

Zeitschrift: Actes de la Société jurassienne d'émulation
Herausgeber: Société jurassienne d'émulation
Band: 119 (2016)

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: 30.01.2026

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

Cahier des sciences

Introduction

DAMIEN BECKER

Le cahier des sciences, millésime 2016, se compose de deux communications et quatre études originales. Exposés brièvement, les textes proposés font majoritairement référence aux sciences de la Terre et laissent une place de choix à des travaux d'étudiants, mettant en lumière des problématiques scientifiques tant en Ajoie que dans la vallée de Delémont et sur les hauts-reliefs du Jura bernois.

Le volume débute par une communication issue de deux études doctorales de l'université de Berne qui propose un éclairage sur les climats d'un passé récent en Suisse, basé notamment sur l'application de nouvelles techniques de mesure sur les stalagmites de la grotte de Milandre. Une deuxième communication concerne l'histoire du projet Mont Terri, un projet international de recherche dans un laboratoire souterrain actif depuis plus de 20 ans.

Les articles de fond commencent par la publication d'un travail de bachelor de l'université de Fribourg sur les grands mammifères découverts au siècle passé dans les sables miocènes de Charmoille. Suit une synthèse des données de la première moitié du ^{xx}e siècle sur la découverte des « paquets glissés » de roche calcaire à Delémont et les défis que posent ces masses en matière de construction et de protection des eaux souterraines. Le sujet de recherche suivant, également issu d'un travail de bachelor de l'université de Fribourg, expose une méthode originale pour repérer et cartographier de manière automatisée des dolines karstiques à l'aide d'un modèle numérique d'altitude appliqué au plateau de Bure en Ajoie. Le cahier se termine par la publication d'un travail de maturité du lycée cantonal portant sur le recensement de la population d'amphibiens de l'étang de la Noz, à Bellelay.

Cette petite introduction éditoriale, trop rapidement résumée, expose tous les éléments qui font de cette édition 2016 un standard pour les futurs cahiers des sciences, à savoir un recueil d'articles scientifiques solides privilégiant travaux d'étudiants et patrimoine scientifique régional.

La grotte de Milandre, un témoin des climats du passé

STÉPHANE AFFOLTER | ANAMARIA HÄUSELMANN

La grotte de Milandre était au cœur du projet de recherche Stalclim¹ (acronyme pour stalagmite et climat) débuté en 2011 et financé par le Fonds national suisse de la recherche scientifique. Le but du projet étant de mieux comprendre les climats du passé en Suisse, notamment grâce au développement et à l'application de nouvelles techniques de mesure sur les stalagmites. Pour atteindre ce but, une évaluation du potentiel climatique de la grotte a été menée.

Introduction

La grotte de Milandre en Ajoie contient des concrétions calcaires (stalagmites, stalactites, fistuleuses, etc.), également appelées spéléothèmes (étymologie du grec *spelaïon* signifiant la grotte et *thema* les dépôts), très bien préservées, qui représentent des archives climatiques d'intérêt majeur pour les régions de basse latitude au même titre que les carottes glaciaires au Groenland enregistrent les variations du climat du passé dans les régions polaires. À ce jour, les carottes de glace ont été étudiées en détail et ont livré des informations capitales et de haute qualité pour les 800 000 dernières années dans les régions polaires. Néanmoins, les informations paléoclimatiques relatives aux régions continentales de basse latitude sont plus disparates et principalement limitées aux périodes les plus récentes (de l'ordre de 10 000 ans) et sont basées sur d'autres archives terrestres, telles que les sédiments lacustres, les cernes d'arbres ou encore les carottes de glaciers. Parmi ces archives climatiques, les spéléothèmes présentent l'avantage de grandir pendant de longs intervalles de temps, et ce, jusqu'à des périodes reculées de l'ordre du million d'années, voire plus. En outre, on les trouve dans des régions karstiques réparties sur l'ensemble de la planète. Enfin, ces spéléothèmes sont préservés, dans la grotte, de l'érosion causée par les

conditions atmosphériques extérieures et agissent ainsi, comme des enregistreurs du climat présent au-dessus de la grotte à l'époque de leur formation.

Les stalagmites de Milandre peuvent être datées précisément grâce à la méthode de datation radiométrique uranium-thorium notamment, et elles enregistrent des informations propres aux changements climatiques ayant eu lieu en Suisse et, plus généralement, à l'échelle de l'Europe (Affolter *et al.* 2015, Affolter 2015, Hasenfratz 2012, Häuselmann 2015, Schmassmann 2010). Dans la grotte de Milandre, les premières datations ont montré que ces concrétions ont grandi de manière régulière à certaines époques dans le passé, par exemple durant les 14 000 dernières années (englobant l'époque Holocène) ou encore entre 90 000 et 125 000 ans (Häuselmann 2015). Durant la dernière période glaciaire correspondant à la fin du Pléistocène, le climat était plus froid et la formation de stalagmites a probablement été interrompue entre 14 000 et 90 000 ans.

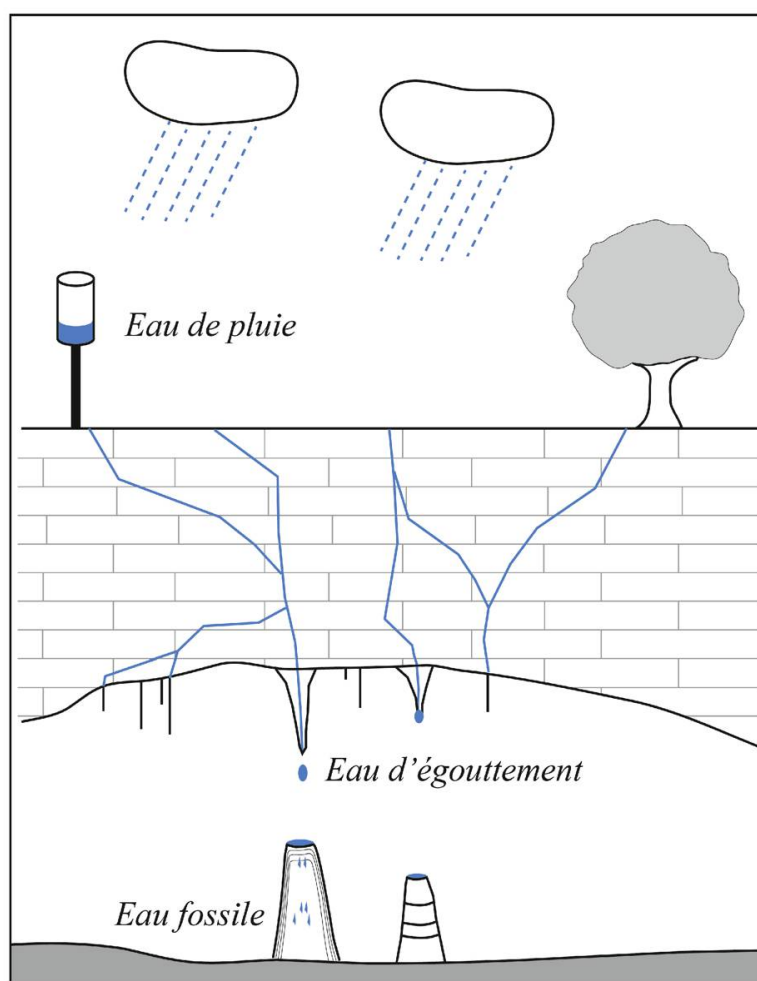


Fig. 1 :
Schéma illustrant le parcours des eaux de précipitation jusqu'à leur emprisonnement au sein des spéléothèmes.

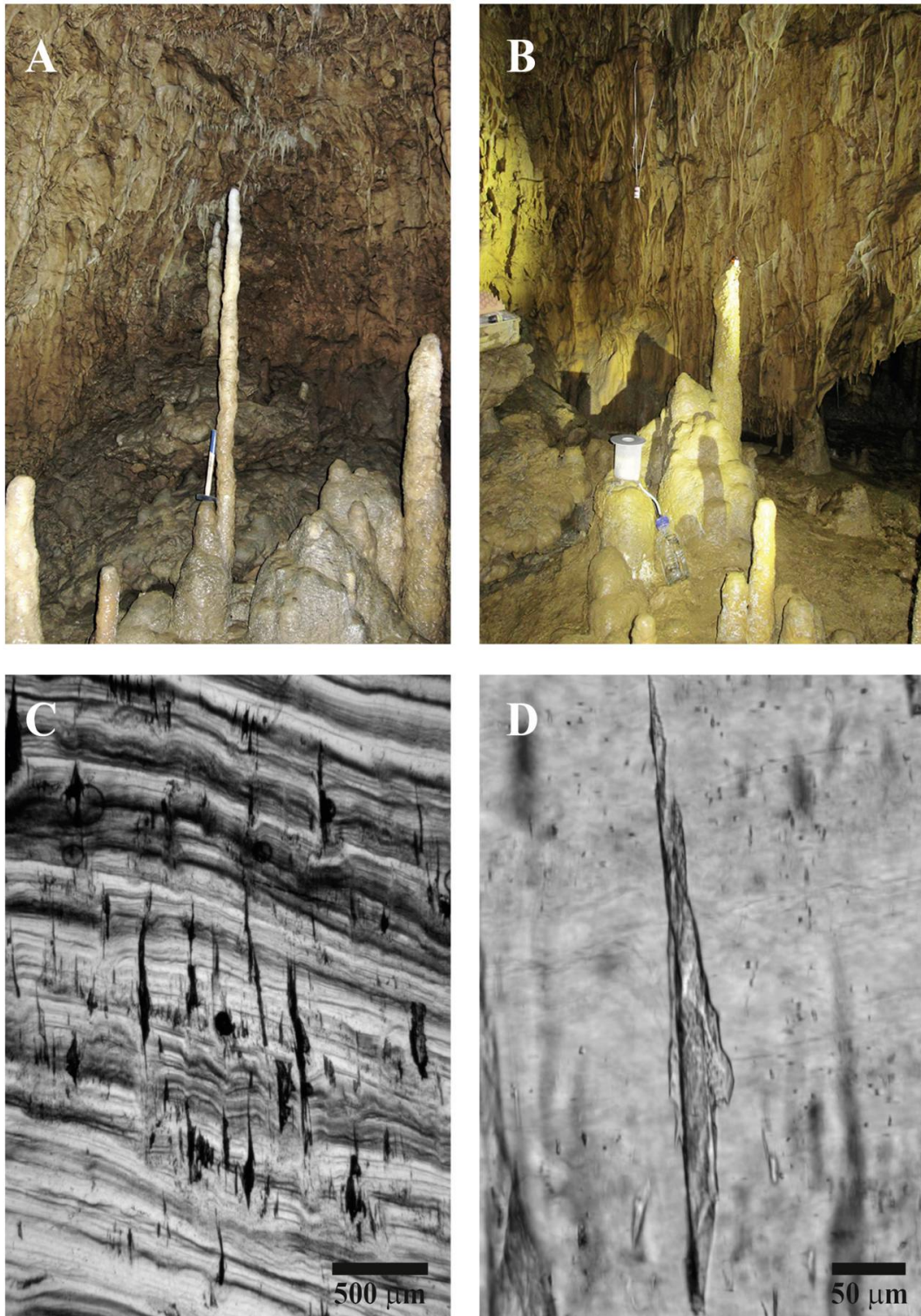


Fig. 2: A. Stalagmites M8 et M6 (au centre). B. Système de récupération des eaux d'égouttement à l'endroit de M6. C. Inclusions fluides (en noir) dans la matrice calcaire, les lamines de croissance sont bien visibles. D. Agrandissement d'une inclusion fluide. Photos C et D par Y. Krüger.

Les variations environnementales et climatiques sont transmises au travers des isotopes stables de l'hydrogène ($\delta^2\text{H}$) et de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) présents dans les précipitations au-dessus de la grotte aux eaux souterraines (via le sol et l'épikarst), puis sont piégées dans les spéléothèmes sous forme de calcite ou d'inclusions fluides (fig. 1). Les stalagmites, en particulier, contiennent dans la matrice calcaire des inclusions d'eau fossile qui représentent un vestige des précipitations tombées au-dessus de la grotte (fig. 2). L'hydrogène et l'oxygène sont des traceurs du cycle de l'eau très utilisés en paléoclimatologie qui fournissent notamment des informations sur les précipitations, températures et circulations atmosphériques actuelles et passées. Ainsi, à partir des variations isotopiques mesurées dans l'eau et dans la calcite d'une stalagmite, il est possible de reconstruire les climats régnant à l'époque de sa formation. À noter encore que le carbone ($\delta^{13}\text{C}$) permet une investigation des changements de végétation ayant eu lieu en surface.

Toutefois, avant de procéder aux reconstructions, il est nécessaire de « calibrer » la grotte, à savoir de comprendre la signification des variations des isotopes stables dans les précipitations pour la région jurassienne et leur transmission au sein du système karstique de Milandre. Dans ce but, une étude a été menée sur les eaux de précipitations au-dessus de la grotte, les eaux d'égouttement dans la grotte et sur les inclusions fluides scellées dans les spéléothèmes. Cette communication résume les résultats récemment publiés (Affolter *et al.* 2015). Le lecteur intéressé au potentiel des spéléothèmes en tant qu'archives climatiques et environnementales peut consulter deux excellentes publications en français (Couchoud 2008a, b).

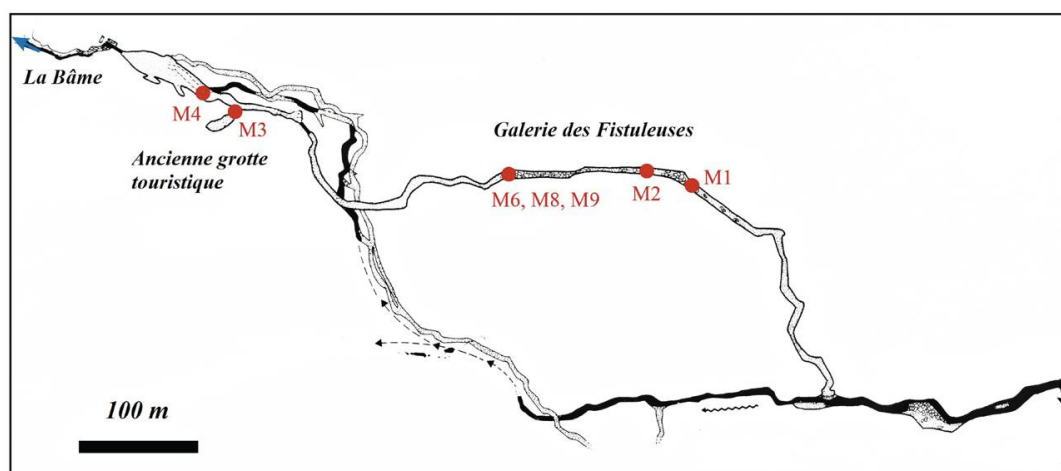


Fig. 3: Situation des stalagmites prélevées dans la partie aval de la grotte de Milandre (modifié d'après Gigon & Wenger, 1986). De la bâme, les eaux se jettent dans l'Allaine à Boncourt.

Résultats

Les stalagmites analysées dans ce projet proviennent de la partie aval de la grotte et plus précisément de la Galerie des fistuleuses (fig. 3). Il est utile de préciser que les stalagmites sont protégées et leur prélèvement réglementé. Ainsi, pour la protection des milieux karstiques, une autorisation est délivrée au cas par cas par la commission scientifique de la Société suisse de spéléologie en accord avec le Spéléo-Club Jura.

Un monitoring a été mené dans cette galerie durant la période 2012-2014, à l'endroit exact où les stalagmites M6 et M8 (fig. 2 et 4) ont été prélevées. Le taux d'humidité mesuré ponctuellement est de 100 %. La température annuelle moyenne est de 9,8 °C avec de très faibles variations durant l'année. La température de la grotte est similaire à la température moyenne annuelle de surface mesurée à la station Météosuisse de Fahy de 8,5 °C en tenant compte de la différence d'altitude de 200 mètres environ et d'un gradient adiabatique régional d'environ 0,0055 °C/m. Ce lien est très important dans l'optique d'une reconstruction climatique, car les variations de température dans la grotte correspondent aux fluctuations régionales annuelles à l'extérieur de celle-ci.

Du point de vue des isotopes stables (discuté ici avec l'hydrogène), une autre observation déterminante est que la composition isotopique des eaux d'égouttement dans la grotte alimentant la stalagmite ($\delta^2\text{H} \cong -60\text{‰}$) est similaire à celle de l'eau fossile récente ($\delta^2\text{H} \cong -61\text{‰}$) extraite de la partie supérieure de la stalagmite M6. L'eau d'égouttement étant elle aussi directement liée à l'isotopie des précipitations (pondérées par leur volume) échantillonnées au-dessus de la grotte à la station Météosuisse de Mormont. Cette dernière présente une isotopie sensiblement plus négative, probablement liée à une évaporation des eaux en surface avant l'infiltration ou à un temps de transit dans l'aquifère karstique équivalent à quelques années, bien qu'une première estimation basée sur le décalage isotopique des eaux permette d'estimer un temps de transit de 8 à 10 mois. Cette question mérite toutefois une étude approfondie. Un autre phénomène lié au bilan hydrique entre en jeu; ainsi l'infiltration des eaux de pluie de la période septembre à mai peut être favorisée au détriment des eaux estivales qui se seraient prioritairement évaporées ou utilisées par la végétation. Avec des valeurs isotopiques moyennes plus élevées en été ($\delta^2\text{H} = -41,2\text{‰}$) qu'en hiver ($\delta^2\text{H} = -86,4\text{‰}$), des variations du bilan hydrique en faveur des mois hivernaux pourraient sensiblement biaiser la moyenne annuelle.



Fig. 4: Stalagmite M8 sciée et polie mettant en évidence la lamination. Les traitillés correspondent à des interruptions de croissance (hiatus).

Néanmoins, la relation robuste entre l'isotopie des eaux de surface et des eaux souterraines est démontrée.

Après ces observations, il est encore nécessaire de déterminer la nature de l'information climatique ou environnementale contenue dans les isotopes stables des précipitations pour le Nord-Ouest de la Suisse. En effet, les variations du rapport isotopique entre molécules d'eau « lourde » et « légère » peuvent être liées à divers facteurs tels que le changement de température, la modification de la source ou de la quantité des précipitations, etc. Durant les deux années du monitoring, nous avons pu déterminer que les isotopes dans les précipitations collectées à Mor-

mont sont principalement contrôlés par la température de l'air (à près de 73 % en moyenne mensuelle). Une faible corrélation de 17 % est également observée entre les isotopes et l'humidité relative locale.

Perspectives

La problématique du changement climatique et du réchauffement de la planète constitue un enjeu majeur de notre société. Afin de mieux appréhender l'évolution future du climat à l'aide de modèles informatiques complexes, la communauté scientifique a besoin de jeux de données climatiques du passé (température, origine des précipitations, etc.) à haute résolution, parfaitement calibrées dans le temps et si possible sur de longs intervalles afin de « nourrir » les modèles. La grotte de Milandre est à même de fournir de tels jeux de données, car elle répond aux variations climatiques extérieures notamment en termes de température et de composition isotopique des eaux. De plus, les isotopes de l'eau sont principalement liés à la température dans le Nord-Est de la Suisse parti-

culièrement. Le tout permettant ainsi de mieux comprendre l'évolution du climat.

Déjà étudiée de manière intensive par le passé et lors de la construction de l'autoroute A16 notamment, la grotte de Milandre ajoute une nouvelle corde à l'arc de son rayonnement scientifique. Grâce à ses concrétions calcaires bien préservées et son accessibilité aisée, elle constitue un site idéal pour l'étude des climats du passé. De plus, le site est proche des stations de Mormont et de Fahy qui délivrent des informations météorologiques de qualité depuis plus de 50 ans permettant ainsi d'avoir une idée précise du lien entre paramètres géochimiques et aspects climatologiques récents. Depuis quelques années, Milandre a été l'objet de plusieurs travaux de master et de doctorat sur les paléoclimats initiés par l'université de Berne (Affolter 2015, Hasenfratz 2012, Häuselmann 2015, Schmassmann 2010) qui feront prochainement l'objet de nouvelles publications scientifiques.

Remerciements

Tout au long du projet, nous avons pu compter sur le soutien de P.-X. Meury (Spéléo-Club Jura), de P. Häuselmann (ISSKA), ainsi que de A. Forster (station Météosuisse de Mormont).

Stéphane Affolter, géologue diplômé de l'université de Neuchâtel, a obtenu en 2015 son doctorat en sciences du climat délivré par l'université de Berne. Sa thèse a été effectuée à l'Institut de physique et au centre Oeschger pour la recherche sur le changement climatique. Il travaille actuellement pour l'International Foundation High Altitude Research Stations Jungfraujoch and Gornergrat, sise à Berne, et s'occupe des mesures atmosphériques effectuées à la station de recherche alpine du Jungfraujoch.

Anamaria Häuselmann est géologue et climatologue diplômée des universités de Cluj Napoca (Roumanie) et de Berne. Elle a obtenu son doctorat en sciences du climat en 2015 délivré par l'université de Berne. Il a été effectué à l'Institut de géologie et au centre Oeschger pour la recherche sur le changement climatique. Membre du Spéléo-Club Interlaken et spécialiste de karstologie, elle sera, dès 2017, la future présidente de la Commission scientifique pour la spéléologie à la Société suisse de spéléologie et Scnat.

RÉFÉRENCES

- Affolter, S., Häuselmann, A. D., Fleitmann, D., Häuselmann, P., Leuenberger, M., 2015 : Triple isotope (δD , $d^{17}O$, $d^{18}O$) study on precipitation, drip water and speleothem fluid inclusions for a Western Central European cave (NW Switzerland). *Quaternary Science Reviews* 127, 73-89.
- Affolter, S., 2015 : *Innovative isotope ratio measurements of speleothem fluid inclusions*. Thèse de doctorat, Institut de physique, université de Berne.
- Couchoud I., 2008a: Les spéléothèmes, archives des variations paléoenvironnementales. *Quaternaire*, vol. 19/4, 255-274.
- Couchoud I., 2008b: Les isotopes stables de l'oxygène et du carbone dans les spéléothèmes: des archives paléoenvironnementales. *Quaternaire*, vol. 19/4, 275-291.
- Gigon, R. & Wenger, R., 1986 : Inventaire Spéléologique de la Suisse. II. Canton du Jura. *Commission Spéléologique de la Société helvétique des sciences naturelles*, Porrentruy.
- Hasenfratz, A., 2012 : *Temperature reconstruction over the past two millennia based on stalagmite $\delta^{18}O$ record from the Jura Swiss Mountains*. Thèse de master, Institut de géologie, université de Berne.
- Häuselmann, A. D., 2015 : *Late Quaternary and Holocene paleoclimate and paleoenvironmental reconstructions – a multi-proxy approach on Swiss speleothems*. Thèse de doctorat, Institut de géologie, université de Berne.
- Schmassmann, S., 2010 : *Speleothem-based climate and environmental reconstruction: A pilot study in the Swiss Jura Mountains*. Thèse de master, Institut de géologie, université de Berne.

NOTE

- ¹ Sinergia project Stalclim: *Multi-proxy climatic and environmental reconstructions from stalagmites from Switzerland, Turkey, Arabia, and India*. Projet conjointement mené par les universités de Zurich, Berne, l'E.T.H.Z. et l'EMPA.

L'histoire du projet Mont Terri

MARC THURY

Le projet Mont Terri est un projet international de recherche dans un laboratoire souterrain construit à partir de la galerie de sécurité du tunnel autoroutier du Mont Terri. Des galeries et niches, d'une longueur totale d'environ 800 m, ont été excavées par étapes depuis 1996 pour accueillir des expériences scientifiques et techniques. 93 expériences sont achevées et 45 sont en cours. Le projet Mont Terri est un projet non conventionnel, il est organisé d'une manière totalement démocratique et transparente. À ce jour, 16 organisations de 8 pays y participent. Le projet est présenté sur www.mont-terri.ch.

Introduction

Par une cérémonie solennelle, le projet Mont Terri a fêté le 19 mai 2016 son 20^e anniversaire. Plus de cent invités de marque ont écouté les allocutions de Guy Parmelin, conseiller fédéral, David Eray, ministre de l'Environnement du canton du Jura, Markus Kägi, conseiller d'État du canton de Zurich, Corina Eichenberger, conseillère nationale, Hans Wanner, directeur IFSN et, en tant qu'hôte, Fridolin Wicki, directeur de l'Office fédéral de topographie (Swisstopo). Ensuite Marc Thury, en tant que fondateur du projet Mont Terri, en a rappelé l'histoire; le texte de son discours est présenté ci-dessous.

L'histoire du projet

Un programme international de recherche est en cours au laboratoire souterrain du Mont Terri depuis 1996. À ce jour, 16 organisations de 8 pays participent à ce projet en tant que partenaires: de Suisse, NAGRA, Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs, IFSN/ENSI, Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (autrefois DSN) et Swisstopo, Office fédéral de topographie (autrefois SHGN, puis OFEG); de France, ANDRA, Agence nationale pour la gestion des

déchets radioactifs et IRSN, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (autrefois IPSN); de Belgique, SCK•CEN, Studiecentrum voor Kernenergie/Centre d'étude de l'énergie nucléaire et AFCN, Agence fédérale de Contrôle nucléaire; d'Espagne, ENRESA, Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S.A.; d'Allemagne, BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe et GRS, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit; du Japon, JAEA, Japan Atomic Energy Agency (autrefois PNC, puis JNC), CRIEPI, Central Research Institut of Electric Power Industry et OBAYASHI, Obayashi Corporation; des États-Unis, CHEVRON, Chevron's ETC Drilling and Completions Technology Department et US DOE, US Department of Energy, Office of Nuclear Energy; enfin, du Canada, NWMO, Nuclear Waste Management Organization.

Le projet Mont Terri est un projet non conventionnel et possède une structure d'organisation particulière. Les projets comparables sont tous gérés par une organisation qui a fondé, développé et financé son laboratoire souterrain compte tenu de ses besoins. Le projet Mont Terri par contre n'a pas été fondé par une organisation, mais il a pu être mis sur pied grâce à l'intense engagement personnel de quelques géologues et d'une personnalité politique. Il est organisé d'une manière totalement démocratique, tous les partenaires ont les mêmes droits et obligations et la construction du laboratoire a été financée conjointement par tous les partenaires associés.

L'histoire du projet débute en 1986, lorsque Charles Emmenegger (fondateur et directeur du SHGN, Service hydrologique et géologique national intégré dans l'Administration fédérale) et Marc Thury (géologue en chef de la NAGRA), qui entretenaient déjà d'excellents contacts depuis 1972, décident d'assurer un échange d'informations régulier concernant les programmes géologiques du SHGN et de la NAGRA. Sur proposition de Jean-Pierre Tripet (chef de la section Hydrogéologie du SHGN), en 1988, la promotion de l'étude des conditions hydrogéologiques des formations argileuses est ajoutée au programme de travail du SHGN. En décembre 1988, Tripet propose de réaliser des recherches géologiques et hydrogéologiques complémentaires dans la galerie de reconnaissance du Mont Terri, alors en cours d'excavation; ces analyses devaient porter sur une formation argileuse, les argiles à Opalinus. Il organise alors le projet, avec le précieux soutien de André Voutat, chef des PCH (Service des ponts et chaussées, JU), Alain Waldmeyer, responsable des ouvrages souterrains aux PCH et Jean-Claude Bouvier, chef de l'OEPN (Office des eaux et de la protection de la nature, JU).

Le projet sera réalisé conjointement par le SHGN et la NAGRA. Les résultats sont très encourageants et Thury décide de tenter de mettre sur pied un projet de recherche au Mont Terri.

Comme la NAGRA exploite au Grimsel, dans des roches cristallines, un laboratoire souterrain qu'elle a elle-même fondé, elle ne souhaite pas mettre sur pied un second laboratoire au Mont Terri. Thury est cependant convaincu que les formations argileuses pourraient représenter une roche d'accueil optimale pour l'entreposage définitif dans de nombreux pays; il se met donc à la recherche, à l'étranger, d'organisations qui pourraient être intéressées à un projet de recherche au Mont Terri. En 1990, il propose auprès de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'OCDE, Organisation de coopération et de développement économiques, la fondation d'un groupe de travail international pour l'étude des formations argileuses. Il est nommé président de ce nouveau groupe et lui attribue le nom de *Clay Club*. Ce groupe joue dès lors le rôle de forum pour « l'idée du Mont Terri ».

Au printemps 1994, six organisations membres du *Clay Club* annoncent leur intérêt pour un projet de recherche commun au Mont Terri. Thury établit alors une proposition de projet et Emmenegger soumet aux autorités du canton du Jura une requête pour sa réalisation. Au début de 1995, le ministre jurassien Pierre Kohler accorde au SHGN, en tant qu'organisation représentant la Confédération suisse, l'autorisation de réaliser ce projet. En été de la même année, l'ANDRA, la NAGRA, le PNC, le SCK•CEN et le SHGN décident la réalisation conjointe du projet proposé.

Thury rédige alors, sur la base de son expérience acquise dans le cadre de la fondation et de la gestion du laboratoire souterrain du Grimsel, et en tenant compte de sa vision personnelle, un projet de contrat de collaboration entre les organisations participantes (*Cooperation Agreement*); après la mise au point de ce texte, celui-ci sera signé par tous les partenaires au printemps 1996. Le projet du Mont Terri est placé sous l'égide du SHGN, qui reçoit chaque année du gouvernement du canton du Jura l'autorisation pour le programme de recherche prévu et, le cas échéant, pour la construction de nouvelles galeries. Le projet est organisé d'une manière totalement démocratique. En outre, une totale transparence est garantie, tous les partenaires ont accès à l'ensemble des résultats, et les rapports sont déposés auprès des Archives géologiques suisses du SHGN (aujourd'hui, Centre d'informations géologiques de Swisstopo).

Le projet de recherche comprend un certain nombre d'expériences spécifiques, auxquelles les partenaires ont la possibilité de participer selon leur intérêt. Pour chaque expérience, un programme accompagné d'un budget est établi chaque année. Le programme annuel est déterminé par un comité directeur (*Steering Committee*) constitué par un délégué de chaque partenaire. Ceux-ci élisent un président, qui dirige le projet, préside le comité directeur et établit des contacts de qualité avec les autorités, la population, la presse, les chercheurs, les commissions spécialisées et les organes directeurs des partenaires. Thury est le premier président élu. L'organisation du projet incombe à un chef de projet — Paul Bossart du GI (Institut Géotechnique SA), qui organise avec une équipe de collaborateurs le fonctionnement du laboratoire, la réalisation des expériences, la construction de nouvelles galeries, la documentation, les archives et les aspects financiers. Un mandat annuel est attribué par le projet au GI pour ces prestations.

Au cours de l'hiver 1995-1996, huit niches sont excavées dans la galerie de reconnaissance du Mont Terri (fig. 1), et les expériences commencent dans ces niches. Les travaux débutent de manière encourageante et tous les participants sont satisfaits de l'organisation. Un nouveau partenaire, l'ENRESA, se joint au projet. En automne 1996, d'autres expériences importantes sont projetées, ainsi que la construction d'un véritable laboratoire souterrain comprenant une galerie principale et des niches latérales. Au printemps 1997, le projet a la possibilité de louer

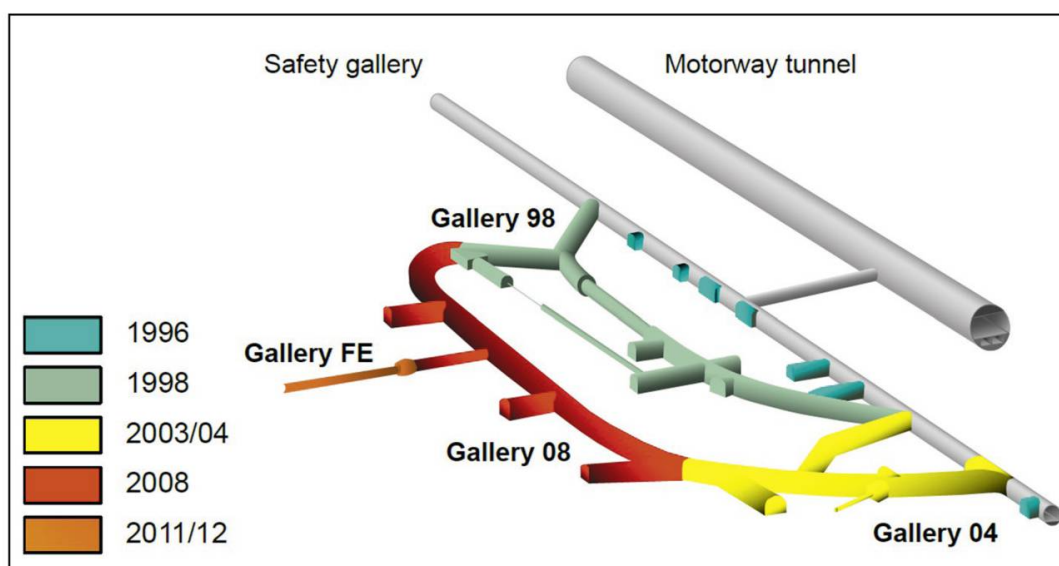


Fig. 1 : Vue du laboratoire souterrain du Mont Terri avec les différentes phases de construction. (tiré de www.mont-terri.ch.)

les bâtiments de l'ancienne fabrique de chaux, grâce au précieux soutien du ministre Pierre Kohler ; ceci permet de disposer de locaux pour des bureaux, ateliers et entrepôts ainsi que d'une agréable salle de réunion, à un emplacement idéal. La construction du laboratoire souterrain et la suite du programme de recherche sont approuvées par les autorités en été 1997 et les travaux d'excavation débutent en automne. À fin 1997, Thury entre au SHGN et dirige le projet en tant que délégué de ce service de la Confédération. Le laboratoire souterrain peut être inauguré solennellement en septembre 1998, en présence de plus de cent invités de marque ; le discours d'inauguration est tenu par le ministre Pierre Kohler.

En 2000, Thury se retire de sa fonction de président et les partenaires élisent Markus Hugi de la NAGRA pour lui succéder. Les autorités du canton du Jura souhaitent cependant que dorénavant, le projet soit géré par un directeur nommé par la Confédération ; le contrat de collaboration est donc ajusté et l'OFEG (Office fédéral des eaux et de la géologie, nouvelle structure de l'ancien SHGN) nomme Peter Heitzmann, chef de la division Géologie, comme nouveau directeur du projet Mont Terri.



Fig. 2: Pour leur contribution méritoire à la réussite du projet, Paul Bossart (à gauche) remet en 2012 le premier *Mont Terri Award* (Prix Mont Terri) à (de droite à gauche) Marc Thury, Charles Emmenegger, Jean-Pierre Tripet, Pierre Kohler et Laurent Schaffter. (Photo *Quotidien Jurassien*.)

En outre, le canton institue une commission de suivi pour le projet, présidée par Marcos Buser puis dès 2012, par Pascal Mertenat.

En été 2002, lors d'une séance stratégique avec les partenaires suisses et les autorités portant sur l'avenir du projet Mont Terri, Thury propose l'élaboration d'un nouveau programme de recherche et la construction d'une nouvelle galerie. Fin 2002, Heitzmann remet la direction du projet à Thury, qui s'est déclaré prêt à reprendre cette fonction pour environ trois ans. Un nouveau programme de recherche et la construction d'une nouvelle galerie sont élaborés. La DSN/HSK (aujourd'hui IFSN/ENSI) rejoint le projet comme douzième partenaire. En été 2003 le programme reçoit l'autorisation du canton. L'excavation de la galerie débute en automne de la même année. En 2005, Thury remet la direction à Bossart et le remercie de son excellent travail en tant que chef de projet depuis 1995. Christophe Nussbaum est alors nommé chef de projet. Toujours en 2005, les collaborateurs du projet Mont Terri, jusqu'ici employés par le GI, sont transférés à l'Office fédéral de topographie, Swisstopo, dans lequel le Service géologique national a été intégré.

En 2010, un centre de visiteurs est construit par les partenaires suisses du projet (NAGRA, IFSN et Swisstopo), avec le précieux soutien du



Fig. 3: Guy Parmelin, conseiller fédéral, et Marc Thury, fondateur du projet Mont Terri, rencontre entre deux Vaudois à l'occasion de l'apéro après la cérémonie du 20^e anniversaire du projet Mont Terri le 19 mai 2016. (Photo AMOI SÀRL, Delémont.)

ministre Laurent Schaffter; ce centre est inauguré en 2011 en présence du Conseiller fédéral Ueli Maurer. De très nombreux groupes visitent désormais le laboratoire souterrain du Mont Terri; en 2015, plus de 5000 visiteurs ont été accueillis. En 2012, le projet remet le premier *Mont Terri Award* (Prix Mont Terri) au ministre Pierre Kohler, au ministre Laurent Schaffter, à Charles Emmenegger, à Jean-Pierre Tripet, à Marc Thury et à Peter Blümling de la NAGRA (fig. 2).

Nous pouvons constater avec une grande satisfaction que le projet Mont Terri se poursuit avec succès depuis déjà vingt ans et qu'il a gagné un remarquable rayonnement sur le plan national et international — que l'avenir du projet soit empreint de réussite (fig. 3)!

Remerciements

L'auteur remercie Paul Bossart, Jean-Pierre Tripet (Bevaix), André Lambert (Baden) et Erik Frank (Ennetbaden) pour leurs précieux commentaires et suggestions ainsi que Jean-Pierre Tripet pour la traduction du manuscrit en français.

Marc Thury (Rebbergstrasse 79, CH-5408 Ennetbaden, marc.thury@bluewin.ch) est géologue, retraité. Il a été géologue en chef de la Nagra. Il a fondé et présidé le Clay Club, un groupe de travail international pour l'étude des formations argileuses de l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE. Il est le fondateur du projet Mont Terri, dont il a été le président puis le directeur jusqu'en 2005.

Les grands mammifères du Miocène supérieur de Charmoille (Jura, Suisse)

KEVIN CHOFFAT | DAMIEN BECKER

Les sables miocènes de Charmoille en Ajoie, longtemps exploités le siècle passé pour la fabrication de tuiles, ont livré de nombreux restes, majoritairement dentaires, de fossiles de mammifères. L'étude des collections du Jurassica Museum, a permis d'identifier au niveau spécifique quatre taxons différents de grands mammifères appartenant à l'ordre des périssodactyles (*Aceratherium incisivum*, *Lartetotherium sansaniense*, *Hippotherium primigenium*, *Chalicotherium goldfussi*). Quelques restes fragmentaires supplémentaires de ruminants et d'un proboscidiien viennent compléter la liste faunique. L'assemblage identifié évoque une faune typique du Miocène supérieur, rapportée grâce à l'association *Hippotherium primigenium* et *Aceratherium incisivum*, à la biozone européenne à mammifères MN9. Cette période, qui s'inscrit dans le contexte miocène de développement de faunes modernes en Europe, correspond à un important événement biogéographique nommé *Hipparion Datum Event*.

Introduction

La sablière miocène de Charmoille, connue dès le début du xx^e siècle, peut être considérée comme l'une des plus importantes localités à grands mammifères fossiles de Suisse. C'est au début du siècle passé que le géologue Karl Hummel (1914) signala pour la première fois la présence de restes de grands mammifères fossiles à Charmoille. Il reçut quelques spécimens du propriétaire de l'époque, alors que la sablière était en pleine exploitation pour fournir la matière première à la tuilerie associée. Stehlin (1914) propose une première liste faunique des espèces présentes, citant notamment pour la première fois en Suisse l'enregistrement de restes

du fameux «petit cheval tridactyle nord-américain», *Hippotherium primigenium* (= *Hipparion gracile*). Principalement durant la première moitié du xx^e siècle, le Musée d'histoire naturelle de Bâle organisa maintes visites de la sablière en exploitation et la localité de Charmoille vit alors passer plusieurs paléontologues de l'école bâloise comme Hans Georg Stehlin ou encore Johannes Hürzeler. Koby (1955) puis Schäfer (1961) publient une liste faunique plus complète, composée d'*Hippotherium primigenium* associé à des restes de Rhinocerotidae que Becker (2003) attribue aux espèces *Aceratherium incisivum*, *Lartetotherium sansaniense* et *Dihoplus schleiermacheri*. D'autres taxons de Perissodactyla (*Tapirus priscus*, *Chalicotherium goldfussi*) et d'Artiodactyla (*Miotragocerus pannoniae*, *Dorcatherium nauai*, *Euprox dicranoceros*, *Korynochoerus palaeochoerus*, *Conohyus simorreensis*), de Proboscidea (*Deinotherium giganteum*, *Tetralophodon longirostris*), de Carnivora (*Machairodus aphanistus*, *Agnotherium* cf. *antiquum*) et de Rodentia (*Trogotherium minutum*) complètent la liste. Cet assemblage, caractéristique de la base du Miocène inférieur européen, est comparable aux assemblages d'autres localités très connues d'Europe occidentale, comme Höwenegg (p. ex. Guérin 1980, Bernor *et al.* 1997).

Aujourd'hui, l'essentiel du matériel de Charmoille est déposé au Musée d'histoire naturelle de Bâle. Cependant, d'autres muséums suisses comptent dans leurs collections quelques spécimens issus de la localité de Charmoille (Jurassica Museum de Porrentruy, Musée d'histoire naturelle de Berne, Musée d'histoire naturelle de Genève, Musée d'histoire naturelle de Neuchâtel, Musée d'histoire naturelle de Soleure). Le but de cette étude est de décrire la collection inédite de spécimens de mammifères de Charmoille déposée au Jurassica Museum et de discuter des implications biostratigraphiques et paléobiogéographiques des taxons identifiés, en particulier des restes rapportés aux périssodactyles.

Cadre géographique et géologique

Le site de Charmoille est une ancienne sablière située au nord du village éponyme, en Ajoie, dans le canton du Jura, au nord-ouest de la Suisse (fig. 1). L'Ajoie est une région naturelle ouverte sur la France, son relief tabulaire marque la transition entre le Jura plissé au sud et les plaines au nord (Braillard 2006).

Les premières descriptions géologiques des dépôts miocènes sur territoire jurassien sont de Greppin (1855) qui décrit des dépôts d'origine vosgienne à restes de dinothères et de rhinocéros. Par la suite, la lithostratigraphie de ces dépôts a été abondamment étudiée (p. ex. Rollier 1898, Hummel 1914, Liniger 1925, 1964, Diebold *et al.* 1963, Laubscher 1963), amenant une utilisation abusive de nombreux termes lithostratigraphiques tels que *Dinotheriumsande des Mont Chaibeux*, *Vogesensande des Bois de Raube*, *Vogesen-Schotter und -Sande von Charmoille* ou encore *Hipparion-Sande von Charmoille*. C'est finalement Kälin (1993, 1997) qui propose une révision moderne de la lithostratigraphie des dépôts miocènes d'origine vosgienne de la région et nomme *Vogesenschüttung* l'éventail fluviatile alimentant une grande partie du synclinal de Delémont ainsi que plus tardivement l'Ajoie. Il crée la Formation du Bois de Raube, constituée en majorité de marnes, de sables et de galets provenant des Vosges, qu'il divise en trois membres (membres du Montchaibeux, du Bois de Raube et d'Ajoie). Les dépôts de la sablière de Charmoille appartiennent au membre supérieur (membre d'Ajoie).

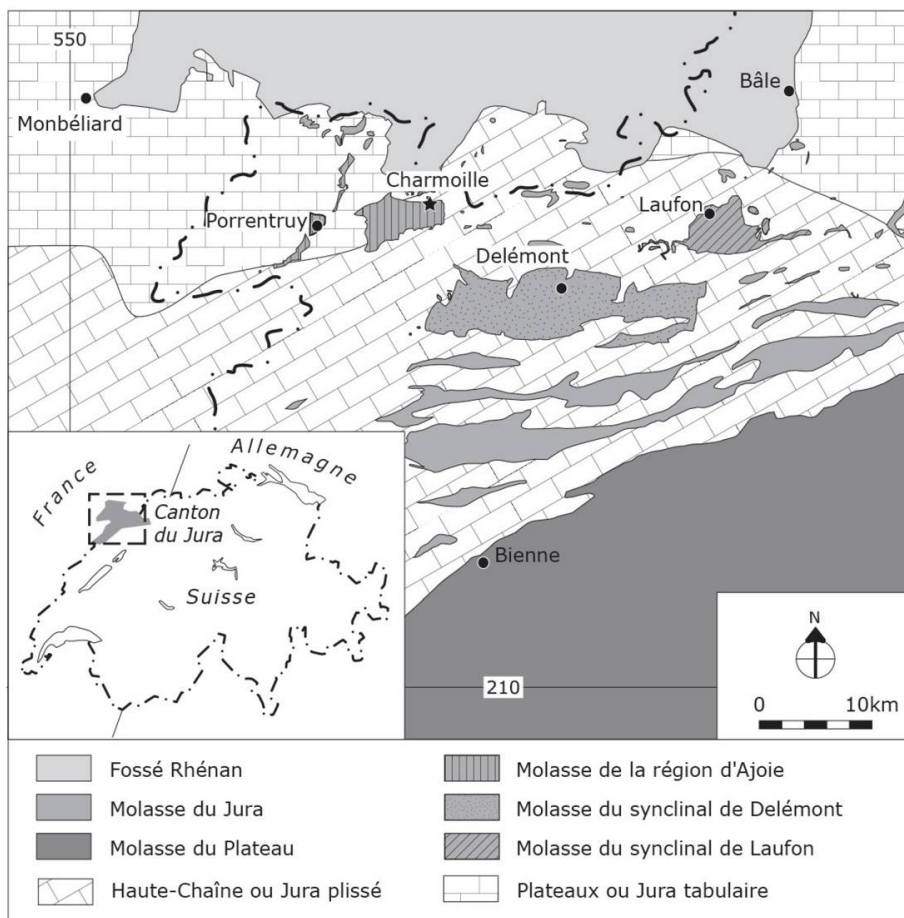


Fig. 1 : Situation géographique et géologique de la localité de Charmoille (Ajoie, Jura, Suisse). Modifiée d'après Becker (2009).

Matériel et méthode

Matériel

Le matériel référé à cette étude concerne exclusivement les spécimens de mammifères rapportés à la localité de Charmoille conservés dans les collections du Jurassica Museum à Porrentruy (anciennement Musée jurassien des sciences naturelles, ce qui explique l'acronyme MJSN-CH des numéros d'inventaire). Il s'agit de cinquante-sept spécimens dont quarante-huit restes dentaires.

Méthode

La terminologie dentaire utilisée pour les Rhinocerotidae et les Chalicotheriidae est celle illustrée par Antoine (2002) et Hooker (1989), respectivement. Les dimensions des dents ont été prises selon la méthodologie biométrique utilisée par Guérin (1980). L'ensemble du matériel dentaire et postcrânien rapporté à *Hippotherium primigenium* suit la nomenclature d'Evander (2004) et Bernor *et al.* (1997), respectivement, et le protocole de mesures d'Eisenmann *et al.* (1988). Les spécimens attribués aux autres groupes de mammifères ont été décrits selon la nomenclature de Dong *et al.* (2003) et Barone (1999) pour le groupe des ruminants et d'après Huttunen & Göhlich (2002) pour les proboscidiens. Les mesures reportées dans les tableaux des dimensions ou dans le texte sont notées en millimètres (précision à 0,5 mm).

Le cadre biostratigraphique est basé sur les corrélations chronologiques des zones européennes à mammifères (MN-Zones; Mein 1999, Steininger 1999), les faunes de référence suisses (Berger 2011) et l'échelle des temps géologiques du Néogène (Lourens *et al.* 2004).

Abréviations

DAP diamètre antéro-postérieur, **DT** diamètre transversal, **L** longueur, **l** largeur, **H** hauteur; **I/i** incisive supérieure/inférieure, **D/d** molaire déciduale supérieure/inférieure, **P/p** prémolaire supérieure/inférieure, **M/m** molaire supérieure/inférieure, **mand.** mandibule, **Mt** métatarse; **MN** Mammalian Neogene Zone; **MJSN** Jurassica Museum, **CH** Charmoille.

Systématique

Classe MAMMALIA Linnaeus, 1758

Ordre PERISSODACTYLA Owen, 1848

Famille Rhinocerotidae Gray, 1820

Genre *Aceratherium* Kaup, 1832

***Aceratherium incisivum* Kaup, 1832**

(Fig. 2a et 3a-f; tabl. 1)

Matériel référencé

Fragment i2 gauche (MJSN-CH_1), fragment D3/4 droite (MJSN-CH_2), P2 droite (MJSN-CH_3), fragment P3 droite (MJSN-CH_4), fragment P3 droite (MJSN-CH_56), M1/2 gauche (MJSN-CH_5), fragment M3 droite (MJSN-CH_6), M3 gauche (MJSN-CH_7), fragment corpus mandibulaire gauche portant m1-2 (MJSN-CH_8), p2 gauche (MJSN-CH_9), p3 gauche (MJSN-CH_10), fragment p3 gauche (MJSN-CH_57), p4 droite (MJSN-CH_11), fragment p4 droite (MJSN-CH_12), m1 droite (MJSN-CH_13), m2 droite (MJSN-CH_14), m2 gauche (MJSN-CH_15).

Description

Denture antérieure

L'unique reste rapporté à la denture antérieure est un fragment d'une incisive inférieure gauche. Le spécimen, en forme de défense, présente une section clairement triangulaire et un émail sans replis ni bourrelets.

Jugales

Les dents jugales référencées ne présentent aucun replis d'émail ni ciment et ont des hauteurs de couronne plutôt basses. L'émail est ridulé sur toute la surface. Les racines, observables, notamment sur le spécimen MJSN-CH_15, sont reliées antérieurement et postérieurement.

Jugales supérieures

Le reste de molaire lactéale MJSN-CH_2 présente une morphologie proche d'une molaire d'adulte. L'émail est très fin, le pli du paracône puissant, le mésostyle légèrement marqué, le crochet simple et le cingulum labial réduit.

Numéro d'inventaire	Anatomie	L	l	H
MJSN-CH_2	Fragment D3/4 droite	-	44,0	31,5
MJSN-CH_3	P2 droite	38,0	44,0	28,5
MJSN-CH_4	fragment P3 droite	-	-	24,5
MJSN-CH_56	fragment P3 droite	34,5	-	31,5
MJSN-CH_56	M1/2 gauche	43,5	50,5	26,5
MJSN-CH_6	Fragment M3 droite	40,5	-	19,5
MJSN-CH_7	M3 gauche	41,5	47,0	35,0
MJSN-CH_8	m1 gauche	41,5	27,0	35,5
	m2 gauche	42,0	28,0	36,0
MJSN-CH_9	p2 gauche	30,0	21,0	26,0
MJSN-CH_10	p3 gauche	35,0	25,5	33,5
MJSN-CH_57	Fragment p3 gauche	35,0	-	27,0
MJSN-CH_11	p4 droite	37,5	28,5	27,0
MJSN-CH_12	Fragment p4 droite	34,5	-	14,5
MJSN-CH_13	m1 droite	46,5	29,5	34,0
MJSN-CH_14	m2 droite	44,5	28,5	25,5
MJSN-CH_15	m2 gauche	41,0	26,5	15,0

Tableau 1: Dimensions [mm] des restes dentaires d'*Aceratherium incisivum* de Charmoille (Miocène supérieur, Jura, Suisse).

Les prémolaires supérieures sont dépourvues d'antécrochet. Elles sont caractérisées par un crochet toujours simple, un métalophe dirigé vers l'arrière et l'intérieur, une postfossette étroite et une séparation entre le protocône et l'hypocône (molariforme *sensu* Heissig 1969). La P2 porte un cingulum labial peu puissant et discontinu, un cingulum lingual fort et continu, une crista et une médifossette, un protocône aussi puissant que l'hypocône et un protolophe labialement aminci, mais en jonction avec l'ectolophe. Sur la P3, la crista est absente, les cingulums lingual et labial sont réduits, le protolophe est en jonction avec l'ectolophe et la constriction du protocône est plutôt absente.

Les molaires supérieures sont caractérisées par l'absence fréquente du cingulum labial, de l'antécrochet et de la crista. Aucune médifossette n'est observée sur le matériel référencé. Le crochet est toujours présent, fort et simple. Le cingulum lingual est fortement réduit, l'étranglement du protocône nettement marqué, le pli du métacône absent et le métastyle

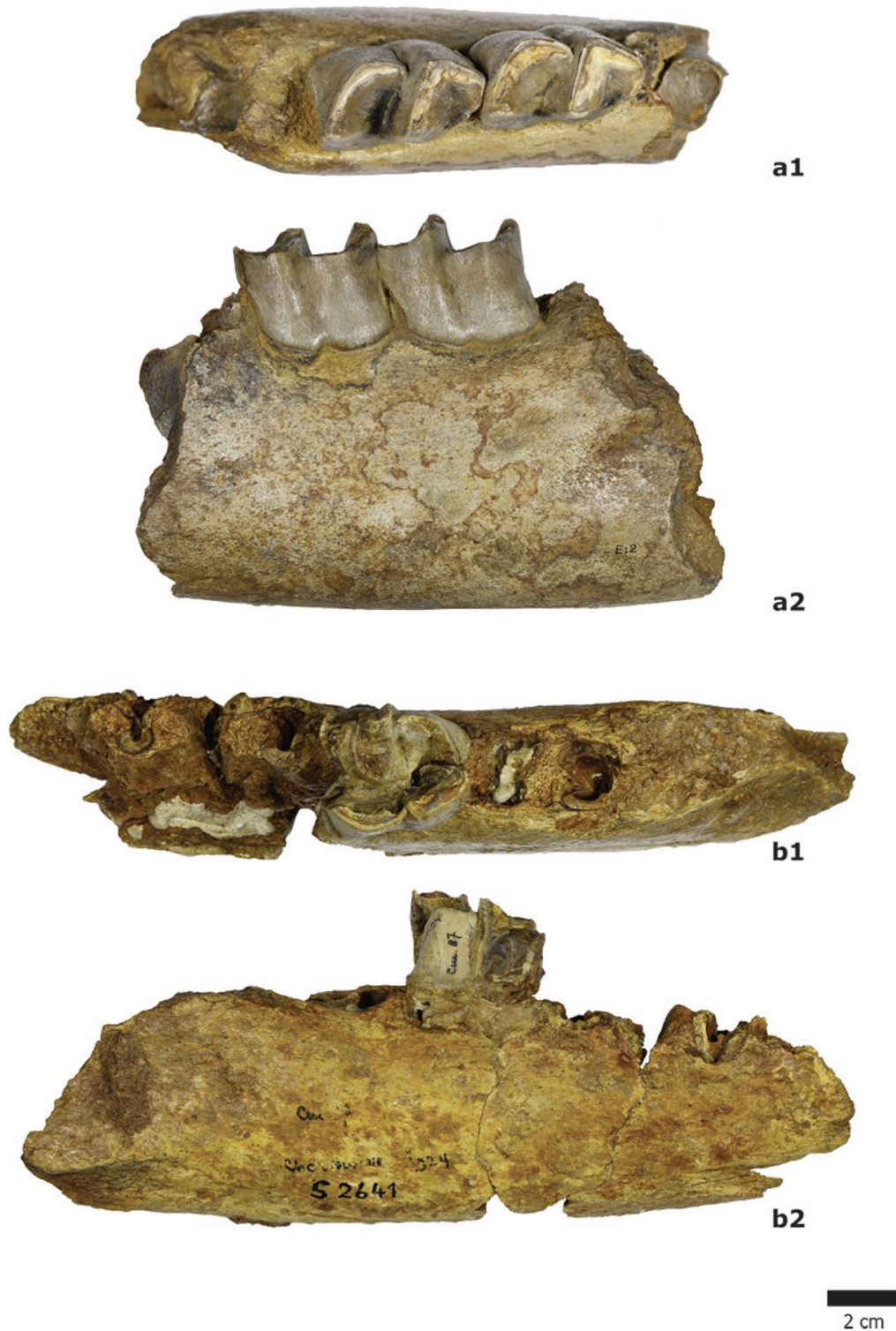


Fig. 2: Rhinocerotidae de Charmoille (Miocène supérieur, Jura, Suisse). a, *Aceratherium incisivum*, fragment corpus mandibulaire gauche portant m1-2 (MJSN-CH_8), en vue occlusale (1) et labiale (2). b, *Lartetotherium sansaniense*, corpus mandibulaire droit portant p3/4 (MJSN-CH_18), en vue occlusale (1) et labiale (2). Barre d'échelle = 20 mm.

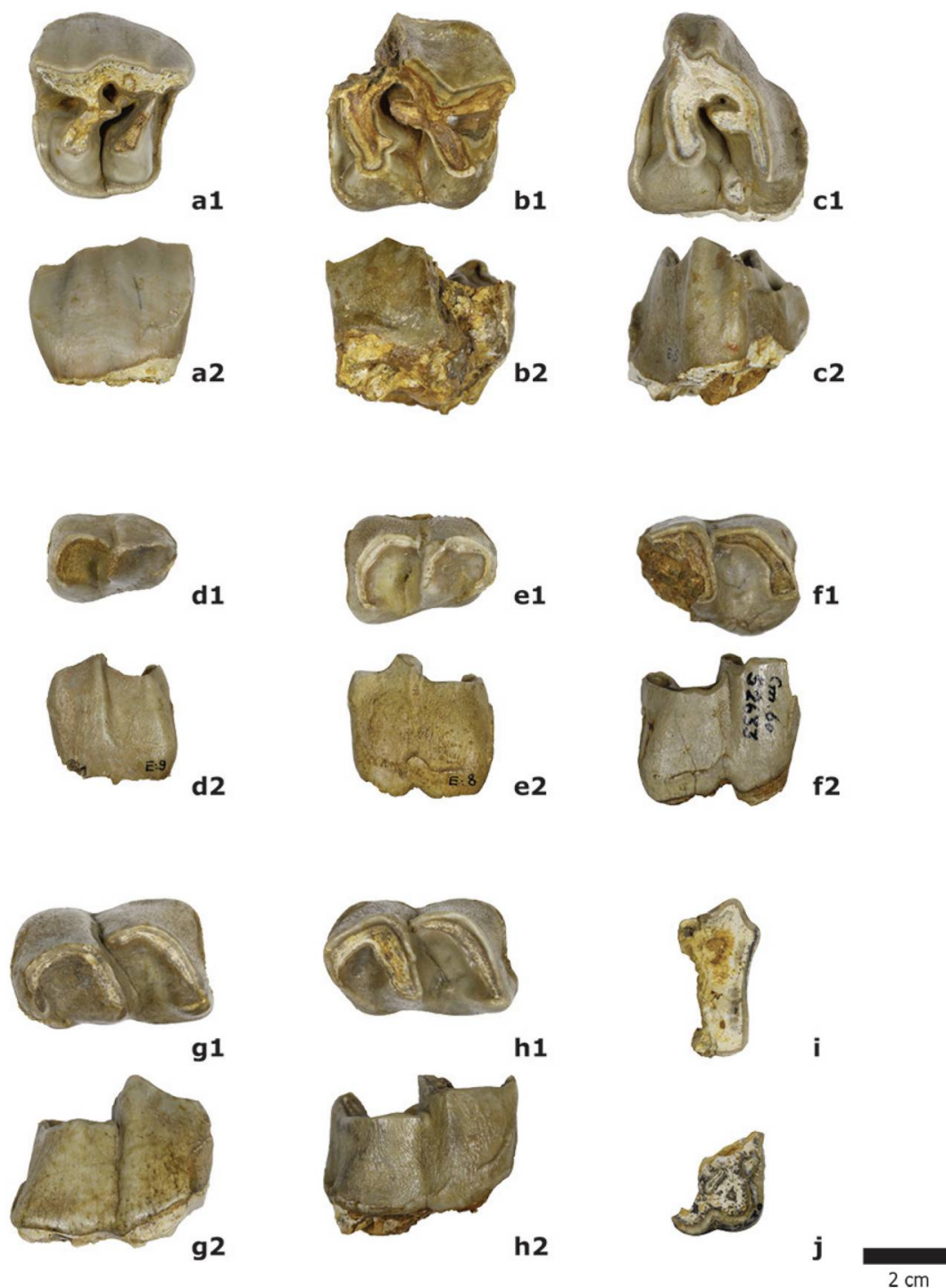


Fig. 3: Rhinocerotidae de Charmoille (Miocène supérieur, Jura, Suisse). *Aceratherium incisivum*, jugales en vue occlusale (1) et en vue labiale (2); a, P2 droite (MJSN-CH_3); b, M1/2 gauche (MJSN-CH_5); c, M3 gauche (MJSN-CH_7); d, p2 gauche (MJSN-CH_9); e, p3 gauche (MJSN-CH_10); f, p4 droite (MJSN-CH_11); g, m1 droite (MJSN-CH_13); h, m2 droite (MJSN-CH_14). *Lartetotherium sansaniense*, jugales supérieures en vue occlusale; i, fragment M1 gauche (MJSN-CH_17); j, fragment P2 gauche (MJSN-CH_16). Barre d'échelle = 20 mm.

allongé. Le profil de l'ectolophe est concave et le métalophe est continu et plutôt long. Le cingulum postérieur est continu, fermant une postfossette étroite et profonde. Sur la M3, l'ectolophe et le métalophe sont fusionnés en un ectométalophe ne présentant pas de sillon postérieur. La dent, de forme approximativement triangulaire, développe un fort mais court cingulum postérieur, une faible crista et un protocône étranglé en feuille de trèfle.

Jugales inférieures et mandibule

Le *corpus mandibulae* est bas (H arrière m2 = 91,0), à base rectiligne et sans sillon lingual. Les jugales inférieures sont caractérisées par un sillon ectolophide légèrement marqué et amorti au collet, un trigonide arrondi formant un dièdre droit, un métaconide lié au métalophide et un entoconide lié à l'hypolophide. Les p2-3 ne présentent pas de rugosités externes verticales. Le débouché lingual de la vallée postérieure des prémolaires est en forme de V, excepté sur la p4 MJSN-CH_11 où il est en forme de U. Le cingulum lingual est plutôt absent et réduit au débouché de la vallée antérieure. Le cingulum labial est présent et réduit, excepté sur la p2 MJSN-CH_9 où il est absent. Cette dernière porte une facette antérieure de contact indiquant la présence d'une d1, un paralophide isolé en éperon, un paraconide développé et une vallée postérieure ouverte lingualemment. Les cingulums lingual et labial des molaires inférieures sont plutôt absents et réduits. L'hypolophide est oblique et l'entoconide ne montre pas de sillon lingual.

Discussion

D'après les motifs dentaires et les dimensions rapportés par Guérin (1980), le matériel référé se rapporte sans équivoque à un rhinocéros de taille moyenne, excluant les grandes formes du Miocène supérieur européen *Dihoplus schleiermacheri* et *Brachypotherium brachypus* ainsi que le petit rhinocéros de Steinheim *Dicerorhinus steinheimensis*. Par ses prémolaires supérieures à protocône et hypocône séparés et ses jugales inférieures à trigonide en dièdre droit et hypolophide oblique ainsi que ses dimensions légèrement plus grandes, il se distingue également des spécimens attribués dans la littérature à l'espèce *Lartetotherium sansaniense* (Guérin 1980, Antoine *et al.* 2010, Heissig 2012). De même, *Alicornops simorreense* est de taille moindre et se différencie par des molaires supérieures à profil de l'ectolophe droit, un sillon ectolophide

des jugales inférieures bien marqué et un trigonide anguleux en dièdre aigu. Chez *Aceratherium tetradactylum*, les jugales sont plus primitives avec des cingulums plus marqués et des prémolaires supérieures montrant un protocône et un hypocône reliés par un pont lingual (semimolariforme *sensu* Heissig 1969). Par contre les dimensions associées au protocône étranglé des jugales supérieures, au crochet simple des prémolaires supérieures, au sillon ectolophide presque mousse des jugales inférieures et à la p2 au paralophide isolé en éperon, au protoconide développé et à une vallée postérieure ouverte lingualement permettent une attribution à l'espèce *Aceratherium incisivum*.

Genre *Lartetotherium* Ginsburg, 1974

***Lartetotherium sansaniense* (Lartet, 1851)**

(Fig. 2b et 3i-j)

Matériel référencé

Fragment P2 gauche (MJSN-CH_16), fragment M1 gauche (MJSN-CH_17), corpus mandibulaire droit portant p3/4 (MJSN-CH_18).

Description

Les spécimens MJSN-CH_16 et MJSN-CH_17 se rapportent à deux fragments linguaux gauches de P2 et M1 (L = 36,5 ; l = -), de tailles relativement modestes. Dépourvue de cingulum lingual, la P2 se caractérise par un pont lingual reliant le protocône à l'hypocône. La M1 est marquée par un pli du paracône plutôt puissant et un profil de l'ectolophe rectiligne dépourvu de pli du métacône. Une légère trace de cingulum lingual est présente au niveau du collet, sur la partie postérieure de la dent. Le *corpus mandibulae* est bas (H arrière p4 = 70,0), porte un sillon lingual et sa base est rectiligne. La p4 (L = 37,0 ; l = 30,5 ; H = 32,5) montre un sillon de l'ectolophide marqué, amorti au collet et un cingulum lingual réduit.

Discussion

Par leur dimensions et leur morphologie, les spécimens référés se différencient des genres *Dihoplus* et *Aceratherium* (Guérin 1980). Le bord lingual de la P2 dépourvu de cingulum et marqué par un pont reliant le

protocône à l'hypocône, ainsi que la dimension et le profil rectiligne de l'ectolophe de la M1 permettent une attribution à l'espèce *Lartetotherium sansaniense* (Antoine *et al.* 2003; Heissig 2012).

Famille Equidae Gray, 1821

Genre *Hippotherium* Kaup, 1832

***Hippotherium primigenium* von Meyer, 1829**

(Fig. 4 et 5a-e; tabl. 2)

Matériel référencé

i2 gauche (MJSN-CH_19), P2 gauche (MJSN-CH_20), P3 gauche (MJSN-CH_21), fragment P3 gauche (MJSN-CH_22), fragment P3 gauche (MJSN-CH_23), P4 droite (MJSN-CH_24), P4 droite (MJSN-CH_25), fragment M1/2 droite (MJSN-CH_26), M1 droite (MJSN-CH_27), M1 droite (MJSN-CH_28), M1/2 gauche (MJSN-CH_29), M1/2 gauche (MJSN-CH_30), fragment M2 droite (MJSN-CH_31), M3 gauche (MJSN-CH_32, MJSN-CH_33), M3 droite (MJSN-CH_34), fragment M3 gauche (MJSN-CH_35), p2 gauche (MJSN-CH_36), fragment p3 gauche (MJSN-CH_37), p4 gauche (MJSN-CH_38), m1 droite (MJSN-CH_39), m2 droite (MJSN-CH_40), m2 gauche (MJSN-CH_41), m3 droite (MJSN-CH_42), m3 gauche (MJSN-CH_43), fragments m (MJSN-CH_44, MJSN-CH_45), fragment Mt III droit distal (MJSN-CH_46), astragale gauche (MJSN-CH_47).

Description

Denture antérieure

Le spécimen MJSN-CH_19 (DAP = 10,5 ; DT = 19,5 ; H = 29,0) est le seul référencé à la denture antérieure. Sa position dans la rangée dentaire peut être déterminée comme étant une i2 gauche, de par sa face mésiale rectiligne, sa face distale pincée et la présence d'un sillon lingual continu sur toute la hauteur de la couronne. Le spécimen montre une couronne recourbée, de forme triangulaire au niveau du collet et ovoïde au niveau de la surface occlusale. La surface de l'émail n'est pas cannelée, le cornet dentaire est légèrement décentré linguo-labialement et la surface occlusale est perpendiculaire à la couronne.

Jugales supérieures

Les jugales supérieures présentent une face labiale avec un parastyle, un mésostyle et un métastyle fortement développés et toujours simples. L'émail est recouvert de ciment, parfois en quantité abondante. Les fossettes sont séparées et leur ornementation est complexe avec toute une série de plis. Le mur postérieur de la postfossette est toujours bien distinct. Le pli caballin est le plus souvent double, toutefois pour certains spécimens, il devient plus complexe selon l'usure générale de la dent. L'hypocône est partiellement isolé par un sillon hypoconal profondément incisé. Le protocône a une forme ovale, allongée, aplatie du côté lingual et arrondie du côté labial. Longitudinalement centré, il a une position plus linguale que l'hypocône et n'est pas relié au protolophe. Aucun éperon du protocône n'est visible. Les P2-4 sont relativement massives, leur contour en vue occlusale varie de plutôt triangulaire avec un parastyle bien développé pour les P2 à rectangulaire pour les P3-4. Les M1-3 ont une forme plus carrée que les P2-4 et sont également plus petites. Les préfossettes et postfossettes, comme pour les prémolaires, sont séparées. La M3 est reconnaissable grâce à la courbure de sa couronne, ainsi que l'allongement de sa surface occlusale.

Jugales inférieures

Comparativement aux jugales supérieures, les jugales inférieures peuvent également porter de grandes quantités de ciment sur leur émail, mais ont un contour en vue occlusale plus allongé et étroit. Leur double boucle est caractéristique, formée par un sillon lingual peu profond et un métaconide et un métastylide arrondis et jointifs. L'ectoflexide est profond et amorti au collet. Il est particulièrement prononcé sur la m2 MJSN-CH_41, séparant le métaconide du métastylide. Le pli caballinide est présent, alors que le pli anté-caballinide tout comme l'ectostylide sont absents. Seules la p4 MJSN-CH_38 et les m3 MJSN-CH_42 et MJSN-CH_43 montrent un métastylide portant un éperon linguo-distal et un sillon lingual légèrement plus incisé.

La seule p2 MJSN-CH_36 présente dans les échantillons a une forme triangulaire, due à l'amincissement de son côté distal et à la présence d'un paraconide bien développé. Le protostylide est visible mais pas isolé. Les p3-4, dépourvus de paraconide, ont une forme plus rectangulaire que la p2. Le protostylide est bien développé et isolé, il apparaît clairement sur la face occlusale de la p4 MJSN-CH_38.

Les m1-2, moins larges que les prémolaires, ont aussi une forme rectangulaire. En vue labiale, la couronne est légèrement incurvée vers l'arrière. Le protostylide apparaît comme étant un pli de l'émail, il est toutefois presque isolé sur la m1 MJSN-CH_39. La m3 est très allongée et plus étroite que les m1/2. Le côté distal se termine par un hypoconulide fortement étranglé. La couronne est légèrement recourbée distalement. Le protostylide est isolé, n'atteignant toutefois pas la surface occlusale. L'ectoflexide est particulièrement étroit et profond, sans pour autant séparer le métaconide du métastylide, et le pli caballinide est très peu développé.

Astragale

L'astragale MJSN-CH_47 (DAP \approx 37,0 ; DT = 48,8 ; H = 52,5) est constitué d'une poulie articulaire légèrement asymétrique et relativement large. En vue antérieure, les deux lèvres médiales et latérales sont très obliques et le bord distal de la facette articulaire pour le naviculaire est horizontal et rectiligne. En vue médiale, la cavité ovoïde est profonde.

Métatarse III

Le fragment distal du MT III MJSN-CH_46 présente les dimensions suivantes : DAP diaphyse = 25,5 ; DT diaphyse = 34,0 ; DAP articulaire distal = 30,0 ; DT articulaire distal = 40,5. En vue antérieure, la *fossa supertrochlearis metatarsi* est plus large que haute et bien déprimée, le relief intermédiaire est haut et tranchant.

Discussion

Les restes dentaires étudiés présentent les caractères diagnostiques d'*Hippotherium primigenium* décrit par Bernor *et al.* (1993, 1997). On retrouve notamment un parastyle allongé pour la P2 et, plus généralement pour les jugales supérieures, un pli caballin double, parfois plus complexe, une incision nette du sillon hypoconal, ainsi qu'un protocône isolé, arrondi du côté labial et aplati du côté lingual. Pour les jugales inférieures, les caractères principaux sont la présence d'un protostylide, la forme généralement arrondie du métaconide et du métastylide et un sillon lingual peu profond pour les prémolaires, à tendance plus incisée pour les m3.

En se basant sur les données biométriques, les restes dentaires référés sont tout à fait similaires aux spécimens d'*Hippotherium primigenium* de

Numéro d'inventaire	Anatomie	L1	L2	I1	I2	I3	H	L proto	L db	L pré	L post
MJSN-CH_20	P2 gauche	33,0	32,0	25,5			22,5	8,5			
MJSN-CH_21	P3 gauche	27,5	25,5	24,5			27,0	8,5			
MJSN-CH_22	fragment P3 gauche	-	-	-			37,0	8,5			
MJSN-CH_23	fragment P3 gauche	-	-	21,0			-	6,0			
MJSN-CH_24	P4 droite	29,0	27,0	26,5			37,0	9,0			
MJSN-CH_25	P4 droite	27,0	29,0	21,5			-	9,5			
MJSN-CH_26	fragment M1/2 droite	24,5	26,0	20,0			26,5	-			
MJSN-CH_27	M1 droite	24,0	23,0	24,0			30,5	8,0			
MJSN-CH_28	M1 droite	22,5	22,0	26,0			16,5	8,5			
MJSN-CH_29	M1/2 gauche	28,0	25,0	24,0			40,0	9,0			
MJSN-CH_30	M1/2 gauche	27,5	26,5	23,0			39,5	9,0			
MJSN-CH_31	fragment M2 droite	-	-	24,0			-	8,5			
MJSN-CH_32	M3 gauche	24,5	24,0	23,5			42,0	8,5			
MJSN-CH_33	M3 gauche	24,5	24,5	21,5			38,5	8,5			
MJSN-CH_34	M3 droite	26,5	26,0	22,5			41,0	8,5			
MJSN-CH_36	p2 gauche	27,5	26,5	14,5	10,0	14,0	23,5		11,0	7,0	12,5
MJSN-CH_37	fragment p3 gauche	21,5	22,0	14,0	13,5	12,0	30,0		13,0	7,5	9,5
MJSN-CH_38	p4 gauche	28,0	26,0	15,0	14,0	14,0	42,0		15,5	9,0	13,0
MJSN-CH_39	m1 droite	25,0	22,0	12,5	12,0	11,0	37,5		14,0	7,0	10,5
MJSN-CH_40	m2 droite	26,5	25,5	13,0	12,5	13,0	57,5		13,0	8,5	12,0
MJSN-CH_41	m2 gauche	23,5	21,0	13,5	13,5	12,5	43,0		14,5	6,5	8,5
MJSN-CH_42	m3 droite	29,0	24,0	13,5	13,5	12,5	57,5		12,5	8,5	10,5
MJSN-CH_43	m3 gauche	27,5	24,5	12,5	12,5	11,0	56,0		11,5	8,5	9,5

Tableau 2: Dimensions [mm] des restes dentaires d'*Hippotherium primigenium* de Charmoille (Miocène supérieur, Jura, Suisse). L1, longueur de la dent au niveau occlusal; L2, longueur de la dent à 10 mm en-dessous du niveau occlusal pour les jugales supérieures et à 10 mm au-dessus de la base de la dent pour les jugales inférieures; I1, largeur maximale de la dent; I2, largeur de la dent (métaconide-protocône); I3, largeur de la dent (métaconide-hypoconide); L proto, longueur du protocône; L db, longueur de la double-boucle (métaconide/métaconide); L pré, longueur de la préfossette; L post, longueur de la postfossette.



Fig. 4: Mammifères de Charmoille (Miocène supérieur, Jura, Suisse). *Hippotherium primigenium* de Charmoille (Miocène supérieur, Jura, Suisse). Jugales en vue occlusale (1) et en vue labiale (2); a, P2 gauche (MJSN-CH_20); b, P3 gauche (MJSN-CH_21); c, P4 droite (MJSN-CH_24); d, M1 droite (MJSN-CH_27); e, M3 gauche (MJSN-CH_32); f, M3 droite (MJSN-CH_34); g, p2 gauche (MJSN-CH_36); h, p4 gauche (MJSN-CH_38). Barre d'échelle = 20 mm.



Fig. 5: Mammifères de Charmoille (Miocène supérieur, Jura, Suisse). *Hippotherium primigenium*; a, m1 droite (MJSN-CH_39), vue occlusale (1), vue labiale (2); b, m2 droite (MJSN-CH_40), vue occlusale (1), vue labiale (2); c, m3 droite (MJSN-CH_42), vue occlusale (1), vue labiale (2); d, fragment distal de Mt III droit (MJSN-CH_46), vue distale (1), vue caudale (2); e, astragale gauche (MJSN-CH_47), vue antérieure (1), vue distale (2). *Chalicotherium goldfussi*; f, M2 droite (MJSN-CH_48), vue occlusale (1), vue labiale (2). cf. *Euprox* sp.; g, fragment d'appendice frontal (MJSN-CH_49). Ruminantia indet.; h, fragment d'astragale gauche (MJSN-CH_50), vue postérieure (1), vue médiale (2). Proboscidea indet.; i, fragment de côte gauche (MJSN-CH_51), vue antérieure. Barres d'échelle = 20 mm.

Götzendorf et d'Höwenegg (Bernor *et al.* 1993, 1997). En particulier, la longueur moyenne du protocône des spécimens de Charmoille (L moyenne = 8,5), bien que montrant une moyenne légèrement supérieure aux spécimens d'Höwenegg (L moyenne = 8,0), reste complètement dans le domaine de variation des valeurs pour l'espèce.

Concernant le post-crânien, outre des dimensions totalement concordantes, la présence et la morphologie de la *fossa supertrochlearis metatarsi* du Mt III est typique d'*Hippotherium primigenium* (Bernor *et al.* 1997).

Famille Chalicotheriidae Gill, 1872

Genre *Chalicotherium* Kaup, 1833

***Chalicotherium goldfussi* Kaup, 1833**

(Fig. 5f)

Matériel référencé

M2 droite (MJSN-CH_48)

Description

Le spécimen référencé est relativement massif (L = 39,5 ; l = 43,5 ; H = 17,0), de forme quadrangulaire en vue occlusale. Ses racines linguales sont reliées, formant une section transversale en 8. Le métacône a une position plus linguale que le paracône. La position du protocône est légèrement postérieure à celle du paracône. Le cingulum mésial est continu et s'abaisse progressivement jusqu'au bord lingual. En vue linguale, le débouché de la vallée médiane est plutôt en forme de U.

Discussion

Les caractères décrits sont représentatifs de l'espèce *Chalicotherium goldfussi*. En particulier, ils diffèrent de ceux de l'espèce contemporaine *Anisodon grande* par un cingulum mésial s'abaissant progressivement jusqu'au bord lingual, un métacône plus lingual que le paracône et un débouché de la vallée médiane en forme de U (Schäfer & Zapfe 1971, Anquetin *et al.* 2007).

Ordre ARTIODACTYLA Owen, 1848
Sous-ordre RUMINANTIA Scopoli, 1777
Famille *Cervidae* Goldfuss, 1820
Genre *Euprox* Stehlin, 1928
cf. *Euprox* sp.
(Fig. 5g)

Matériel référencé

Fragment appendice frontal (MJSN-CH_49)

Description

Le fragment d'appendice frontal ($H = 68,0$) est composé de la couronne à la base et d'une partie du merrain. Le profil distal de la couronne est circulaire (environ 27 mm de diamètre sans les pierrures). À sa base, le cercle de pierrures se compose d'une série de nodules osseux, apparaissant comme un anneau de perle. Dans notre cas, l'anneau est incomplet, de par l'endommagement de la pièce. L'ornementation de la ramure est un ensemble de rainures et de crêtes longitudinales bien développées, partant de la base de la couronne vers le sommet du merrain. Distalement, les rainures commencent à diverger, annonçant probablement une subdivision du merrain.

Discussion

La faible taille du fragment ne permet pas une identification spécifique. Cependant, la présence d'une couronne très bien développée est une caractéristique du genre *Euprox*, permettant sa différenciation avec les autres cerfs primitifs du Miocène (p. ex. *Dicrocerus*. Stehlin 1928; Dong *et al.* 2003). Le spécimen est assigné avec précaution à cf. *Euprox* sp.

Ruminantia indet.
(Fig. 5h)

Matériel référencé

Fragment astragale gauche (MJSN-CH_50)

Description

Le fragment d'astragale gauche MJSN-CH_50 (DAP \approx 20,5; H \approx 38,0) représente les lèvres médiales des trochlées proximale et distale. Ces dernières sont jointives en vue antérieure et d'orientation verticale.

Discussion

La présence d'une double trochlée est une caractéristique des astragales d'artiodactyle. L'orientation verticale de la trochlée proximale, typique chez les ruminants, diffère des Suina qui possèdent une trochlée proximale plus oblique latéralement (Barone 1999). De même, des lèvres médiales des trochlées proximale et distale jointives en vue antérieure diffèrent des astragales de Tylopoda qui présentent des lèvres clairement séparées (Jiménez-Hidalgo & Carranza-Castañeda 2010). Le spécimen référé possède des dimensions proches de celles des astragales de *Miotragocerus pannoniae* retrouvés en Bavière à Höwenegg et à Oberföhring (Fuss et al. 2015), cependant une identification plus précise que Ruminantia indet. n'est pas possible sur la base de ce matériel.

Ordre PROBOSCIDEA Illiger, 1811

Proboscidea indet.

(Fig. 5i)

Matériel référé

Fragment côte gauche (MJSN-CH_51)

Description

De par la conservation fragmentaire de cette côte, sa position précise ne peut être garantie. Le spécimen (DAP = 27,5 ; DT = 46,0) est fragmenté des deux côtés. Cependant, la section plutôt aplatie et grossièrement triangulaire, marquée par la présence du sillon de la face externe, place ce fragment juste en dessous de la partie articulaire de la côte.

Discussion

La comparaison des dimensions du spécimen avec celles d'une côte d'Elephantidae récent ou actuel permet un rapprochement avec un individu de la taille d'un mégaherbivore, même plus importante que celle d'un *Mammuthus primigenius*. Il pourrait s'agir d'un reste de *Deinotherium giganteum*, mais ce matériel très incomplet ne permet pas une identification plus précise que l'ordre Proboscidea.

Mammalia indet.

Matériel référencé

Fragments os (MJSN-CH_52, MJSN-CH_53, MJSN-CH_54, MJSN-CH_55)

Remarque

Plusieurs fragments d'os indéterminables sont également référés dans cette étude. Ils sont tous très incomplets et ne permettent pas d'identification. Tout au plus pouvons-nous dire que les spécimens MJSN-CH_54 et MJSN-CH_55 semblent correspondre à des fragments de côtes.

Discussion

L'identification des spécimens référés dans cette étude permet de définir un assemblage faunique important, même si d'autres taxons comme les Carnivora ou le rhinocerotidé *Dihoplus schleiermacheri* signalés par les anciens auteurs (p. ex. Schäfer 1961, Becker 2003) n'ont pas été recensés dans le matériel du Jurassica Museum. Sur les cinquante-sept restes étudiés, la grande majorité appartient à deux espèces, *Hippotherium primigenium* (vingt-neuf spécimens) et *Aceratherium incisivum* (dix-sept spécimens). Trois spécimens sont assignés à *Lartetotherium sansaniense*, un à *Chalicotherium goldfussi*, deux à des ruminants et un à un grand proboscidien. Quatre restes de mammifères non déterminés sont encore présents.

L'assemblage faunique de Charmoille correspond clairement à un âge du Miocène supérieur. En accord avec Kälén (1993, 1997) et Becker (2003),

l'occurrence de *Hippotherium primigenium* avec les deux rhinocérotidés *Aceratherium incisivum* et *Lartetotherium sansaniense*, ainsi que le chalicothère *Chalicotherium goldfussi* indique que la localité appartient à la biozone européenne mammalienne de référence MN9 (fig. 6). À titre comparatif, l'assemblage faunique de Charmoille peut être rapproché de

Millions d'années (Ma)	Séries		Etages	Zones à mammifères	EUROPE ← Suisse →	Biostratigraphie des périssodactyles enregistrés à Charmoille			
Faunes de référence									
ca. 9.9	MIOCENE	supérieur	Tortonien	MN10-12	LOS MANSUETOS	<i>Aceratherium incisivum</i>	<i>Lartetotherium sansaniense</i>	<i>Hippotherium primigenium</i>	<i>Chalicotherium goldfussi</i>
					CREVILLENTE 2				
MASIA DEL BARBO									
ca. 11.2 11.6		MN9	Charmoille CAN LLOBATERES Nebelbergweg						
ca. 13.5 13.8		moyen	Serravalien	MN7/8	LA GRIVE Anwil Montchaibeux				
	MN6				SANSAN Rümikon				

Fig. 6: Biostratigraphie des assemblages de périssodactyles de Charmoille (Jura, Suisse) identifiés dans la collection du Jurassica Museum, en accord avec les faunes de référence européennes (en capitale) et suisses (en bas de casse). D'après Berger (2011).

celui d'Höwenegg, dont une datation absolue à $10,8 \pm 0,4$ Ma basée sur des dépôts volcaniques a été établie (Krijgsman *et al.* 1996).

En référence à la biochronologie mammalienne européenne, la biozone à mammifères MN9 (11,1 à 9,7 Ma ; Steininger 1999) correspond à la base du Miocène supérieur. Sa limite inférieure est principalement définie par l'occurrence du « petit cheval tridactyle nord-américain », *Hippotherium primigenium*. Ce taxon marqueur colonise l'ensemble de l'Eurasie et

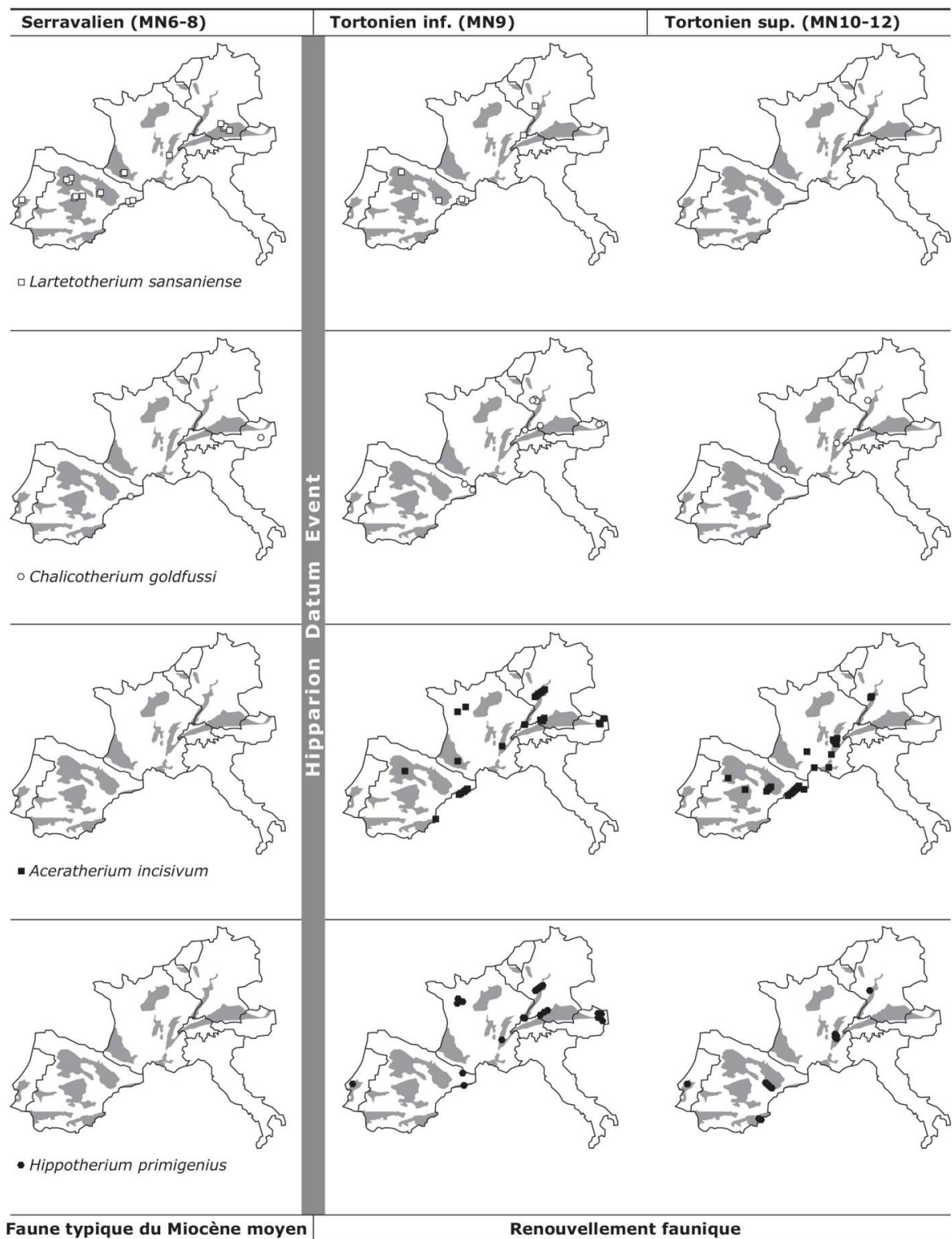


Fig. 7 : Distribution paléogéographique des espèces de périssodactyles enregistrées à Charmoille (d'après les localités reportées dans l'annexe 1). Zones grises, bassins sédimentaires tertiaires d'Europe occidentale.

même l'Afrique du Nord à la suite d'un important changement climatique et paléogéographique survenu à la base du Miocène supérieur. Il y a environ 12 millions d'années, un net refroidissement est enregistré à l'échelle globale. La calotte glaciaire de l'Antarctique s'épaissit, entraînant une baisse du niveau des océans (Janis 1989, Whybrow & Andrews 2000, Zachos *et al.* 2001). L'Amérique du Nord et l'Eurasie sont alors reliées par la Bérिंगie et *Hippotherium primigenium* peut se propager sur l'ensemble des continents holarctiques (MacFadden 1992). Cet événement paléobiogéographique a été nommé *Hipparion Datum Event*, marquant la base de la biozone européenne MN9 et le début d'un renouvellement faunique en Europe. Les espèces identifiées dans la collection du Jurassica Museum ne représentent qu'une partie de l'association faunique de Charmoille. Néanmoins, les périssodactyles enregistrés mettent bien en évidence ce renouvellement faunique du point de vue de leur paléobiogéographie à l'échelle de l'Europe occidentale (fig. 7).

Lartetotherium sansaniense, présent en Europe dès MN5 (Heissig 1999), bien avant l'*Hipparion Datum Event*, montre un net déclin de son registre fossile durant la biozone MN9 pour définitivement disparaître dès MN10. *Chalicotherium goldfussi* présente une discrète occurrence dès MN8 durant le Serravalien terminal. L'apparition précoce de ce taxon semble souligner une amorce de changement climatique survenant près d'un million d'années avant l'*Hipparion Datum Event*. Durant MN9, il est plus largement représenté, alors que sa distribution est déjà sur le déclin à partir de MN10, disparaissant de la péninsule ibérique dans un premier temps, puis complètement d'Europe occidentale à MN12 (Heissig 1999, Maridet & Costeur 2010). *Aceratherium. incisivum* et surtout *Hippotherium primigenium* marquent la base de MN9. Ils illustrent l'importante dispersion des représentants du renouvellement faunique à l'échelle de l'Europe qui s'installe durablement durant le Tortonien, période dominée par des paysages arbustifs et arborés sous des conditions subtropicales humides (Becker 2003). Cette période s'inscrit parfaitement dans le contexte du Miocène voyant l'installation des faunes modernes en Europe. Elle est cependant marquée par une diminution de la diversité des rhinocerotidés et d'autres périssodactyles, excepté des équidés, qui deviennent de plus en plus spécialisés. Parallèlement, le nombre de bovidés et de cervidés augmente, les ruminants devenant dominants partout en Europe (Maridet & Costeur 2010).

Kevin Choffat, titulaire d'un bachelor en sciences de la Terre de l'université de Fribourg, se destine au métier d'ingénieur en gestion de la nature. La présente étude est basée sur les principaux résultats de son travail de bachelor.

Damien Becker, docteur ès sciences (paléontologie) et habilité de l'université de Fribourg, est conservateur du Jurassica Museum.

BIBLIOGRAPHIE

- Anquetin J., Antoine P.-O. & Tassy P. 2007 : Middle Miocene Chalicotheriinae (Mammalia, Perissodactyla) from France, with a discussion on chalicotheriine phylogeny. *Zoological Journal of the Linnean Society* 151, 577-608.
- Antoine P.-O. 2002 : Phylogénie et évolution des Elasmotheriina (Mammalia, Rhinocerotidae). *Mémoires du Muséum d'Histoire naturelle* 188, 359 p.
- Antoine P.-O., Duranthon F. & Tassy P. 1997 : L'apport des grands mammifères (Rhinocerotidés, Suoidés, Proboscidiens) à la connaissance des gisements du Miocène d'Aquitaine (France). In: Aguilar J.-P., Legendre S. & Michaux J. (Éd.). Actes du congrès BiochroM'97. *Mémoires et Travaux de l'École pratique des Hautes Études, Institut de Montpellier* 21, 581-590.
- Antoine P.-O., Duranthon F. & Welcomme J.-L. 2003 : *Alicornops* (Mammalia, Rhinocerotidae) dans le Miocène supérieur des Collines Bugti (Balouchistan, Pakistan) : implications phylogénétiques. *Geodiversitas* 25, 575-603.
- Antoine P.-O., Downing K. F., Crochet J.-Y., Duranthon F., Flynn L. J., Marivaux L., Métais, G., Rajpar A. R. & Roohi G. 2010 : A revision of *Aceratherium blanfordi* Lydekker, 1884 (Mammalia: Rhinocerotidae) from the Early Miocene of Pakistan: postcranials as a key. *Zoological Journal of the Linnean Society* 160, 139-194.
- Barone R. 1999 : *Anatomie comparée des mammifères domestiques. Tome 1 Ostéologie*. Vigot, Paris.
- Becker D. 2003 : Paléoécologie et paléoclimats de la molasse du Jura (Oligo-Miocène) : apport des Rhinocerotidea (Mammalia) et des minéraux argileux. Thèse de doctorat de l'université de Fribourg, *GeoFocus* 8, 327 p.
- Becker D. 2009 : Earliest record of rhinocerotoids (Mammalia : Perissodactyla) from Switzerland : systematics and biostratigraphy. *Swiss Journal of Geosciences* 102, 489-504.
- Berger J.-P. 2011 : Du bassin molassique au fossé rhénan : évolution des paléoenvironnements dans un avant-pays dynamique. *Géochronique, Magazine des Géosciences*, 117, 44-49.
- Bernor R. L., Tobien H. & Woodburne M. O. 1989 : Patterns of Old World hipparionine evolutionary diversification and biogeographic extension. In: Lindsay E., Fahlbusch V. & Mein P. (Éd.). *Topics on European Mammalian Chronology*. New York (Plenum), 263-319.
- Bernor R. L., Mittmann H.-W. & Rögl F. 1993 : Systematics and Chronology of the Götzendorf « Hipparion » (Late Miocene, Pannonian F, Vienna Basin). *Annalen des Naturhistorischen Museums in Wien* 95, 101-120.

Les grands mammifères de Charmoille

- Bernor R. L., Tobien H., Hayek L.-A. C. & Mittmann H.-W. 1997 : *Hippotherium primigenium* (Equidae, Mammalia) from the late Miocene of Höwenegg (Hegau, Germany). *Andrias* 10, 231 p.
- Braillard L. 2006 : Morphogenèse des vallées sèches du Jura tabulaire d'Ajoie (Suisse) : rôle de la fracturation et étude des remplissages quaternaires. Thèse de doctorat de l'université de Fribourg, *GeoFocus* 14, 224 p.
- Costeur L. 2009 : Preliminary overview of regional endemism in European Neogene ungulates. *Bulletin de la Société géologique de France* 180, 17-25.
- Diebold P., Laubscher H.-P., Schneider A. & Tschopp R. 1963 : Levé géologique de la feuille 1085 Saint-Ursanne. *Atlas géologique de la Suisse au 1:25 000 (40)*. Commission géologique suisse.
- Dong W., Liu J. & Pan Y. 2003 : A new *Euprox* from the Late Miocene of Yuanmou, Yunnan Province, China, with interpretation of its paleoenvironment. *Chinese Science Bulletin* 48, 485-491.
- Eisenmann V., Alberdi M. T., De Giuli C. & Staesche U. 1988 : *Studying fossil horses. Collected papers after the «New York International Hipparion Conference, 1981»*. Volume I: Methodology, 1-78.
- Engesser, B. and Mödden, C. 1997 : A new version of the biozonation of the Lower Freshwater Molasse (Oligocene, Agenian) of Switzerland and Savoy on the basis of fossil mammals. In: Aguilar, J.-P., Legendre, S. & Michaux, J. (Éd.). *Actes du congrès BiochroM'97. Mémoires et Travaux de l'École pratique des Hautes Études, Institut de Montpellier* 21, 581-590.
- Evander R. L. 2004 : A revised dental nomenclature for fossil horses. *Bulletin American Museum of Natural History* 285, 209-20108.
- Fuss J., Prieto J. & Böhme M. 2015 : Revision of the bovid *Miotragocerus monacensis* Stromer, 1928 (Mammalia, Bovidae) at the Middle to Late Miocene transition in Central Europe. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie* 276, 229-265.
- Gentry A. W., Rössner G. E. & Heizmann E. P. J. 1999 : Suborder Ruminantia. In: Rössner G. E. & Heissig K. (Éd.). *The Miocene Land Mammals of Europe*. Verlag D^r Friedrich Pfeil, München, 225-258.
- Greppin J. B. 1855 : Notes géologiques sur les terrains modernes, quaternaires et tertiaires du Jura bernois et en particulier du Val de Delémont. Compléments aux notes géologiques. *Neue Denkschriften der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft* 14, 52 p.
- Guérin C. 1980 : Les rhinocéros (Mammalia, Perissodactyla) du Miocène terminal au Pléistocène supérieur en Europe occidentale. Comparaison avec les espèces actuelles. *Documents des laboratoires de géologie de Lyon* 79, 1-1185.
- Heissig K. 1969 : Die Rhinocerotidae (Mammalia) aus der oberoligozänen Spaltenfüllung von Gaimersheim bei Ingolstadt in Bayern und ihre phylogenetische Stellung. *Abhandlungen der Bayerische Akademie der Wissenschaften N. F.* 138, 133 p.
- Heissig K. 1999 : Family Rhinocerotidae. In: Rössner G.E. & Heissig K. (Eds.). *The Miocene Land Mammals of Europe*. Verlag D^r Friedrich Pfeil, München, 175-188.
- Heissig K. 1999 : Family Chalicotheriidae. In: Rössner G. E. & Heissig K. (Éd.). *The Miocene Land Mammals of Europe*. Verlag D^r Friedrich Pfeil, München, 189-192.
- Heissig K. 2012 : Les Rhinocerotidae. In: Peigné S & Sen S. (Éd.). *Mammifères de Sansan. Mémoires du Muséum national d'histoire naturelle* 203, 317-485.

- Hooker J. J. 1989 : Character polarities in early perissodactyls and their significance for Hyracotherium and infraordinal relationships. In: Prothero R. & Schoch R. M. (Éd.). *The Evolution of Perissodactyls*, Oxford University Press, New York, 79-101.
- Hulbert R. C. 1988 : *Cormohipparion and Hipparion* (Mammalia, Perissodactyla, Equidae) from the late Neogene of Florida. *Bulletin of the Florida State Museum. Biological Sciences* 33, 229-338.
- Hummel K. L. 1914 : Die Tektonik des Elsgaus (Berner Tafeljura). *Berichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau* 20, 205-286.
- Hünemann K. A. 1989 : Die Nashornskelette (*Aceratherium incisivum* Kaup 1832) aus dem Jungtertiär vom Höwenegg im Hegau (Südwestdeutschland). *Andrias* 6, 5-116.
- Huttunen K. & Göhlich U. B. 2002 : A partial skeleton of *Prodeinotherium bavaricum* (Proboscidea, Mammalia) from the Middle Miocene of Unterzolling (Upper Freshwater Molasse, Germany). *Geobios* 35, 489-514.
- Janis C. M. 1989 : A climatic explanation for patterns of evolutionary diversity in ungulate mammals. *Palaeontology* 32, 463-481.
- Jiménez-Hidalgo E. & Carranza-Castañeda O. 2010 : Blancan camelids from San Miguel de Allende, Guanajuato, Central Mexico. *Journal of Paleontology* 84, 51-65.
- Kälin D. 1993 : *Stratigraphie und Säugetierfaunen der oberen Süßwassermolasse der Nordwestschweiz*. Thèse inédite de l'université de Zurich, 238 p.
- Kälin D. 1997 : Litho- und Biostratigraphie der mittel- bis obermiozänen Bois de Raube-Formation (Nordwestschweiz). *Eclogae Geologicae Helvetiae* 90, 97-114.
- Koby F.-E. 1955 : Aperçu sur les mammifères tertiaires et quaternaires des environs de Porrentruy. In : Société jurassienne d'Émulation (Éd.). *Recueil d'études et de travaux scientifiques. 135^e session de la Société helvétique des sciences naturelles*. Porrentruy, 81-111.
- Krijgsman W., Garcès M., Langereis C. G., Daams R., Dam J. van, Meulen A. J. van der, Agustí J. & Cabrera L. 1996 : A new chronology for the middle to late Miocene continental record in Spain. *Earth and Planetary Science Letters* 142, 367-380.
- Laubscher H.-P. 1963 : Notice explicative de la feuille 1085 Saint-Ursanne. *Atlas géologique de la Suisse au 1:25 000 (40)*. Commission géologique suisse.
- Liniger H. 1925 : Geologie des Delsberger Beckens und der Umgebung von Movelier. *Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz* 55.
- Liniger H. 1964 : Beziehungen zwischen Pliozän und Juraformation in der Ajoie. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 57, 75-90.
- Lourens L., Hilgen F., Shackleton N. J., Laskar J. & Wilson D. 2004 : The Neogene period. In : Gradstein F.M., Ogg, J.G. & Smith, A.G. (Éd.). *A geological time scale*. Cambridge University Press, Cambridge, 409-440.
- MacFadden B. J. 1992 : *Fossil horses. Systematics, paleobiology, and evolution of the family Equidae*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne, Madrid.
- Maridet O. & Costeur L. 2010 : Diversity trends in Neogene European ungulates and rodents: large-scale comparisons and perspectives. *Naturwissenschaften* 97, 161-172.
- Mein P. 1999 : European Miocene Mammal Biochronology. In : Rössner G. E. & Heissig K. (Éd.). *The Miocene Land Mammals of Europe*. Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München, 25-38.

Les grands mammifères de Charmoille

- Rollier L. 1898 : Deuxième supplément à la description géologique de la partie jurassienne de la feuille VII de la carte géologique de la Suisse au 1/100 000. *Matériaux pour la carte géologique de la Suisse* 8.
- Schäfer H. 1961 : Die pontische Säugetierfauna von Charmoille (Jura bernois). *Eclogae Geologicae Helvetiae* 54, 559-566.
- Schäfer H. & Zapfe H. 1971 : *Chalicotherium grande* Blainv. und *Chalicotherium goldfussi* Kaup. Odontologische und osteologische Unterschiede. *Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft in Basel* 81, 157-199.
- Stehlin H. G. 1914 : Übersicht über die Säugetiere der schweizerischen Molasseformation, ihre Fundorte und ihre stratigraphische Verbreitung. *Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft in Basel* 25, 170-193.
- Stehlin H. G. 1928 : Bemerkungen über die Hirsche von Steinheim am Aalbuch, *Eclogae Geologicae Helvetiae* 21, 245-256.
- Steininger F.F. 1999 : Chronostratigraphy, Geochronology and Biochronology of the Miocene « European Land Mammal Mega-Zones (ELMMZ) » and the Miocene « Mammal-Zones (MN-Zones) ». In : Rössner G.E. & Heissig K. (Eds.). *The Miocene Land Mammals of Europe*. Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München, 9-24.
- Whybrow P. J. & Andrews P. 2000: Response of Old World terrestrial vertebrate biotas to Neogene climate change. The last 145 Millions years. In : Cluver S. J. & Rawson P. F. (Éd.). *Biotic response to global change*. Cambridge University Press, Cambridge, 350-398.
- Zachos J., Pagani M., Sloan L., Thomas E. & Billups K. 2001 : Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science* 292, 686-693.

Annexe 1

Liste des localités d'Europe occidentale où sont enregistrées les espèces de périssodactyles: *Lartetotherium sansaniense*, *Aceratherium incisivum*, *Hippotherium primigenium* et *Chalicotherium goldfussi* (d'après Maridet & Costeur 2010). Abréviations: AT (Autriche), CH (Suisse), DE (Allemagne), ES (Espagne), FR (France), PT (Portugal).

Biozones	Localités	<i>Lartetotherium sansaniense</i>	<i>Aceratherium incisivum</i>	<i>Hippotherium primigenius</i>	<i>Chalicotherium goldfussi</i>
MN6	Derching (DE)	X			
	Fuensaldaña (ES)	X			
	Manchones (ES)	X			
	Paracuellos 3 (ES)	X			
	Paracuellos 5 (ES)	X			
	Póvoa de Santarém (PT)	X			
	Sansan (FR)	X			
	Stätzling (DE)	X			
MN7/8	Arroyo del Val 4 (ES)	X			
	Brihuega (ES)	X			
	Can Almirall (ES)	X			
	Can Mata 1 (ES)	X			X
	Coca (ES)	X			
	Cerro del Otero (ES)	X			
	Fuensaldaña (ES)	X			
	Gratkorn (AT)				X
	La Grive (FR)	X			
	Massenhausen (DE)	X			
	Sant Quirze (ES)	X			
	Steinheim (DE)	X			
	Villefranche d'Astarac (FR)	X			
Biozones	Localités	<i>Lartetotherium sansaniense</i>	<i>Aceratherium incisivum</i>	<i>Hippotherium primigenius</i>	<i>Chalicotherium goldfussi</i>
MN9	Aveiras de Baixo (PT)			X	
	Budenheim (DE)		X		
	Can Casablanca (ES)		X		
	Can Gabarro (ES)	X	X		
	Can Llobateres (ES)	X	X	X	
	Can Ponsic (ES)	X	X		
	Cendejas de la Torre (ES)	X			
	Charmoille (CH)	X	X	X	X
	Das (ES)				X
	Douc-la-Fontaine (FR)		X	X	
	Ebingen (DE)			X	
	El Firal (ES)			X	X
	Eppelsheim (DE)		X	X	X
	Esselborn (DE)		X		
	Fuensaldaña (ES)	X			
	Gaiselberg (AT)		X	X	X
	Götzendorf/Sandberg (AT)			X	
	Höwenegg im Hegau (DE)		X	X	X
	Kettenheim (DE)			X	
	Los Valles de Fuentidueña (ES)		X		
	Lugnez (CH)			X	
	Mariathal (AT)			X	X
	Melchingen (DE)		X	X	

Les grands mammifères de Charmoille

	Nombrevilla (ES)	X			
	Noyant-sous-le-Lude (FR)			X	
	Oppenheim (DE)		X		
	Pedregueras 1A (ES)		X		
	Relea (ES)	X			
	Saint-Jean-de-Bournay (FR)		X	X	
	Salmendigen (DE)		X		
	Sant Père de Ribes (ES)	X			
	Sceaux-d'Anjou (FR)		X	X	
	Trie-sur-Baïse (FR)		X		
	Santiga (ES)		X		
	Vösendorf (AT)		X	X	
	Westhofen (DE)		X	X	X
	Wien-Belvedere (AT)		X		
	Wissberg (DE)	X	X	X	X
	Wolfsheim (DE)			X	

Biozones	Localités	<i>Lartetotherium sansaniense</i>	<i>Aceratherium incisivum</i>	<i>Hippotherium primigenius</i>	<i>Chalicotherium goldfussi</i>
MN10	Ambérieu 1 (FR)		X		
	Azambujeira sup. (PT)			X	
	Can Trullas (ES)		X		
	Can Barba (ES)		X		
	Can Casablanques 2 (ES)		X		
	Can Perellada (ES)		X		
	Croix-Rousse (FR)			X	
	La Roma 2-R2 (ES)		X	X	
	La Tarumba (ES)		X		
	Masia del Barbo IIA (ES)			X	
	Masia del Barbo IIB (ES)		X	X	
	Montredon (FR)		X		
	Orignac (FR)				X
	Priay A (FR)		X	X	
	Puy Courmy (FR)		X		
	Sabadell (ES)		X		
	Saint-Fons (FR)			X	
	Sermenaz- Bas Neyron (FR)		X		
	Soblay (FR)		X		X
	Terrassa (ES)		X		
	Vienne (FR)		X		
	Viladecavalls (ES)		X		
MN11	Ambérieu 3 (FR)			X	
	Crevillente 1 (ES)			X	
	Dorn-Dürkheim (DE)		X	X	X
	La Cantera (ES)			X	
	Piera (ES)		X		
	Puente Minero (ES)			X	
	Weisenau (DE)				
MN12	Aljezar B (ES)			X	
	Aubignas 2 (FR)		X		
	Concud « Cerro de la Garita » (ES)		X		
	Concud « Las Pedrizas » (ES)		X		
	Cucuron (FR)		X		
	Los Mansuetos (ES)		X		
	Salobral (ES)		X		

L'ancien grand glissement rocheux de Delémont

FRANÇOIS FLURY

La découverte des « paquets glissés » de roche calcaire à Delémont a intrigué les géologues entre les années 1870 et 1930. Curieusement, les données sur ce phénomène de grande ampleur (plusieurs millions de mètres cubes de roche calcaire déplacés et répartis sur une surface de l'ordre de quelques kilomètres carrés) sont rares et partielles, aucune étude contemporaine, détaillée et complète, n'étant disponible.

Ces masses d'épaisseurs variables (jusqu'à 20 mètres) correspondent à des calcaires du Malm disloqués, dont la stratification, lorsqu'elle est localement observable, est proche de l'horizontale. Ailleurs, elles apparaissent sous forme de volumes très fracturés (blocs, pierres), sans stratification apparente. Les mélanges avec la molasse marneuse sont fréquents.

Le présent article propose une synthèse des données de la première moitié du xx^e siècle puis montre, par un choix limité d'objets récents et inédits (fouilles et sondages), les défis que posent ces masses en matière de construction et de protection des eaux souterraines.

Introduction, contexte et buts

La vieille ville de Delémont se trouve adossée au flanc nord du bassin du même nom, dans le Jura plissé (fig. 1).

La topographie particulière à l'amont de la vieille ville, entre le stand de tir du Bambois et le château du Domont, intrigue les géologues depuis plus d'un siècle : à la place de molasses que l'on s'attendrait à trouver dans la partie nord du synclinal delémontain, ce sont des calcaires fracturés qui affleurent.

Dans le contexte de l'établissement de la carte géologique locale dans les années 1920, Hans Liniger mentionne différents affleurements de

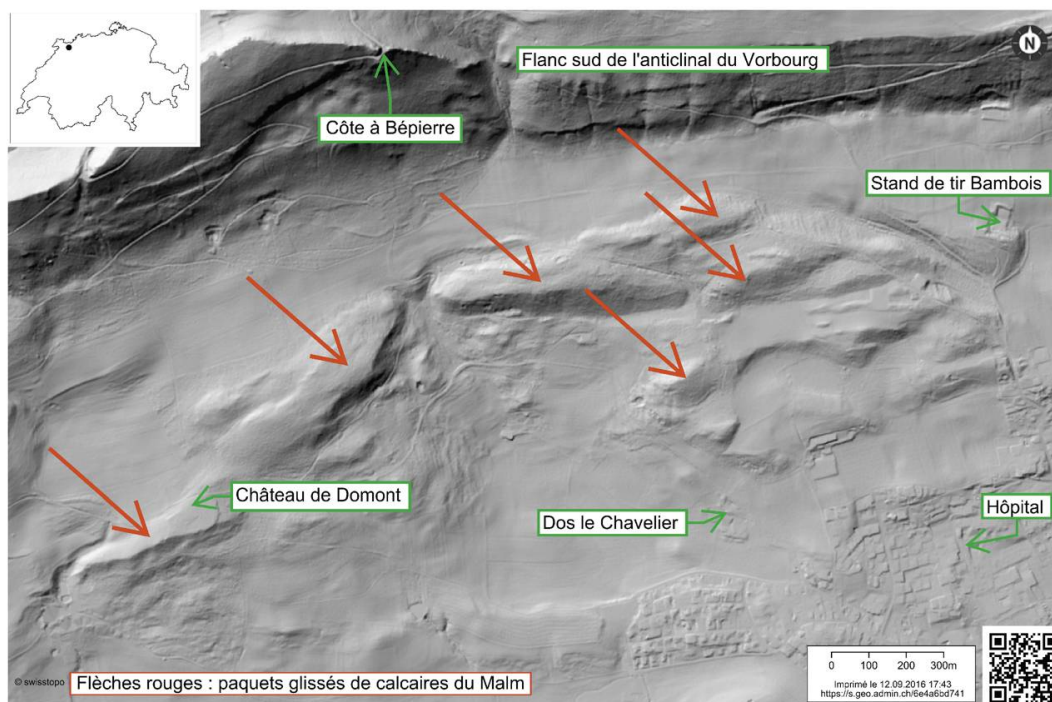


Fig. 1: Modèle numérique de terrain au nord-ouest de la ville de Delémont. Consultable à l'adresse <https://s.geo.admin.ch/6e4a6bd741>.

calcaires fracturés, généralement de pentages proches de l'horizontale, au nord et au nord-ouest de la vieille ville de Delémont (« *Malmsackungsmassen von Domont* », Liniger, 1925, Keller & Liniger, 1930). Ces « terrains tassés ayant glissé en bloc » concernent notamment des calcaires du Jurassique supérieur des lieux-dits Bois Brûlé et Feuilleresse.

Plus au nord, ces mêmes calcaires sont bien visibles dans la falaise du Bérider où ils sont encore en place et appartiennent au flanc sud de l'anticlinal du Vorbourg.

En 1898, Louis Rollier parlait déjà d'un phénomène identique au sud de la ville, sur la colline du Montchaibeux : « La couverture jurassique de la colline du Mont-Chaibeut au sud de Delémont a déjà excité la sagacité de plus d'un géologue, [...]. La couverture du Mont-Chaibeut est donc dans un lambeau séquanien disloqué mais stratifié normalement. »

Ce phénomène, qui façonne encore aujourd'hui le paysage de la ville de Delémont, correspond à plusieurs millions de mètres cubes de roche calcaire déplacés et répartis sur une surface de l'ordre de quelques kilomètres carrés.

Ces masses de calcaires fracturés, localement mélangés à des marnes plus récentes du Tertiaire, sont recoupées en forages ou lors de travaux de génie civil à Delémont (fig. 2, 3, 4, 8 et 9). Elles présentent des caracté-

ristiques géotechniques et hydrogéologiques particulières du fait de leur nature fortement hétérogène et de leur distribution a priori aléatoire.

Les données sur ce phénomène de grande ampleur sont rares et partielles, aucune étude scientifique détaillée et complète n'étant disponible.

Dans ce contexte, le présent article propose une synthèse des données de la première moitié du xx^e siècle, puis présente un choix limité d'objets récents et inédits (fouilles et sondages) afin d'illustrer les conséquences pratiques de cette géologie particulière.

Nous espérons ainsi susciter des études plus complètes de ce phénomène important pour la compréhension de notre sous-sol et, plus généralement, de l'histoire géologique de la chaîne jurassienne.

Données initiales et caractérisation du phénomène

Répartition

Pour ce qui concerne la ville de Delémont, la répartition géographique des masses glissées est présentée sous forme d'extrait de la carte géologique en figure 5, alors que des profils géologiques nord-sud caractérisent en figure 6 le phénomène dans le contexte des structures géologiques locales. À Delémont, on constate que le phénomène est localisé sur le flanc sud de l'anticlinal du Vorbourg, entre Courroux à l'est et le vallon de la Golatte à l'ouest.

Âge de mise en place des masses glissées

Pour le nord de la ville de Delémont, Liniger estime l'âge du phénomène par analogie avec les observations possibles au Montchaibeux et au Crât de Pavillon à Courtételle: il situe le glissement des masses séquanienues du Montchaibeux au Quaternaire ancien, ou alors pendant les dernières phases du plissement jurassien au Pliocène (Tertiaire).

Mécanisme et origine des masses glissées

Pour le Montchaibeux, le(s) mécanisme(s) ayant conduit à ces glissements rocheux a (ont) fait l'objet de plusieurs hypothèses de la part des géologues des xix^e et xx^e siècles:

— vers 1870, J.-B. Greppin « croyait que le Séquanien avait percé ici la molasse, par suite d'une poussée volcanique ». (Cité par Rollier, 1898);

— L. Rollier (1898) estimait qu'« il n'y a pas d'autre explication rationnelle à donner pour ce lambeau qu'un glissement en bloc d'une partie des marnes séquanienues avec les calcaires sus-jacents, provenant de la montagne de Châtillon au versant nord de la chaîne de Vellerat »;

— H. Liniger (1925) ne se prononce pas de manière explicite sur le mécanisme: « La plus ancienne masse tassée de la vallée est sans doute la couverture séquanienne du Montchaibeux. Son glissement est intervenu alors que la vallée n'était qu'à peine érodée et que tout le remplissage molassique était encore intact. La date du glissement est à mon sens à situer au Quaternaire ancien, si le glissement n'a pas eu lieu en relation avec les derniers mouvements du plissement [jurassien] (chevauchement au sud de Courrendlin). » (Traduction personnelle);

— toujours pour le Montchaibeux, Lugeon (1949), quant à lui, pense que « c'est certainement un paquet décoiffé ne pouvant venir que du sud, mais sans que l'on puisse savoir exactement où était le lieu de la racine de cette petite *Klippe*, dans le sens tectonique donné à ce terme ».

Pour ce qui concerne spécifiquement les paquets glissés du nord de la ville de Delémont, Liniger (1925) estime que: « Pour la masse glissée de Malm du Domont déjà connue, masse qui a été exploitée au NW de Delémont en de nombreux endroits pour des empièvements de routes, il n'est nulle part possible d'effectuer une telle détermination de l'âge; néanmoins, l'analogie peut être acceptée avec les âges décrits plus haut [pour le Montchaibeux] .»

« On constate dans ces masses glissées, en paquets encore intacts, des couches de Rauracien plutôt au nord, et des masses de Séquanien plus au sud. Cette disposition donne l'impression qu'une partie du flanc renversé [de l'anticlinal du Vorbourg] s'est déchirée ou, ce qui est plus vraisemblable, que des restes du toit de la voûte anticlinale chevauchante ont glissé dans le bassin. Dans tous les cas, il faut chercher les causes profondes du glissement [...] dans la géométrie (position) du flanc sud de l'anticlinal [du Vorbourg]. » (Traduction personnelle.)

Aujourd'hui, sans nouvelles investigations détaillées (sondages carotés dédiés, etc.) et au stade d'une recherche bibliographique limitée, nous sommes d'avis qu'un modèle très plausible de structure d'effondrement gravitaire est présenté par Harrison et Falcon (*Gravity Collapse Structures*, 1936), sur la base d'observations dans les monts Zagros en Iran: il est

vraisemblable que les paquets glissés du bassin de Delémont résultent du mécanisme de type *slip sheet* repris en figure 7 ci-dessous.

On notera encore que, du point de vue de la terminologie recommandée par l'OFEV (2016), ces masses glissées correspondent à un *glissement translationnel profond*, qui s'est très probablement déroulé en plusieurs étapes, avec en plus des événements de type *éboulement*, voire *écroulement*.

Données : présentation de quelques cas

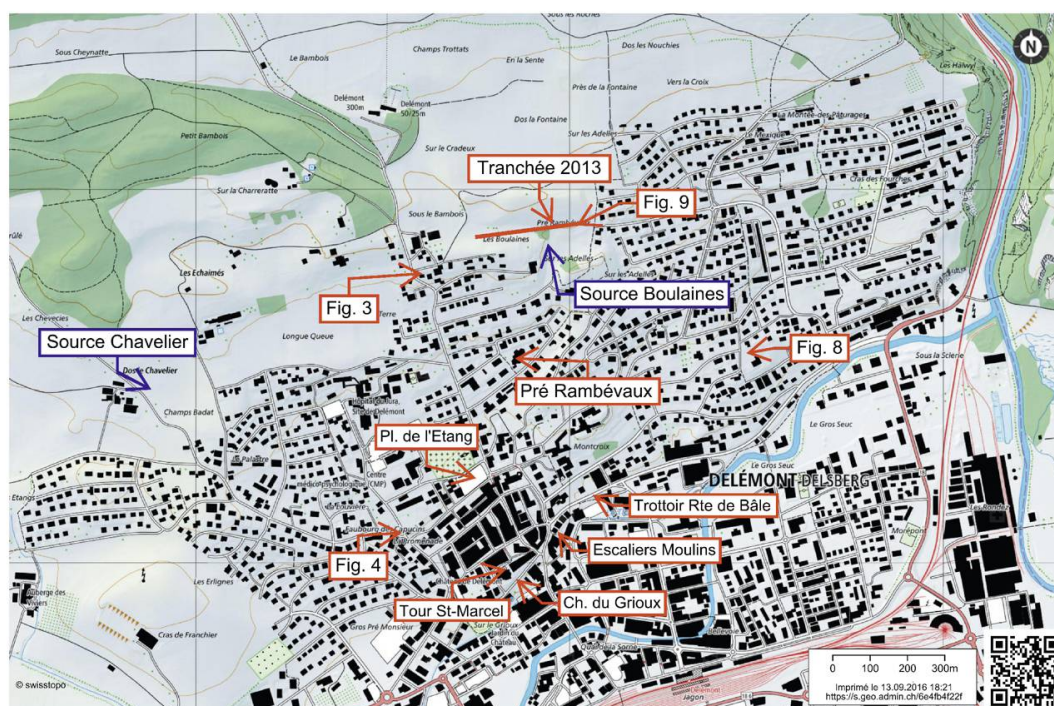


Fig. 2: Localisation des objets mentionnés. Consultable à l'adresse <https://s.geo.admin.ch/6e4fb4f22f>.

Forage de 4 sondes géothermiques verticales à l'est de la ville

À l'est de la ville, à la rue des Vergers, le forage de 4 sondes géothermiques verticales au printemps 2016, à 100 m de profondeur chacune, permet d'établir le modèle géologique suivant, sur la base des déblais de forage (*cuttings*):

- de 0 à 12 m de profondeur : paquet glissé de calcaires fracturés ;
- de 12 m à 34 m de profondeur : molasse marneuse (probablement faciès Terre jaune) ;
- dès 34 m et jusqu'en fond de forage à 100 m : calcaires en place du Malm appartenant au flanc nord du synclinal de Delémont. (Cadastre géologique, base de données du sous-sol disponible à l'adresse <http://bit.ly/2chaXHF>.)

Juste à côté, la fouille d'un nouvel immeuble (fig. 8) montre sur plus de 3 m de hauteur des calcaires séquanien très fracturés (oolithe nuciforme, oolithe rousse, rares passages marno-calcaires, pas de pendages « lisibles », avec quelques traces de bolus sidérolithique).



Fig. 3: Paquet glissé du nord de la rue de Chêtré, calcaires fracturés à pendage horizontal (coordonnées 592 650/246 725). La localisation des objets est donnée en figure 2.



Fig. 4: Paquet glissé de calcaires très fracturés (nord-ouest, à gauche sur la photographie) reposant sur la molasse faciès Terre jaune (à droite); noter le contact à pendage incliné vers le nord-ouest. La hauteur de l'affleurement est d'environ 1 m. Été 2016, fouille à l'extrémité est de la route du Domont (coordonnées 592 530/246 090).

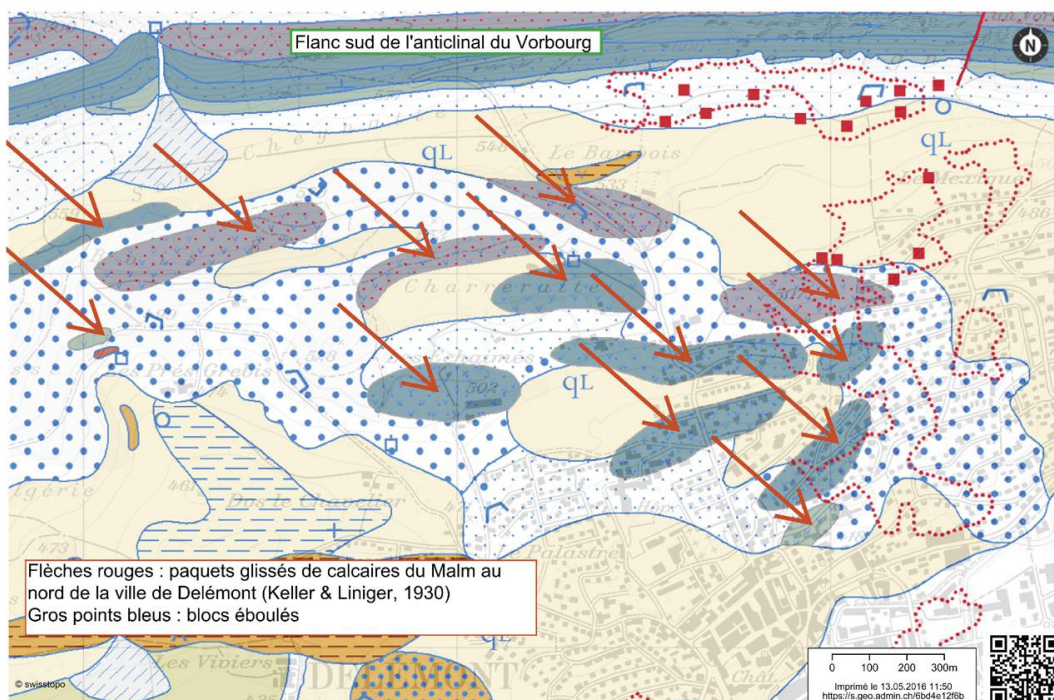
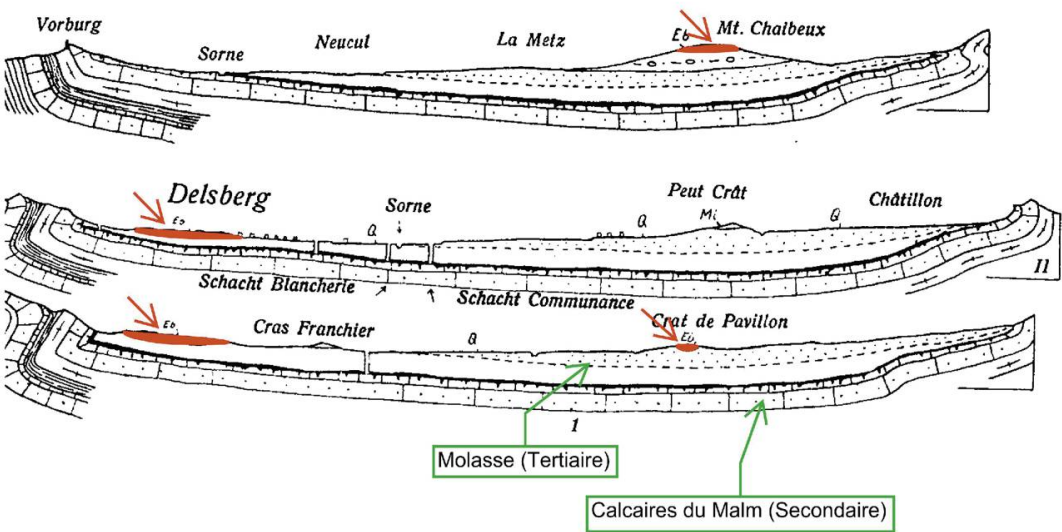


Fig. 5: Extrait de la carte géologique de Delémont (Keller & Liniger, 1930). Consultable à l'adresse <https://s.geo.admin.ch/6bd4e12f6b>.



Flèches rouges : paquets glissés de calcaires du Malm (Liniger, 1925)

Fig. 6: Profils géologiques nord-sud établis par Liniger (1930); en rouge, les masses glissées.

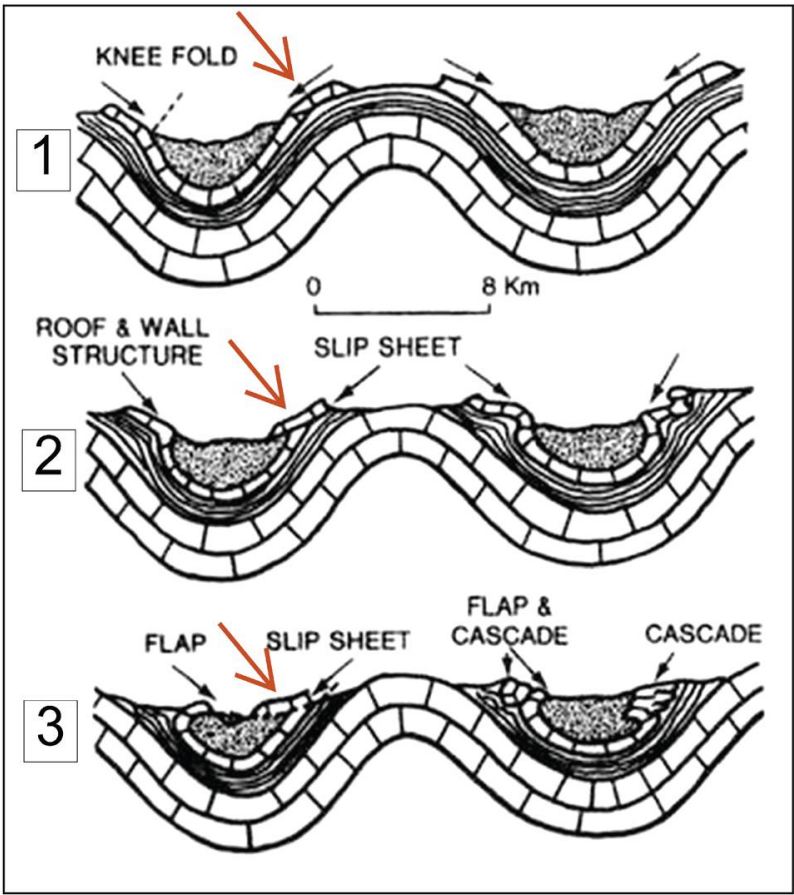


Fig. 7: Modèle d'effondrement gravitaire de type *slip sheet* (flèches rouges, selon Harrison & Falcon, 1936).

Fouille de la conduite Boulaines – Champateau

Pendant l'été 2013, une importante fouille a été exécutée pour la pose d'une conduite entre le réservoir des Boulaines et celui de Champateau (fig. 2). Un tronçon de cette fouille, d'axe est-ouest et situé à 100 m au nord du réservoir des Boulaines, a recoupé de manière spectaculaire un des paquets glissés cartographiés par Liniger : des blocs calcaires jusqu'à 1 m³ ont été retirés de la fouille à certains endroits (fig. 9), alors que plus à l'ouest, à l'amont de la source des Boulaines, les calcaires du même paquet glissé étaient finement découpés par une fracturation très serrée.

Aucune venue d'eau n'a été décelée pendant l'ouverture de la tranchée, même en période d'orage. En conséquence, il a été admis que la probabilité d'un impact sur le débit de la source des Boulaines pouvait être considérée comme quasi nulle (MFR, 2013).

Pré Rambévaux

Pour l'étude géotechnique du futur bâtiment « Plein Soleil », 5 sondages en tranchées ont été effectués en avril 1991 jusqu'à des profondeurs comprises entre 3,2 m et 4,2 m (Meury Flury Rieben SA, 1991). Sous la terre végétale, un mélange hétérogène de limon graveleux gris clair et de blocs calcaires fracturés du Malm a été recoupé au-dessus des limons argileux de la molasse. Les épaisseurs de cette couche à pierres et blocs calcaires, ainsi que la taille et la proportion des blocs, varient fortement d'un sondage à l'autre ; elles sont décrites dans le tableau ci-dessous.

N° Sondage	Épaisseur couche à pierres et blocs calcaires	Diamètre maximum des blocs calcaires	Proportion pierres et blocs calcaires	Profondeur de la base de la couche
P2	> 3,0 m	Env. 1,0 m	> 50 %	Pas recoupé en sondage
P3 et P5	Env. 1,0 m	Env. 0,2 m	Env. < 20 %	1,5 et 1,7 m
P1 et P4	Env. 0,3 m	Env. 0,1 m	Env. < 5 %	0,6 et 1,0 m

Tableau 1 : Pré Rambévaux, données des 5 sondages en tranchées (coordonnées 592 864/246 550).



Fig. 8: Talus de la fouille pour le nouvel immeuble à la rue des Vergers (coordonnées 593 515/246 567).



Fig. 9: Blocs calcaires anguleux (Malm) retirés de la fouille à environ 30 m à l'ouest du sentier Henri-Parrat (coordonnées 593 025/246 910).

Le risque géotechnique principal identifié au cours de cette étude est celui de tassements différentiels pouvant résulter de cette géologie très hétérogène (caractéristiques géotechniques significativement différentes entre les limons argileux de la molasse et la couche à pierres et blocs calcaires). Les parades proposées concernent la qualité de la structure (rigidité, joints, radier ad hoc) ainsi que la substitution, localement, d'horizons de mauvaise qualité par du béton maigre.

Bordure nord de la vieille ville : place de l'Étang

En 1990, lors d'une investigation géotechnique à la place de l'Étang, 4 sondages carottés ont été exécutés jusqu'à 12 m de profondeur. Sous des remblais et dépôts palustres jusque vers 2,0 m à 3,3 m de profondeur, on trouve dans les 4 sondages de la molasse sous forme de limon argileux (faciès *Terre jaune*) jusqu'en fond de sondage. Le sondage S4 rompt toutefois quelque peu cette homogénéité apparente : on y a recoupé de « nombreux graviers calcaires » entre 4 m et 5,6 m, mais toujours dans une matrice de limon argileux (Meury Flury Rieben SA, 1990). Ces graviers calcaires appartiennent aux masses glissées, mais ne posent ici aucun problème particulier a priori : le contexte géotechnique d'un éventuel futur bâtiment est celui d'une fouille en milieu urbain, fouille qui impliquerait très probablement une enceinte, par exemple une paroi clouée.

Tour de l'église Saint-Marcel

Durant plus d'un siècle, la tour de l'église Saint-Marcel préoccupa les Delémontains : la tour actuelle fut construite en 1851, car la précédente penchait vers le nord et « menaçait de s'écrouler sur les maisons voisines au point que tous leurs habitants durent les évacuer et se loger au château » (Guéniat, 1951). Dès sa construction en 1851, la nouvelle tour commença à pencher également vers le nord et, comme la précédente, menaçait les immeubles de la vieille ville. Par la suite, le phénomène de tassement différentiel se poursuivit de manière alarmante, à tel point que des travaux de reprise en sous-œuvre furent exécutés en 1938. Une partie des réflexions et expertises qui amenèrent à ces travaux est connue (Guéniat, 1951) : en résumé, on retiendra que les fondations nord — fortement sollicitées — de la tour de l'église, d'abord mises en péril par l'excavation d'une tranchée jusqu'à la base de la fondation, furent améliorées au moyen de 32 pieux forés armés injectés de 40 cm de diamètre, longs de 6 à 7 mètres. Ces pieux, reliés par une longrine, en sus de reporter une

part des charges en profondeur, confinent le terrain d'assise des fondations superficielles de la partie nord de la tour.

Connaissant la géologie très hétérogène de la vieille ville de Delémont, on pourrait a priori penser que le tassement différentiel de la tour Saint-Marcel résulte, du côté nord de la tour, de molasses marneuses altérées, alors qu'au sud, la présence de rocher calcaire issu des masses glissées pourrait expliquer une meilleure résistance des terrains. Or, il n'en est rien (Guéniat, 1951): « constatation surprenante, la tarière du creusage de tous les trous ne sortit pas une pierre de la grosseur d'un œuf, mais seulement des couches d'argile de différentes couleurs, toutes compactes et sèches, sauf une humide et glissante. Elle avait probablement sa grosse part de tout le mal ».

Plus récemment, en 1994, dans le cadre de la surveillance de la stabilité du chemin du Grioux au sud de l'église Saint-Marcel, un sondage carotté a été effectué sur le parvis de l'église, à environ 5 m à l'est du coin sud-est de l'église: sous une dizaine de mètres de remblais composés principalement de limon argileux et sableux, on a recoupé jusqu'à 21 m de profondeur la molasse faciès *Terre jaune*. Il s'agit de limon argileux bariolé jaune, brun orangé-rouge et blanc, de consistance ferme à très ferme. Des cristaux de gypse ont été recoupés localement entre 12 et 14,5 m de profondeur.

Les observations de 1938 citées par Alphonse Guéniat sont donc confirmées par ce sondage carotté: les masses calcaires glissées n'ont pas atteint le secteur de la tour de l'église Saint-Marcel. D'autres sondages effectués au chemin du Grioux confirment ce modèle (Meury & Flury, 1989 et MFR SA, 1995).

Conclusions et perspectives

Les « paquets glissés » de roche calcaire découverts par les géologues des années 1870-1930 restent toujours d'actualité pour la ville de Delémont. Ces masses d'épaisseurs variables (de quelques décimètres jusqu'à 20 mètres), souvent proches d'affleurements de molasse marneuse, soulèvent toute une série de questions en matière de construction (risques de tassements différentiels, difficultés locales de terrassement, tenues des fouilles).

La stabilité du front aval de ces anciennes masses glissées — et plus généralement du pied sud de la vieille ville et de la route de Bâle — mérite

une attention certaine lors de travaux. Des mouvements lents ont été constatés par le passé en différents endroits : chemin du Grioux, passage du Creux (escaliers des Moulins), déformation du trottoir sud de la route de Bâle à la hauteur du projet du Théâtre du Jura.

La localisation précise des masses glissées n'est que partiellement connue, les données disponibles étant très limitées et dispersées auprès de différents acteurs (administrations communale et cantonale, bureaux d'études). Le « cadastre géologique, base de données du sous-sol » donne une partie des forages destructifs et des rares sondages carottés. Il est disponible à l'adresse <http://bit.ly/2chaXHF>.

La protection des ressources en eau potable constitue également un important volet de cette question : le rôle éventuel d'aquifère de surface de ces masses calcaires pour l'alimentation de la source de la Doux est à préciser et, si la contribution de ces masses glissées devait être avérée, les outils de protection devraient être adaptés. Le rôle de ces masses glissées dans l'alimentation des petites sources mériterait également attention : Boulaines, Chavelier, etc.

Une contribution à la recharge du grand aquifère profond du Malm du synclinal de Delémont (Flury *et al.*, 1991), même indirecte et très partielle, n'est pas à exclure à ce stade des connaissances. Dans le contexte de futurs forages pour sondes géothermiques verticales, on devrait éviter de mettre en contact ces masses glissées avec les calcaires profonds du Malm, ceci conformément à l'article 43, alinéa 3, de la LEaux (1991) qui stipule que « la création de communications permanentes entre des nappes souterraines est interdite si une telle intervention peut diminuer les réserves en eaux souterraines ou altérer leur qualité ».

Enfin, sur un plan plus strictement géologique, l'intérêt fondamental subsiste de dater ce grand glissement rocheux, de caractériser ses différentes étapes et, bien sûr, de les situer dans l'histoire de l'édification de la chaîne de montagnes qui nous sert de cadre de vie.

Remerciements

Un grand merci à mes collègues Marc Hessenauer, François Pasquier et Francis Fleury qui ont bien voulu relire une première version de cet article et me faire part de leurs précieuses remarques ! Ma gratitude va également à M. l'abbé Pierre Salvadé, M. le Prof. J.-P. Schaer et

MM. Bernard Beuret, Tristan Flury, Manuel Lachat et Didier Lambert pour la fourniture de données ou leurs conseils avisés.

François Flury est géologue et hydrogéologue. Formé à l'université de Neuchâtel, il a dirigé le bureau MFR Géologie-Géotechnique SA de Delémont de 1987 à 2014 (www.mfr.ch).

RÉFÉRENCES

- Flury F., Allemann R. & Lachat R. 1991 : Recherche d'eau par forages dans l'aquifère profond du Malm à Delémont. – Résultats de la phase d'exploration. *Gaz-Eaux-Eaux usées*, 1991/12, SSIGE, Zurich.
- Guéniat A. 1951 : Les cent ans de la Tour Saint-Marcel. Consolidation de la Tour. Rapport détaillé de M. le Doyen Guéniat, confié aux archives de la paroisse de Delémont, publié dans le *Bulletin paroissial de Delémont*, du mois de février 1951, à l'occasion du 75^e anniversaire du chanoine Alphonse Guéniat et des 100 ans de la tour de l'église, 15 p.
- Harrison J. V. & Falcon, N. L. 1936 : Gravity Collapse Structures and Mountain Ranges, as exemplified in South-Western Persia. *Quart. Journ. Geol., Soc. Lond.* Vol. 92, 1936, p. 91-102. *In*: Collier, C. & Pain, C., 2000 : *The Origin of Mountains*. Routledge, London, 347 p.
- Keller W. T. & Liniger H. 1930 : Feuille 1086 Delémont, Carte 1. *Atlas géologique de la Suisse 1/25 000*, Commission géologique de la Société helvétique des Sciences naturelles.
- LEaux (1991) : Loi fédérale sur la protection des eaux du 24 janvier 1991 (état au 1^{er} janvier 2016). RS 814.20.
- Liniger H. 1925 : «Geologie des Delsberger Beckens und der Umgebung von Movelier». *Matériaux pour la carte géologique de la Suisse*, Nouvelle série, 55 (IV). Commission géologique de la Société helvétique des Sciences naturelles, Berne, 71 p.
- Lugeon M. 1949 : Question de mode en géologie et autres histoires: Le décoiffement. Livre jubilaire Charles Jacob. *Annales Hébert et Haug* publiées par le laboratoire de géol. de la faculté des sciences de l'université de Paris, VII, p. 262-274.
- Meury & Flury, Géologues SIA 1989 : « *Sur le Grioux* », Delémont. Étude géologique. Municipalité de Delémont. Delémont, 25.10.1989, p. 9. Rapport inédit.
- Meury Flury Rieben SA 1990 : *Faisabilité d'une construction à la Place de l'Étang – Reconnaissances géologiques-géotechniques*. Fond. Delémont Capitale, Delémont, 30.08.1990, p. 9. Rapport inédit.
- Meury Flury Rieben SA 1991 : *Construction d'un immeuble à Delémont – Plein Soleil au Pré Rambévau / Étude géologique-géotechnique*. Commission de construction Plein Soleil – Foyer Jurassien à Delémont, Delémont, 01.10.1991, p. 8. Rapport inédit.
- MFR Géologie-Géotechnique SA 1995 : *Chemin du Grioux. Reconnaissances géologiques-géotechniques*. Rapport d'étude. Delémont, 06.11.1995, p. 11. Rapport inédit.
- MFR Géologie-Géotechnique SA 2013 : *Alimentation de secours pour le réservoir de Champateau. Suivi de la fouille à l'amont de la source des Boulaines*. Rapport. Delémont, 23.11.2013, p. 5. Rapport inédit.
- OFEV 2016 : Protection contre les dangers dus aux mouvements de terrain. Aide à l'exécution concernant la gestion des dangers dus aux glissements de terrain, aux chutes de pierres et aux coulées de boue. Office fédéral de l'environnement, Berne. *L'environnement pratique*, n° 1608, 98 p.

Le glissement rocheux de Delémont

Rollier L. 1898 : *Deuxième supplément à la description géologique de la partie jurassienne de la feuille VII de la carte géologique de la Suisse au 1/100 000*. Schmid et Francke, Berne, 206 p.

SITE INTERNET

Cadastre géologique, base de données du sous-sol. Site qui donne accès aux levés de certains forages. Consultable à l'adresse <http://www.geocad1.vd.ch/index.php?mode=display&view=carte> ou <http://bit.ly/2chaXHF>.

Cartographie automatisée des dolines du plateau de Bure (Ajoie, Suisse) et mise en lien avec la fracturation tectonique

RAPHAËL VALLAT | LUC BRAILLARD

Cet article présente une méthodologie pour repérer puis cartographier de manière automatisée des dolines karstiques à l'aide d'un modèle numérique d'altitude. La région étudiée est le plateau de Bure en Ajoie (JU, Suisse). La cartographie automatisée est réalisée à partir d'outils d'analyse spatiale basés sur des paramètres tels que la pente, la courbure et l'altitude relative des surfaces du terrain. Cette méthode de cartographie novatrice s'est révélée très performante. Elle a permis de fournir un bon aperçu de la distribution et de la surface des dolines sur le plateau de Bure, à une échelle plus étendue que ne le permettrait une cartographie sur le terrain. Par ailleurs, elle permet de mettre en évidence des dolines difficilement visibles, voire non identifiables sur le terrain, telles que les dépressions peu profondes et très évasées ou les dolines situées sous couverture forestière. À partir des résultats cartographiques, une étude du lien entre la répartition des dolines et la fracturation tectonique est menée en utilisant des données de fracturation déjà existantes.

Introduction

Le plateau de Bure en Ajoie est caractérisé par l'absence d'écoulements de surface, un réseau de vallées sèches bien développé et de nombreuses dolines et ouvalas (coalescence de dolines). Dans son étude morphogénétique des vallées sèches du Jura tabulaire d'Ajoie, Braillard (2006, p. 76-79) a pu mettre en évidence, en plusieurs endroits localisés, le lien existant entre dolines et fractures tectoniques, ceci sur la base de photographies aériennes. Il n'existe toutefois jusqu'à présent aucune carte détaillée des

dolines qui permette de comparer de manière systématique, sur l'ensemble du plateau de Bure, leur répartition spatiale avec celle des fractures du substrat rocheux. L'examen de l'image ombrée du modèle numérique de terrain (ci-après MNT), disponible depuis 2011 à une résolution de 2 m, montre que les dolines et dépressions fermées figurant sur la carte géologique au 1/25 000 sont largement sous-représentées. Une nouvelle cartographie, basée sur le MNT, doit donc être réalisée pour obtenir un inventaire le plus complet possible des dolines du plateau de Bure, ceci dans une perspective morphogénétique qui cherche à vérifier le lien de causalité existant entre fractures, dolines, ouvalas et vallées sèches. Pour réaliser cette cartographie détaillée des dolines, deux approches sont possibles :

- Une approche dite « manuelle » qui consiste à délimiter le pourtour de chaque doline interprétée comme telle sur la base de la vision à l'écran de l'ombrage du MNT. Cette approche est relativement chronophage et sujette à interprétation.

- Une approche dite « automatisée » qui, sur la base des données numériques du MNT, permet l'identification des dolines grâce à des outils d'analyse de données spatiales.

- Cette deuxième approche automatisée a fait l'objet d'un récent travail de bachelor (Vallat 2015) dont les questions de recherche étaient les suivantes :

- Dans quelle mesure une cartographie automatisée des dolines du plateau de Bure est-elle réalisable ?

- Y a-t-il un lien entre les alignements de dolines et la fracturation tectonique sur le plateau de Bure ?

- La méthodologie développée pour réaliser cette cartographie des dolines, les résultats obtenus, leur validation, ainsi que les liens avec la fracturation tectonique sont résumés dans le présent article.

Contextes géographique et géologique

La superficie de la zone investiguée du plateau de Bure totalise 79,4 km² (fig. 1 et 2). Elle est délimitée à l'est par l'Allaine et au sud par la vallée sèche principale de la Haute-Ajoie qui relie Porrentruy à Damvant. Au nord-ouest, la zone est délimitée par la frontière entre la Suisse et la France, au-delà de laquelle nous ne disposons pas de modèle altimétrique suffisamment précis pour mener notre étude. Le plateau de Bure, surtout

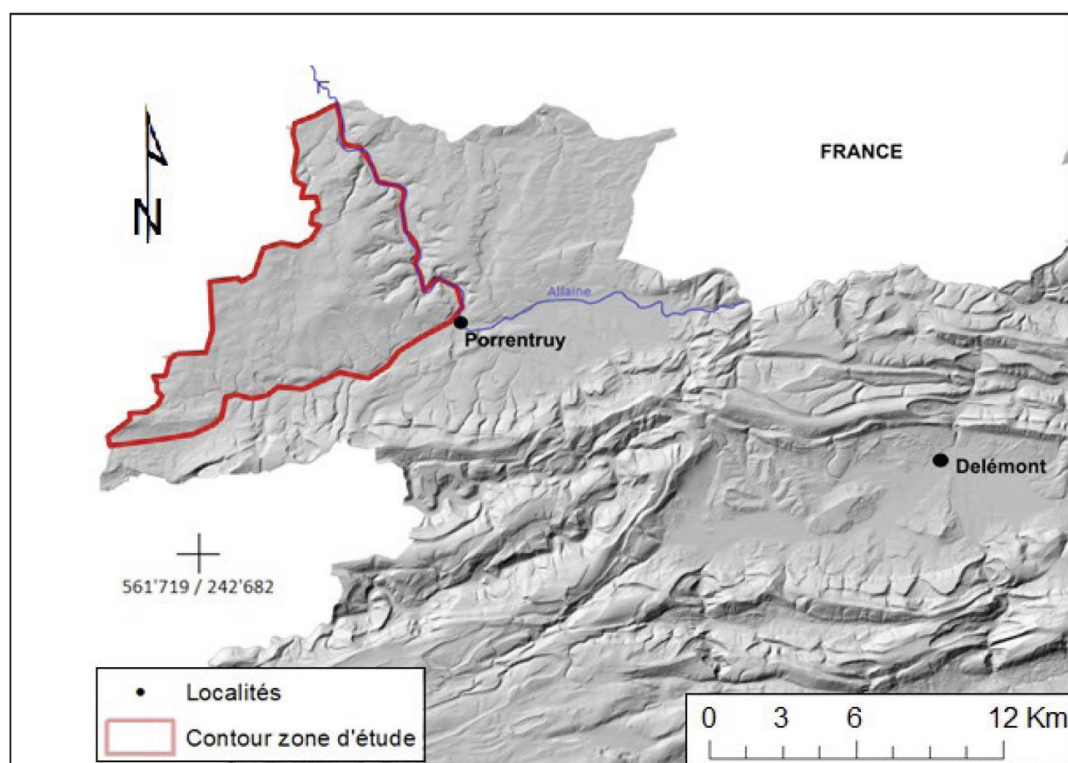


Fig. 1: Situation générale de la zone d'étude reportée sur l'image ombrée du MNT.

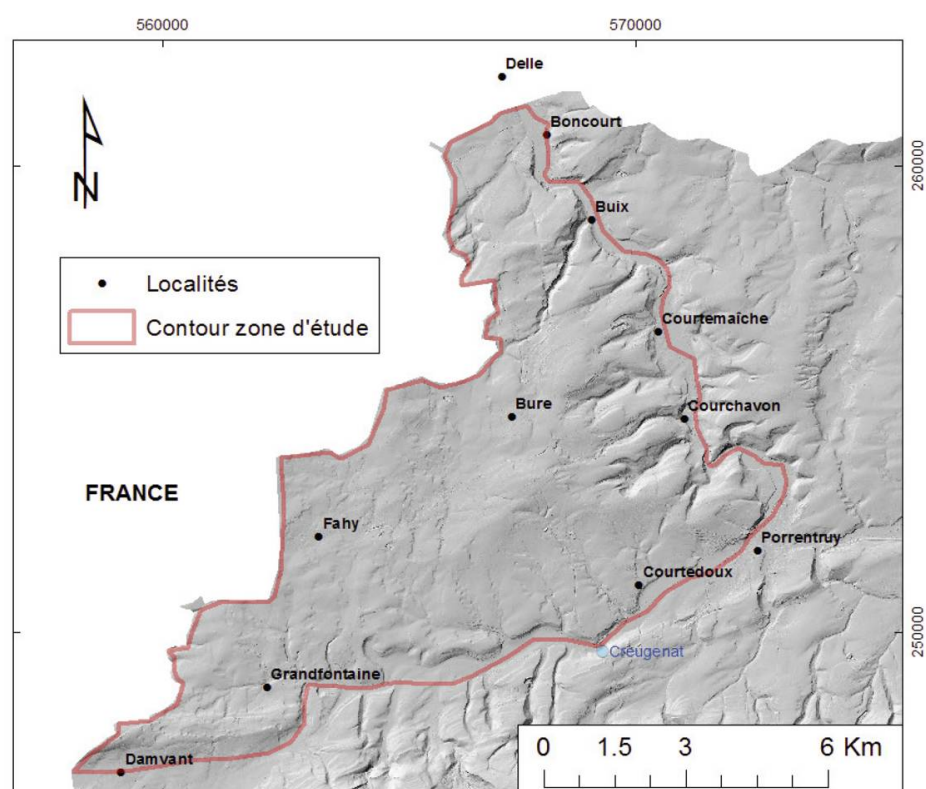


Fig. 2:
Détail de la
zone d'étude
reportée sur
l'image ombrée
du MNT.

recouvert de cultures et de forêts, possède une faible densité de population. Il présente ainsi une part aménagée relativement limitée en superficie, ce qui est favorable pour notre étude.

Les calcaires et marnes jurassiques qui forment le plateau de Bure sont cisailés par une tectonique cassante qui délimite des blocs disposés en touches de piano (Chauve *et al.* 1985; Diebold *et al.* 1963; Liniger 1969; voir fig. 3). Ils sont localement recouverts par des dépôts quaternaires peu épais (< 2 m), essentiellement constitués de lœss mis en place lors de la dernière glaciation, ou de limons lœssiques remaniés à partir des lœss au Tardiglaciaire ou à l'Holocène. Sur le plateau de Bure, la morphologie karstique s'exprime par un réseau rectangulaire de vallées sèches très

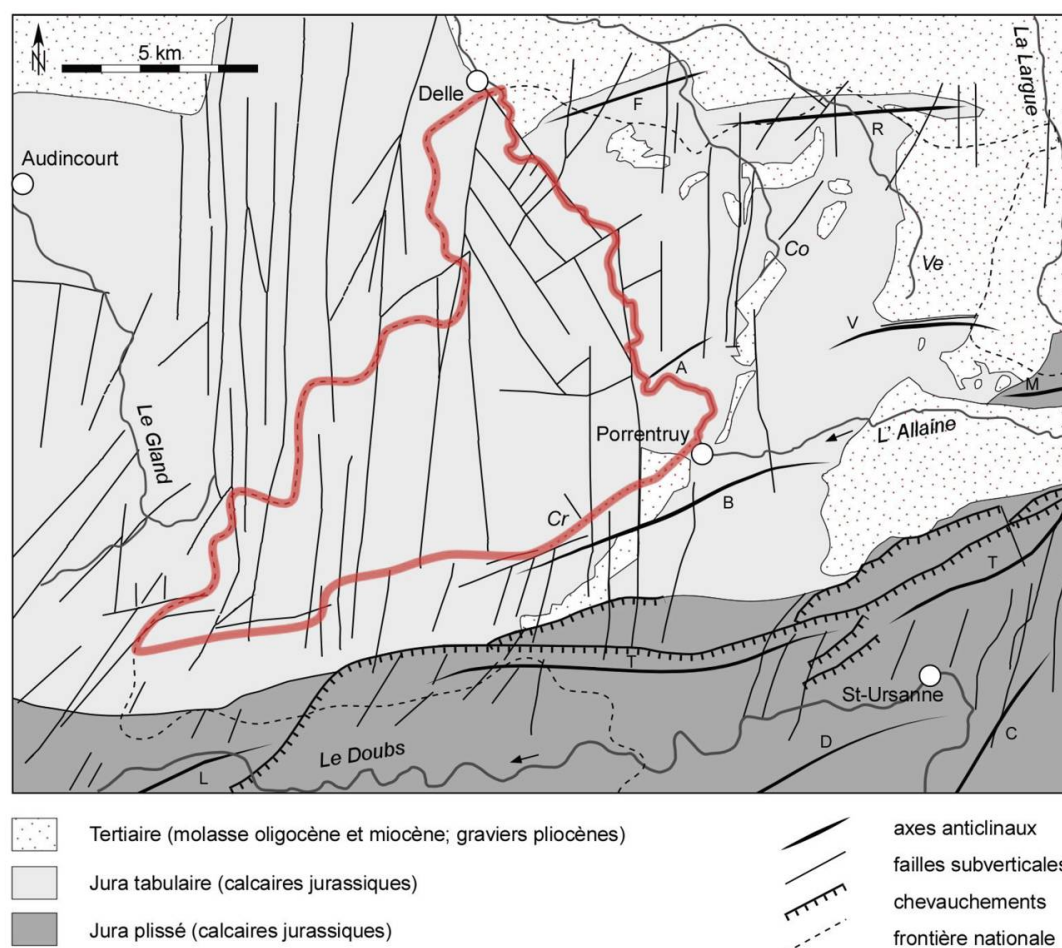
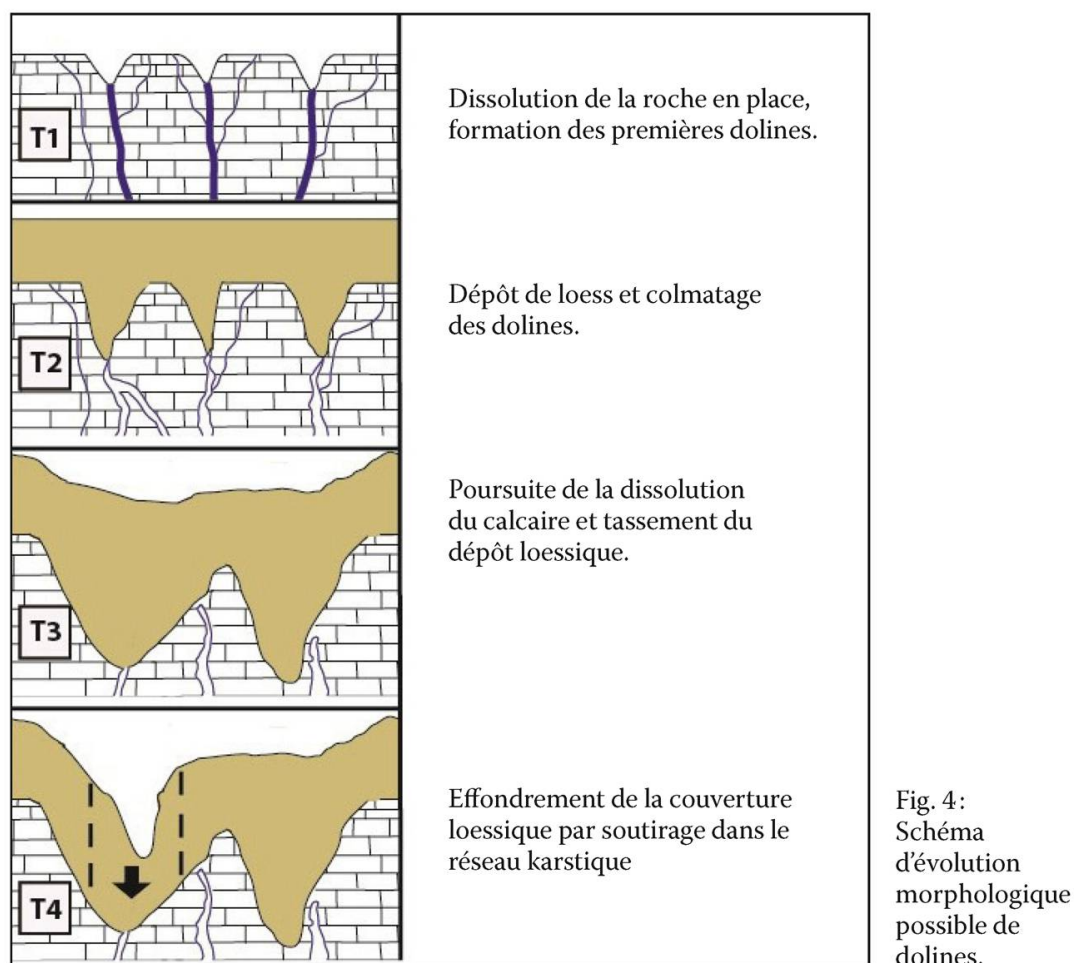


Fig. 3: Carte tectonique de l'Ajoie (compilation d'après Chauve *et al.* 1985; Diebold *et al.* 1963; Liniger 1969), avec la zone de cartographie des dolines (en rouge) sur la partie helvétique du plateau de Bure. Cours d'eau: Co: La Cœuvatte, Ve: La Vendline, Cr: cours d'eau temporaire du Creugenat. Anticlinaux: F: Florimont, R: Réchésy, V: Vendlincourt, M: Morimont, A: Pont d'Able, B: Banné, T: Mont Terri, D: Clos du Doubs, C: Caquerelle, L: Lomont.

émoussées. Les dolines y sont nombreuses et localement alignées sur les directions des vallées sèches. Du sommet du plateau vers ses marges, le réseau de vallées sèches gagne en densité et évolue vers un système radial de vallées sèches bien incisées. La rivière souterraine Milandraine, qui draine une bonne partie du plateau vers le nord, se développe selon deux orientations préférentielles qui coïncident avec les directions des vallées sèches en surface (Braillard 2006).

Dolines

Les dolines sont des dépressions circulaires fermées de diamètre et de profondeur variable. En Ajoie, les formes rencontrées mesurent de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de diamètre pour des profondeurs de quelques décimètres à quelques mètres. Il s'agit de formes karstiques de surface qui résultent de la dissolution des roches calcaires



par les eaux météoriques légèrement chargées en dioxyde de carbone. La coalescence de plusieurs dolines originellement individualisées forme une ouvala, dont la forme peut être plus ou moins circulaire ou plus ou moins allongée.

En Ajoie, la plupart des dolines sont partiellement voire totalement colmatées par des dépôts loessiques (Braillard 2006, Leuenberger & Rauber 2014). Les dolines dans lesquelles aucun soutirage karstique ne s'est produit après le dépôt des loess peuvent par conséquent n'être que peu, voire pas du tout (selon l'importance de la dissolution karstique postérieure au colmatage) marquées par une dépression topographique en surface (fig. 4). Cela rend leur détection particulièrement difficile tant sur le terrain qu'à l'aide d'un MNT. Il faut donc garder à l'esprit que notre démarche de cartographie automatisée ne peut pas détecter les dolines totalement comblées qui n'auraient été ni réactivées par soutirage karstique ni agrandies par dissolution après leur colmatage.

Fracturation tectonique

Les assises calcaires du plateau de Bure sont intensément fracturées selon cinq systèmes de fractures subverticales observées à l'échelle de l'affleurement (Braillard 2005): F1 ($N170^\circ \pm 15^\circ$), F2 ($N125^\circ \pm 10^\circ$), F3 ($N025^\circ \pm 10^\circ$), F4 ($N070^\circ \pm 5^\circ$) et F5 ($N100^\circ \pm 10^\circ$). S'y ajoutent trois familles de failles kilométriques également subverticales: FI ($N005^\circ \pm 5^\circ$), FII ($N145^\circ \pm 5^\circ$) et FIII ($N050^\circ \pm 10^\circ$). Ces dernières, qui sont reportées sur les cartes géologiques, ne sont toutefois jamais observées à l'échelle de l'affleurement. Il est ainsi probable que ces accidents FI, FII et FIII correspondent à de grands décrochements qui sont exprimés sur le terrain par des fissures de cisaillement de deuxième ordre F1 à F4 (fig. 5).

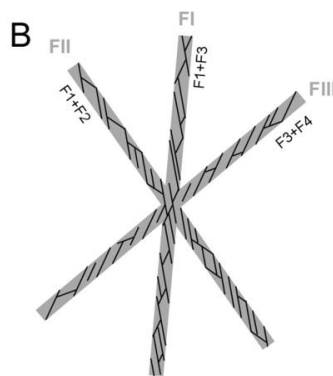
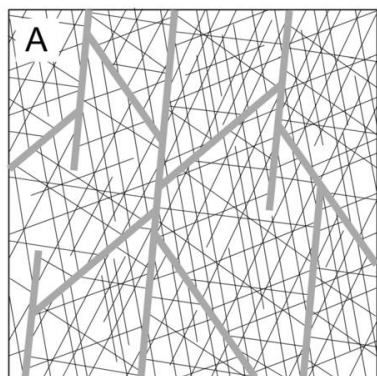


Fig. 5: Fracturation du plateau de Bure. A: schéma synthétique sans échelle, vue en plan (les accidents kilométriques sont en grisé); B: proposition schématique de relation géométrique entre les grands accidents kilométriques (FI, FII et FIII) et les fractures visibles à l'échelle de l'affleurement (F1 à F4). Modifié d'après Braillard 2005.

Lien entre la fracturation, les dolines et les vallées sèches

Les résultats de plusieurs travaux dont Aubert (1969), Siméoni & Jamier (1975) et Braillard (2006), montrent que les dolines se développent de manière privilégiée le long des fractures tectoniques. Ce développement résulte d'une combinaison entre l'orientation et la densité des fractures d'une part et la direction des écoulements superficiels et épikarstiques d'autre part. Les vallées sèches semblent ainsi s'être formées par la coalescence de dolines, alignées en chapelets le long des fractures parallèles à l'écoulement des eaux superficielles.

Méthodologie

Le MNT utilisé est le modèle altimétrique numérique *swissALTI 3D*, qui décrit la surface du terrain sans végétation ni constructions (Swisstopo 2015). Il est construit à partir de mesures laser effectuées depuis un aéronef. Sa résolution est de 2 m, sa précision dans les 3 dimensions de l'espace est de $\pm 0,5$ m pour les altitudes inférieures à 2 000 m au-dessus du niveau de la mer. L'année des mesures du *swissALTI 3D* pour l'Ajoie est 2011.

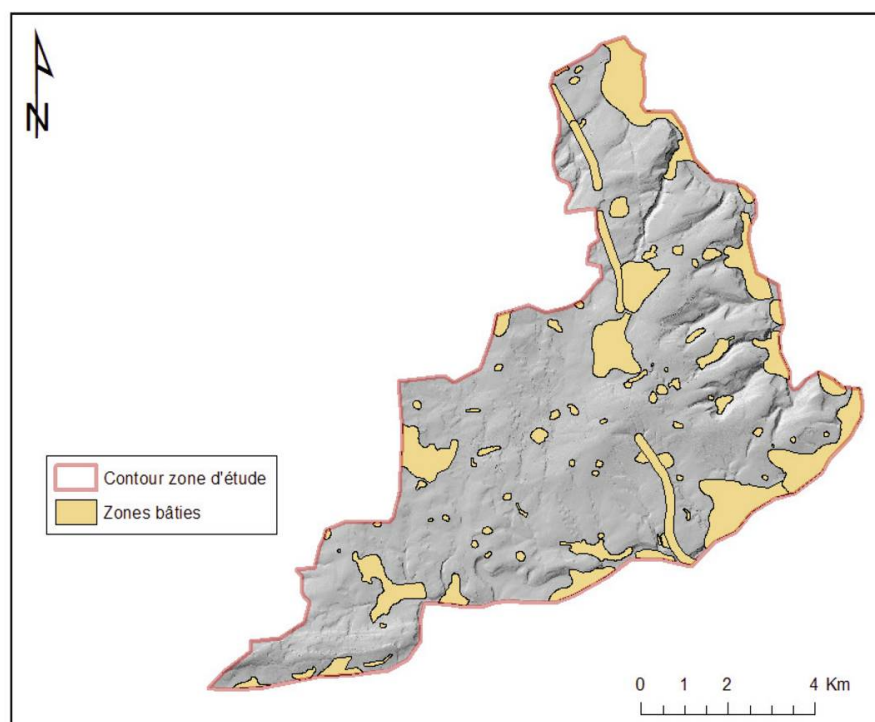


Fig. 6:
Zones bâties (en couleur) qui ont été exclues de l'analyse spatiale.

Un filtre passe-bas a été appliqué pour permettre une réduction optimale des anomalies et des hétérogénéités d'échelles non pertinentes. Pour la visualisation, un ombrage a été appliqué au MNT, soit une source lumineuse virtuelle qui éclaire le relief avec un azimuth de 315° N. et un angle de 45° par rapport à l'horizontale.

La zone d'étude a ensuite été analysée visuellement, avec l'aide de l'ombrage du MNT, des orthophotos, et des couches vectorielles de Swisstopo relatives aux aménagements anthropiques. Les surfaces contenant des bâtiments, routes et autres aménagements qui modifient la topographie du terrain naturel ont été exclus de la zone d'étude (fig. 6).

Choix de la zone test

La zone test (fig. 7) sert de référence pour la comparaison entre les différents modèles de cartographie automatisée d'une part et la cartographie manuelle des dolines d'autre part. Elle se situe au nord de Chevenez et a été choisie pour sa bonne représentativité de la zone d'étude. La cartographie manuelle a été réalisée visuellement sur la base de la vision à l'écran de l'ombrage du MNT. Plusieurs images du relief (avec variations angulaires de la source lumineuse) ont été utilisées, ceci afin d'être le plus

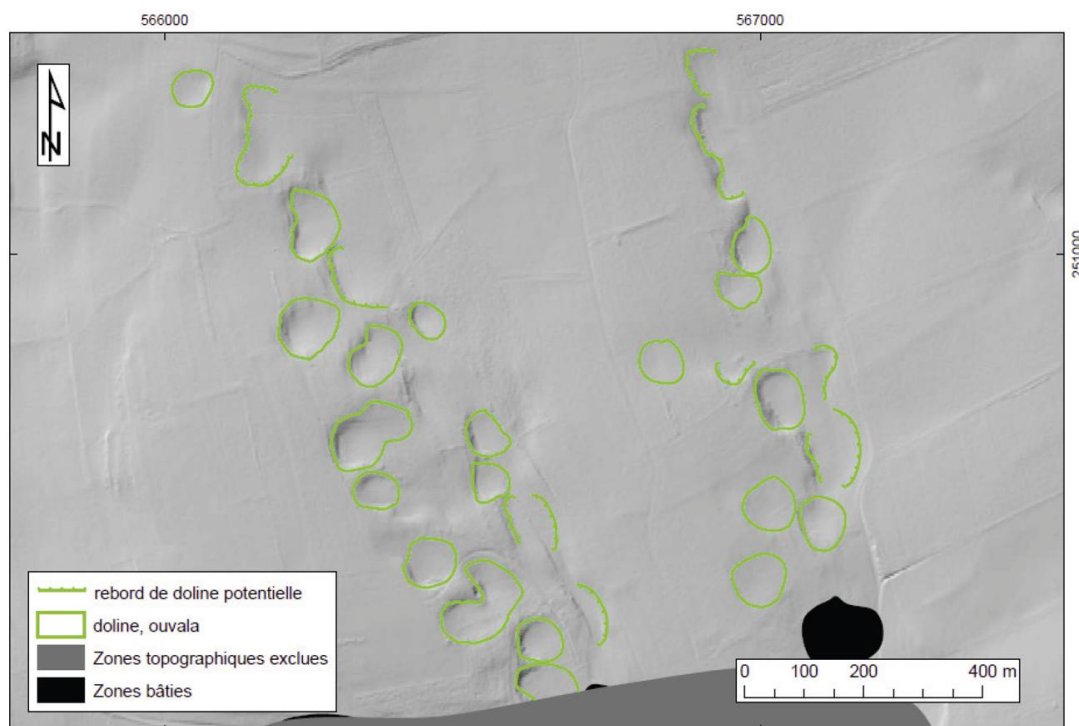


Fig. 7: Cartographie manuelle des dolines de la zone test, située au nord de Chevenez.

exhaustif possible dans la détection des dolines. Il faut toutefois relever que la cartographie manuelle est empreinte d'un certain degré d'interprétation, qui dépend notamment de l'expertise de l'opérateur. De plus, aucune visite sur le terrain n'a eu lieu préalablement.

Paramètres d'identifications des dolines dans le logiciel

Les dolines du plateau de Bure sont de dimensions variables, de quelques mètres de diamètre à plusieurs centaines pour les plus grandes coalescences. Certaines sont des dépressions fermées tandis que d'autres peuvent être ouvertes, partiellement comblées, ou désagrégées. La difficulté réside donc dans l'identification des paramètres géométriques et statistiques qui permettent de rendre compte de la variété des formes.

La détection de dolines pose naturellement la question de la forme de la représentation cartographique : est-ce la localisation par un point, la surface, ou le contour ou même le volume qui est recherchée ? Considérant les deux questions de recherche, il y a deux buts : d'une part, la cartographie de dolines est le plus clairement représentée par des surfaces. D'autre part, la mise en évidence des alignements de dolines (à mettre en lien avec la fracturation) se fait plus aisément avec des points représentant le centre des dolines. Les deux types de représentation (points et surfaces) sont donc pertinentes.

Modélisation

Trois approches ont été élaborées pour modéliser les dolines et les ouvalas : le remplissage, la courbure et les statistiques de surfaces. Elles se basent sur les particularités morphométriques des dolines de la zone d'étude.

Méthode « remplissage »

Une dépression fermée correspond à une ou plusieurs cellules du MNT qui sont plus basses en altitude que toutes les autres les entourant. C'est donc une statistique de surface recherchant des points minimaux qui permet de repérer ces dépressions. Une fois ces points repérés, ils sont remplis virtuellement jusqu'à leur niveau de débordement (fig. 8). Le

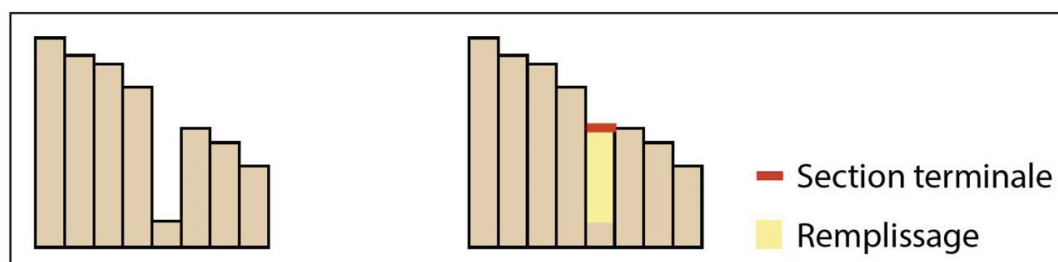


Fig. 8: Illustration en 2D du fonctionnement de l'outil remplissage (ArcGIS, 2010).

volume de la dépression fermée peut alors être calculé, la surface visible de la doline sur le modèle est la section terminale de ce remplissage.

L'outil a été paramétré pour remplir les dépressions de plus de 20 cm de profondeur uniquement. Cette valeur est un choix résultant d'un compromis entre un nombre de dolines surestimé comportant beaucoup d'artefacts et un nombre de dolines sous-estimé, omettant des dépressions.

Cette méthode est fiable et n'établit quasiment pas d'identifications erronées. Elle connaît toutefois des restrictions importantes pour les dolines partiellement ouvertes qui ne sont donc pas détectées par la méthode.

Méthode « courbure »

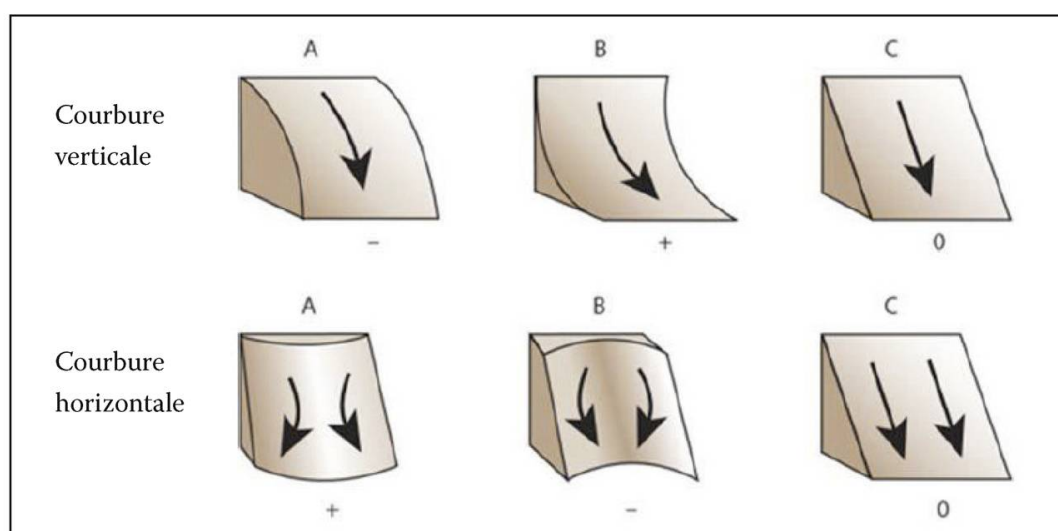


Fig. 9: Illustration des caractéristiques des courbures (adapté de: Kimerling *et al.* 2012).

La courbure est définie comme la dérivée seconde de la surface, soit la pente de la pente. Il existe deux types de courbures dans un espace en trois dimensions (fig. 9) : la courbure verticale qui mesure le changement de pente, la courbure horizontale qui mesure le changement perpendiculairement à la pente.

Les dolines présentent donc une courbure horizontale négative et une courbure verticale positive au fond et négative sur les rebords, ce qui est exprimé par les schémas B- et A- vers B+ (fig. 9).

La méthode « courbure » résulte d'une combinaison entre la courbure horizontale et la variation de la courbure verticale. Au niveau opérationnel, la courbure est dépendante de la résolution du MNT ; la résolution de 2 m est toutefois inadaptée pour le calcul de la courbure horizontale. Pour éliminer des effets de courbure à une échelle non pertinente pour les dolines, la résolution des cellules a été changée de 2 m à 6 m de côté pour le calcul de la courbure horizontale uniquement.

La courbure verticale a été calculée puis la mesure de l'écart-type a été faite sur un rayon de 10 m autour de chaque cellule. Ce rayon reflète la longueur moyenne des pentes constatées sur la zone d'étude. Cette opération met en évidence les changements de courbure, soit la dérivée troisième de la pente. Celle-ci est intéressante, car une doline présente un changement de courbure verticale spécifique, passant de convexe au sommet à concave au fond.

Ensuite, l'outil *Plan curvature* a été appliqué sur le MNT réduit à une résolution de 6 m pour obtenir la courbure horizontale. Celle-ci a été reclassifiée pour graduer les valeurs selon leur pertinence. Un filtre majoritaire y a été appliqué pour éliminer les pixels isolés, non pertinents.

Les courbures horizontales et verticales ont ensuite été reclassifiées pour garder les valeurs intéressantes. Ces nouvelles valeurs ont été multipliées entre elles. Le produit formant une distribution continue qui fait ressortir les courbures intéressantes, il suffit alors de sélectionner les classes de valeurs pertinentes visuellement et de les extraire en polygones.

Méthode « statistiques de surfaces »

L'idée de la méthode « statistiques de surfaces » est de faire des statistiques zonales d'altitude : l'altitude moyenne d'une zone est comparée à l'altitude moyenne d'une zone contenue dans la première. Ainsi une surface peut être classifiée comme globalement plus basse, égale, ou plus

haute que la zone dans laquelle elle est contenue. Le paramétrage des zones est crucial pour faire ressortir les formes du paysage recherchées, la forme et la taille de la zone soumise aux statistiques doivent être adaptées aux formes recherchées.

La méthode utilisée s'inspire de l'extension développée par Jenness Enterprises (2006). Elle repose sur une comparaison entre 2 zones circulaires autour de chaque cellule, la plus petite d'un rayon de 40 m et la plus grande d'un rayon de 80 m. Les rayons des zones ont été choisis en relation avec les particularités morphométriques des dolines de la zone d'étude. L'indice produit ne fait pas la distinction entre les dépressions fermées et les zones basses non fermées. Il est donc intéressant de ce point de vue, car il donne un bon aperçu en calculant la déviation des altitudes

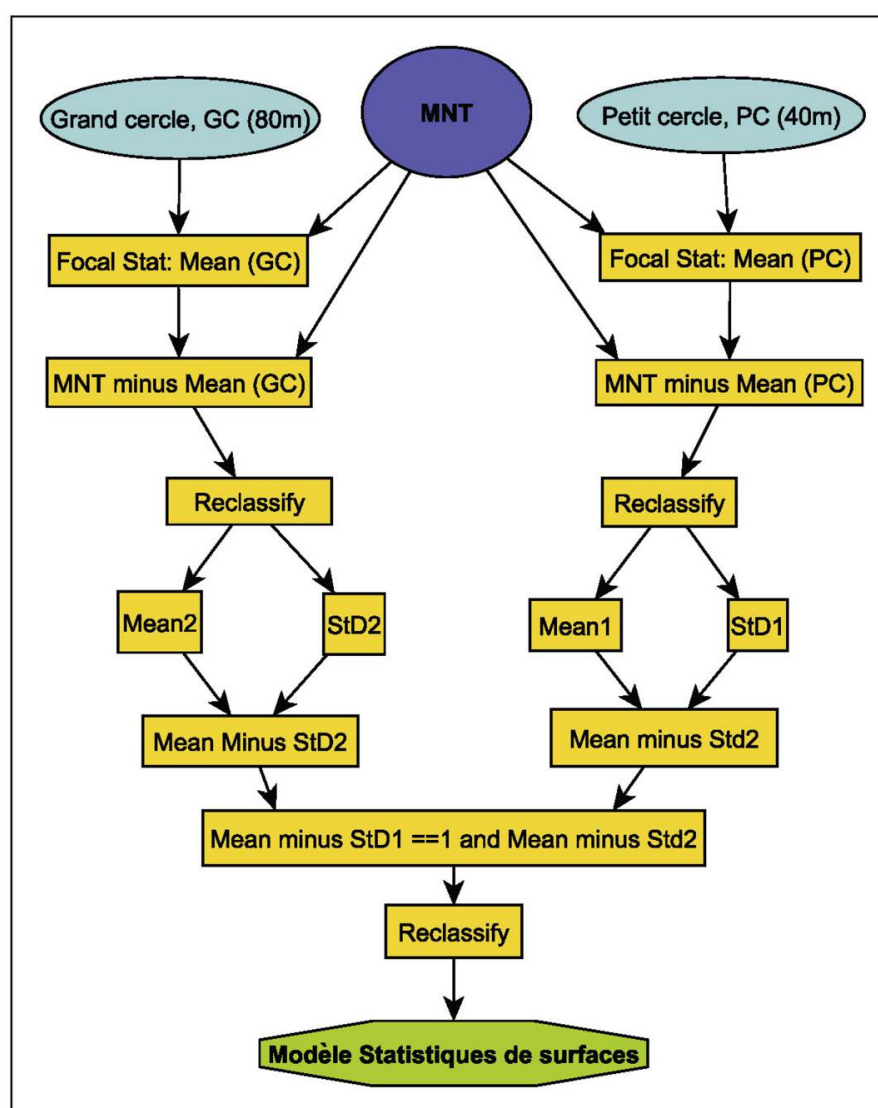


Fig. 10: Schéma de la méthode « statistiques de surfaces » avec les noms des outils dans ArcMap.

par rapport à la moyenne. Les étapes de modélisation sont résumées sur la figure 10. La méthode n'est pas adaptée à la détection de dolines en relief escarpé. Elle est adéquate pour une zone d'étude relativement plane, telle qu'un plateau.

Résultats

Les résultats sont présentés selon les différentes approches de modélisation, sous la forme de cartes qui sont comparées individuellement à la cartographie manuelle.

Méthode « remplissage »

Cette méthode a permis de repérer les dolines correspondant à des dépressions fermées. La plupart des zones de remplissage sont circulaires avec parfois un allongement dans une direction préférentielle, le long de laquelle il est intéressant de remarquer qu'il y a souvent d'autres remplissages, parfois également allongés (fig. 11). Ces dispositions se retrouvent de manière récurrente.

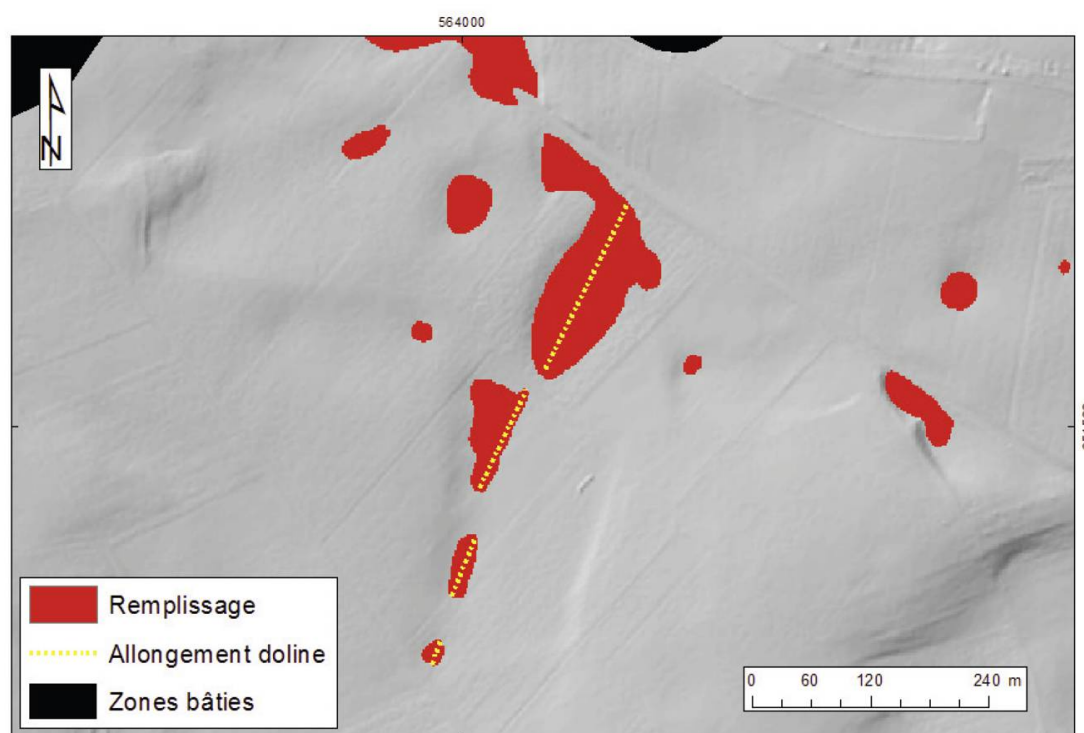


Fig. 11 : Modèle « remplissage », détail de la zone centrale montrant des dolines allongées qui présentent une orientation préférentielle.

La superficie des remplissages va de quelques mètres carrés à 140 600 m² pour une dépression au sud-ouest (fig. 12). Cela met en évidence qu'il y a une grande diversité de dépressions fermées. Les zones avec des dépressions fermées majeures, visibles sur la figure 13 sont probablement des ouvalas, c'est-à-dire des coalescences d'un nombre important de dolines. Les rebords en arc de cercle du large remplissage elliptique de 450 m sur 300 m visible sur la figure 12 en sont des indicateurs vraisemblables.

La méthode remplissage est particulièrement intéressante pour les larges dépressions fermées, avec des pentes douces, qui ne sont pas mises en évidence par les autres méthodes. De plus, elle est la seule méthode qui donne des résultats viables en zones escarpées.

Sur la zone test (fig. 14), 16 dolines sur 30 cartographiées manuellement sont repérées par la méthode «remplissage». En résumé, bien qu'elle n'identifie que les dépressions fermées, cette méthode est intéressante, car elle ne fait que très peu de fausses identifications et est indépendante de la pente, ce qui la rend applicable sur tout type de topographie.

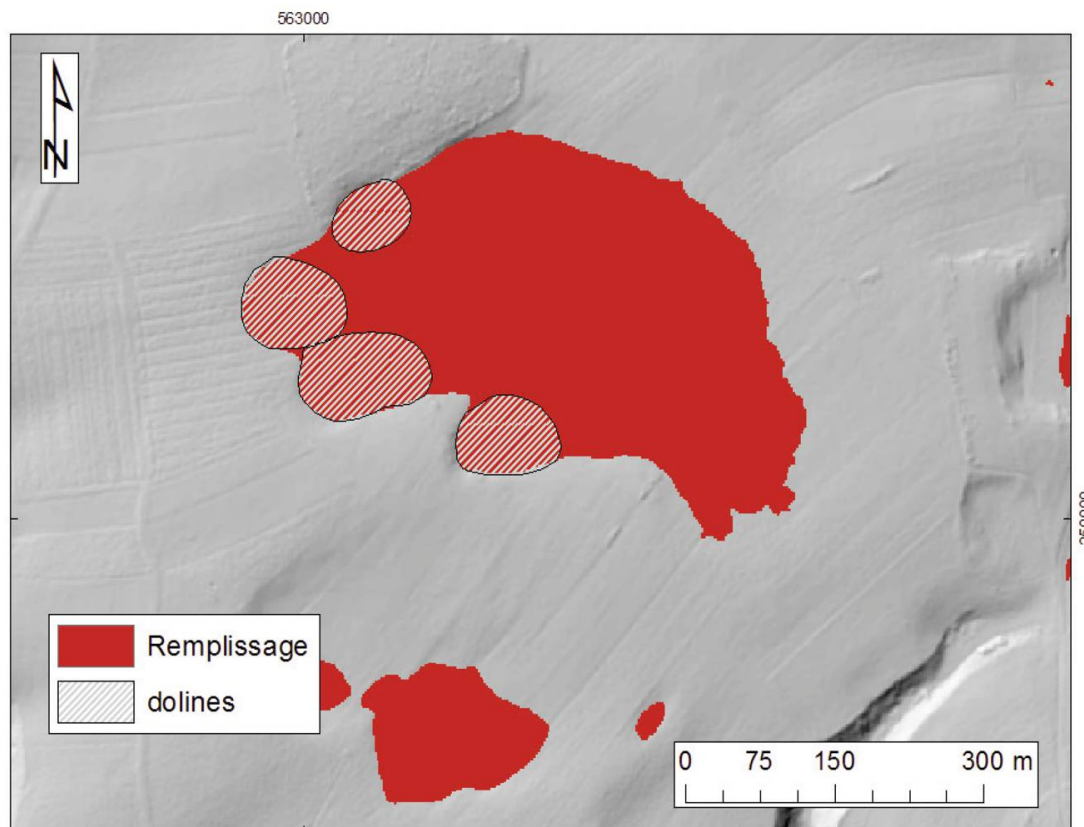


Fig.12: Modèle «remplissage», rebords de dolines en bordure d'une ouvala, zone S.O.

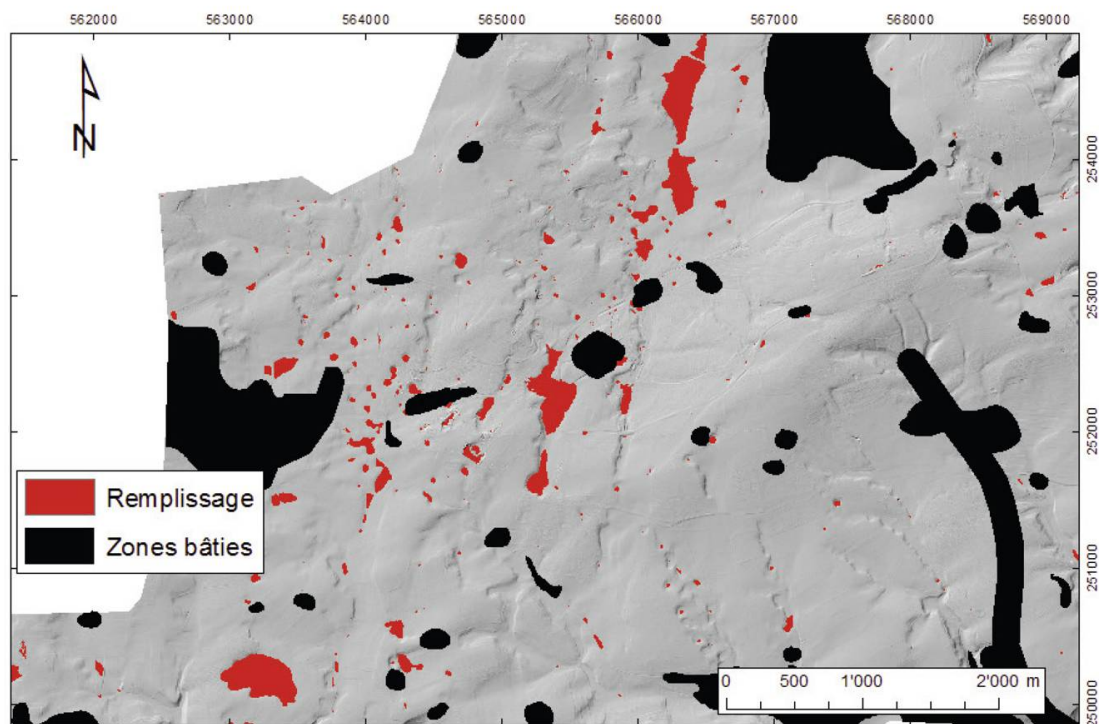


Fig. 13: Modèle « remplissage », zone centrale.

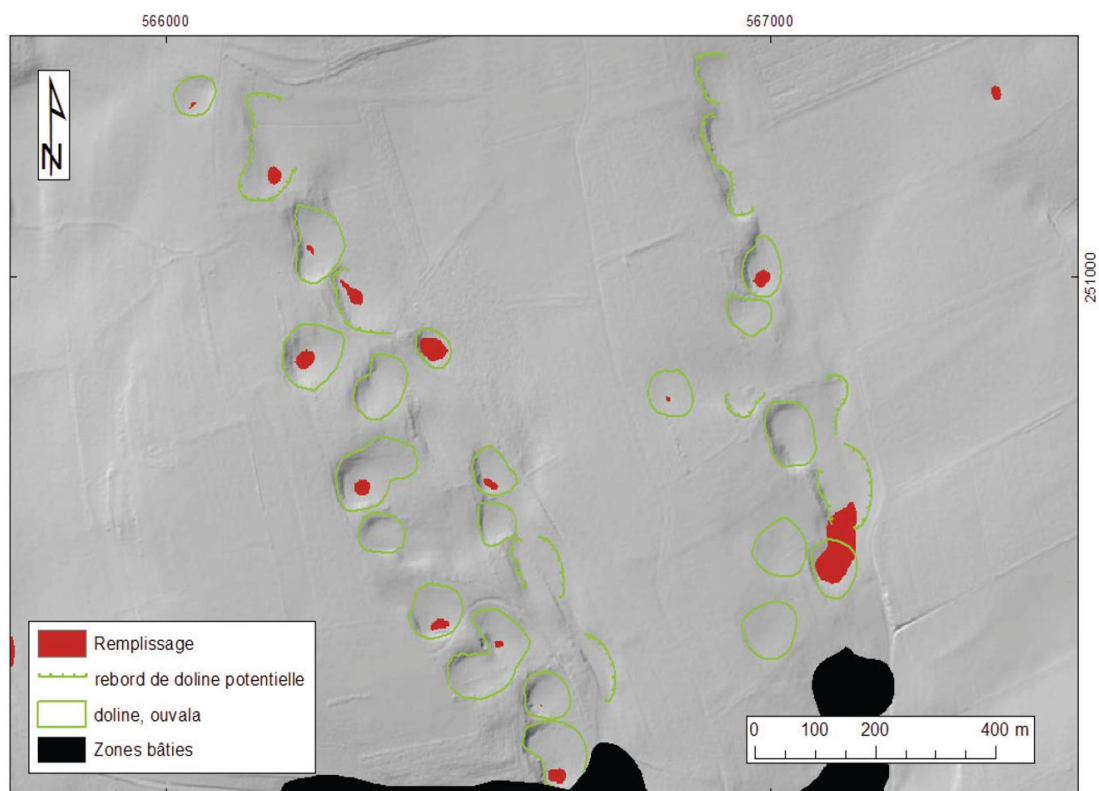


Fig. 14: Polygones du modèle « remplissage », Zone test.

Méthode « courbure »

Les polygones (fig. 15) de la méthode « courbure » représentant potentiellement des dolines sont près de 12 000 sur la zone d'étude entière, mais seulement 1 928 sur la zone définie comme pertinente pour la méthode (c'est-à-dire sans les surfaces aménagées. Cela démontre la limitation de cette méthode aux zones globalement planes et non bâties. Chacun de ces polygones représente une zone de courbures verticale et horizontale correspondant potentiellement à une doline. Ils ne représentent pas forcément une doline entière, mais peuvent parfois n'en représenter qu'une portion. Il peut donc y avoir plusieurs polygones pour une même dépression, comme cela est visible sur la figure 16. Cette méthode présente donc l'avantage de mettre en évidence les anciennes dolines qui sont à l'origine des ouvalas.

Sur la zone test, la méthode courbure identifie 24 dolines sur les 30 cartographiées manuellement (fig. 16). Elle détecte quelques possibles dolines non repérées visuellement sur la base du MNT, et identifie parfois des courbures qui ne sont pas des dolines, le long d'axes routiers par exemple. La courbure, paramétrée de manière spécifique à la géométrie

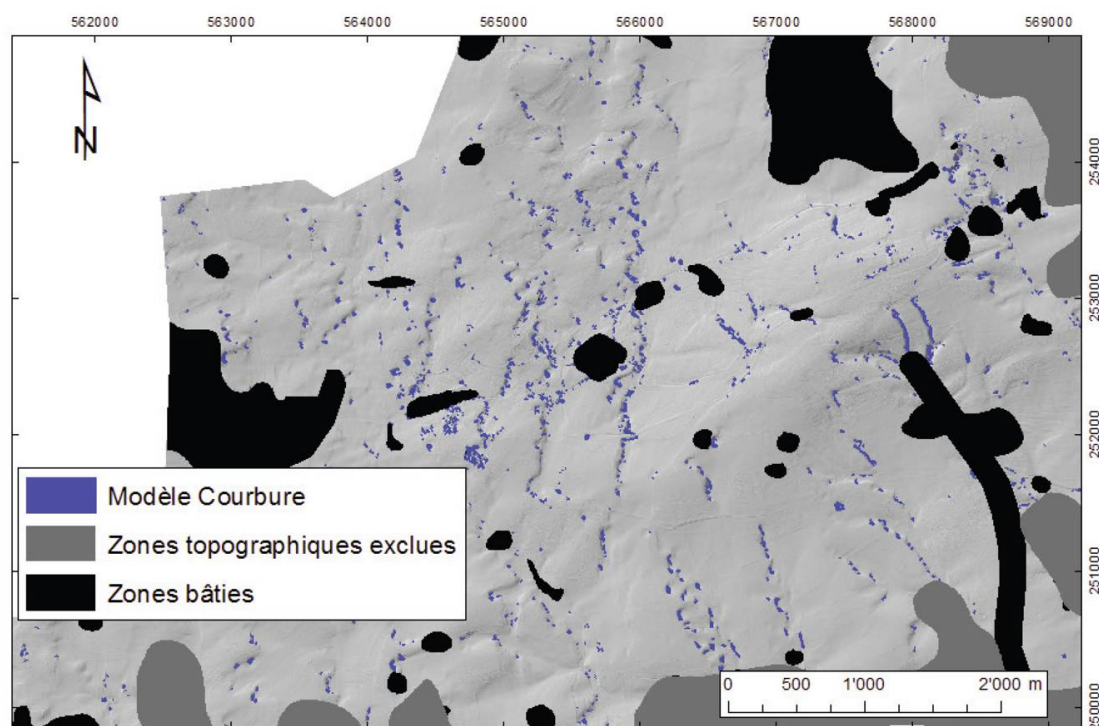


Fig. 15: Polygones du modèle « courbure », zone centrale.

Cartographie automatisée des dolines de Bure

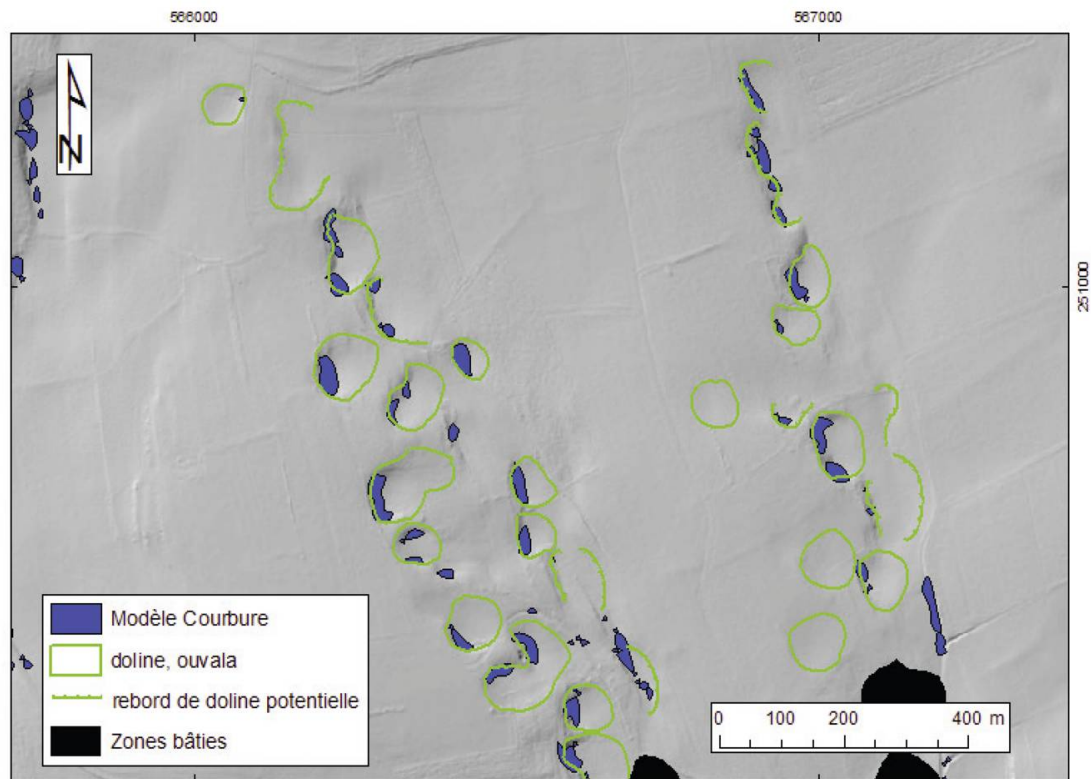


Fig. 16: Polygones du modèle «courbure», zone test.

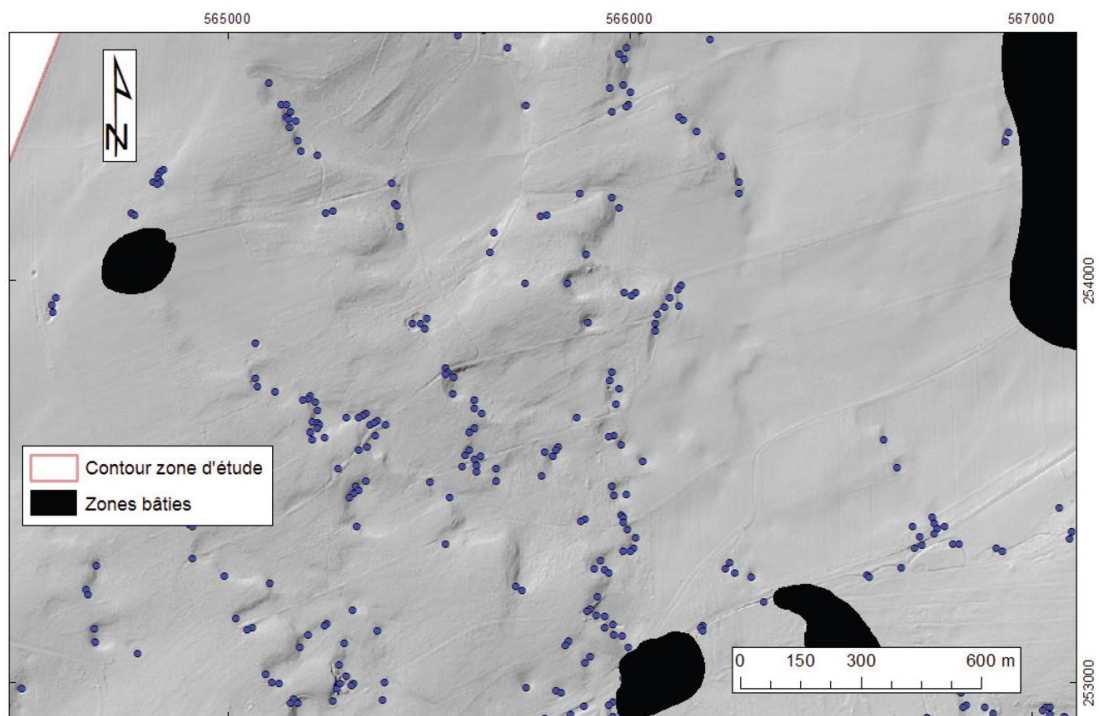


Fig. 17: Centroïdes des polygones du modèle «courbure», détail de la zone centrale.

recherchée, en fait un indicateur très pertinent sur une étendue relativement plane tel que la zone centrale et ouest de la région d'étude.

Elle permet de localiser une partie importante des dolines, sans toutefois en donner le contour. Pour repérer des alignements de dolines, plutôt que le contour de chaque doline, c'est une analyse globale de la distribution des centroïdes des surfaces du modèle « courbure » qui est pertinente (fig. 17).

Méthode « statistiques de surfaces »

Cette méthode a produit 1073 polygones sur la zone d'étude, soit autant de dolines ou ouvalas potentielles. La superficie moyenne de chacune de ces formes est de 1 008 m² pour une surface totale de 1,082 km² (fig. 18).

La méthode « statistiques de surfaces » identifie 27 dolines sur les 30 cartographiées manuellement (fig. 19). Elle détecte plusieurs dolines potentielles non repérées visuellement sur la base du MNT.

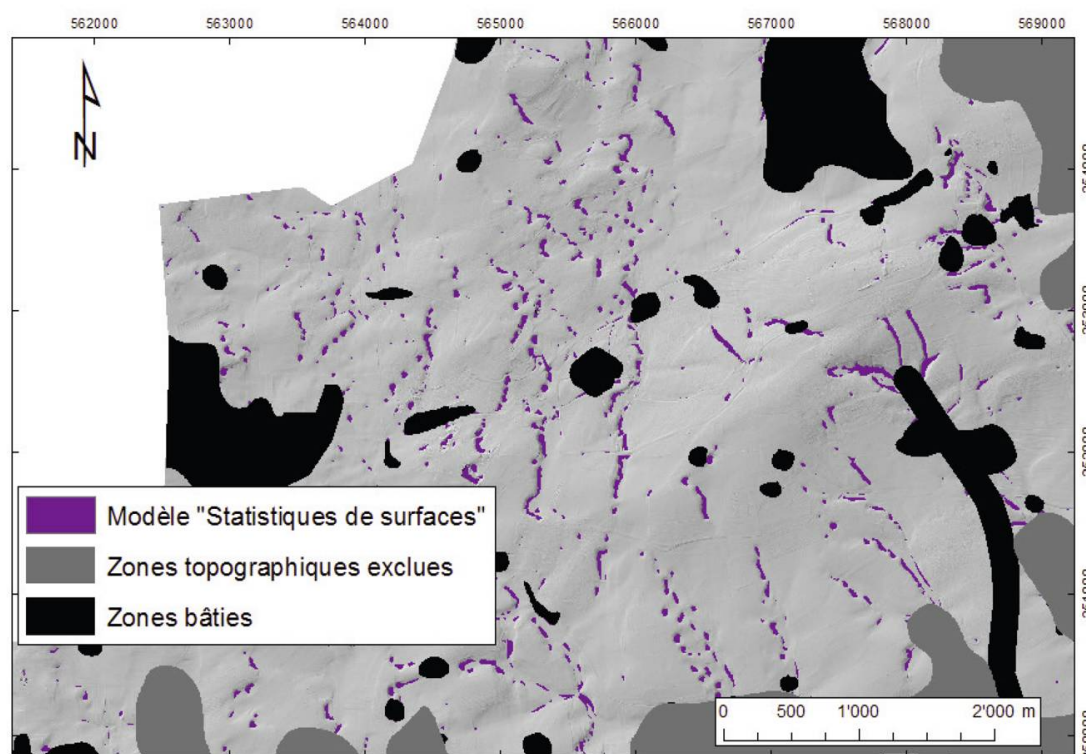


Fig. 18: Modèle « statistiques de surfaces », zone centrale.

Cartographie automatisée des dolines de Bure

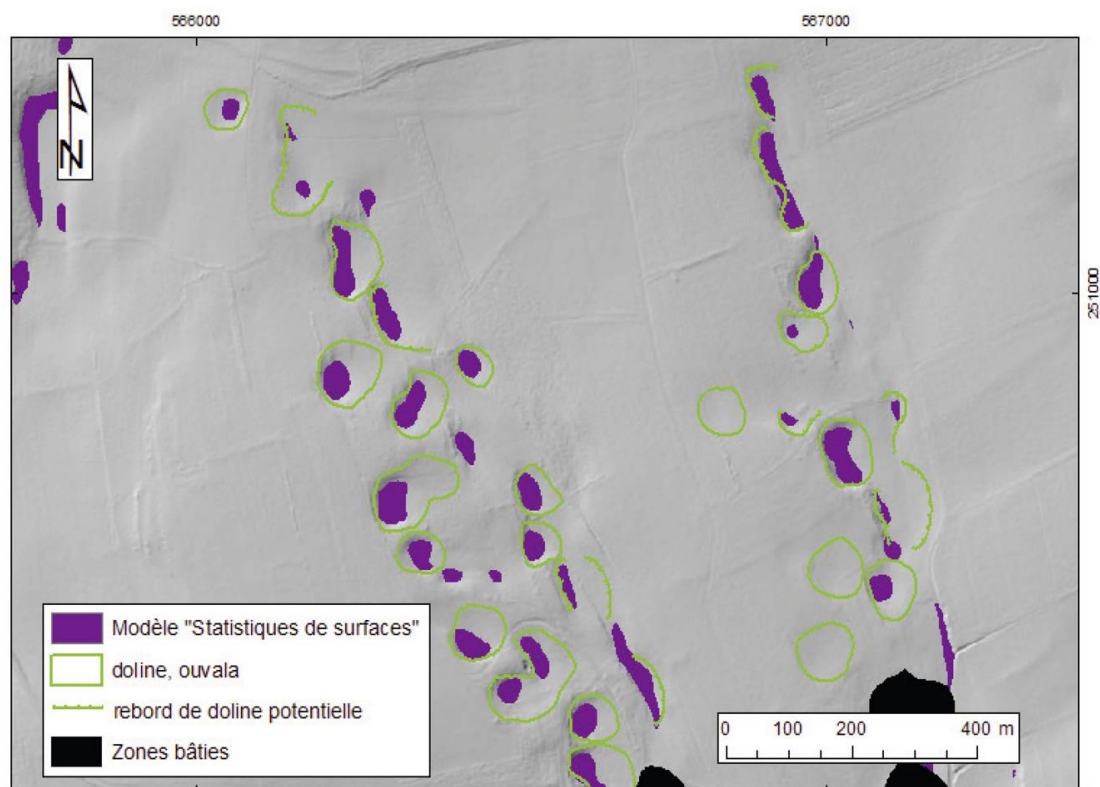


Fig. 19: Polygones du modèle « statistiques de surfaces », zone test.

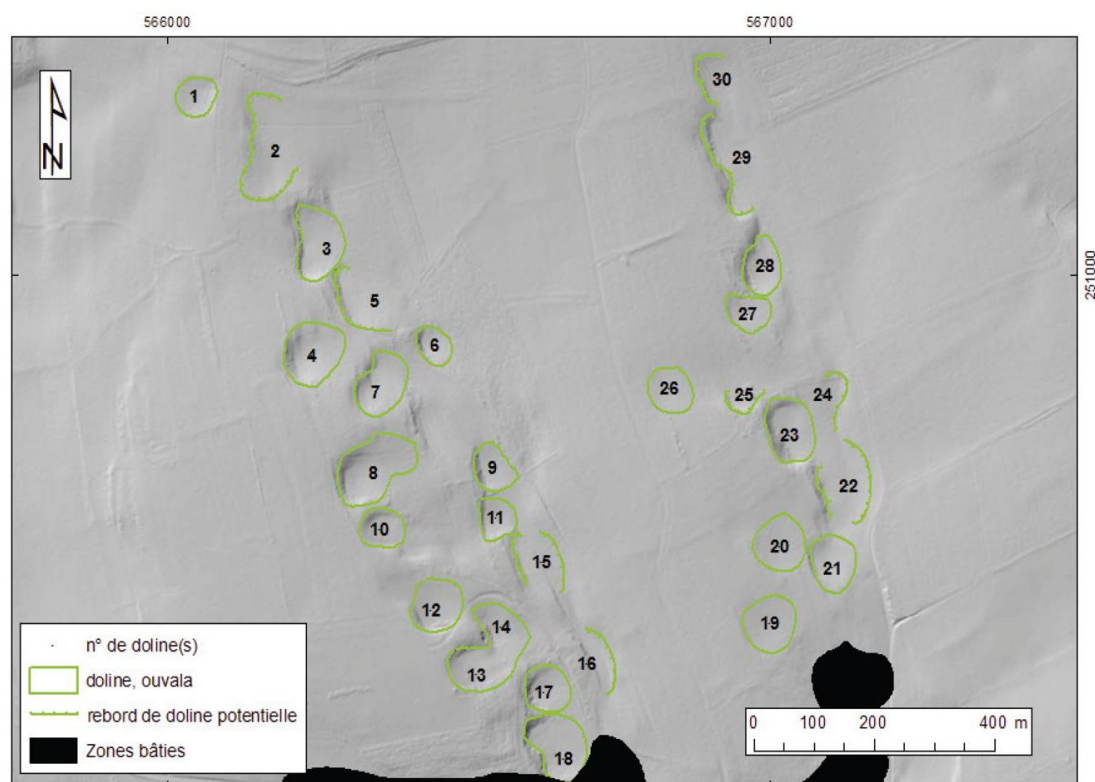


Fig. 20: Dolines de la zone test, numérotées de 1 à 30.



Fig. 21: Vue sur la doline n° 21 depuis l'est, avec contour de la dépression topographique en traitillés. Coordonnées 567 100/ 250 550. Photo R. Vallat, 05.07.2015.



Fig. 22: Vue sur la doline n° 24 depuis l'ouest, avec contour de la dépression topographique en traitillés. Coordonnées 567 110/250 830. Photo R. Vallat, 05.07.2015.

Illustrations de terrain

La reconnaissance des dolines sur le terrain est généralement favorisée par l'absence de couverture végétale (forêt, cultures de céréales) et la lumière rasante. Les dolines peu profondes et très évasées ou celles situées en forêt sont généralement invisibles au regard. Dans ces cas, seule l'utilisation du MNT permet de les détecter.

La doline n° 21 (fig. 21), morphologiquement bien exprimée sur le terrain, est identifiée par toutes les méthodes, alors que la doline n° 24 (fig. 22), peu profonde et très évasée, n'a été identifiée que par la méthode « statistiques de surfaces ».

Discussion

Évaluation des méthodes de cartographie automatisée

La cartographie manuelle réalisée sur la zone test est utilisée comme référence qui est comparée aux modèles produits par les trois méthodes de cartographie automatisée. Les résultats de cette analyse comparative sont résumés dans le tableau 1, qui appelle les explications suivantes :

- Les erreurs de commission apparaissent quand des formes sont incorrectement identifiées comme dolines.
- Les erreurs d'omission surviennent chaque fois qu'une doline identifiée manuellement n'est pas cartographiée par le modèle.
- Taux de correspondance [%]=

$$\frac{\text{identifications positives parmi la cartographie manuelle}}{\text{somme des dolines cartographiées+erreurs de commissions de la méthode}} * 100$$

En considérant les trois méthodes sur la zone test (fig. 23), 28 dolines sur les 30 cartographiées manuellement ont été positivement identifiées, 2 dolines n'ont pas été identifiées et 8 ont été faussement identifiées par l'une des méthodes au moins, soit 74 % d'identifications correspondantes.

Ces résultats sont toutefois relatifs dans la mesure où la cartographie manuelle présente un certain degré d'interprétation, comme discuté plus haut. Ainsi, une observation détaillée sur le terrain a montré, a posteriori,

	Cartographie manuelle	A) Remplissage	B) Courbure	A ou B	C) Statistiques de surfaces	Combinaison A ; B ; C
Identifications dolines et rebords de doline potentielle	30	15	24	27	27	28
Erreur de commission	?	0	7	6	6	8
Erreur d'omission	?	15	6	3	3	2
Taux de correspondance avec cartographie manuelle	-	50 % (15/30)	65 % (24/37)	75 % (27/36)	75 % (27/36)	74 % (28/38)

Tableau 1 : Comparaison des trois modèles et de la cartographie manuelle sur la zone test. Pour la combinaison des méthodes A ; B ; C, les mêmes erreurs d'identification survenues dans plusieurs méthodes ne sont comptabilisées qu'une seule fois. La méthode « remplissage » identifie 50 % des dolines cartographiées manuellement et n'identifie aucune doline faussement. La méthode « courbure » présente une correspondance de 65 % avec la cartographie manuelle, mais c'est la méthode qui fait le plus de fausses identifications. La méthode « statistiques de surfaces » est la plus performante : elle présente une correspondance de 75 % et ne commet que trois erreurs d'omission.

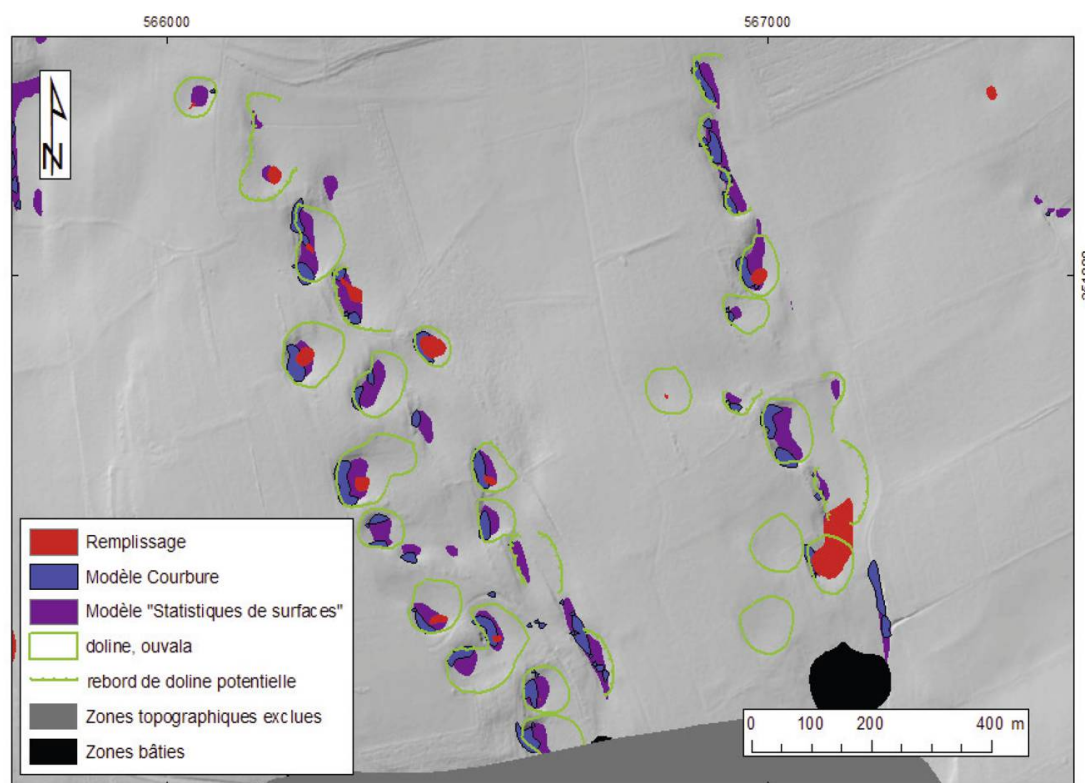


Fig. 23 : Combinaison de tous les modèles sur la zone test servant à la validation des méthodes.

que les 2 dolines non identifiées par les méthodes automatisées (erreurs d'omission, n° 19 et n° 20, fig. 20) ont une probabilité assez faible d'en être en réalité. Il s'agirait donc plutôt d'une erreur de jugement lors de la cartographie manuelle plutôt que d'un manque de performance des méthodes de cartographie automatisée. Quant aux 8 dolines « faussement » identifiées par les méthodes de cartographie automatisée, elles se sont révélées pour 7 d'entre elles être de véritables dolines lors de l'observation sur le terrain. Il n'y aurait donc a priori qu'une seule erreur de commission produite par les méthodes automatisées.

Alignements de dolines

Le traçage des alignements de dolines a été réalisé manuellement sur la base des différents modèles de cartographie automatisée (fig. 24). Pour le traçage, c'est à la fois la tendance générale à l'échelle kilométrique et l'alignement local sur quelques dolines qui a été pris en compte. Par conséquent, les lignes tracées sont le résultat d'une interprétation et ont une marge d'erreur estimée à $\pm 5^\circ$. Pour des raisons de lisibilité graphique, seule la zone centrale du plateau de Bure est représentée dans le détail sur la figure 24.

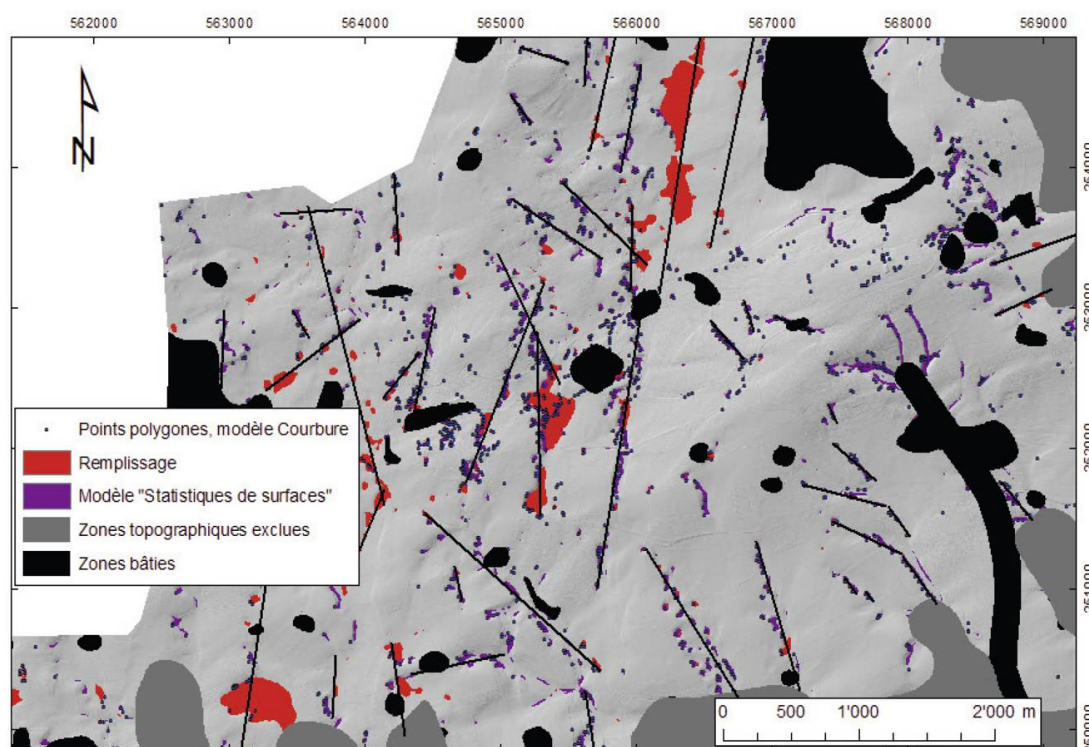


Fig. 24: Alignements de dolines dans la zone centrale, tracés sur la base des modèles produits par la cartographie automatisée.

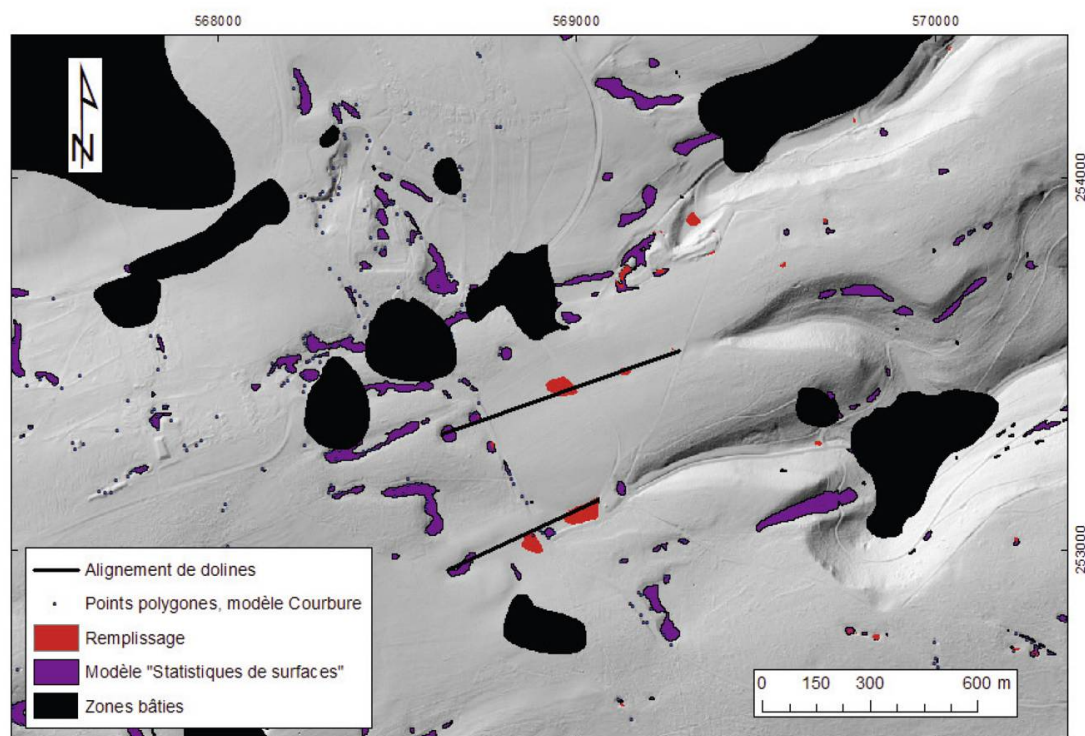


Fig. 25: Exemple d'alignements de dolines situés dans le prolongement amont de vallées (S.E. de Bure).

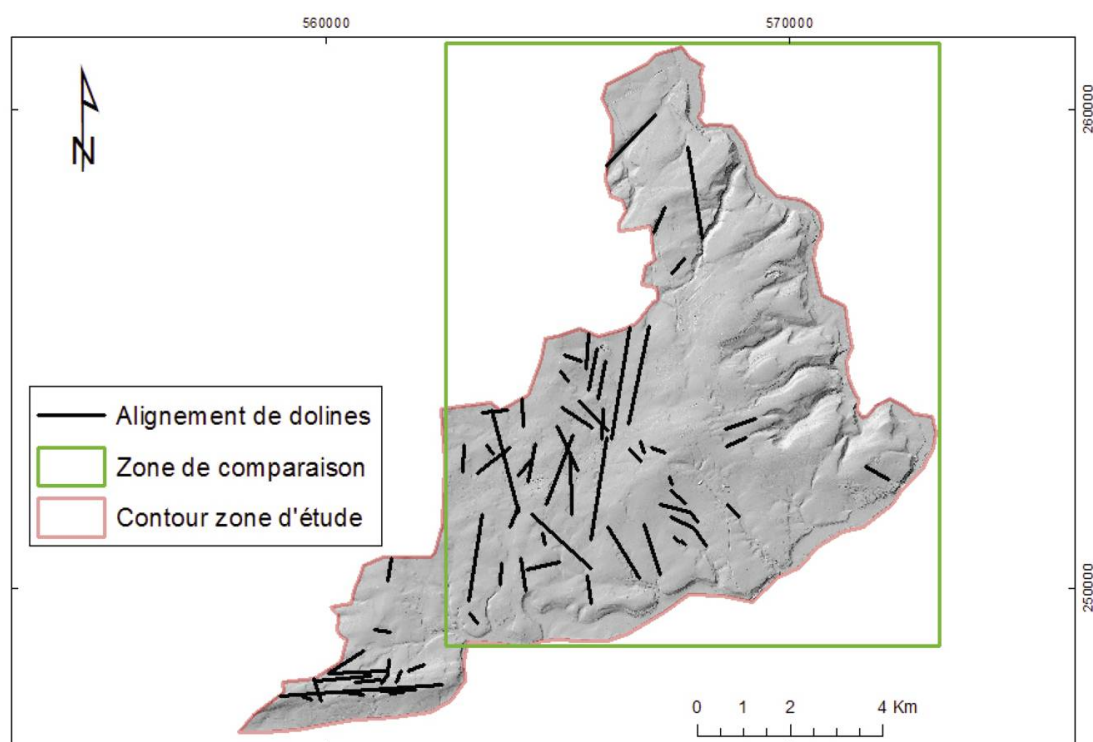


Fig. 26: Alignements de dolines situés sur la zone d'étude.

D'un point de vue géomorphologique, les dolines présentent souvent une morphologie allongée dans la direction de l'alignement. On constate également que certains alignements sont situés dans le prolongement amont de vallées sèches (fig. 25). Cette configuration est visible sur douze d'entre eux situés au sud et à l'est du plateau de Bure.

Si l'on considère la zone d'étude entière, trois directions d'alignements prépondérantes sont visibles : N.-S., N.O.-S.E. et E.-O. (fig. 26).

Fracturation et alignement de dolines

Pour pouvoir comparer les alignements de dolines aux orientations de la fracturation tectonique à disposition, les zones d'études doivent correspondre. Par conséquent, seule la zone encadrée en vert sur la figure 26, pour laquelle des données de fracturation existent (Braillard 2005), a été prise en compte. Les azimuts des alignements de dolines présents sur cette zone ont été mesurés afin de construire un diagramme en rose (fig. 27, A). Un facteur de pondération relatif à la longueur des tronçons a été appliqué. Les tronçons d'alignements de dolines sont répartis par tranches de 15° , dont la longueur est proportionnelle au nombre de tronçons. Le diagramme en rose fait apparaître deux directions principales (notées D pour « dolines ») : la famille D1, qui présente une assez grande variation angulaire ($N010^\circ \pm 20^\circ$), avec toutefois un pic bien marqué entre $N010^\circ$ et $N015^\circ$, et la famille D2 ($N125^\circ \pm 10^\circ$) qui est moins importante, mais a une faible dispersion angulaire.

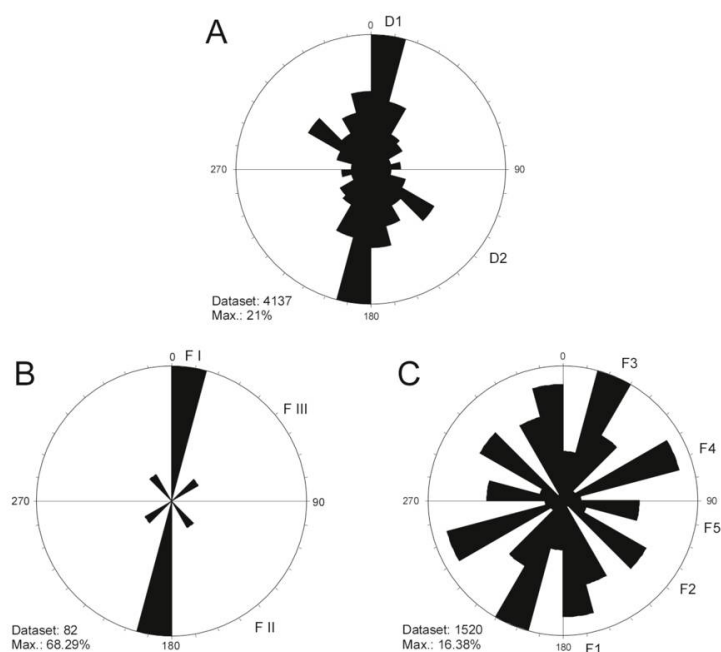


Fig. 27 :
Rosace des directions des alignements de dolines sur le plateau de Bure (A), des failles kilométriques reportées sur les cartes géologiques (B) et des fractures visibles à l'échelle de l'affleurement (C).

Le pic bien marqué entre N010° et N015° de la famille D1, qui totalise environ 20% des alignements de dolines, correspond à la direction des failles kilométriques F1. Les autres alignements de cette famille D1 coïncident avec les orientations des fractures F1 et F3. La famille D2 correspond quant à elle à la famille de fractures F2.

Il apparaît donc qu'un lien existe entre les alignements de dolines et la fracturation tectonique, qu'il s'agisse des failles kilométriques ou des fractures visibles à l'échelle de l'affleurement. Il semble que les alignements des dolines isolées correspondent plutôt aux fractures visibles à l'échelle de l'affleurement, tandis que les ouvalas linéaires, qui évoluent vers les vallées sèches, correspondent davantage aux failles kilométriques. Cette hypothèse, qui découle d'un simple examen visuel de la carte des alignements de dolines (fig. 24), nécessiterait d'être validée par une étude plus systématique et plus détaillée.

Conclusion

La combinaison des différentes méthodes de cartographie automatisée a produit un inventaire très complet des dolines du plateau de Bure. Les zones aménagées, qui produisent beaucoup de fausses identifications, doivent cependant être exclues de la surface analysée. Les méthodes ont mis en évidence un nombre important de dolines invisibles à l'œil tant sur l'ombrage du MNT, sur les photographies aériennes, voire parfois sur le terrain. Parmi les différentes approches de modélisation testées, la méthode « statistiques de surfaces » s'est révélée être la plus performante. La méthode « remplissage » convient quant à elle à l'analyse des zones escarpées, alors que la méthode « courbure » est celle qui fait le plus de fausses identifications.

L'étape de validation des méthodes automatisées a montré que même en utilisant plusieurs ombrages du MNT différents (avec variations angulaires de la source lumineuse), la cartographie manuelle à l'écran reste sujette à interprétation et devrait être complétée par une observation sur le terrain. Ces aspects, qui rendent la cartographie manuelle passablement laborieuse, confèrent donc aux approches de cartographie automatisée un avantage indéniable. Selon les contextes morphologiques et l'étendue des zones à cartographier, la cartographie automatisée peut donc favorablement compléter, voire remplacer une cartographie manuelle.

La cartographie automatisée a permis de mettre en évidence des alignements de dolines sur le plateau de Bure, qui sont vraisemblablement dictés par l'orientation de la fracturation. Une étude plus détaillée, qui tienne compte d'autres paramètres comme notamment la direction des écoulements superficiels et épikarstiques, serait toutefois nécessaire pour déterminer le rôle que chaque type de fractures (failles kilométriques et fractures visibles à l'échelle de l'affleurement) joue dans la formation de ces alignements.

Raphaël Vallat, originaire de Bure (JU), a obtenu sa maturité au gymnase de la rue des Alpes à Bienne en 2009 et son bachelor en géographie physique à l'université de Fribourg en 2015. La présente étude reprend les principaux résultats de son travail de bachelor. Il poursuit actuellement un master en géographie à l'université de Lausanne.

Luc Braillard, docteur en géologie et géomorphologie de l'université de Fribourg, a travaillé de 1998 à 2007 auprès de la Section d'archéologie et paléontologie du canton du Jura (travaux A16). Il est actuellement enseignant-chercheur à l'université de Fribourg (département de Géosciences).

RÉFÉRENCES

- Aubert, D. (1969) : Phénomènes et formes du karst jurassien. *Eclogae geologicae Helvetiae*. 62/2, 325-399.
- Braillard, L. (2005) : Rôles de la tectonique et de la stratigraphie dans la formation des vallées sèches de l'Ajoie (JU-Suisse). *Actes de la Société jurassienne d'Émulation* 108, p. 33-65.
- Braillard, L. (2006) : Morphogenèse des vallées sèches du Jura tabulaire d'Ajoie (Suisse) : rôle de la fracturation et étude des remplissages quaternaires. *GeoFocus* 14, université de Fribourg, Suisse.
- Chauve, P., Martin, J. & Bailly, C. (1985) : *Carte géologique Delle au 1/50 000 avec notice explicative*. BRGM.
- Diebold, P., Laubscher, H.-P., Schneider, A. & Tschopp, R. (1963) : *Atlas géologique de la Suisse 1/25 000*, feuille Saint-Ursanne. Commission géologique suisse.
- Jenness Enterprises (2006) : Topographic position index. Extension ArcMap téléchargeable en libre accès à l'adresse : <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>.
- Kimerling, A., Buckley, A., Muehrcke, P. & Muehrcke, J. (2012) : *Map Use: Reading, Analysis, Interpretation*. Redlands, CA : Esri Press Academic.
- Leuenberger, H. Rauber, G. (2014) : Fouille de dolines : présentation d'une méthodologie et de son application sur le terrain. *Actes de la Société jurassienne d'Émulation* 117, p. 39-49.
- Liniger, H. (1969) : *Atlas géologique de la Suisse 1/25 000*, feuille Bonfol. Commission géologique suisse.

- Siméoni, G., Jamier, D. (1975): Relations entre éléments structuraux et morphologie dans la région du plateau de Bure (Jura tabulaire). *Bulletin du Centre d'Hydrogéologie*, université de Neuchâtel, p. 163-173.
- Swisstopo (2015): modèle *swissALTI 3D*. [Consulté le 29 mars 2015]. Disponible à l'adresse: <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/fr/home/products/height/swissALTI3D.html>
- Vallat, R. (2015): *Cartographie automatisée des dolines du plateau de Bure (Ajoie, Suisse) à l'aide d'un modèle numérique d'altitude et mise en lien avec la fracturation tectonique*. Travail de bachelor, université de Fribourg, géographie.

Étude de la population d'Amphibiens de l'étang de la Noz

GAUVAIN SAUCY

La présente étude porte sur un recensement de la population d'Amphibiens de l'étang de la Noz à Bellelay grâce à la pose de bar-rages lors de la migration post-hivernale en 2015. Les résultats ainsi obtenus ont permis d'étudier les zones d'hibernation des Amphibiens, l'espèce la plus précoce, la proportion de chaque espèce ainsi que la proportion des sexes dans chaque espèce.

De plus, les conditions météorologiques influant sur la migration post-hivernale et sur les effectifs de la population ont été étudiées, respectivement à l'aide des résultats du recensement de 2015 et à l'aide des résultats de recensements d'années antérieures sur un autre secteur couvrant lui aussi une partie de la migration de la population d'Amphibiens de l'étang de la Noz.

Introduction

Cette étude a été lancée avec l'objectif de vérifier les hypothèses suivantes :

1. Les Amphibiens de l'étang de la Noz hibernent majoritairement au nord du plan d'eau, dans la forêt de Béroie; seule une petite partie hiberne au sud, à l'est et à l'ouest.
2. Les Grenouilles rousses *Rana temporaria* sont plus précoces que les autres Amphibiens.
3. Les mâles sont plus nombreux que les femelles pour chaque espèce présente dans le point d'eau étudié et entament la migration post-hivernale les premiers.
4. La proportion de la population totale capturée dans le secteur de l'école secondaire de Bellelay (É.S.B.) est relativement élevée et chaque espèce représente une proportion égale de la population totale.

5. Certains facteurs météorologiques influencent la migration post-hivernale ainsi que les effectifs de la population.

Il est évident que tout ce qui a été entrepris dans cette étude a été effectué en minimisant les dérangements pouvant être occasionnés à l'environnement dans lequel a eu lieu le travail de terrain tout en essayant de garantir l'exactitude, l'exhaustivité et la qualité des informations récoltées.

Contexte

L'étang de la Noz est né vraisemblablement entre 1743 et 1771 grâce à l'abbé de Bellelay. Celui-ci entreprit sa construction dans la perspective de fournir un réservoir d'alimentation pour un moulin.

Après avoir appartenu à l'armée française à partir de 1797, à un industriel français, au baron de Reinach et à la famille Amstutz, le plan d'eau a appartenu à l'État de Berne dès 1919, puis à la Fondation Bellelay. L'étang appartient aujourd'hui à la société du Domaine de Bellelay.

Ce site a été classé dans la liste des réserves naturelles par le Conseil exécutif bernois le 12 septembre 1972. Il est de nos jours encore protégé. L'étang a subi plusieurs travaux d'entretien et de rénovation en 1995 et de 2009 à 2011 (Brahier, 2011).

Dès 2000 (excepté en 2001), des barrages à Amphibiens sont posés par M. Willy Houriet et M^{me} Marie-José Juillerat sur la route en amont de l'étang de la Noz. Dès 2006, MM. Jean-Luc Brahier et Maurice Wisard posent également des barrages au nord-est de Bellelay, action reprise depuis par la société La Libellule. Un article intitulé « Action batraciens Bellelay », retraçant 12 ans de captures, a paru dans les *Actes 2012* de la Société jurassienne d'Émulation (Brahier & Houriet, 2012).

Alimenté par la Sorne, l'étang artificiel de la Noz se situe dans le canton de Berne, dans la commune de Saicourt, à environ un kilomètre à l'est de la frontière avec le Jura. L'altitude est de 946 mètres. Les coordonnées du centre de l'étang sont les suivantes: 578 628/234 213¹.

L'étang occupe le fond d'une petite combe. Il a une superficie d'un peu plus de 10 200 m² et une circonférence d'environ 525 m. Les rives sud, nord et ouest de l'étang sont bordées de quelques arbres et de nombreux buissons denses. L'ouest du plan d'eau est formé par une zone alluviale. Une digue forme le bord est de l'étang. Au-delà se trouvent des surfaces agricoles puis la forêt (fig. 1).

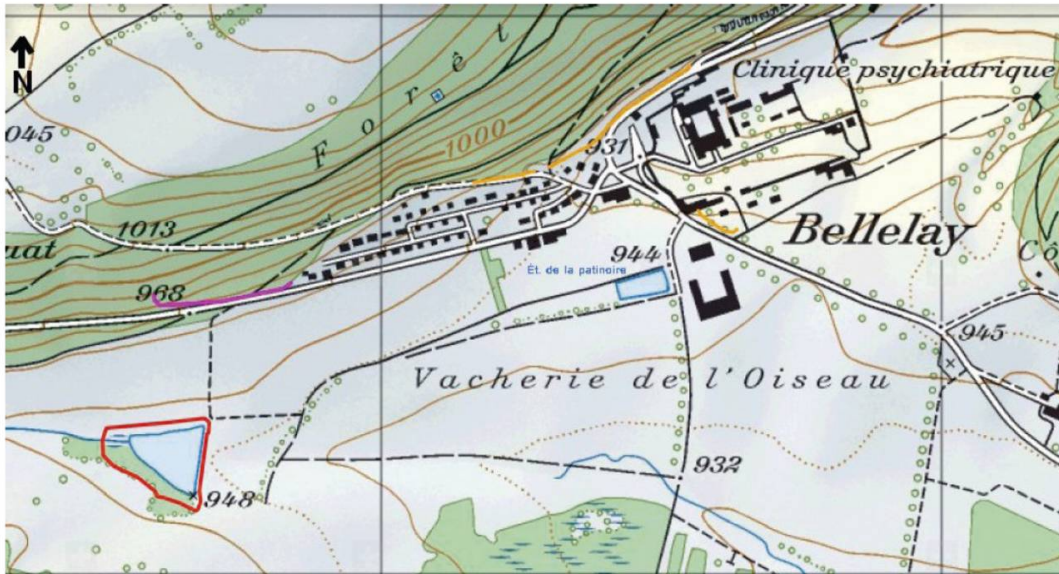


Fig. 1 : Ensemble des secteurs de pose de barrages à Bellelay en 2015. En rouge : secteur Noz ; en rose : secteur É.S.B. ; en orange : secteur « La Libellule ». Un côté de carré représente 1 km ; le nord est en haut de l'image. Source : Swisstopo.

Trois facteurs principaux ont influencé le choix du plan d'eau étudié :

- Le fait que les Amphibiens de la région soient recensés depuis 2006 sur le secteur É.S.B. et par l'association La Libellule permettant une appréciation plus élargie des résultats de ce travail.
- La présence minime d'obstacles à la pose des barrages, comme de la végétation, des barrières, des ruisseaux, etc.
- La faible distance entre le lieu étudié et mon domicile à Lajoux, afin de gagner du temps dans les déplacements quotidiens nécessaires.

Matériel et méthodes

Terrain

La présente étude retrace précisément une saison complète de migration post-hivernale dans un secteur d'importance régionale, mise en relation avec des données de nombreuses années passées et d'autres secteurs locaux. Ce travail représente environ 170 heures passées sur le terrain, fréquemment de nuit, pour près de 2 tonnes de matériel installé sur environ 600 mètres de distance.

Toute intrusion dans une réserve naturelle doit passer par une demande auprès du canton. Elle ne peut avoir lieu si aucune autorisation n'est décernée. La demande pour cette étude a donc été adressée au canton de Berne. Celle-ci a été accordée par M. Olivier Bessire. De plus, les barrages passant sur les prés de M. Alwin Reichenbach, agriculteur, il était nécessaire d'avoir également son agrément. Celui-ci a été obtenu oralement.

Le moyen de capture d'Amphibiens le plus répandu en Suisse a été utilisé pour ce recensement: le barrage à Amphibiens (fig. 2). Il est constitué de quatre éléments. Les deux principaux sont la bâche, tenue par des piquets métalliques à la fois par le haut (système d'attache) et par le bas (en la coinçant entre le sol et la barre transversale du piquet), ainsi que les piquets, qui sont enfoncés dans le sol à la main ou à la masse en fonction du modèle. Les deux autres éléments sont des sardines, utilisées afin de minimiser l'espace entre le sol et le bas de la bâche en plaquant cette dernière sur le sol (fig. 2b, d), ainsi que des seaux en plastique enterrés de manière à ce que le bord supérieur du récipient soit au même niveau ou un peu au-dessous du niveau du sol (fig. 2e, f). Les trous sont effectués à l'aide d'une pelle, d'une bêche à trou et d'un piochard. Lorsque les sardines ne suffisaient pas à leur fonction, les bâches étaient maintenues au sol grâce à des mottes de terre ou des pierres.

Les ruisseaux ont été barrés par des treillis métalliques, laissant ainsi passer l'eau, mais pas les Amphibiens. Ces installations nécessitaient

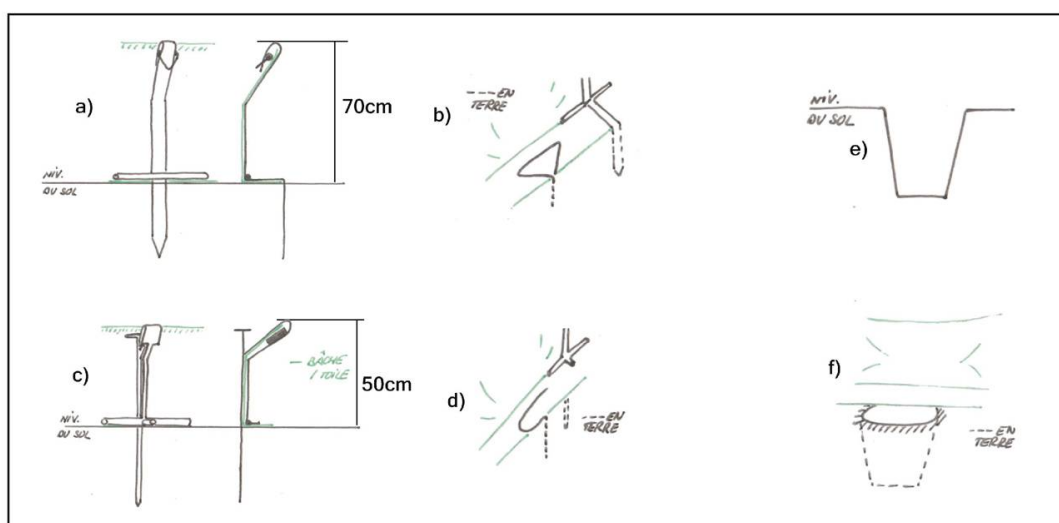


Fig. 2: Barrages à Amphibiens. En vert, la bâche. a) Modèle de 70 cm de hauteur; b) Sardines du modèle de 70 cm; c) Modèle de 50 cm de hauteur; d) Sardines du modèle de 50 cm; e) Seau installé vu de profil; f) Seau installé vu de hauteur d'homme. Schémas: Gauvain Saucy.

cependant d'enlever les débris accumulés derrière la grille environ une fois toutes les trois semaines.

Il existe beaucoup de modèles de barrages différents fonctionnant sur ce principe. Afin de couvrir les 600 m nécessaires, deux d'entre eux ont été utilisés: environ 560 m ont été équipés d'un premier modèle de 70 cm de hauteur (fig. 2a, b) et le reste d'un second modèle de 50 cm de hauteur (fig. 2c, d). La disposition de ces modèles a été effectuée selon la figure 3.

Le principe de fonctionnement est simple: les Amphibiens rencontrent de nombreux obstacles lors de leurs migrations. Leurs seuls moyens pour les franchir sont de les contourner ou de les escalader. On profite donc de ce comportement pour les capturer. En voulant contourner la bâche qu'ils ne peuvent escalader, ils tombent dans les seaux, d'où ils ne peuvent ressortir.

Il arrive cependant que, si la migration est forte, les seaux soient bien remplis. Les Amphibiens se trouvant sur le dessus peuvent alors parfois s'extirper du seau pour continuer leur trajet. Ce phénomène est assez rare grâce à la profondeur des seaux et à l'intervalle réduit de temps entre deux relevés. De plus, les individus ayant pu sortir des seaux rencontreront un seau suivant moins rempli.

Les migrations ayant principalement lieu de nuit, les relevés des seaux se font tôt le matin, idéalement au lever du jour. On évite ainsi que les individus capturés ne souffrent de la chaleur en journée. Mais si le relevé est effectué trop tôt, la migration nocturne n'étant pas terminée, des individus se feront piéger pour la journée entière. Bien entendu, lorsque



Fig. 3 : Répartition des 600 m de barrages à Amphibiens sur le pourtour du secteur Noz. Les seaux sont numérotés de 1 à 17. Source: Google Earth.

les migrations étaient importantes, surtout en journée, deux à trois relevés étaient effectués sur 24 heures. Ceci afin d'infliger le moins d'attente possible aux individus capturés.

Les prédateurs ont également posé quelques difficultés dans la mesure où les barrages rendaient les Amphibiens plus vulnérables, car immobilisés. Ces barrages ont attiré ainsi plusieurs espèces prédatrices: des Putois d'Europe *Mustela putorius*, Hérons cendrés *Ardea cinerea*, Corneilles noires *Corvus corone*, Milans noirs *Milvus migrans* et très probablement des Renards roux *Vulpes vulpes*. Il était donc important de s'assurer que la prédation ne devienne pas excessive. Immédiatement après l'annonce du premier cas de prédation (par un Héron cendré), seulement cinq protections ont été fabriquées et installées, par manque de temps. Ces protections se présentent ainsi (fig. 4): une plaque, si possible d'un diamètre supérieur à celui de l'ouverture du seau, est surélevée d'environ cinq centimètres par rapport au niveau du sol à l'aide de tiges métalliques plantées dans le sol. Ce système permet aux Amphibiens (même les couples) de passer sans dérangement tandis qu'aucun angle ne permet à un bec ou une patte d'atteindre le fond du seau. Aucun témoignage de prédation n'a alors eu lieu après la pose de ces protections, ni dans les seaux protégés ni dans les autres. Aucune protection supplémentaire n'a donc été fabriquée et posée.

Il a fallu également penser à la migration post-nuptiale, car celle-ci se chevauche généralement avec la fin de la migration post-hivernale. Deux solutions étaient envisageables: soit la pose de seaux du côté du plan

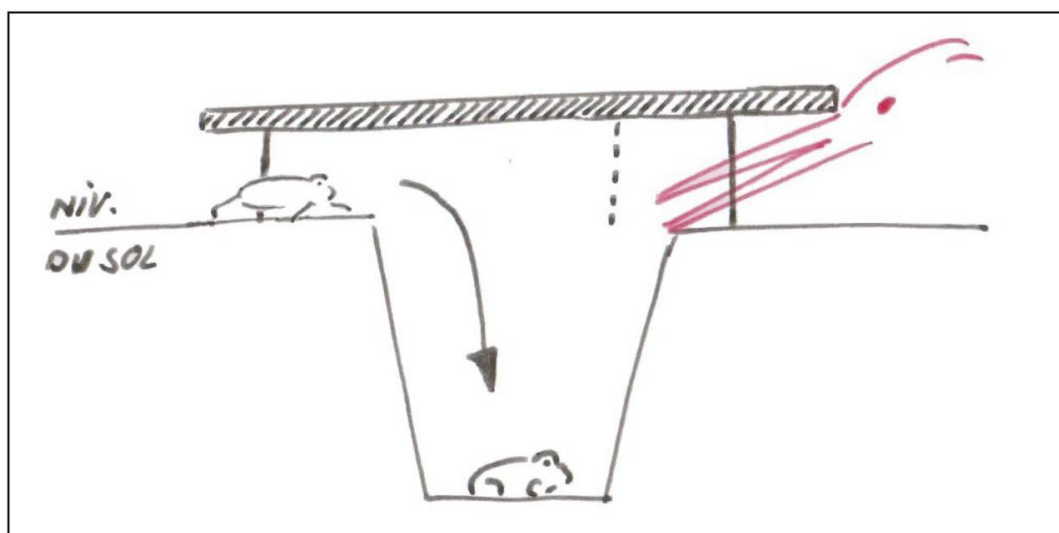


Fig. 4: Plaque de protection contre les prédateurs. En rouge: le prédateur potentiel observé le plus fréquemment sur le site, le Héron cendré *Ardea cinerea*. Schéma: Gauvain Saucy.

d'eau, soit une simple surveillance de ce même côté de la bâche sans installation supplémentaire. La deuxième méthode a été retenue, car des Amphibiens réussissant à franchir les barrages dans le sens inverse par leurs propres moyens ont été observés. Il a donc fallu surveiller le côté interne des barrages et faire passer les individus qui s'y trouvaient.

Deux méthodes ont été employées pour relever les effectifs des captures : les résultats sont, lorsqu'une seconde personne est présente, notés sur des feuilles, protégées ou non par une boîte en plastique, ou, lorsque le relevé est effectué par une seule personne, enregistrés vocalement à l'aide d'un téléphone portable placé dans une poche à l'abri des intempéries. Dans les deux cas, toutes les informations ainsi écrites ou enregistrées ont été retranscrites à mon domicile sur un fichier Openoffice Calc prévu à cet effet.

Les barrages du modèle de 70 cm de hauteur ayant beaucoup de prise au vent, les deux tempêtes successives Mike (30.03.2015) et Niklas (01.04.2015) ont causé quelques dommages et ont surtout démonté et emporté les barrages alors posés dans la zone alluviale. Le vent a rendu la remise en place très difficile. La réinstallation a dû être effectuée durant la nuit suivant la tempête, à l'aide de lampes frontales.

Le démontage des barrages a été facilité par l'emploi d'un outil original : une enrouleuse à bâches montée sur une chenillette à moteur (fig. 5). Celle-ci a été inventée et construite par M. Jean-Marie Gisiger.



Fig. 5: Enrouleuse à bâches inventée et construite par M. Jean-Marie Gisiger. Photographie: Bertrand Saucy.

Pour tous les transports de matériel, une remorque crochée à un véhicule motorisé a été nécessaire.

La présence de deux autres secteurs de barrages gérés par différentes associations piégeant également une partie de la population de l'étang de la Noz a nécessité une organisation interassociative, de manière à ce que certains individus ne soient pas comptabilisés deux fois. Nous avons donc agi en accord les uns avec les autres: les individus capturés dans le secteur É.S.B. ont été déposés directement dans l'étang après détermination, venant ainsi s'ajouter au nombre d'individus capturés dans le secteur Noz. Les individus capturés dans les barrages de La Libellule sont répartis dans une certaine proportion à destination de l'étang dit de la patinoire (fig. 1) et de l'étang de la Noz, et donc déposés en amont des barrages du secteur Noz. Cependant, les résultats de ce recensement n'indiquent pas le nombre exact déposé à destination de l'étang de la Noz. De plus, aucune certitude n'est établie sur le fait que les Amphibiens suivent bien la trajectoire estimée par les naturalistes, certains d'entre eux pouvant décider de choisir un étang éloigné comme destination. Par conséquent, les résultats du recensement 2015 dans le secteur La Libellule ne sont pas employés dans la présente étude.

Le recensement a eu lieu du 13 avril au 25 mai 2015.

Il est également important, même si ce n'est pas là le sujet de ce travail, de rendre le lecteur attentif à la chytridiomycose, un champignon parasite (*Batrachochytrium dendrobatidis*) qui décime actuellement les populations d'Amphibiens à travers le monde entier. Ainsi des précautions sont à prendre dès que l'on aborde un point d'eau afin de minimiser voire empêcher la propagation de cette mycose (KARCH, chytridiomycose).

Laboratoire

Le travail théorique et de rédaction de cette étude a nécessité plusieurs programmes informatiques adaptés à un ordinateur portable: Openoffice Calc pour le traitement des données météorologiques, des résultats du recensement et pour l'élaboration des graphiques, calculs et tableaux; Openoffice Writer pour la rédaction; Adobe Acrobat Document; Photophiltre pour le traitement des schémas et Google Earth pour l'élaboration de certaines cartes.

Tous les contacts à distance ont été effectués par téléphone ou à l'aide d'une boîte de messagerie électronique.

Les données météorologiques nécessaires ont été obtenues grâce au portail IDAweb de l'Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse (2014). Les critères qui ont été demandés sont les suivants :

Pour la période du 01.01.2015 au 30.04.2015 :

- température du sol à 5 cm ; moyenne journalière ;
- épaisseur totale de neige gisante mesurée automatiquement ; mesure de 05 h 40 ;
- température de l'air à 5 cm de l'herbe ; moyenne journalière ;
- précipitations ; somme du jour civil ;

Pour la période du 01.01.2002 au 31.05.2015 :

- température du sol à 5 cm ; moyenne mensuelle ;
- épaisseur totale de neige gisante ; moyenne mensuelle ;
- température de l'air à 5 cm de l'herbe ; moyenne mensuelle ;
- précipitations ; somme mensuelle.

L'ensemble de ces mesures a été effectué à la station météorologique de La Chaux-de-Fonds (coordonnées: 550 919/214 861 ; altitude: 1018 m). Le choix de cette station s'est fait par la sélection de la station météorologique la plus proche et la plus représentative du climat du lieu de l'étude.

Seules les moyennes mensuelles de la température du sol à 5 cm du 01.01.2002 au 31.05.2015 n'ont pas pu être exploitées, n'ayant pas été effectuées chaque année.

Les résultats des recensements d'Amphibiens dans le secteur É.S.B. m'ont été procurés par M. Willy Houriet, responsable de ce secteur (Houriet, 2012).

Résultats

À l'issue de ce recensement sur le secteur Noz, 19 831 individus de cinq espèces ont été capturés et déterminés. Les espèces présentes étaient les suivantes :

- Crapaud commun *Bufo bufo* (Linnaeus, 1758) : 8 883 individus capturés.
- Grenouille rousse *Rana temporaria temporaria* (Linnaeus, 1758) : 2 967 individus capturés.
- Grenouille verte *Pelophylax* sp. : 97 individus capturés.

— Triton alpestre *Ichthyosaura alpestris* (Laurenti, 1768): 1 776 individus capturés.

— Triton palmé *Lissotriton helveticus* (Razoumowskyi, 1789): 6 108 individus capturés.

Le détail de ces captures figure dans les tableaux 1 et 2.

Totaux par dates et par seau : nbr = entre relevé matinal de la veille et du jour																			
Date :	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	Tot/date :	
ve 13.03.15																			0
sa 14.03.15																			0
di 15.03.15																			0
lu 16.03.15																			0
ma 17.03.15																			0
me 18.03.15		2	2													1			5
je 19.03.15		2	5	1	4						3	4		2		2			23
ve 20.03.15		2		1					1	1	2						3		10
sa 21.03.15	9	27	32	9	16				1	1	1		1			2	13		111
di 22.03.15	6	31	32	17	7	2			3	2	26	4		2	1	1	5		139
lu 23.03.15			2	1							2								5
ma 24.03.15		20	13	5	8	1	1										3		51
me 25.03.15	1	21	11	5	11	1			1	2	2	4		2			9		68
je 26.03.15		10	15	1	20			2		2	3		1	1	1	2			57
ve 27.03.15	1	1	7	1	4			1	3	1			1	1					23
sa 28.03.15	2	14	12	13	17	1	12	3								2			76
di 29.03.15	66	92	117	88	94	49	71	31	24	77	73	31	49	87	67	66	75		1157
lu 30.03.15	53	84	181	128	109	75	117	109	2	75	47	14	143	129	32	29	68		1395
ma 31.03.15	112	70	213	174	138	142	105	167	206	188	74	65	107	100	94	92	80		2127
me 01.04.15	43	69	116	45	106	36	42	23	31	13	11	50	13	32	13	2	6		651
je 02.04.15	5	3	6	6			1		1	1	1		2	2	2		1		30
ve 03.04.15			10						1	1	1						3		16
sa 04.04.15	22	81	180	93	150	68	70	95	67	108	56	53	22	18	18	8	37		1146
di 05.04.15		8	9	10	3	5	9	1	1	3	3	3	2		1	3	2		63
lu 06.04.15		1					1	1											3
ma 07.04.15	2	1	13		2	1		1					1		1				22
me 08.04.15					1			1				1							3
je 09.04.15	1		1	1							1		1	1	1				7
ve 10.04.15	8	30	46	21	30	15	34		8	2	5	4	3	2	2	1	6		217
sa 11.04.15	98	177	261	211	245	54	186	198	50	114	133	100	78	84	86	112	88		2275
di 12.04.15	73	180	221	137	79	34	144	97	44	29	85	54	26	58	47	32	75		1415
lu 13.04.15	121	125	178	173	87	31	116	77	61	36	56	43	20	57	40	25	30		1276
ma 14.04.15	131	244	167	128	101	55	123	36	18	15	34	22	10	60	18	12	39		1213
me 15.04.15	19	88	166	102	67	42	87	62	34	23	55	9	9	12	10	23	7		815
je 16.04.15	26	75	129	109	59	41	112	79	50	21	95	21	13	16	16	15	11		888
ve 17.04.15	43	86	157	116	125	31	120	205	157	199	243	148	27	42	51	49	59		1858
sa 18.04.15	78	205	287	200	121	56	121	212	262	107	195	140	69	88	70	124	53		2388
di 19.04.15	4	6	3	5	1	4	12	9	4		26	3	1		4		1		83
lu 20.04.15	8	18	17	8	2	2	5	2	1		7	3	1				2		76
ma 21.04.15	2	5	11	17	3	2	7	6	6	1	4	2	1		1		2		70
me 22.04.15	6	1	21	16	15	4	3	1			2								69
Tot./seau :	940	1779	2641	1842	1625	752	1499	1419	1036	1019	1246	778	601	795	577	604	678		19831

Totaux par espèces et par dates :																			
Date :		Bufo bufo				Rana temporaria				Pelophylax sp.		Lissotriton helveticus			Ichthyosaura alpestris			Tot/Date :	
		tot	m	f	j	tot	m	f	j	tot	m	f	tot	m	f				
ve 13.03.15	0					0				0		0	0	0	0	0	0	0	0
sa 14.03.15	0					0				0		0	0	0	0	0	0	0	0
di 15.03.15	0					0				0		0	0	0	0	0	0	0	0
lu 16.03.15	0					0				0		0	0	0	0	0	0	0	0
ma 17.03.15	0					0				0		0	0	0	0	0	0	0	0
me 18.03.15	1	1				4	4			0		0	0	0	0	5	0	0	5
je 19.03.15	3	2	1			20	14	5	1	0		0	0	0	23	0	0	23	0
ve 20.03.15	2	2				8	5	2	1	0		0	0	0	10	0	0	10	0
sa 21.03.15	2	1		1		109	73	36		0		0	0	0	111	0	0	111	0
di 22.03.15	0					138	88	46	4	0		0	0	1	138	1	0	139	1
lu 23.03.15	0					5	4	1		0		0	0	0	5	0	0	5	0
ma 24.03.15	0					50	29	21		0		0	0	1	50	1	1	51	1
me 25.03.15	3	3				64	43	21		0		0	0	1	67	1	1	68	1
je 26.03.15	0					52	32	18	2	0		0	0	5	52	5	5	57	5
ve 27.03.15	0					18	12	4	2	0		0	0	5	18	5	5	23	5
sa 28.03.15	0					75	50	25		0		0	0	1	75	1	1	76	1
di 29.03.15	309	275	34			735	510	195	30	0		6	4	2	107	88	19	113	1157
lu 30.03.15	419	331	85	3		533	390	130	13	8		30	29	1	405	291	114	435	1395
ma 31.03.15	331	279	52			411	307	100	4	5		283	228	55	1097	761	336	1380	2127
me 01.04.15	208	158	50			128	100	27	1	7		36	32	4	272	182	90	308	651
je 02.04.15	10	6	4			6	6			0		6	5	1	8	5	3	14	30
ve 03.04.15	5	4	1			3	3			0		2	2		6	5	1	8	16
sa 04.04.15	152	132	20			324	264	51	9	1		200	172	28	469	294	175	669	1146
di 05.04.15	4	4				32	24	6	2	0		9	9		18	11	7	27	63
lu 06.04.15	0					2	1	1		0		1	1	0	0	0	2	1	3
ma 07.04.15	4	4				1	1	1		0		4	4		13	7	6	17	22
me 08.04.15	0					1	1			0		0	0		2	1	1	2	3
je 09.04.15	0					2	2			0		1	1		4	1	3	5	7
ve 10.04.15	43	34	9			85	58	24	3	1		6	4	2	82	53	29	88	217
sa 11.04.15	1157	923	234			75	44	19	12	5		266	220	46	772	426	346	1038	2275
di 12.04.15	708	580	128			14	7	5	2	4		206	172	34	483	258	225	689	1415
lu 13.04.15	904	719	184	1		10	7	2	1	2		67	58	9	293	166	127	360	1276
ma 14.04.15	1018	836	182			4	3		1	1		30	27	3	160	76	84	1023	1213
me 15.04.15	668	546	122			4	3	1		0		19	10	9	124	67	57	143	815
je 16.04.15	717	581	136			0				3		26	20	6	142	63	79	168	888
ve 17.04.15	1044	794	249	1		16	3	6	7	3		219	167	52	576	228	348	720	1858
sa 18.04.15	1031	847	183	1		37	15	4	18	54		330	239	91	936	272	664	1063	2388
di 19.04.15	56	50	6			1	1			3		5	3	2	18	7	11	60	83
lu 20.04.15	26	23	3			0				0		13	9	4	37	17	20	26	76
ma 21.04.15	40	38	2			0				0		2	1	1	28	9	19	40	70
me 22.04.15	18	16	2			0				0		9	5	4	42	14	28	18	51
Tot./sp. :	8883	7189	1687	8883	7	2967	2102	752	113	97		1776	1422	354	6108	3315	2793	11947	7884
									2967						1776		6108		19831

Durant la même saison, le recensement sur le secteur É.S.B. a permis de déterminer 524 Amphibiens, également parmi les cinq espèces ci-dessus.

Les résultats obtenus sur le secteur Noz ainsi que les résultats des recensements des années 2003 à 2015 du secteur É.S.B. avec les mesures météorologiques citées dans le chapitre « Matériel et méthode – Laboratoire » ont permis l'élaboration des graphiques et calculs.

Lors de la mise en forme, plus de 200 calculs, tableaux et graphiques ont été réalisés. L'ensemble de ces résultats représente une masse bien trop importante pour un travail de maturité. Seuls les documents sur lesquels se basent les interprétations et les résultats présentant le plus d'intérêt sont donc présentés dans ce chapitre.

Première hypothèse

Recherche d'une vérification de la première hypothèse: les Amphibiens de l'étang de la Noz hibernent majoritairement au nord du plan d'eau, dans la forêt de Béroie, seule une petite partie hiberne au sud, à l'est et à l'ouest.

On peut clairement observer, sur la figure 6, qu'un pic d'affluence a lieu dans le seau n° 3 et de là, une tendance régressive des totaux de captures par seau pour atteindre un minimum au seau n° 13.

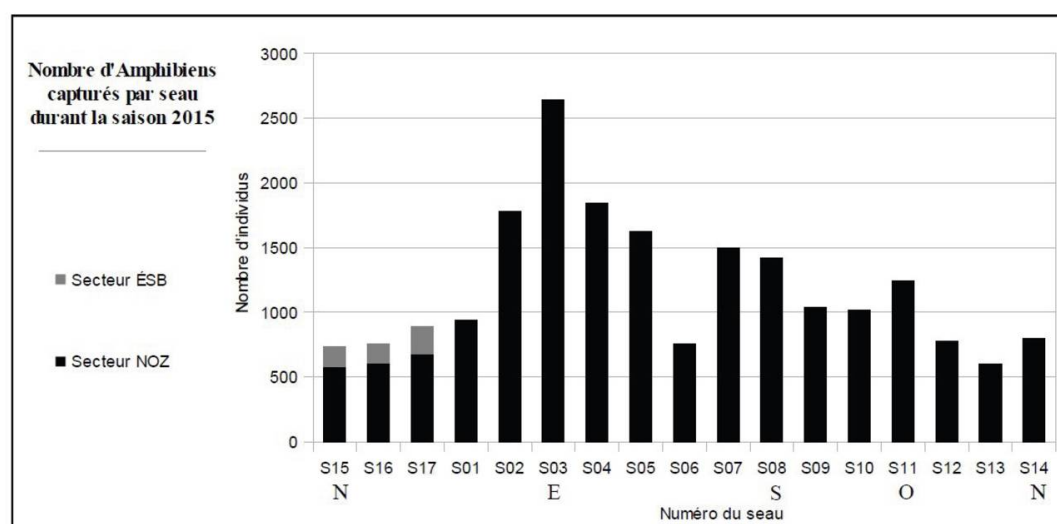


Fig. 6: Nombre d'Amphibiens capturés par seau durant la saison 2015. Afin de présenter toutes les données exploitées sur le même graphique, les totaux des seaux du secteur É.S.B. ont été cumulés aux seaux 15, 16, et 17 du secteur Noz en fonction de leur position géographique relative, soit selon la figure 7, et en partant du principe que les Amphibiens prennent le chemin le plus court pour effectuer leur migration.

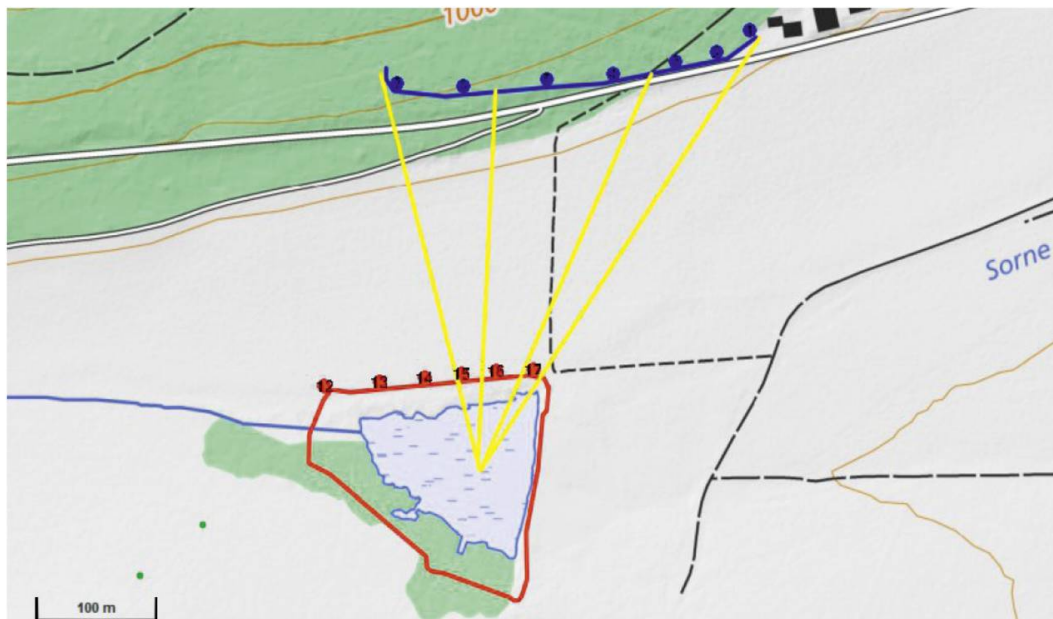


Fig. 7 : Méthode utilisée pour insérer les données É.S.B. utilisées sur la figure 6. En jaune, déplacements logiques des Amphibiens justifiant l'insertion du total du secteur É.S.B. dans les seaux 15, 16, 17. Source: Swisstopo.

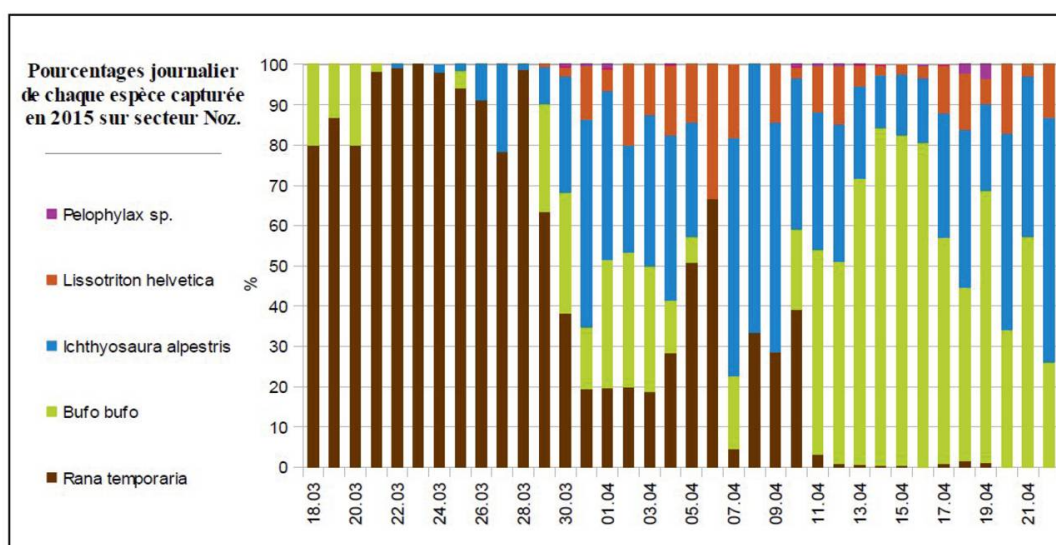


Fig. 8 : Proportion journalière de chaque espèce capturée en 2015 sur secteur Noz, du 18 mars au 22 avril.

Deuxième hypothèse

Recherche d'une vérification de la deuxième hypothèse: les Grenouilles rouges sont plus précoces que les autres Amphibiens.

Sur la figure 8, les Grenouilles rousses atteignent, contrairement aux autres espèces, une proportion supérieure à 75 % au début de la saison (atteignant même les 100 % le 23 mars 2015) et frôlant les 0 % dès le 11 avril 2015. De plus, la proportion de Grenouilles rousses diminue avec l'avancement de la saison dès le 28 mars 2015, mis à part deux pics, respectivement du 4 au 6 avril 2015 et du 8 au 10 avril 2015.

Troisième hypothèse

Recherche d'une vérification pour la troisième hypothèse: les mâles sont plus nombreux que les femelles chez chaque espèce présente dans le point d'eau étudié et entament la migration post-hivernale les premiers.

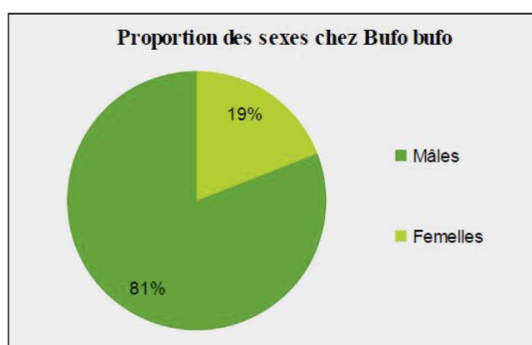


Fig. 9: Proportion des sexes chez les Crapauds communs. Les valeurs utilisées sont les sommes de l'ensemble des captures sur secteurs Noz et É.S.B. en 2015.

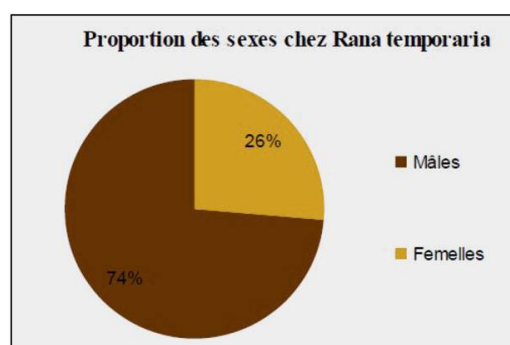


Fig. 10: Proportion des sexes chez les Grenouilles rousses. Les valeurs utilisées sont les sommes de l'ensemble des captures sur secteurs Noz et É.S.B. en 2015.

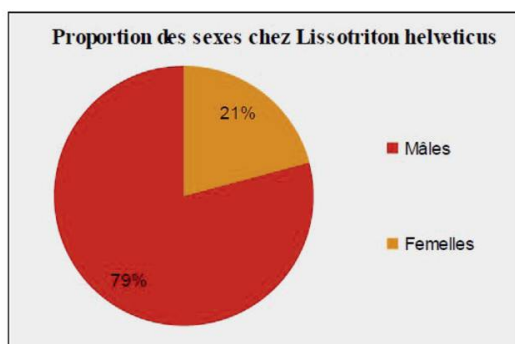


Fig. 11: Proportion des sexes chez les Tritons palmés. Les valeurs utilisées sont les sommes de l'ensemble des captures sur secteurs Noz et É.S.B. en 2015.

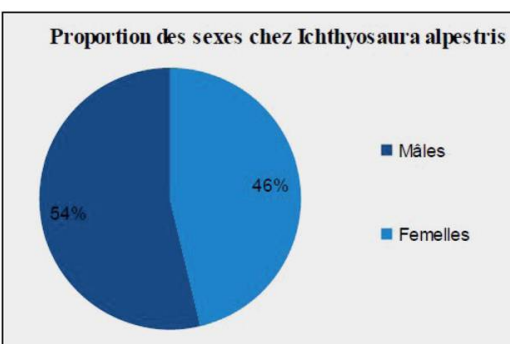


Fig. 12: Proportion des sexes chez les Tritons alpestres. Les valeurs utilisées sont les sommes de l'ensemble des captures sur secteurs Noz et É.S.B. en 2015.

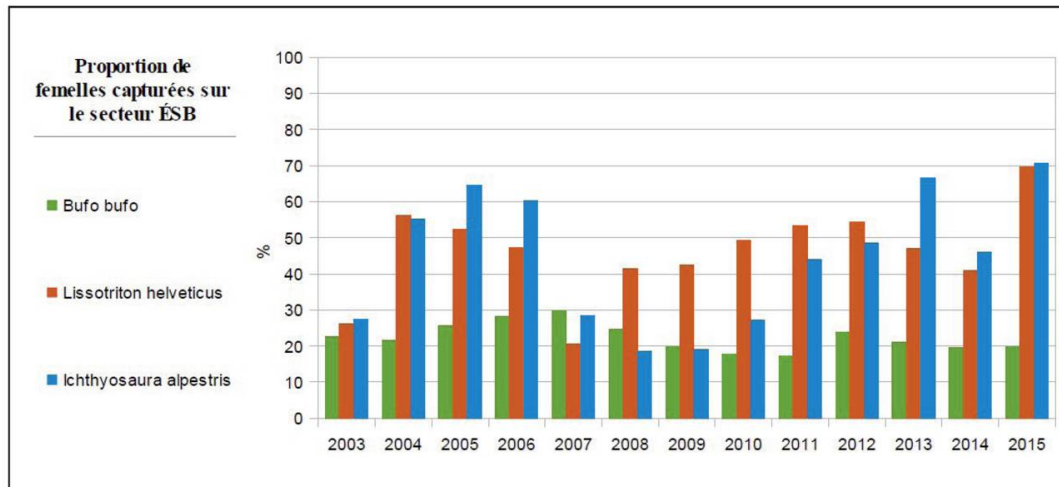


Fig. 13: Proportion de femelles capturées sur le secteur É.S.B. pour les années 2003 à 2015 en pour cent par rapport au total par espèce.

Les figures 9, 10, 11 et 12 sont établies à partir de la somme de l'ensemble des captures des secteurs É.S.B. et Noz sur toute la période d'étude. Plus l'échantillon analysé est grand et plus les proportions sont représentatives. Elles présentent clairement une grande majorité de mâles, excepté chez les Tritons alpestres où le phénomène est moins marqué. La figure 13 regroupe les mêmes calculs, mais pour les années 2003 à 2015 sur le secteur É.S.B. On peut ainsi constater que, excepté chez les Crapauds communs, la proportion de femelles capturées dépasse plusieurs fois les 50 % (dans 38,5 % des cas pour les Tritons palmés et alpestres).

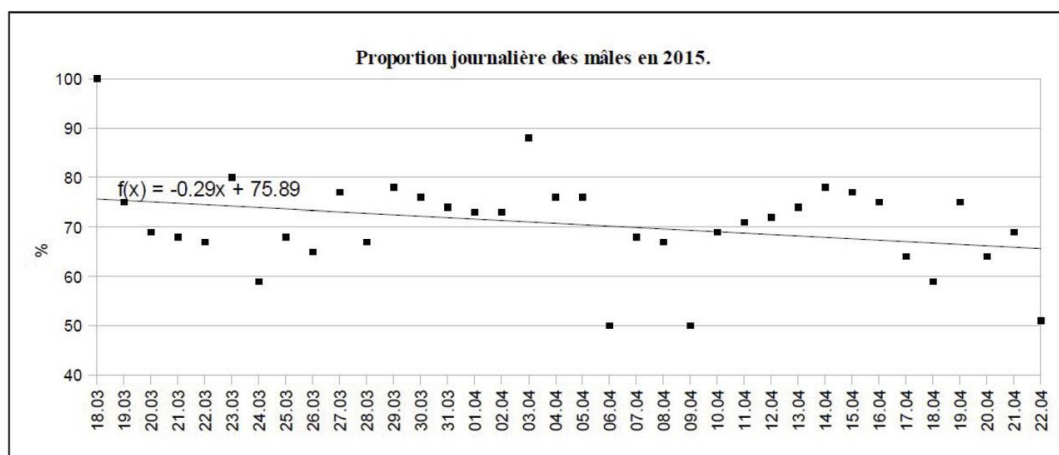


Fig. 14: Proportion journalière de mâles en 2015, toutes espèces confondues, en prenant en compte les sommes des valeurs des secteurs Noz et É.S.B.

La figure 14 montre bien, par sa « courbe » de tendance, que la proportion de mâles en 2015 diminue avec l'avancement de la date. Chaque année de 2002 à 2015 présente cette tendance, parfois même très prononcée, comme en 2009 avec une « courbe » de tendance d'une pente de $-2,44$ (non présentée).

Quatrième hypothèse

Recherche d'une vérification pour la quatrième hypothèse: la proportion de la population totale capturée dans le secteur É.S.B. est relativement élevée et chaque espèce représente une proportion égale de la population totale.

Le total de la population recensée de l'étang de la Noz correspond donc à la somme des totaux de captures des secteurs Noz et É.S.B. Pour rappel, les Amphibiens recensés dans le secteur La Libellule et faisant partie de la population de l'étang de la Noz ont été comptabilisés, car capturés aussi dans ce secteur. Nous arrivons donc à une population totale recensée en 2015 de 20355 individus (19831 sur le secteur Noz et 524 sur le secteur É.S.B.).

Les 524 captures sur le secteur É.S.B. représentent donc le 2,57 % de la population totale recensée. La population totale recensée est donc égale à 38,9 fois le total recensé dans le secteur É.S.B.

On constate sur la figure 15 que les Crapauds communs (45,3 %) et les Tritons alpestres (30,7 %) sont de loin les espèces les mieux représentées dans l'étang de la Noz (14,6 % pour les Grenouilles rousses, 8,9 % pour les Tritons palmés et 0,5 % pour les Grenouilles vertes).

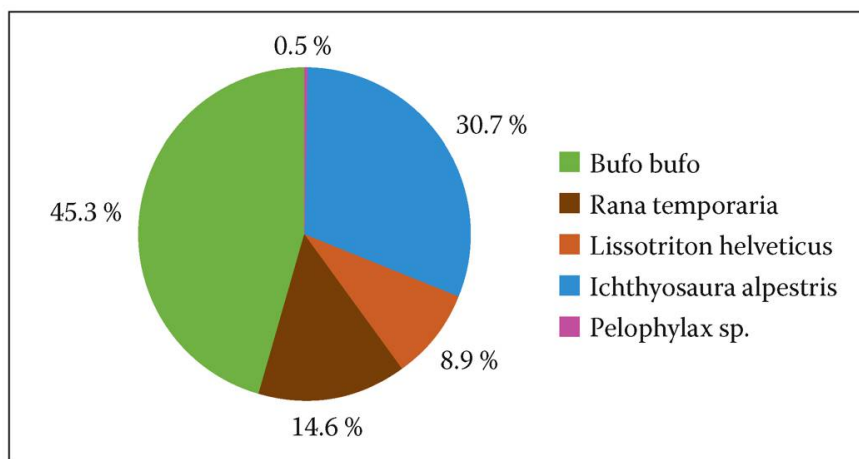


Fig. 15:
Proportion de
chaque espèce
capturée en
2015.
Les valeurs
utilisées sont
les résultats des
recensements
sur les secteurs
Noz et É.S.B.
en 2015.

Cinquième hypothèse

Recherche d'une vérification pour la quatrième hypothèse: Certains facteurs météorologiques influencent la migration post-hivernale ainsi que les effectifs de la population.

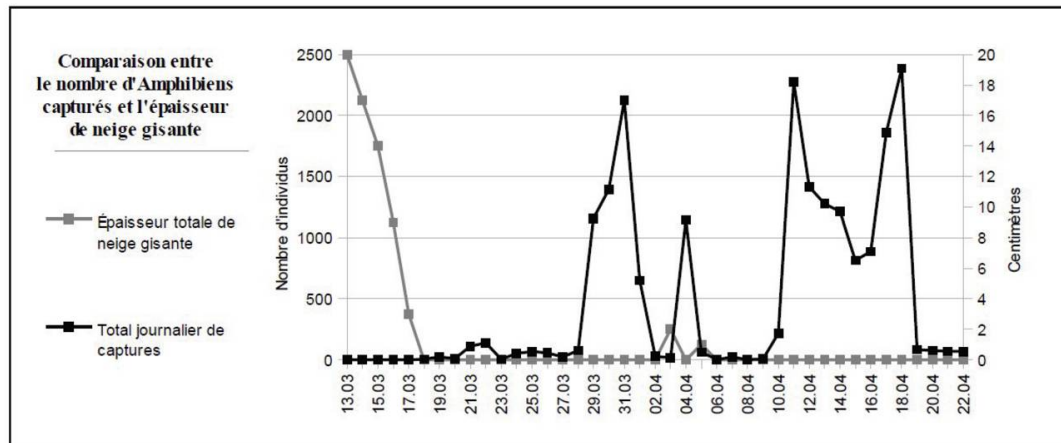


Fig. 16: Comparaison entre le nombre d'Amphibiens et l'épaisseur de neige gisante. Période: 2015. Les valeurs utilisées pour les totaux d'Amphibiens capturés sont le résultat du recensement sur le secteur Noz.

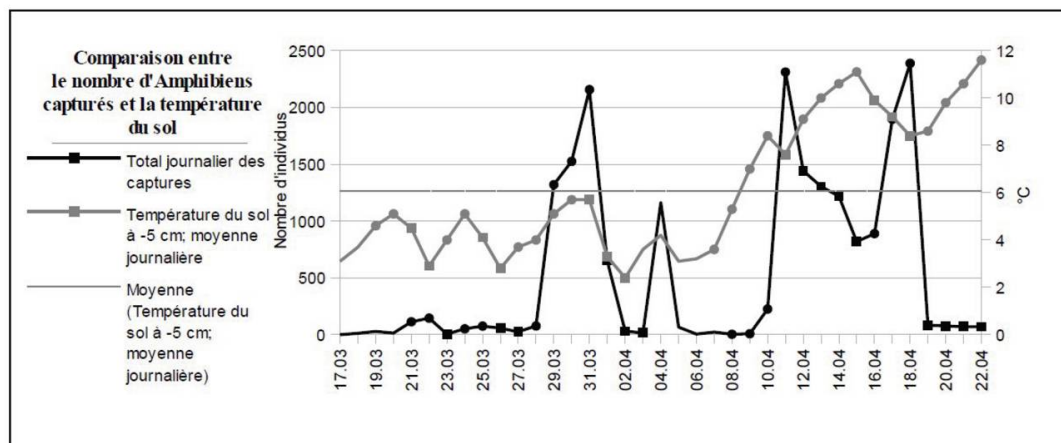


Fig. 17: Comparaison entre le nombre d'Amphibiens capturés et la température du sol. Période: 2015. Les valeurs utilisées pour les totaux d'Amphibiens capturés sont les résultats des recensements sur les secteurs Noz et É.S.B.

Discussion

Il était très important que ces barrages ne deviennent pas des pièges mortels, que ce soit pour les Amphibiens eux-mêmes ou pour d'autres

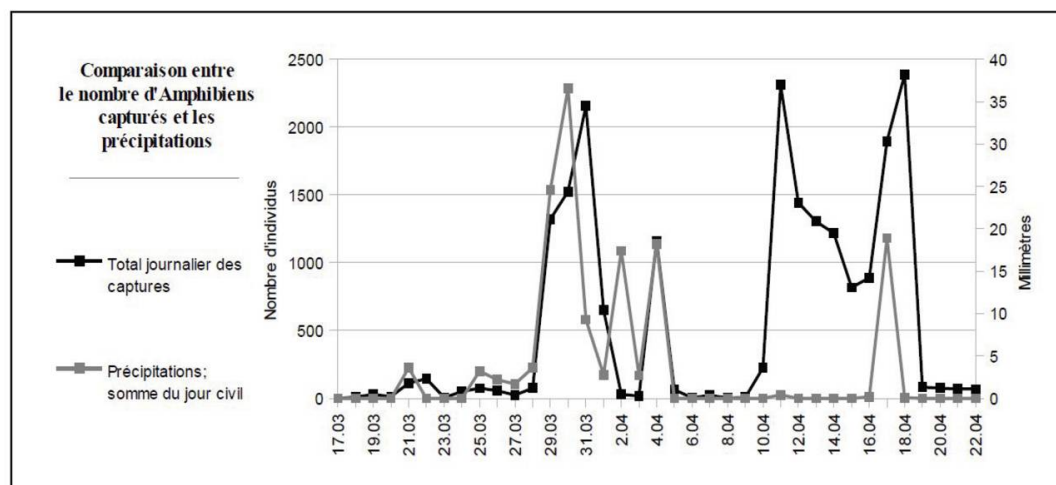


Fig. 18: Comparaison entre le nombre d'Amphibiens capturés et les précipitations. Période: 2015. Les valeurs utilisées pour les totaux d'Amphibiens capturés sont les résultats des recensements sur les secteurs Noz et É.S.B.

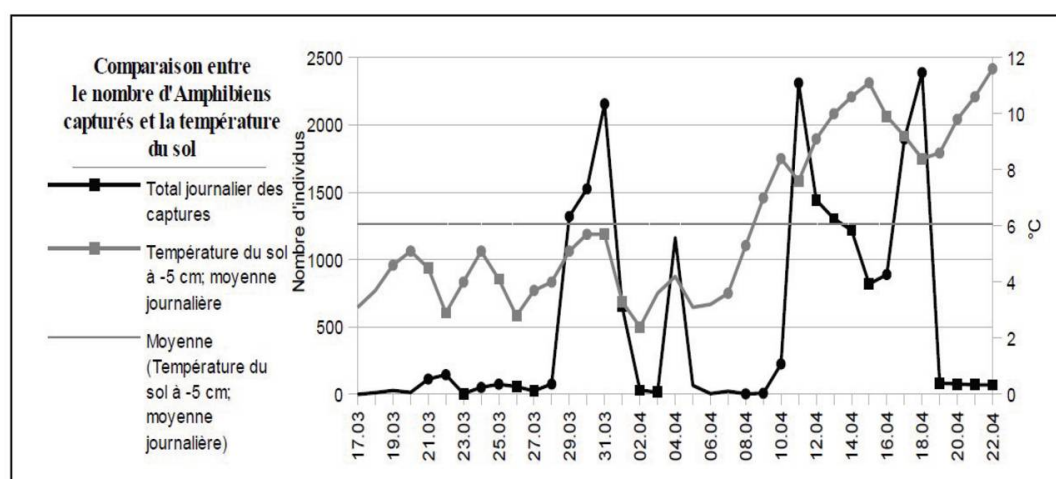


Fig. 19: Comparaison entre le nombre de captures sur le secteur É.S.B. de 2003 à 2015, l'épaisseur de neige gisante et la température de l'air. Les valeurs utilisées pour les totaux d'Amphibiens capturés sont les résultats des recensements sur le secteur É.S.B.

animaux, tels que les insectes ou les micromammifères. Les insectes sont assez résistants pour qu'un relevé journalier suffise à éviter que certains d'entre eux périssent. Par contre, les micromammifères sont plus fragiles. De ce fait, des bois ont été installés dans les seaux afin de permettre à ces espèces de ressortir et d'ainsi éviter la noyade si de l'eau se retrouvait piégée au fond des seaux (événement qui a été évité le plus possible, notamment par des perforations du fond du seau excepté en zones inondées). Cette technique a assez bien fonctionné, même si malheureusement, les micromammifères sont parfois victimes d'une crise

cardiaque lors d'une émotion forte ou meurent de faim. Quelques Musaraignes *Soricidae* sp. et Campagnols roussâtres *Myodes glareolus* et terrestres *Arvicola terrestris* n'ont ainsi pas pu être sauvés. Ces bois ne permettent semble-t-il pas aux Amphibiens de sortir des seaux, mais rien n'a encore été prouvé à ce sujet.

Les cas de morts d'Amphibiens causés par les barrages n'ont heureusement pas été très nombreux. Deux individus sont décédés par assèchement le long des bâches, mais d'autres individus, plus nombreux, sont morts de la même manière avant d'arriver au barrage. Un individu s'est fait en partie ronger par une Musaraigne. Mis à part ces trois cas, la seule cause de mort importante et encore en partie inexpliquée est le cas du seau n° 8, le samedi 18 avril 2015, dans lequel plusieurs dizaines d'individus de toutes les espèces présentes sont morts par asphyxie.

Première hypothèse

En 2015, les seaux n° 6 et n° 11 ne suivent pas la tendance générale indiquée au chapitre « Résultats – Première hypothèse », mais ce phénomène peut s'expliquer par l'emplacement de ces seaux qui serait moins favorable (par exemple, le seau n° 6 se trouvant derrière le pied d'un tronc, ce dernier déviait probablement les Amphibiens dans les seaux voisins).

Le seau n° 3 se trouvant plein est et le seau n° 13 étant placé nord-nord-ouest, on peut affirmer que contrairement à l'hypothèse de départ,

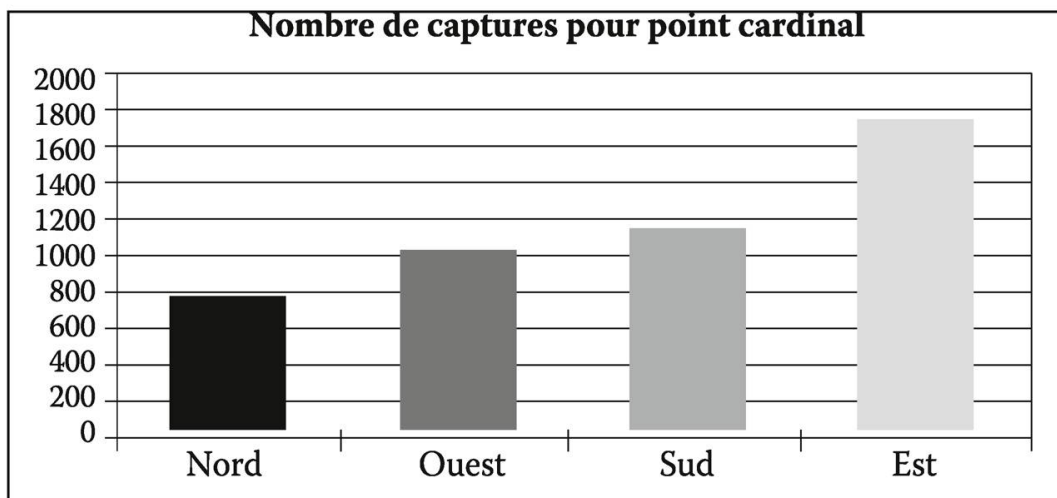


Fig. 20: Nombre de captures pour chaque point cardinal. Les valeurs utilisées sont les résultats du recensement 2015 sur le secteur Noz.

ce n'est que la minorité de la population de l'étang de la Noz qui hiberne au nord, tandis que la majorité hiberne à l'est du plan d'eau.

Cependant, pour confirmer cette remarque, comme les seaux ne sont pas tous espacés de la même distance, figure 20.

Est: seaux 1 à 5

Sud: seaux 6 à 10

Ouest: seaux 11 à 12

Nord: seaux 13 et 17

On obtient ainsi la figure 20.

Les Amphibiens de l'étang de la Noz hibernent donc vraisemblablement majoritairement à l'est, dans la forêt de la Sagne et dans la tourbière du même nom. Ces deux milieux sont idéaux pour l'hibernation des Amphibiens.

D'autre part, si les Amphibiens migrant au nord hibernaient dans la forêt de Béroie, ils seraient capturés au printemps dans les barrages du secteur É.S.B. et seuls quelques-uns d'entre eux se retrouveraient dans les seaux 15 à 17 du secteur Noz. Or, les seaux 15 à 17 du secteur Noz ont capturé beaucoup plus d'individus (1859) que les barrages du secteur É.S.B. (524). Par conséquent, contrairement à l'hypothèse de départ, les Amphibiens migrant au nord ne proviennent pas majoritairement de la forêt de Béroie, mais plus probablement du champ placé entre le secteur É.S.B. et le secteur Noz.

Deuxième hypothèse

La constatation au chapitre « Résultats — Deuxième hypothèse » confirme l'hypothèse de départ. Par ailleurs, le Centre de coordination pour la protection des Amphibiens et Reptiles de Suisse (KARCH) précise qu'une température d'un à deux degrés de plus par rapport aux Grenouilles rousses est nécessaire pour que les Crapauds communs entament leur migration. Quant aux Tritons, les conditions nécessaires au commencement de leur migration ne sont que peu connues (KARCH, Migration des amphibiens: Espèces).

Troisième hypothèse

Le fait que, excepté chez les Crapauds communs, la proportion de femelles capturées dépasse plus d'une fois les 50 % n'est de loin pas négligeable.

Cependant, comme les captures sur le secteur É.S.B. sont minimales par rapport au nombre total d'individus, ces pourcentages obtenus peuvent s'éloigner des pourcentages réels (voir « Résultats — Quatrième hypothèse »). Les Grenouilles rousses et vertes n'ont pas été prises en considération pour la figure 13 par manque de données.

La figure 13 n'est donc à analyser qu'avec certaines précautions, mais on peut toutefois affirmer que des proportions de femelles supérieures à 50 % existent minoritairement. La tendance est nettement à une majorité de mâles chez toutes les espèces, surtout chez les Crapauds communs.

D'autre part, selon la figure 14 et les observations y relatives, il semble qu'il y ait effectivement une tendance au fait que les mâles partent en premier, puisque leur proportion journalière baisse avec l'avancement de la date. Ils attendent donc les femelles sur les plans d'eau.

Quatrième hypothèse

La population totale réelle diffère de la population totale recensée, car certains individus peuvent hiberner au fond du point d'eau. De plus, on ne peut être certain qu'aucun Amphibien ne puisse passer les barrages lors d'une pose normale; et lors des tempêtes Mike (30.03.2015) et Niklas (01.04.2015) des percées ont été présentes durant quelques heures, permettant ainsi très probablement à de nombreux individus de passer sans se faire piéger. Il est bien évidemment très difficile d'estimer ces passages non comptabilisés. Les trouées ayant été réparées dès que possible et en proportion avec les chiffres annuels, le nombre d'individus non comptabilisé devrait vraisemblablement être inférieur au millier.

Si la part des captures recensées dans le secteur É.S.B. représente les 2,57 % de la population totale recensée, cette même part représente donc moins de 2,57 % de la population totale réelle. Il est important de préciser que ce secteur est équipé de barrages avec pour but premier de protéger les Amphibiens migrateurs du danger que représente la route (Brahier & Houriet 2012). L'impact qu'a cette mesure de protection est donc plus faible qu'imaginé au début des opérations de sauvegardes.

Aucune interprétation ne semble nécessaire à ajouter aux constatations du chapitre « Résultats — Quatrième hypothèse » relatives à la figure 15.

Cinquième hypothèse

On peut constater sur la figure 16 qu'en 2015, aucune capture et donc aucune sortie d'hibernation n'a eu lieu tant que de la neige gisante était présente sur le sol, excepté les 3 et 5 avril, mais ces jours correspondent également à un faible nombre de captures et donc à un faible nombre de sorties d'hibernation. Les Amphibiens évitent de toute évidence le contact avec la neige; ce facteur météorologique retarde donc les migrations post-hivernales.

On constate sur la figure 17 une corrélation entre le nombre d'Amphibiens capturés et la température du sol, excepté dès le 12 avril: lorsque la température du sol croît (points ronds sur le graphique) ou décroît (points carrés sur le graphique). Le nombre d'Amphibiens capturé en fait de même avec un, parfois deux jours d'écart, durée correspondant vraisemblablement au temps nécessaire aux Amphibiens pour rejoindre l'étang. Une température du sol élevée favorise donc la sortie d'hibernation.

Dès le 18 avril pourtant, le nombre de captures baisse rapidement avant de plafonner à des taux très faibles tandis que la température ne cesse d'augmenter pour atteindre les valeurs les plus élevées de la période étudiée. Ce phénomène s'explique par le fait que la migration touche alors à sa fin.

Avec les précipitations pluvieuses journalières (fig. 18), on a vraisemblablement le facteur météorologique le plus influant positivement sur les migrations post-hivernales. En effet, presque chaque pic de précipitations est suivi, le lendemain, par un pic du nombre de captures; ce décalage d'un jour correspondant donc au temps nécessaire aux Amphibiens pour effectuer leur migration. Les précipitations par température douce favorisent également leur sortie d'hibernation avant la migration.

Deux exceptions cependant, respectivement les 2 et 4 avril 2015: le premier pic de précipitation ne provoque aucune hausse du nombre de captures le lendemain, tandis que le second, lui, arrive le même jour, alors que le pic de captures était attendu le jour suivant. L'explication de ce cas est simple: ces précipitations sont constituées de neige (car de la neige gisante est présente les jours suivants). De plus, le nombre de captures relativement élevé du 4 avril (1 163 individus) laisse à penser que les individus sont sortis d'hibernation en masse entre deux chutes de neige, certains ayant été bloqués par la première et d'autres « anticipant » la seconde. Remarquons par ailleurs la température plus douce du 3 avril.

On peut donc en conclure les influences suivantes: une température douce et des précipitations pluvieuses favorisent la migration, à l'inverse d'une température basse et de neige gisante.

Cette conclusion semble également applicable au graphique *Migration des Grenouilles rousses et Crapauds communs 2012* (C.S.C.F. & KARCH 2012, gr. 1), du moins en majeure partie.

Sur la figure 19, on constate que de 2003 à 2015, le nombre de captures et l'épaisseur de neige gisante varient de la même manière sur la période, excepté en 2006 et 2007. Les Amphibiens hibernent donc dans des meilleures conditions lorsque la neige gisante est plus épaisse, celle-ci isolant le sol du gel. Ainsi, les non-corrélations de 2006 et 2007 sont peut-être explicables par la température de l'air. En effet, l'épaisseur de neige gisante de ces deux années a vraisemblablement été insuffisante face aux relativement basses températures de 2006 et celles très clémentes de 2007. Le même phénomène est constaté pour 2015.

Conclusion

Les résultats obtenus grâce au travail de terrain de la présente étude ainsi que les informations récoltées auprès des naturalistes et météorologues ont été analysés afin de confirmer ou de réfuter les cinq hypothèses de départ. Il en ressort les remarques suivantes:

- La majorité de la population de l'étang de la Noz hiberne à l'est de l'étang de la Noz, probablement dans la tourbière de la Sagne.
- Les individus hibernant au nord du point d'eau ne proviennent pas majoritairement de la forêt de Béroie, mais plus vraisemblablement des champs séparant l'étang de la Noz du secteur É.S.B.
- La Grenouille rousse est bel et bien l'espèce la plus précoce parmi les cinq espèces se reproduisant dans l'étang de la Noz.
- La tendance est nettement à une majorité de mâles chez toutes les espèces présentes dans le point d'eau étudié, surtout chez les Crapauds communs, bien que chez les Tritons, des proportions de femelles dépassant les 50 % se rencontrent occasionnellement.
- Une tendance au fait que les mâles entament la migration post-hivernale en premier semble exister.
- La part de la population étudiée capturée dans les barrages du secteur É.S.B. était de 2,57 % en 2015.

— Les proportions des différentes espèces se répartissent ainsi: 45,3 % pour les Crapauds communs, 30,7 % pour les Tritons alpestres, 14,6 % pour les Grenouilles rousses, 8,9 % pour les Tritons palmés et 0,5 % pour les Grenouilles vertes.

— La présence de neige gisante influence négativement la migration post-hivernale tandis que la température élevée du sol et les précipitations pluvieuses favorisent la sortie d'hibernation.

— La présence de neige gisante l'hiver ainsi qu'une moyenne de température hivernale clémente favorisent la survie des Amphibiens en hibernation.

Les points suivants seraient intéressants à approfondir ou à étudier :

— Étudier les zones d'hibernation des Amphibiens de l'étang de la Noz, en ayant notamment comme hypothèse de départ le fait qu'ils hibernent dans la tourbière de la Sagne à l'est et dans des galeries de Campagnols terrestres *Arvicola terrestris* dans le champ au nord du point d'eau.

— La migration entre étangs (notamment entre l'étang de la Noz et l'étang de la patinoire) est un phénomène que certaines observations laissent supposer.

— Bon nombre de paramètres n'ont pas été analysés dans la présente étude pour *Pelophylax* sp. et surtout pour *Rana temporaria* en raison des petits nombres de captures. Il serait donc intéressant de faire des recherches ciblées sur ces deux espèces.

— La migration diurne s'est révélée lors de ce travail plus importante qu'estimée.

— Les critères météorologiques influent sur la mortalité des œufs et des juvéniles.

Remerciements

L'Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse pour les données météorologiques transmises grâce à leur portail IDAweb.

M. Bessire Olivier, collaborateur scientifique à l'Office de l'agriculture et de la nature du canton de Berne pour l'autorisation de pose des barrages et de captures.

M^{me} Juillerat Marie-José pour la vingtaine de relevés des barrages effectués notamment dans des conditions météorologiques extrêmes ainsi que pour ses conseils divers.

M. Houriet Willy pour les résultats des recensements des années 2003 à 2015 dans le secteur É.S.B., pour sa grande aide aux réinstallations nocturnes des barrages emportés par la tempête Niklas.

M. Brahier Jean-Luc, président de la société La Libellule pour ses nombreux conseils, ses quelques relevés effectués et surtout pour le prêt de cent mètres de barrages appartenant à la société.

M. Roth Édouard du canton du Jura pour le prêt de 560 mètres de barrages à Amphibiens appartenant au centre A16 de Delémont

M. Gisiger Jean-Marie pour son aide au démontage des barrages et surtout pour son ingénieuse enrouleuse à bâches.

M. Reichenbach Alwin et sa famille pour leur accord de pose des barrages sur leurs terres d'exploitation.

M^{me} Vogel Carine pour la relecture de la présente étude et ses nombreux conseils.

M^{lle} Houlmann Éliane et MM. Lometti Lucas et José pour la fourniture de nombreux seaux alimentaires.

M^{me} Kiran Sylvie et sa famille pour la mise à disposition régulière d'un véhicule.

M^{me} et M. Saucy Daisy et Bertrand pour l'aide apportée sur le terrain, notamment pour la conduite des véhicules.

M. Paroz dit « le Grillon » pour un relevé matinal dans des conditions météorologiques extrêmes.

M. Monnerat Paul pour la relecture et la correction de cette étude.

M. Bassin Philippe pour sa fonction d'expert lors de l'évaluation de la présente étude.

Gauvain Saucy a obtenu son diplôme de maturité après trois ans d'étude au lycée cantonal de Porrentruy avec pour option spécifique biologie-chimie. Il étudie à présent la biologie au niveau bachelor à l'université de Neuchâtel. La présente étude reprend les principaux résultats de son travail de maturité.

BIBLIOGRAPHIE

Références internet

Brahier J.-L. 2011 : La Noz, un étang à l'histoire mouvementée. *Le Pèlerin* [en ligne]. [Consulté le 6 mars 2015]. Disponible à l'adresse: <http://lepelerin.over-blog.com/article-la-noz-un-etang-a-l-histoire-mouvementee-73472635.html>.

C.S.C.F. & KARCH 2012 : Herpetofaunistik Herpétofaune [en ligne]. [Consulté le 20 juillet 2015]. Disponible à l'adresse: [http://www.karch.ch/files/content/sites/karch/files/Doc %20 %C3%A0%20t%C3%A9l%C3%A9charger/Amphibienwanderung/Amphibien%20und%20 Verkehr%202012_NEWS37.pdf](http://www.karch.ch/files/content/sites/karch/files/Doc%20%C3%A0%20t%C3%A9l%C3%A9charger/Amphibienwanderung/Amphibien%20und%20Verkehr%202012_NEWS37.pdf).

Chytrididomycose. KARCH: Centre de coordination pour la protection des Amphibiens et Reptiles de Suisse [en ligne]. [Consulté le 24 juillet 2015]. Disponible à l'adresse: <http://www2.unine.ch/karch/page-32162.html>.

Migrations des amphibiens: Espèces. KARCH: Centre de coordination pour la protection des Amphibiens et Reptiles de Suisse [en ligne]. [Consulté le 9 août 2015]. Disponible à l'adresse: <http://www.karch.ch/karch/page-34099.html>.

Cartes de la Suisse. Confédération suisse en collaboration avec les cantons [en ligne]. [Consulté le 24 juillet 2015]. Disponible à l'adresse: <https://map.geo.admin.ch/>.

Portail de données pour l'enseignement et la recherche (IDAweb). Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse 2014 [en ligne]. [Consulté le 24 juillet 2015]. Disponible à l'adresse: [http://www.meteosuisse.admin.ch/home/service-et-publications/conseil-et-ser vice/portail-de-donnees-pour-l-enseignement-et-la-recherche.html](http://www.meteosuisse.admin.ch/home/service-et-publications/conseil-et-service/portail-de-donnees-pour-l-enseignement-et-la-recherche.html).

Articles

Brahier J.-L. & Houriet W. 2012 : Action batraciens Bellelay. *Actes 2012 de la Société jurassienne d'Émulation*.

NOTE

¹ Pour toute la présente étude, le système de coordonnées utilisé est CH1903/LV03.