comme suit (fig. 3) :

« À chacune des dents de la surface de trituration correspond une seconde couronne moins complètement formée, plus pâle et plus altérée, dirigée en sens inverse et paraissant naître de la même racine, [...]. La réunion de ces couronnes forme une surface [...] semblable à l'autre, et l'ensemble de la pièce est un os aplati et épais que la substance fossilisante rend souvent méconnaissable, et qui porte sur ses deux faces, en apparence, un appareil dentaire complet, organisation difficile à comprendre [...]. » (p. 37)

Il signale ensuite, avec honnêteté, que cette « singulière organisation a déjà été décrite par M. Quenstedt », puis il suggère le mécanisme du remplacement dentaire : « Ces dents exécutent leur évolution presque sur elles-mêmes, et détruisent dans ce mouvement la racine de celles qu'elles doivent remplacer ». Cette déduction est très proche des résultats obtenus récemment sur la base d'une étude qui repose sur une technologie de pointe, comme nous allons le voir.

La paléoichtyologie moderne

Les fouilles paléontologiques conduites avant la construction de l'autoroute Transjurane ont été l'occasion de la découverte de milliers d'empreintes de pas de dinosaures préservées dans des niveaux calcaires résistants. Mais entre ces bancs très durs se trouvent des niveaux plus meubles, argileux, contenant une multitude de coquilles fossilisées, dont de très nombreuses petites huîtres, et quelques rares restes de vertébrés. On y trouve des squelettes plus ou moins complets de tortues, mais également des restes plus incomplets de crocodiles

ou de poissons. Parmi ces derniers sont des écailles de lépidotes, très résistantes en raison de leur base osseuse surmontée d'une couche d''email, mais surtout des dents broyeuses isolées et des fragments de mâchoires broyeuses. Un travail de systématique sur ces fossiles, déjà engagé à travers le catalogue des découvertes de la Pal A16 (Leuzinger *et al.* 2017), devra se poursuivre et se compléter d'études paléobiologiques.

Aux côtés des nombreuses dents de lépidotes ont été découverts quelques éléments plus complets de mâchoires, dont une très belle hémi-mandibule trouvée sur le site de Courtedoux – Tchâfouè. Son étude a été conduite récemment par Léa Leuzinger, une étudiante alors en thèse à La Rioja en Argentine, en collaboration avec la chercheuse spécialiste des poissons fossiles Adriana López-Arbarello de Munich, le paléontologue et responsable des travaux de la Pal A16 Jean-Paul Billon-Bruyat et l'auteur de ces lignes (Leuzinger *et al.* 2019). Le spécimen présentait extérieurement une batterie dentaire très bien préservée, constituée de dents de taille régulière et toutes au même stade de développement (fig. 4A), portées pour quelques-unes par un os de la bordure de l'hémi-mandibule, le dentaire, et pour la majorité par un os situé à l'intérieur de la mâchoire, le coronoïde-préarticulaire (rappelons que tous les vertébrés ont plusieurs ossements qui constituent la mandibule, seuls les mammifères n'en possède qu'un, le dentaire). Ce fossile, très bien préservé et peu déformé, a été tomographié à l'université de Fribourg et son anatomie interne a été reconstituée en segmentant des milliers d'images afin de reconstruire un modèle tridimensionnel. L'intérieur de la mâchoire a révélé une structure très complexe qui vient confirmer les observations de Pictet et apportent des informations complémentaires (fig. 4C). Nous confirmons que chaque dent fonc-

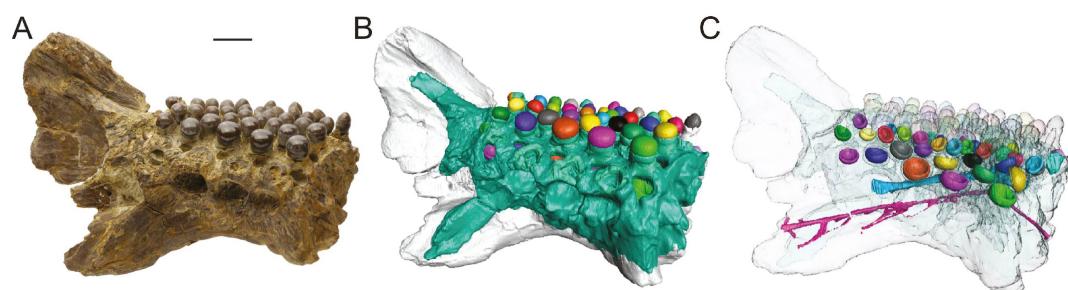


Fig. 4. Hémi-mandibule gauche de *Scheenstia* sp. découverte durant les fouilles de la Pal A16 sur le site de Courtedoux-Tchâfouè (TCH005-353). A, photographie; B, rendu surfacique à partir d'un CT scan; C, structures internes montrant les dents de remplacement en position inversée. Les couleurs des couronnes sont les mêmes que celles des dents fonctionnelles correspondantes en B. On observe également les parcours du canal sensoriel mandibulaire (en rose) et un canal pour des nerfs (en bleu). D'après Leuzinger *et al.* (2019).

tionnelle possède sa dent de remplacement située à sa verticale, mais retournée de 180° (comparer fig. 4B et 4C). Nous pouvons aussi préciser que chaque dent de remplacement est située dans une petite crypte, et que l'ensemble de ces dents de remplacement est au même stade de développement. Cette donnée est importante car elle indique que l'animal devait probablement perdre l'ensemble de ses dents en même temps, puis restait édenté pendant quelques jours. Pendant ce temps d'attente, les dents de remplacement effectuaient leur rotation sur elles-mêmes, puis croissaient vers la surface où elles éruptaient, prêtes à servir. Qu'un poisson reste ainsi temporairement édenté peut paraître bizarre, mais chez le loup de l'Atlantique (*Anarhichas lupus*), une espèce à la dentition broyeuse vivant actuellement, les grosses dents broyeuses que l'animal portent sur ses mandibules et son palais se remplacent de la même façon, mais sans un retournement complet des dents sur elles-mêmes. Pendant sa période « sans-dent », l'animal reste caché dans son terrier attendant l'arrivée de sa nouvelle dentition pour partir croquer des oursins et autres crustacés (il est à noter, au passage, que le loup de l'Atlantique est justement l'espèce qui a permis à Agostino Scilla en 1724 de reconnaître dans les bufonites des dents de poissons plutôt que des pétrifications issues de la tête des crapauds). Un autre poisson très célèbre, le piranha, perd lui aussi toutes ses dents en même temps.

Dans notre article décrivant ce nouveau type de remplacement dentaire (Leuzinger *et al.* 2019), nous citons des auteurs de la première moitié du xx^e siècle qui mentionnaient déjà chez *Lepidotes* la disposition si particulière des dents de remplacement, comme par exemple Woodward en 1916, Weitzel en 1930 et Peyer en 1954. Mais ce que nous avons omis, par méconnaissance de la littérature scientifique plus ancienne, c'est que les premières observations de cette particularité remontent au milieu du xix^e siècle, avec la très pertinente observation de Pictet et de Quenstedt.

La présence de nombreuses dents isolées de *Lepidotes* et de *Scheenstia* dans les roches du Jurassique du Jura sont liées à leur importante minéralisation qui les rend plus favorables à la fossilisation que les ossements. Mais, comme me l'a fait remarquer ma collègue Růžena Gregorová, il est probable que beaucoup de ces dents, qui consistent souvent en une simple couronne sans trace de racine, correspondent en fait aux dents usées que ces poissons devaient perdre à plusieurs reprises durant le cours de leur vie (Gregorová, comm. pers. 2020).

Alors que déambulaient des dinosaures sur les îles européennes du Jurassique, les lagons alentours grouillaient de vie. Les lépidotes profitaient de l'abondante nourriture et broyaient les innombrables petits coquillages couvrant le fond de l'eau. Ces poissons perdaient par vagues leurs dents très dures qui s'accumulaient parmi les coquilles. Après 150 millions d'années, des hommes ont en retrouvé quelques-unes. Ils les ont d'abord utilisées comme médicaments ou comme ornement pour une couronne royale, puis ils ont cherché à comprendre quels animaux les portaient. Mais la quête ne s'arrête pas là. Parmi les nombreuses pistes de recherche possibles, il y a par exemple la reconstitution de l'histoire évolutive de ces lépidotes qui retracerait leur évolution et leurs relations biogéographiques avec les espèces proches présentes sur d'autres continents ou la compréhension des mécanismes biologiques et génétiques de ce mode particulier de renouvellement dentaire par comparaison avec des modèles animaux actuels.

Lionel Cavin (lionel.cavin@ville-ge.ch) est paléontologue, conservateur du département de géologie et paléontologie au muséum d'histoire naturelle de Genève. Il étudie l'histoire évolutive des poissons osseux au Mésozoïque.

BIBLIOGRAPHIE

- Agassiz L. 1833-1843: *Recherches sur les poissons fossiles*. Neuchâtel. 5 tomes.
- Buffetaut E. 1991: *Des fossiles et des hommes*. Robert Laffont.
- Cavin L. 2009: *Darwin et les fossiles: histoire d'une réconciliation*. Georg.
- Cavin L., Deesri U. & Olive S. 2020: *Scheenstia bernissartensis* (Actinopterygii: Ginglymodi) from the Early Cretaceous of Bernissart, Belgium, with an appraisal of ginglymodian evolutionary history. *Journal of Systematic Palaeontology* 18(6), 513-527.
- Desor E. & Gressly A. 1859: *Études géologiques sur le Jura neuchâtelois*. Imprimerie C. Leidecker.
- Duffin C. J. 2008: Fossils as drugs: pharmaceutical palaeontology. *Ferrantia* 54, 1-83.
- Duffin C. J. 2010: The Toadstone — a rather unlikely jewel. *Jewellery History Today* 8, 3-4.
- Gaudant J. 2008: *Johann Jakob Scheuchzer: Les fossiles témoins du déluge*. Presse des mines.
- Gregorová R. & Duffin C. J. 2010: The pre-scientific history of *Lepidotes Agassiz*, 1832. In: Nützel, A., Reichenbacher B. & Krings M. 2019 *Abstracts of the 90th Annual Meeting of the Paläontologische Gesellschaft*, Munich 2019.
- Gregorová R., Bohatý M., Stehlíková D. & Duffin C. J. 2020: «Crapaudine» (*Scheenstia* teeth) — the jewel of Kings. *Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae* 105 (2), 277–294.
- Leuzinger L., Püntener C. & Billon-Bruyat J.-P. 2017: *Vertébrés mésozoïques: poissons*. Catalogue du patrimoine paléontologique jurassien-A16. Office de la Culture-Paléontologie A16, Porrentruy.

Les lépidotes

- Leuzinger L., Cavin L., López-Arbarello A. & Billon-Bruyat J. P. 2020: Peculiar tooth renewal in a Jurassic ray-finned fish (*Lepisosteiformes*, +*Scheenstia* sp.). *Palaeontology* 63(1), 117-129.
- López-Arbarello A. & Sferco E. 2011: New semionotiform (Actinopterygii: Neopterygii) from the Late Jurassic of southern Germany. *Journal of Systematic Palaeontology* 9(2), 197-215.
- Peyer B. 1954: Ein Gebissfund von *Lepidotus* aus dem oberen weissen Jura von Thayngen Kt. Schaffhausen (Schweiz). *Schweizerische Paläontologische Abhandlungen* 70, 3-20.
- Pictet F. J. 1860: *Description de quelques débris de Reptiles et Poissons fossiles trouvés dans l'étage Jurassique supérieur (Virgulien) du Jura Neuchâtelois*. J. Kessmann, H. Georg.
- Thurmann J. & Etallon A. 1861: *Lethaea bruntrutana, ou, études paléontologiques et stratigraphiques sur le Jura bernois et en particulier les environs de Porrentruy*. Œuvre posthume (Vol. 1). Zürcher & Furrer.
- Tribolet de M. 1873: *Recherches géologiques et paléontologiques dans le Jura supérieur Neuchâtelois*. Zürcher & Furrer.
- Weitzel K. 1930: Drei Riesenfische aus den Solnhofener Schiefern von Langenaltheim. *Abhandlungen der Senckenbergischen naturforschenden Gesellschaft* 42, 85-113.
- Woodward A. S. 1916: *The fossil fishes of the English Wealden and Purbeck formations*. Palaeontographical Society London.

NOTE

¹ Section des Sciences de la Terre, Muséum d'histoire naturelle de la Ville de Genève, CP 6434, 1211 Genève 6, Suisse.

Analyse micro-historique du laboratoire souterrain «Mont-Terri Project» : une appréciation du rôle du canton du Jura

MARCOS BUSER

L'histoire du laboratoire international Mont-Terri et le rôle de la Commission cantonale de suivi sont présentés du point de vue de son président de longue date. Elle montre l'importance d'un processus continu d'interrogations, d'apprentissages et d'améliorations successives dans le traitement de telles tâches dans le secteur des déchets nucléaires. Cette procédure suppose non seulement une nouvelle culture dans le traitement de la connaissance et de la société, mais aussi une adaptation des structures et des comportements sous-jacents. En ce sens, le projet Mont-Terri est un exemple de culture d'apprentissage avec différenciation structurelle, qui vise à répondre aux attentes et aux exigences sociales élevées en matière de contrôle et d'assurance de qualité et de transparence d'un projet de recherche par une autorité.

Abstract

The present history of the international laboratory «Mont-Terri Project» and the role of the Monitoring and Surveillance Commission is presented from the point of view of its long-time president, the geologist and social scientist Marcos Buser. It shows how important a questioning and learning process is in dealing with such tasks in the nuclear sector. This procedure not only presupposes a new culture in dealing with knowledge and society, but also requires an adaptation of the underlying structures and behavioral patterns. In this sense, the Mont-Terri project is an example of a learning culture with structural differentiation, which is intended to meet the high social expectations

and demands for high-quality, transparent control and monitoring of a research project by an authority.

Zusammenfassung

Die Geschichte des internationalen Labors «Mont-Terri Project» und der Rolle der Begleit- und Überwachungskommission wird aus der Sicht des langjährigen Präsidenten, des Geologen und Sozialwissenschaftlers Marcos Buser, dargelegt. Sie zeigt, wie wichtig ein hinterfragendes und lernendes Verfahren bei der Bewältigung solcher Aufgaben im Nuklearbereich ist. Dieses Vorgehen setzt nicht nur eine neue Kultur im Umgang mit Wissen und Gesellschaft voraus, sondern verlangt auch eine Anpassung der zugrundeliegenden Strukturen und Verhaltensweisen. Das Mont-Terri Projekt ist in diesem Sinne ein Beispiel einer Lernkultur mit struktureller Differenzierung, das den hohen gesellschaftlichen Erwartungen und Ansprüchen an eine qualitativ hochstehende, transparente Kontrolle und Überwachung eines Forschungsprojektes durch eine Behörde genügen muss.

Un projet à grand succès

1995-2020. Le Projet Mont-Terri (PMT) pour la recherche géologique célèbre son 25^e anniversaire. Un projet de recherche unique, non seulement au niveau national, mais aussi au niveau international. L'évolution du projet est également unique, car personne n'aurait pu imaginer le grand succès de cette plateforme de recherche à ses débuts. De nombreux scientifiques, des autorités et des politiciens y ont été impliqués. Mais la contribution décisive à ce succès a été apportée par le gestionnaire du projet, Swisstopo, et plus concrètement par son directeur de laboratoire de 2006 à 2020, le Dr Paul Bossart, et son équipe de scientifiques et de techniciens. Certes, la vision du départ apportée par le Dr Marc Thury de la Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs Nagra a rendu possible la mise en place du projet. Toutefois, une structure de direction susceptible de coordonner une recherche scientifique en plein essor d'un nombre croissant de partenaires du projet était nécessaire. Sans cette contribution et l'enthousiasme des institutions participantes, ce succès n'aurait pas été possible. Cette évolution montre bien ce que des personnes et des institutions peuvent réaliser lorsqu'elles sont capables de

Le laboratoire souterrain «Mont-Terri Project»

s'accorder sur un projet. Bien sûr, il y a eu aussi des phases difficiles, des discussions et des crises, mais en fin de compte, cela n'a fait que renforcer le projet. L'histoire unique des réalisations scientifiques du PMT attend d'être écrite, nonobstant les très nombreux rapports scientifiques et les synthèses sur les expériences (Bossart & Thury 2008, Bossart *et al.* 2017). Mais il est déjà certain que ce projet a apporté une contribution particulièrement pertinente à la recherche sur les roches argileuses pour le stockage des déchets hautement radioactifs, mais pas seulement: l'extension à la géothermie et aux questions relatives au stockage du CO₂ enrichit cette recherche dans un projet interdisciplinaire de grande envergure.

D'autres acteurs impliqués dans ce projet étaient le canton du Jura avec son gouvernement et ses institutions. Leur rôle n'était pas très visible pour le monde extérieur, mais ils ont eux aussi marqué l'orientation structurelle du projet ainsi que les questions spécifiques liées à la sécurité. L'article suivant retrace les éléments importants de cette contribution pour la mémoire. Il s'agit d'une contribution personnelle du point de vue du président de longue date de la Commission de suivi.

Le contexte général du projet Mont-Terri

À l'origine, le projet Mont-Terri était à la croisée de trois mégaprojets nationaux respectivement internationaux: en premier de la construction du réseau routier national suisse et, plus particulièrement, de l'autoroute reliant Bienne à la frontière française dans le Jura oriental (Transjurane); deuxièmement dans le cadre des recherches menées pour le projet suisse de gestion des déchets nucléaires dans les roches des Argiles à Opalinus traversées dans les tunnels autoroutiers du Mont-Terri et du Mont-Russelin; finalement, en tant que plateforme de recherche pour divers organismes nationaux de pays européens et d'autres pays industrialisés d'outre-mer chargés de la gestion des déchets radioactifs. Le projet autoroutier de la Transjurane offrait ainsi des conditions cadres uniques pour l'exécution d'un projet de recherche géologique par le biais des affleurements géologiques à l'intérieur du tunnel du Mont-Terri et par les caractéristiques d'accès aisé.

L'intérêt pour les roches argileuses pour le stockage des déchets radioactifs en sous-sol profond remonte aux années 1950 (Theis 1955,

EKRA 2000). Cependant, il faudra alors encore plusieurs décennies avant que ce concept ne soit effectivement inclus dans la liste restreinte des roches hôtes potentielles. Dans les années 1980, les roches argileuses deviennent de plus en plus « populaires » auprès des organismes et autorités responsables de l'élimination des déchets nucléaires. C'est ainsi que l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN/NEA) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE/OECD) crée un groupe de travail appelé « club de l'argile » (« clay club »), chargé d'étudier les propriétés de roches argileuses dans le cadre du concept du dépôt géologique profond de déchets radioactifs (Horsemann *et al.* 1996). Du côté suisse, la Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs (Nagra) et la Division principale de la sécurité des installations nucléaires (DSN) sont représentées dans le « club de l'argile ».

Dans le courant des années 1980, des professeurs universitaires, des experts extérieurs — et même quelques scientifiques de la Nagra — ont attiré l'attention des autorités de contrôle suisses sur la nécessité d'élargir le programme de recherche de sites de stockage pour déchets radioactifs aux roches sédimentaires. Finalement, dans le courant de 1985, la DSN exigeait des études concrètes sur des formations argileuses dans le bassin molassique et le Jura et tout particulièrement sur les argiles dites à « Opalinus », une ammonite caractéristique de cet étage géologique nommée « Lias inférieur » âgé de 174 millions d'années¹. C'est ainsi que la Nagra entame dès 1985 ce programme et publie un premier rapport intermédiaire deux ans plus tard². Entretemps, le Service hydrogéologique et géologique national fait une première reconnaissance des tunnels du Mont-Terri et du Mont-Russelin et en informe la Nagra. L'intérêt grandit et on s'écrit en janvier 1989. Les premières expériences dans des niches de la galerie de sécurité sont discutées puis même sollicitées par des universités et bureaux suisses (EPFL, Bureau Norbert SA, etc.). Mais ce n'est qu'à partir de 1994 que le projet prend vraiment de la hauteur. Ce sont précisément des membres du « club de l'argile » qui s'associent à l'idée de développer un projet de recherche commun dans la galerie de sécurité³. En fait, c'est le départ du projet du laboratoire, qui profitera tout particulièrement de son internationalité. Un laboratoire de recherche de terrain pluri-disciplinaire, servant de plate-forme internationale de recherche, d'échange et de discussion.

Le laboratoire du Mont-Terri dans le contexte national

Le fait que le laboratoire soit construit sur le sol suisse est étroitement lié à la réorientation du programme suisse de stockage profond. Au milieu des années 80, dans le cadre du projet «Garantie 1985» présenté par la Nagra et centré dans un premier temps sur la recherche d'un site de dépôt dans les roches cristallines du nord de la Suisse, le Conseil fédéral suisse avait décidé qu'à l'avenir, les roches sédimentaires devaient également être prises en considération comme roches d'accueil pour le stockage des déchets hautement radioactifs. Comme déjà mentionné, c'est le début de la recherche sur la couverture sédimentaire du socle cristallin qui se soldera par un premier rapport intermédiaire de la Nagra sur les sédiments (Nagra 1988). Dans les dix ans suivants, l'intérêt pour les argiles à Opalinus comme roche d'accueil va croissant (rapports Nagra 1991, 1994, 1996), alors que les anciennes stratégies visant l'exploration du socle cristallin profond sous le Plateau suisse et le Jura sont abandonnées au fur et à mesure.

Parallèlement à ce changement fondamental en relation avec la roche d'accueil pour des dépôts de déchets hautement radioactifs, le programme pour les déchets faiblement et moyennement radioactifs connaît également des difficultés. Au Wellenberg (Canton de Nidwald), la Coopérative de gestion des déchets nucléaires du Wellenberg (GNW) n'arrive pas vraiment à faire avancer son projet. Le Département de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC) est de plus en plus conscient qu'une réévaluation des concepts de stockage des déchets radioactifs en Suisse devient indispensable. En 1999, le conseiller fédéral Moritz Leuenberger nomme une commission chargée de l'étude des «concepts de gestion des déchets radioactifs» (EKRA), dont les réflexions (EKRA 2000, 2002) seront en grande partie intégrées dans la nouvelle loi sur l'énergie nucléaire (LENu), qui entre finalement en vigueur en 2003. Le rejet par vote populaire du projet de la société GNW au Wellenberg en automne 2002 constitue toutefois un sérieux revers pour la recherche d'un site de dépôt en Suisse. Il oblige la Confédération à lancer une nouvelle procédure de recherche de site, dont la conception interviendra entre 2005 et 2008 (OFEN 2008). Parallèlement à cette évolution, une controverse croissante sur l'avenir de l'énergie nucléaire est en cours depuis l'an 2000. Cette controverse se termine provisoirement avec l'accident de Fukushima le

11 mars 2011 et la décision de ne pas renouveler le parc des centrales nucléaires existantes.

Les adaptations du programme national et les développements nationaux et internationaux dans le domaine de l'énergie nucléaire ont un impact direct sur la gestion du projet Mont-Terri. La direction du projet assurée par des représentants de l'industrie nucléaire et secondée par les autorités fédérales compétentes, particulièrement le DETEC, posait des problèmes d'acceptation. Dans ce contexte, il faut tenir compte du fait que les structures des programmes de stockage des déchets nucléaires et la gouvernance de ces programmes suivaient les directives établies à l'époque de l'introduction de l'énergie nucléaire en Suisse dans les années 1950. Ces structures avaient été scellées avec la mise en service des quatre centrales nucléaires et de leurs cinq réacteurs par les sociétés d'électricité détenues par des cantons suisses. Depuis, l'industrie nucléaire gérait les centrales et était responsable du conditionnement et du stockage intermédiaire des déchets. Suite au grave accident du réacteur de Lucens (canton de Vaud) et aux travaux de décontamination et d'assainissement nécessaires, les entreprises d'électricité responsables et la Confédération en tant que partenaire minoritaire avaient décidé de créer une société coopérative dédiée au stockage intermédiaire des déchets et à la recherche de possibilités de stockage des déchets de faible et moyenne activité provenant des centrales nucléaires suisses, ainsi que des secteurs médical, industriel et de la recherche (Flüeler 2000). Ce fut la naissance de la Nagra, qui se mit ainsi à la tête des programmes spécifiques de recherches de site pour le stockage final des déchets. Enfin, les autorités fédérales se portaient responsables des décisions juridiques et politiques nécessaires à ce programme (KARA 1976, Flüeler 2000, Buser 2019). En toute logique, les finances étaient également clairement entre les mains de l'industrie de l'électricité en vertu du principe du pollueur-payeur. Cette division du travail a eu une influence sur le développement et les événements du projet Mont-Terri côté suisse. De ce fait et en raison de ces conditions structurelles ainsi que des expériences acquises dans la gestion du deuxième laboratoire de recherche suisse au Grimsel (canton de Berne) dans les roches cristallines alpines, la Nagra a longtemps revendiqué la direction du laboratoire de recherche. Au fil du temps, elle a néanmoins dû accepter que le projet Mont-Terri devait avoir une gestion fondamentalement différente sachant que les questions d'acceptation de la recherche dans le domaine du stockage géologique profond étaient et sont d'une importance éminente pour le

Le laboratoire souterrain «Mont-Terri Project»

grand public. Mais revenons de nouveau au développement des événements liés au PMT.

Le canton du Jura, en tant que propriétaire des lieux, a joué un rôle décisif dans les décisions et développements qui ont abouti à ce changement de perception. De toute évidence, les débats et conflits tournant autour des procès décisionnels ont fortement façonné l'histoire du PMT. Il s'agit sans aucun doute du point de friction le plus important qui s'est manifesté dans les premières années après 2000 entre le canton, les autorités fédérales et les partenaires suisses du PMT. Le canton, en s'appuyant sur le régal minier cantonal, a donc insisté sur la mise en place de structures de gestion de projets indépendantes des intérêts de l'industrie nucléaire. Ce différend entre les institutions concernées a profondément marqué l'histoire du PMT. Il convient toutefois de signaler que la nécessité d'une indépendance scientifique et politique de la recherche au Mont-Terri a finalement été acceptée par tous les acteurs suisses.

L'évolution du projet et le rôle du canton du Jura (tableau 1)

Le PMT n'était pas destiné à démarrer comme un projet de recherche à long terme. Tout au début, des expériences scientifiques ont été lancées dans la galerie de sécurité, d'abord pour mieux comprendre le comportement géomécanique des roches dans les voûtes souterraines, puis sous la forme d'expériences complémentaires d'un consortium de promoteurs de projets dans le domaine de l'évacuation des déchets nucléaires. La transformation du projet d'un champ expérimental limité par des intérêts individuels en un laboratoire de recherche de renommée internationale avec une orientation de recherche de plus en plus large est non seulement remarquable, mais montre aussi à quel point de telles transformations ont un caractère aléatoire. Pendant de longues années, personne ne s'attendait à cette évolution. Le succès du projet est dû dans une large mesure à l'enthousiasme général des institutions et personnes associées qui se sont engagées au fil du temps. Malgré les nombreuses difficultés auxquelles le projet a été confronté pendant de nombreuses années, cet enthousiasme de la génération fondatrice du projet a été un élément essentiel de sa réussite. Certes, la compétence et la bonne gestion du projet ainsi que le contrôle strict du canton ont aussi fortement contribué au développement du projet.

Mais il est difficile de s'imaginer que le projet ait eu un tel succès sans le « feu » de l'engagement des personnes et institutions impliquées. Cette brève rétrospective ne prétend pas retracer l'évolution de la recherche et les résultats scientifiques du projet qui sont du ressort de swisstopo et des autres partenaires ; elle les complète et décrit le rôle du canton du Jura en tant que propriétaire du laboratoire et organe de contrôle.

Le début du projet : 1989-1995

En fait, tout au début, aucun projet de recherche de longue durée n'était prévu dans la galerie de sécurité du tunnel autoroutier du Mont-Terri. Le percement des tunnels du Mont-Terri et du Mont-Russelin avait conduit dans un premier temps à un programme d'essais dans la galerie de reconnaissance sous la conduite de l'École polytechnique fédérale de Lausanne. Un relevé géologique des affleurements souterrains était de toute façon nécessaire. C'est dans ce contexte que le Service hydrologique et géologique national (SHGN) fit son entrée en scène. Ce service, initialement rattaché à l'Office fédéral de l'environnement (OFEFP), s'est vu associer au fil de quelques années à diverses administrations et départements fédéraux. Le monde des géologues étant petit, il n'était donc pas surprenant que la Nagra en ait eu connaissance. Ce faisant, les collègues d'autres programmes d'enfouissement de déchets nucléaires dans le monde l'apprirent à leur tour.

Quoi qu'il en soit, dès 1989, des expériences dans la galerie de sécurité faisaient l'objet de discussions entre entreprises, services administratifs intéressés et Nagra (SHGN 18.01.1989). Une première esquisse d'un programme expérimental était discutée peu de temps après (27.01.1989). Dans le courant de l'hiver la recherche de fonds pour le relevé des galeries souterraines était entamée et les autorisations du Service des ponts et chaussées du canton du Jura furent octroyées (RCJU 13.02.1992).

Mais ce n'est qu'en 1994 que le projet de recherche des partenaires devait se développer (SHGN 23.11.1994). Marc Thury, géologue en chef à la Nagra, déposait une requête auprès du SHGN, qui la soutenait (Projet Mont-Terri 14.09.1994). Le 26 octobre 1994 un projet de recherche plus complet était présenté lors d'une réunion avec les autorités compétentes du canton, le Service des ponts et chaussées (SHGN 23.11.1994). Le projet prévoyait en fait une phase d'expériences scientifiques entre 1995 et 1998, avec possibilité de prolongation. Le

Le laboratoire souterrain «Mont-Terri Project»

SGHN était envisagé en tant que responsable vis-à-vis du canton, ce qui montrait que la délégation de la Confédération était consciente de la sensibilité politique du dossier. De plus, le bureau géologique Geotechnisches Institut de Berne s'y est associé en 1996 et Paul Bossart devenait chef de projet jusqu'à sa promotion comme nouveau directeur 10 ans plus tard.

Toutefois, dès le départ, le gouvernement jurassien avait clairement précisé que l'approbation du projet ne s'appliquait qu'à la recherche. Le stockage des déchets radioactifs était exclu d'emblée, une thématique qui par la suite a fait l'objet de nombreuses interventions et informations de la part du canton. Le 13 février 1994, trois jours après que les organisations de protection de l'environnement (Greenpeace, Pro Natura) ont déposé une pétition munie de 5000 signatures demandant l'arrêt du stockage des déchets chimiques spéciaux dans la carrière souterraine voisine des Fours à Chaux sur le chemin d'accès au tunnel autoroutier, le ministre jurassien responsable, Pierre Kohler, avait autorisé le programme d'essais hydrogéologiques déposé le 23 novembre 1994⁴. Le message était toutefois sans équivoque : le canton autorisait le projet de recherche, mais s'assurait de l'indépendance de la gestion. Suivant l'autorisation, le Service jurassien des ponts et chaussées transmettait le 31 mars 1995 au Service hydrogéologique et géologique National une liste relative aux conditions générales à respecter dans le cadre du projet.

De son côté, la recherche de partenaires, que la Nagra poursuivait intensivement, se déroulait avec succès : cinq organismes ou instituts de recherche dans le domaine de la gestion des déchets nucléaires s'engageaient⁵. Le Consortium Mont-Terri fut ainsi créé. Marc Thury en assumait la direction : il fut officiellement détaché au SHGN, bien qu'il travaillât aussi au siège de la Nagra à Wettingen. Au cours des deux années suivantes trois nouveaux partenaires européens rejoignaient le projet⁶. Le projet grandissait. En septembre 1997 le canton du Jura rachetait les parcelles de l'ancienne fabrique de chaux (Groupe de travail 2013), ce qui permettait au Consortium Mont-Terri de conclure un contrat de location à long terme des bâtiments.

Une première grande expansion du projet : 1995 – printemps 2000

Mais les principales caractéristiques d'un projet à plus long terme étaient liées à la décision des partenaires de planifier de nouvelles

expériences. Pour cela, ils avaient besoin d'espace et prévoyaient une première extension sous la forme d'une galerie en forme de fer à cheval allongé. Cette extension réalisée dans le courant des années 1997 et 1998 créa l'espace nécessaire à la poursuite des travaux scientifiques et donnait un nouvel élan au projet (PMT s. d.). L'ambitieux programme de recherche démarrait après l'inauguration de la nouvelle galerie dite « 1998 » en septembre de la même année. Après la construction de la galerie et la mise en place du vaste programme de recherche, la consolidation réelle du projet se poursuivait. Plusieurs nouveaux partenaires européens et d'outre-mer (Japon) rejoignaient le consortium (PMT s. d.). En 2001 le projet atteignait le nombre de dix partenaires. Par ailleurs, le canton soulignait son soutien en 1999 en prolongeant la décision sur l'utilisation du tunnel de sécurité (Gouvernement RCJU 22.06.1999).

Cependant, la croissance réussie du projet signifiait aussi que sa gestion devenait de plus en plus exigeante. Comme souvent dans un projet croissant, des tensions au sein du consortium se faisaient sentir. Le contexte de ces tensions ne fut pas communiqué. Mais le résultat soulevait des questions : Marc Thury, fondateur et chef de file du projet depuis près de six ans, se retirait du projet dans le printemps de 2000 (PMT s. d.). La succession fut difficile. La Nagra finit par proposer un de ses scientifiques, Markus Hugi, comme directeur, et se déclarait prête à prendre en charge les frais généraux de gestion. Les partenaires adhéraient à cette proposition. Ainsi, Markus Hugi fut porté à la tête du projet et assumait officiellement ses fonctions au début de la nouvelle phase (PMT 24.08.2000). La Nagra avait donc effectivement pris la tête du projet de recherche au premier juillet 2000. Mais elle avait omis d'informer le canton, tout comme les services de la Confédération, ce qui finit par poser un problème fondamental pour les élus jurassiens.

Une rupture se dessine : été et automne 2000

En fait, Pierre Kohler, le ministre responsable du Département de l'équipement et environnement (DEE)⁷ du canton, avait appris indirectement la nomination du nouveau directeur. La situation politique du canton en matière de politique environnementale était déjà fortement grecée par la présence de deux sites de stockage de déchets toxiques, d'une part dans les galeries des Fours à Chaux (DMS Saint-Ursanne, Groupe de travail 2013a) et à la décharge de déchets industriels

Le laboratoire souterrain «Mont-Terri Project»

de Bonfol (Ribeaud 2014) de l'autre. Le risque d'une nouvelle dérive d'un grand projet de déchets sur le sol cantonal ne fut pas accepté par les responsables politiques jurassiens. Pierre Kohler informait le Gouvernement qui insistait sur une gestion indépendante du projet. Le 20 septembre 2000 Pierre Kohler signalait son étonnement au SHGN de ne pas avoir été informé du changement de direction et de la reprise de la gestion du projet par la Nagra. Plusieurs lettres suivirent, dont un échange de lettres avec le ministre fédéral de l'environnement Moritz Leuenberger en octobre 2000. Les positions furent définies. Le canton n'était pas prêt à accepter une gestion du projet par la Nagra et exigeait la reprise du projet par une entité de la Confédération.

C'est à ce stade du développement du PMT que les difficultés historiques de l'élimination des déchets nucléaires en Suisse ont refait surface. Les structures nationales dans le domaine du nucléaire suivaient depuis des décennies la primauté qu'Otto Zipfel, délégué à l'énergie nucléaire, avait déjà stipulé en 1957: les programmes concrets étaient du ressort de l'industrie nucléaire, les centrales étant essentiellement en possession des cantons ou communes suisses. Le gouvernement fédéral ne voyait aucune raison de s'impliquer plus que nécessaire dans cette gestion. Ce partage des tâches fut adopté et poursuivi par tous les politiciens et toutes les administrations de la Confédération. Bien que la loi sur l'énergie atomique de 1959 ait été modifiée par le décret fédéral d'octobre 1978, aucun changement n'est intervenu au niveau d'une nouvelle organisation des compétences.

Toutefois, la commission EKRA⁸ (2002) avait signalé la nécessité de réfléchir sur des structures et modèles de gestion ainsi que sur le financement du programme de stockage des déchets radioactifs en Suisse. Mais le Parlement n'avait finalement retenu que des dispositions visant à renforcer une recherche plus indépendante dans la nouvelle loi sur l'énergie nucléaire de 2003 (LENu art. 86). Une réorganisation des structures allant au-delà d'une interprétation étroite du principe du pollueur-payeur n'était ni dans le point de mire ni dans l'intérêt de l'administration fédérale. En conséquence, des concepts fondamentalement différents étaient exprimés dans le cadre de l'organisation du laboratoire de recherche. Ces différentes idées ont façonné les discussions pour les années à venir — il s'agissait de modèles organisationnels fondamentalement différents en ce qui concerne les responsabilités des divers intervenants. Ceci a entraîné d'importants problèmes de communication et même des conflits entre les acteurs concernés.

Les autorités fédérales, en particulier l'Office fédéral de l'énergie, ont soutenu la répartition historiquement définie des compétences, ce qui signifie que la Nagra était considérée comme une institution légitime pour la gestion du projet de recherche au Mont-Terri. Il est intéressant de noter que les autorités fédérales n'ont pris en considération ni les problèmes de gouvernance dans ce modèle, ni les difficultés d'acceptation du projet par la région jurassienne. L'expérience acquise avec les deux projets de décharges mentionnés ci-dessus — tout particulièrement en relation avec les occupations des sites menées par Greenpeace en 1994, 1995 et 2000 — avait sensibilisé le gouvernement cantonal à ces questions d'acceptation par le public. Le Jura, en tant que canton fondamentalement opposé à l'énergie nucléaire, voulait éviter de nouvelles actions politiques de cette nature. Comme déjà mentionné, cette constellation avait conduit à des conflits prolongés entre les acteurs principaux, qui s'étaient manifestés dès l'automne 2000 et qui ont fondamentalement changé le développement du projet.

Conflits et nouvelle organisation : 2000-2001

Ce qui a suivi dans les années à venir était une confrontation difficile entre ces deux positions. Le canton exigeait un projet indépendant des intérêts de l'industrie nucléaire. Mais le DETEC a hésité. Dans sa lettre du 10 octobre 2000, le ministre fédéral de l'énergie a fait allusion au patronage exercé par le SHGN. Or les réflexions du canton sont allées bien plus loin: ce n'était pas un patronage qui était souhaité mais une indépendance scientifique du projet et — suivant cette logique — une direction du PMT indépendante des intérêts de la Nagra. Le 7 novembre 2000, le jour avant la séance clé du 8 novembre relative à la structure à donner au projet de recherche, Pierre Kohler, en signe de bonne volonté, avait autorisé l'expérience dite du «Raise boring» dans un forage de grand diamètre et qui nécessitait d'urgence l'autorisation cantonale. Tout en affirmant que les autres expériences feraient l'objet d'une demande d'autorisation séparée qui serait traitée selon les résultats de séance.

La réunion du 8 novembre 2000 réunit le Département de l'environnement et de l'équipement et ses experts d'une part, et les représentants du Service géologique et hydrologique national (SGHN) et des représentants du PMT de l'autre. Pierre Kohler imposa les règles du jeu: soit la Confédération reprenait la direction du projet, soit le Gouvernement jurassien stoppait ce dernier. «C'est à prendre ou à

Le laboratoire souterrain «Mont-Terri Project»

laisser» a déclaré le ministre jurassien lors de la séance. Le SHGN décida d'entrer en matière. Deux jours plus tard il communiquait sa décision de reprendre la direction du projet au DEE tout en précisant qu'une convention serait à établir entre canton et Confédération et un «contrat avec le Consortium de recherche» pour la réalisation des expériences (SGHN 10.11.2000). Le ministre Moritz Leuenberger (DETEC) confirmait cet agrément dans sa lettre du 1^{er} décembre 2000 et annonçait la nécessité d'élaborer une convention de gestion du laboratoire entre canton du Jura et le nouvel organisme placé à la tête du projet, l'Office fédéral de l'eau et de la géologie (OFG). Le SGHN fut rattaché à ce nouvel office dès 2001. C'est ainsi que débute un long chapitre sur la définition et répartition concrètes des responsabilités des acteurs impliqués.

De son côté, le Gouvernement jurassien avait pris ses dispositifs en matière de structure et avait nommé par arrêté du 19 décembre 2000 un groupe de travail temporaire chargé de suivre les travaux de recherche et de surveillance du projet Mont-Terri. La commission de suivi — comme on l'appellera plus tard — fut ainsi créée. Elle regroupait les différents services de l'État jurassien ainsi que des experts extérieurs, et tout particulièrement le Service des ponts et chaussées⁹, qui assumaient la tutelle officielle de la part du canton pour le suivi du projet (fig. 1).

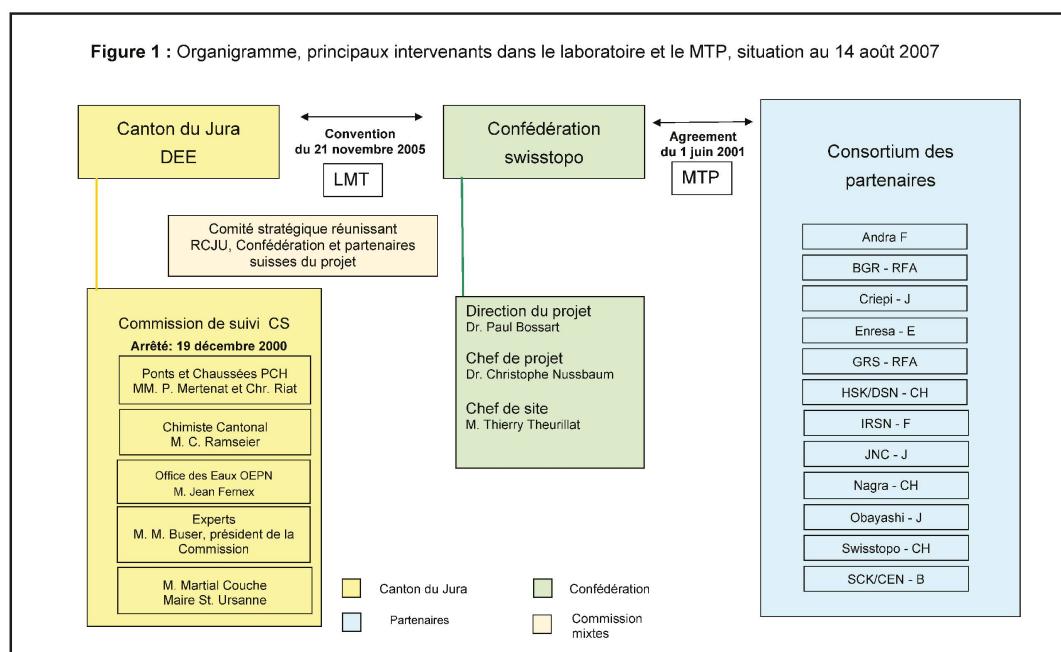


Fig. 1: Organigramme, principaux intervenants dans le laboratoire et le MTP, situation au 14 août 2007.

La présidence fut attribuée au géologue Marcos Buser, qui travaillait déjà sur d'autres grands projets pour le canton du Jura. Pascal Mertenat, ingénieur auprès du Services des ponts et chaussées, devenait son principal soutien dans ce projet et lui succéderait en tant que président de la commission en 2013/2014. Le cahier de charges était ambitieux pour une commission de cette taille : suivre un programme de recherche complexe grandissant, contrôler les conditions de sécurité dans une galerie de fuite d'un tunnel autoroutier, accompagner la gestion des stratégies et d'une politique d'information indépendante.

La Commission de suivi (CS) devint ainsi le répondant majeur du projet du côté du canton. Le SGHN fut officiellement informé au début de 2001 de la création de la CS (DEE 12.01.2001). C'est ainsi que la commission abordait les fonctions qui lui étaient attribuées. Il est intéressant de se remémorer les tâches confiées à la commission au vu des décisions ultérieures : on y trouve — entre autres — le « préavis concernant les autorisations de nouvelles phases du programme expérimental », le « suivi et contrôle du programme expérimental », la « surveillance de la politique de communication du projet scientifique » et les « négociations avec les autorités fédérales compétentes ou institutions impliquées dans le projet ». D'autres fonctions attribuées sont du domaine des tâches administratives. Toutes ces tâches ont dû être précisées puis mises en œuvre, poussant la commission aux limites de ses capacités, compte tenu de ses ressources modestes. En fin de compte, il n'a été possible d'accomplir ces travaux nombreux et variés que grâce à une coopération interne exceptionnellement bonne et à des méthodes parfois peu conventionnelles. Ainsi, la Commission de suivi se présentait parfois à l'improviste au laboratoire et signalait sur place les lacunes observées en matière de sécurité, alors que la majorité de ses membres — dont son président — avait oublié de mettre ce jour-là les casques de protection obligatoires. Une petite anecdote qui a fait l'objet de nombreuses plaisanteries. Mais revenons à l'histoire.

Le 6 février 2001 la Commission de suivi se réunit pour la première fois et se pencha prioritairement sur la nouvelle convention à mettre en place (CS 6.2.2001). Durant les prochains mois, des projets de convention seront préparés et échangés entre le SGHN et la CS. La convention finale régla les droits et obligations des parties signataires. La transparence fut un élément clé de ce nouvel accord.

Parallèlement, le SGHN (OFEG) et les partenaires ont établi un contrat entre partenaires (*agreement*) qui a réglé les droits et les responsabilités entre les parties. Le 23 mai 2001 la Convention fut

Le laboratoire souterrain «Mont-Terri Project»

signée par le Gouvernement jurassien et l'OFEG. Et à partir du 1^{er} juillet 2001, l'Office fédéral de l'eau et de la géologie prit en charge le projet et nommait comme directeur le chef du Service hydrologique et géologique national, le géologue Peter Heitzmann. Le canton du Jura était satisfait — il avait obtenu les garanties voulues pour une gestion indépendante du laboratoire. Mais de nouvelles difficultés ne tarderont pas à se manifester.

Le conflit couve et éclate : 2002-2005

Malgré ce succès, la situation n'était pas vraiment détendue. La gestion du projet par le Service géologique national posait des problèmes. Le canton avait souhaité un engagement plus déterminé de la part de la Confédération. De plus, la situation s'était aggravée par le fait que le chef du projet était tombé malade. Il fut remplacé début 2003 par Marc Thury, invité à reprendre la direction une deuxième fois. Cependant, les désaccords entre le projet et le canton se poursuivaient aussi sous sa direction. Les rôles des différents acteurs n'avaient pas été suffisamment clarifiés. Le canton et son ministre de tutelle de l'époque, Laurent Schaffter, étaient sous pression. Le ministre a prié la Commission de suivi de chercher des solutions. À cette fin celle-ci avait contacté certains partenaires du PMT, des représentants d'institutions

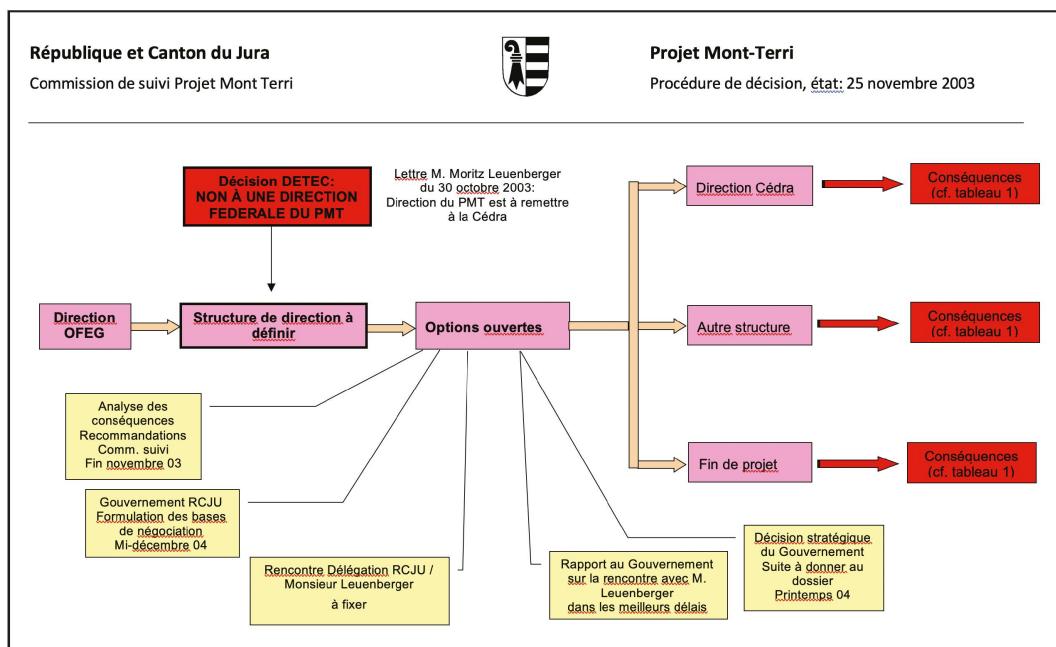


Fig. 2: Options ouvertes de réorganisation des structures étudiées et soumises au Gouvernement. La reprise du projet par la Nagra sera refusée par le Gouvernement jurassien qui souhaite toujours une institution de la Confédération à la tête du projet.

suisses et des scientifiques externes indépendants. Suite à ces consultations, la commission avait élaboré les modèles de gestion envisageables et les avait soumis au ministre et au gouvernement du canton (fig. 2). Par la suite, le Gouvernement s'était clairement exprimé en faveur de la structure existante.

De leur côté, le gouvernement fédéral et la Nagra ont envisagé une nouvelle structure de projet. Le principe du pollueur-payeur fut de nouveau mis au premier plan. Une gestion du projet par les producteurs des déchets eux-mêmes en découlait. Une solution inacceptable pour le gouvernement jurassien. À partir de 2003, les conflits entre acteurs ont rendu de plus en plus difficile l'entente entre les parties. Le travail quotidien était devenu difficile. Des échanges de lettres s'en sont suivis. Le ministre fédéral avait même exprimé son souhait que la direction du laboratoire soit reprise par la Nagra. Les pressions s'intensifiaient. Un jeu de pouvoir, dans lequel les différents acteurs étaient piégés. Face à cette situation, Marc Thury adressa un mémoire à l'un des directeurs exécutifs de la Nagra le 5 avril 2004. Il commentait la nécessité de réformer le projet du Mont-Terri, en suggérant qu'il serait plus réaliste de viser «un programme de promotion de l'acceptation qui permettrait à la Nagra de reprendre le projet dans un proche avenir» (Marc Thury, 05.04.2004).

Le gouvernement cantonal refusa une fois de plus en avril 2004 (Gouvernement RCJU 27.04.2004). Il a laissé entendre qu'il réévaluerait l'octroi des autorisations d'exploitation du laboratoire en cas de retrait de la Confédération. Devant cette situation, la Confédération a finalement cédé, sans pour autant s'engager davantage dans le projet. Enfin, les deux gouvernements fédéral et jurassien ont convenu d'une rencontre. Elle s'est tenue le 9 septembre 2004 à Berne. Plusieurs dossiers ont fait état des discussions, tout particulièrement celles liées à l'assainissement et au remblayage des galeries des Fours à Chaux bloqués depuis des années ainsi que celles du laboratoire du Mont-Terri. La Confédération dut prendre acte du fait que le canton n'était pas prêt à s'incliner. La question de la gestion du laboratoire par la Nagra fut donc définitivement hors de question. Cet épisode a marqué le début d'une nouvelle phase dans la recherche d'une solution pour le remplacement de l'OFEG. Le DETEC n'était plus intéressé à s'engager dans le PMT. L'OFEG fut dissous pour des raisons indépendantes au PMT. Et le Service hydrologique et géologique national a dû être de nouveau transféré. Il fut rattaché à Swisstopo dans le Département fédéral de la défense, de la protection de la population et des sports

Le laboratoire souterrain «Mont-Terri Project»

(DDPS). À partir du printemps 2005, une nouvelle convention était négociée, qui occupera la Commission de suivi de manière prépondérante. Un nouveau directeur fut nommé: Paul Bossart, qui a conduit avec un grand succès le développement du PMT depuis janvier 2006. Avec la reprise définitive du projet par Swisstopo la paix s'annonçait enfin dans le projet. Le gouvernement jurassien finit par s'imposer. Ce fut probablement le tournant décisif pour l'institutionnalisation des structures du PMT et pour les relations au sein du projet.

Bilan intermédiaire relatif aux structures

En rétrospective et du point de vue des intérêts cantonaux, trois éléments doivent être notés dans le développement des structures du projet. Tout d'abord, le rôle éminemment important qui sous-tend le modèle politico-économique de l'économie suisse doit une fois de plus être souligné. L'attitude libérale du modèle de la société suisse s'exprime dans la primauté de l'économie sur celle d'autres intérêts publics. De ce fait il n'est pas étonnant que la protection de l'environnement en Suisse, en particulier les conséquences à long terme d'une action économique, ne fait pas l'objet d'une réflexion sur l'organisation durable des intérêts publics. Cela s'applique particulièrement, mais pas exclusivement, à l'utilisation de la technologie nucléaire. Par ailleurs, l'industrie chimique est également confrontée à un défi similaire, bien qu'il existe des différences significatives dans la manière de traiter les impacts environnementaux potentiels.

Cette condition cadre doit être considérée comme l'un des problèmes fondamentaux résultant de l'utilisation de l'énergie nucléaire. Elle est devenue particulièrement évidente dans le domaine de l'élimination des déchets nucléaires. Les modèles de gestion ont été subordonnés aux intérêts économiques. L'État a déterminé les conditions cadres, mais ne s'est pas attribué (ou n'a pas voulu s'attribuer) les missions du contrôle et de la maîtrise des processus. Dans ces conditions, les possibilités d'intervention, voire de correction ont été limitées. En fin de compte, ce modèle a affaibli les intérêts du secteur public, qui constitue pourtant le dernier filet de sécurité en cas de *crashes* ou dépassements budgétaires de mégaprojets hors de contrôle.

Le deuxième facteur qui découle directement de cette forme d'organisation est lié aux dépendances et aux asymétries qui en résultent. L'utilisation des ressources financières disponibles est la façon la plus simple d'en faire la démonstration. Les structures sont basées sur le principe «Qui paie commande». Si les ressources sont réparties

unilatéralement — ce qui est le cas pour le modèle d’organisation suisse et le recours très strict au principe du pollueur-payeur —, c’est le payeur qui gère un processus entièrement dans son sens. Il contrôle donc aussi la recherche. Les intérêts scientifiques qui se manifestent en dehors du cercle étroit de ses intérêts n’ont guère l’occasion de se développer. Ce faisant, les opportunités de développement se déplacent très unilatéralement vers le détenteur des ressources. Cela affaiblit les autorités de suivi, amplifie les asymétries en termes de compétence et de savoir-faire et conduit à une fragilisation de la fonction de contrôle. C’est d’ailleurs une raison essentielle pour laquelle la CS a toujours essayé dans le cadre de son budget limité d’assurer une fonction de supervision minimale des programmes de recherche actuels et d’assurer ainsi ses connaissances sur le développement scientifique du projet.

Enfin, ce sont précisément les problèmes d’asymétrie et finalement de gouvernance découlant d’une telle organisation qui deviennent évidents. Jusqu’à son expansion dans de nouveaux domaines de recherche (CSS, géothermie), le PMT s’est caractérisé par la participation d’organismes institutionnels de gestion des déchets radioactifs ainsi que d’autorités de contrôle ou de leurs instituts de recherche dans le domaine nucléaire. La direction du projet établie durant une phase du projet par la coopérative suisse des producteurs d’énergie nucléaire a posé deux problèmes supplémentaires : d’une part, un organisme défendant les intérêts des producteurs des déchets serait à la tête d’une plate forme de recherche dans laquelle des autorités de surveillance ou de contrôle scientifique sont également impliquées. D’autre part, la coopération des agences de gestion des déchets et des autorités de régulation à des expériences communes dans le cadre d’un même projet de recherche ont ainsi posé un problème fondamental pour la gouvernance du processus et la crédibilité de ses résultats. L’acceptation publique et scientifique d’un tel processus peut difficilement être gagnée.

Au-delà des considérations politiques, ces questions ont été au cœur de la logique d’action de la Commission de suivi. En tant qu’organe de contrôle et de supervision, une telle commission devait pouvoir intervenir dans les processus lorsqu’un projet s’égaraît en termes de structure ou de gouvernance. Un contrôle et une supervision fortes ont finalement renforcé le projet Mont-Terri dans ses aspects fondamentaux, même si l’opérateur et certains partenaires n’ont pas toujours apprécié les actions du canton.

Tâches, succès et échecs des travaux de la Commission de suivi

Par la suite les activités les plus importantes de la commission sont succinctement décrites.

D'une part, les activités de la CS étaient déjà fixées dans l'arrêté du gouvernement et se sont développées d'autre part et de manière sélective au cours du temps. Deux domaines d'activité ont été particulièrement exigeants pour la CS: le suivi de la recherche au laboratoire à travers l'examen des programmes annuels de recherche ainsi que les exigences en matière de sécurité. N'oublions pas: jusqu'à l'an 2000, le canton du Jura était responsable de la partie jurassienne de l'autoroute A16. À partir du 1^{er} janvier 2008, les autoroutes étaient transférées à la Confédération. Il en résultait automatiquement de nouvelles conditions de propriété: le canton était uniquement responsable du laboratoire, tandis que l'Office fédéral des routes (OFROU) devenait propriétaire du tunnel. Ce changement des rapports de propriété a impliqué que la convention entre le canton et la Confédération a dû être modifiée et que de nouveaux accords sont devenus nécessaires. L'OFROU s'est davantage impliqué dans la Commission de suivi et a obtenu le siège de vice-président de la commission. De cette manière, les surveillances cantonale et fédérale du projet ont été mises en commun. Voici un bref résumé des activités de la commission.

Sécurité du laboratoire, des accès, du travail et des risques

Dans les premières phases d'exploitation, les exploitants et le canton n'ont accordé qu'une importance limitée aux mesures de sécurité dans le laboratoire et dans le tunnel de sécurité. Cette situation a changé fondamentalement le 11 septembre 2003. Ce jour-là, une partie de la voûte de la galerie 2004 en construction, s'est effondrée en seulement quelques heures. La stabilité du massif avait été surestimée. Cela a conduit non seulement à une nette expansion des mesures de stabilisation (ancrages, béton projeté, etc.) sur les galeries, mais aussi à des mesures systématiques des mouvements de convergence des galeries. Dorénavant, le canton a exigé un rapport annuel de suivi, le «rapport sur la conservation des ouvrages», qui a désormais présenté à l'automne de chaque année des mesures de convergence et des évaluations ainsi que les mesures de sécurité et de maintenance qui en découlent par l'exploitant. Lors de l'agrandissement du laboratoire en 2008 (Galerie 08), des écoulements d'eau interstitielle sont apparus, ce qui

suggère une réaction directe de la roche au forage réalisé à l'aide de tunneliers. Ces phénomènes se sont répétés lors de la construction de la nouvelle galerie à partir de 2018. Il s'agit là d'une observation très importante, car la construction d'un dépôt en couches géologiques profondes nécessitera une alternance de phases de construction et de stockage.

Un deuxième effet très important des grandes opérations de forage fut la production de poussière. Ici, de même, la Commission de suivi est intervenue de manière ciblée. En 2008, des discussions majeures ont eu lieu entre l'exploitant et le canton au sujet de la détection des poussières dans la galerie de sécurité. L'analyse des poussières par diffractométrie aux rayons X a montré que ces poussières étaient essentiellement constituées de fines particules d'argiles à Opalinus. Ce résultat a amené l'opérateur du laboratoire non seulement à assumer les opérations de nettoyage dans la galerie de sécurité, mais aussi à employer dorénavant des systèmes de filtration efficaces pendant les opérations de forage.

L'effet le plus important de la surveillance par la Commission de suivi a été lié à la planification des mesures à prendre en cas d'accident grave. Le canton a exigé un certain nombre de mesures de sécurité qui ont été mises en œuvre progressivement à partir de 2006: une cellule de survie en cas d'incendie souterrain, des analyses de risque pour les divers scénarios d'accidents sérieux, la mise en place des mesures de protection (déTECTeurs en cas d'incendie, mesures d'extinction et d'alarme, mesures d'évacuation, exercices, mise en surpression de la galerie de sécurité à partir de 2010 etc.). Le développement de cette culture de sécurité a pris de nombreuses années et se poursuit jusqu'à aujourd'hui. Un rapport «concept de sécurité» a été actualisé tous les ans¹⁰ et a permis ainsi de poursuivre les efforts et la modernisation des mesures de protection pour les utilisateurs du laboratoire.

Dernier champ d'activité de la Commission de suivi en matière de sécurité: les mesures de radon à l'intérieur du laboratoire (et des anciennes galeries des Fours à Chaux) par l'ancien chimiste cantonal jurassien et le suivi strict des diverses expériences avec traceurs radioactifs ou sondes à fortes sources radioactives dans des forages. La supervision a été renforcée au sein de la commission en impliquant l'ancien président de la commission fédérale de radioprotection.

Bien que Swisstopo ait résisté de longues années à des mesures plus efficaces dans le domaine de la sécurité en raison d'un manque de moyens financiers, le canton a maintenu sa position. Pourtant, les fric-

Le laboratoire souterrain «Mont-Terri Project»

tions ont longtemps perduré. En septembre 2011, un incident est survenu à la porte nord de l'espace survie, sans que la CS — donc le canton — en soit immédiatement informée. Le ministre Philippe Receveur a menacé de fermer le laboratoire si les processus exigés par le canton n'étaient pas appliqués. Suite à ce dernier litige entre l'exploitant et le canton, Swisstopo a assuré les fonds nécessaires pour la sécurité du fonctionnement du laboratoire souterrain. Cet épisode a marqué la fin des relations conflictuelles. Dorénavant, les deux parties coopèrent de manière profitable. Désormais, le gestionnaire du laboratoire et les partenaires se félicitent du haut niveau de sécurité des galeries. Ce succès a montré le rôle déterminant d'autorités de contrôle fermes, économiquement et politiquement indépendantes.

Recherche et expériences

Un deuxième volet de grande importance pour la commission fut le suivi des expériences scientifiques. Dès la prise des fonctions, la CS a accompagné la recherche de près. Elle ne s'est pas seulement contentée de suivre l'état d'avancement des projets annuels, qui sont la base pour les autorisations annuelles, mais elle a examiné avant tout les expériences qui comportaient des risques ou qui sont d'une grande importance pour l'acceptation publique. N'oublions pas qu'avec le plan sectriel pour les dépôts en couches géologiques profondes, les recherches menées par les partenaires suisses, et surtout par la Nagra, au Mont-Terri, attirent également une attention particulière. En outre, les experts cantonaux remplissent d'autres fonctions importantes dans le domaine des programmes suisses en matière de gestion de déchets radioactifs ou de protection contre les radiations. Dès le départ, la commission placera donc la recherche et la promotion de la recherche au cœur de ses activités, avec un succès mitigé. Certaines initiatives ont été couronnées de succès, comme les propositions de 2000 visant à faire étudier les questions de microbiologie et de production de gaz par un groupe de chercheurs de l'Institut géologique de l'ETH Zurich (Prof. J. McKenzie). La Nagra reprendra cette idée et coordonnera ces recherches avec d'autres partenaires. La proposition faite par la commission en 2003 dans le cadre du «programme long terme de recherche» de lancer un projet de campagnes d'information systématiques a également été couronnée de succès. Dès 2008, Swisstopo, la Nagra et l'autorité de surveillance, l'Inspection fédérale de sécurité nucléaire IFSN, planifieront et mettront en œuvre le «Centre de visiteurs», qui fournira des informations sur la recherche du laboratoire et sur le plan

sectoriel des dépôts en couches géologiques profondes aux organisations intéressées, aux scientifiques, à la politique ou au grand public.

D'autres idées de recherche n'ont été reprises que partiellement, voire pas du tout. En 2003, quatre anciens membres de la commission EKRA (Buser, Hufschmied, Keusen, Wildi) ont proposé des expériences sur le concept de surveillance et de dépôt dit « pilote », qui n'ont cependant pas suscité l'intérêt nécessaire à une réalisation. De même, les expériences de stockage de matières radioactives (laboratoire A), extrêmement délicates pour des raisons d'acceptation publiques, mais absolument nécessaires pour la preuve de sûreté, n'ont jamais pu être discutées. Un dernier échec a été l'idée avancée par la CS d'élaborer un plan de recherche systématique (dans le sens du Earth Science Technical Plans for Mined Repositories [DOE 1979]). Cette idée semble dépasser le cadre financier du projet de recherche.

Toutefois, comme cela a déjà été mentionné, la commission a suivi autant que faire se peut l'évolution de la recherche. Outre les expériences de diffusion avec des radiotraceurs, il s'agit principalement d'expériences sur les gaz (en particulier l'hydrogène ou le CO₂ supercritique). Dans ces cas, la commission a exigé des analyses de risques, chacune d'elles étant réalisée par un spécialiste externe. D'autres expériences ont fait l'objet d'exams approfondis. Ceci s'applique principalement aux deux expériences EB et FE, qui ont déjà donné des résultats significatifs concernant la corrosion des colis en acier ou les effets thermiques, hydrauliques et mécaniques de la chaleur des colis en acier sur la bentonite de remplissage des emplacements ainsi que sur les parois des galeries.

Autres activités

Le contrôle des processus a joué un rôle majeur dans la supervision du projet. Ce n'est pas seulement l'approbation des projets de recherche soumis annuellement qui s'est avérée comme étant importante. La participation régulière aux réunions des responsables du projet (steering-meeting) et les journées scientifiques (technical meeting) ainsi que les rapports personnels ont également été utiles. De même, les programmes d'information ont joué un rôle important pour le canton. Bien sûr, ils ont été au centre des intérêts des opérateurs du laboratoire, sans pour autant être négligés par le canton.

Parmi les activités de la commission au fil des ans, mentionnons l'information régulière du ministre de tutelle et du Gouvernement, les

Le laboratoire souterrain «Mont-Terri Project»

développements de stratégies, les négociations, les préparations de séance, la coordination entre services du canton dans le cadre du PMT, le suivi et le contrôle des installations, le développement d'idées pour la formation de jeunes et pour le suivi scientifique [groupe de réflexion] etc. De plus, la commission a visité au cours des années des installations nucléaires comme le Zwilag de Würenlingen, le centre de stockage de Soulaines-Dhuys et le laboratoire de Bure en France, a organisé la réception des marnes à Opalinus issues des extensions du laboratoire et leur dépôt intermédiaire dans les cavernes des Fours à Chaux ou a participé à des journées d'information ou à des congrès.

Remarques finales : **Le projet du Mont-Terri, le rôle du Canton et de l'autorité de suivi à la lumière des développements internationaux récents**

L'engagement du canton du Jura dans le projet du Mont-Terri s'inscrit dans le cadre des deux projets pratiquement simultanés d'assainissement et de remblayage des galeries des anciens Fours à Chaux respectivement de l'assainissement de la décharge pour déchets industriels de Bonfol. Sans l'expérience de ces deux projets, l'engagement du canton ne pourrait être correctement apprécié. D'une part, il s'agit de l'exigence, formulée dès le départ, d'interdire le stockage des déchets radioactifs dans le laboratoire. D'autre part, la nécessité d'un contrôle étroit du projet par une Commission de suivi dotée des compétences nécessaires en est le résultat. En ce sens, il a fallu des années avant de trouver et de mettre en œuvre un modèle d'exploitation du laboratoire qui correspondait en fin de compte aux intérêts du canton et à ceux de la Confédération. Le fait que les intérêts de l'industrie nucléaire aient pu être mis au second plan et que le laboratoire soit finalement dirigé par un service de l'administration fédérale peut être considéré comme un grand succès pour le canton. D'autant plus que même la Nagra soutient la structure organisationnelle actuelle, le projet étant géré par un organisme d'État¹¹. Mais ce n'est pas tout: ce modèle d'organisation a créé une base essentielle pour une plate forme de recherche plus indépendante des intérêts industriels. À cet égard, le modèle d'autorisation annuelle choisi, qui exige un suivi permanent du projet et un examen approfondi des propositions de programmes par le canton,

mais assure en même temps un échange étroit entre l'exploitant et les autorités, a fortement contribué au succès du projet.

Le fait que les partenaires internationaux aient soutenu ce modèle peut également être considéré comme un succès particulier. Le modèle choisi finalement a permis au projet de s'ouvrir davantage et d'envisager de nouveaux domaines de recherche. Cela n'aurait pas été possible dans un laboratoire dirigé par l'industrie nucléaire. L'expérience acquise au Mont-Terri montre, à titre d'exemple, qu'une surveillance étroite et un contrôle strict par une autorité de surveillance étatique ne peuvent que renforcer un projet. La prévoyance stratégique du canton et la mise en place d'un cadre opérationnel clair ont joué un rôle majeur dans cette évolution. Le fait que les partenaires du projet de recherche acceptent également le caractère exemplaire des exigences de sécurité montre combien il est important de fixer de telles conditions cadres.

Si nous examinons ce modèle d'organisation à la lumière des développements internationaux actuels, il devient clair à quel point cette approche de direction indépendante — et donc crédible — d'un tel projet était visionnaire au départ. Ces dernières années en particulier, la gestion des déchets radioactifs est de plus en plus considérée d'un point de vue des défis organisationnels. Une évolution particulièrement intéressante peut être observée en Allemagne. Après des décennies d'échecs, les différentes parties concernées sont parvenues à un accord plus ou moins accepté sur le lancement d'un programme de recherche de dépôts géologiques profonds pour déchets radioactifs. Le 5 mai 2017, la loi dite de sélection des sites (Stand AG) est entrée en vigueur¹². Elle réglemente la recherche de sites de dépôt, définit les structures appropriées pour ce processus de recherche et contient entre autres deux règlements fondamentaux spécifiques. D'une part, elle définit le processus de recherche comme « un processus participatif, scientifique, transparent, d'auto-questionnement et d'apprentissage », qui doit aboutir au site d'un dépôt sûr à long terme pour la période de stockage d'un million d'années. La formulation est remarquable, car l'élément « participatif », exige la coopération de la société et du public, l'approche « fondée sur la science » suppose des programmes et des processus de recherche scientifique solides et ouverts, la transparence signifie non seulement rendre l'impact visible, mais aussi révéler les conflits et les critiques. Par-dessus tout, le « processus d'auto-questionnement et d'apprentissage » vise ce qu'une culture de l'erreur et de la sécurité cherche à atteindre¹³. Une culture dont l'énergie nucléaire se targue depuis des décennies¹⁴ et qui, comme dans l'aviation, devrait permettre

Le laboratoire souterrain «Mont-Terri Project»

de tirer les leçons des erreurs. Car : pour apprendre de ses erreurs, il faut bien sûr pouvoir en parler ouvertement. C'est le cœur de tout processus d'apprentissage. D'autre part, la loi sur le choix des sites utilise un modèle simple avec des structures organisationnelles établies: un promoteur de projet (Société fédérale pour le stockage définitif BGE), une autorité de surveillance (Office fédéral pour la sécurité du stockage des déchets nucléaires BASE) et un comité de surveillance national indépendant des intérêts particuliers (Nationales Begleitgremium), qui doit servir de médiateur de tout intérêt dans le débat social et garantir la transparence et l'acceptation nécessaires du processus¹⁵. Ainsi, ces deux principes fondamentaux d'organisation et de fonctionnement se retrouvent dans les objectifs et la structure d'un tel programme.

Si le projet Mont-Terri est regardé sous cet angle, nous constatons qu'il repose sur ces deux mêmes principes essentiels depuis près de deux décennies. Le premier accord signé par les parties contractantes en 2001 — la Convention 2001 — était basé sur ces mêmes propos. Par son biais elle a déterminé et veillé à ce qu'une structure forte et indépendante des intérêts particuliers soit établie et qu'une structure de suivi solide accompagne le projet et le programme de recherche au service du public. Le résultat obtenu aujourd'hui est encourageant et peut en fait être considéré comme exemple de la manière dont — malgré toutes les difficultés et les différends — la crédibilité d'un tel programme peut être établie sur une interaction respectueuse, critique et ouverte entre les trois parties prenantes du projet de dépôt géologique profond: le gestionnaire, le contrôleur et le public.

Remerciements

Les personnes suivantes ont apporté leurs commentaires et critiques aux diverses versions du texte. Nous les en remercions: Luis Calvo Salgado, historien, Bülach; Dr Thomas Flüeler, spécialiste en risque, Commission de suivi; Dr Marzio Giamboni, géologue, Commission de suivi; Dr André Herrmann, chimiste, Commission de suivi; Dr André Lambert, géologue, Baden; Dr Federico Matousek, géologue, Zurich; Pascal Mertenat, ancien président de la Commission de suivi; Prof. Dr Walter Wildi, géologue, Genève. Swisstopo a été sollicité à plusieurs reprises, mais n'a pas souhaité apporter un commentaire.

ACTES 2020 | SCIENCES

Marcos Buser (marcos.buser@bluewin.ch; Funkackerstrasse 19, 8050 Zurich), géologue ETH Zurich, est spécialiste des déchets industriels et radioactifs. Il a été président de la Commission de suivi du Projet Mont-Terri de 2000 à 2013/2014.

RÉFÉRENCES

A. Sources Internet du projet et du canton du Jura

Mont-Terri Project: www.mont-terri.ch

Canton du Jura, Département de l'environnement, Service des infrastructures, Mont-Terri:
<https://www.jura.ch/DEN/SIN/Laboratoire-du-Mont-Terri.html>

B. Publications et autres écrits

Bossart P, Thury M. (Eds.), 2008 : Mont Terri Rock Laboratory. Project, Programme 1996 to 2007 and Results. *Reports of the Swiss Geological Survey*, No. 3. Federal Office of Topography (Swisstopo), Wabern. <http://www.mont-terri.ch>.

Bossart P., Bernier F., Birkholzer J., Bruggeman C., Connolly P., Dewonck S., Fukaya M., Herfort M., Jensen M., Matray J.-M., Mayor J. C., Moeri A., Oyama T., Schuster K., Shigeta N., Vietor T., & Wieczorek K., 2017 : Mont Terri rock laboratory, 20 years of research : introduction, site characteristics and overview of experiments. *Swiss Journal of Geosciences*, 110. <https://doi.org/10.1007/s00015-016-0236-1>.

Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz, Bundesamt für Justiz, 2017 : Gesetz zur Suche eines Standortes für ein Endlager für hochaktive Abfälle (Standortwahlgesetz – StandAG), 5. Mai 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/standag_2017/BJNR107410017.html (27.09.2020).

Buser Marcos, 2019 : *Wohin mit dem Atommüll, Das nukleare Abenteuer und seine Folgen, Ein Tatsachenbericht*. Rotpunktverlag Zürich.

Buser Marcos, Lambert André, Wildi Walter, 2020 : Deep Geological and Chemical Waste Disposal: Where We Stand and Where We Go, atw, *International Journal for Nuclear Power*, Issue 6/7.

DOE, USGS, 1979 : *Earth Science Technical Plan for Mined Geologic Disposal of Radioactive Waste*, US. Department of Energy (DOE), U.S Geological Survey (USGS), TID 29 018 (Draft).

EKRA, 2000 : *Modèles de gestion des déchets radioactifs*, Rapport final, Office fédéral de l'énergie, Berne, 31 janvier 2000.

EKRA, 2002 : *Beitrag zur Entsorgungsstrategie für radioaktive Abfälle in der Schweiz*, im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern, Oktober 2002.

Flüeler Thomas, 2002 : *Radioaktive Abfälle in der Schweiz. Muster der Entscheidungsfindung in komplexen soziotechnischen Systemen*, Dissertation ETH Zürich.

Groupe de travail DMS, 2013 : *Décharge de matériaux stabilisés, Historique du site des Fours à Chaux de Saint-Ursanne et cas « Fairtec »*, données principales, rapport à l'attention du Gouvernement du Canton du Jura, 21 novembre 2013.

Groupe de travail DMS, 2013 : *Décharge de matériaux stabilisés, Rapport final du site des Fours à Chaux de Saint-Ursanne et cas « Fairtec »*, rapport à l'attention du Gouvernement du Canton du Jura.

Horseman S. T., Higgo J. J. W., Alexander J., Harrington J. F., 1996: *Water, Gas and Solute Movement Through Argillaceous Media*, Report CC-96/1, Nuclear Energy Agency, OECD.

Le laboratoire souterrain «Mont-Terri Project»

- KARA, 1976: *Jahresbericht 1976*, Koordinationsausschuss des Eidgenössischen Amts für Energiewirtschaft für radioaktive Abfälle, KARA 54.
- INSAG, 1991: *Safety Culture*, safety series No. 75-INSAG-4, International Nuclear Safety Advisory Group.
- MTP, s.d.: Historique du projet, <https://www.mont-terri.ch/fr/projet-du-mont-terri/historique-du-projet.html> (01.10.2020).
- Nagra, 1988: *Sedimentstudie. Zwischenbericht 1988*, Nagra Technischer Bericht NTB 88-25.
- Nagra, 1991: *Sedimentstudie. Zwischenbericht, zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1988 bis 1990 und Konzept für das weitere Vorgehen*, Nagra Technischer Bericht NTB 91-19.
- Nagra, 1994: *Sedimentstudie. Zwischenbericht 1993*, Nagra Technischer Bericht NTB 94-10.
- Nagra, 1996 : Sondierprogramm Benken. Arbeitsprogramm, Nagra Technischer Bericht 96-07.
- OFEN, 2008: Plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes», Office fédéral de l'énergie.
- Ribeaud J., 2014: *Maudite Décharge : Histoire d'un site contaminé et de son assainissement à la frontière franco-suisse*, Éditions Alphil.
- Theis C., 1956: Problèmes relatifs à l'enfouissement des déchets nucléaires, *Actes de la Conference internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques*, tenue à Genève du 8 au 20 août 1955, Volume IX, 1956.

ABRÉVIATIONS

CS	Commission de suivi
CSS	Carbon dioxide capture and storage
DDPS	Département fédéral de la défense, de la protection de la population et des sports
DEE	Département de l'équipement et environnement (Département de l'environnement)
DETEC	Département de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication
DSN	Division principale de la sécurité des installations nucléaires
EKRA	Commission sur les «concepts de gestion des déchets radioactifs»
ETH	Eidgenössische Technische Hochschulen
GNW	Coopérative de gestion des déchets nucléaires du Wellenberg
IFSN	Inspection fédérale de sécurité nucléaire
LENu	Nouvelle loi sur l'énergie nucléaire
Nagra	Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs
OFEG	Office fédéral de l'eau et de la géologie
OFEN	Office Fédéral de l'énergie
OFEFP	Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (aujourd'hui office fédéral de l'environnement OFEV)
OFROU	Office fédéral des routes
PCH	Service des ponts et chaussées (Service des infrastructures)
PMT	Projet Mont-Terri
SHGN	Service hydrologique et géologique national

NOTES

¹ Comm. pers. D. E. Kowalski, ancien directeur Nagra.

² Nagra, 1988, *Sedimentstudie. Zwischenbericht 1988*, Nagra Technischer Bericht NTB 88-25.

ACTES 2020 | SCIENCES

³ MTP, s. d., Historique du projet, <https://www.mont-terri.ch/fr/projet-du-mont-terri/historique-du-projet.html> (01.10.2020).

⁴ Groupe de travail DMS, 2013, Rapport final, Historique du site des Fours à Chaux de Saint-Ursanne et du cas de « Fairtec », à l'attention du Gouvernement de la République et Canton du Jura, 21 novembre 2013, document non publié.

⁵ SHGN, Andra (France), Nagra, PNC (Japon), SCK.CEN (Belgique), cf. www.mont-terri.ch.

⁶ BGR (Allemagne), Enresa (Espagne), IRSN (France), cf. www.mont-terri.ch.

⁷ Aujourd'hui Département de l'environnement (DEN).

⁸ EKRA concepts d'élimination des déchets radioactifs.

⁹ Aujourd'hui Service cantonal des infrastructures.

¹⁰ Réimprimé tous les 5 ans.

¹¹ Comm. pers. Dr Tim Vietor, Nagra.

¹² Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz, Bundesamt für Justiz, 2017, Gesetz zur Suche eines Standortes für ein Endlager für hochaktive Abfälle (Standortwahlgesetz – StandAG), 5. Mai 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/standag_2017/BJNR107410017.html (27.09.2020).

¹³ Buser, M., Lambert, A., Wildi, W., 2020, Deep Geological and Chemical Waste Disposal: Where We Stand and Where We Go, atw, International Journal for Nuclear Power, Issue 6/7.

¹⁴ INSAG, 1991, Safety Culture, safety series N°. 75-INSAG-4, International Nuclear Safety Advisory Group.

¹⁵ Bundesgesellschaft für Endlagerung BGE, Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (bis 31.12.2019 «Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit»), Nationales Begleitgremium.