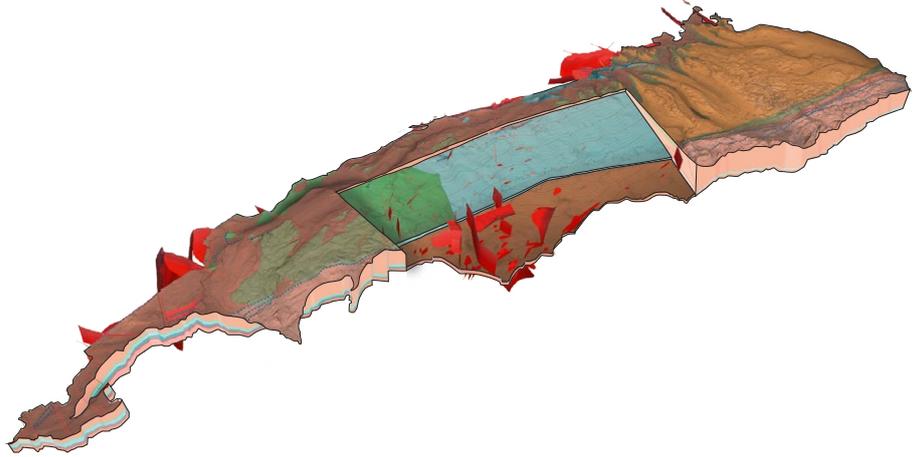


GeoMol: Modèle géologique 3D du bassin molassique suisse – Rapport final



Berichte der Landesgeologie
Rapports du Service géologique national
Rapporti del Servizio geologico nazionale
Reports of the Swiss Geological Survey

Robin Allenbach, Roland Baumberger, Eva Kurmann, C. Salomè Michael et Lance Reynolds



GeoMol: Modèle géologique 3D du bassin molassique suisse – Rapport final

Berichte der Landesgeologie
Rapports du Service géologique national
Rapporti del Servizio geologico nazionale
Reports of the Swiss Geological Survey

Robin Allenbach, Roland Baumberger, Eva Kurmann, C. Salomè Michael et Lance Reynolds



Imprint

GeoMol: Modèle géologique 3D du bassin molassique suisse – rapport final

Auteurs (par ordre alphabétique)

Robin Allenbach, Roland Baumberger, Eva Kurmann, C. Salomè Michael et Lance Reynolds

Avec des contributions de

Bastien Delacou, Gennaro Di Tommaso, Mirjam Dürst Stucki, Pascal Kuhn, Maria Ponzio et Philip Wehrens.

Traduction française

Christian Marro, Traductonet

Composition et mise en page

Office fédéral de topographie swisstopo

Impression

Office fédéral de topographie swisstopo

Site Internet

<https://viewer.geomol.ch>

Éditeur

© 2017, Office fédéral de topographie, CH-3084 Wabern, www.swisstopo.ch – Tous droits réservés. Toute traduction ou reproduction de ce document ou de parties de celui-ci, sous quelque forme ou par quelque procédé que ce soit (analogique ou numérique), qui ne sont pas d'un usage exclusivement privé, ne sont autorisées qu'avec l'accord de l'éditeur.

Recommandation pour la citation en bibliographie

SWISSTOPO (2017): GeoMol: Modèle géologique 3D du bassin molassique suisse – rapport final. – Rapp. Serv. géol. natl. *10 FR*

Avis de non-responsabilité

Les résultats exposés dans le présent rapport et intégrés dans le modèle géologique 3D ont été obtenus en interprétant diverses données (levés sismiques, forages, cartes et profils géologiques, etc.) d'ancienneté, de qualité et de niveau de détail variables. Ces données n'étaient pas homogènes au départ, aussi a-t-il fallu les simplifier et les harmoniser. L'élaboration du modèle a également été influencée par les connaissances géologiques et par le parcours professionnel des collaboratrices et des collaborateurs impliqués.

Le modèle tridimensionnel faisant l'objet du présent rapport offre une possibilité simple et rapide d'interroger des structures géologiques dans le sous-sol du périmètre traité. Il peut servir de base pour (1) acquérir une vue d'ensemble du sous-sol géologique du bassin molassique suisse, (2) estimer sommairement la position et la géométrie de différents horizons lithostratigraphiques et (3) localiser sommairement les zones de failles existantes. Les données et les informations extraites de ce modèle 3D ne sauraient remplacer des avis d'experts, ni des expertises géologiques, ni des relevés de site de toute nature. Elles ne doivent être utilisées pour prendre des décisions qu'en lien avec des rapports d'expertises.

Ce rapport ainsi que les informations accessibles sur le site Internet lié au projet donnent aux personnes et aux institutions intéressées des renseignements au sujet du modèle décrivant la géologie du bassin molassique suisse en trois dimensions. Beaucoup de temps et de travail ont été investis pour assurer la qualité du modèle 3D et de ce rapport. Il n'est toutefois pas garanti que les interprétations qu'ils présentent correspondent à la réalité en tout lieu du sous-sol. La Confédération helvétique et les auteurs ne peuvent en aucun cas être rendus responsables de toute perte ou dommage matériel ou immatériel causé par l'accès aux informations publiées, par leur utilisation ou leur non-utilisation, par un usage abusif de ces informations ou par des dysfonctionnements techniques.

ISSN 1661-9285

ISBN 978-3-302-40109-6

Préface de l'éditeur

Le Plateau suisse est un lieu de résidence et de travail pour plus de la moitié de la population suisse. Cet espace est utilisé intensivement. D'une part, il fait l'objet d'une importante demande en ressources telles que roches et terres, eaux souterraines et géothermie. D'autre part, les responsables d'infrastructures privées et publiques (transports publics, routes, géoénergie) l'intègrent de plus en plus dans leurs planifications. La mise en valeur de son potentiel géologique et l'exploitation durable des ressources limitées de son sous-sol revêtent une grande importance sociétale, politique, économique et géoscientifique.

Le Service géologique national est le centre de compétence de la Confédération pour la documentation du sous-sol. Il est chargé du relevé, de l'analyse et de la mise à disposition de données géologiques numériques et de modèles tridimensionnels d'intérêt national. Dans le cadre du programme européen «INTERREG IV B Alpine Space», le projet «GeoMol – Évaluation du potentiel géologique dans les bassins d'avant-chaîne alpins pour planifier et exploiter durablement leurs ressources naturelles» a permis d'élaborer entre 2012 et 2015 un modèle géologique tridimensionnel synthétique du bassin molassique (GeoMol15). En outre un projet séparé s'est attaché à développer un modèle géologique tridimensionnel détaillé du Plateau suisse (Geo-

Mol17). Les résultats de ces deux projets posent les premiers jalons en vue de décrire et de visualiser systématiquement le sous-sol suisse. Le projet GeoMol fournit ainsi une contribution active à la planification et à l'exploitation durable du sous-sol.

GeoMol constitue surtout un important projet de coopération avec des institutions sises en Suisse et en Europe. Le Service géologique national a collaboré avec des partenaires de la Confédération (ARE, OFEV, OFEN), avec des cantons (AG, FR, GE, LU, SO, VD, ZH), des universités (Bâle, Berne, Fribourg, Genève), le Musée cantonal de géologie (Vaud) et des entités privées (Nagra, SEAG). GeoMol a en même temps permis à tous les intervenants d'acquérir de nouvelles connaissances dans le domaine de la modélisation géologique tridimensionnelle. Au sein du projet européen, la Suisse a essentiellement travaillé avec des partenaires allemands, français, italiens, autrichiens et slovènes dans le cadre du programme «INTERREG IV B Alpine Space».

Les auteurs sont seuls responsables du contenu du texte, des illustrations et des annexes.

Olivier Lateltin
Responsable du Service géologique national

Vorwort des Herausgebers

Das Schweizer Mittelland ist sowohl Wohn- als auch Arbeitsort für mehr als die Hälfte der nationalen Bevölkerung. Diese Region wird intensiv genutzt. Zum einen besteht eine grosse Nachfrage an Ressourcen wie Steine und Erden, Grundwasser und Erdwärme, zum anderen beziehen auch die Verantwortlichen von privaten und öffentlichen Infrastrukturen (ÖV, Strassen, Geoenergie) diesen Raum vermehrt in die Planung mit ein. Die Erschliessung dieser Geopotenziale und die nachhaltige Bewirtschaftung der endlichen Ressource «Untergrund» hat gesellschaftliche, politische, wirtschaftliche und geowissenschaftliche Relevanz.

Die Landesgeologie ist das Kompetenzzentrum des Bundes für die Dokumentation des Untergrundes. Sie befasst sich mit der Erhebung, Analyse und Bereitstellung von digitalen geologischen Daten und 3D-Modellen von nationalem Interesse. Im Rahmen des EU-Programms «INTERREG IV B Alpine Space» wurde im Projekt «GeoMol – Bewertung von Geopotenzialen für die nachhaltige Planung und Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen in den alpinen Vorlandbecken» (2012–2015) ein geologisches 3D-Übersichtsmodell des Molassebeckens (GeoMol15) erstellt. Darüber hinaus wurde in einem separaten Projekt ein detailliertes geologisches 3D-Modell (GeoMol17) des Schweizer

Mittellandes entwickelt. Die Ergebnisse des Projekts bilden die ersten Schritte, den Untergrund der Schweiz systematisch zu beschreiben und zu visualisieren. Das Projekt GeoMol liefert damit einen aktiven Beitrag für die nachhaltige Planung und Bewirtschaftung des Untergrundes.

GeoMol ist vor allem ein bedeutendes Kooperationsprojekt mit Institutionen innerhalb der Schweiz und Europa. Die Landesgeologie hat mit Partnern aus Bund (ARE, BAFU, BFE), Kantonen (AG, FR, GE, LU, SO, VD, ZH), Universitäten (Basel, Bern, Freiburg und Genf), dem Geologischen Museum des Kantons Waadt und Privaten (Nagra, SEAG) zusammengearbeitet. Gleichzeitig konnte mit GeoMol bei allen Beteiligten neues Wissen und Erfahrung im Bereich der geologischen 3D-Modellierung aufgebaut werden. Die Zusammenarbeit im GeoMol-UE-Projekt konzentrierte sich im Rahmen des EU-Programms «INTERREG IV B Alpine Space» auf Partner aus Deutschland, Frankreich, Italien, Österreich und Slowenien.

Für den Inhalt des Textes, die Illustrationen und die Anhänge sind die Autoren allein verantwortlich.

Olivier Lateltin
Leiter der Landesgeologie

Prefazione dell'editore

L'Altipiano svizzero è un luogo di residenza e di lavoro per oltre la metà della popolazione svizzera. Questa regione è intensamente sfruttata. Da una parte, essa è soggetta a un'importante domanda di risorse quali rocce e terre, acque sotterranee e geotermia. D'altra parte, i responsabili di infrastrutture private e pubbliche (trasporti pubblici, strade, geotermia) la integrano sempre più nelle loro pianificazioni. La valorizzazione del suo potenziale geologico e lo sfruttamento sostenibile delle risorse limitate del suo sottosuolo rivestono una grande importanza sociale, politica, economica e geoscientifica.

Il Servizio geologico nazionale è il centro di competenza della Confederazione per la documentazione del sottosuolo. Esso è incaricato del rilievo, dell'analisi e della messa a disposizione di dati geologici numerici e modelli tridimensionali d'interesse nazionale. Sotto l'egida del programma europeo «INTERREG IV B Alpine Space», nell'ambito del progetto «GeoMol-Valutazione del potenziale geologico nei bacini di avampaese alpini per pianificare e sfruttare sostenibilmente le loro risorse naturali», è stato elaborato tra il 2012 e il 2015 un modello geologico tridimensionale sintetico del bacino molassico (GeoMol15). Inoltre un progetto separato si è concentrato sullo sviluppo di un modello geologico tridimensionale dettagliato dell'Altipiano svizzero (GeoMol17).

I risultati di questi due progetti pongono le prime basi in vista della descrizione e della visualizzazione sistematica del sottosuolo svizzero. Il progetto GeoMol fornisce quindi un contributo attivo alla pianificazione e allo sfruttamento sostenibile del sottosuolo.

GeoMol costituisce soprattutto un importante progetto di cooperazione con istituzioni che hanno sede in Svizzera e in Europa. Il Servizio geologico nazionale ha collaborato con partners della Confederazione (ARE, UFAM, UFE), con i cantoni (AG, FR, GE, LU, SO, VD, ZH), le università (Basilea, Berna, Friburgo, Ginevra), il Museo di geologia del Canton Vaud ed enti privati (Nagra, SEAG). Nel contempo GeoMol ha permesso a tutti i partecipanti di acquisire nuove conoscenze nel campo della modellizzazione geologica tridimensionale. In seno al progetto europeo, la Svizzera ha lavorato essenzialmente con partners tedeschi, francesi, italiani, austriaci e sloveni nell'ambito del programma «INTERREG IV B Alpine Space».

Gli autori sono i soli responsabili del contenuto del testo, delle illustrazioni e degli allegati.

Olivier Lateltin
Responsabile del Servizio geologico nazionale

Foreword from the editor

The Swiss Plateau is both a place of work and residence for more than half the nation's population. This region is subject to intensive land use. On the one hand, there is a high demand for resources such as rocks and soils as well as groundwater and geothermal energy. On the other hand, those in charge of private and public infrastructure (public transport, roads, geo-energy) are increasingly involved in planning in the same areas. The development of these geopotentials and the sustainable management of the finite resource «subsurface» has social, political, economic and geoscientific relevance.

swisstopo is the federal competence centre responsible for documenting the subsurface. It deals with the collection, analysis, storage and provision of digital geological data and 3D models of national interest. A 3D geological model of the Swiss Molasse Basin (GeoMol15) was produced as part of the project «GeoMol – Assessing subsurface potentials of the Alpine Foreland Basins for sustainable planning and use of natural resources» (2012–2015), within the framework of the EU's «INTERREG IV B Alpine Space» program. In addition, a more detailed 3D geological model (GeoMol17) of the same region was generated in a separate sub-project. The

results of this project are the first steps in systematically describing and visualizing Switzerland's subsurface. The GeoMol project thus makes an active contribution to the sustainable planning and management of the subsurface.

GeoMol, in particular, is an important collaboration project between various institutions both within Switzerland and across Europe. On a national level, swisstopo worked together with partners from Swiss federal offices (ARE, FOEN, SFOE), cantons (AG, FR, GE, LU, SO, VD, ZH), universities (Basel, Bern, Fribourg und Geneva), the Cantonal Museum of Geology (VD) and private organisations (Nagra, SEAG). Internationally, cooperation in the GeoMol-UE project focused on partners from Germany, France, Italy, Austria and Slovenia, all within the framework of the EU program «INTERREG IV B Alpine Space». All of those involved with GeoMol were able to acquire new knowledge and experience in the field of 3D geological modelling.

The authors alone are responsible for the content of the text, the illustrations and the appendices.

Olivier Lateltin
Head of the Swiss Geological Survey

Résumé

Le présent rapport ainsi que les modèles GeoMol15 et GeoMol17 qui l'accompagnent sont le fruit de près de cinq ans de travail. Le projet «GeoMol – Évaluation du potentiel géologique dans les bassins d'avant-chaîne alpins pour planifier et exploiter durablement leurs ressources naturelles» a été lancé dans le cadre du programme européen «INTERREG IV B Alpine Space». Le but du projet consistait à élaborer un modèle tridimensionnel continu du bassin d'avant-chaîne nord-alpin et un autre de la plaine du Pô. Il visait aussi à traiter certaines questions spécifiques en examinant cinq régions pilotes à l'aide de modèles détaillés. Le potentiel géothermique, le potentiel de stockage de CO₂ et l'aléa sismique en faisaient notamment partie.

Le modèle GeoMol15 s'inscrit dans la suite des résultats de l'Atlas sismique du bassin molassique suisse (SASMB, SOMMARUGA et al. 2012). La nouveauté réside dans la modélisation d'horizons et de zones tectonisées supplémentaires, en se basant sur l'interprétation de failles signalées dans l'Atlas. La contribution suisse au modèle GeoMol européen comprend le modèle d'ensemble GeoMol15, ainsi que des modèles plus détaillés dans trois régions pilotes, élaborés avec une densité supérieure de données, des horizons supplémentaires et des représentations plus fines des zones de failles connues. Ces trois domaines pilotes couvrant plus de la moitié du bassin molassique suisse, il a été décidé de réaliser, pour le projet GeoMol Suisse, un modèle continu incluant de nombreux détails (GeoMol17). À cet effet, le bassin molassique suisse a été subdivisé en six aires de modélisation, qui ont été traitées par les six partenaires du projet.

Les zones de jonction entre ces six sous-modèles ont ensuite été harmonisées pour donner le modèle final GeoMol17.

Toutes les données utilisées sont affectées d'incertitudes qui influencent les modèles 3D. Par conséquent, GeoMol15 et GeoMol17 ne reflètent pas exactement la géologie du bassin molassique suisse, mais donnent plutôt un aperçu des principaux éléments structuraux de son sous-sol géologique en fonction des données actuellement disponibles. Ils comprennent les principales zones faillées et douze horizons stratigraphiques cartographiables dans tout le bassin molassique à partir des données sismiques.

Il faut s'attendre à ce que l'intérêt pour l'utilisation du sous-sol croisse fortement dans un proche avenir. Des conflits pourront ainsi survenir entre les divers types d'usages, tels que sol de fondation, lieu d'extraction de matières premières, de production ou stockage d'énergie, d'élimination ou encore d'entreposage provisoire d'hydrocarbures. Les autorités et les organes législatifs seront donc appelés à se préoccuper toujours davantage de l'extension du droit de l'aménagement du territoire en profondeur. Un premier aperçu du sous-sol géologique leur est fourni par les modèles 3D de GeoMol. Ces modèles serviront aussi aux entreprises privées qui ont besoin de modélisations tridimensionnelles du sous-sol pour réaliser des études pilotes de toutes sortes. Les centres de formation pourront également en tirer profit pour visualiser des caractéristiques géologiques ou pour fonder leurs propres modèles dans le cadre de projets de recherche.

Zusammenfassung

Dieser Bericht und die dazugehörigen Modelle GeoMol15 und GeoMol17 sind das Resultat von beinahe fünf Jahren Arbeit. Initialisiert wurde das EU-Projekt «GeoMol – Bewertung von Geopotenzialen für die nachhaltige Planung und Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen in den alpinen Vorlandbecken» im Rahmen des EU-Programms «INTERREG IV B Alpine Space». Ziel dieses Projekts war die Erstellung von je einem zusammenhängenden 3D-Modell des Nordalpinen Vorlandbeckens als auch des Po-Beckens. Ausserdem wurden innerhalb dieses Projekts anhand von fünf Pilotregionen mit detaillierteren Modellen spezifische Fragestellungen bearbeitet. Diese beinhalteten Studien zu Geothermie- und CO₂-Speicherpotenzial als auch zur Erdbebengefährdung.

Das Modell GeoMol15 ist eine Weiterentwicklung der Resultate des Seismischen Atlas des Schweizer Molassebeckens (SASMB, SOMMARUGA et al. 2012). Die Ergänzung besteht aus zusätzlich modellierten Horizonten und Störungszonen, welche auf der Störungsinterpretation des SASMB basieren. In der Schweiz wurden für das GeoMol-UE-Modell nebst dem Übersichtsmodell GeoMol15 in drei Pilotregionen detailliertere Modelle mit höherer Datendichte, zusätzlichen Horizonten und detaillierterer Darstellung der bekannten Störungszonen erstellt. Da diese drei Pilotmodelle mehr als die Hälfte des Schweizer Molassebeckens abdeckten, wurde für das Schweizer GeoMol-Projekt beschlossen, ein durchgehendes detailreiches Modell zu erstellen (GeoMol17). Um dieses Modell zu realisieren, wurde das Schweizer Molassebecken in sechs Modelliergebiete aufgeteilt, welche von sechs verschiedenen Projektpartnern bear-

beitet wurden. Im finalen Modell GeoMol17 sind die Grenzregionen zwischen den sechs Teilmodellen harmonisiert.

Alle verwendeten Eingangsdaten beinhalten Unsicherheiten, welche das 3D-Modell beeinflussen. Daher entsprechen weder GeoMol15 noch GeoMol17 einer exakten Darstellung der Geologie des Schweizer Molassebeckens. Die Modelle geben vielmehr einen Überblick über die wichtigsten strukturellen Elemente des geologischen Untergrunds im Schweizer Molassebecken mit den aktuell zur Verfügung stehenden Daten. Dazu gehören die wichtigsten Störungszonen und 12 stratigraphische Horizonte, die durch das ganze Molassebecken in seismischen Daten kartierbar sind.

Es ist durchaus zu erwarten, dass in absehbarer Zukunft das Interesse an der Nutzung des Untergrunds an Bedeutung stärker zunehmen wird. Bei den verschiedenen Nutzungsarten, sei es als Baugrund, zur Gewinnung von Rohstoffen, zur Produktion oder Speicherung von Energie, für die Entsorgung oder bei der Zwischenlagerung von Kohlenwasserstoff, kann es zu Nutzungskonflikten kommen. Daher werden sich Behörden und Gesetzgeber zunehmend mit dem Raumplanungsrecht im Untergrund befassen müssen. Mithilfe der 3D-Modelle aus GeoMol können sie sich ein erstes Bild über den Untergrund machen. Weitere Abnehmer sind Unternehmen aus der Privatwirtschaft, die für die Durchführung von Pilotstudien verschiedenster Ausrichtungen ein 3D-Modell des Untergrunds benötigen. In Ausbildungsstätten dienen solche Modelle zur Visualisierung der geologischen Gegebenheiten oder als Ausgangslage zur weiteren Modellierung in eigenen Forschungsprojekten.

Riassunto

Il presente rapporto insieme ai modelli GeoMol15 e GeoMol17 che lo accompagnano sono il frutto di quasi cinque anni di lavoro. Il progetto «GeoMol - Valutazione del potenziale geologico nei bacini di avampaese alpini per pianificare e sfruttare sostenibilmente le loro risorse naturali» è stato lanciato nell'ambito del programma europeo «INTERREG IV B Alpine Space». Lo scopo del progetto consisteva nell'elaborare un modello tridimensionale continuo del bacino di avampaese nord-alpino e uno della pianura padana. Esso mirava pure a trattare alcune questioni specifiche esaminando cinque regioni pilota attraverso modelli dettagliati. In particolare ne facevano parte il potenziale geotermico, il potenziale di stoccaggio di CO₂ e la pericolosità sismica.

Il modello GeoMol15 rappresenta il seguito dei risultati raggiunti con l'Atlante sismico del bacino molassico svizzero (SASMB, SOMMARUGA et al. 2012). La novità risiede nella modellizzazione di orizzonti e zone tettoniche supplementari, sulla base dell'interpretazione di faglie segnalate nell'Atlante. Il contributo svizzero al modello GeoMol europeo comprende il modello generale GeoMol15, nonché i modelli più dettagliati di tre regioni pilota, elaborati con una densità di dati superiore, con orizzonti supplementari e rappresentazioni più sottili delle zone di faglia conosciute. Siccome queste tre zone pilota ricoprono oltre la metà del bacino molassico svizzero è stato deciso di realizzare, per il progetto GeoMol Svizzera, un modello continuo che includesse numerosi dettagli (GeoMol17). A questo scopo, il bacino molassico svizzero è stato suddiviso in sei aree di modellizzazione

che sono state trattate dai sei partners del progetto. Le zone di congiunzione tra questi sei sotto-modelli sono state in seguito armonizzate per portare al modello finale GeoMol17.

Tutti i dati utilizzati sono soggetti ad incertezze che influenzano i modelli 3D. Di conseguenza, GeoMol15 e GeoMol17 non riflettono esattamente la geologia del bacino molassico svizzero, ma offrono piuttosto uno scorcio dei principali elementi strutturali del suo sottosuolo geologico in funzione dei dati attualmente disponibili. I modelli comprendono le principali zone di faglia e dodici orizzonti stratigrafici cartografabili in tutto il bacino molassico partendo dai dati sismici.

Ci si aspetta che l'interesse per l'utilizzo del sottosuolo cresca fortemente in un futuro prossimo. Si potranno quindi verificare dei conflitti tra i diversi tipi di utilizzo, quali terreno di fondazione, luogo di estrazione delle materie prime, di produzione o stoccaggio dell'energia, di smaltimento o di deposito provvisorio di idrocarburi. Le autorità e gli organi legislativi saranno pertanto chiamati ad occuparsi sempre maggiormente dell'estensione del diritto per la pianificazione del territorio in profondità. Una prima visione del sottosuolo geologico è fornita loro dai modelli 3D di GeoMol. Questi modelli serviranno pure alle imprese private che hanno bisogno di modellizzazioni tridimensionali del sottosuolo per realizzare studi pilota di ogni genere. I centri di formazione potranno anch'essi trarne dei vantaggi per visualizzare caratteristiche geologiche o per fondare i loro modelli nell'ambito di progetti di ricerca.

Summary

This report and its associated GeoMol15 and GeoMol17 models are the result of almost five years of work. The EU's «GeoMol – Assessing subsurface potentials of the Alpine Foreland Basins for sustainable planning and use of natural resources» project was launched under the EU program «INTERREG IV B Alpine Space». The goal of this project was the creation of a coherent 3D model of the North Alpine Foreland Basin as well as the Po Basin. In addition, five pilot regions within this project addressed specific questions using more detailed models. These included studies on geothermal and CO₂ storage potentials, as well as on earthquake hazards.

The GeoMol15 model is a further development of the results of the Seismic Atlas of the Swiss Molasse Basin (SASMB, SOMMARUGA et al. 2012). This further development consists of additionally modelled horizons and fault zones; the latter were based on the SASMB fault interpretations. Along with the GeoMol15 model, more detailed models were produced in three pilot regions for the Swiss portion of the GeoMol-UE model. These have a higher data density, additional horizons and more detailed representations of major fault zones. As these three pilot models covered more than half of the Swiss Molasse Basin, it was decided to create a continuous, detailed model for the Swiss GeoMol project (GeoMol17). In order to produce this model, the Swiss Molasse Basin was divided into six regions, which were modelled by six different project partners. In

the final GeoMol17 model, the border regions between the six sub models are harmonised.

All input data contains uncertainties that affect the 3D model. Therefore, neither the GeoMol15 nor the GeoMol17 model is an exact representation of the geology of the Swiss Molasse Basin. Rather, these models provide a general view of the major structural elements of the geological subsurface in the Swiss Molasse Basin using the currently available data. These elements include 12 stratigraphic horizons that can be mapped across the entire Molasse Basin in the seismic data and the main fault zones.

The interest in the use of the subsurface is expected to increase in the near future. As a result, there are likely to be conflicts of interest between the different types of use i.e. be it for the location of new infrastructure, extraction of raw materials, production or storage of energy, temporary storage of hydrocarbons or waste disposal. Authorities and legislators will therefore have to increasingly deal with spatial planning law that covers the subsurface domain. Here, the 3D models from GeoMol can be used to obtain an initial view of the subsurface. Other customers include private companies, who need a 3D model of the subsurface for various types of pilot studies. In academic institutions, such models serve to provide a means of visualizing the general geological conditions or as a starting point for further modeling in their own research projects.

Table des matières

1.	Introduction	16	4.6.1	Vue d'ensemble des données disponibles	40
1.1	Motivation	16	4.6.2	Traitement des données	41
1.2	GeoMol Europe	16	4.6.3	Nouvelles interprétations	41
1.3	GeoMol Suisse	17	4.7	Cartes et modèles du toit du rocher	42
1.3.1	Aire modélisée	17	4.7.1	Vue d'ensemble des données disponibles	42
1.3.2	Deux modèles	17	4.7.2	Traitement des données	45
1.3.3	Des styles de travail différents	18	4.8	Autres données de surface	45
1.3.4	Orientation des produits	19			
1.4	Objectifs de qualité généraux assignés aux modèles géologiques 3D	19	5.	Méthodologie et démarche appliquées	46
1.5	Logiciels utilisés	19	5.1	Situation initiale	46
1.6	Structure du rapport	20	5.2	GeoMol15	46
			5.2.1	Démarche générale	46
			5.2.2	Interprétation sismique	46
			5.2.3	Modèle de vitesses	46
			5.2.4	Modélisation des horizons	48
			5.2.4.1	Topographie et toit du rocher	48
			5.2.4.2	Horizons de la molasse	48
			5.2.4.3	Horizons de la base du «Cénozoïque» à la base du «Mésozoïque»	49
			5.2.5	Modélisation des failles	49
			5.2.5.1	Zones de failles principales	49
			5.2.5.2	Zones de failles conceptuelles	49
			5.3	GeoMol17	49
			5.3.1	Démarche générale	49
			5.3.2	Interprétation sismique	50
			5.3.3	Atténuation des écarts (misties)	55
			5.3.4	Modèle de vitesses et conversion en profondeurs	55
			5.3.4.1	Cartes des isopaques	56
			5.3.5	Modélisation des horizons	58
			5.3.5.1	Toit du rocher	58
			5.3.5.2	Horizons de la molasse	58
			5.3.5.3	Horizons de la base du «Cénozoïque» à la base du «Mésozoïque»	60
			5.3.5.4	Horizon Base du «Permo-carbonifère»	61
			5.3.6	Modélisation des failles	61
			5.3.6.1	La modélisation soumise à comparaison	61
			5.3.6.2	Modélisation des failles dans le modèle profond du Service géologique national	61
			5.3.7	Ajustement à la jonction entre les sous-modèles	67
2.	Vue d'ensemble de la géologie	21	6.	Résultats et discussion	68
2.1	Situation et structure générale	21	6.1	GeoMol15	68
2.2	Stratigraphie et histoire sédimentaire	22	6.1.1	Failles	68
2.2.1	Carbonifère-Permien	22	6.1.2	Horizons	72
2.2.2	Trias-Crétacé	22	6.1.2.1	Toit du rocher	72
2.2.2.1	Trias	23	6.1.2.2	Horizons molassiques	72
2.2.2.2	Jurassique	23	6.1.2.3	Horizons mésozoïques	72
2.2.2.3	Crétacé	26	6.2	GeoMol17	74
2.2.3	Paléogène-Néogène	26	6.2.1	Failles	74
2.2.4	Quaternaire	27	6.2.1.1	Vue d'ensemble	76
2.3	Unités tectoniques de la molasse	27	6.2.1.2	Zones de failles dans le bassin molassique suisse	77
2.3.1	Molasse du Jura	27			
2.3.2	Molasse du Plateau	27			
2.3.3	Molasse subalpine	28			
2.4	Évolution tectonique	28			
2.4.1	Formation des fossés permo-carbonifères	28			
2.4.2	Évolution du bassin d'avant-pays nord-alpin	29			
2.4.3	Influence du Fossé du Haut-Rhin	29			
2.4.4	Poussée à distance et formation du Jura	29			
2.4.5	Formation de la zone triangulaire	29			
2.4.6	Néotectonique	29			
3.	Construction du modèle	30			
3.1	Carbonifère-Permien	30			
3.2	Trias-Crétacé	30			
3.3	Paléogène-Néogène	34			
4.	Données de base	35			
4.1	Cartes d'ensemble des données	35			
4.2	Cartes géologiques et tectoniques	35			
4.2.1	Vue d'ensemble des données disponibles	35			
4.2.2	Traitement des données	35			
4.3	Profils géologiques	37			
4.3.1	Vue d'ensemble des données disponibles	37			
4.3.2	Traitement des données	38			
4.4	Données de forages	38			
4.4.1	Vue d'ensemble des données disponibles	38			
4.4.2	Traitement des données	38			
4.5	Sections sismiques	39			
4.5.1	Vue d'ensemble des données disponibles	39			
4.5.2	Traitement des données	39			
4.5.3	Campagne sismique du lac de Constance	40			
4.6	Interprétations sismiques	40			

6.2.1.3	Zone de failles de Born-Engelberg . . .	81	8.4.4.2	Application de GeoMol	112
6.2.1.4	Zone de failles de Saint-Gall	83	8.4.5	Hydrocarbures	112
6.2.1.5	Zones de failles dans la région du fossé permo-carbonifère du nord de la Suisse	83	8.4.6	Stockage de déchets radioactifs	112
6.2.2	Horizons	87	8.4.7	Construction d'infrastructures	112
6.2.2.1	Toit du rocher	87	9.	Accès aux résultats	114
6.2.2.2	Horizons de la molasse	87	9.1	Visualiseur de données 3D	114
6.2.2.3	Horizons mésozoïques	89	9.1.1	Vue 3D avec le visualiseur 3D	114
6.2.3	Ajustements à la jonction entre les sous-modèles	95	9.1.2	Vue 2D avec le visualiseur 3D	116
6.2.4	Modèle de vitesses	97	9.1.2.1	Forages virtuels	116
7.	Assurance qualité et incertitudes	98	9.1.2.2	Profils	116
7.1	Assurance qualité	98	9.1.2.3	Cartes en profondeur	116
7.1.1	Qualité de l'exécution	99	9.2	map.geologieportal.ch	116
7.1.2	Qualité des données de base	99	9.3	Portail géologique	116
7.1.2.1	Procédure générale	99	9.4	Web Map Service	116
7.1.2.2	Données de forages	100	9.5	Site web du projet GeoMol-UE	118
7.1.2.3	Données sismiques	100	9.6	Annexes au texte	118
7.1.2.4	Profils géologiques	100	9.6.1	Planches	118
7.1.3	Assurance qualité des sous-modèles	100	9.6.2	Support de données	118
7.1.4	Toit du rocher	100	10.	Perspectives	119
7.1.5	Vérifications relatives à l'assurance qualité	100	11.	Conclusions	120
7.2	Incertitudes affectant les modèles géologiques 3D	101	12.	Remerciements	121
7.2.1	Incertitudes affectant les données de base	101	Liste bibliographique	122	
7.2.1.1	Données géologiques primaires	101			
7.2.1.2	Données géologiques primaires traitées	101			
7.2.1.3	Données et informations géologiques secondaires	102			
7.2.2	Incertitudes affectant les résultats	102			
8.	Applications	104			
8.1	Application dans un but de communication et de visualisation	104			
8.2	Application dans la planification de projets	104			
8.3	Application dans l'évaluation de conflits entre utilisations du sous-sol	105			
8.4	Application dans la caractérisation de potentiels géologiques	106			
8.4.1	Géothermie profonde	106			
8.4.1.1	Possibilités d'exploitation	106			
8.4.1.2	Application de GeoMol dans la région pilote Genève-Savoie	106			
8.4.1.3	Application de GeoMol dans la région pilote Lac de Constance - Allgäu	107			
8.4.2	Stockage de CO ₂	107			
8.4.2.1	Étude fondamentale dans le Plateau suisse	107			
8.4.2.2	Application de GeoMol	108			
8.4.3	Aquifères profonds	108			
8.4.3.1	Application de GeoMol	109			
8.4.4	Risques géologiques	109			
8.4.4.1	Vue d'ensemble du Plateau molassique suisse	109			

Liste des figures et des tableaux

Figures

Fig. 1-1: Vue d'ensemble de l'aire modélisée dans le cadre du projet européen GeoMol et des régions pilotes sélectionnées pour caractériser différents potentiels géologiques	17	Fig. 5-11: Ajustement d'une zone de failles dans une région limitrophe à la jonction de deux sous-modèles	66
Fig. 1-2: L'aire du projet GeoMol Suisse, subdivisée selon les aires modélisées par les différents partenaires de GeoMol17	18	Fig. 5-12: Illustration de l'adaptation réciproque d'horizons à l'aide de profils régulièrement espacés.	66
Fig. 2-1: Carte tectonique d'ensemble du bassin molassique suisse et unités tectoniques adjacentes.	21	Fig. 6-1: Aperçu du modèle GeoMol15	69
Fig. 2-2: Profil chronostratigraphique et lithostratigraphique du bassin molassique suisse et de son soubassement avec indication des horizons modélisés dans le cadre du projet GeoMol	22	Fig. 6-2: Vue d'ensemble des zones de failles modélisées dans GeoMol15.	71
Fig. 2-3: Corrélation entre sept forages profonds exécutés dans le bassin molassique	24	Fig. 6-3: Représentation schématique de la zone triangulaire et des failles conceptuelles modélisées.	72
Fig. 2-4: Vue d'ensemble des unités molassiques affleurantes et des axes de plis dans le bassin molassique.	25	Fig. 6-4: Carte des épaisseurs des sédiments cénozoïques dans GeoMol15.	73
Fig. 2-5: Profil transversal à travers le Jura, le bassin molassique (aire modélisée) et la bordure nord des Alpes	26	Fig. 6-5: Carte des épaisseurs des sédiments mésozoïques dans GeoMol15.	73
Fig. 4-1: Carte d'ensemble des données concernant l'horizon Toit du Dogger, avec indication des données et des interprétations existantes	36	Fig. 6-6: Aperçu du modèle GeoMol17	75
Fig. 4-2: Vue d'ensemble des sections sismiques 2D mises à la disposition du projet GeoMol Suisse	39	Fig. 6-7: Rosaces des failles normales, inverses et décrochantes modélisées à la base du «Cénozoïque» et à la base du «Mésozoïque»	77
Fig. 4-3: Modèles du toit du rocher et cartes des isohypses du toit du rocher existants en Suisse	43	Fig. 6-8: Vue d'ensemble des failles modélisées au niveau de la base du «Cénozoïque» dans GeoMol17.	79
Fig. 5-1: Schéma du déroulement des travaux accomplis pour élaborer le modèle GeoMol15.	47	Fig. 6-9: Vue d'ensemble des failles modélisées au niveau de la base du «Mésozoïque» dans GeoMol17	80
Fig. 5-2: Carte des vitesses d'intervalles (GeoMol15) indiquant les intervalles sismiques dans le Dogger, avec localisation des forages profonds et des points d'accrochage.	48	Fig. 6-10: Vue du modèle dans la région de la zone de failles de Born-Engelberg à l'aide de blocs et de coupes	81
Fig. 5-3: Représentation schématique du déroulement des travaux accomplis pour élaborer le modèle GeoMol17.	54	Fig. 6-11: Coupes dans des modèles 3D reflétant différentes interprétations	82
Fig. 5-4: Carte des vitesses d'intervalles (GeoMol17) indiquant les intervalles sismiques dans le Dogger, avec localisation des forages profonds et des points d'accrochage.	56	Fig. 6-12: Vue du modèle 3D GeoMol17 aux environs de la zone de failles de Saint-Gall	84
Fig. 5-5: Conversion en profondeurs	57	Fig. 6-13: Vue dans une partie du modèle 3D décrivant le fossé permio-carbonifère du nord de la Suisse.	85
Fig. 5-6: Répartition non corrigée des épaisseurs dans l'intervalle constitué par le Lias dans le sous-modèle du Service géologique national	57	Fig. 6-14: Évolution conceptuelle des failles formant la structure «en queue de poisson» de l'anticlinal de Stadel-Irchel dans la zone d'influence du linéament de Baden-Irchel-Herdern	86
Fig. 5-7: Modélisation de l'horizon TUSM	59	Fig. 6-15: Modèle altimétrique du toit du rocher	88
Fig. 5-8: Représentation schématique du rapport déplacement/longueur	64	Fig. 6-16: Carte des épaisseurs des roches meubles: un produit dérivé du modèle du toit du rocher	88
Fig. 5-9: Vue cartographique et en coupe du polygone relatif à une faille normale et à une faille inverse	65	Fig. 6-17: Modèle altimétrique du toit du rocher avec indication de la répartition actuelle des unités de la molasse à ce niveau	89
Fig. 5-10: Étapes suivies pour déterminer les valeurs de profondeur relatives à un polygone de faille normale et de faille inverse	65	Fig. 6-18: Modèle altimétrique du toit du Dogger dérivé de GeoMol17, avec les zones de failles qui recoupent cet horizon	91
		Fig. 6-19: Carte des épaisseurs du Dogger dérivée de GeoMol17.	94
		Fig. 6-20: Ajustements à la jonction entre les sous-modèles.	96
		Fig. 7-1: Organigramme «Assurance qualité lors de la reprise de données» mis en œuvre pour élaborer des modèles géologiques 3D.	99
		Fig. 7-2: Diagramme X-Z du chevauchement «Kronberg-Süd» avec la répartition des nœuds du maillage pour différents espacements	103
		Fig. 8-1: Schéma de la planification d'un projet hypothétique de géothermie	105

Fig. 8-2: Points communs entre le projet GeoMol et le programme GEothermie 2020	107
Fig. 8-3: Modèle géologique 3D de la région Fribourg–Berne–Soleure–Lucerne.	108
Fig. 8-4: Représentation des foyers sismiques (magnitude >2) situés dans la couverture sédimentaire, sur fond du modèle de failles de GeoMol17, au niveau de la base du «Cénozoïque».	110
Fig. 8-5: Représentation des foyers sismiques (magnitude >2) situés dans le socle cristallin (jusqu'à une profondeur de 15 km), sur fond du modèle de failles de GeoMol17, au niveau de la base du «Mésozoïque».	111
Fig. 9-1: La construction générale du visualiseur de données 3D.	115
Fig. 9-2: Vue de l'onglet «Géologie 2D».	115
Fig. 9-3: Le site map.geologieportal.ch, accès centralisé à la visualisation 2D des données géologiques concernant la Suisse.	117
Fig. 9-4: Layer WMS «Potentiel de stockage de CO ₂ dans le Hauptrogenstein et dans le Membre d'Effingen dans la région pilote Plateau suisse»	117

Tableaux

Tab. 3-1: Vue d'ensemble des horizons modélisés dans GeoMol15 et des modèles pilotes ainsi que comparaison entre les désignations CH et UE.	31
Tab. 3-2: Vue d'ensemble des horizons modélisés dans GeoMol17 et des données de base pour chacun des sous-modèles	32
Tab. 4-1: Données cartographiques utilisées pour établir le modèle GeoMol17.	37
Tab. 4-2: Horizons interprétés à partir des données sismiques et désignation des horizons marqueurs selon la sismique, retenus dans GeoMol, en regard de travaux exécutés antérieurement dans le bassin molassique suisse.	41
Tab. 4-3: Modèles existants du toit du rocher en Suisse qui ont été utilisés pour modéliser le toit du rocher dans GeoMol17	44
Tab. 5-1: Vue d'ensemble des méthodes de modélisation des horizons appliquées aux différents sous-modèles.	51
Tab. 5-2: Vue d'ensemble des méthodes de modélisation des failles appliquées aux différents sous-modèles	62
Tab. 7-1: Les quatre volets de l'assurance qualité des modèles géologiques 3D, avec description des principes respectifs.	99
Tab. 9-1: Vue d'ensemble des données cartographiques disponibles dans le support de données annexé	118

1. Introduction

Les géodonnées constituent des bases importantes pour fonder des décisions politiques, économiques et privées. De 60 à 80% d'entre elles ont un lien avec la dimension verticale (WILLIAMS & VAN DEMARK 1987, COOPERS AND LYBRAND 1996, HAHMANN & BURGHARDT 2013). Les informations spatiales utilisées pour prendre des décisions revêtent généralement la forme de données superficielles bidimensionnelles. Disponibles en nombre limité, les descriptions et visualisations tridimensionnelles du sous-sol ne jouent actuellement qu'un rôle mineur dans les décisions. En même temps, l'exploitation croissante du sous-sol est perçue comme une solution à de nombreux défis futurs (sécurité de l'approvisionnement, protection de la population, mobilité). Les conflits entre usages qui résultent d'attentes et de visions divergentes (p.ex. propriété en 3D contre aménagement du territoire en 3D) sont susceptibles de générer des disputes à l'avenir (BAUMBERGER & ALLENBACH 2016).

Ayant identifié précocement cette problématique, le Service géologique national (SGN=Landesgeologie) a commencé à compléter la cartographie géologique classique par la modélisation géologique 3D en 2011. Les modèles 3D de la géologie du Plateau suisse fournissent désormais une base de travail tridimensionnelle harmonisée et aisément accessible. Ils peuvent être exploités à différents niveaux de détail pour procéder à une première estimation des conflits potentiels entre usages du sous-sol et des possibilités qu'il offre.

1.1 Motivation

La région du Plateau suisse est un lieu de résidence et de travail pour plus de la moitié de la population helvétique. Du fait de son histoire géologique et de sa position centrale, cette région est déjà exploitée intensivement pour des ressources naturelles (p.ex. matières premières minérales, eaux souterraines, géothermie de faible profondeur) et par des infrastructures (transports publics, routes, énergie, etc.). La pression exercée par les usages souhaités du sous-sol va se renforcer encore sous l'impulsion de la politique, de la technologie et de la croissance démographique, si bien que le potentiel souterrain du Plateau (p.ex. géothermie, stockage de déchets, hydrocarbures) va occuper le centre des intérêts. Les instruments actuels ne suffisent guère pour affronter les défis futurs. À l'heure actuelle, l'aménagement du territoire ne tient pas compte du sous-sol, la structure fédéraliste de la Suisse complique l'accès aux données de base utiles (KETTIGER 2016) et les séries de données 3D pertinentes ne sont pas accessibles librement pour diverses raisons.

D'une part, la nature limitée des ressources du Plateau suisse demande que les opérations de recherche, d'extraction, d'utilisation et de restitution soient réalisées d'une manière durable sur le long terme. D'autre part, cette région jouera un rôle de plus en plus important dans l'approvisionnement énergétique du pays en tant que fournisseuse, tandis que de nombreux projets d'infrastructures (énergie, transports) y seront également planifiés et exécutés.

En conséquence, le recensement des divers potentiels géologiques (LANDESGEOLOGIE en prép.) et l'exploitation consciente et durable des ressources épuisables du sous-sol qu'il permet revêtent une grande importance sociétale et géoscientifique.

L'élaboration des modèles géologiques 3D du Plateau suisse vise aussi à poser des bases pour aborder certains thèmes ne relevant pas des sciences de la Terre:

- Accroître la perception de la sphère politique et du public vis-à-vis des ressources épuisables du sous-sol helvétique.
- Accentuer l'orientation économique des données de base géologiques en vue d'utiliser durablement le sous-sol helvétique.
- Favoriser la collaboration à l'échelle nationale en ce qui concerne l'aménagement du territoire, l'extraction des ressources et l'harmonisation des données de base.

Les modèles géologiques 3D du bassin molassique (Plateau) suisse qui font l'objet du présent rapport ont été partiellement élaborés dans le cadre du projet européen «GeoMol – Évaluation du potentiel géologique dans les bassins d'avant-pays alpins pour planifier et exploiter durablement leurs ressources naturelles» (GEOMOL TEAM 2015). Ce projet a été suscité par le désir de mettre au point des bases géologiques transfrontières en vue d'aménager le territoire en trois dimensions et de mettre ces données à la disposition des auteurs de projets, des ingénieurs et des décideurs.

1.2 GeoMol Europe

GeoMol était à l'origine un projet européen soutenu par la Coopération territoriale européenne dans le cadre du programme «INTERREG IV B Alpine Space». Organisé par quatorze partenaires provenant de six pays différents, il a duré de septembre 2012 à juin 2015. Son but consistait, d'une part, à élaborer un modèle géologique 3D transnational et harmonisé du bassin d'avant-pays nord-alpin et de parties du bassin du Pô et, d'autre part, à décrire et évaluer les potentiels certains ou présumés (géothermie, thermalisme, stockage de

GeoMol EU

Aire modélisée, y compris les régions pilotes

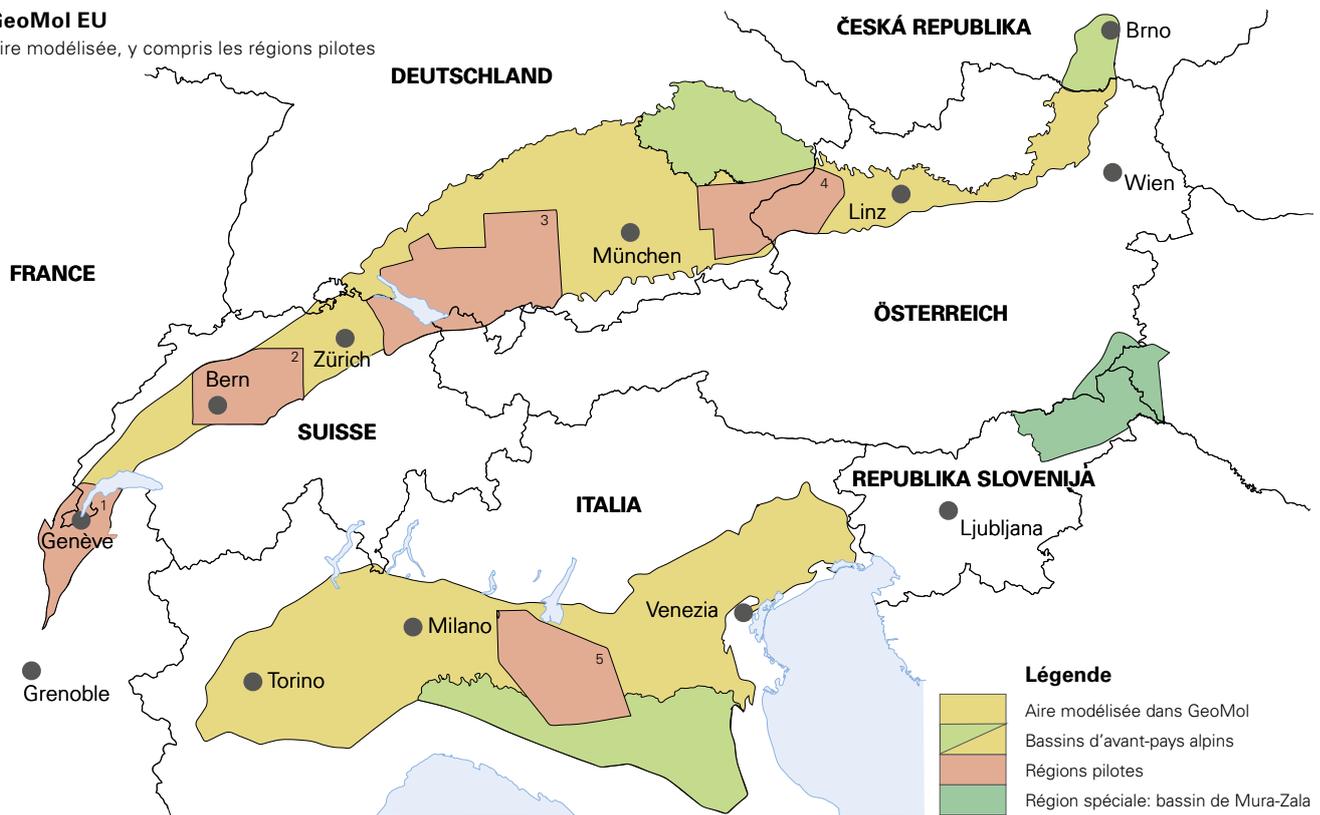


Fig. 1-1: Vue d'ensemble de l'aire modélisée dans le cadre du projet européen GeoMol et des régions pilotes sélectionnées pour caractériser différents potentiels géologiques. (1) Genève-Savoie, (2) Plateau suisse, (3) Lac de Constance - Allgäu, (4) Haute-Autriche - Haute-Bavière, (5) Brescia-Mantoue-Mirandola. GEOMOL TEAM (2015), carte remaniée.

déchets) et les dangers éventuels (p. ex. aléa sismique) présents dans des régions pilotes sélectionnées (fig. 1-1).

Outre un modèle d'ensemble peu détaillé couvrant toute l'aire du projet, des modèles thématiques traitant de ces potentiels ont été construits de manière plus détaillée dans cinq régions pilotes (Genève-Savoie, CAPAR et al. 2015; Plateau suisse; Lac de Constance - Allgäu, GEOMOL LCA-PROJEKTTEAM 2015; Haute-Autriche - Haute-Bavière, PFLEIDERER et al. 2016; Brescia-Mantoue-Mirandola, ISPRA 2015) et dans le cadre d'une étude spéciale (ŠRAM et al. 2015). Les résultats ont paru sous la forme de rapports, de modèles 3D utilisables et de service cartographique 2D. Ils peuvent être consultés et téléchargés partiellement à l'adresse Internet <http://www.geomol.eu>.

1.3 GeoMol Suisse

1.3.1 Aire modélisée

L'aire modélisée dans le cadre de GeoMol Suisse est généralement limitée au nord par la ligne d'affleurement de l'horizon Base du «Cénozoïque» (fig. 1-2). Cette limite coïncide avec la bordure méridionale de la chaîne du Jura dans de vastes secteurs. Les premiers anticlinaux de cette chaîne d'avant-pays plissée et décollée (*fold-and-thrust belt*) ont aussi été inclus partiellement dans le modèle. Au sud du bas-

sin molassique, l'aire modélisée est limitée par la bordure septentrionale des nappes alpines.

1.3.2 Deux modèles

Le Plateau suisse a fait l'objet de deux modèles qui couvrent tout le bassin molassique mais diffèrent par les données de base utilisées et par le niveau de détail de la stratigraphie et des éléments structuraux qu'ils représentent (BAUMBERGER & ALLENBACH 2016). Dans ce rapport le terme de «bassin molassique» n'est pas limité aux seuls dépôts molassiques, mais inclus également le soubassement de ce bassin jusqu'au socle cristallin.

- GeoMol15: ce modèle fournit une vue d'ensemble de la géologie du bassin molassique suisse. Sa maille a une largeur de 200 m. Il correspond au modèle élaboré dans le cadre de GeoMol Europe (fig. 1-1).
- GeoMol17: ce modèle, faisant appel à davantage de données, est plus détaillé. Sa maille a une largeur de 100 m. Les zones de failles y ont par exemple été traitées d'une manière plus fine que dans le modèle GeoMol15.
- Le modèle GeoMol15 se base surtout sur l'Atlas sismique du bassin molassique suisse (SASMB, SOMMARUGA et al. 2012), en le complétant principalement sur trois points essentiels:

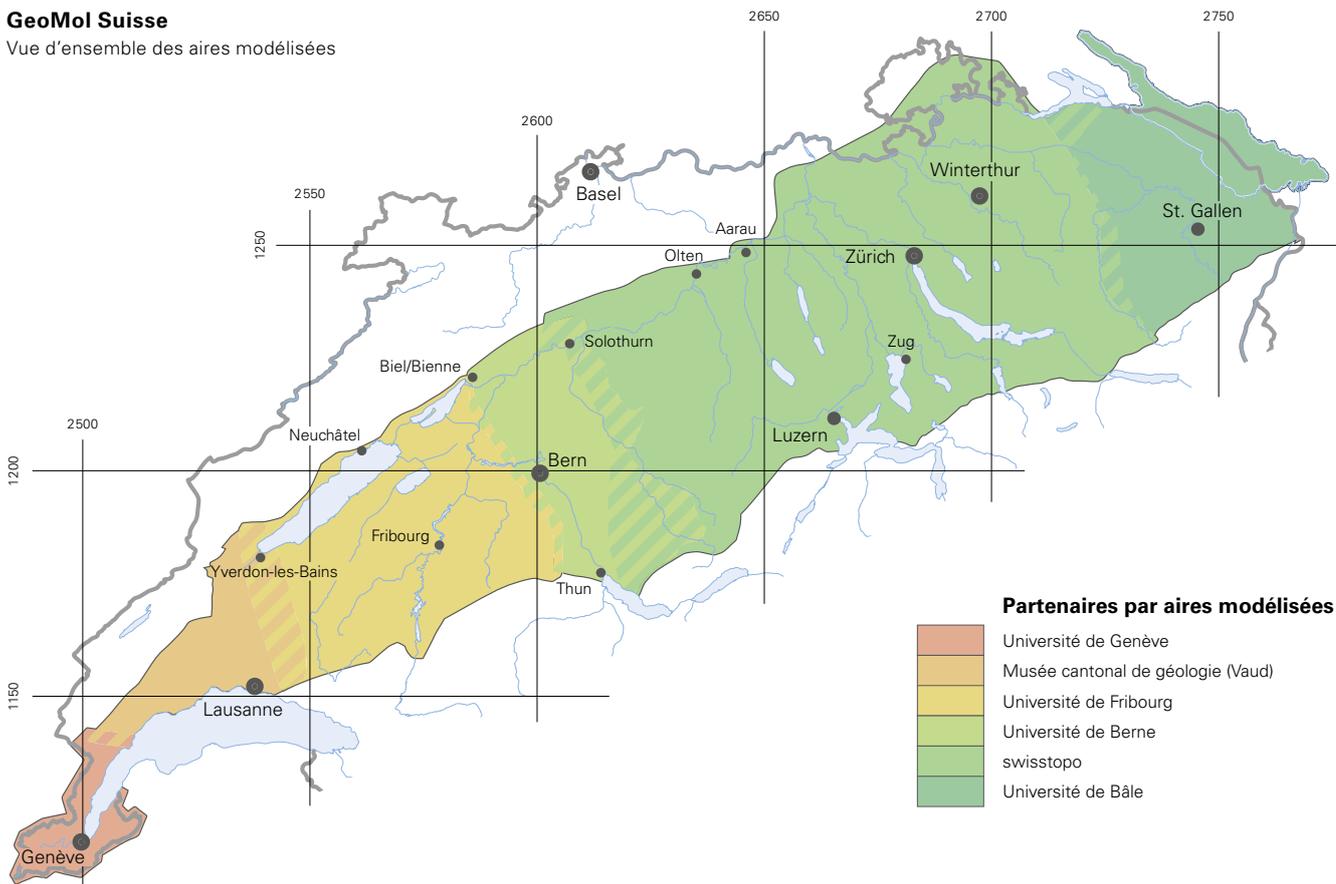


Fig. 1-2: L'aire du projet GeoMol Suisse, subdivisée selon les aires modélisées par les différents partenaires de GeoMol17.

- Des données supplémentaires provenant de forages exécutés en Suisse ont été intégrées pour obtenir de nouveaux points d'accrochage pour les horizons stratigraphiques modélisés (chap. 3).
- Des zones de failles ont été modélisées sous une forme simplifiée sur la base des failles interprétées.
- Deux niveaux lithostratigraphiques d'une grande importance tant sous l'aspect scientifique que dans l'optique de l'utilisation du sous-sol ont pu être complétés à partir du toit du rocher et de deux horizons internes à la Molasse.

Le modèle GeoMol17 se fonde parfois sur des données différentes ou supplémentaires, c'est pourquoi les deux modèles ne peuvent pas être comparés directement. Les différences sont les suivantes:

- Les sections sismiques seulement interprétées partiellement jusqu'ici ont été interprétées complètement.
- Les sections sismiques non encore exploitées dans GeoMol15 ont été numérisées et interprétées.
- Des forages profonds supplémentaires exécutés en Allemagne ont été intégrés dans un nouveau modèle de vitesses pour mieux étayer les conversions temps-profondeurs effectuées lors de l'interprétation des données sismiques.

- Des forages de profondeur moyenne (100–500 m) ont été exploités en sus des forages profonds (>500 m).
- De nombreuses données superficielles, telles que cartes ou profils géologiques et mesures de structures, ont été exploitées.

La modélisation a été réalisée par swisstopo en collaboration avec cinq partenaires: l'Université de Genève (CLERC 2016), le Musée cantonal de géologie (Vaud) (MARCHANT & BAUER 2016), l'Université de Fribourg (GRUBER et al. 2016), l'Université de Berne (MOCK 2016) et l'Université de Bâle (HUGGENBERGER et al. 2016) (fig. 1-2).

Le chapitre traitant de la méthodologie (chap. 5) expose principalement la démarche appliquée par swisstopo. Compte tenu du rattachement des horizons aux lignes d'affleurement ainsi que des données de base à sa disposition, swisstopo a encore subdivisé l'aire à traiter en un modèle profond et deux modèles peu profonds (chap. 5.3).

1.3.3 Des styles de travail différents

Six partenaires ont collaboré au projet GeoMol17 (fig. 1.2). Les horizons lithostratigraphiques à modéliser et les résultats à remettre ont fait l'objet de prescriptions. Au vu des données de base disponibles dans les diverses aires mo-

délinées, des connaissances des personnes impliquées et des infrastructures informatiques exploitées, il a été convenu que les partenaires soient libres de choisir les méthodes, les procédures et les logiciels d'interprétation et de modélisation qu'ils souhaitaient appliquer.

Différents styles de travail sont par conséquent perceptibles dans la version actuelle de GeoMol17. Citons par exemple la représentation variable des déplacements au contact des zones de failles, qui ont été traités comme des gradins simples (surfaces «non découpées») ou en distinguant le compartiment monté relativement et le compartiment descendu relativement (surfaces «découpées») (voir notamment le chap. 6). On ne peut en tirer aucune conclusion quant à la justesse ou à la qualité des modèles géologiques 3D, mais cela montre que plusieurs modes de modélisation sont susceptibles d'atteindre l'objectif visé. Cette collaboration a permis d'élargir considérablement les connaissances à propos des étapes de travail et des possibilités techniques. L'utilisation de données de base différentes et la subdivision des aires de travail ont eu pour effet que les limites entre les sous-modèles ne concordaient pas d'emblée et qu'il a parfois fallu procéder à des ajustements au niveau des jonctions.

1.3.4 Orientation des produits

Environ cinquante spécialistes provenant de milieux scientifiques et administratifs suisses ont répondu au questionnaire soumis aux utilisateurs de modèles dans le cadre du projet GeoMol-UE (BAUMBERGER & MICHAEL 2013). GeoMol Suisse s'est référé aux réponses reçues pour structurer la présentation des résultats du projet. Les conclusions principales tirées du questionnaire sont les suivantes:

- L'intérêt principal au sujet du sous-sol profond porte sur son potentiel géologique (surtout géothermie et matières premières) et sur les conflits entre ses usages (au sens d'un aménagement du territoire en profondeur).
- Il y a une demande de produits numériques, c'est-à-dire de résultats sous la forme de données vectorielles, profils, coupes virtuelles (forages, profils) et modèles 3D, y compris indications et cartes concernant les données disponibles et les séries de paramètres décrivant les roches.
- GeoMol ne fait l'objet d'aucune demande de produits analogiques.
- Les jeux de données suivants sont souhaités: horizons lithostratigraphiques importants, failles, position de surfaces de nappes libres et répartition des températures dans le sous-sol.

Certaines de ces attentes ont pu être satisfaites. Les résultats de GeoMol Suisse sont discutés en détail au chapitre 6. Des résultats non prévus au début des travaux, tels que cartes synthétiques des données et modèle de vitesses actualisé valable dans le bassin molassique suisse, ont en outre été obtenus.

1.4 Objectifs de qualité généraux assignés aux modèles géologiques 3D

Un modèle géologique 3D est une représentation simplifiée de la situation géologique, aussi constitue-t-il toujours une approximation de la réalité. La répartition des géodonnées est très disparate en Suisse. Certaines régions bénéficient d'une grande densité de géodonnées tandis que d'autres ne sont décrites que par de rares, voire aucunes, données, selon qu'elles ont déjà fait ou non l'objet d'une campagne d'exploration du sous-sol. En règle générale, la densité d'informations diminue avec la profondeur. Seuls des forages (profonds) fournissent des informations sûres au sujet du sous-sol et seules des investigations sismiques livrent des vues du sous-sol à grande échelle. C'est ainsi que les modèles géologiques 3D sont généralement étayés, au vu de leur extension, par un nombre relativement restreint de données de base réparties d'une manière discrète.

La modélisation géologique 3D permet aussi de faire des prévisions au sujet de la constitution géologique du sous-sol dans des régions à faible densité de données. Un modèle satisfait aux objectifs de qualité généraux lorsqu'il:

- est topologiquement correct (sans objets géométriques s'interpénétrant ou se recoupant) et «étanche» (sans discontinuité entre objets géométriques);
- est agencé de manière à représenter les informations sûres d'une manière aussi précise que possible (compte tenu de leur interprétation par des spécialistes); et
- propose une interprétation géologique plausible et judicieuse dans les secteurs dépourvus d'informations (compte tenu des données disponibles et de leur interprétation par des spécialistes).

Ce sujet est approfondi au chapitre 7, en combinaison avec la question des incertitudes affectant les modèles géologiques.

1.5 Logiciels utilisés

swisstopo a utilisé différents logiciels pour mener à bien les diverses phases de ses travaux. Le chapitre 5 détaille leur application selon les étapes et les aires de modélisation.

Les logiciels suivants ont été utilisés:

- GeoGraphix (interprétation sismique, banque de données de forages et corrélations entre forages)
- IHS Kingdom® (conversions temps-profondeurs)
- Surfer (rasterisation)
- Petrosys (rasterisation et contrôle de la qualité des interprétations sismiques)
- ArcGIS (cartographie et rasterisation)
- Move™ (modélisation géologique 3D et constitution de fichiers PDF décrivant les modèles 3D)
- GST (stockage des modèles 3D)
- Navigateur Internet (visualisation des modèles 3D)
- Adobe Creative Suite (rapport)

1.6 Structure du rapport

Le présent document ne constitue pas un rapport géologique final, mais un rapport d'activité au sujet du projet GeoMol. Il met l'accent sur la méthodologie et sur la démarche appliquées par le Service géologique national, tout en présentant les résultats des autres partenaires impliqués dans le projet GeoMol Suisse (point 1.3.3). La première

partie expose une vue d'ensemble de la géologie (chap. 2), la construction du modèle (chap. 3), les données de base utilisées (chap. 4) ainsi que la méthodologie et la démarche appliquées (chap. 5). La deuxième partie est consacrée aux résultats (chap. 6), à l'assurance qualité et aux incertitudes (chap. 7), aux applications des modèles (chap. 8) et à l'accès aux résultats (chap. 9), puis elle évoque les perspectives d'avenir (chap. 10).

2. Vue d'ensemble de la géologie

Carte tectonique d'ensemble

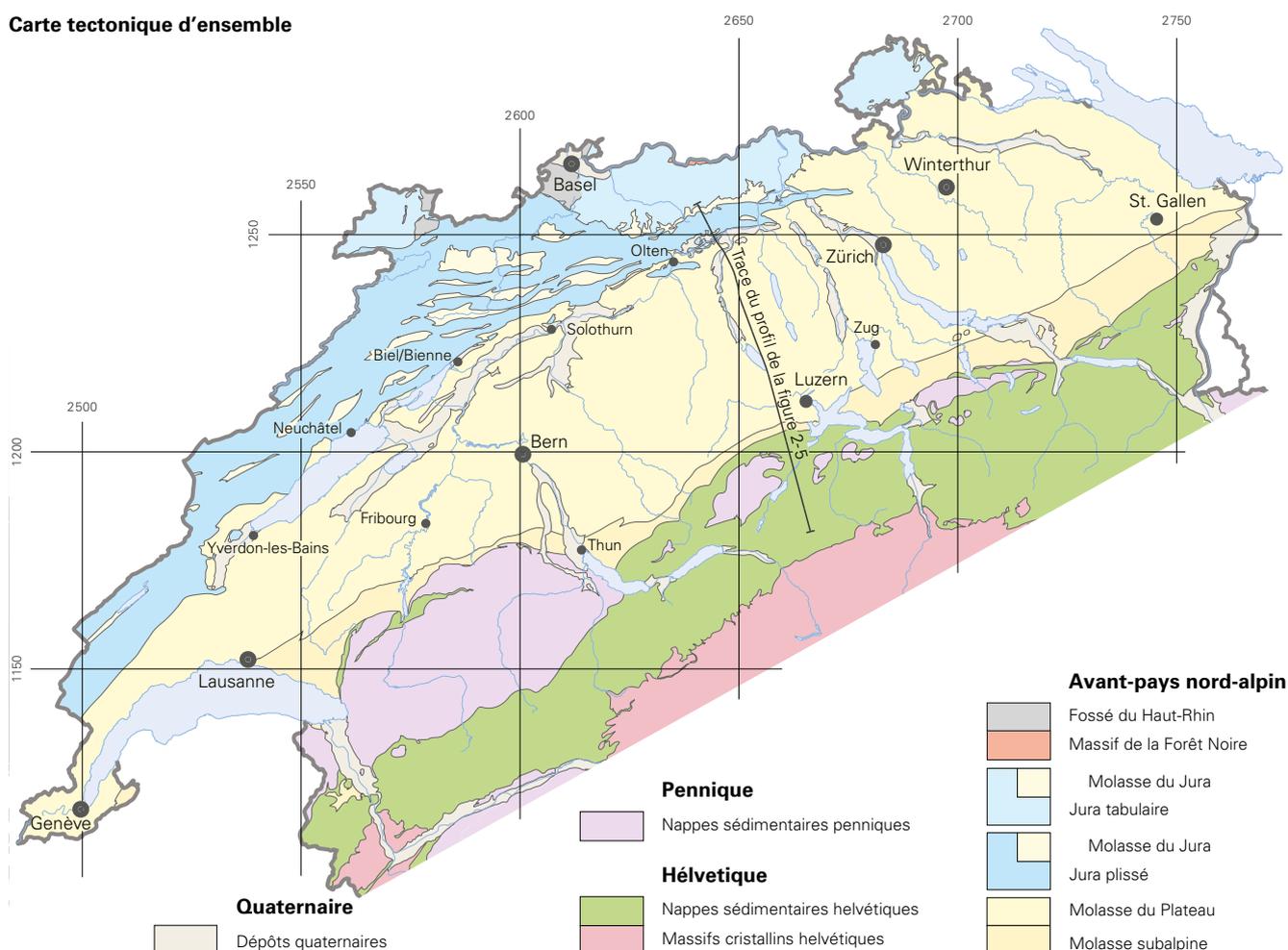


Fig. 2-1: Carte tectonique d'ensemble du bassin molassique suisse et unités tectoniques adjacentes (SOMMARUGA et al. 2012, remanié).

2.1 Situation et structure générale

Le bassin molassique suisse fait partie du bassin d'avant-pays nord-alpin et comprend essentiellement le Plateau suisse. Il est limité au nord par les sédiments mésozoïques du Jura plissé et du Jura tabulaire et au sud par le front septentrional des Alpes, formé par le chevauchement des nappes sédimentaires hélictiques et penniques (fig. 2-1). Le bassin molassique suisse est limité à l'est et à l'ouest par les frontières nationales et non par des particularités géologiques.

Le bassin d'avant-pays nord-alpin est un bassin sédimentaire asymétrique qui s'étend le long des Alpes sur une distance de 1000 km, de la Savoie en France jusqu'à la République tchèque, en passant par la Suisse, l'Allemagne et l'Au-

triche. Il se biseaute au sud-ouest de Genève, entre la chaîne jurassienne et les chaînes subalpines des Alpes françaises, tandis qu'il s'élargit vers l'est. Le bassin d'avant-pays nord-alpin a une largeur de 30 km en Suisse occidentale et de 50 km en Suisse centrale, pour atteindre un maximum de 150 km au sud de l'Allemagne (HOMEWOOD et al. 1986, IBELE 2011, GEOMOL TEAM 2015).

L'orogénèse alpine et la formation du bassin d'avant-pays nord-alpin qui l'accompagne résultent d'une collision continent-continent entre la plaque adriatique et la plaque européenne. Au cours de l'orogénèse alpine qui s'est produite au Paléogène et au Néogène, des nappes de charriage – compartiments de croûte terrestre – se sont empilées dans une marge continentale écrasée. Il en est résulté un épaissement de la

croûte terrestre et la formation d'un bassin d'avant-pays flexural. Ce bassin a été ensuite comblé par les débris d'ablation des Alpes naissantes – les sédiments molassiques (MATTER et al. 1980, KARNER & WATTS 1983, PFIFFNER 1986, 2009, SINCLAIR & ALLEN 1992, SCHLUNEGGER et al. 1993, IBELE 2011). Des travaux récents de SCHLUNEGGER & KISSLING (2015) ainsi que HERWEGH et al. (2017) montrent que le soulèvement des Alpes n'est pas seulement dû au raccourcissement imputable à la tectonique des plaques, mais aussi à des forces de poussée verticales consécutives à la déchirure (*slab detachment*) de la plaque européenne plongeante.

Le bassin d'avant-pays nord-alpin a été déformé dans sa bordure méridionale lors des derniers mouvements de nappes de l'orogénèse alpine. La couverture sédimentaire a alors été cisailée dans la partie occidentale du bassin, le long d'un décollement basal situé dans les niveaux triasiques du Groupe de l'anhydrite, puis poussée vers le nord-ouest. Cette poussée à distance a formé la chaîne du Jura à la bordure septentrionale du bassin d'avant-pays alpin (LAUBSCHER 1961, PFIFFNER 2009, SOMMARUGA et al. 2012).

2.2 Stratigraphie et histoire sédimentaire

L'histoire stratigraphique et sédimentaire du bassin d'avant-pays nord-alpin comprend trois phases (Carbonifère-Permien, Trias-Crétacé, Paléogène-Néogène) séparées par des discordances importantes (fig. 2.2). Le socle cristallin varisque ainsi que les sédiments déposés dans les fossés permio-carbonifères ont été recouverts de sédiments mésozoïques avant que les sédiments molassiques cénozoïques ne viennent s'y superposer (BACHMANN & MÜLLER 1992).

La figure 2-3 illustre une corrélation entre sept forages profonds pratiqués dans le bassin molassique le long d'une ligne orientée SW-NE. Le log de rayonnement gamma figuré pour chaque forage décrit le rayonnement émis par les minéraux argileux. Il distingue ainsi les sédiments argileux (pics vers la droite) des autres sédiments (pics vers la gauche). Des séquences riches en argile sont visibles à la base du Dogger (Argile à Opalinus) et dans le Malm inférieur (Formation de Wildeg).g).

2.2.1 Carbonifère - Permien

L'aire modélisée comprend des sédiments carbonifères et permien déposés dans des fossés paléozoïques. Ces structures se sont formées pendant l'extension varisque (McCANN 2008), puis elles ont été remplies progressivement de sédiments clastiques entre le Carbonifère tardif et la limite Permien-Trias (BACHMANN & MÜLLER 1992, MÜLLER et al. 2002, MADRITSCH et al. 2013). Les sédiments des fossés permio-carbonifères, dont l'épaisseur peut atteindre 2500 m, comprennent des grès fluviatiles, des conglomérats, des siltites, des argilites et des veines de charbon isolées (MATTER 1987).

Unités modélisées dans le modèle géologique 3D

Stratigraphie				
Chronostratigraphie			Lithostratigraphie	
Ère	Période	Époque	Groupe Formation	Horizons modélisés
Cénozoïque	Quaternaire			
	Molasse marine supérieure (OMM)	Toit de l'OMM		
	Molasse d'eau douce inférieure (USM)	Toit de l'USM		
	Paléogène	Oligoc.	Molasse marine inférieure (UMM)	Toit de l'UMM*
				Base du «Cénozoïque»
Mésozoïque	Crétacé		Sédiments crétacés	Toit du «Crétacé»
	Jurassique	Jur. tardif	Malm supérieur	Toit du Malm supérieur
			Malm inférieur	Toit du Malm inférieur
		Jur. moyen	Dogger	Toit du Dogger
			Argile à Opalinus*	Toit de l'Argile à Opalinus
	Jur. préc.	Lias	Toit du Lias	
	Trias	Trias tardif	Keuper	Toit du Keuper
			Keuper gypseux*	Toit du Keuper gypseux*
		Trias moyen	Muschelkalk	Toit du Muschelkalk
			Groupe de l'anhydrite*	Toit du Groupe de l'anhydrite*
Trias préc.		Buntsandstein	Base du «Mésozoïque»	
Paléozoïque	Carbonifère-Permien		Sédiments des fossés permio-carbonifères*	
			Socle cristallin	Base du «Permio-carbonifère»*

Fig. 2-2: Profil chronostratigraphique et lithostratigraphique du bassin molassique suisse et de son soubassement avec indication des horizons modélisés dans le cadre du projet GeoMol. Les horizons marqués d'un astérisque (*) n'ont pas été modélisés dans tout le bassin (chap. 3). Le projet GeoMol utilise la nomenclature classique. Selon la définition de JORDAN (2016), le Keuper gypseux correspond à la Formation du Bänkerjoch et le Groupe de l'anhydrite à la Formation de Zeglingen (lexique lithostratigraphique de la Suisse, www.strati.ch).

2.2.2 Trias - Crétacé

Au cours du Mésozoïque, la sédimentation s'est déroulée dans un domaine épicontinental situé le long de la bordure nord-ouest de la Téthys. Le socle cristallin et les sédiments des fossés permio-carbonifères ont été recouverts progressivement de sédiments en direction du sud-est au cours du Trias, du Jurassique précoce et du Jurassique moyen (BACHMANN et al. 1987, BACHMANN & MÜLLER 1992). On observe dans la partie Suisse romande du bassin molassique un épaississement des séquences sédimentaires mésozoïques, en particulier des évaporites du Trias (fig. 2-3), pouvant être imputable à

une subsidence accrue de la plate-forme sud-européenne, périodiquement moins stable (SOMMARUGA et al. 2012).

2.2.2.1 Trias

La séquence triasique du nord de la Suisse comprend 225–550 m de sédiments marins à continentaux. Elle est subdivisée en Buntsandstein, Muschelkalk et Keuper (voir notamment JORDAN 2016). Notons que JORDAN (2016) a redéfini de nombreuses unités lithostratigraphiques du Trias lors de l’harmonisation de la nomenclature lithostratigraphique de la Suisse (projet HARMOS, STRASKY et al. 2016).

Buntsandstein

La partie centrale et orientale du bassin d’avant-pays était une zone d’ablation au début du Trias. Le Buntsandstein diminue rapidement d’épaisseur en direction du sud-est et il se biseaute le long d’une ligne reliant sensiblement Lausanne à Zurich (TRÜMPY 1959, 1962). Des grès, conglomérats, siltites et argilites, qui ont actuellement une épaisseur de 5–25 m, se sont formés dans ce milieu continental (SIGNORELLI et al. 2004, PFIFFNER 2009).

Muschelkalk

La Formation de Kaiseraugst (nommée autrefois Muschelkalk inférieur), de faible épaisseur, repose sur le Buntsandstein. Elle présente une alternance de marnes et de minces bancs de calcaire et de dolomie formés sous l’effet des marées. Par la suite, les évaporites (anhydrite et sel) de la Formation de Zeglingen (nommée autrefois Muschelkalk moyen ou Groupe de l’anhydrite) se sont formées en zone côtière. L’anhydrite de la Formation de Zeglingen servira ultérieurement de niveau de décollement basal du Jura plissé dans la partie occidentale du bassin d’avant-pays. TRÜMPY (1959) avait présumé que les évaporites de la Formation de Zeglingen étaient limitées à la région située à l’ouest d’une ligne Innertkirchen–Winterthour. L’unité supérieure du Muschelkalk, la Formation de Schinznach (nommée autrefois Muschelkalk supérieur et comprenant le Trochitenkalk, le Plattenkalk et la Trigonodus-Dolomit), s’amincit progressivement vers le sud et le sud-est en même temps que son degré de dolomitisation augmente fortement (TRÜMPY 1962, PFIFFNER 2009).

Keuper

Les sédiments du Keuper comprennent des marnes, des grès et parfois du charbon et des évaporites. Ce sont des dépôts continentaux de rivières méandriformes dans une plaine alluviale côtière, qui témoignent occasionnellement d’une influence marine. Ces faciès littoraux à continentaux sont aussi nommés «Keuper germanique» (p. ex. PFIFFNER 2009). Vers le sud et le sud-est l’épaisseur du Keuper diminue, ses évaporites disparaissent et son caractère devient essentiellement continental. Le Keuper manque dans certaines régions suite à une phase d’érosion antéjurassique à médiojurassique. Il est en revanche très épais au sud de la chaîne jurassienne (TRÜMPY 1962). Dans la partie occidentale du bassin molassique, les évaporites du Keuper ont servi de niveau de décollement du Jura plissé.

2.2.2.2 Jurassique

Des plates-formes carbonatées peu profondes précédées de bassins épicontinentaux ont prédominé en Europe centrale pendant le Jurassique. Elles ont laissé de puissants dépôts, principalement de calcaires, marnes et argilites, dans la région du futur bassin molassique suisse. Des interactions entre les oscillations eustatiques du niveau de la mer et la subsidence différentielle (BURKHALTER 1996, ALLENBACH 2001, WETZEL & ALLIA 2003), probablement liée à des réactivations de failles paléozoïques, ont généré d’importantes variations latérales de faciès, connues dans le Jura mais très hypothétiques dans le sous-sol profond.

Lias

La partie centrale et orientale de l’aire modélisée se trouve dans le secteur connu sous le nom de «terre alémanique», entre le Bassin souabe au nord-est et le Bassin parisien au sud-ouest. Jusqu’à 250 m d’argilites et de marnes se sont déposées dans la partie occidentale de l’aire modélisée (régions de Genève et du lac de Neuchâtel) tandis que l’ensemble du Lias a une épaisseur de 25–70 m dans la partie orientale (PIEŃKOWSKI et al. 2008). La faible épaisseur du Lias dans cette région indique que la subsidence y était globalement moindre au Jurassique précoce (PIEŃKOWSKI et al. 2008). Ces fluctuations d’épaisseur témoignent plutôt de l’existence d’une subsidence différentielle. La géologie superficielle de la chaîne du Jura présente des variations brusques de faciès et d’épaisseur (REISDORF et al. 2011).

Dogger

La plus ancienne unité lithostratigraphique du Dogger présente dans l’aire modélisée est l’Argile à Opalinus. Chronostratigraphiquement parlant, sa limite inférieure se situe à la fin du Jurassique précoce dans la partie nord-ouest de l’aire modélisée et elle évolue de manière diachrone vers l’est. L’Argile à Opalinus consiste en une succession homogène d’argilites, avec quelques intercalations silteuses ou sableuses, qui s’est déposée relativement rapidement dans des conditions marines. La variation d’épaisseur de 80 m à 120 m observée au nord de la Suisse est interprétée comme étant le résultat d’une subsidence différentielle le long de failles paléozoïques réactivées (WETZEL & ALLIA 2003). Des dépôts côtiers ne sont connus que dans le sud de l’Allemagne. La Formation du Passwang qui surmonte l’Argile à Opalinus (BURKHALTER 1996) est composée de cycles granocroissants commençant par des sédiments fins calcaires et siliciclastiques pour s’achever par des oolites ferrugineuses. Ces sédiments se sont déposés dans une mer épicontinentale peu profonde. La plate-forme de Bourgogne s’est ensuite étendue jusque dans l’aire modélisée avec le dépôt de carbonates d’eau peu profonde du Hauptrogenstein. En bordure sud et est de la plate-forme, ce sont principalement des marnes de la Formation de Klingnau qui se sont déposées. La Formation d’Ifenthal, datant de la fin du Jurassique moyen, comprend deux cycles granodécroissants qui commencent par des marnes pour passer à des carbonates d’eau peu profonde (PIEŃKOWSKI et al. 2008, BLÄSI et al. 2013).

Corrélation entre forages

Corrélation du rayonnement gamma entre sept forages profonds réalisés dans le bassin molassique suisse

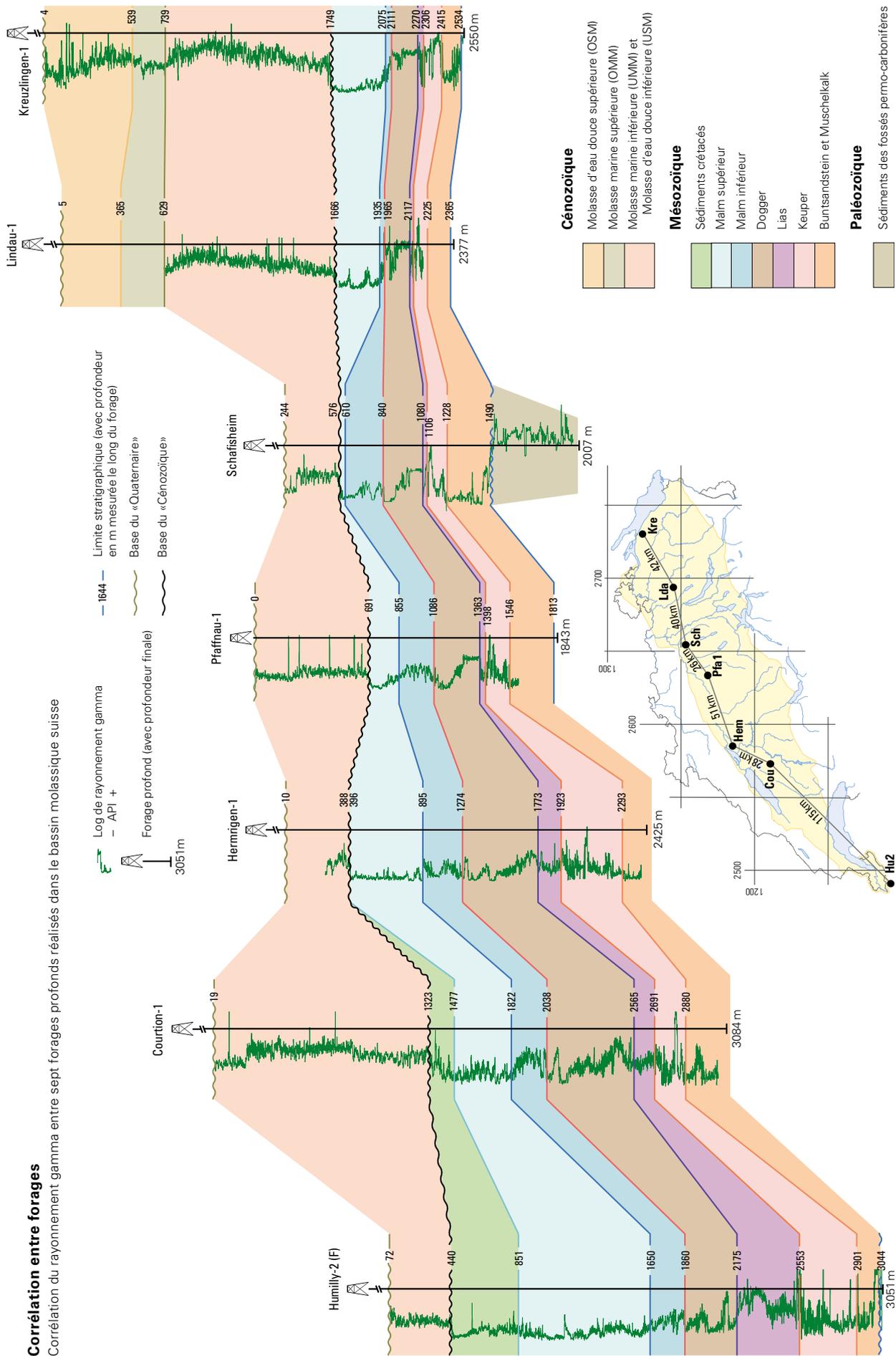


Fig. 2-3: Corrélation entre sept forages profonds exécutés dans le bassin molassique. Les logs décrivent le rayonnement gamma généré naturellement par la roche. Les roches argileuses émettent généralement un rayonnement naturel supérieur dû à la présence de potassium radioactif dans les minéraux argileux. Les corrélations entre les horizons modélisés se basent sur des données fournies par les partenaires du projet.

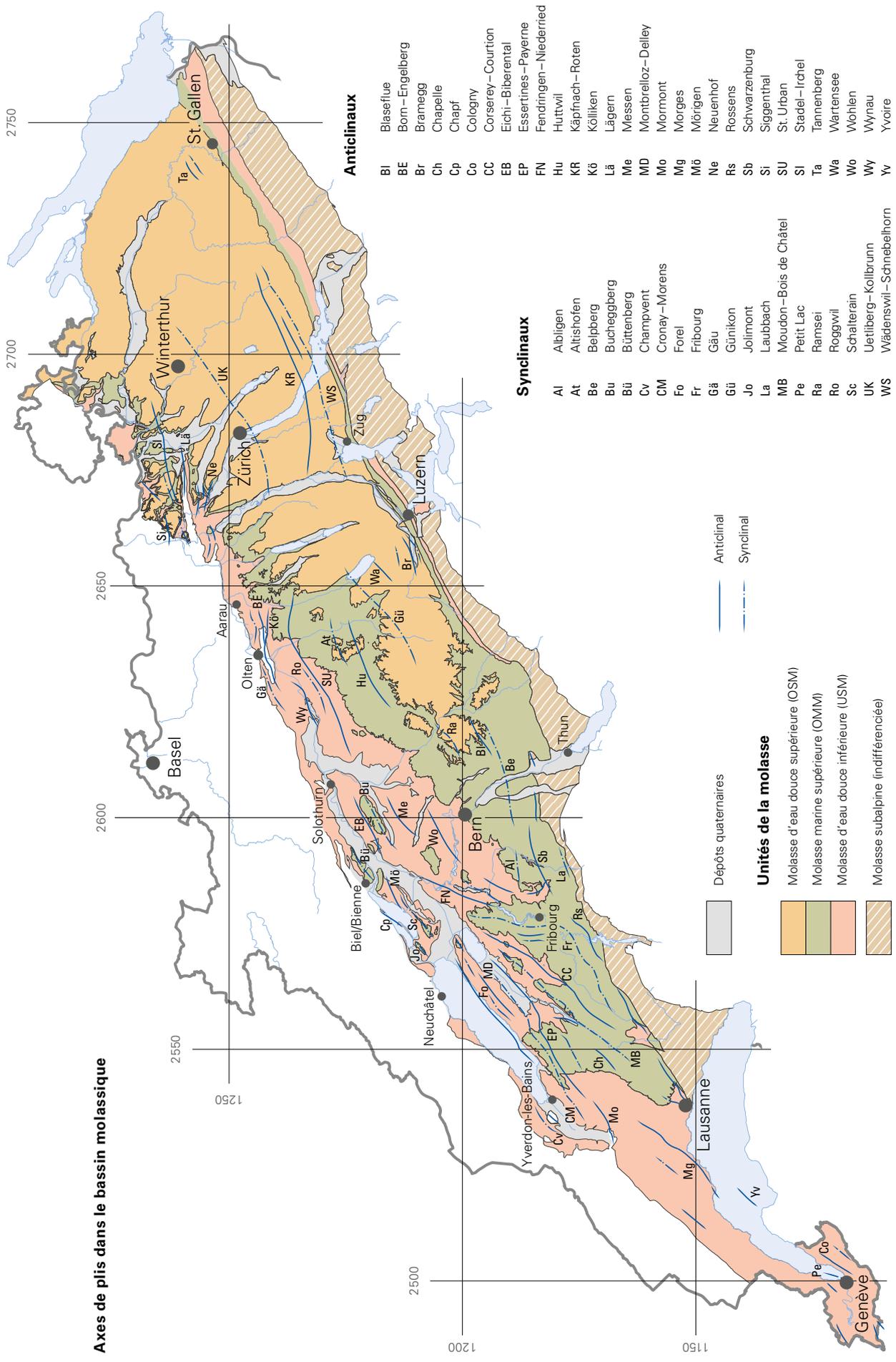


Fig.2-4: Vue d'ensemble des unités molassiques affleurantes et des axes de plis dans le bassin molassique. Compilation et harmonisation basées sur les esquisses tectoniques au 1:200 000 de l'Atlas géologique de la Suisse et sur d'autres esquisses tectoniques (voir notamment le point 4.2.2).

Malm

Au début du Jurassique tardif, le nord-ouest de la Suisse est marqué par la sédimentation des argilites de la Formation de Bärschwil, qui ont ensuite été recouvertes par une plate-forme carbonatée progradant à partir du nord-ouest. Au même moment, la sédimentation était inexistante ou lacunaire dans de vastes secteurs du reste de l'aire modélisée. Ce sont principalement des carbonates d'eau peu profonde qui se sont déposés au nord-ouest lors de la formation de la plate-forme. Dans le reste de l'aire modélisée, des marnes à intercalations calcaires de la Formation de Wildegg se sont déposées au milieu du Jurassique tardif. Des variations d'épaisseur considérables ainsi que des changements de faciès sont observés le long de failles paléozoïques connues et présumées affectant le socle cristallin, ce qui témoigne de la réactivation de ces accidents tectoniques (ALLENBACH 2002, PIEŃKOWSKI et al. 2008).

2.2.2.3 Crétacé

À l'issue d'une régression temporaire survenue à la limite entre le Jurassique et le Crétacé, le Crétacé précoce a connu une nouvelle transgression de la Téthys avec dépôt de sédiments marins peu profonds (BACHMANN & MÜLLER 1992).

Des sédiments crétacés n'existent actuellement qu'à l'ouest d'une ligne Bienne-Thoune. On ignore si des dépôts ont aussi existé plus à l'est, qui auraient ensuite été érodés lors de la phase continentale survenue entre le Crétacé tardif et le Paléogène (PFIFFNER 2009, SOMMARUGA et al. 2012, fig. 2-3).

2.2.3 Paléogène - Néogène

À l'Éocène tardif, et peut-être plus tôt déjà, la subduction de la plaque européenne sous la plaque adriatique a provoqué à l'avant des futures Alpes un bombement qui a généré l'exondation d'une partie de la marge continentale européenne. De vastes régions ont ainsi été soumises à l'érosion et à la karstification, d'où la formation d'une discordance régionale au sommet des dépôts mésozoïques (BACHMANN & MÜLLER 1992, PFIFFNER 2009). Ces poches et fissures karstiques ont été remplies de sédiments sidérolithiques produits par l'altération des couches jurassiques les plus récentes - et éventuellement crétacées - sous un climat subtropical à semi-aride (WULLSCHLEGER 2005).

Le bassin molassique est alors apparu entre le bombement d'avant-pays et les Alpes en formation, sous la forme d'un bassin flexural d'avant-pays qui s'est progressivement rempli de sédiments et propagé vers le nord. C'est ainsi que les sédiments cénozoïques se sont déposés en discordance sur une lacune stratigraphique dans de vastes régions (BACHMANN & MÜLLER 1992, PFIFFNER 2009).

À l'Oligocène et au Miocène, le bassin d'avant-pays s'étendait le long des Alpes orientales et centrales, en devenant plus étroit en direction de l'ouest, à la transition vers les Alpes occidentales. Il s'est rempli en deux phases. Des sédiments de mer profonde se sont déposés dans un «stade flysch» durant le Paléocène et l'Oligocène précoce, puis un «stade molasse» impliquant des dépôts marins peu profonds et des dépôts continentaux s'est mis en place à l'Oligocène

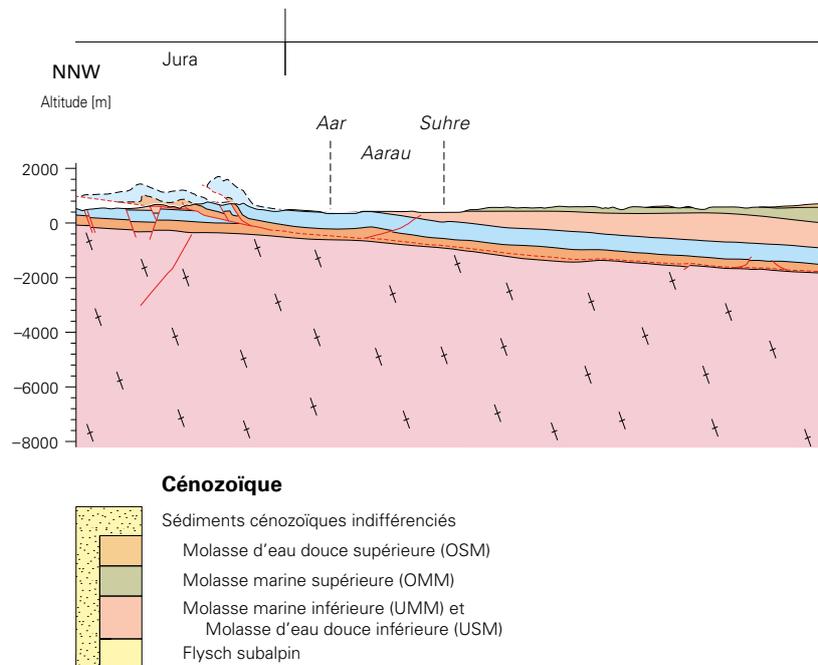
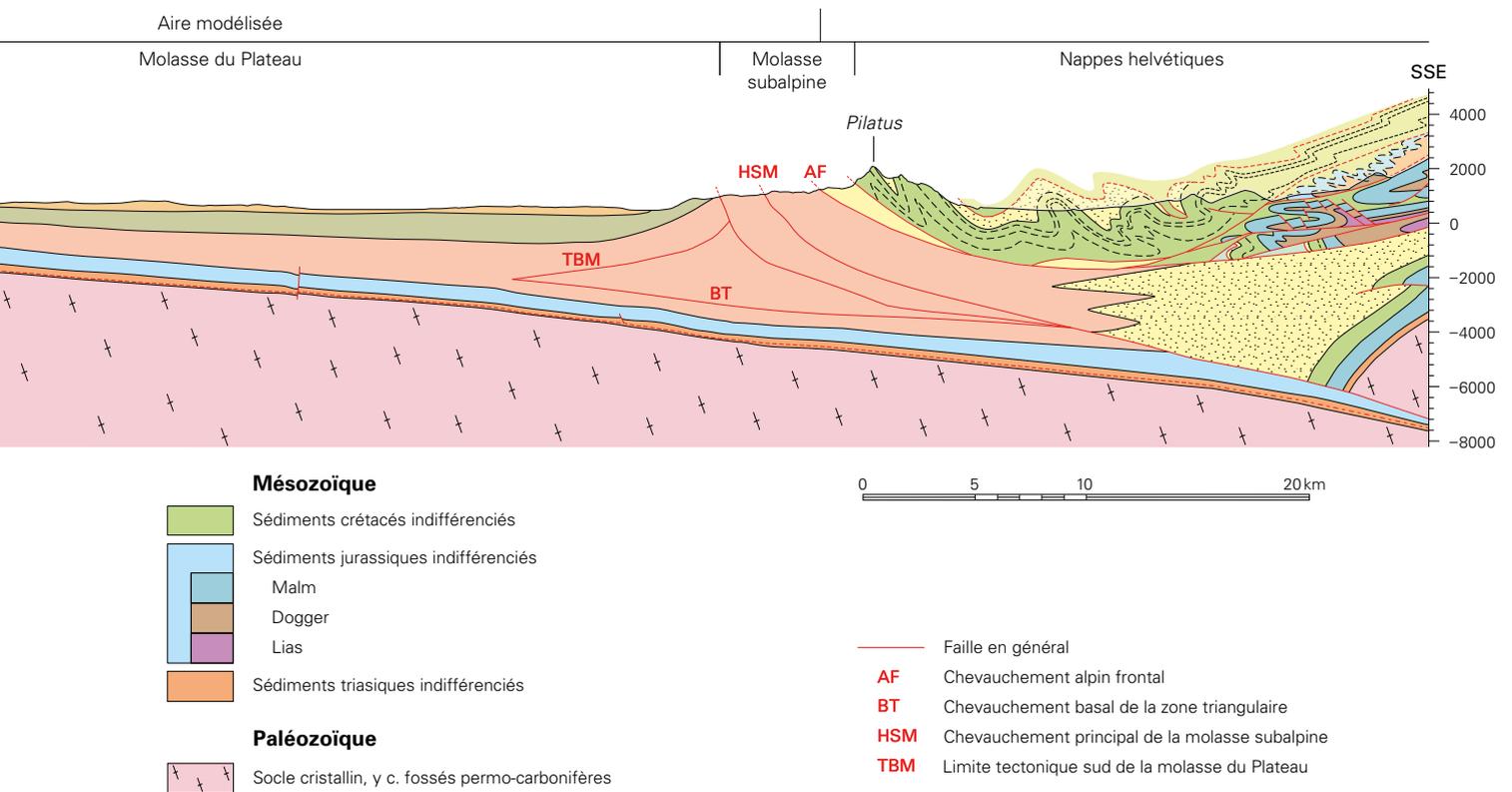


Fig. 2-5: Profil transversal à travers le Jura, le bassin molassique (aire modélisée) et la bordure nord des Alpes. Sa trace est indiquée à la figure 2-1. Compilation à partir de GeoMol17 et de profils géologiques issus de l'AG25 (feuille 135 Aarau, profil 5, pl. II), de la carte géologique spéciale 128 et de JORDAN et al. (2015).

tardif et au Miocène. Au cours de ces épisodes, les soulèvements et les abaissements du bassin ont occasionné deux incursions marines. L'avancée et le retrait de ces bras de mer ont formé deux cycles molassiques caractérisés par une succession de dépôts marins et continentaux (SINCLAIR 1997). Ces deux cycles (ou mégaséquences) sont classiquement subdivisés en quatre groupes lithostratigraphiques (p.ex. MATTER et al. 1980): Molasse marine inférieure (UMM), Molasse d'eau douce inférieure (USM), Molasse marine supérieure (OMM) et Molasse d'eau douce supérieure (OSM).

Pendant les deux cycles molassiques, des fleuves alpins ont formé, en bordure méridionale du bassin, de vastes cônes de déjection et des deltas qui s'étendaient parfois sur des dizaines de kilomètres dans le bassin à partir du bord des Alpes (HABICHT 1987).

La fin de la sédimentation dans le bassin molassique non déformé a été diachrone. Elle s'est produite il y a moins de 11 millions d'années dans sa partie occidentale, pendant le plissement et le soulèvement de la chaîne jurassienne, et il y a environ 6-5 millions d'années dans sa partie située en Haute-Autriche. Un soulèvement considérable des Alpes et du bassin molassique a débuté il y a environ 5 millions d'années dans les Alpes occidentales et centrales et il y a 4-3 millions d'années dans les Alpes orientales. Suite à ce soulèvement, les sédiments de la molasse ont été érodés dans la partie occidentale du bassin, raison pour laquelle l'OSM n'existe et n'affleure actuellement plus qu'à l'est de Fribourg (HOMEWOOD et al. 1986, KUHLEMANN & KEMPF 2002, fig. 2-4).



On se référera à BERGER et al. (2005a, b) pour trouver une compilation des unités de la molasse et une analyse exhaustive de l'évolution paléogéographique du bassin molassique et du Fossé du Haut-Rhin.

2.2.4 Quaternaire

Le Quaternaire est caractérisé par plusieurs périodes glaciaires lors desquelles des glaciers se sont parfois avancés loin sur le Plateau suisse et par-dessus la partie orientale du Jura. Ces périodes glaciaires ont généré, d'une part, de l'érosion et, d'autre part, des dépôts glaciaires qui marquent le paysage actuel du bassin molassique de leur empreinte. Les roches meubles n'ont pas été modélisées dans le cadre du projet GeoMol, l'horizon supérieur considéré étant le toit du rocher, qui a été façonné par l'érosion glaciaire et fluviale. Dans les grandes vallées alpines, le creusement a été tel qu'il a atteint des altitudes inférieures au niveau actuel de la mer (FINCKH et al. 1984). Sur le Plateau suisse, le toit du rocher est à une profondeur moindre, mais il présente tout de même de nombreux chenaux et bassins.

2.3 Unités tectoniques de la molasse

La molasse est subdivisée en trois unités tectoniques. La molasse du Jura, la molasse du Plateau et la molasse subalpine se succèdent du nord-ouest vers le sud-est (HOFMANN

1957, HOMEWOOD et al. 1989, TRÜMPY 1980, SOMMARUGA et al. 2012, fig. 2-1). La désignation des unités tectoniques est en cours de redéfinition dans le cadre de l'harmonisation de la nomenclature tectonique faisant suite au projet HARMOS (STRASKY et al. 2016). Le projet GeoMol et le présent rapport utilisent encore la nomenclature et la subdivision en usage jusqu'ici.

2.3.1 Molasse du Jura

La molasse du Jura se compose de sédiments qui ont été déformés conjointement au plissement de la chaîne jurassienne. Du fait du soulèvement et de l'érosion qu'elle a subis, on n'en décèle plus que quelques occurrences dans les synclinaux du Jura plissé (SOMMARUGA et al. 2012). La molasse du Jura n'a pas été modélisée dans le cadre du projet GeoMol, car elle se trouve hors du bassin molassique actuel.

2.3.2 Molasse du Plateau

La molasse du Plateau comprend deux sous-unités tectoniques: la molasse du Plateau horizontale et la molasse du Plateau redressée et plissée.

La molasse du Plateau horizontale constitue la majeure partie du bassin molassique suisse actuel. Son style structural diffère entre l'ouest et l'est du bassin. Sa partie occidentale comprend de vastes anticlinaux d'orientation NE-SW et des failles transversales d'orientation N-S, NW-SE et

WNW-ESE (fig. 2-4). Sa limite nord correspond à la limite d'érosion longeant la chaîne du Jura. Les strates de la molasse du Plateau se redressent progressivement et se plissent en approchant de sa bordure sud où se trouve la zone dite triangulaire. La molasse du Plateau redressée et plissée peut être suivie depuis le nord des Préalpes penniques à l'ouest jusqu'au Rhin à l'est. Elle s'élargit quelque peu au nord de Thounne et à l'est de Saint-Gall. Son style structural est prédominé par des plis, dont la surface axiale subverticale est souvent cisailée (HABICHT 1945, HOFMANN 1955, 1956, SOMMARUGA et al. 2012).

2.3.3 Molasse subalpine

La molasse subalpine affleure au sud de la molasse du Plateau en formant une zone étroite qui précède le front des nappes sédimentaires helvétiques et penniques. Cette zone est marquée par un empilement d'écaillés chevauchées les unes sur les autres, redressées et dont les sédiments molassiques présentent eux-mêmes des déformations internes.

La limite nord de la molasse subalpine est une zone de transition structurale caractérisée par des chevauchements à vergence nord-ouest. À l'est de l'Aar, les sédiments molassiques forment une zone triangulaire complexe (point 2.4.5), siège de rétrochevauchements et de failles inverses dédoublées.

À l'Oligocène, les sédiments de la partie la plus méridionale de la molasse subalpine ont été surmontés tectoniquement par l'avancée du front alpin, puis écrasés par l'empilement des nappes alpines. C'est ainsi que les chevauchements à l'intérieur de la molasse subalpine impliquent les sédiments cénozoïques jusqu'à leur base sous la pile de nappes alpines BACHMANN et al. 1982, VOLLMAYR & WENDT 1987, VOLLMAYR 1992, MÜLLER et al. 2002, PFIFFNER 2009, SOMMARUGA et al. 2012, fig. 2-5).

2.4 Évolution tectonique

En ce qui concerne l'évolution tectonique du bassin molassique au Paléogène et au Néogène, la collision des plaques a joué un rôle essentiel dans la naissance du bassin d'avant-pays nord-alpin. Mais d'autres caractéristiques et processus tectoniques ont également influencé le développement de structures dans le bassin molassique actuel (IBELE 2011):

- structures héritées de l'ancienne marge continentale européenne passive (p.ex. fossés permo-carbonifères) et répartition des évaporites triasiques;
- formation du système de fossés Haut-Rhin - Bresse à l'Éocène-Oligocène;
- raccourcissement des Alpes, persistant éventuellement à l'heure actuelle, avec exhumation/soulèvement consécutif des massifs cristallins externes;
- poussée à distance et formation de la chaîne jurassienne à la fin du Miocène.

Les parties occidentale et orientale du bassin molassique suisse présentent des différences structurales dues à ces ca-

ractéristiques et processus tectoniques divers. Dans la partie occidentale, la densité de failles dans les sédiments mésozoïques est nettement supérieure et les structures sont caractérisées par des anticlinaux d'axe SW-NE (fig. 2-4). Dans la partie centrale et orientale, les zones de déformation et les niveaux de décollement se trouvent principalement dans les séquences sédimentaires cénozoïques. Les données sismiques font apparaître des failles normales d'orientation WSW-ESE, parallèles au bassin, à l'intérieur des séquences sédimentaires paléozoïques et mésozoïques. Certaines d'entre elles affectent également les séquences sédimentaires cénozoïques (BACHMANN et al. 1982, BACHMANN & MÜLLER 1992, DIEBOLD & NOACK 1997, LÜSCHEN et al. 2004, PFIFFNER 2009, IBELE 2011, SOMMARUGA et al. 2012).

2.4.1 Formation des fossés permo-carbonifères

Un système de fossés a commencé à se former dans le socle cristallin varisque au Carbonifère tardif. Nombre d'entre eux, situés en France, en Suisse et en Allemagne, présentent une géométrie en demi-graben. Ils ont généralement une orientation ENE-WSW dans le nord de la Suisse, selon l'état actuel des connaissances (BACHMANN & MÜLLER 1992, NAEF & MADRITSCH 2014). La plupart des auteurs s'accordent à penser que leur formation résulte de l'interaction entre plusieurs systèmes de failles (p. ex. DIEBOLD et al. 1991, HENK & TIMMERMAN 2005, ZIEGLER 2005, MCCANN et al. 2006, NAEF & MADRITSCH 2014). MCCANN et al. (2006) et NAEF & MADRITSCH (2014) estiment que certains fossés permo-carbonifères ont pu résulter d'une cinématique de type *pull-apart*. Des failles raides étaient également actives pendant la formation des fossés (p. ex. ZIEGLER 1990, FAURE 1995, MCCANN et al. 2006, NAEF & MADRITSCH 2014). Dans la plupart des cas, elles bordent les fossés et leur activité contrôlait la sédimentation à l'intérieur de ceux-ci (BACHMANN & MÜLLER 1992, NAEF & MADRITSCH 2014).

Les failles limitant les fossés permo-carbonifères ont été en partie réactivées ultérieurement dans la partie occidentale du bassin molassique suisse, par exemple aux alentours de Genève. Les failles décrochantes orientées NE-SW et NW-SE, que l'on peut suivre du Jura plissé au front des Alpes, ont été identifiées comme étant des failles dans le socle paléozoïque réactivées plusieurs fois au Paléogène et au Néogène (GORIN et al. 1993, SOMMARUGA et al. 2012). Au nord de la Suisse également, il existe des indications bien étayées de réactivations de failles affectant des fossés permo-carbonifères et liées à la formation du bassin molassique (DIEBOLD & NOACK 1997).

Certaines failles situées dans le socle cristallin aux alentours de Fribourg ont un caractère comparable à celui des failles liées aux fossés permo-carbonifères, aussi peut-on éventuellement y voir des failles marginales de tels fossés. Elles ont été réactivées pendant la phase de rifting du système de fossés Haut-Rhin - Bresse. Ces failles dans le socle peuvent être corrélées avec les failles affectant les couches sédimentaires sus-jacentes du fait de la similarité du style de déformation, de leur orientation et de leur localisation découlant d'interprétations sismiques, ainsi que de l'emplacement d'épicentres de tremblements de terre (KASTRUP et al. 2007).

2.4.2 Évolution du bassin d'avant-pays nord-alpin

L'évolution du bassin d'avant-pays nord-alpin a débuté à la marge méridionale de la plate-forme européenne avec la subduction de la plaque européenne sous la plaque adriatique (africaine) et la transgression de la Téthys à la fin de l'Éocène. L'orogénèse alpine s'en est suivie, accompagnée d'un épaissement de la croûte terrestre. La charge tectonique exercée par les nappes de chevauchement alpines sur la lithosphère et la charge sédimentaire exercée par l'accumulation des débris d'ablation issus de l'orogénèse en cours dans le bassin d'avant-pays ont induit une subsidence du bassin molassique. Lors de cet épisode, l'extension induite par la courbure flexurale de la croûte a favorisé le développement de failles normales antithétiques et synthétiques, généralement parallèles au bassin, dans les couches sédimentaires mésozoïques. La pression de compression exercée sur le bassin a en outre réactivé le système de failles permo-carbonifère (BACHMANN et al. 1982, BACHMANN & KOCH 1983, KARNER & WATTS 1983, PFIFFNER 1986, 2009, BACHMANN et al. 1987, SINCLAIR & ALLEN 1992).

2.4.3 Influence du Fossé du Haut-Rhin

Juste au nord-ouest de la chaîne jurassienne se trouve le système de fossés Haut-Rhin – Bresse, reliés entre eux par une zone de failles transformantes. Il fait partie du système de rifts européen qui s'étendait de la mer du Nord au sud de la France au Cénozoïque (ZIEGLER 1990). La phase principale de formation du Fossé du Haut-Rhin, avec son canevas de failles orientées NNE–SSW, s'est déroulée à la fin de l'Éocène et à l'Oligocène (BERGER et al. 2005a, HINSKEN et al. 2007).

Plusieurs failles orientées NNE–SSW traversent le Jura plissé. La présence de failles transversales de même orientation a également été prouvée ou présumée dans le bassin molassique suisse, à l'ouest de Berne. Elles ont été associées à la formation du Fossé du Haut-Rhin, voire interprétées comme étant son prolongement vers le sud (REVERTERA 1927, PLANCHEREL 1979, RYBACH et al. 1980, KASTRUP et al. 2007, LAUBSCHER 2008, MEIER 2010, IBELE 2011).

2.4.4 Poussée à distance et formation du Jura

Le soulèvement des massifs cristallins externes et leur chevauchement vers le nord-ouest dans les Alpes centrales a provoqué, dans la partie ouest et centrale du bassin molassique suisse, un cisaillement dans les sédiments recouvrant le socle cristallin paléozoïque et leur transport vers le nord-ouest le long d'un niveau de décollement basal situé dans les niveaux triasiques du Groupe de l'anhydrite (LAUBSCHER 1961, BURKHARD 1990, SCHMID et al. 1996). Sous l'effet de ce processus, nommé poussée à distance («Fernschub»), la chaîne jurassienne s'est formée au bord septentrional du bassin d'avant-pays nord-alpin à la fin du Miocène. Cette poussée à distance est expliquée par une transmission des poussées des Alpes vers le Jura. D'après la doctrine communément admise, le socle cristallin et les fossés permo-carbonifères n'ont pas été influencés substantiellement par ce mécanisme tectonique (LAUBSCHER 1961, PFIFFNER 2009).

La chaîne jurassienne se termine à l'est avec l'anticlinal de la Lägern, qui comprend un chevauchement enraciné dans le niveau de décollement basal. On ne sait pas exactement si cet horizon se prolonge latéralement vers l'est ni où se trouve précisément la limite nord de la déformation due à la poussée à distance (NAGRA 2008). À l'est de Zurich, le front de déformation est associé à des chevauchements aveugles dans la molasse du Plateau. Le niveau de décollement basal devrait manquer à l'est du forage Lindau-1, car les séries évaporitiques s'amincissent dans cette direction et les couches triasiques se biseautent sur le socle cristallin au nord-est (massif de Bohème). On présume que la transition de la partie décollée à la partie autochtone de l'avant-pays nord-alpin passe par le prolongement de la zone de failles de Neuhausen vers le sud-est, en direction du Hörnli et de Neckertal. C'est ainsi qu'il n'existe en Suisse orientale, en Allemagne et en Autriche aucun front de déformation alpin clair au nord de la molasse subalpine (BURKHARD 1990, IBELE 2011, SOMMARUGA et al. 2012, ORTNER et al. 2015).

Sous l'effet de la poussée à distance, la pile de sédiments du bassin molassique a été transportée passivement sur un trajet correspondant au raccourcissement de la chaîne jurassienne. Celui-ci décroît d'ouest en est le long du Jura, ce qui indique que la pile de sédiments du bassin molassique a été déplacée différentiellement en subissant une rotation dans le sens des aiguilles d'une montre (LAUBSCHER 1961, BURKHARD 1990, KEMPF et al. 1998, IBELE 2011). Une partie de la distance de raccourcissement a été compensée par des failles transversales.

2.4.5 Formation de la zone triangulaire

Le soulèvement des massifs cristallins externes, concomitant à la poussée à distance et au plissement de la chaîne jurassienne, a vraisemblablement induit dans les sédiments de la molasse subalpine situés à l'est du lac de Thoune la formation d'une zone triangulaire complexe incluant des chevauchements et des rétrochevauchements. Le raccourcissement affectant la molasse subalpine croît d'ouest en est en même temps que décroît le raccourcissement des couches mésozoïques et de la molasse du Plateau imputable à la poussée à distance (BURKHARD 1990, BACHMANN & MÜLLER 1992, SOMMARUGA et al. 2012).

2.4.6 Néotectonique

Divers indices révèlent que les failles transversales affectant le bassin molassique en Suisse occidentale sont sujettes à une activité néotectonique traçable du Jura au bassin molassique (VOUILLAMOZ et al. 2017). Cette activité peut être attribuée à une réactivation de failles raides dans le socle cristallin (KASTRUP et al. 2004, NAGRA 2008, IBELE 2011).

3. Construction du modèle

Tous les horizons modélisés dans le cadre du projet GeoMol sont décrits ci-après. Un horizon est défini comme étant une surface de séparation entre deux unités lithostratigraphiques. C'est pourquoi le présent rapport ne comprend aucune description lithostratigraphique détaillée des unités rencontrées (voir à ce sujet le lexique lithostratigraphique de la Suisse à l'adresse www.strati.ch). Comme le projet GeoMol a été lancé avant la finalisation des nouvelles unités stratigraphiques, la définition des horizons modélisés (fig. 2-2) ne correspond pas toujours à la subdivision du lexique.

Tous les horizons n'ont pas été modélisés dans l'ensemble du bassin molassique suisse, ni selon le même degré de détail. La plupart des horizons représentés ont été modélisés à partir de données sismiques et de forages. Cependant, certains d'entre eux ont été établis uniquement à partir de données de forages – indiquant donc la répartition de leurs épaisseurs – et d'autres en exploitant des données de forages, des cartes et des profils géologiques.

Deux tableaux ont été dressés pour donner une vue d'ensemble des différents modèles, des horizons modélisés et des données de base utilisées dans le projet GeoMol.

Le tableau 3-1 donne une vue d'ensemble de GeoMol15 avec ses modèles pilotes, ses données de base et la désignation de ses horizons dans le proche étranger (France, Allemagne et Autriche).

Le tableau 3-2 donne une vue d'ensemble des horizons modélisés et des données de base utilisées pour élaborer le modèle GeoMol17, en distinguant les différents sous-modèles.

Les vitesses enregistrées dans les principaux forages profonds pratiqués dans le bassin molassique ont été retravaillées sur la base des études de ROTH et al. (2010) et MEIER (2010). Ces deux études comprennent des sismogrammes synthétiques qui se prêtent bien aux interprétations sismiques. Pour couvrir les – parfois vastes – volumes dépourvus d'informations fiables situés entre les forages profonds, les concepteurs des modèles se sont efforcés d'attribuer un réflecteur net ou un faciès sismique à tout horizon marqueur ou unité stratigraphique. Quelques horizons marqueurs cartographiés à partir d'investigations sismiques correspondent à des variations notables de la lithologie, telles qu'elles apparaissent également à la limite entre formations en surface ou dans un profil de forage. Certaines transitions lithologiques importantes – comme le passage d'une argilite à un calcaire ou d'une évaporite à un calcaire – peuvent aussi causer de fortes variations du signal sismique. Mais les horizons marqueurs ressortant dans les investigations sismiques ne sont pas toujours aisés à cartographier, car les sédiments mésozoïques présentent aussi des variations latérales de faciès et des passages graduels (p. ex. argilite-marne-calcaire). Outre la lithologie, l'hétérogénéité des données sismiques et la profondeur variable des

horizons interprétés prêterent la qualité des représentations sismiques. Il n'est donc pas toujours possible d'assigner un réflecteur unique ou un groupe de réflecteurs à chaque unité lithostratigraphique dans tout le bassin (ROTH et al. 2010). Au vu des dimensions des différents sous-modèles de GeoMol17, il est toutefois généralement possible d'y identifier des réflecteurs (ou des séquences) caractéristiques. Le tableau A5-1 (compris dans le support de données annexé) donne une vue d'ensemble des signaux sismiques des horizons marqueurs dans chacun des sous-modèles.

Les relations entre les horizons interprétés dans les données sismiques et leurs liens avec la succession lithologique, telles que décrites aux chapitres 3.1 à 3.3, proviennent des travaux de MEIER (2010), ROTH et al. (2010), SOMMARUGA et al. (2012), CLERC (2016), GRUBER et al. (2016), HUGGENBERGER et al. (2016), MARCHANT & BAUER (2016) et MOCK (2016) ainsi que d'observations personnelles.

3.1 Carbonifère – Permien

Base du «Permo-carbonifère» (BPK)

Parmi les fossés permo-carbonifères suisses, seule une partie de celui du nord du pays a été modélisée, dans la région Aarau–Laufenburg–Benken–Winterthur, dans le cadre du projet GeoMol. Le fossé permo-carbonifère du nord de la Suisse a été atteint par un forage de la Nagra au cours des années 1980 (SPRECHER & MÜLLER 1986). Les connaissances à son sujet proviennent de l'interprétation de données de sismique réflexion et, dans une large mesure, de données de forages profonds exécutés par la Nagra et par des sociétés pétrolières. Il traverse vraisemblablement tout le nord de la Suisse, de l'Ajoie au lac de Constance (DIEBOLD et al. 1991).

La lithostratigraphie des sédiments permo-carbonifères n'a pas été subdivisée plus finement. La modélisation de l'horizon Base du «Permo-carbonifère» dans le projet GeoMol est principalement fondée sur des données provenant de la deuxième étape du plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes» (SGT) de la Nagra (NAGRA 2014).

3.2 Trias – Crétacé

Base du «Mésozoïque» (BMes)

L'horizon continu le plus profond modélisé dans le projet GeoMol est celui de la base du «Mésozoïque». Il correspond à la surface d'érosion du socle cristallin, des sédiments des fossés permo-carbonifères ou de la base du «Mésozoïque». La modélisation de l'horizon Base du «Méso-

Tab. 3-1: *Vue d'ensemble des horizons modélisés dans GeoMol15 et des modèles pilotes ainsi que comparaison entre les désignations CH et UE.*

Modèles		GeoMol 15	Modèle pilote Genève – Savoie	Désignation dans le projet GeoMol Europe (F)	Modèle pilote «Plateau Suisse»	Modèle pilote Lac de Constance – Allgäu	Désignation dans le projet GeoMol Europe (D, A)
Horizons modélisés							
TFels	Toit du rocher	p / cartes des isohypses, modèles du rocher		Base du Quaternaire			Basis Lockergestein
TOSM	Toit de l'OSM	Correspond à TFels	–	–	Correspond à TFels	Correspond à TFels	n/a
TOMM	Toit de l'OMM	p	–	–	p	s	Basis Obere Süswassermolasse
TUSM	Toit de l'USM	p	–	–	p	s	Basis Obere Meeremolasse
TUMM	Toit de l'UMM	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
BKån	Base du «Cénozoïque»	s	s	Base du Tertiaire	s	s	Basis Tertiär
TKre	Toit du «Crétacé»	Correspond à BKån	Correspond à BKån	n/a	Correspond à BKån	–	–
TUMa	Toit du Malm supérieur	s	s	Toit du Jurassique supérieur	s	Correspond à BKån	n/a
TLMa	Toit du Malm inférieur	s	s	n/a	s	s	Top Impressamergel-Fm.
TDo	Toit du Dogger	s	s	Toit du Jurassique moyen	s	s	Top Mitteljura
TOpa	Toit de l'Argile à Opalinus	n/a	n/a	n/a	t	n/a	n/a
TLi	Toit du Lias	s	s	Toit du Jurassique inférieur	s	s	Top Unterjura
TKeu	Toit du Keuper	s	s	Toit du Trias	s	s	Top Trias
TGips	Toit du Keuper gypseux	n/a	n/a	n/a	t	t	Top Unterkeuper
TMus	Toit du Muschelkalk	s	s	n/a	s	s	Top Muschelkalk
TAnhy	Toit du Groupe de l'anhydrite	n/a	n/a	n/a	n/a	t	Top Heilbronn-Fm.
BMes	Base du «Mésozoïque»	s	s	Toit du socle / Toit du Paléozoïque	s	s	Top Paläozoikum

Légende

- absent dans l'aire modélisée
- n/a non modélisé
- s interprétation de sections sismiques
- t dérivé de la répartition des épaisseurs
- p dérivé de données de forages, cartes et profils géologiques

Tab.3-2: *Vue d'ensemble des horizons modélisés dans GeoMol17 et des données de base pour chacun des sous-modèles.*

Sous-modèles		Genève	Vaud	Fribourg	Berne	Service géologique national Modèle peu profond – NW	Service géologique national Modèle peu profond – NE	Service géologique national Modèle profond	Lac de Constance
Horizons modélisés									
Modélisation dérivée de données de forages, cartes des isohypses et modèles du rocher									
TFels	Toit du rocher	n/a	n/a	n/a	Correspond à TFels	n/a	Correspond à TFels	Correspond à TFels	Correspond à TFels
TOSM	Toit de l'OSM	n/a	Correspond à TFels	Correspond à TFels	p	Correspond à TFels	p	Correspond à TFels	s
TOMM	Toit de l'OMM	Correspond à TFels	s	p	p	p	p	p	s
TUSM	Toit de l'USM	–	s	t (conceptuel)	n/a	–	–	n/a	n/a
TUMM	Toit de l'UMM	s	s	s	s	p	p	s	s
BKän	Base du «Cénozoïque»	Correspond à BKän	Correspond à BKän	Correspond à BKän	Correspond à BKän	–	–	–	–
TKre	Toit du «Crétacé»	–	–	–	–	–	–	–	–
TUMa	Toit du Malm supérieur	s	s	s	s	Correspond à BKän	Correspond à BKän	Correspond à BKän	Correspond à BKän
TLMa	Toit du Malm inférieur	s	s	s	s	p	t	s	s
TDo	Toit du Dogger	s	s	s	s	p	p	s	s
TLi	Toit du Lias	s	s	s	s	p	p	s	s
TKeu	Toit du Keuper	s	s	s	s	p	t	s	s
TMus	Toit du Muschelkalk	s	s	s	s	p	p	s	s
BMes	Base du «Mésozoïque»	s	s	s	s	p	p	s	s
BPK	Base du «Permo-carbonifère»	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	p	n/a	n/a

Légende

- absent dans l'aire modélisée
- n/a non modélisé
- s interprétation de sections sismiques
- t dérivé de la répartition des épaisseurs
- p dérivé de données de forages, cartes et profils géologiques

zoïque» est basée sur des interprétations sismiques et des données de forages.

Les caractéristiques sismiques de l'horizon marqueur Base du «Mésozoïque» varient considérablement dans toute l'aire modélisée, du fait des variations de lithologie dans les niveaux sus-jacents comme sous-jacents (ROTH et al. 2010, MADRITSCH et al. 2013).

Toit du Groupe de l'anhydrite (TAnhy)

L'horizon modélisé Toit du Groupe de l'anhydrite (Muschelkalk moyen), qui correspond au toit de la Formation de Zeglingen (JORDAN 2016), n'a été modélisé que dans la région pilote Lac de Constance – Allgäu, à partir de la répartition des épaisseurs dérivées de données de forages. Cet horizon est nommé «Top Heilbronn-Formation» dans le rapport final concernant la région pilote Lac de Constance – Allgäu (GEO-MOL LCA-PROJEKTTEAM 2015).

Toit du Muschelkalk (TMus)

L'horizon modélisé Toit du Muschelkalk correspond au toit du Membre du Stamborg (anciennement Trigonodus-Dolomit du Muschelkalk supérieur). Il ne correspond donc pas au toit du Muschelkalk selon la subdivision retenue actuellement dans le lexique lithostratigraphique de la Suisse (www.strati.ch). La modélisation de l'horizon Toit du Muschelkalk est basée sur des interprétations sismiques et des données de forages profonds.

Le réflecteur ayant servi à interpréter l'horizon Toit du Muschelkalk devrait être imputable dans de vastes régions au passage de la dolomie dure du Membre du Stamborg aux évaporites et marnes tendres du Keuper. Contrairement à la dolomite du Membre du Stamborg, le Membre d'Asp est en-deçà de la résolution sismique du fait de sa faible épaisseur, si bien qu'il n'offre aucun contraste d'impédance avec les marnes et les évaporites sus-jacentes.

Toit du Keuper gypseux (TGips)

L'horizon modélisé Toit du Keuper gypseux correspond au toit de la Formation du Bänkerjoch (anciennement Keuper moyen). Il n'a été modélisé que dans les deux régions pilotes «Plateau suisse» et Lac de Constance – Allgäu, à partir de la répartition des épaisseurs dérivées de données de forages.

Toit du Keuper (TKeu)

L'horizon modélisé Toit du Keuper correspond au toit de la Formation du Klettgau. Sa modélisation est basée sur des interprétations sismiques, des données de forages profonds, ainsi que des profils géologiques dans la bordure nord du bassin molassique.

L'horizon Toit du Keuper est aisément cartographiable à partir des données sismiques, principalement dans la partie occidentale de l'aire modélisée. Cela devrait être dû à la composition gréseuse du Trias tardif (Rhétien), qui présente un bon contraste sismique avec les évaporites et les marnes des niveaux sous-jacents. Dans la partie orientale de l'aire modélisée, le Lias est si mince que le toit du Keuper et le toit du Lias sont difficiles à distinguer.

Toit du Lias (TLi)

L'horizon modélisé Toit du Lias correspond au toit de la Formation de la Stafflegg. Sa modélisation est basée sur des interprétations sismiques, des données de forages profonds, ainsi que des cartes et des profils géologiques à la bordure nord du bassin molassique.

La limite Lias–Dogger est marquée par un saut bien visible dans les logs de vitesses relevés dans les forages profonds du bassin molassique (ROTH et al. 2010, MEIER 2010). Du point de vue lithologique, ce saut devrait correspondre au passage du sommet de la Formation de la Stafflegg, formé de bancs un peu plus calcaires, à l'Argile à Opalinus (comm. pers. de REISDORF).

Toit de l'Argile à Opalinus (TOpa)

L'horizon Toit de l'Argile à Opalinus n'a été modélisé que dans la région pilote «Plateau suisse», à partir de la répartition des épaisseurs dérivées de données de forages. Son image sismique est néanmoins évoquée ici, car l'Argile à Opalinus présente souvent un faciès sismique transparent aisément repérable. Seule sa limite supérieure est difficile à appréhender, se trouvant à la transition entre des argilites et des calcaires marneux de la Formation du Passwang, et de leurs équivalents latéraux dans le Dogger inférieur.

Toit du Dogger (TDo)

L'horizon modélisé Toit du Dogger correspond au toit de la Formation d'Ifenthal. Sa modélisation est basée sur des interprétations sismiques, des données de forages profonds, ainsi que des cartes et des profils géologiques pour le relier aux lignes d'affleurement à la bordure nord du bassin molassique.

Dans la partie occidentale et centrale de l'aire modélisée, l'horizon Toit du Dogger correspond à un réflecteur net et continu (SOMMARUGA et al. 2012), imputable au contraste d'impédance entre le calcaire dur du Dogger supérieur et les séquences marneuses du Malm inférieur. L'horizon Toit du Dogger ressort assez peu dans les données sismiques de la partie orientale de l'aire modélisée, du fait du faible contraste d'impédance à la limite entre le Dogger et le Malm (ROTH et al. 2010).

Toit du Malm inférieur (TLMa)

L'horizon modélisé Toit du Malm inférieur correspond au toit du Membre d'Effingen de la Formation de Wildegg. Dans le rapport final concernant la région pilote Lac de Constance – Allgäu (GEO-MOL LCA-PROJEKTTEAM 2015), cet horizon est nommé «Top Impressamergel-Formation» (cette formation représente l'équivalent latéral du Membre d'Effingen au sud de l'Allemagne). La modélisation de l'horizon Toit du Malm inférieur est basée sur des données de forages profonds, des interprétations sismiques, ainsi que des cartes et des profils géologiques pour le relier aux lignes d'affleurement dans la bordure nord du bassin molassique.

Les données sismiques révèlent souvent un faciès sismique transparent qui correspond aux marnes du Membre d'Effingen. Un réflecteur est plus ou moins perceptible selon la constitution du sommet du Membre d'Effingen et des niveaux sous-jacents.

Toit du Malm supérieur (TUMa)

L'horizon modélisé Toit du Malm supérieur correspond au toit du Malm, et à l'horizon modélisé Base du «Cénozoïque» là où les sédiments crétacés font défaut sous le bassin molassique. Sa modélisation est basée sur des interprétations sismiques, des données de forages profonds, ainsi que des cartes et des profils géologiques pour le relier aux lignes d'affleurement dans la bordure nord du bassin molassique.

L'horizon Toit du Malm supérieur est difficile à discerner dans les données sismiques. Son identification est encore plus malaisée lorsqu'il se trouve dans l'ombre du puissant réflecteur Base du «Cénozoïque» et que la lithologie varie dans les niveaux sus-jacents.

Toit du «Crétacé» (TKre)

Des sédiments crétacés n'apparaissent dans l'aire modélisée qu'à l'ouest d'une ligne Bienne-Thoune (fig. 2-3). La base du «Cénozoïque» étant érosive, il n'existe pas d'horizon Toit du «Crétacé» à proprement parler dans l'aire modélisée. Là où il y a des sédiments crétacés, l'horizon Toit du «Crétacé» correspond donc à l'horizon modélisé Base du «Cénozoïque». Pour délimiter l'horizon Toit du «Crétacé», la limite d'érosion a été établie à l'aide de données de forages et d'interprétations sismiques, en interprétant les limites inférieure et supérieure des sédiments crétacés (BKän et TUMa).

3.3 Paléogène - Néogène

Base du «Cénozoïque» (BKän)

L'horizon modélisé Base du «Cénozoïque» correspond à la surface d'érosion karstifiée située entre les derniers sédiments mésozoïques et la base des sédiments cénozoïques. Sa modélisation est basée sur des informations sismiques, des données de forages, ainsi que des cartes et des profils géologiques pour le relier aux lignes d'affleurement dans la bordure nord du bassin molassique.

L'empreinte sismique de l'horizon marqueur Base du «Cénozoïque» consiste généralement en une bande caractéristique ou un groupe de réflecteurs de polarités différentes. Des variations latérales sont imputables à la karstification de la surface d'érosion de la base du «Cénozoïque» (ROTH et al. 2010). La présence d'*onlaps* locaux (SOMMARUGA et al. 2012) sur le Malm supérieur constitue également un indice clair des premiers épandages cénozoïques sur les sédiments mésozoïques.

Toit de la Molasse marine inférieure (TUMM)

L'horizon Toit de la Molasse marine inférieure a été modélisé à partir de données de forages, et d'interprétations sismiques quand c'était possible. Il a été construit dans une position subparallèle à l'horizon Base du «Cénozoïque», avec une légère augmentation d'épaisseur en direction du sud-est.

L'horizon Toit de l'UMM n'existe pas dans le sous-modèle Genève. Dans le sous-modèle Vaud, il a été modélisé à partir de l'interprétation de trois sections sismiques et de forages de profondeur moyenne. Le sous-modèle Fribourg comprend un modèle conceptuel de l'horizon Toit de l'UMM dont la limite nord d'orientation NE-SW est parallèle au bassin molassique et se biseaute au nord des forages Romans-1, Sorens-1, Savigny-1, Thun-1 et Linden-1. Dans les autres sous-modèles situés plus à l'est, il n'a pas été possible de modéliser l'horizon Toit de l'UMM faute de données de base.

Toit de la Molasse d'eau douce inférieure (TUSM)

Dans la bordure sud du bassin molassique suisse, l'horizon Toit de la Molasse d'eau douce inférieure correspond au toit de l'USM-II et non de l'USM-III (BERGER et al. 2010). L'USM-III a été modélisée comme étant un équivalent terrestre à l'intérieur de l'OMM. Le toit non érodé de l'USM a été modélisé à partir de données de forages, d'interprétations sismiques, de cartes géologiques et de profils géologiques.

Dans les sous-modèles Berne et Service géologique national, l'horizon Toit de l'USM a été interprété à partir de données sismiques. Dans la partie ouest du bassin molassique, l'USM a été parfois érodée et le toit du rocher correspond, là où l'USM affleure, à l'horizon érodé modélisé Toit de l'USM (fig. 2-4).

Toit de la Molasse marine supérieure (TOMM)

Là où la Molasse marine supérieure (OMM) affleure (fig. 2-4), le toit du rocher correspond à l'horizon érodé modélisé Toit de l'OMM. En bordure sud du bassin molassique, l'horizon Toit de l'OMM correspond à l'équivalent terrestre de l'OMM (= USM-III et parties de l'OSM-I, BERGER et al. 2010), car il a été renoncé à modéliser en trois dimensions les lithofaciès des unités concernées et par conséquent des dépôts de molasse. L'horizon Toit de l'OMM a été modélisé à partir de données de forages, d'interprétations sismiques, de cartes géologiques et de profils géologiques. Dans la partie orientale de l'aire modélisée, un réflecteur sismique double continu a été cartographié comme étant le toit de l'OMM.

Toit de la Molasse d'eau douce supérieure (TOSM)

Là où la Molasse d'eau douce supérieure est encore préservée (fig. 2-4), le toit du rocher correspond à l'horizon érodé modélisé Toit de l'OSM.

Toit du rocher (TFels)

Le plus élevé des horizons continus modélisés dans le cadre du projet GeoMol est le toit du rocher. Il correspond à la base des roches meubles, et à la surface topographique lorsque le rocher affleure. Le toit du rocher a été modélisé à partir de données de forages, de cartes des isohypses, de modèles du rocher et de cartes géologiques.

4. Données de base

Dans le cadre du projet GeoMol, toutes les données de base ont été saisies dans le système de coordonnées CH1903+ (MN95). Les données originales exprimées selon le système de coordonnées CH1903 (MN03) ont fait l'objet d'une transformation simple (E + 2 000 000, N + 1 000 000) (SWISSTOPO 2006).

Pour assurer la collaboration transfrontière avec les partenaires internationaux du projet GeoMol-UE, les échanges de données et les modélisations ont nécessité des conversions de coordonnées entre les différents systèmes en vigueur dans les pays concernés. Elles ont été effectuées soit sous ArcGIS (méthode Projeter), soit avec le logiciel KoordTrans (KARICH 2010), qui permet de transformer des objets GoCAD (GEO MOL TEAM 2015).

4.1 Cartes d'ensemble des données

Pour chaque horizon modélisé dans GeoMol17, les données de base disponibles ont été regroupées dans une carte d'ensemble. Cette carte indique d'une manière générale la localisation et le type des données existantes. L'idée consiste à présenter les données de base disponibles pour chaque horizon et à indiquer tous les types de données (profils géologiques, sections sismiques, forages) à l'aide desquelles cet horizon a fait l'objet d'une interprétation (fig. 4-1). Comme les cartes d'ensemble des données montrent où et à l'aide de quelles données les horizons ont été modélisés, elles peuvent servir à l'utilisateur pour retracer la construction du modèle GeoMol17. Elles témoignent ainsi de la fiabilité de GeoMol17 sans qu'il ne faille recourir à un modèle des incertitudes (chap. 7.2). Elles permettent aussi de vérifier si les données utilisées sont concordantes. Cette approche indique également les lacunes affectant les données de base qui ont obligé de procéder à des extrapolations.

Il a été renoncé volontairement à restituer cartographiquement la densité des données obtenues par interpolation, car cela occulterait les données existantes et empêcherait de tirer des conclusions à leur sujet.

Aucune représentation équivalente concernant GeoMol15 n'a été insérée dans ce rapport, car les données en question sont accessibles sur le site web du projet GeoMol-UE (chap. 9).

La figure 4-1 présente la carte d'ensemble des données concernant l'horizon Toit du Dogger. Elle indique les profils géologiques (chap. 4.3), les données de forages (chap. 4.4) et les données sismiques (chap. 4.5 et 4.6) disponibles. Elle précise également si ces données ont fait l'objet d'une interpré-

tation concernant l'horizon considéré. Les cartes d'ensemble des données portant sur tous les horizons modélisés sont disponibles sur le support de données annexé.

4.2 Cartes géologiques et tectoniques

4.2.1 Vue d'ensemble des données disponibles

La géologie et la tectonique du bassin molassique suisse sont décrites par de nombreuses cartes à diverses échelles et de qualité variable. La modélisation dans GeoMol s'est principalement fondée sur les cartes de l'Atlas géologique de la Suisse au 1:25 000 (AG25), accompagnées de leurs notices explicatives, et sur les jeux de données vectorielles GeoCover à la même échelle. Les diverses cartes de l'AG25 et données GeoCover n'ont pas toutes le même âge et elles émanent de différents auteurs. Chaque document reflète ainsi l'état des connaissances au sujet des unités stratigraphiques et tectoniques au moment de sa parution. Cela signifie que les limites lithologiques et les unités lithostratigraphiques n'ont pas été cartographiées de la même manière dans les diverses feuilles tout au long de l'établissement de l'AG25 (de 1930 à nos jours) et que le contenu de deux feuilles voisines ne coïncide pas forcément à leur jonction.

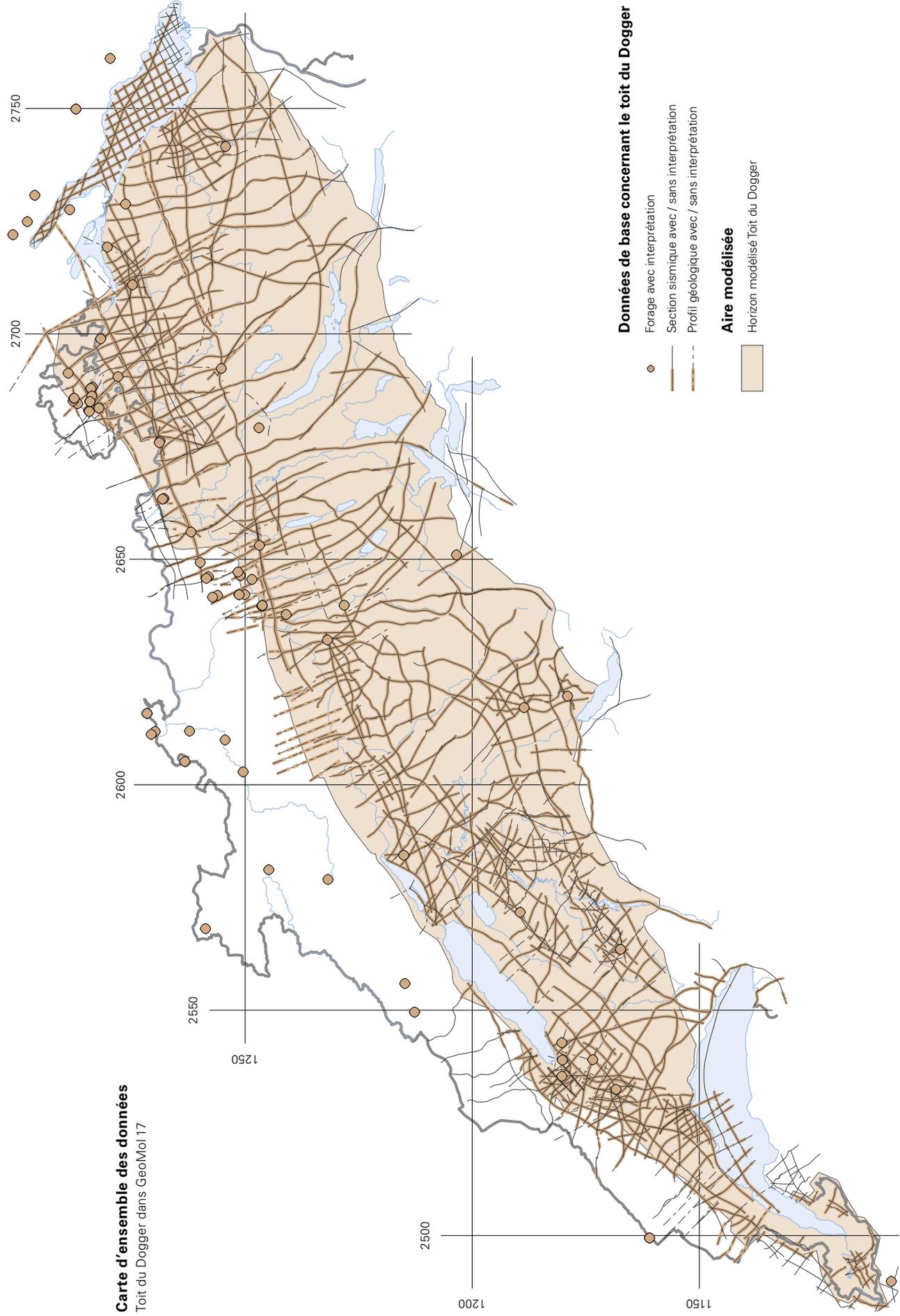
Les données cartographiques utilisées pour établir le modèle GeoMol17 sont listées dans le tableau 4-1.

4.2.2 Traitement des données

Carte harmonisée de la molasse

Une carte harmonisée de la molasse (fig. 2-4) a été dressée pour élaborer le modèle 3D du fait que les cartes de l'AG25 et les données GeoCover n'avaient fait l'objet d'aucune harmonisation géométrique en bordure des feuilles avant le début du projet GeoMol et que les subdivisions lithostratigraphiques n'avaient pas toujours été les mêmes au fil des années de parution.

Ces travaux de compilation et d'harmonisation ont principalement fait appel aux esquisses tectoniques au 1:200 000 liées à l'AG25. Comme les cartes contiguës se recouvrent partiellement, ce sont les plus récentes qui ont servi à fixer les contours géologiques. La carte géologique au 1:500 000 (CG500) et la carte géologique spéciale «Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps» au 1:100 000 (CGS128) ont aussi été utilisées là où il n'existait encore aucune feuille de l'AG25 – ni esquisse tectonique associée. Une fois cette compilation achevée, les contours ont été vérifiés en les confrontant à l'AG25 et aux données GeoCover. On s'est



Carte d'ensemble des données
Toit du Dogger dans GeoMol 17

Fig. 4-1: Carte d'ensemble des données concernant l'horizon Toit du Dogger, avec indication des données et des interprétations existantes.

Tab. 4-1: *Données cartographiques utilisées pour établir le modèle GeoMol17.*

Données cartographiques	But des données utilisées
Atlas géologique de la Suisse au 1:25 000 (AG25), y compris cartes structurales et d'ensemble des notices explicatives, et jeux de données vectorielles GeoCover	Carte harmonisée de la molasse, carte structurale harmonisée, toit du rocher, GeoMol 17
Esquisses tectoniques au 1:200 000 liées à l'AG25	Carte harmonisée de la molasse, carte structurale harmonisée
Carte géologique et carte tectonique de la Suisse au 1:500 000 (CG500)	Carte harmonisée de la molasse, carte structurale harmonisée, GeoMol 17
Cartes et esquisses géologiques et tectoniques à différentes échelles (HAUS 1937, BECK 1945, RUTSCH 1947, SCHUPPLI 1950, BLAU 1966, RIGASSI 1978, SCHLUNEGGER et al. 1993, SCHLUNEGGER 1995, MÜLLER et al. 2002, BONNET 2007, MATZENAUER 2007, 2011, LAUBSCHER 2008, MEIER 2010, MOSAR et al. 2010, ROTH et al. 2010, IBELE 2011, SOMMARUGA et al. 2012, DUPUY et al. 2014, MADRITSCH 2015, RIME 2015, VOUILLAZOZ 2015, HEUBERGER et al. 2016)	Carte structurale harmonisée, sous-modèles Vaud, Fribourg, Berne et Service géologique national
Carte géologique spéciale «Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps» au 1:100 000 (CGS 128), y compris notice explicative (PIFFNER et al. 2010, PFIFFNER 2011)	Zone triangulaire, sous-modèle Lac de Constance
Carte géologique de la France au 1:50 000, feuille Saint-Julien-en-Genevois, y compris notice explicative (DONZEAU et al. 1997a, 1997b), et feuille Annemasse, y compris notice explicative (KERRIEN et al. 1998, CHAROLLAIS et al. 1998)	Sous-modèle Genève
Synoptische tektonische Karte Top Kristallin, Beilage 6-17 (NAEF & MADRITSCH 2014)	Fossé permo-carbonifère
Geologische Übersichtskarte Baden-Württemberg, Deutschland, au 1:300 000 (GÜK300) (téléchargeable dans le visualiseur de cartes du Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, LGRB)	Sous-modèle Lac de Constance

ainsi assuré que les affleurements de molasse soient cartographiés correctement sur la carte harmonisée.

Pendant la sédimentation de la Molasse marine supérieure (OMM), le dépôt de sédiments marins était accompagné de dépôts fluviaux dans les cônes de déjection des grandes rivières alpines (p.ex. épandages du Napf, du Hörnli, du Kronberg-Gäbris et du Pfänder). Cet équivalent terrestre de l'OMM (USM-III et parties de l'OSM-I, BERGER et al. 2010) est cartographié comme OMM sur la carte harmonisée de la molasse (fig. 2-4). C'est ainsi, par exemple, que l'épandage du Hörnli entre Eschenbach (SG) et Herisau (AR), équivalent terrestre de l'OMM, a été modélisé avec cette dernière unité. Les lithofaciès n'ont pas été modélisés en 3D dans le cadre de GeoMol à cause de leur complexité, aussi les horizons de la molasse (TUSM, TOMM et TOSM) ont-ils été cartographiés et modélisés dans une optique chronostratigraphique, principalement à la bordure sud du bassin molassique. La définition des unités actuelles de la molasse peut être trouvée dans le lexique lithostratigraphique de la Suisse (www.strati.ch).

Les contours géologiques des sédiments molassiques ont été extraits de la carte harmonisée de la molasse et les lignes d'affleurement du TUSM et du TOMM ont aussi été considérées dans la modélisation de ces deux horizons. La ligne d'affleurement de la base du «Cénozoïque», qui a été intégrée dans la modélisation de cet horizon, provient également de la carte harmonisée au nord du bassin molassique.

Carte structurale harmonisée

Les compilations cartographiques des axes de plis (fig. 2-4) et des zones de failles du bassin molassique sont venues enri-

chir la carte harmonisée de la molasse. Plusieurs cartes géologiques et tectoniques provenant de diverses publications (tab. 4-1) y ont été ajoutées. Les structures ont en outre été complétées par d'autres données superficielles de swisstopo (modèle numérique de terrain swissALTI^{3D} et orthophotos).

La carte structurale harmonisée avec indication de l'emplacement des axes de plis et des zones de failles à la surface du terrain a aussi été utilisée comme base pour établir le modèle GeoMol17.

4.3 Profils géologiques

4.3.1 Vue d'ensemble des données disponibles

La plupart des notices explicatives de l'AG25 sont accompagnées de planches comprenant des profils géologiques à travers la région cartographiée. Ces profils ont surtout été utilisés pour relier les horizons aux lignes d'affleurement à la bordure nord du bassin molassique et pour modéliser les horizons de la molasse. Outre ceux de l'AG25, des profils géologiques provenant des publications suivantes ont été intégrés dans l'élaboration du modèle GeoMol17:

- profils géologiques accompagnant la carte géologique spéciale «Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps» au 1:100 000 (CGS128) pour modéliser la zone triangulaire;
- profils géologiques de LAUBSCHER (2008) pour élaborer le sous-modèle Berne;

- profils géologiques de PIETSCH & JORDAN (2014) pour élaborer le sous-modèle du Service géologique national;
- profils géologiques basés sur des sections sismiques établies par la Nagra lors de la deuxième étape du plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes» (MEIER et al. 2014) pour élaborer le sous-modèle du Service géologique national.

4.3.2 Traitement des données

Pour mener à bien le projet GeoMol, les traces des profils ont été géoréférencées sous ArcGIS et les horizons à modéliser ont été numérisés sous Move™, donc référencés selon la profondeur. Les profils obtenus ont alors été confrontés au modèle numérique de terrain swissALTI^{3D} (SWISSTOPO 2017) et leur position dans l'espace a éventuellement été corrigée. Certains profils géologiques dérivés de sections sismiques se recoupant ne coïncidaient pas à leur intersection. Il a été admis dans ce cas que l'erreur provenait de divergences dans les conversions temps-profondeurs ou de différences de qualité entre les sections sismiques exploitées.

Les profils géologiques ont surtout été utilisés à la bordure nord du bassin molassique, pour raccrocher les horizons modélisés aux lignes d'affleurement. Ils ont aussi constitué une base importante afin de modéliser les deux horizons molassiques TUSM et TOMM.

À d'autres endroits, les profils géologiques ont généralement servi de base conceptuelle grâce aux informations au sujet de l'épaisseur des couches et de l'emplacement des failles et des structures plissées qu'ils contiennent. Ils sont donc importants pour vérifier la modélisation et constituent souvent la seule base dans les régions peu couvertes par d'autres données.

4.4 Données de forages

Les données de forages représentent une source d'information fiable au sujet du sous-sol. Les forages fournissent une vue ponctuelle très précise, mais la détermination des lithofaciès et des limites lithostratigraphique qui en découle est étroitement tributaire des connaissances et de l'expérience des géologues qui y procèdent. Toutefois, la marge d'interprétation dont ils disposent lors du traitement des données de forages est généralement plus étroite que pour d'autres méthodes d'investigation.

4.4.1 Vue d'ensemble des données disponibles

Le projet GeoMol a bénéficié de données fournies par différentes entités, provenant de forages de différentes profondeurs et exécutés dans différents buts. Les données de forages suivantes ont été intégrées dans une banque de données afin d'être enregistrées d'une manière homogène:

- Forages liés à l'AG25: environ 13500 forages ont été repris à partir des feuilles de l'AG25. Les données les décrivant comprennent notamment la cote à laquelle le rocher

a été atteint et des informations au sujet des lithologies rencontrées. Sont venus s'y ajouter environ 600 forages issus des notices explicatives de l'AG25 qui ne sont pas représentés sur les cartes.

- Forages profonds stockés dans les archives du Service géologique national: plus de 1500 forages provenant de différentes investigations et rapports géologiques ont pu être repris dans les archives du SGN.
- Données provenant de forages concomitants¹ réalisés par la Société anonyme pour le pétrole suisse (SEAG) et par la Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs (Nagra). Environ 700 d'entre eux ont atteint le rocher et 220 ne l'ont pas touché, ou alors pas d'une manière indubitable.
- Données de forages provenant des cantons: la plupart des forages (surtout réalisés pour poser des sondes géothermiques ou pour procéder à des investigations géotechniques) ont été mis à disposition par les cantons. Les fonds de données cantonaux sont organisés d'une manière très variable. Ils vont des archives sur papier aux banques de données avec liens vers des fichiers PDF décrivant les forages. Selon le type d'archive ou de banque de données, les informations pertinentes ont pu être importées directement dans la banque de données du projet GeoMol, ou alors elles ont dû être scannées (profils de forages) et/ou saisies sous la forme de tableaux (limites de couches).
- Outre ces séries de données, des forages effectués par les CFF, par armasuisse et par l'Office fédéral des routes (OFROU) ont été collectés et exploités.

Le support de données annexé contient un tableau regroupant les forages profonds utilisés pour établir le modèle GeoMol17 en plus des cartes d'ensemble des données, en indiquant les données de forages utilisées avec ou sans interprétation pour chaque horizon.

4.4.2 Traitement des données

Les données de forages disponibles sur papier ont été scannées et importées dans la banque de données dédiée aux forages sous une forme homogène. Ont été saisis les horizons importants pour GeoMol17 ainsi que certains autres horizons lithostratigraphiques modélisés dans les régions pilotes (chap. 3).

Les forages ont été classés selon leur qualité et ce classement a été stocké dans la banque de données les décrivant (point 7.1.2.2).

Certains forages ont fait l'objet de plus d'une interprétation des unités stratigraphiques. Dans ce cas, soit une des interprétations a été privilégiée, soit le forage a été réinterprété, soit il n'a pas été exploité.

¹ Des forages concomitants sont réalisés dans le cadre de campagnes sismiques. Les vitesses sismiques dans les roches meubles sont déterminées au moyen de géophones placés dans les puits de forages. Les roches meubles «lentes» sont susceptibles de déformer l'image sismique du sous-sol profond, aussi doivent-elles être prises en considération dans le traitement des données sismiques.

Sections sismiques

GeoMol 17

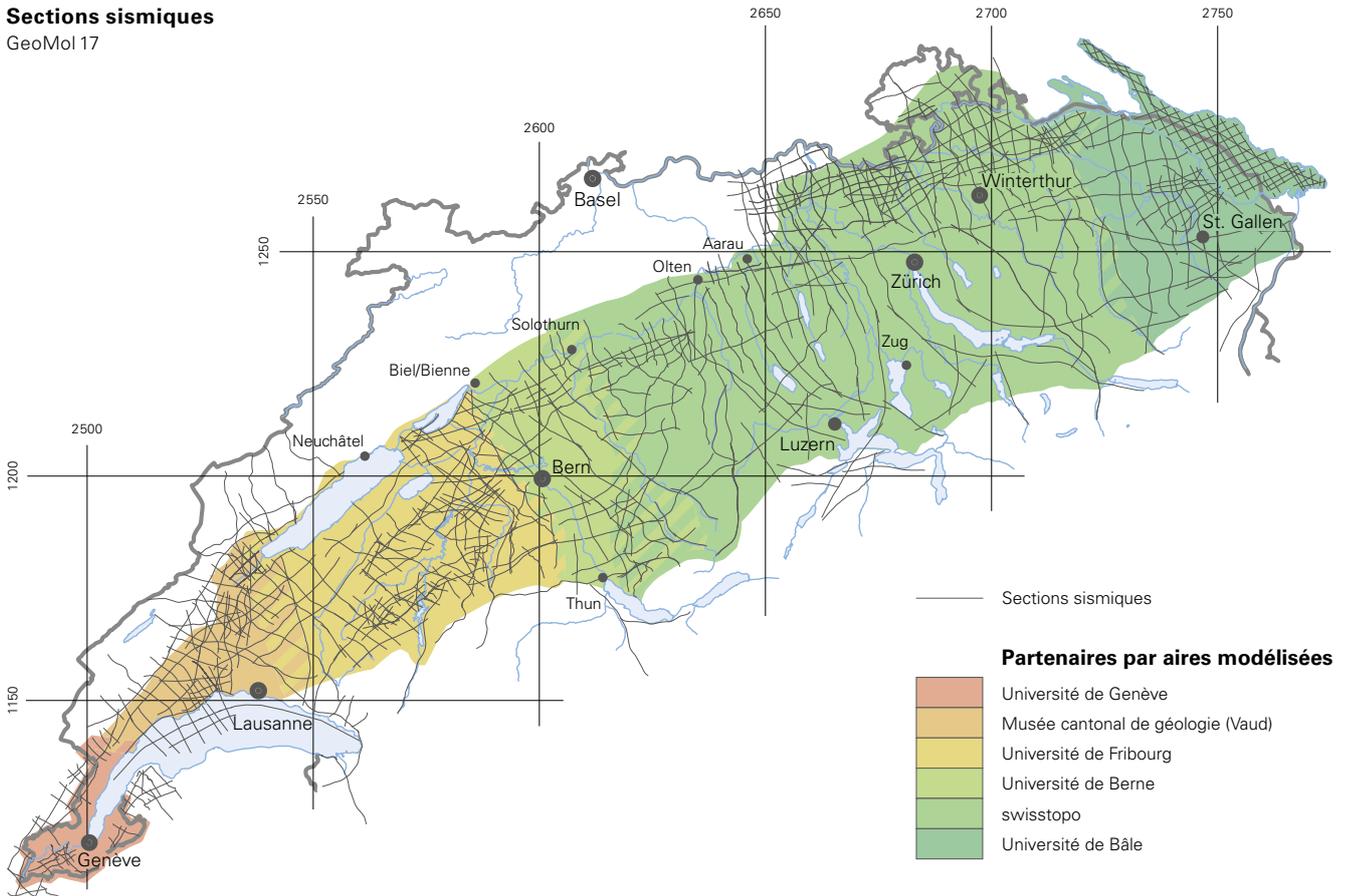


Fig. 4-2: Vue d'ensemble des sections sismiques 2D mises à la disposition du projet GeoMol Suisse.

4.5 Sections sismiques

La plupart des données sismiques bidimensionnelles utilisées proviennent de la prospection d'hydrocarbures qui s'est déroulée entre les années 1960 et 1990. Des sections sismiques datant de 2010 et 2014 ont été interprétées en plus pour élaborer le sous-modèle Genève. Font exception les données sismiques concernant le Jura oriental et le Plateau molassique contigu, acquises par la Nagra en 2011–2012 lors de la deuxième étape du plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes» (SGT, NAGRA 2014). Ces sections et leurs interprétations déjà converties en profondeurs ont été mises à la disposition du projet. Les sections interprétées ont ainsi pu être utilisées comme des profils géologiques (point 4.3.1).

De nombreuses sections sismiques relevées sur le Plateau suisse ont changé de main au cours des années et ont parfois été retraitées par leurs nouveaux détenteurs. On n'a souvent pas pu déterminer très clairement à quel retraitement les données utilisées par le projet GeoMol, stockées au format SEG-Y², avaient été soumises, ni si des sections sur papier et des fichiers SEG-Y portant le même nom résultaient de traitements similaires. Outre les changements de propriétaires et les différents usages de cette documentation, certaines sections sismiques ont été renommées au fil du temps.

² Format standard de stockage de données géophysiques numériques, développé par la Society of Exploration Geophysicists (SEG).

4.5.1 Vue d'ensemble des données disponibles

La figure 4-2 présente une vue d'ensemble des sections sismiques mises à la disposition du projet. Le support de données annexé comprend en outre les cartes d'ensemble des données avec l'emplacement des sections sismiques et une indication concernant leur interprétation horizon par horizon (chap. 4.1). Un tableau synthétisant les sections sismiques utilisées pour GeoMol 17 y est également stocké.

4.5.2 Traitement des données

La plupart des sections sismiques exploitées ont pu être reprises directement au format SEG-Y auprès de leurs fournisseurs. Certaines anciennes sections n'existaient cependant que sous la forme de graphiques sur papier scannés, aussi a-t-il d'abord fallu les vectoriser. La vectorisation des sections sismiques pour en tirer des fichiers SEG-Y et l'assignation de la géométrie des lignes sismiques correspondantes ont été confiées à une société spécialisée. Au cours de cette étape, les données sismiques ont été traitées d'une manière plus poussée, en plus d'être vectorisées, en optimisant le rapport signal/bruit ou en faisant migrer des sections sommées (stackées).

Les fichiers SEG-Y déjà disponibles ne comprenaient pas toujours la géométrie des lignes. En outre, on ne savait parfois pas exactement si les coordonnées décrivaient des

points de tir (SP), des points milieux communs (CMP), des points de profondeur communs (CDP) ou des points de réception (GRP). Une carte de base incluant les coordonnées et la géométrie des lignes sismiques a été établie sur un fond topographique pour clarifier la question des coordonnées. Cette représentation a permis d'identifier les SP, les CDP et les GRP en fonction de la position des coordonnées et de vérifier la plausibilité de ces coordonnées. (La plupart des levés sismiques ont été obtenus en utilisant des véhicules vibrateurs comme source d'énergie principale, si bien que les points de tir suivent généralement le tracé de routes ou de chemins).

Une fois les coordonnées converties au format CH1903+ (MN95), les fichiers SEG Y ont été chargés dans un système d'interprétation des données et les décalages totaux mentionnés dans ROTH et al. (2010) et MEIER (2010) ont été utilisés pour diminuer les écarts au niveau des croisements des sections (*misties*, point 5.3.3). Comme les interprétations des données sismiques de la Nagra provenant de la première étape du plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes» (ROTH et al. 2010, MEIER 2010) ont servi de base au modèle GeoMol17, le plan de référence sismique situé à 500 m d'altitude a aussi été utilisé.

4.5.3 Campagne sismique du lac de Constance

swisstopo a fait vectoriser les versions scannées des sections sismiques sur papier relevées dans le cadre de la campagne sismique du lac de Constance, mises à disposition par le Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) du Bade-Wurtemberg. Cette campagne avait été menée à bien par l'entreprise Prakla-Seismos durant l'hiver 1980–1981, sur mandat de l'ancienne BEB Gewerkschaften Brigitta und Elwerath Betriebsführungsgesellschaft mbH et des sociétés Deutsche BP AG, Deutsche Schachtbau- und Tiefbohr-gesellschaft mbH, Preussag AG, SEAG, Vorarlberger Erdöl und Ferngas GmbH et Wintershall AG (SCHULZ et al. 1982). Chacune des 49 sections sismiques fournies existait en trois versions:

- sommée (stackée) sans correction;
- sommée (stackée) avec correction statique et sans filtre de cohérence;
- sommée (stackée) avec correction statique et avec filtre de cohérence.

Pour le projet GeoMol-UE, il était important de disposer d'un bon socle de données afin de pouvoir relier les modèles allemand, autrichien et suisse dans la région du lac de Constance.

La qualité des résultats de la campagne sismique du lac de Constance est très variable. Une cause pourrait en être les épaisseurs parfois considérables de sédiments quaternaires peu triés déposés en amont du delta du Rhin (SCHULZ et al. 1982, SCHOOP & WEGENER 1984). On ne peut guère mettre de réflecteurs en évidence à ses alentours. On n'y perçoit que des signaux indésirables (multiples) – imputables aux réflexions entre des limites de couches ou, plus précisément dans ce cas, entre le fond du lac et la surface de l'eau – qui couvrent les signaux désirés. Au large du delta,

d'épais dépôts quaternaires, induisant des vitesses sismiques faibles, déforment l'image sismique. C'est ainsi que les réflecteurs mésozoïques s'incurvent sous un chenal entaillant le fond du lac, parallèlement à ce chenal. Ils sont en revanche plus ou moins plats dans les versions corrigées statiquement, mais alors le remplissage du chenal s'incurve vers le haut et donne l'impression erronée d'un relief. Une autre difficulté a consisté à relier la sismique du lac de Constance à la sismique terrestre de la Suisse. Comme pour la sismique terrestre, les sections sismiques du lac ont été décalées selon l'axe temporel pour diminuer les écarts au niveau des croisements des sections. La campagne du lac de Constance a été rattachée à la sismique terrestre sur la rive nord-ouest, à proximité de Kreuzlingen. Mais il s'est alors avéré que les réflecteurs détectés sous le lac étaient situés de plus en plus haut en direction du sud-est par rapport à leurs homologues détectés par la sismique terrestre. La raison n'a pas pu être entièrement élucidée, mais elle devrait avoir un rapport avec les corrections statiques appliquées aux données sismiques du lac de Constance pour compenser les faibles vitesses dans la tranche d'eau et dans les roches meubles.

4.6 Interprétations sismiques

Le modèle GeoMol15 a exploité les interprétations des transects selon SOMMARUGA et al. (2012), lesquelles étaient basées sur des sections sismiques relevées lors de la prospection d'hydrocarbures (chap. 4.5). Dans le cadre du modèle GeoMol17, il a été possible d'augmenter la densité des sections sismiques utilisées par rapport à GeoMol15. Sont venues s'y ajouter les sections de la Nagra déjà converties en profondeurs provenant de la deuxième étape du plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes» (SGT), les sections relevées dans le lac de Constance et quelques autres provenant des Préalpes et du Plateau. La réinterprétation de certaines sections sismiques a permis d'améliorer parfois les connaissances au sujet de la géologie de la région concernée. On a par exemple pu, dans le cas de la campagne sismique du lac de Constance, cartographier les horizons marqueurs du Mésozoïque et quelques failles malgré les difficultés signalées au point 4.5.3. Le tableau 4-2 fournit une vue d'ensemble des horizons interprétés dans les données sismiques dans le cadre de GeoMol.

4.6.1 Vue d'ensemble des données disponibles

Au cours de ses travaux, l'équipe en charge du projet GeoMol a pu accéder aux principales interprétations sismiques publiées à l'échelle du bassin molassique du Plateau suisse (NAEF et al. 1995, ROTH et al. 2010, MEIER 2010, SOMMARUGA et al. 2012, MADRITSCH et al. 2013). L'interprétation des horizons (tab. 4-2) est très similaire sur de grandes distances dans toutes les interprétations ou ne s'écarte que de quelques réflecteurs. Comme les interprétations ont été étalonnées à l'aide de forages et qu'elles sont parallèles aux réflecteurs, la géométrie des horizons interprétés présente peu de divergences. La comparaison entre les interprétations fait

surtout ressortir des différences au niveau des failles. On admet généralement la présence de failles là où des groupes de réflecteurs continus se terminent latéralement et sont interrompus ou décalés verticalement. Mais on ne voit pas toujours très bien si, et dans quelle mesure, ces interruptions sont causées par des failles. Les interruptions des réflecteurs peuvent aussi être dues à une qualité médiocre des données ou être imputables à leur traitement.

L'interprétation de lignes voisines, et partant l'élaboration d'une vue d'ensemble à l'échelle régionale, fournit des indications supplémentaires au sujet de l'existence et de la position possible d'un système de failles. L'interprétation des failles laisse souvent entrevoir l'expérience subjective des opérateurs et les modèles tectoniques conceptuels retenus (point 7.2.2). Si GeoMol 15 s'est fondé sur l'interprétation de SOMMARUGA et al. (2012), GeoMol 17 a exploité les interprétations de ROTH et al. (2010) et de MEIER (2010). Il n'existait auparavant aucune interprétation numérique des données sismiques du lac de Constance.

Outre les cartes d'ensemble des données, qui représentent les sections sismiques interprétées ou non horizon par horizon, le support de données annexé comprend un tableau qui regroupe les sections sismiques utilisées pour établir le modèle GeoMol 17.

4.6.2 Traitement des données

Pour des raisons techniques, le logiciel Seisvision n'a pu être utilisé que pour les interprétations de la Nagra (ROTH et al. 2010, MEIER 2010), pour les charger directement et les réutiliser ou pour s'en servir afin de traiter des sections chargées en plus mais non encore interprétées. Le logiciel d'interprétation Kingdom Suite a en outre été mis en œuvre pour charger les interprétations de SOMMARUGA et al. 2012, car il offre la possibilité d'importer des horizons rastérisés en temps et d'extraire des interprétations d'horizons à partir de coupes entre surfaces géologique et géométries de lignes. Les étapes nécessaires de contrôle de la qualité et de traitement des données lors du chargement des sections sismiques ont été décrites au point 4.5.2.

4.6.3 Nouvelles interprétations

Dans le cadre du projet GeoMol 17, les interprétations de la Nagra (ROTH et al. 2010, MEIER 2010) et de l'Atlas sismique du bassin molassique suisse (SASMB, SOMMARUGA et al. 2012) ont servi de base pour établir la plupart des sous-modèles (fig. 4-2), après avoir été partiellement complétées et refaites pour obtenir des données de base homogènes.

Tab. 4-2: *Horizons interprétés à partir des données sismiques et désignation des horizons marqueurs selon la sismique, retenus dans GeoMol, en regard de travaux exécutés antérieurement dans le bassin molassique suisse.*

Projet GeoMol		Nagra	NTB 94-14 NAEF et al. (1995)	NAB 10-39 ROTH et al. (2010)	NAB 10-40 MEIER et al. (2010)	NAB 13-10 MADRITSCH et al. (2013)	SASMB SOMMARUGA et al. (2012)	
Toit de l'OMM	TOMM	Basis OSM	BOS	BOS				
Toit de l'USM	TUSM	Basis OMM	BOM	BOM				
Toit de l'UMM	TUMM							
Base du «Cénozoïque»	BKän	Basis Tertiär / Top Malm	BTe	BTe	BTe	BTe	Near Base Tertiary	NBTer
Toit du Malm supérieur	TUMa						Near Top late Malm	NTIMa
		Basis «Kimméridgien»	BKi					
Toit du Malm inférieur	TLMa						Intra Early Malm	leMa
Toit du Dogger	TDo	Basis Malm / Top Dogger	BMa	BMa	BMa	BMa	Near Top Dogger	NTDo
		«Unterer Dogger»	UDo					
		Top Opalinus-Ton	TOp					
Toit du Lias	TLi	Top Lias / Basis Opalinus-Ton	TLi	TLi	TLi	TLi	Near Top Liassic	NTLi
Toit du Keuper	TKeu						Near Top Triassic	NTTr
Toit du Muschelkalk	TMus	Basis Keuper / Top Muschelkalk	TMk	TMk	TMk	TMk	Near Top Muschelkalk	NTMuka
Base du «Mésozoïque»	BMes	Basis Mesozoikum	BMz	BMz	BMz	BMz	Near Base Mesozoic	NBMes

Sous-modèle Genève: toutes les sections utilisées pour établir ce sous-modèle ont été entièrement réinterprétées.

Sous-modèle Vaud: toutes les sections utilisées pour établir ce sous-modèle ont été entièrement réinterprétées. Les interprétations existantes (MEIER 2010, SOMMARUGA et al. 2012) ont été chargées dans le logiciel Kingdom Suite et comparées avec les nouvelles.

Sous-modèle Fribourg: ce sous-modèle est basé sur l'interprétation de SOMMARUGA et al. (2012). 59 sections non interprétées levées dans l'aire modélisée ont été utilisées pour étendre l'interprétation de SOMMARUGA et al. (2012) et pour densifier les données, en particulier dans la partie centrale et orientale de l'aire modélisée.

Sous-modèle Berne: ce sous-modèle est basé sur l'interprétation de la Nagra (ROTH et al. 2010, MEIER 2010). D'autres sections non interprétées ont été rattachées au réseau existant de sections interprétées puis interprétées à leur tour. C'est en particulier le cas dans la partie sud de l'aire modélisée, qui ne faisait l'objet d'aucune interprétation de la Nagra. Les nouvelles interprétations ont imposé de modifier localement celle de la Nagra. Les interprétations des transects ont été reconstituées dans le logiciel Kingdom Suite, à partir de SOMMARUGA et al. (2012), dans un but de comparaison.

Sous-modèle Service géologique national: quelques sections non interprétées ont été ajoutées au jeu de données et l'interprétation existante a été complétée ou modifiée à partir de l'interprétation de la Nagra (ROTH et al. 2010, MEIER 2010). Les horizons TLMa et TKeu ont été réinterprétés, tandis que les horizons TOMM et TUSM ont été interprétés à partir de cartes géologiques pour fournir des sections sismiques le long des Alpes.

Sous-modèle Lac de Constance: de nouvelles sections ont été interprétées et l'interprétation existante a été complétée ou modifiée à partir de l'interprétation de la Nagra (ROTH et al. 2010, MEIER 2010). Les données sismiques du lac de Constance ont été entièrement réinterprétées (point 4.5.3).

4.7 Cartes et modèles du toit du rocher

4.7.1 Vue d'ensemble des données disponibles

Des données existantes obtenues auprès de tiers, telles que cartes des isohypses du rocher ou modèles du toit du rocher, ont été directement intégrées dans la modélisation du toit du rocher dans GeoMol17, puis adaptées en fonction des données de forages disponibles. La modélisation du toit du rocher dans GeoMol17 résulte donc d'une compilation de différents modèles de cet horizon. Les lacunes restantes ont fait l'objet d'interpolations et d'adaptations manuelles lors de la modélisation.

Les cartes et les modèles du toit du rocher disponibles en Suisse ont une qualité variable. Ils diffèrent par la densité des données exploitées, par leur échelle, par la taille du périmètre d'investigation retenu et par la méthode de modélisation appliquée.

Les modèles du toit du rocher utilisés pour modéliser cette surface dans GeoMol17 sont représentés dans la figure 4-3 et synthétisés dans le tableau 4-3. Outre les quatre

modèles suprarégionaux (JORDAN 2007, 2010, FIORE 2007, SCHÄLLI 2012, DÜRST STUCKI & SCHLUNEGGER 2013, PIETSCH & JORDAN 2014), des modèles cantonaux (Genève, Vaud, Soleure), des cartes de l'AG25 (feuilles Aarau, Baden, Balsthal, Murgenthal, Romanshorn, Schöftland, Uster, Winterthur, Zürich), des cartes régionales du nord de la Suisse (GRAF 2009) et des cartes portant sur des grandes vallées alpines basées sur la gravimétrie (KLINGELÉ 2012) ont été mis à contribution. Ces modèles et ces cartes des isohypses du toit du rocher ont été intégrés dans la modélisation du toit du rocher dans GeoMol17 (point 5.3.5.1).

Modèle Nagra du nord-est de la Suisse

Le modèle du toit du rocher élaboré pour la Nagra (JORDAN 2007, 2010, PIETSCH & JORDAN 2014) couvre l'ensemble du nord-est de la Suisse. Le toit du rocher ou base du «Quaternaire» y a été numérisé à la main sous ArcGIS, à partir de cartes, données de forages, rapports et investigations sismiques existantes, puis il a été interpolé pour donner une grille de largeur de maille égale à 25 m. La première version du modèle a été achevée en 2008 et une grande partie a été remaniée et adaptée en fonction des données et des recherches les plus récentes en 2013.

Modèle Dürst Stucki

Le modèle du toit du rocher de DÜRST STUCKI & SCHLUNEGGER (2013) couvre l'ensemble du territoire du canton de Berne. Le toit du rocher y a été élaboré par une construction à la main sous ArcGIS, à partir d'environ 40000 forages, puis il a été converti pour donner une grille de largeur de maille égale à 25 m. La banque de données de forages a été exploitée selon son état en 2013.

Modèle Fiore

Le modèle du toit du rocher de FIORE (2007) combine plusieurs cartes des isohypses ainsi que des données obtenues par sismique réflexion et par géoélectricité (PUGIN 1988, MEYER 2000, DUPUY 2005). Ce modèle couvre de grandes parties de la Suisse occidentale. La grille a une largeur de maille égale à 50 m.

Modèle Schälli

Le modèle du toit du rocher de SCHÄLLI (2012) représente le toit du rocher dans la vallée de la Seez et dans la vallée inférieure du Rhin selon une grille de largeur de maille égale à 25 m. Il inclut également quelques cartes existantes de la topographie du toit du rocher (WILDI 1984, GRÜNENFELDER 1989, MÜLLER 1995, PFIFFNER et al. 1997, OBERHAUSER 1998, BENZ 2003, KLINGELÉ 2009, BERNASCONI 2011). Il a été élaboré en appliquant la même méthode que le modèle Nagra du nord-est de la Suisse et que le modèle Dürst Stucki.

Cartes des isohypses du rocher de Graf

Les cinq cartes régionales des isohypses du rocher Thurtal–Rafzerfeld, Rafzerfeld–Rheintal, Birrfeld–Habsburg–Rinikerfeld, Ruckfeld–Surbtal et Aaremündung de

Carte d'ensemble des données

Toit du rocher

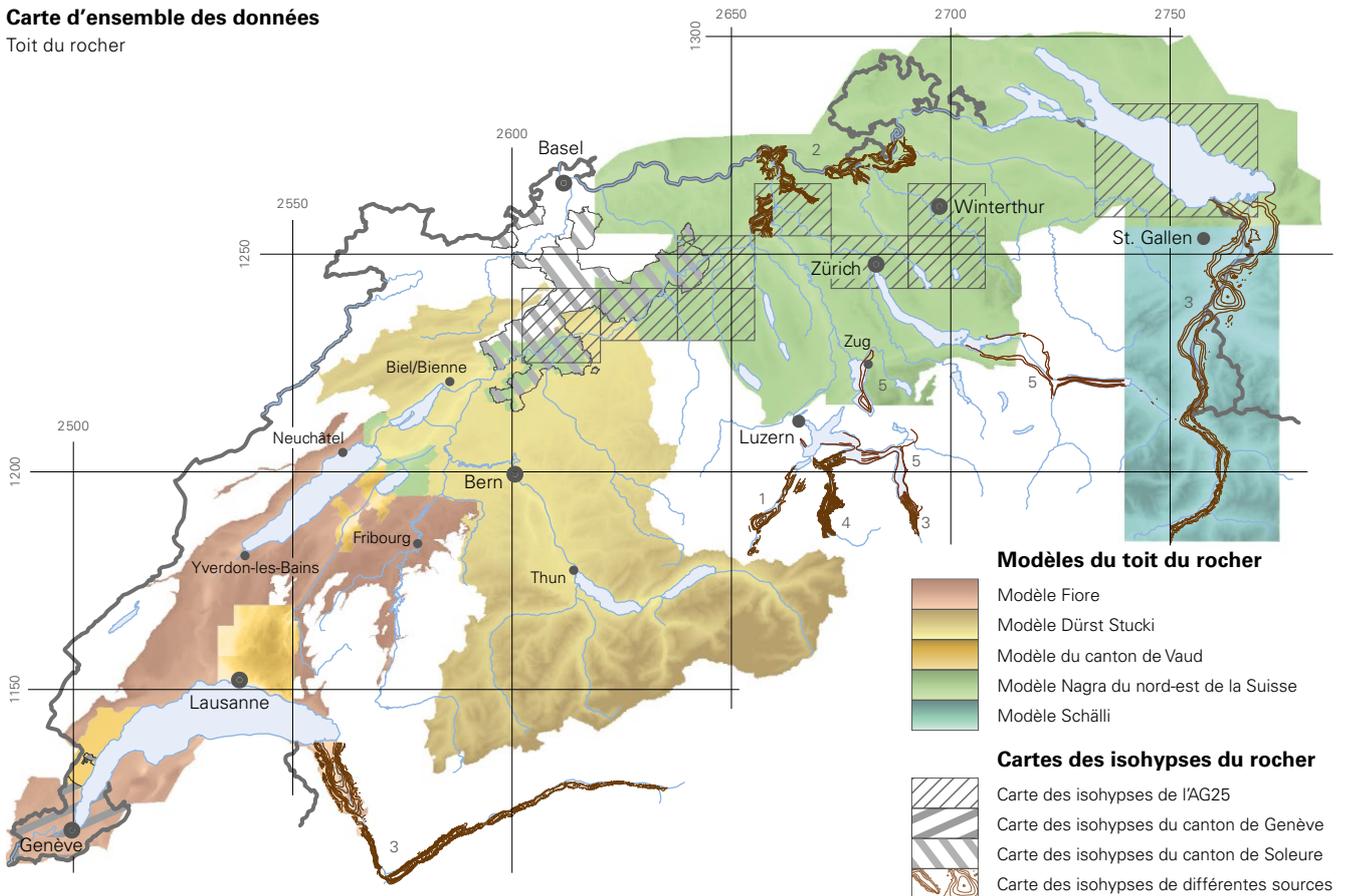


Fig. 4-3: Modèles du toit du rocher et cartes des isohypses du toit du rocher existants en Suisse qui ont été utilisés pour établir et valider le modèle du toit du rocher selon GeoMol17 (tab. 4.3). Les cartes des isohypses du rocher, provenant de diverses sources, sont numérotées (1: BODMER et al. 1996, 2: GRAF 2009, 3: KLINGELÉ 2012, 4: LINIGER et al. 2014, 5: WILDI 1984).

GRAF (2009) présentent une équidistance de 10 m. Elles sont fondées sur des forages, des affleurements, des profils, des cartes existantes et des expertises.

Carte des isohypses du rocher au Wellenberg de la Nagra

La carte des isohypses du rocher de la Nagra (LINIGER et al. 2014) couvre la région de Buochs, Wolfenschiessen et Engelberg, dans le canton de Nidwald. Elle est basée sur des forages, sur des isohypses du rocher provenant d'investigations géologiques effectuées dans le cadre de la construction de la rampe raide de la voie ferrée Lucerne–Stans–Engelberg (Dr. T.R. Schneider AG) et sur des données collectées par l'industrie des hydrocarbures (BODMER et al. 1996).

Carte des isohypses du rocher de Bodmer

Dans le cadre de la recherche de gisements de gaz profonds, le Tiefengas Konsortium (TGK) a effectué des mesures par gravimétrie, sismique réflexion et sismique réfraction en Suisse centrale. BODMER et al. (1996) se sont fondés sur ces données ainsi que sur d'autres études et forages pour établir une carte des isohypses du rocher dans les vallées principales des cantons d'Obwald, de Nidwald et d'Uri.

Carte des isohypses du rocher de Wildi

WILDI (1984) a établi une carte des isohypses du rocher décrivant la topographie du toit du rocher sous le remplissage quaternaire de vallées du nord et de l'est de la Suisse. Cette carte montre que de nombreuses vallées du Plateau et des Alpes ont été profondément creusées sous l'effet de l'érosion glaciaire.

Carte des isohypses du rocher de Klingelé

Le modèle de l'épaisseur des roches meubles de KLINGELÉ (2012), basé sur des investigations gravimétriques, couvre les grandes vallées alpines et le Jura. Le contraste de densité entre la roche meuble et la roche consolidée, plus ancienne et plus profonde, permet de déterminer l'épaisseur des roches meubles et ainsi la position du toit du rocher.

La carte des épaisseurs du quaternaire dérivée d'investigations gravimétriques sert de base à la modélisation dans les grandes vallées alpines et elle a joué un rôle important pour établir une première représentation approximative de la topographie du toit du rocher.

Tab. 4-3: Modèles existants du toit du rocher en Suisse qui ont été utilisés pour modéliser le toit du rocher dans GeoMol17.

Modèle	Publication	Région	Résolution	Données de base
Modèle Nagra du nord-est de la Suisse	JORDAN (2007, 2010), PIETSCH & JORDAN (2014)	Modèle du toit du rocher dans le nord-est de la Suisse	Largeur des mailles de la grille: 25 m	Cartes existantes, données de forages, rapports et investigations sismiques
Modèle Dürst Stucki	DÜRST STUCKI & SCHLUNEGGER (2013)	Modèle du toit du rocher dans le canton de Berne	Largeur des mailles de la grille: 25 m	Banque de données de forages incluant environ 40 000 forages
Modèle Fiore	FIORE (2007)	Modèle du toit du rocher dans l'ensemble de la Suisse occidentale	Largeur des mailles de la grille: 50 m	Cartes des isohypses, données obtenues par sismique réflexion et par géoélectricité
Modèle Schälli	SCHÄLLI (2012)	Modèle du toit du rocher dans la vallée de la Seez et la vallée du Rhin	Largeur des mailles de la grille: 25 m	Cartes existantes de la topographie du toit du rocher et données de forages
Carte des isohypses du rocher de Graf	GRAF (2009)	Cartes des isohypses du rocher Thurtal – Rafzerfeld, Rafzerfeld – Rheintal, Birrfeld – Habburg – Rinikerfeld, Ruckfeld – Surbtal et Aaremündung	Équidistance: 10 m	Forages, affleurements, profils, cartes existantes et expertises
Carte des isohypses du rocher au Wellenberg de la Nagra	LINIGER et al. (2014)	Cartes des isohypses du rocher à Buochs, Wolfenschliessen et Engelberg (NW)		Forages, isohypses du rocher et données provenant de l'industrie des hydrocarbures
Carte des isohypses du rocher de Bodmer	BODMER et al. (1996)	Modèle du toit du rocher dans les vallées principales des cantons d'Obwald, Nidwald et Uri		Mesures obtenues par gravimétrie, sismique réflexion et sismique réfraction ainsi qu'autres études et forages
Carte des isohypses du rocher de Wildi	WILDI (1984)	Cartes des isohypses du rocher dans le nord et l'est de la Suisse (vallées et lacs)	Équidistance: 50 m	Cartes existantes, données de forages, données sismiques et gravimétriques
Carte des isohypses du rocher de Klingelä	KLINGELE (2012)	Épaisseur des roches meubles dans les grandes vallées alpines et dans le Jura		Contrastes de densité entre la roche meuble et la roche consolidée, plus ancienne et plus profonde
Modèles cantonaux (GE, VD, SO)		GE: carte des isohypses du rocher dans le canton de Genève VD: sept modèles régionaux du toit du rocher SO: carte des isohypses du rocher couvrant la partie du canton située dans le bassin molassique		
Carte des isohypses du rocher de l'AG25	Aarau: GRAF & WILLENBERG (2011 a) Baden: GRAF (2007) Balsthal: GRAF & WILLENBERG (2014) Murgenthal: GRAF & WILLENBERG (2011 b) Romanshorn: ZAUGG et al. (2008) Schöftland: GRAF & WILLENBERG (2012) Uster: WYSSLING (2008) Winterthur: FRANK et al. (2011) Zürich: SCHINDLER et al. (2015)	Isohypses du toit du rocher selon l'AG25: Aarau, Baden, Balsthal, Murgenthal, Romanshorn, Schöftland, Uster, Winterthur et Zürich	Équidistance: 10 m	Forages, données obtenues par sismique réflexion, expertises

Modèles cantonaux

Différents modèles du toit du rocher sont disponibles dans les cantons de Genève, Vaud et Soleure (fig. 4-3). Toute la superficie du canton de Genève est couverte par une carte des isohypses du rocher. Dans le canton de Vaud, sept modèles régionaux du toit du rocher couvrent de vastes secteurs du territoire cantonal. Les parties du canton de Soleure situées dans le bassin molassique font également l'objet d'une carte des isohypses du rocher.

Les données de base de ces modèles cantonaux ne diffèrent guère de la banque de données de GeoMol. Établies en 2013 et 2014, ces cartes sont de plus très actuelles.

Cartes des isohypses du rocher de l'AG25

Neuf feuilles de l'AG25 comprennent des cartes des isohypses du rocher (Aarau, Baden, Balsthal, Murgenthal, Romanshorn, Schöftland, Uster, Winterthur et Zürich). Ces isohypses, d'équidistance 10 m, ont été établis sur la base de forages, de données de sismique réflexion et de rapports d'expertises (GRAF 2007, WYSSLING 2008, ZAUGG et al. 2008, FRANK et al. 2011, GRAF & WILLENBERG 2011a, b, 2012, 2014, SCHINDLER et al. 2015).

Autres informations sur la topographie du toit du rocher

Outre les modèles existants du toit du rocher cités jusqu'ici, d'autres publications fournissent des informations au sujet de sa topographie. Des profils provenant d'investigations réalisées par des cantons pour étudier les eaux souterraines ou pour établir les classes de sols de fondation fournissent ainsi de bonnes indications au sujet de la topographie du toit du rocher. Ces renseignements ont été exploités pour adapter le modèle aux données de base (point 5.3.5.1) dans le but de vérifier la position du toit du rocher modélisée dans GeoMol17.

4.7.2 Traitement des données

La première étape de la modélisation du toit du rocher a consisté à acquérir les données de forages, à les vérifier et à les préparer pour la modélisation. Ce processus a varié selon la source des données car elles sont, par exemple, plus ou moins complètes et de qualité inégale. Parfois il a été possible d'exploiter de vastes banques de données et parfois il a

fallu rechercher les informations dans les différents profils de forages et les saisir à la main. La deuxième étape a consisté à acquérir et à préparer les autres données de base. On a admis qu'elles étaient correctes et pouvaient donc être utilisées telles quelles pour modéliser le toit du rocher.

La distinction suivante est très importante pour la modélisation qui s'ensuit (LANDESGEOLOGIE 2015):

- régions où le rocher affleure ou est recouvert d'une faible épaisseur de roches meubles;
- régions où le rocher est recouvert de roches meubles d'épaisseur inconnue.

Sur le Plateau suisse, la distinction entre ces régions a également fait appel à GeoCover (données vectorielles de l'AG25). Dans les vallées alpines, c'est la Carte géologique de la Suisse au 1:500 000 qui a été utilisée dans un but de simplification. Cette étape intermédiaire était nécessaire pour isoler les régions dans lesquelles le rocher affleure ou est recouvert d'une mince couverture de roche meuble. Elle a permis d'extraire les courbes de niveau topographiques selon la Carte nationale de la Suisse pour les intégrer directement dans le modèle du toit du rocher (LANDESGEOLOGIE 2015).

4.8 Autres données de surface

En sus des cartes géologiques et tectoniques, l'interprétation des données disponibles et l'élaboration du modèle GeoMol17 ont eu recours à différentes données de swisstopo concernant la surface topographique:

- cartes topographiques nationales au 1:25 000 (CN25);
- orthophotos SWISSIMAGE, qui regroupent des images aériennes numériques en couleurs de la Suisse;
- modèles numériques de terrain: MNT25, le modèle numérique de terrain qui couvre l'ensemble du territoire suisse, basé sur la Carte nationale de la Suisse au 1:25 000, avec une grille de largeur de maille égale à 25 m (SWISSTOPO 2005) et swissALTI^{3D}, le modèle numérique de terrain à haute résolution qui décrit la configuration du terrain sans végétation ni construction en Suisse et au Liechtenstein (SWISSTOPO 2017).

5. Méthodologie et démarche appliquées

5.1 Situation initiale

Les méthodes d'élaboration des deux modèles GeoMol15 et GeoMol17 diffèrent à de nombreux égards. La cause réside principalement dans le morcellement du projet. Si l'ensemble du modèle GeoMol15 a été construit par swisstopo sur la base d'une documentation homogène (SOMMARUGA et al. 2012), la modélisation dans le cadre du projet GeoMol17 a été subdivisée en six sous-aires, qui ont été traitées par différents partenaires. Deux modèles ont ainsi vu le jour: GeoMol15, relativement simple, et GeoMol17, plus détaillé et décrivant les structures avec une résolution supérieure.

Comme le modèle GeoMol15 et les sous-modèles de GeoMol17 ont été établis durant la même période, deux démarches ont été développées indépendamment l'une de l'autre. Les difficultés posées par la modélisation tridimensionnelle du bassin molassique suisse ont été résolues suivant différentes approches tenant compte des exigences fondamentales. La méthodologie mise en œuvre pour élaborer le modèle GeoMol15 est détaillée au chapitre 5.2, tandis que le chapitre 5.3 traite de la méthodologie appliquée pour le modèle GeoMol17. Les différences entre les méthodologies appliquées sont d'abord indiquées, puis les diverses étapes de travail accomplies dans le cadre du sous-modèle du Service géologique national sont décrites de manière plus approfondie.

5.2 GeoMol 15

5.2.1 Démarche générale

L'élaboration du modèle GeoMol15 s'est principalement fondée sur les résultats consignés dans l'Atlas sismique du bassin molassique suisse (SASMB, SOMMARUGA et al. 2012). Une grande partie de la sismique réflexion existant dans l'ensemble du bassin à l'époque de cette publication y avait été interprétée d'une manière homogène. Deux représentations raster, l'une en temps et l'autre en profondeurs, ont été établies pour chaque horizon sismique interprété. Les surfaces ainsi calculées ont permis de construire un premier modèle tridimensionnel simplifié du bassin molassique suisse.

Les différences principales entre le modèle GeoMol15 et le modèle 3D du SASMB résident dans la modélisation des horizons au voisinage de la ligne d'affleurement de la base du «Cénozoïque», dans l'ajustement des horizons aux marqueurs identifiés dans les forages profonds (calage à l'aide des forages), dans la modélisation des principales zones de

failles et dans la modélisation complémentaire des horizons du «Cénozoïque» et du toit du rocher.

La démarche appliquée pour construire le modèle GeoMol15 est expliquée à l'aide d'un schéma (fig. 5-1). Les principales étapes de travail y sont assorties d'un renvoi au point de ce rapport qui en traite. Dans un premier temps, les étapes générales appliquées pour élaborer le SASMB sont exposées, de l'interprétation des données sismiques au calcul des rasters décrivant les horizons selon les temps et les profondeurs (points 5.2.2 et 5.2.3). Puis vient une description des adaptations et du traitement de la base constituée par le SASMB opérés pour modéliser les horizons de GeoMol15 (point 5.2.4). Les principales étapes accomplies pour modéliser les failles sont finalement expliquées (point 5.2.5).

5.2.2 Interprétation sismique

L'interprétation sismique du SASMB comprend les huit principaux horizons sismiques cartographiables dans l'ensemble du bassin molassique suisse. Ces horizons marqueurs, qui se trouvent sur des limites stratigraphiques importantes ou à proximité de celles-ci, ont été ajustés en tenant compte des limites entre formations observées dans les forages. Les failles principales, qui décalent les horizons sismiques, ont été interprétées. Puis les différentes sections sismiques interprétées ont été converties selon une altitude de référence de 500 m dans une banque de données SIG. Les écarts de temps au niveau des croisements des sections sismiques (*misties*) ont été largement atténués en appliquant un procédé de correction décrit en détail par SOMMARUGA et al. (2012).

5.2.3 Modèle de vitesses

Les forages profonds associés à des tirs de calage fournissent des renseignements au sujet de la position des horizons stratigraphiques touchés par ces forages, exprimée sous la forme de temps comme de profondeurs. Les valeurs temps-profondeurs mesurées permettent d'établir des diagrammes des vitesses d'intervalles au format raster. Il s'est avéré nécessaire d'introduire des points d'accrochage supplémentaires pour obtenir une extrapolation réaliste dans les régions couvertes par une faible densité de données. Ces points se trouvent pour la plupart dans des secteurs de bordure du bassin molassique qui ne peuvent plus être assez bien contrôlés en exploitant les forages profonds existants (fig. 5-2). Les rasters décrivant les vitesses ont été calculés sous ArcGIS en appliquant l'algorithme Thin Plate. Comme pour le calcul des horizons sous la forme de temps, ils ont

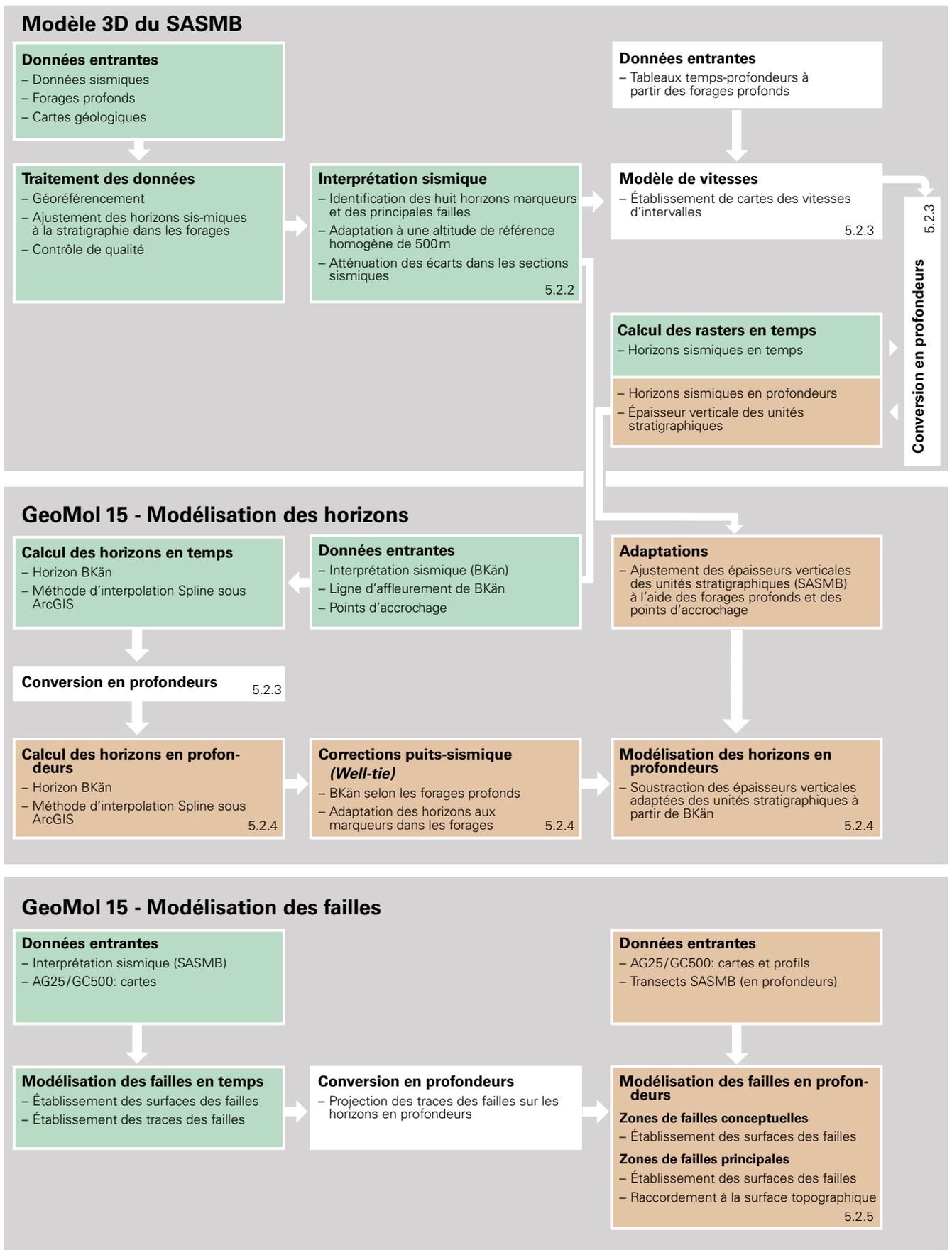


Fig. 5-1: Schéma du déroulement des travaux accomplis pour élaborer le modèle GeoMol15. Le bloc gris supérieur comprend la méthode appliquée par SOMMARUGA et al. (2012) pour calculer les horizons sismiques en temps et en profondeurs. Le bloc gris médian contient les adaptations des horizons du SASMB opérées pour construire le modèle GeoMol15. Le bloc gris inférieur inclut les étapes de travail accomplies pour modéliser les failles. Les traitements réalisés en temps sont colorés en vert et ceux en profondeurs en orange.

Carte des vitesses d'intervalles GeoMol 15

(Intervalles entre isolignes 200 m/s)

Dogger

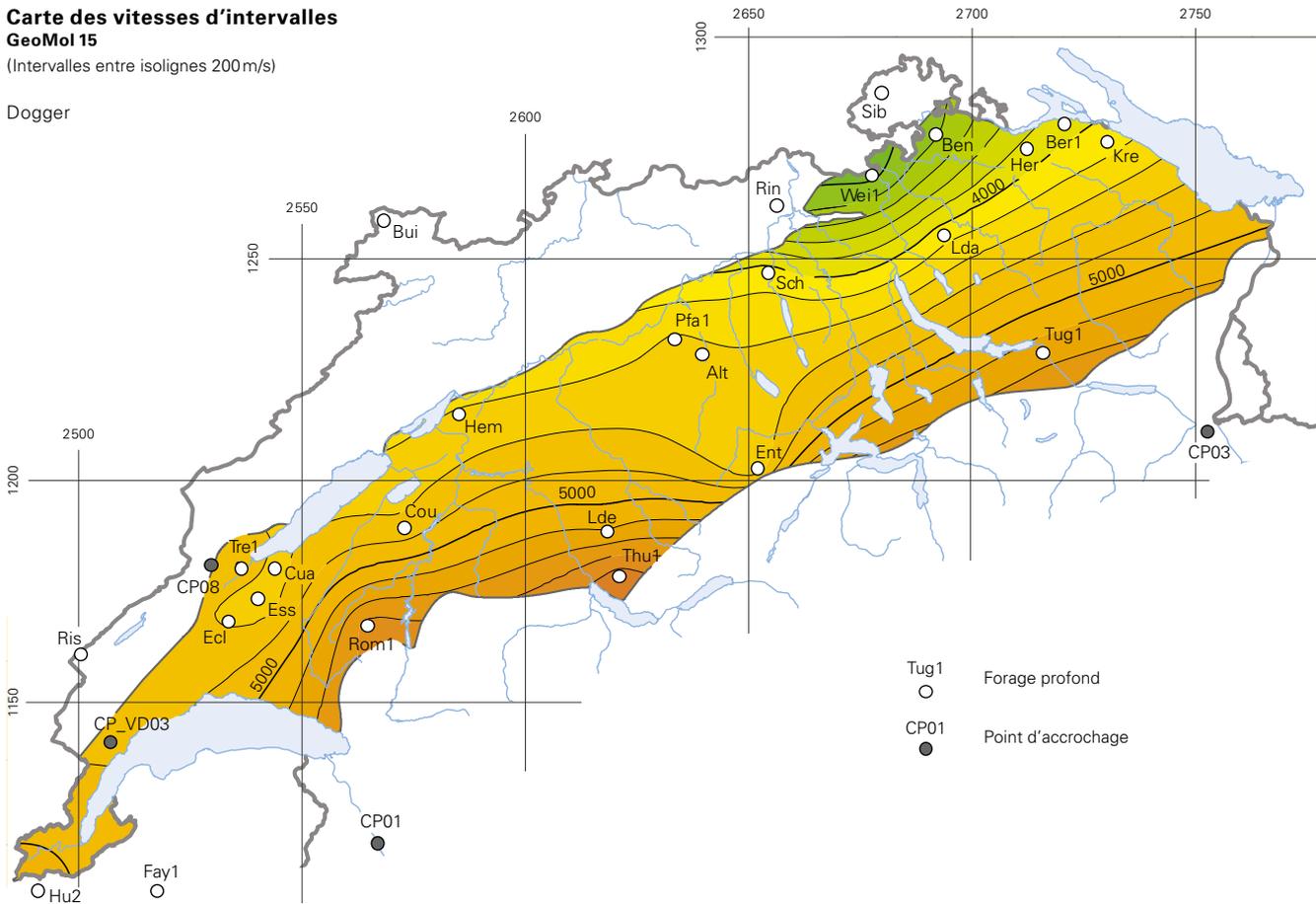


Fig. 5-2: Carte des vitesses d'intervalles (GeoMol 15) indiquant les intervalles sismiques dans le Dogger, avec localisation des forages profonds et des points d'accrochage pour lesquels les valeurs temps-profondeurs sont entrées dans les calculs du raster décrivant les vitesses (SOMMARUGA et al. 2012, remanié).

été dotés de mailles de largeur 100 m. Au vu de la faible densité de données, ces rasters interpolés ne représentent qu'une approximation des tendances générales dans le bassin molassique suisse (fig. 5-2).

5.2.4 Modélisation des horizons

Les points suivants décrivent trois étapes de travail appliquées selon les données de base pour construire les horizons du modèle. Les résultats obtenus ont pour point commun une résolution de 100x100 m.

5.2.4.1 Topographie et toit du rocher

L'horizon topographique a été construit à partir du jeu de données raster du modèle numérique de terrain MNT25, en adaptant la taille de ses mailles afin d'obtenir une résolution de 100x100 m.

Pour les deux modèles GeoMol15 et GeoMol17, le même modèle altimétrique du toit du rocher a été calculé selon deux résolutions différentes. La démarche générale de modélisation de cet horizon peut donc être reprise de la description du modèle détaillé GeoMol17 (point 5.3.5.1).

5.2.4.2 Horizons de la molasse

Les horizons TOMM et TUSM ont été modélisés individuellement dans la molasse du Plateau suisse, tandis que les sédiments de la molasse subalpine n'ont pas été subdivisés.

Comme les réflecteurs sismiques des unités de la molasse n'ont pas pu être suivis sans ambiguïté dans l'ensemble du bassin molassique, les unités cénozoïques n'ont pas été interprétées dans le cadre du SASMB. L'élaboration du modèle GeoMol15 a donc exploité l'interprétation de la Nagra (ROTH et al. 2010). Les isolignes des deux horizons de la molasse ont été ajustées aux forages utilisés dans le cadre de GeoMol15 ainsi qu'aux lignes d'affleurement en surface. Dans la région limitrophe avec le Bade-Wurtemberg, il a fallu adapter notablement les isolignes pour les raccorder au modèle européen. Une fois ces améliorations apportées, les isolignes corrigées ont été interpolées conjointement avec les forages et les lignes d'affleurement, en appliquant l'outil d'interpolation Topo vers raster d'ArcGIS, pour fournir la surface des horizons concernés.

5.2.4.3 Horizons de la base du «Cénozoïque» à la base du «Mésozoïque»

Les horizons allant de la base du «Cénozoïque» à la base du «Mésozoïque» ont été modélisés en plusieurs étapes dans le cadre de GeoMol15. L'horizon Base du «Cénozoïque» a d'abord été calculé à partir de l'interprétation en temps de l'horizon Base du «Tertiaire» du SASMB. Contrairement aux calculs au format raster du SASMB, la ligne d'affleurement de l'horizon Base du «Cénozoïque» (en temps) ainsi que des points d'accrochage ont été intégrés dans l'interpolation. Cet horizon a été calculé en appliquant l'outil Spline d'ArcGIS. Puis il a été ajusté avec une grille de correction à l'aide des forages mesurés en temps. Il a ensuite été converti en profondeurs en appliquant le modèle de vitesses du SASMB décrit précédemment (point 5.2.3).

L'horizon Base du «Cénozoïque» a ensuite été ajusté à sa ligne d'affleurement, aux forages existants et aux profils de l'AG25. Il a généralement été adapté aux profils géologiques à une distance inférieure à 2000 m de la ligne d'affleurement pour pouvoir être raccordé correctement à la surface topographique. Une grille de correction a de nouveau été appliquée à cet effet.

Enfin, les horizons sous-jacents ont été calculés selon leurs profondeurs, en utilisant les rasters décrivant l'épaisseur verticale des unités stratigraphiques représentées dans le SASMB. Pour le modèle GeoMol15, l'épaisseur de ces unités a été ajustée aux forages et aux profils géologiques. La position des horizons mésozoïques sous-jacents a donc été calculée à partir de l'horizon adapté Base du «Cénozoïque», en retranchant à chaque fois l'épaisseur stratigraphique de l'horizon sus-jacent.

5.2.5 Modélisation des failles

Les failles les plus importantes ont été modélisées de deux manières en fonction des données exploitées. Les zones de failles principales reconnues dans les données sismiques ont été interprétées et modélisées en temps puis converties en profondeurs. Les zones de failles conceptuelles, fondées sur des cartes et des profils géologiques, ont été modélisées en profondeurs.

5.2.5.1 Zones de failles principales

La modélisation des structures dans le cadre de GeoMol15 s'est fondée sur l'interprétation des failles du SASMB. Dans GeoMol15 les failles ont été raccordées à la surface topographique à l'aide de cartes et de profils géologiques (AG25 et CG500). Les zones de failles retenues dans la modélisation devaient être indiquées par des interprétations sismiques ou par des cartes géologiques. Dans une première étape, les plans de failles ont été modélisés temporellement à partir des failles interprétées dans les sections sismiques. Les intersections entre les horizons et les failles modélisés ont ensuite été converties en profondeurs. Des informations superficielles supplémentaires provenant de cartes et de profils ont été intégrées dans la modélisation des failles, ce qui a permis de tenir compte des affleurements connus de ces structures à la surface. Le déplace-

ment le long des failles n'a pas été pris en considération dans GeoMol15.

5.2.5.2 Zones de failles conceptuelles

La modélisation des failles parcourant la zone triangulaire de la molasse subalpine a d'abord nécessité l'uniformisation des traces en surface. Les informations à ce sujet proviennent principalement des feuilles de l'AG25 et de la Carte géologique de la Suisse au 1:500 000. Les profils accompagnant la carte géologique spéciale «Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps» au 1:100 000 ont également servi de base. Les failles conceptuelles figurant dans les profils géologiques du SASMB ont aidé à fixer la position de la zone triangulaire en profondeur. Les différents jeux de données ont ensuite été reliés entre eux à l'aide d'isolignes de failles. Ainsi, ces structures à grande échelle ont pu être construites en continu.

5.3 GeoMol 17

5.3.1 Démarche générale

Contrairement au modèle GeoMol15, le modèle GeoMol17 se compose de plusieurs sous-modèles élaborés par les partenaires respectifs. Données de base différentes, logiciels de modélisation différents et priorités différentes expliquent en partie la variabilité parfois importante des méthodes mises en œuvre dans les diverses aires modélisées. Le tableau 5-1 indique les méthodes appliquées par les partenaires du projet et les logiciels qu'ils ont utilisés pour accomplir les étapes de leurs travaux. On y voit que le même problème peut être résolu par diverses approches techniques. Cela se remarque surtout dans le cas de la modélisation des horizons de la base du «Cénozoïque» à la base du «Mésozoïque», qui se fondent principalement sur des données sismiques. Outre l'utilisation de différents logiciels d'interprétation et de modélisation, c'est surtout le moment de la conversion temps-profondeurs spécifique à chacune des méthodes de modélisation appliquées qui est déterminant. C'est ainsi que, pour certains sous-modèles, les horizons ont d'abord été interpolés en temps pour fournir des rasters, avant d'être calés à l'aide de données supplémentaires exprimées en profondeurs. D'autres équipes ont d'abord converti l'interprétation sismique bidimensionnelle des horizons en profondeurs, puis poursuivi la modélisation en tenant compte d'autres données exprimées en profondeurs.

En raison des grandes différences entre les démarches appliquées, le présent rapport décrit principalement la méthodologie mise en œuvre par swisstopo. Celle qui a été suivie dans les autres sous-aires est exposée dans des rapports séparés (CLERC 2016, GRUBER et al. 2016, HUGGENBERGER et al. 2016, MARCHANT & BAUER 2016, MOCK 2016).

L'aire modélisée par le Service géologique national a été subdivisée en un domaine peu profond et un domaine profond afin d'en faciliter le traitement. Cette distinction était nécessaire pour pouvoir raccorder le modèle à la surface topographique et à cause des différences entre les données de base exploitées. C'est aussi pour cette raison que la méthode

de modélisation a largement varié selon les modèles partiels du Service géologique national.

La modélisation à grande profondeur a exclusivement recouru à des données issues d'investigations sismiques et de forages profonds. Les données sismiques disponibles restituent très précisément les caractéristiques du sous-sol géologique profond, mais elles sont peu appropriées à proximité de la surface. La modélisation à faible profondeur a surtout fait appel à des forages ainsi qu'à des cartes et profils géologiques. Les caractéristiques géologiques de la bordure nord de cette sous-aire modélisée (pied sud du Jura) ont été décrites en détail dans de nombreuses cartes et profils géologiques. Des forages peu profonds, exécutés en abondance dans cette région, ont en outre été intégrés dans la modélisation, tandis que les interprétations sismiques existantes de la Nagra déjà converties en profondeurs, provenant de la deuxième étape du plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes», ont également été utilisées. Une dernière phase a consisté à ajuster entre eux les trois sous-modèles de swisstopo et ceux des autres partenaires, puis à les assembler.

L'interprétation sismique du modèle profond est d'abord exposée ci-après (point 5.3.2). Puis vient une description de l'atténuation des écarts (*misties*), de l'élaboration du modèle de vitesses utilisé dans GeoMol et de la conversion temps-profondeurs qui s'ensuit (points 5.3.3 et 5.3.4). Le point consacré à la modélisation des horizons (point 5.3.5) présente la méthode appliquée pour modéliser le toit du rocher, les horizons de la molasse, les horizons de la base du «Cénozoïque» à la base du «Mésozoïque» et l'horizon Base du «Permo-carbonifère», en distinguant les étapes de travail appliquées au modèle profond et au modèle peu profond. Les phases de la modélisation des failles et de leurs déplacements sont traitées au point 5.3.6. Puis le point 5.3.7 explique comment les différents sous-modèles ont été harmonisés et réunis pour constituer un seul modèle global.

5.3.2 Interprétation sismique

Le Service géologique national s'est fondé sur les interprétations sismiques de la Nagra (ROTH et al. 2010, MEIER 2010) pour établir son sous-modèle profond dans le cadre du projet GeoMol17. Il a ainsi pu commencer les travaux en exploitant des interprétations déjà réalisées et vérifiées couvrant une vaste surface.

Une fois les sections sismiques et leurs interprétations chargées dans le logiciel Seisvision, elles ont été comparées visuellement avec les annexes des rapports de travail de la Nagra NAB 10-39 et NAB 10-40 (ROTH et al. 2010, MEIER 2010) pour s'assurer que les interprétations correspondent aux réflecteurs appropriés. Cet examen a aussi servi à vérifier que les décalages totaux de chaque section sismique avaient été introduits correctement. D'autres sections sismiques non interprétées ont également été chargées dans le projet d'interprétation puis raccrochées au réseau de sections sismiques déjà interprétées. Les auteurs ont veillé à cartographier autant que possible les mêmes réflecteurs que dans l'interprétation de la Nagra. C'est le Service géologique national qui a interprété les horizons Toit du Malm inférieur et Toit du Keuper dans l'aire modélisée (point 4.6.1).

Une unité géologique peut parfois se voir allouer une image sismique caractéristique. Ce faciès sismique est calé à l'aide de mesures géophysiques effectuées dans les puits de forages. Différents facteurs influencent l'image sismique en sus de la lithologie (ROTH et al. 2010). En font notamment partie l'hétérogénéité des données sismiques, la profondeur variable des horizons interprétés et les changements latéraux de faciès dans les sédiments. Il n'est par conséquent pas possible d'attribuer un groupe de réflecteurs donné à une unité stratigraphique sur de grandes distances, par exemple sur l'ensemble du bassin molassique suisse. Il faut plutôt caler les interprétations sur les quelques forages profonds disponibles (ROTH et al. 2010).

Les auteurs de l'interprétation sismique de la Nagra, reprise pour réaliser la présente modélisation, avaient déjà veillé à interpréter d'abord une section sismique recoupant un forage profond pour limiter au maximum le décalage vertical entre le réflecteur considéré et le forage. La précision de la corrélation entre la sismique et les forages a de nouveau été vérifiée dans le cadre du projet GeoMol. Les horizons complémentaires ont été interprétés autant que possible le long d'amplitudes maximales ou minimales, mais aussi parfois le long de passages à la valeur zéro (annexe A5-1 et chap.3).

De nouvelles failles ont été interprétées par analyse des amplitudes (terminaisons ou décalages), comme dans les travaux antérieurs (ROTH et al. 2010, MEIER 2010, SOMMARUGA et al. 2012). Lors de l'interprétation structurale, il a été veillé à ce que les déplacements des réflecteurs soient perceptibles autant que possible sur plusieurs horizons marqueurs. Une faille identifiée ou présumée dans une section sismique a été recherchée dans les sections voisines, en tenant compte du canevas tectonique connu en surface. L'interprétation initiale sur la section considérée a été considérée comme valide lorsqu'une faille présumée était repérée sur une ou plusieurs sections sismiques voisines. Le logiciel d'interprétation a d'abord été utilisé pour interpréter la géométrie des failles (failles en forme de bâtonnets ou *fault sticks*), puis pour déterminer le déplacement des réflecteurs interprétés le long des failles interprétées (rejet horizontal, fig. 5-8). Le rejet interprété a été mesuré en temps pour un double trajet. Lorsqu'il a été cartographié sur une seule section sismique, il est représenté par une ligne sur la vue cartographique. Cette dernière dessine un polygone lorsque le rejet a été cartographié sur deux sections sismiques ou plus.

Une fois l'interprétation achevée, une première étape de contrôle de la qualité a été réalisée en établissant des cartes des isochrones pour tous les horizons interprétés. Ces cartes ont généralement révélé des erreurs d'interprétation, qui ont été corrigées avant l'exportation définitive.

Les interprétations des horizons et des failles ont ensuite été exportées sous la forme de fichiers ASCII pour être soumises à la suite du traitement.

Tab. 5-1: *Vue d'ensemble des méthodes de modélisation des horizons appliquées aux différents sous-modèles. Elles sont décrites en détail dans les rapports correspondants.*

Sous-modèles		Genève	Vaud	Fribourg	Berne	Service géologique national Modèle profond	Service géologique national Modèle peu profond NW	Service géologique national Modèle peu profond NE	Lac de Constance
		CLERC (2016)	MARCHANT & BAUER (2016)	GRUBER et al. (2016)	MOCK (2016)				HUGENBERGER et al. (2016)
Toit du rocher									
Logiciel		ArcGIS							
Méthode		Topo vers raster							
Remarques		Modélisation homogène par swisstopo							
Horizons de la molasse									
Logiciel		-	IHS Kingdom	Move™	IHS Kingdom / ArcGIS	ArcGIS / Move™			IHS Kingdom, ArcGIS, GoCAD
Méthode		-	Flex Gridding	Krigeage et Spline avec Barrières	Flex Gridding	Topo vers raster			Spline avec barrières
Remarques		Aucun horizon TUSM ni TOMM dans l'aire modélisée	Interprétation sismique intégrée dans la modélisation, complétée par des données de forages et des lignes d'affleurement topographiques	Modélisation à partir de données de forages et de lignes d'affleurement topographiques	Interprétation sismique intégrée dans la modélisation, complétée par des données de forages et des lignes d'affleurement topographiques	Interprétation sismique intégrée dans la modélisation, complétée par des données de forages et des lignes d'affleurement topographiques			Interprétation sismique intégrée dans la modélisation, complétée par des données de forages et des lignes d'affleurement topographiques
Horizons de BKân à BMes									
Interprétation sismique									
Logiciel		Petrel E&P	IHS Kingdom	Move™	IHS Kingdom	Seisvision	-	-	IHS Kingdom
Remarques		Situation initiale: interprétation propre; autres interprétations, rapports et publications complémentaires à l'interprétation (GORIN 1989, GORIN et al. 1993, SIGNER & GORIN 1995, PAOLACCI 2012)	Situation initiale: diverses interprétations (SOMMARUGA et al. 2012, CAPAR et al. 2015, divers rapports publiés)	Situation initiale: interprétation (SOMMARUGA et al. 2012); complétée par l'interprétation propre de sections sismiques supplémentaires	Situation initiale: interprétation étape 1 SGT (ROTH et al. 2010, MEIER 2010); complétée par l'interprétation propre de sections sismiques supplémentaires	Situation initiale: interprétation étape 1 SGT (ROTH et al. 2010); complétée par l'interprétation propre de sections sismiques supplémentaires		Aucune interprétation sismique en temps utilisée	Situation initiale: interprétation étape 1 SGT (ROTH et al. 2010); complétée par l'interprétation propre de sections sismiques supplémentaires (dont sismique du lac de Constance)

Sous-modèles

Genève	Vaud	Fribourg	Berne	Service géologique national Modèle profond	Service géologique national Modèle peu profond NW	Service géologique national Modèle peu profond NE	Lac de Constance
CLERC (2016)	MARCHANT & BAUER (2016)	GRUBER et al. (2016)	MOCK (2016)				HUGGENBERGER et al. (2016)
Atténuation des écarts (misties)							
Logiciel	Petrel E&P	Move™	IHS Kingdom	MATLAB	-	-	IHS Kingdom
Remarques	Atténuation manuelle des incohérences apparentes au niveau des croisements de sections en décalant les durées de parcours	Méthode: Bulk-Shift pour adapter des lignes entières; autres écarts: fonction d'atténuation dans IHS Kingdom	Méthode SASMB	Atténuation des écarts initiaux, lissage des pics présentés par les horizons			Méthode: Exact Fit
Modélisation 3D des horizons exprimés en temps							
Logiciel	Petrel E&P	ArcGIS	IHS Kingdom		-	-	ArcGIS
Méthode	Interpolation convergente	Spline avec barrières	Flex Gridding				Spline avec barrières
Remarques		Traces de failles comme barrières, puis correction et adaptation des horizons exprimés en temps	Polygones de failles comme barrières, puis correction des artefacts éventuels en 2D	Aucun horizon 3D élaboré en temps (raster)			Polygones de failles comme barrières
Modèle de vitesses							
Remarques	Modèle de vitesses homogène de swisstopo Unités de la molasse: vitesses moyennes du toit du rocher à la base du «Cénozoïque» Entre la base du «Cénozoïque» et la base du «Mésozoïque»: vitesses d'intervalles sommées (stackées)						
Conversion en profondeurs							
Logiciel	Petrel E&P	IHS Kingdom	IHS Kingdom	Petrosys, Move™			IHS Kingdom
Méthode	Interpolation convergente	Layer Cake (Dynamic Depth Conversion)	Dynamic Depth Conversion	Dynamic Depth Conversion et Map Update			Extended Math Calculator
Remarques	Modèle de vitesses 3D élaboré à partir des cartes des vitesses d'intervalles de swisstopo		Processus itératif incluant des points de contrôle pour éliminer les artefacts dans le raster en profondeurs	Conversion en profondeurs des sections sismiques interprétées; correction des artefacts affectant les horizons au contact des failles, atténuation des écarts résiduels			

Modélisation 3D des horizons exprimés en profondeurs							
Logiciel	Petrel E&P	IHS Kingdom		Move™	Petrosys, Move™	ArcGIS, Move™	ArcGIS, Surfer
Méthode	Interpolation convergente / Gridding	Flex Gridding appliqué aux horizons convertis en profondeurs, aux forages et aux lignes d'affleurement		Modélisation explicite: élaboration de maillages entre plusieurs coupes	Algorithme de courbure minimale, méthode d'interpolation bicubique	Topo vers raster	Fonction de base radiale
Remarques		Correction des horizons exprimés en profondeurs au contact des failles	Élimination des artefacts affectant les conversions en profondeurs, correction des recouvrements d'horizons	Concerne le modèle peu profond; aucune modélisation des horizons en profondeurs pour le modèle profond	Failles inverses: insertion de «patches» pour modéliser la zone de superposition	Situation initiale: cartes et profils géologiques, données de forages	Situation initiale: interprétation étape 2 SGT (NAGRA 2014) en profondeurs; traces de failles comme barrières; modélisation par segments
Calage à l'aide de forages							
Logiciel	Petrel E&P	IHS Kingdom	Move™	IHS Kingdom	Petrosys		IHS Kingdom
Méthode	Élaboration d'une grille de correction avec interpolation convergente	Outil Horizon Flattening	Outil Reshape	Grille de correction	Grille de correction		Grille de correction
Remarques	Correction des horizons exprimés en profondeurs à l'aide de forages et de forages d'accrochage			Après le calage à l'aide de forages: correction des artefacts aux failles en 2D, puis gridding final	Calage de l'interprétation sismique 2D à l'aide de forages (données linéaires)	Insertion de forages dans la modélisation	Insertion de forages dans la modélisation
Raccordement à la surface							
Remarques	Insertion d'affleurements comme forages d'accrochage dans la modélisation	Calage des horizons exprimés en ligne d'affleurement	BKân: modélisation d'une structure en forme de rampe pour le raccorder à la ligne d'affleurement en direction du Jura	Modèle peu profond pour le raccordement à la structure de plis et chevauchements du Jura (Move™), lignes d'affleurement topographiques utilisées comme points de contrôle pour le gridding final (IHS Kingdom)	-	Insertion de la ligne d'affleurement dans la modélisation	Insertion de la ligne d'affleurement (points d'accrochage) dans la modélisation
							Raccordement des horizons de la molasse à la ligne d'affleurement, les horizons profonds n'affleurent pas en surface

Modélisation des failles: Voir le point 5.3.6

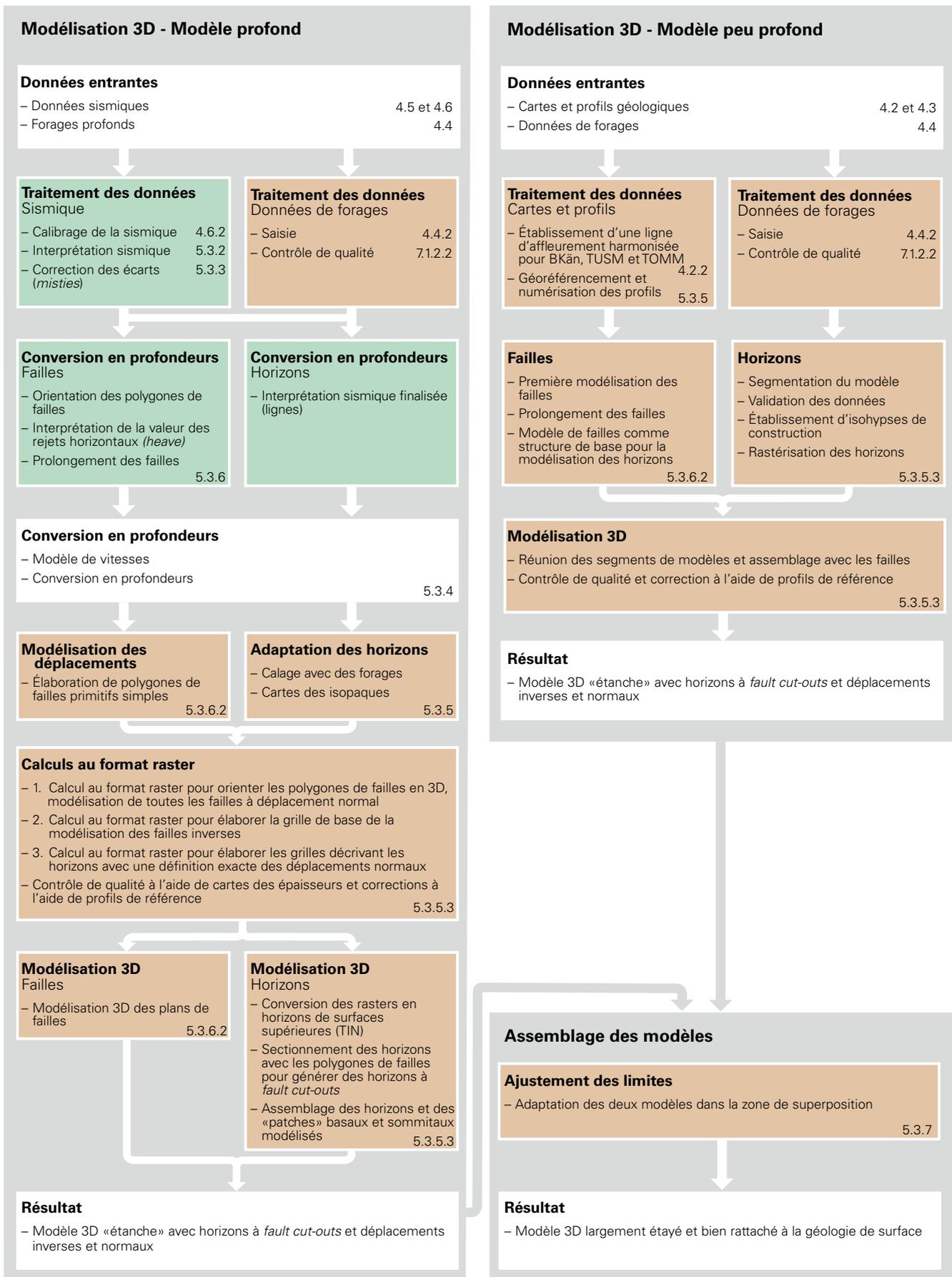


Fig. 5-3: Représentation schématique du déroulement des travaux accomplis pour élaborer le modèle GeoMol17. Le schéma indique la succession chronologique et les liens entre les étapes de travail individuelles. Comme dans la figure 5-1, les traitements en temps sont colorés en vert et ceux en profondeurs en orange.

5.3.3 Atténuation des écarts (misties)

Les écarts au niveau des croisements des sections ont été corrigés pour éviter la présence d'artefacts dans l'image structurale du sous-sol. La plupart des écarts affectant les jeux de données utilisés sont dus aux raisons suivantes:

- corrections statiques différentes selon les sections sismiques, comme c'est très souvent le cas lorsqu'elles proviennent de diverses campagnes;
- données de référence sismiques non ou mal documentées (lors du traitement/retraitement ou de l'exportation d'un fichier SEG Y à partir du logiciel d'interprétation);
- effets de migration;
- incohérences dans l'interprétation.

Pour atténuer les écarts, les interprétations d'horizons, exprimées en temps pour des doubles trajets, ont été exportées sous la forme de fichiers ASCII à partir du logiciel d'interprétation. Puis ces fichiers ont été importés dans MATLAB pour vérification, ce qui a permis d'identifier les tronçons faisant défaut dans l'interprétation et les sections sismiques non interprétées. L'existence de tronçons manquants était habituellement due à la présence de failles ou de secteurs mal imagés. La plupart des sections sismiques non interprétées étaient imputables à une qualité des travaux généralement faible. Dans certains cas, la cause du problème résidait dans le redoublement d'une section sismique sous deux noms différents, seule une version ayant été interprétée. Les incohérences dans l'interprétation ont été levées si nécessaire avant l'atténuation des écarts, puis l'interprétation a été réexportée. Cela s'est principalement produit dans le cas d'unités très minces, pour lesquelles un petit écart peut déjà représenter une part importante de l'épaisseur.

Dans la méthode appliquée, les écarts ont d'abord été calculés et atténués au niveau des croisements des sections sismiques. L'étendue maximale de la zone d'influence de l'atténuation des écarts affectant les horizons interprétés à proximité des croisements de sections était prédéfinie (cercles de rayon 250 m). L'interprétation n'a pas du tout été influencée par la correction des écarts à l'extérieur d'un autre rayon d'influence de 10 km à partir du croisement des sections sismiques. La profondeur des horizons interprétés a ensuite été recalculée dans cette zone d'influence par interpolation avec l'outil Spline. Cela a permis d'éviter la présence d'oscillations ou de coudes générés par une interprétation linéaire. L'atténuation des écarts devait notamment satisfaire à trois conditions importantes: les structures interprétées à partir de la sismique devaient rester inchangées, l'épaisseur des formations devait être conservée autant que possible et les déplacements causés par les failles ne devaient pas être lissés dans l'interprétation. Les données corrigées ont été vérifiées au terme d'une première atténuation des écarts pour s'assurer qu'il n'y ait plus d'écarts résiduels supérieurs à 30 ms (SOMMARUGA et al. 2012) et leur cause a été déterminée le cas échéant. Les écarts en question correspondaient souvent à des failles ou à des incohérences non encore repérées entachant l'interprétation. Puis les écarts ont été recalculés sous leur forme atténuée à l'issue de ce travail de vérification et de correction. Enfin, les horizons ont été lissés

dans une dernière étape. Si elle avait été omise, les rasters décrivant les horizons auraient été très irréguliers le long des sections sismiques.

5.3.4 Modèle de vitesses et conversion en profondeurs

Comme dans le cas du modèle GeoMol15, les conversions en profondeurs ont été fondées sur les vitesses d'intervalles. Mais contrairement à GeoMol15, les données entrant dans les rasters décrivant ces vitesses ont été actualisées, puis ces rasters ont été recalculés (fig. 5-4). La grande différence par rapport aux vitesses d'intervalles de SOMMARUGA et al. (2012) réside dans le fait que les valeurs relevées dans les forages de Saint-Gall (SGa) et Schlattingen (SlA) ont fourni d'importants points de données supplémentaires dans l'est de l'aire modélisée. Il a en outre été possible d'exploiter des valeurs provenant de forages implantés au sud de l'Allemagne, dans le secteur du lac de Constance. L'existence de ces points de données a permis de raccrocher le raster décrivant les vitesses d'intervalles au-delà de la frontière suisse et ainsi d'atténuer les effets d'extrapolation (voir notamment fig. 5-2).

Les vitesses d'intervalles ont été dérivées de profils de vitesses mesurés dans des forages (tirs de calage), pour lesquels le temps d'un simple trajet a été enregistré à certaines profondeurs mesurées. Dans le cadre de GeoMol17, ces paires de valeurs temps-profondeurs ont été recalculées, à partir des marqueurs stratigraphiques harmonisés définis par les partenaires du projet dans leurs aires de modélisation respectives, pour établir les vitesses d'intervalles. Il a fallu recalculer de nombreux profils de vitesses pour les ramener à un plan de référence sismique d'altitude 500 m. Dans une première étape de contrôle de la qualité, les valeurs fournies ont été insérées dans un graphique pour chaque intervalle considéré afin d'identifier les tendances et les valeurs aberrantes. La figure 5-5A présente un graphique qui inclut toutes les paires temps-profondeurs disponibles concernant l'horizon Base du «Cénozoïque». La ligne continue traversant le nuage de points indique la tendance, tandis que les lignes en traits-tirés correspondent à un écart de $\pm 10\%$ par rapport à celle-ci. Les points s'écartant de moins de 10% de la ligne de tendance ont été considérés comme fiables et les points distants de plus de 10% ont tous été vérifiés avant d'être éventuellement utilisés.

Les paires de valeurs temps-profondeurs de chacun des intervalles indiquent idéalement une tendance à l'augmentation ou à la diminution de la vitesse en fonction de la surcharge stratigraphique. Les valeurs aberrantes sont fréquemment dues à des intervalles incomplets imputables au fait qu'une limite supérieure a été érodée ou qu'une limite inférieure n'a pas été atteinte par un forage. La fig. 5-5B présente les courbes temps-profondeurs correspondant à différents scénarios. Le forage de gauche fait certes l'objet d'une courbe temps-profondeurs complète décrivant la formation médiane, mais le sommet de celle-ci a été érodé et des points de données importants manquent donc pour établir un modèle régional des vitesses. Le forage de droite n'a pas entièrement traversé la formation médiane, si bien qu'aucune mesure de vitesse n'a pu être effectuée au sommet de la formation sous-

Carte des vitesses d'intervalles

GeoMol 17

(Intervalles entre isolignes 200 m/s)

Dogger

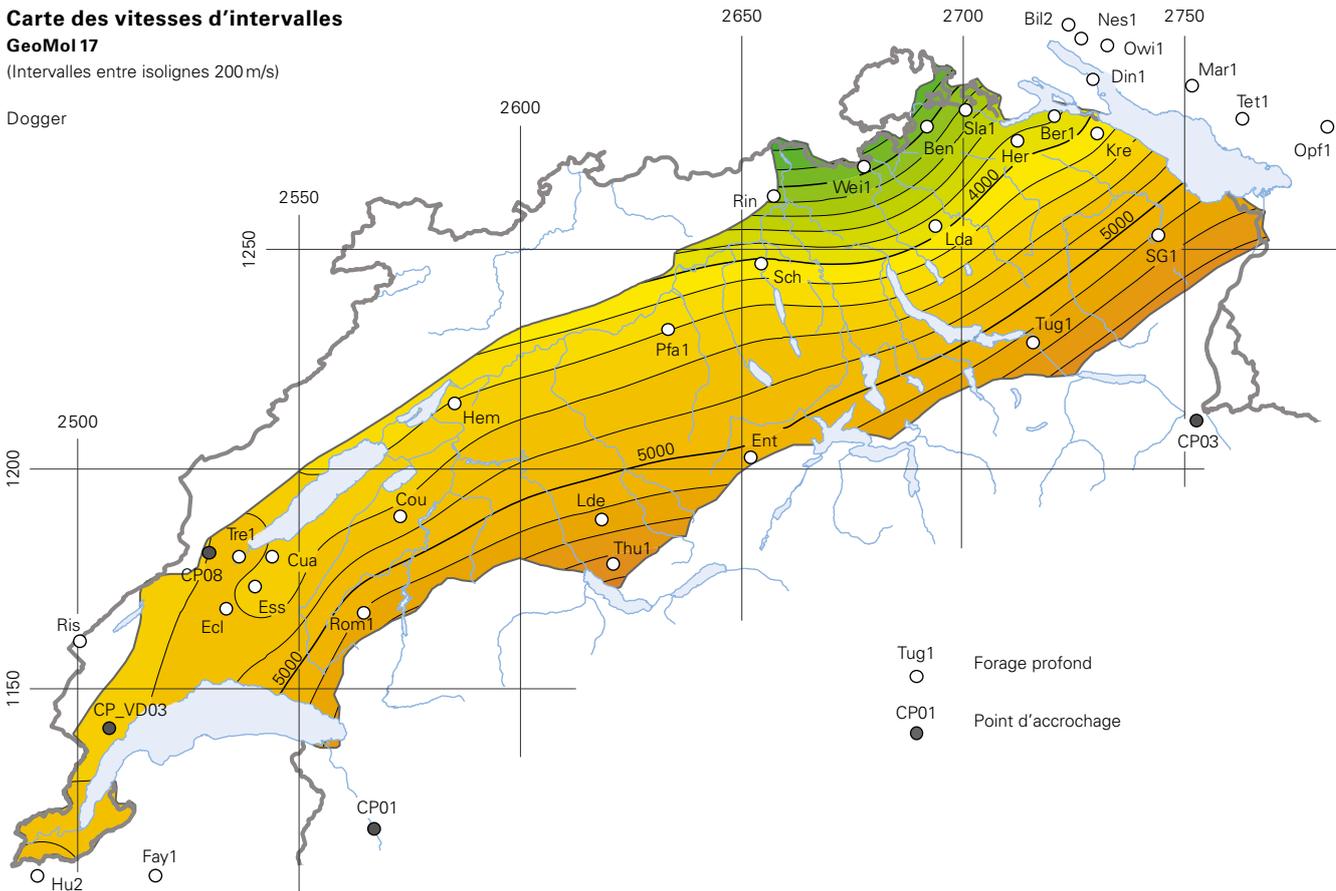


Fig. 5-4: Carte des vitesses d'intervalles (GeoMol17) indiquant les intervalles sismiques dans le Dogger, avec localisation des forages profonds et des points d'accrochage pour lesquels les valeurs temps-profondeurs sont entrées dans les calculs du raster décrivant les vitesses.

jacente. Le cas idéal est illustré par le forage du milieu, où des vitesses ont été mesurées à travers toute la formation médiane.

Lorsque la cause d'une valeur aberrante a été identifiée, cette valeur a été rééditée. Les paires de valeurs temps-profondeurs qui n'ont pas pu être corrigées ont été retirées de la banque de données. Dans une étape subséquente de contrôle de la qualité, les paires de valeurs temps-profondeurs ont été insérées dans un graphique et vérifiées visuellement. À ce stade également, les trends régionaux devaient être discernables et les forages voisins ne devaient présenter aucune contradiction inexplicable. Une courbe de tendance fournit la fonction mathématique décrivant une vitesse d'intervalle. Du fait de la faible densité de données, il a fallu introduire des points d'accrochage synthétiques, comme dans le cadre des travaux de SOMMARUGA et al. (2012). Les points d'accrochage définis dans cette étude ont été réutilisés et édités si nécessaire. D'autres points d'accrochage ont été ajoutés. En conséquence de la faible densité de données, les vitesses d'intervalles ont dû être considérées au titre de modèle régional et non de modèle détaillé.

Lors de la conversion en profondeurs, on peut transformer soit les horizons interprétés sous la forme de lignes, soit les surfaces calculées à partir des horizons interprétés. Dans le cas du sous-modèle profond du Service géologique natio-

nal, les horizons interprétés ont été transformés sous la forme de lignes exprimées en profondeurs pour chaque section sismique. Cette méthode présente les avantages suivants par rapport à la transformation de surfaces géologiques:

- La grande densité de données le long de la trace d'une section sismique est conservée plus longtemps durant le processus de traitement (ROTH et al. 2010).
- Des artefacts affectant le raster obtenu par transformation d'une surface sont évités, ce qui dispense d'une étape de contrôle de la qualité.

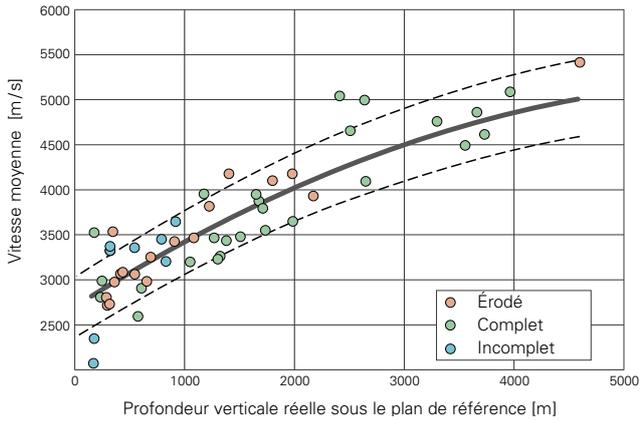
En règle générale, une valeur de profondeur correspondant à un horizon ne peut être calculée en un point quelconque au moyen d'une vitesse d'intervalle que si l'horizon sus-jacent est présent à cet endroit. Les points manquants à cause de failles, d'erreurs ou de lacunes dans l'interprétation ont été ajoutés pour garantir une succession ininterrompue des horizons.

5.3.4.1 Cartes des isopaques

Dans le cas idéal, une carte des isopaques confirme ce que l'on sait au sujet de la géologie régionale et elle donne une explication géologique aux variations latérales de l'épaisseur des formations (fig. 5-6). Les variations brusques signalent des

Conversion en profondeurs

A Paires temps-profondeurs



B Courbes temps-profondeurs

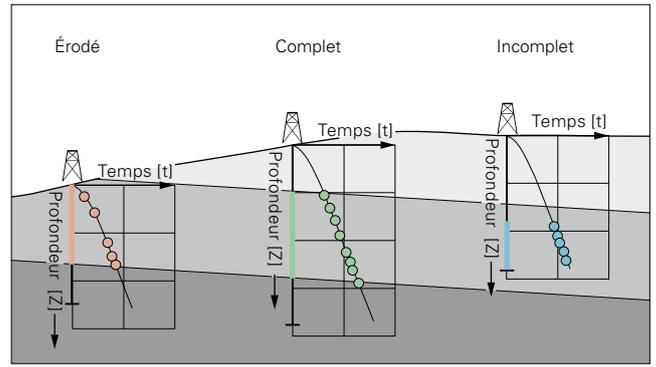


Fig. 5-5: Conversion en profondeurs. (A) Graphique avec toutes les paires temps-profondeurs disponibles concernant l'horizon Base du «Cénozoïque», la ligne de tendance (continue) et les écarts de $\pm 10\%$ par rapport à celle-ci (lignes en traits-tirés). (B) Courbes temps-profondeurs correspondant à différents scénarios.

Épaisseur

Lias (TKeu – TLi)

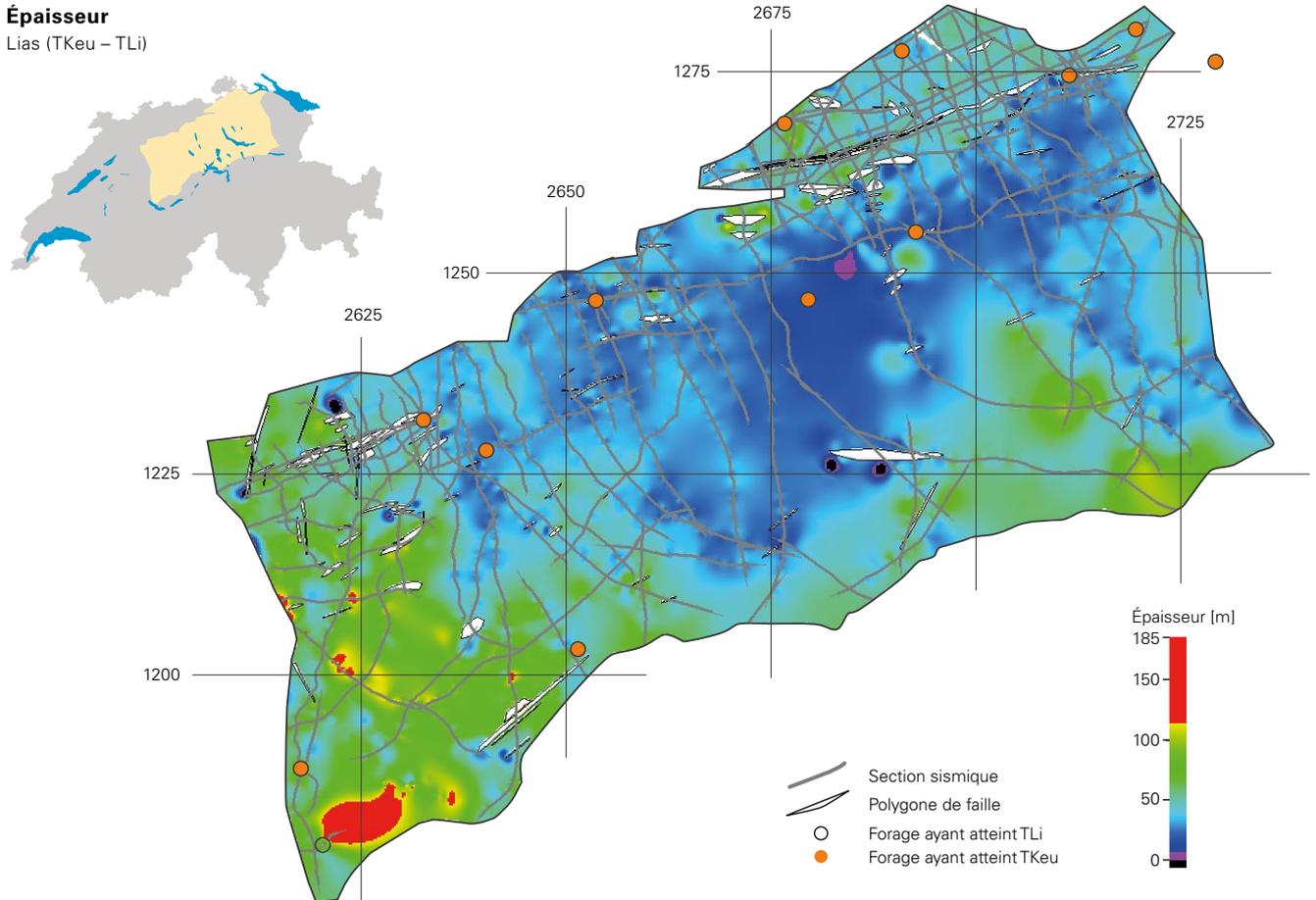


Fig. 5-6: Répartition non corrigée des épaisseurs dans l'intervalle constitué par le Lias dans le sous-modèle du Service géologique national. L'épaisseur représentée se fonde sur l'interprétation de sections sismiques et de données de forages. On y observe clairement des variations d'épaisseur suivant une tendance régionale dans la partie centrale, mais aussi des valeurs aberrantes correspondant à des épaisseurs très faibles ou excessivement grandes. Une épaisseur de 110 m et plus apparaît dans le coin sud-ouest. En y regardant de plus près, on voit que cette anomalie conique n'est due qu'à un court tronçon à l'extrémité d'une section sismique. Dans ce cas, des artefacts affectant l'extrémité de la section sismique étaient responsables de l'anomalie. Dans d'autres cas, l'interprétation a été réexaminée afin de confirmer ou de rejeter les valeurs aberrantes. Les épaisseurs minimales sont souvent liées à des artefacts affectant des polygones de failles rastérisés.

artefacts et des erreurs dans le calcul de l'épaisseur des horizons. Les cartes des isopaques permettent ainsi de vérifier la qualité des résultats obtenus, en particulier dans les régions couvertes par une faible densité de données.

Les cartes des isopaques font aussi ressortir les régions dans lesquelles une épaisseur apparaît trop faible ou trop grande. Ont été considérées comme trop faibles les épaisseurs nulles et celles qui étaient inférieures à 50% de la plus petite épaisseur connue à partir de forages voisins. Les épaisseurs égales ou supérieures à 150% de la plus grande épaisseur connue à partir des forages voisins ont également été examinées de plus près. Elles ont été conservées lorsque la présence d'une anomalie d'épaisseur a effectivement été confirmée dans l'interprétation. Il s'est avéré dans la plupart des cas que les anomalies étaient imputables à des artefacts apparus lors de la rasterisation dans les régions couvertes par une faible densité de données.

Ces anomalies peuvent être occasionnées par des écarts (*misties*) insuffisamment corrigés, des géométries complexes à proximité de failles ou des contradictions dans l'interprétation. Des profils de correction ont été générés pour y pallier. Ils recoupent les sections sismiques interprétées à chacune de leurs extrémités, formant ainsi des profils supplémentaires, étayés par la sismique puisque basés sur des données sismiques à leurs extrémités. Entre deux, des points d'accrochage ont été introduits de manière à ce que les tendances suivies par l'épaisseur correspondent aux épaisseurs observées aux extrémités.

5.3.5 Modélisation des horizons

La procédure de modélisation des horizons diffère considérablement d'une aire modélisée à l'autre. Les diverses méthodes appliquées sont indiquées dans un tableau synthétique (tab. 5-1). Les points suivants détaillent principalement les diverses étapes de travail accomplies par le Service géologique national pour modéliser les horizons.

5.3.5.1 Toit du rocher

Les données de forages, les courbes de niveau topographiques et les isohypses inclus dans les modèles existants du toit du rocher (chap. 4.7) ont d'abord été interpolés pour élaborer une version initiale de la surface du rocher. Un premier jeu d'isolignes d'équidistance 10 m décrivant la topographie possible du toit du rocher a ainsi été généré pour l'ensemble du territoire suisse. Les calculs ont été effectués en utilisant l'outil Topo vers raster d'ArcGIS. Cette méthode d'interpolation a permis d'utiliser des shapefiles de différentes géométries (points ou lignes).

Les isolignes ont été corrigées à la main lorsque l'écart entre les isohypses du rocher calculées et les données de forages disponibles étaient supérieures à 10 m. Les isohypses du rocher ont été adaptées de manière à correspondre aux conceptions au sujet de la topographie de ce niveau géologique. Ainsi, les vallées fluviales ont été dessinées sous la forme d'entailles aux flancs raides alors que les grandes vallées glaciaires se sont vues conférer des formes arrondies. L'interprétation a été limitée au minimum et le modelé du

toit du rocher a été principalement étayé par les données disponibles. Par exemple, la profondeur maximale des vallées a été dérivée exclusivement de forages et de modèles existants, et non d'interprétations tenant compte de la déclivité des flancs rocheux.

La grande difficulté lors de l'analyse de la cohérence entre les diverses données entrantes a consisté à décider si une erreur était apparue lors du levé d'un forage ou si le modelé du toit du rocher subissait un changement brusque, impliquant d'adapter les isohypses.

Dans une dernière étape, les isohypses corrigées et adaptées ont été calculées conjointement avec les données de forages, en appliquant l'outil d'interpolation Topo vers raster d'ArcGIS, pour générer une surface. A titre de contrôle, la surface interpolée du rocher a aussi été comparée avec les forages qui ne l'ont pas atteinte.

5.3.5.2 Horizons de la molasse

Comme dans la modélisation du toit du rocher, la modélisation de l'horizon TUSM a commencé par le calcul d'un premier raster à partir des différentes données existantes. Cette interprétation avec l'outil Topo vers raster d'ArcGIS s'est fondée sur une ligne d'affleurement homogène (fig. 2-4), sur des données de forages, sur des valeurs en profondeur dérivées de profils géologiques et sur l'interprétation sismique de l'horizon TUSM. Les isolignes de ce premier horizon montrent clairement que les diverses données entrantes ne sont pas homogènes et se contredisent même parfois (fig. 5-7A).

Dans une deuxième étape, les données entrantes ont été vérifiées et écartées si nécessaire. L'harmonisation de la ligne d'affleurement du contact USM-OMM s'est surtout fondée sur les esquisses tectoniques au 1:200 000 de l'AG25. La simplification de cette ligne d'affleurement a eu d'importantes répercussions sur la modélisation 3D, en particulier sur les altitudes (composante z), assignées automatiquement à partir de swissALTI^{3D} à cette ligne. Les altitudes étaient de ce fait trop précises par rapport à la ligne simplifiée, ce qui a généré une interpolation erronée le long du contact attendu. Pour cette raison, la modélisation a utilisé des points de contact individuels sûrs issus des différentes feuilles de l'AG25 afin de ne pas restreindre inutilement l'interpolation. Les données exprimées en profondeurs issues des forages avaient une qualité variable, aussi a-t-il fallu les évaluer par comparaison avec des points de données voisins. La limite USM-OMM s'est avérée difficile à repérer dans les données sismiques, c'est pourquoi la modélisation de l'horizon TUSM en Suisse centrale et nord-orientale a essentiellement recouru à l'interprétation sismique de la Nagra (ROTH et al. 2010). À l'ouest et au sud du bassin molassique, le jeu de données sismiques a été complété par des interprétations spécifiques de l'horizon TUSM. Comme cela ressort bien dans la figure 5-7, les profils géologiques et l'interprétation sismique divergeaient parfois considérablement. Les profils géologiques ont donc été utilisés principalement dans la modélisation des régions peu profondes de la bordure nord du bassin, pour relier les horizons modélisés aux lignes d'affleurement en surface. Ils n'ont en revanche pas servi à la modélisation du domaine interne du bassin molassique.

Premier calcul de l'horizon TUSM

Interpolation avec toutes les données entrantes

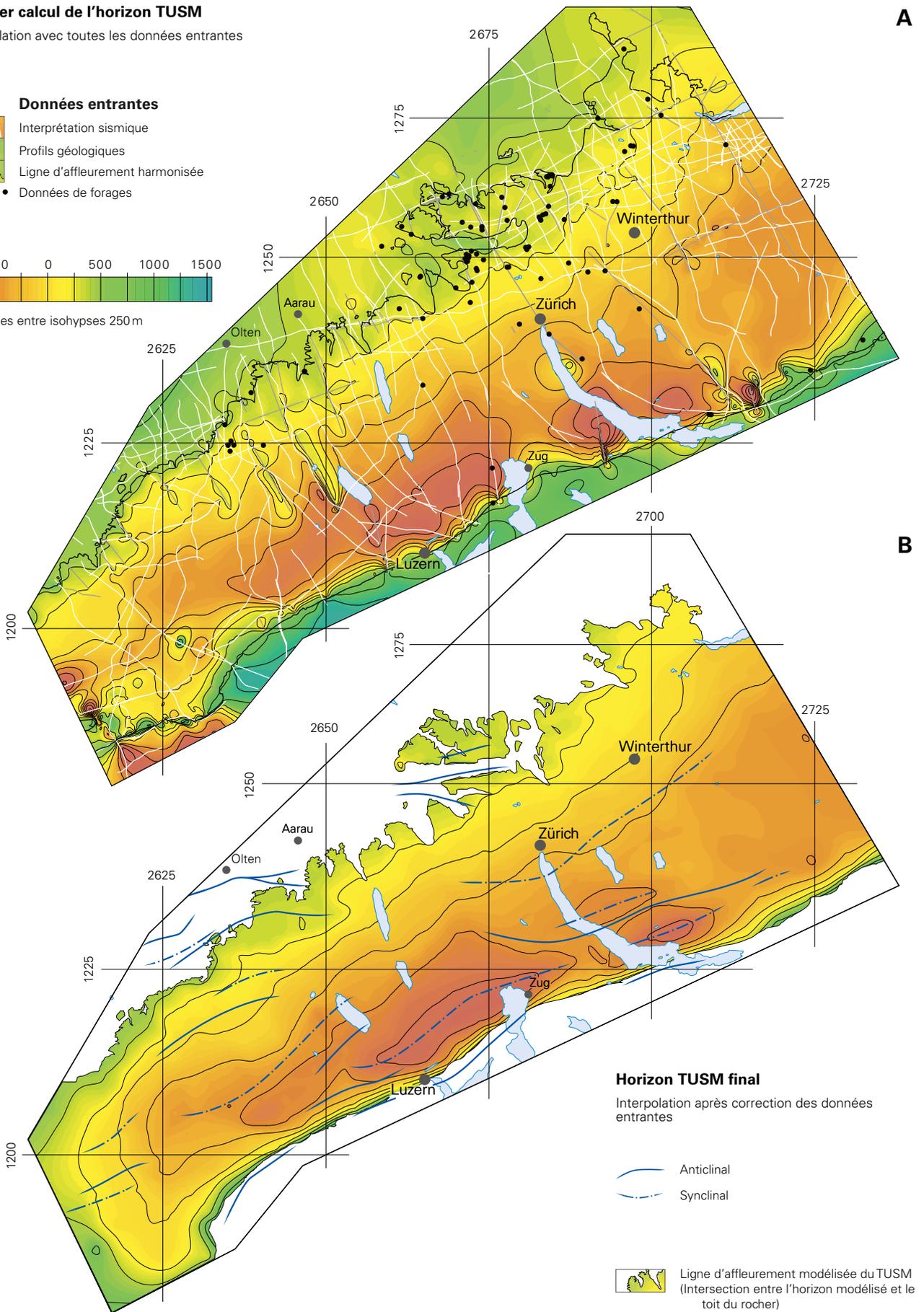
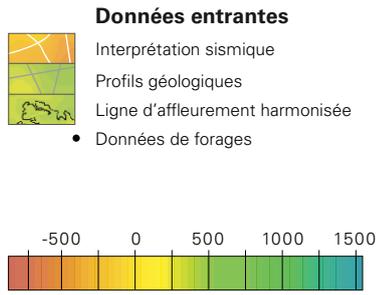


Fig. 5-7: Modélisation de l'horizon TUSM. (A) premier calcul de l'horizon incluant toutes les données entrantes; (B) l'horizon final obtenu après correction des données entrantes. L'interpolation a été étayée et contrôlée à l'aide d'isohypses auxiliaires et de profils d'accrochage.

Une fois les données entrantes validées, le jeu de données, hétérogène, a été harmonisé à l'aide d'isohypses auxiliaires. Cela a permis d'inclure de vastes structures géologiques dans le calcul des horizons. La construction de ces contours auxiliaires a exploité les indications de profondeur figurant dans les données entrantes sus-mentionnées et, entre les points de données, le pendage des unités molassiques à la surface (AG25) ainsi que les axes de plis figurant sur la carte structurale harmonisée (fig. 2-4). Dans le secteur Zoug–Zurich–Winterthur, il a aussi été tenu compte des cartes des isohypses de l'horizon de bentonite de Künsnacht (GUBLER 2009, REY et al. 2011) pour identifier les principales structures plissées. Le raster final décrivant l'horizon TUSM a finalement été calculé en appliquant la même méthode, à partir des données entrantes corrigées et des isohypses auxiliaires (fig. 5-7B).

L'horizon TOMM a été modélisé de la même manière. Pour contrôler l'interpolation, plus de 50 profils ont été élaborés avec le logiciel Move™ en direction NNW–SSE à intervalles de 2,5 km et 12 profils en direction WSW–ENE à intervalles de 5 km. Les intersections avec les horizons calculés TUSM et TOMM ainsi que les données entrantes ont été insérées dans les profils. Cela a permis de vérifier et d'adapter les épaisseurs des unités molassiques modélisées dans l'intervalle entre les données entrantes. Dans les interpolations impliquant des structures géologiques (plis), il est important que ces structures concordent verticalement entre les horizons modélisés.

5.3.5.3 Horizons de la base du «Cénozoïque» à la base du «Mésozoïque»

Le sous-modèle du Service géologique national a été subdivisé en un modèle partiel profond et deux modèles partiels peu profonds pour pouvoir raccorder le sous-modèle à la surface topographique et en raison des différences entre les données de base exploitées. Il en a résulté que les méthodes appliquées pour élaborer les différents modèles partiels du Service géologique national divergeaient parfois fortement.

Établissement du modèle 3D profond

Le modèle profond est exclusivement basé sur des données sismiques et sur des forages profonds, qui restituent très précisément les caractéristiques géologiques du sous-sol profond. Le traitement des données utilisées dans le modèle profond du Service géologique national a été décrit en détail aux points 5.3.2 à 5.3.4.

La modélisation 3D des horizons est étroitement liée à celle des failles, et réciproquement. Cette règle générale dans la modélisation 3D a été appliquée en particulier à l'élaboration du modèle 3D profond du SGN. Les failles ont été incluses indirectement dans la modélisation des horizons du fait qu'elles en décalent la position. Les horizons ont été rastérisés une première fois par interpolation bicubique sous Petrosys, en utilisant les polygones de failles sans valeurs exprimées en profondeurs comme barrières dans les calculs. Il en a résulté un premier raster comprenant toutes les failles à rejet normal. Ce résultat intermédiaire était très important pour la modélisation des failles,

car il a permis de déterminer les profondeurs de chacun des polygones des failles normales.

D'autres étapes de travail ont été nécessaires pour modéliser le déplacement le long des failles inverses, susceptible d'occasionner une superposition d'un seul et même horizon dans le modèle (point 5.3.6.2). Le toit du compartiment inférieur situé sous le chevauchement n'avait pas été calculé lors de la première rastérisation, c'est pourquoi un deuxième raster, dit raster de base, a été construit en calculant les déplacements verticaux de toutes les failles. À cet effet, il a d'abord fallu déterminer les valeurs de déplacement de chacun des polygones des failles inverses. Les paragraphes du point 5.3.6.2 consacrés à la conversion des failles en profondeurs fournissent davantage d'informations à ce sujet ainsi qu'une explication illustrée par un schéma.

Les polygones de failles avec leurs valeurs de profondeurs ont été intégrés dans les calculs au cours d'une troisième étape de rastérisation. Il en a résulté des rasters incluant les déplacements normaux des horizons définis exactement. Puis ces rasters ont été vérifiés, et adaptés si nécessaire, à l'aide de profils d'accrochage.

Au moyen du logiciel Move™, les rasters corrigés, sous la forme de nuages de points, ont été transformés conjointement avec les polygones de failles pour donner des surfaces (Triangulated Irregular Network, TIN). Il en a résulté des horizons continus dans lesquels les découpes dues aux failles (*fault cut-outs*) ont été positionnées à l'aide des polygones de failles. Pour chaque faille inverse, deux «patches» liés à l'horizon considéré ont été dessinés dans la zone de chevauchement (fig. 5-9 et 5-10), à partir de la ligne basale et de la ligne sommitale du polygone de faille, puis ils ont été ajoutés au maillage décrivant l'horizon concerné. Les failles normales autant qu'inverses ont été incluses de cette manière dans le modèle profond du Service géologique national.

Établissement des modèles 3D peu profonds

Les failles ont été modélisées avant les horizons pour élaborer les deux modèles peu profonds. Les plans de failles fournissent ainsi la structure de base des modèles. Afin d'inclure les déplacements le long des failles dans la modélisation des horizons, l'aire traitée a été subdivisée en plusieurs segments de manière à pouvoir modéliser séparément le niveau inférieur et le niveau supérieur des déplacements. Les segments de modèles n'ont été assemblés pour former des horizons que dans une étape ultérieure. Les données entrant dans les modèles peu profonds étaient très hétérogènes, comme pour la modélisation des horizons de la molasse (point 5.3.5.2). Cela est principalement dû au fait que la marge d'interprétation des profils géologiques peut varier. Les données de base ont dû faire l'objet d'une vérification et d'un tri préalable. Il était important d'étayer le calcul des horizons par des isohypses auxiliaires pour pouvoir inclure les structures plissées à grande échelle dans la modélisation des horizons. Ces lignes d'appoint ont été interpolées conjointement avec les profondeurs des profils géologiques, les altitudes des lignes d'affleurement et les données de forages, en utilisant l'outil Topo vers raster d'ArcGIS, pour générer des surfaces. Les segments d'horizons modélisés ont été décou-

pés au contact des failles sous Move™, puis reliés avec les outils de traitement proposés par ce logiciel pour fournir des horizons de surface homogène. La modélisation des horizons a été vérifiée, et adaptée si nécessaire, à l'aide de cartes des épaisseurs et de profils séparés par un intervalle régulier de 1 km.

5.3.5.4 Horizon Base du «Permo-carbonifère»

Au vu des données disponibles (MADRITSCH et al. 2013, NAEF & MADRITSCH 2014), l'horizon Base du «Permo-carbonifère» n'a pu être modélisé que dans le nord de la Suisse. La méthode appliquée à cet effet a différé des autres approches du fait que cet horizon ne faisait l'objet d'aucune interprétation sismique fiable convertie en profondeurs. L'accent a donc été mis sur la modélisation au contact potentiel avec les failles qui décalent l'horizon Base du «Mésozoïque» selon des interprétations sismiques et avec les failles profondes présumées à la base du fossé permo-carbonifère en vertu de considérations conceptuelles. La modélisation de l'horizon Base du «Permo-carbonifère» s'est par conséquent surtout fondée sur la carte tectonique synoptique du toit du cristallin de la Nagra (GREEN et al. 2013, NAEF & MADRITSCH 2014).

La profondeur de l'horizon Base du «Permo-carbonifère» devait être connue pour pouvoir élaborer un modèle exprimé en profondeurs de cet horizon et des failles qui le touchent. Deux sources étaient susceptibles de fournir des informations au sujet des profondeurs. D'une part, une modélisation gravimétrique directe a permis d'appréhender la géométrie et l'épaisseur des fossés permo-carbonifères en Suisse (ABDELFETTAH et al. 2014). Différentes cartes de filtrage gravimétriques ainsi que la carte gravimétrique de la Nagra (NAEF & MADRITSCH 2014, annexe 4-1) ont servi à cet effet. D'autre part, des cartes d'interprétation en temps pour des doubles trajets, comme la «Regionale Strukturkarte Nordschweiz: Basis Mesozoikum 1:100 000» (MADRITSCH et al. 2013, annexe 6-5) et la «Isochronenkarte für den behelfsmässigen seismischen Horizont Top Kristallin im Bereich des zentralen Nordschweizer Permokarbondrogs» (NAEF & MADRITSCH 2014, fig. 6-2) ont fourni une aide. Ces documents ont permis de calculer une vitesse moyenne de 4500 m/s dans les sédiments du fossé permo-carbonifère et de l'appliquer aux conversions en profondeurs. Les épaisseurs résultantes ont été soustraites à la profondeur de l'horizon Base du «Mésozoïque» pour établir l'horizon Base du «Permo-carbonifère».

Les déplacements dus aux failles ont été intégrés dans les horizons modélisés par traitement manuel dans le logiciel de modélisation 3D, si bien que les profondeurs du fossé permo-carbonifère correspondent assez précisément aux valeurs du modèle d'ABDELFETTAH et al. (2014). Un plan de faille continu a été modélisé là où tant l'horizon Base du «Permo-carbonifère» que l'horizon Base du «Mésozoïque» étaient décalés.

Du fait de la méthode décrite ici, les failles – et en particulier les profondeurs du fossé permo-carbonifère du nord de la Suisse tel qu'il a été modélisé – sont entachées d'une incertitude relativement grande. Le modèle du Permo-carbonifère ne doit donc être utilisé que dans un but de visualisation.

5.3.6 Modélisation des failles

5.3.6.1 La modélisation soumise à comparaison

La modélisation des failles a été abordée différemment par les divers partenaires. La méthode appliquée pour convertir les failles interprétées en unités de temps vers des unités de profondeur divergeait considérablement. Les failles modélisées en temps ont notamment été converties en profondeurs à l'aide d'un raster 3D selon le logiciel utilisé. D'autres partenaires ont utilisé les intersections entre les horizons et les failles (traces ou polygones de failles) pour convertir en profondeurs la géométrie des failles.

La manière de modéliser le déplacement d'un horizon le long d'une faille a également différé. Dans certains sous-modèles, les horizons considérés ont été décalés mais pas interrompus le long des failles. Dans d'autres, les horizons ont été sectionnés par les failles ou par les polygones de failles en 3D, si bien que les horizons décalés présentent des découpes au contact des failles (*fault cut-outs*). La plupart des méthodes d'interpolation n'autorisent pas des valeurs dédoublées sur une même verticale, c'est pourquoi la modélisation des failles inverses et des chevauchements est souvent très laborieuse. Ce problème a été résolu dans certaines aires modélisées en les subdivisant en plusieurs segments pour pouvoir modéliser séparément les niveaux inférieurs et supérieurs des structures et découper ensuite les surfaces par les failles qui les affectent.

Le tableau 5-2 synthétise les diverses étapes de travail accomplies pour modéliser les failles dans les différents sous-modèles. Il indique quel logiciel a été appliqué à quel stade, comment les failles ont été converties de temps en profondeurs, comment elles ont été prolongées horizontalement et comment leur rejet a été modélisé.

Le point suivant détaille la modélisation des failles dans le modèle profond du Service géologique national. Elle a d'abord été réalisée en temps, puis les failles considérées ont été converties en profondeurs et leur traitement s'est poursuivi en profondeurs. Dans les modèles peu profonds du Service géologique national, les failles ont été modélisées uniquement en temps.

5.3.6.2 Modélisation des failles dans le modèle profond du Service géologique national

Polygones de failles

Le recours à des polygones de failles a permis d'inclure les déplacements le long des failles dans l'interpolation des horizons. La figure 5-8 montre qu'un polygone de faille correspond à l'intersection entre une faille et un horizon. L'extension spatiale de la faille et le déplacement qu'elle occasionne sont ainsi définis précisément. Des polygones de failles ont été construits pour chaque horizon, en reliant les points d'intersection entre la faille et les niveaux supérieur et inférieur de la structure à travers plusieurs sections sismiques. Ces deux lignes se rejoignent aux extrémités de la faille en formant un polygone de faille (apex A, fig. 5-8).

Des polygones de failles primitifs ont été construits, en utilisant le logiciel Petrosys, à partir des rejets horizontaux (*heave H* dans la fig. 5-8) des failles interprétées dans les levés sismiques. Pour pouvoir calculer les déplacements minimaux

Tab. 5-2: *Vue d'ensemble des méthodes de modélisation des failles appliquées aux différents sous-modèles. Elles sont décrites en détail dans les rapports correspondants.*

Sous-modèles	Genève	Vaud	Fribourg	Berne	Service géologique national Modèle profond	Service géologique national Modèle peu profond NW	Service géologique national Modèle peu profond NE	Lac de Constance
Nombre de failles	19	57	190	139	133	19	113	26
Modélisation des failles en temps	Oui	Oui	Oui	Non	Non			Non
Logiciel	Petrel	IHS Kingdom	Move™	-	-	-	-	-
Remarques	Failles modélisées sous forme de rasters 3D	Des polygones de failles ont été appliqués comme barrières dans la modélisation des horizons	Des traces de failles ont été appliquées comme barrières dans la modélisation des horizons	Des polygones de failles ont été appliqués comme barrières dans la modélisation des horizons	Des polygones de failles ont été appliqués comme barrières dans la modélisation des horizons			Des polygones de failles ont été appliqués comme barrières dans la modélisation des horizons
Conversion en profondeurs								
Logiciel	Petrel	IHS Kingdom						IHS Kingdom
Méthode	Pillar Gridding	Dynamic Depth Conversion						
Remarques	Conversion en profondeurs des plans de failles	Conversion en profondeurs des bâtonnets	Projection des traces de failles sur des horizons exprimés en profondeurs	Conversion en profondeurs des bâtonnets	Conversion en profondeurs à l'aide des polygones de failles			Conversion en profondeurs à l'aide des polygones de failles
Modélisation des failles en profondeurs								
Logiciel		IHS Kingdom, Move™	Move™		Move™	Move™	Move™	GoCAD
Remarques		Basée sur des bâtonnets (en temps) et des polygones de failles	Basée sur des traces de failles	Basée sur des bâtonnets (en temps) et des polygones de failles	Basée sur des polygones de failles	Basée sur des isolignes entre failles tirées de profils géologiques	Basée sur des polygones de failles	Basée sur des polygones de failles
Prolongement horizontal								
Méthode	Aucune	Aucune	Relativement au déplacement, mais pas rapport déplacement/longueur	Rapport déplacement/longueur par horizon	Rapport déplacement/longueur par horizon	Basé sur la carte géologique	Rapport déplacement/longueur	Prolongement de 500 m ou d'environ 1/3 de la longueur

Extrémités des failles	Coupées verticalement	Coupées verticalement.	Coupées verticalement	Arrondies pour chaque horizon	Elliptiques	Elliptiques	Arrondies pour chaque horizon	Elliptiques	Arrondies pour chaque horizon	Anguleuses, mais pas coupées verticalement
Modélisation des rejets										
Modélisation des découpes	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
Remarques			Rejet sous la forme de gradin dans l'horizon	Rejet sous la forme de gradin dans l'horizon						
Modélisation des failles inverses	Non	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui

(D_{min} dans la fig. 5-8B) à partir des rejets horizontaux, il a fallu convertir localement les interprétations sismiques en profondeurs en se basant sur les trois forages profonds les plus proches. Les failles ont ainsi été subdivisées en trois catégories:

- Catégorie 1: Le plus faible déplacement minimal apparent interprété dans une section sismique est >80 m ET la faille peut être suivie sur plusieurs sections sismiques.
- Catégorie 2: Le plus faible déplacement minimal apparent interprété dans une section sismique est >80 m OU la faille peut être suivie sur plusieurs sections sismiques.
- Catégorie 3: Le plus faible déplacement minimal apparent interprété dans une section sismique est <80 m ET la faille n'a été interprétée que dans une seule section sismique.

Pour les failles qui décalent plusieurs horizons, c'est le plus grand déplacement d'horizon qui a déterminé l'attribution à une catégorie. Les polygones de failles des catégories 1 et 2 ont été utilisés pour prolonger les failles horizontalement au-delà des sections sismiques. Les failles de la catégorie 3 n'ont plus été considérées dans la modélisation.

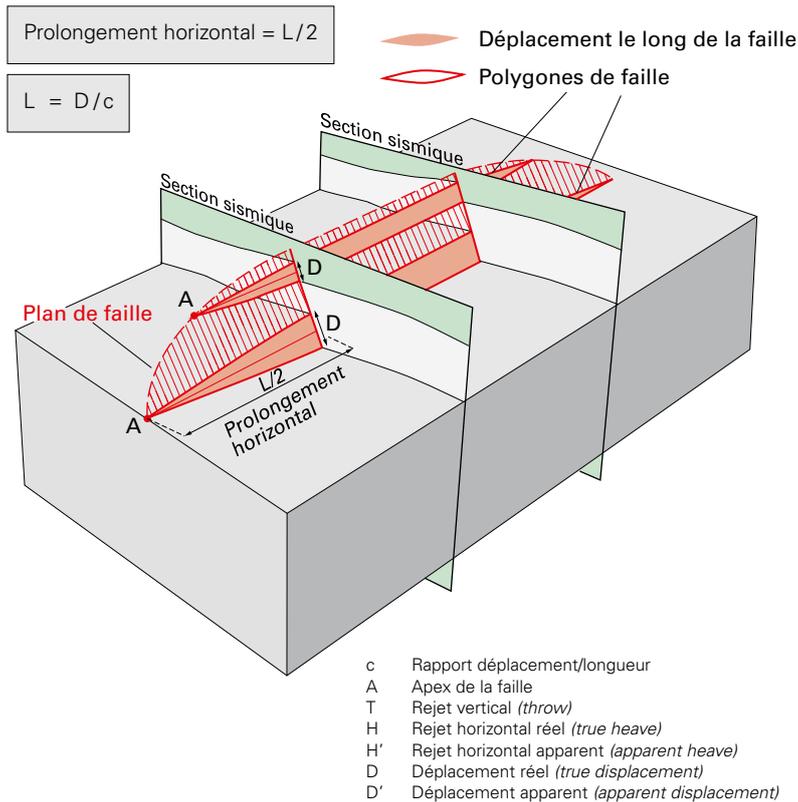
La loi généralement reconnue qui lie le déplacement maximal généré par une faille (D_{max}) à la longueur de cette faille (L) a été appliquée pour prolonger chaque faille au-delà des sections sismiques (WATTERSON 1986, WALSH & WATTERSON 1988, COWIE & SCHOLZ 1992, GILLESPIE et al. 1992, SCHULTZ & FOSSEN 2002, KIM & SANDERSON 2005, TORABI & BERG 2011).

Le rapport déplacement/longueur (c) dépend du type de roche, du type de faille (inverse, normale ou décrochante) et de sa taille (centimétrique à kilométrique). La mise en regard des rapports déplacement/longueur pour des failles connues dans le bassin molassique ainsi que les données de TORABI & BERG (2011) ont fourni une bonne corrélation linéaire permettant de tirer la valeur $c = 0,05$. La longueur d'une faille a alors été calculée en divisant le déplacement maximal par c . Les failles ont été prolongées au-delà des sections sismiques à raison de la moitié de leur longueur calculée dans chaque direction.

Il est essentiel de connaître le déplacement occasionné par une faille pour être à même de la prolonger horizontalement. Comme les données sismiques ne sont généralement pas perpendiculaires aux structures, elles mesurent souvent le déplacement apparent et non le déplacement réel. C'est le déplacement minimal (*dip-slip*) qui a été utilisé ici pour éviter de surestimer la longueur des failles (fig. 5-8). En parcourant une faille selon sa direction, le déplacement maximal se situe généralement au milieu de la faille pour diminuer vers ses extrémités. Comme la position de la section sismique par rapport au plan de la faille est inconnue et que cette section ne se trouve généralement pas exactement au milieu de la faille, il faut partir du principe que les longueurs de failles calculées ici tendent à être trop faibles.

Il est important de connaître la véritable orientation d'une faille, car sa longueur dépend de son rejet horizontal réel (H). Une différence dans l'orientation d'une faille modifie l'angle

A Prolongement d'une faille



B Déplacement minimal

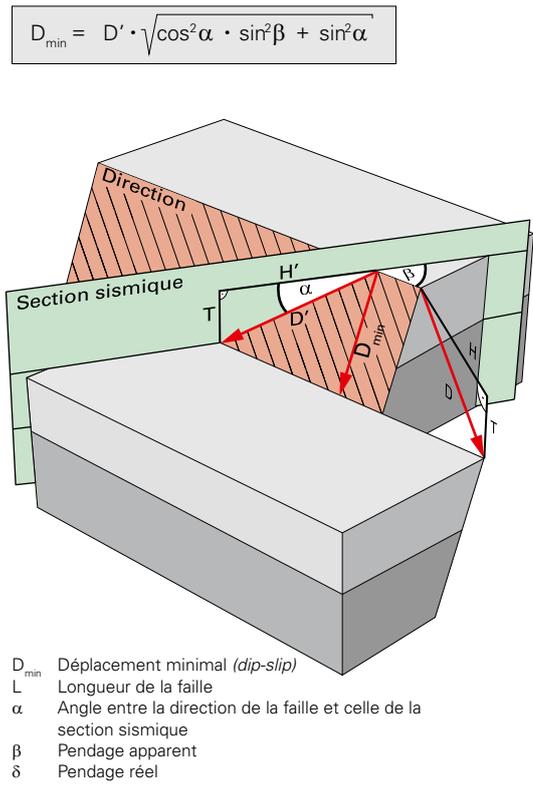


Fig. 5-8: Représentation schématique du rapport déplacement/longueur utilisé pour déterminer le prolongement horizontal d'une faille (A). Calcul du déplacement minimal d'un horizon le long d'une faille (B).

α entre l'orientation de la faille et celle de la section sismique, ce qui influence le rejet horizontal apparent (H') et par conséquent le déplacement maximal (D_{\max}) et ainsi la longueur de la faille (L).

L'orientation des failles qui ont pu être suivies à travers plusieurs sections sismiques a été donnée par les lignes les reliant d'une section à l'autre. L'orientation des failles qui n'ont pu être interprétées que dans une seule section sismique a été orientée conformément à l'orientation générale des failles locales. Cette information provient de cartes géologiques (AG25) et de cartes structurales du sous-sol (MEIER 2010, NAEF & MADRITSCH 2014, ROTH et al. 2010).

Conversion en profondeurs des failles

La figure 5-9 illustre une faille normale et une faille inverse en vue cartographique et en coupe. Dans le cas des failles inverses, les profondeurs relatives à un horizon sont dédoublées dans le secteur du polygone de faille, ce qui est mis en évidence par la surface en hachuré gris. Du fait de ce chevauchement, deux méthodes de conversion des polygones de failles en profondeurs ont été appliquées en fonction du type de faille.

Les polygones de failles ont d'abord été insérés comme barrières sans valeurs de profondeur dans un premier raster calculé avec le logiciel Petrosys. Ce faisant, les horizons ont

été décalés dans le sens normal au contact des polygones de failles. Cela a permis de déterminer les points fixes de la construction des polygones des failles normales exprimées en profondeurs. La profondeur exacte du sommet et de la base de ces failles (nt et nb dans la fig. 5-10) était déjà connue en termes métriques à partir des sections sismiques. La profondeur des apex a été tirée directement des horizons rastérisés, ce qui a permis de construire les polygones de failles exprimés en profondeurs en utilisant les points fixes. Il a fallu rééchantillonner les polygones de failles pour générer exactement les déplacements le long des polygones lors d'une deuxième étape de rastérisation.

Des étapes supplémentaires ont été nécessaires pour convertir les polygones de failles inverses en profondeurs. Les données sismiques ont permis d'établir la profondeur de leur sommet (rt dans la fig. 5-10), tandis que la profondeur de leur base (rb dans la fig. 5-10) a été calculée au terme d'une deuxième rastérisation (point 5.3.5.3). Les données sismiques exprimées en profondeurs, sans les valeurs de la partie supérieure du chevauchement, ont été utilisées à cet effet. La profondeur des deux apex (A) a été tirée du premier raster des horizons. Les polygones liés aux failles inverses, exprimés en profondeurs, ont alors été construits à l'aide de ces points fixes (rt , rb et A).

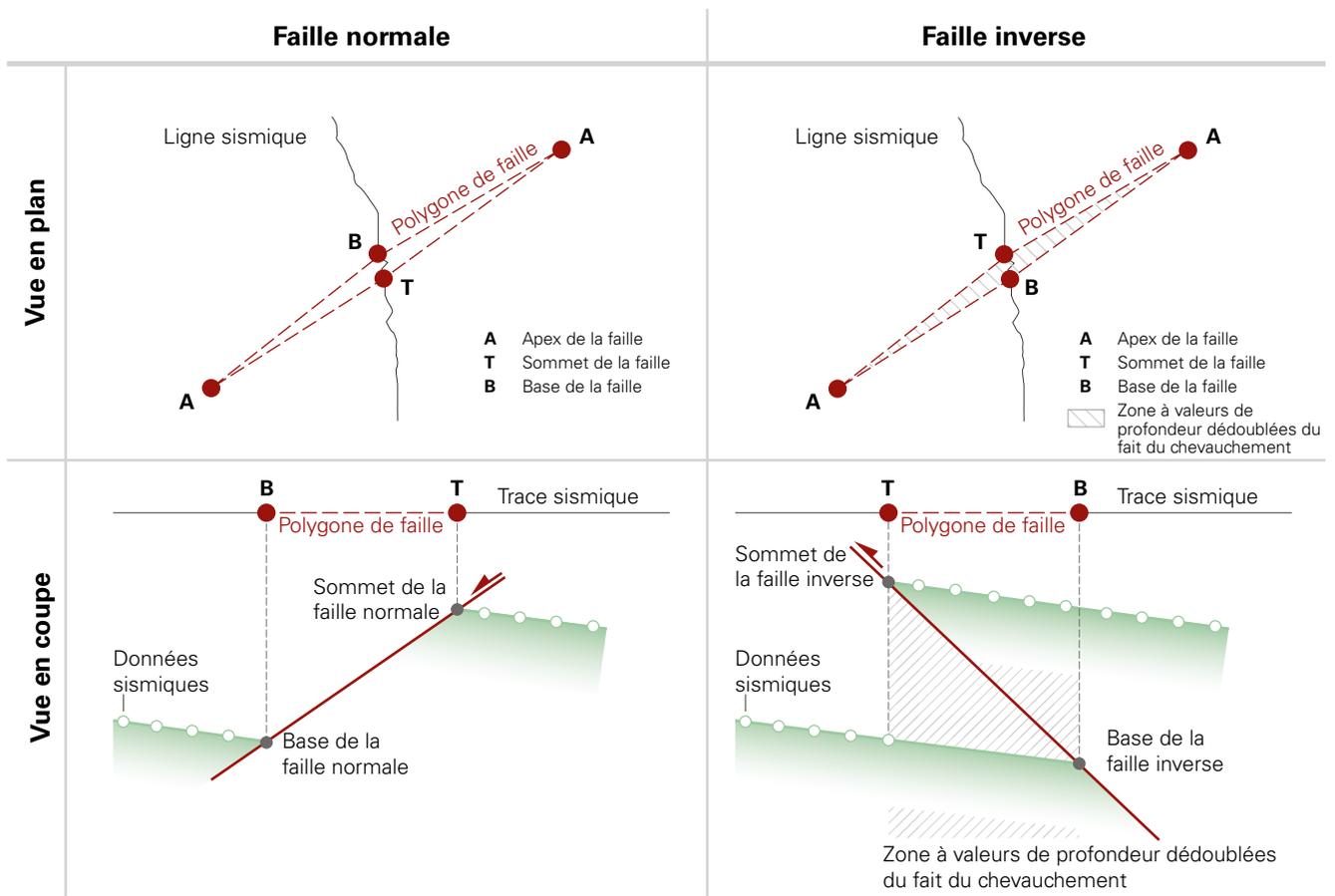


Fig. 5-9: Vue cartographique et en coupe du polygone relatif à une faille normale et à une faille inverse. Ce polygone est défini par les points fixes correspondant au sommet (T) et à la base de la faille (B) ainsi que par deux apex. Dans le cas d'une faille inverse, il existe une zone à valeurs de profondeur dédoublées du fait du chevauchement.

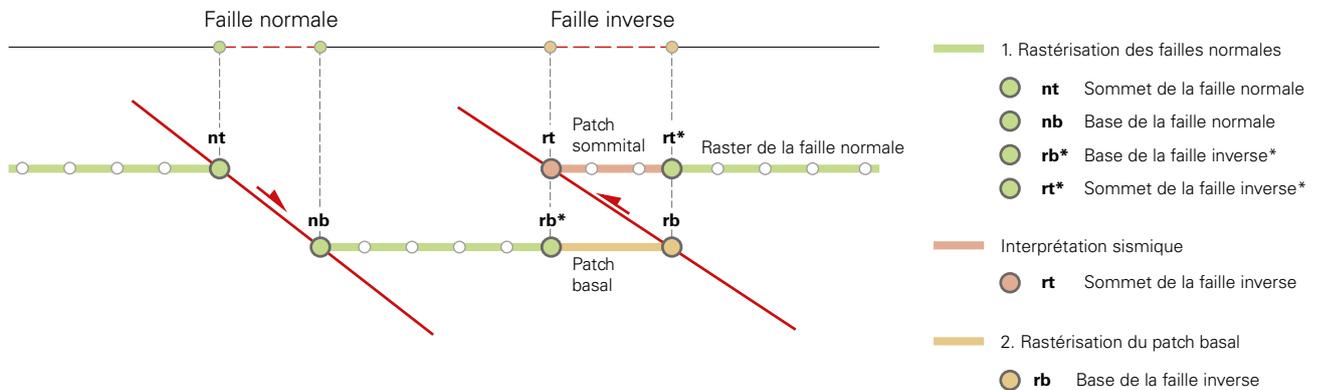


Fig. 5-10: Étapes suivies pour déterminer les valeurs de profondeur relatives à un polygone de faille normale et de faille inverse. La profondeur des points fixes (nt, nb) et des deux apex appartenant à la faille normale a été établie dans un premier calcul de rastérisation (en vert clair). Dans cette étape, les failles inverses ont été rastérisées comme les failles normales, ce qui a donné les points rb* et rt*. Les points fixes de la faille inverse (rt et rb) ont alors été déterminés à l'aide de l'interprétation sismique (en rouge) et d'un deuxième calcul de rastérisation (en jaune).

Modélisation des plans de failles

Les plans de failles ont été modélisés avec le logiciel Move™ en considérant les polygones de failles, les bâtonnets (*fault sticks*) et les lignes d'affleurement tridimensionnelles. Ces plans ont été affinés par l'ajout de bâtonnets et d'isolignes supplémentaires. Les interpolations sont basées sur la méthode

de triangulation de Delaunay, car elle intègre exactement tous les sommets (vertex) dans les surfaces interpolées. Cette démarche, dans laquelle les sommets des polygones de failles ont été pris en compte aussi bien dans le calcul des horizons que dans la modélisation des failles, a permis de garantir un contact «étanche» entre les horizons et les failles.

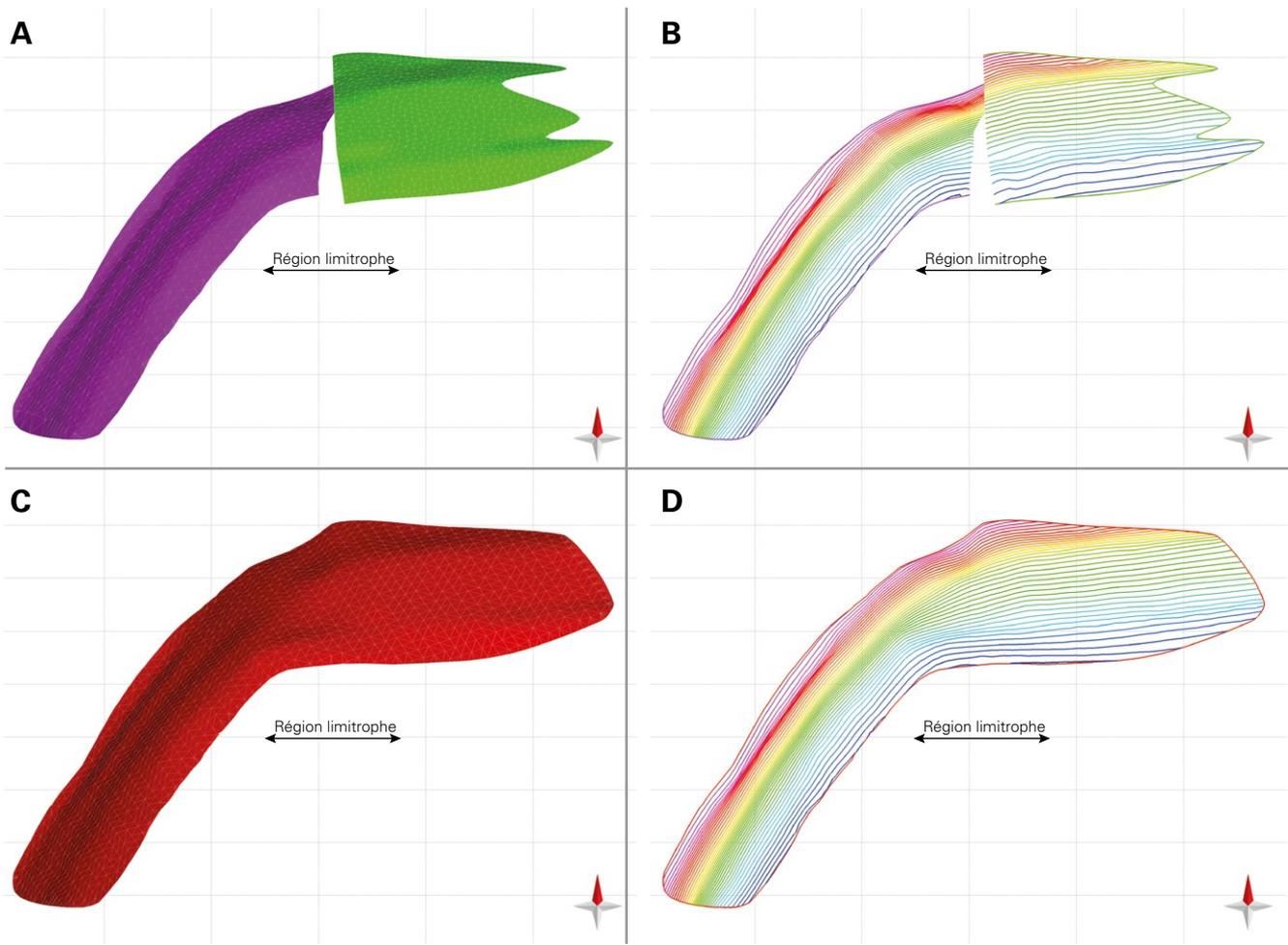


Fig. 5-11: Ajustement d'une zone de failles dans une région limitrophe à la jonction de deux sous-modèles. Les différences d'altitude entre les deux sous-modèles sont visibles tant dans la représentation sous forme de surfaces (A) que sous forme d'isohypses (B). Les divergences entre les isohypses de la faille ont été levées de manière à obtenir finalement un seul plan de faille harmonisé. C) Vue du plan de faille. D) Vue des isohypses de la faille.

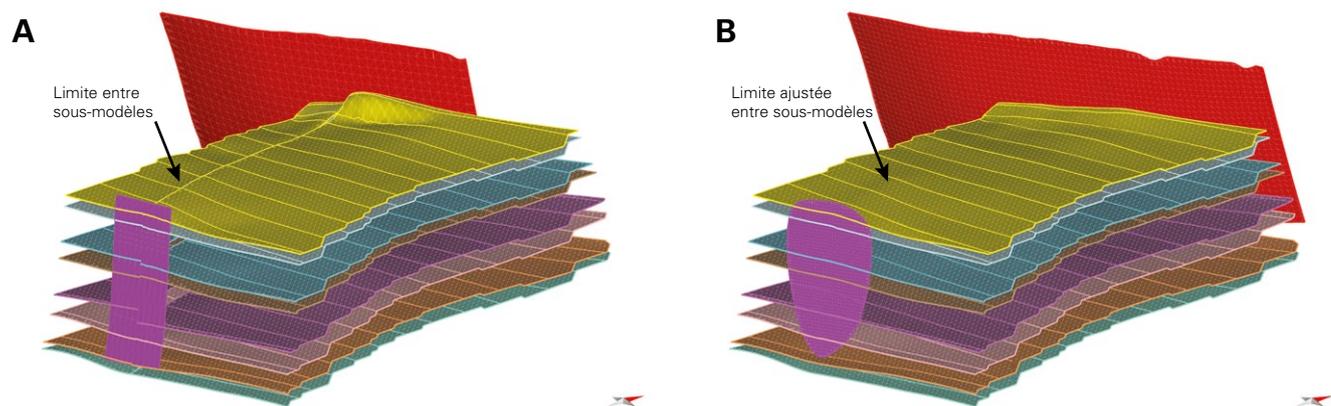


Fig. 5-12: Illustration de l'adaptation réciproque d'horizons à l'aide de profils régulièrement espacés. A) Les horizons situés à gauche et à droite de la limite entre les sous-modèles, construits par différents partenaires, étaient à des altitudes différentes. B) Ces horizons ont été adaptés, ce qui a permis de les assembler.

5.3.7 Ajustement à la jonction entre les sous-modèles

Comme expliqué précédemment (point 5.3.1), les divers sous-modèles élaborés dans le cadre de GeoMol17 se sont fondés sur différentes approches techniques, données de base et conceptions géologiques. Les styles de travail respectifs sont toujours bien reconnaissables dans les modèles obtenus malgré la définition préalable de conditions-cadre et de zones de recouvrement à la jonction entre les sous-modèles. Il a fallu faire concorder chaque horizon et chaque faille des sous-modèles pour que GeoMol17 satisfasse à l'exigence d'un modèle tridimensionnel du bassin molassique suisse continu, géologiquement cohérent et visuellement homogène. À cet effet, des régions limites géologiquement pertinentes (aires hachurées dans la fig. 1-2), délimitées par des bandes situées de part et d'autre des lignes de jonction entre les modèles, avaient été convenues entre les partenaires impliqués avant le début de la modélisation. Dans ces régions,

les divers partenaires ont travaillé au-delà de leurs aires de modélisation respectives, jusque dans la bande limitrophe étudiée par le partenaire voisin. Les failles et les horizons ainsi traités à double dans les zones de jonction ont servi de base pour ajuster les sous-modèles les uns aux autres.

L'assemblage de deux plans de failles modélisés différemment dans une zone de jonction a généralement consisté à faire concorder leurs isohypses (fig. 5-11). Puis un nouveau plan de faille harmonisé a été construit avec les isohypses adaptées de la faille.

Les divergences entre les horizons modélisés dans le cadre de deux sous-modèles contigus ont principalement été corrigées à l'aide de coupes. Les profils perpendiculaires à la limite (fig. 5-12) permettent de construire une transition douce entre les sous-modèles. Il a ainsi été possible d'accorder simultanément tous les horizons pour tenir compte de la géométrie interne du modèle (point 6.2.3).

6. Résultats et discussion

6.1 GeoMol 15

GeoMol15 comprend la modélisation tridimensionnelle de dix horizons géologiques ainsi que des principales zones de failles affectant le bassin molassique suisse. Ce modèle se fonde essentiellement sur les données de l'Atlas sismique du bassin molassique suisse (SASMB). Les améliorations par rapport au modèle de l'atlas ont consisté à raccrocher les horizons modélisés aux forages profonds, à les relier à la surface topographique et à modéliser les failles (point 6.1.1) et les horizons de la molasse (point 6.1.2.2). En regard du modèle détaillé GeoMol17, GeoMol15 présente en particulier l'avantage d'être un modèle simple et général, harmonisé avec le modèle européen à ses bordures occidentale et orientale. Il est cependant limité au nord par la ligne d'affleurement de la base du «Cénozoïque», si bien que des zones géologiquement plus complexes, comme les structures de Born et de la Lägern, y sont coupées. Dans la région genevoise, GeoMol15 a été élaboré par le service géologique français (BRGM) et par l'Université de Genève, dans le cadre du modèle pilote Genève-Savoie.

Le modèle à couches continues GeoMol15 est présenté à la figure 6-1, avec des profils et des blocs donnant un aperçu de ses zones internes. Pour en améliorer la visualisation, les volumes situés entre les horizons modélisés ont été remplis graphiquement. Les multiples profils d'orientation NW-SE témoignent des variations latérales d'ouest en est. Les deux profils A et B montrent les dix horizons géologiques et les failles interceptées qui ont été modélisés dans GeoMol15. Les horizons du modèle GeoMol15 ont une allure généralement régulière et ils présentent peu de fluctuations d'épaisseur imputables à la modélisation. Cela est principalement dû au modèle utilisé comme base (SASMB), dont l'établissement s'est achevé par un lissage des irrégularités issues de l'interpolation.

Contrairement à GeoMol17 (chap. 6.2), les horizons et les zones de failles ont été modélisés d'une manière très simplifiée dans GeoMol15. Cela se manifeste notamment par le fait que les horizons ne sont pas décalés au contact des failles et que les zones de failles composées de plusieurs éléments tectoniques sont représentées par une seule surface.

Profil A

Le profil A s'étend sur une cinquantaine de kilomètres du nord-ouest au sud-est (fig. 6-1), de Bienne à Thoune en passant par Berne. Il présente la structure biseauté typique du bassin molassique, dans lequel l'épaisseur des unités de la molasse augmente du nord-ouest vers le sud-est pour y atteindre jusqu'à 5000 m. Les sédiments crétacés, dont l'épaisseur sous le bassin molassique suisse décroît vers le NE, de

300 m près de Genève (fig. 6-5) jusqu'à 0 m, sont encore juste recoupés par le profil A (fig. 6-1). Disparaissant à l'est de Bienne et de la vallée de l'Aar, ils sont absents sous le reste du bassin (profil B). Au nord du profil A, l'anticlinal de Mörigen et trois failles simplifiées de la structure de Hermrigen sont visibles près du Jaissberg. Il apparaît clairement ici que les décalages des horizons le long des failles n'ont pas été modélisés dans GeoMol15. Le profil recoupe le chevauchement principal de la molasse subalpine dans sa partie méridionale. Les unités de la molasse n'ont pas été distinguées dans le modèle au sud de cette structure.

Profil B

Le profil B s'étend sur une soixantaine de kilomètres du nord-ouest au sud-est (fig. 6-1), de Rekingen à Einsiedeln en passant par la Lägern et Zurich, puis en longeant le lac de Zurich. Il donne un aperçu du modèle GeoMol15 dans sa partie orientale. On y voit clairement que l'épaisseur des sédiments mésozoïques est inférieure à celle du profil A situé plus à l'ouest.

Le profil B recoupe la zone de failles de Stadel-Irchel ainsi que le chevauchement principal du Jura à la Lägern. Ces structures complexes ont été modélisées d'une manière volontairement très simplifiée dans GeoMol15. La structure de Stadel-Irchel a été représentée par une seule surface, sous la forme d'un chevauchement dirigé vers le nord-ouest du côté ouest (profil B, fig. 6-1) et d'une faille normale inclinée vers le nord-ouest du côté est. Si le chevauchement principal du Jura a été considéré sous la forme d'un plan de faille, les horizons impliqués dans l'anticlinal de la Lägern n'ont pas été modélisés dans GeoMol15. Le profil recoupe la zone triangulaire à son extrémité SE (point 6.1.1).

6.1.1 Failles

Dans le cadre de GeoMol15, les principales zones de failles ont été modélisées sur la base des interprétations du SASMB. Les zones à traiter ont été sélectionnées sur la base des failles simplifiées du SASMB (ENGLER & SOMMARUGA 2013). Elles correspondent aux failles principales, interprétées tant lors de l'exploration sismique que sur la carte tectonique de la Suisse. Dix-huit zones de failles ont donc été retenues selon divers critères tels que la fiabilité des données, l'exactitude de leur position dans l'espace et le caractère connu ou non des zones de failles interprétées (fig. 6-2). Le chevauchement basal de la molasse subalpine et les failles de la zone triangulaire ont été insérés sous la forme de failles conceptuelles. Il a été renoncé à modéliser un horizon de décollement dans les sédiments triasiques (point 6.2.1.1).

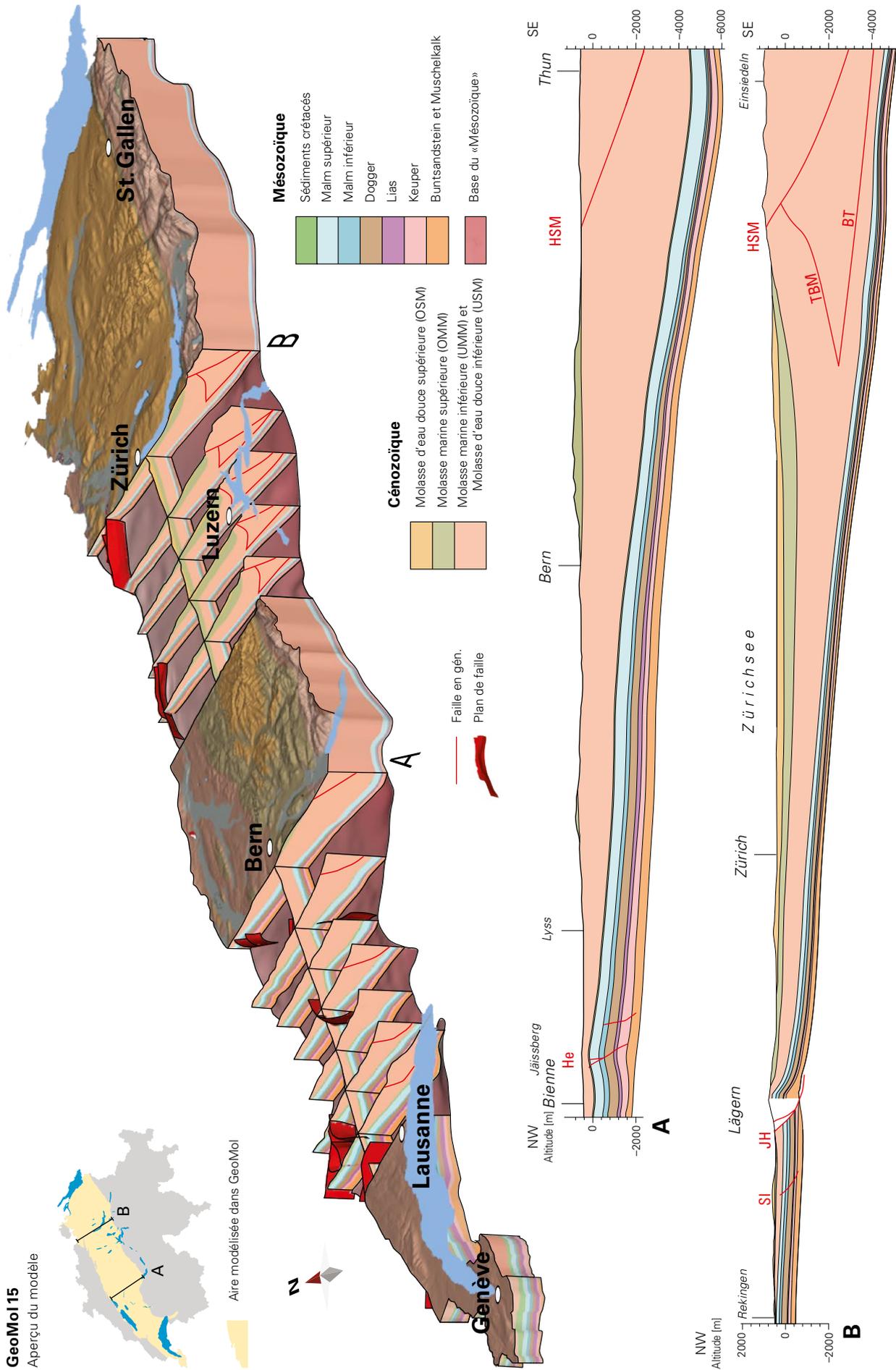


Fig. 6-1: Aperçu du modèle GeoMol15. Les blocs et les coupes exposent la constitution interne du modèle GeoMol15 avec une exagération verticale d'un facteur deux. Les profils A et B illustrent son caractère simple et général. Les principales zones de failles y ont été fortement simplifiées et modélisées sans déplacement des limites de couches. Zones de failles modélisées: BIH = Baden - Irchel - Herdern, BT = chevauchement basal de la zone triangulaire, He = Herrrigen, HSM = chevauchement principal de la molasse subalpine, JH = chevauchement principal du Jura, TBM = limite tectonique sud de la molasse du Plateau.

Ainsi, seuls les principaux plans de failles ont été modélisés et les horizons n'ont pas été décalés le long des failles.

Les structures du bassin molassique diffèrent considérablement entre le sud-ouest et le nord-est ainsi qu'entre le pied sud du Jura au nord-ouest et le secteur de la molasse subalpine au sud-est. Les principales zones de failles modélisées dans GeoMol15 sont décrites succinctement ci-après de l'ouest vers l'est.

Partie occidentale du bassin molassique

L'ouest du bassin molassique est dominé par de grandes failles décrochantes, dextres et orientées WNW-ESE ainsi que senestres et orientées N-S, qui forment un canevas conjugué. Elles décalent ou limitent les structures anticlinales orientées NE-SW (zone de failles d'Essertines, fig. 6-2). Dans GeoMol15, la plupart de ces failles décrochantes, à l'exception de la zone de failles de La Sarraz, ont été modélisées sous la forme d'un seul plan de faille dans un but de simplification. Il s'agit là d'une représentation très simplifiée de zones tectonisées complexes, souvent caractérisées par de larges zones très fracturées comportant des rejets inverses et normaux, dites structures en éventail.

La structure de La Lance, décrite dans de nombreuses publications (BERTSCHY 1958, MEIA 1966, GORIN et al. 2003, IBELE 2011), est une grande faille décrochante dextre orientée WNW-ESE qui satisferait aux critères définissant une zone de failles dans le modèle GeoMol15 en raison de sa taille et de son importance. Mais elle n'y a volontairement pas été intégrée, car elle n'a pas pu être suivie dans le SASMB, principalement faute de sections sismiques dans le lac de Neuchâtel. Il n'a généralement pas été possible de bien localiser dans les sections sismiques les failles décrochantes raides présentant des déplacements faibles. C'est pourquoi d'autres failles décrochantes connues, comme les failles dextres orientées NNW-SSE de la zone de failles des vallées de l'Aar et de la Gürbe (Aaretal- et Gürbetal-Störungsszone) n'ont pas été modélisées dans GeoMol15.

Dans la région de Fribourg, le modèle comprend deux plans de failles senestres orientés N-S qui limitent ensemble la zone de Fribourg à l'est. Il s'agit là également d'une représentation très simplifiée d'une zone tectonisée complexe, comprenant plusieurs segments de failles en échelons (MEIER 2010, IBELE 2011, ABEDNEGO 2015, VOUILLAMOZ et al. 2017). Des investigations microsismiques ont révélé le long de cette zone tectonisée une faible activité sismique limitée aux unités du Mésozoïque tardif et du Cénozoïque (ABEDNEGO 2015, VOUILLAMOZ 2015). Ce système de failles senestres orientées N-S se poursuit vers le nord et passe à une zone de failles frontales orientées SW-NE à proximité de Hermrigen (MEIER 2010). L'anticlinal de Mörigen (fig. 2-4) est un pli-faille inverse qui ressort de cette structure de chevauchement à vergence nord. Dans le modèle GeoMol15, la structure de Hermrigen se compose de trois plans de failles distincts qui passent d'est en ouest à une seule faille décrochante raide d'orientation N-S (fig. 6-2).

Partie centrale du bassin molassique

La zone de failles de Born-Engelberg (fig. 2-4) est constituée dans le modèle GeoMol15 de trois plans de failles

d'orientation WSW-ENE à W-E. Cette structure, composée à l'ouest d'un chevauchement à vergence sud, se sépare vers l'est en deux failles à vergence nord. C'est ainsi que l'anticlinal de Born-Engelberg se subdivise en deux bombements à l'est de l'Aar: l'anticlinal de Born-Engelberg proprement dit et l'anticlinal de Kölliken au sud du précédent (fig. 2-4). Contrairement à GeoMol17 (point 6.2.1.3) les horizons stratigraphiques situés au voisinage de la zone de failles de Born-Engelberg n'ont pas été modélisés dans GeoMol15. Il en va de même pour le chevauchement principal du Jura, pour lequel un chevauchement principal et un chevauchement secondaire divergent ont certes été modélisés alors que les horizons plissés de l'anticlinal de la Lägern ont été découpés.

Partie orientale du bassin molassique

Le linéament de Baden-Irchel-Herdern (NAGRA 2014, MALZ et al. 2016) s'étend au nord du chevauchement principal du Jura, sur une distance de 60 km, en direction ENE-WSW (fig. 6-2). Il correspond vraisemblablement à la bordure sud du fossé permo-carbonifère du nord de la Suisse (DIEBOLD 1991, NAEF et al. 1995, NAGRA 2008). La partie orientale de cette vaste zone tectonisée, à caractère extensif, se suit de la zone de distension du socle cristallin jusqu'au-dessus de la base du «Cénozoïque» en traversant les sédiments mésozoïques. En direction de l'ouest, la partie de cette zone de distension affectant le Mésozoïque présente progressivement un caractère compressif (MADRITSCH et al. 2013). Comme l'anticlinal de Stadel-Irchel comprend des chevauchements à vergence nord aussi bien que sud, il a été récemment qualifié de structure «en queue de poisson» (MADRITSCH et al. 2013, MALZ et al. 2016). Le linéament de Baden-Irchel-Herdern et la zone de failles de Stadel-Irchel ont été fortement simplifiés dans GeoMol15, en étant modélisés comme un seul plan de faille: d'une faille inverse à vergence nord sur son côté ouest, il passe à une faille normale plongeant vers le nord dans la région d'Irchel. Le plan de faille modélisé atteint les sédiments triasiques dans la partie occidentale de la zone de failles et il descend au-dessous de la base du «Mésozoïque» dans sa partie orientale.

Au sud du lac de Constance se trouve la zone de failles de Saint-Gall-Romanshorn, un système de failles normales d'orientation NNE-SSW. L'interprétation structurale d'un nouveau jeu de données sismiques 3D a révélé une zone tectonisée en plusieurs phases (HEUBERGER et al. 2016). Mais, sur la base des interprétations du SASMB, cette zone de failles a été réduite dans le modèle GeoMol15 à un plan de faille unique qui s'incurve au nord selon une orientation NW-SE pour plonger vers le nord-est.

Au sud de l'aire modélisée, l'accent a été mis sur la zone la plus externe de la molasse subalpine, une zone de transition structurale caractérisée par des chevauchements raides à vergence nord. Depuis l'est de la vallée de l'Aar jusqu'au sud de l'Allemagne et à l'Autriche, des rétrochevauchements à vergence sud-est constituent la zone triangulaire conjointement avec le chevauchement principal de la molasse subalpine (fig. 6-2 et 6-3). Ce chevauchement ainsi que la limite tectonique de la molasse du Plateau ont été modélisés sous la forme d'un plan de faille continu d'orientation SW-NE. L'architecture tectonique complexe de la zone triangulaire,

Zones de failles modélisées
GeoMol15

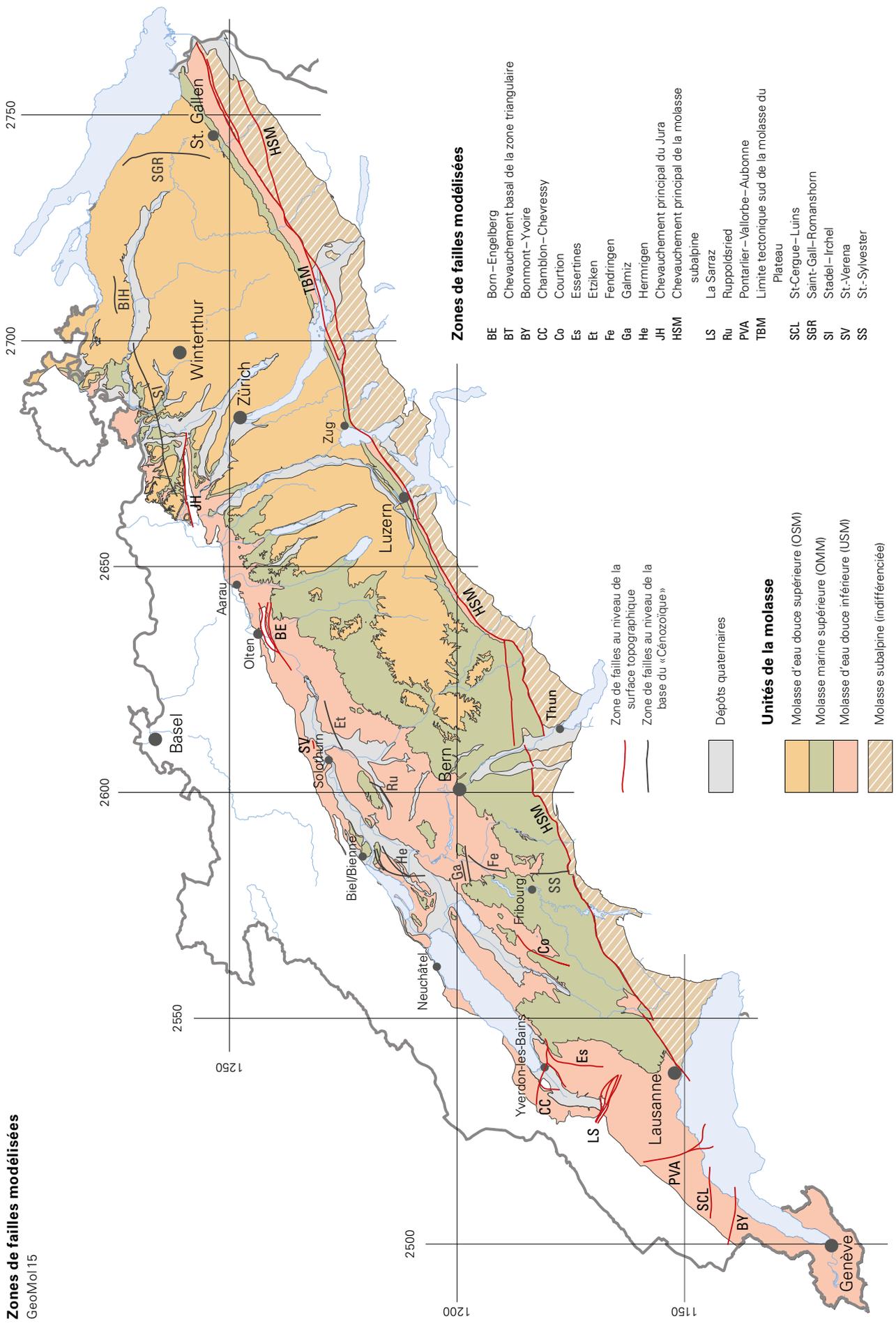


Fig. 6-2: Vue d'ensemble des zones de failles modélisées dans GeoMol15.

Zones de failles modélisées

Zone triangulaire

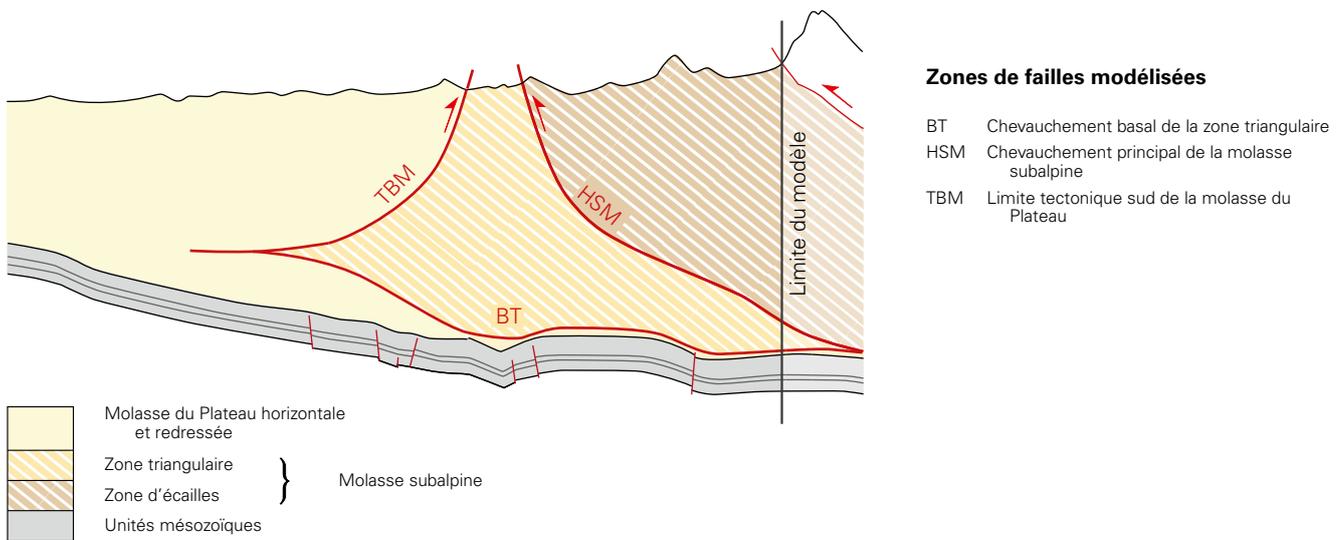


Fig. 6-3: Représentation schématique de la zone triangulaire et des failles conceptuelles modélisées.

avec ses trains de plis brisés, ses couches déjetées et ses compartiments rocheux écaillés (BACHMANN et al. 1982, PFIFNER 2009, SCHLUNEGGER et al. 2016, SOMMARUGA et al. 2012, VOLLMAYR 1992, VOLLMAYR & WENDT 1987) a été très fortement simplifiée dans les modèles GeoMol15 et GeoMol17, où elle a été limitée aux failles conceptuelles indiquées dans la figure 6-3. La modélisation de ces trois zones de failles s'est principalement fondée sur les cartes de l'AG25, ainsi que sur les transects du SASMB dans le domaine profond (point 5.2.5.2).

6.1.2 Horizons

Dix horizons géologiques ont été modélisés dans le cadre de GeoMol, sur la base des interprétations du SASMB. Comme évoqué précédemment, les horizons considérés dans GeoMol15 diffèrent très peu des résultats de SOMMARUGA et al. (2012). Les différences concernent surtout le domaine subsuperficiel. Les horizons du toit du rocher et des unités de la molasse ont été modélisés en plus dans GeoMol15.

6.1.2.1 Toit du rocher

Le toit du rocher a été modélisé en même temps pour GeoMol15 et GeoMol17. La seule différence réside dans le niveau de détail. Les résultats obtenus ne sont pas exposés ici, étant fournis dans la description détaillée du toit du rocher dans GeoMol17 (point 6.2.2.1).

6.1.2.2 Horizons molassiques

Par rapport au modèle du SASMB, les deux horizons molassiques Toit de l'USM et Toit de l'OMM ont été modélisés en plus dans GeoMol15. L'épaisseur totale des sédiments molassiques entre la base du «Cénozoïque» et le toit

du rocher est indiquée dans la figure 6-4. On y voit distinctement une augmentation en forme de coin de cette épaisseur du NW au SE, qui passe de 0 m au sud du Jura à plus de 5500 m dans la zone de la molasse subalpine (hachuré blanc dans la fig. 6-4). Les isopaques des horizons cénozoïques sont disposées régulièrement du sud-ouest vers le nord-est. Les petites variations locales sont dues à des approfondissements du toit du rocher.

6.1.2.3 Horizons mésozoïques

La modélisation des horizons de la base du «Cénozoïque» à la base du «Mésozoïque» est principalement fondée sur des données sismiques raccrochées à des forages profonds. Par rapport aux horizons modélisés dans le SASMB (SOMMARUGA et al. 2012), GeoMol15 a mis l'accent sur la connexion entre l'interprétation sismique et la géologie en surface et sur l'accrochage exact des horizons modélisés aux forages profonds. Les modifications ont essentiellement porté sur l'horizon Base du «Cénozoïque» et elles ont consisté à le caler sur les profils géologiques et sur les lignes d'affleurement (AG25). Les horizons sous-jacents suivent les structures de la base du «Cénozoïque» compte tenu de leur épaisseur (SASMB).

Les unités mésozoïques sont constituées d'une épaisseur de 0 à 400 m de sédiments crétacés, 800 à 2000 m de sédiments jurassiques et 150 à 800 m de sédiments triasiques. La profondeur et l'épaisseur des différents horizons ne sont pas détaillées ici, mais elles figurent dans les explications relatives au SASMB. La figure 6-5 montre que l'épaisseur des unités mésozoïques (des sédiments crétacés aux sédiments triasiques) diminue nettement d'ouest en est. Elle passe de plus de 3500 m à Genève à moins de 1000 m en Suisse orientale, en passant par environ 2500 m à Fribourg. Les isolignes sont sensiblement orientées N-S conformé-

Carte des épaisseurs

Sédiments cénozoïques dans GeoMol 15

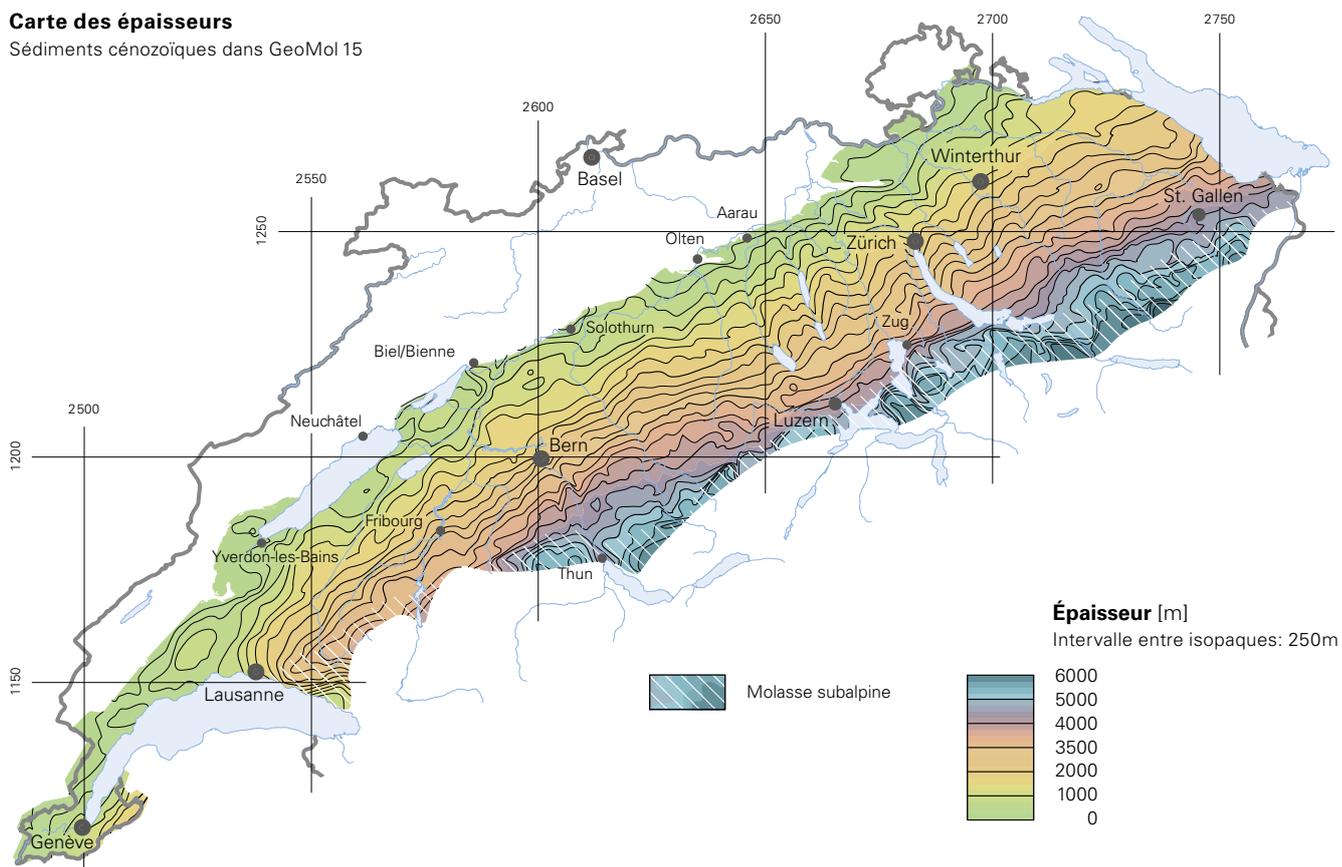


Fig. 6-4: Carte des épaisseurs des sédiments cénozoïques dans GeoMol15.

Carte des épaisseurs

Sédiments mésozoïques dans GeoMol 15

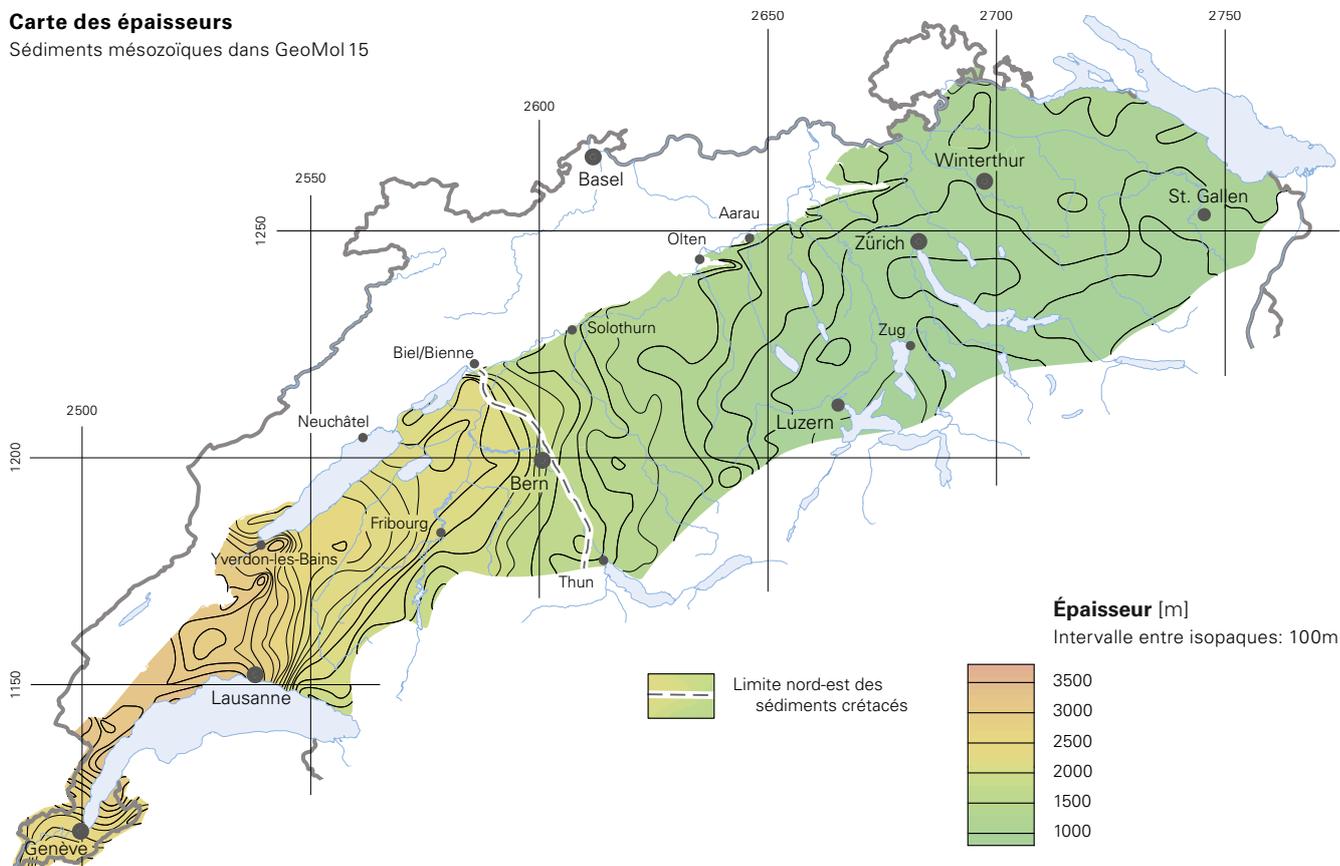


Fig. 6-5: Carte des épaisseurs des sédiments mésozoïques dans GeoMol15.

ment à ces grandes différences d'épaisseur d'ouest en est (SOMMARUGA et al. 2012). Les sédiments crétacés s'aminçissent de plus en plus de Genève (>300 m) en direction de l'est, pour disparaître complètement le long de la vallée de l'Aar, entre le lac de Thoune et le forage profond Hermrigen-1 (fig. 2-3 et 6-5).

6.2 GeoMol 17

GeoMol17 est un modèle géologique tridimensionnel complet et détaillé qui se compose de plusieurs sous-modèles. Ceux-ci ont été harmonisés à leurs limites et assemblés pour constituer un modèle 3D homogène du bassin molassique suisse. Les différences les plus marquantes par rapport à GeoMol15 résident dans la modélisation plus complète des zones de failles (fig. 6-6) et dans l'accrochage des horizons modélisés à la surface topographique. Les mêmes horizons géologiques ont été modélisés dans GeoMol17 et dans GeoMol15. L'horizon Toit de l'UMM a été construit en plus dans les sous-modèles Vaud et Fribourg. Il n'a en revanche pas été identifié clairement dans les données sismiques des autres sous-aies, aussi n'y a-t-il pas été modélisé. Dans la partie nord-est de GeoMol17, l'horizon Base du «Permo-carbonifère» a été modélisé pour représenter le fossé permo-carbonifère du nord de la Suisse.

Les données de base, en particulier l'interprétation sismique mais aussi le choix de la méthode d'interpolation, influencent très fortement le modèle obtenu. Les résultats peuvent diverger largement selon les données entrantes et le paramétrage choisi lorsqu'on applique comme ici un procédé de calcul semi-automatique. Des décalages de plusieurs centaines de mètres ont notamment été mesurés au voisinage des failles dans les zones de jonction où les deux sous-modèles se recouvrent (point 6.2.3). Ils n'apparaissent plus au final du fait que les limites ont été ajustées (point 5.3.7), mais il faut impérativement être conscient de ces différences lorsque l'on considère les résultats.

La figure 6-6 fournit un aperçu de la constitution interne de GeoMol17 en présentant des profils ainsi que les failles modélisées. La présentation sous la forme de blocs comme dans la figure 6-1 n'a pas été retenue ici pour améliorer la visibilité des nombreux plans de failles modélisés. La vue du modèle a été orientée de manière à mettre l'accent sur la représentation des failles. À cette échelle, la modélisation des horizons, pourtant plus détaillée, ne diffère guère de celle de GeoMol15. Les variations irrégulières de l'épaisseur d'une unité donnée sont souvent dues à la manière dont les horizons ont été modélisés dans GeoMol17 – un à un et conformément aux données disponibles.

Les traces des profils A et B de la figure 6-6 sont les mêmes que dans la figure 6-1, ce qui permet de comparer les deux modèles. C'est pourquoi les profils ne font pas l'objet d'une description générale ici pour privilégier l'exposé des différences entre les deux modèles.

Profil A

Le style structural du nord-ouest du modèle est marqué par la structure de Hermrigen, une structure chevauchante

qui oblique sur son côté ouest pour former une faille décrochante senestre d'orientation N-S (fig. 6-8). Dans GeoMol17, cette structure se compose de plusieurs chevauchements à vergence nord-ouest et d'un chevauchement conjugué à vergence sud-est. Le chevauchement principal de la structure de Hermrigen forme une structure soulevée (*pop-up*) avec le rétrochevauchement local. Le mode de modélisation des déplacements au sein de cette structure dans GeoMol17 a pour effet que l'épaisseur des couches y diffère entre GeoMol17 et GeoMol15 (déplacements non modélisés, point 6.1.1) malgré le calage des horizons sur le forage profond Hermrigen-1.

Au sud-est de Berne les unités mésozoïques présentent des structures faiblement plissées dues à des chevauchements situés plus à l'ouest (fig. 6-8). Ces structures, très locales, disparaissent complètement un peu à l'est de la trace du profil. De vastes structures plissées ont été modélisées essentiellement dans les sédiments cénozoïques. Le synclinal du Belpberg apparaît dans le profil A du fait de la modélisation du contact USM-OMM (fig. 2-4).

La zone triangulaire a été observée dans l'interprétation sismique au sud du bassin molassique, quelques kilomètres à l'ouest de la faille transversale de la vallée de l'Aar (Aaretal-Querstörung). Le profil A (fig. 6-6) présente une coupe à travers la zone triangulaire modélisée, qui a été décalée par la faille transversale dextre de la vallée de la Gürbe (Gürbetal-Querstörung).

Profil B

Les différences les plus marquantes entre les profils B de GeoMol17 (fig. 6-6) et GeoMol15 (fig. 6-1) apparaissent du côté nord-ouest. La modélisation du fossé permo-carbonifère du nord de la Suisse dans GeoMol17, plus détaillée mais probablement encore très simplifiée, se fonde sur l'interprétation sismique des données provenant de la deuxième étape du plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes» (MADRITSCH et al. 2013, NAEF & MADRITSCH 2014, NAGRA 2014).

Le profil B recoupe le linéament de Baden – Irchel – Herdern situé au bord du fossé permo-carbonifère et la structure complexe «en queue de poisson» de la zone de failles de Stadel – Irchel (MALZ et al. 2016). Cette interaction entre des chevauchements à vergence nord et des rétrochevauchements à vergence sud, avec les déplacements qu'ils impliquent, ont été modélisés en détail dans GeoMol17 (point 6.2.1.5). Contrairement à GeoMol15, les chevauchements à vergence nord liés au chevauchement principal du Jura et à l'anticlinal de la Lägern ont été modélisés complètement et non pas interrompus.

Le redressement de la molasse du Plateau en bordure sud du bassin molassique, connu à partir d'affleurements géologiques, peut être observé au sud-est du profil. Les unités de la molasse à fort pendage vers le nord et les failles de la zone triangulaire y sont décalées d'une manière dextre par la faille transversale de Schindellegi d'orientation NW-SE (HANTKE et al. 2009).

6.2.1 Failles

Dans le modèle GeoMol17, contrairement à GeoMol15, les zones de failles du bassin molassique, au nombre d'environ

GeoMol17

Aperçu du modèle

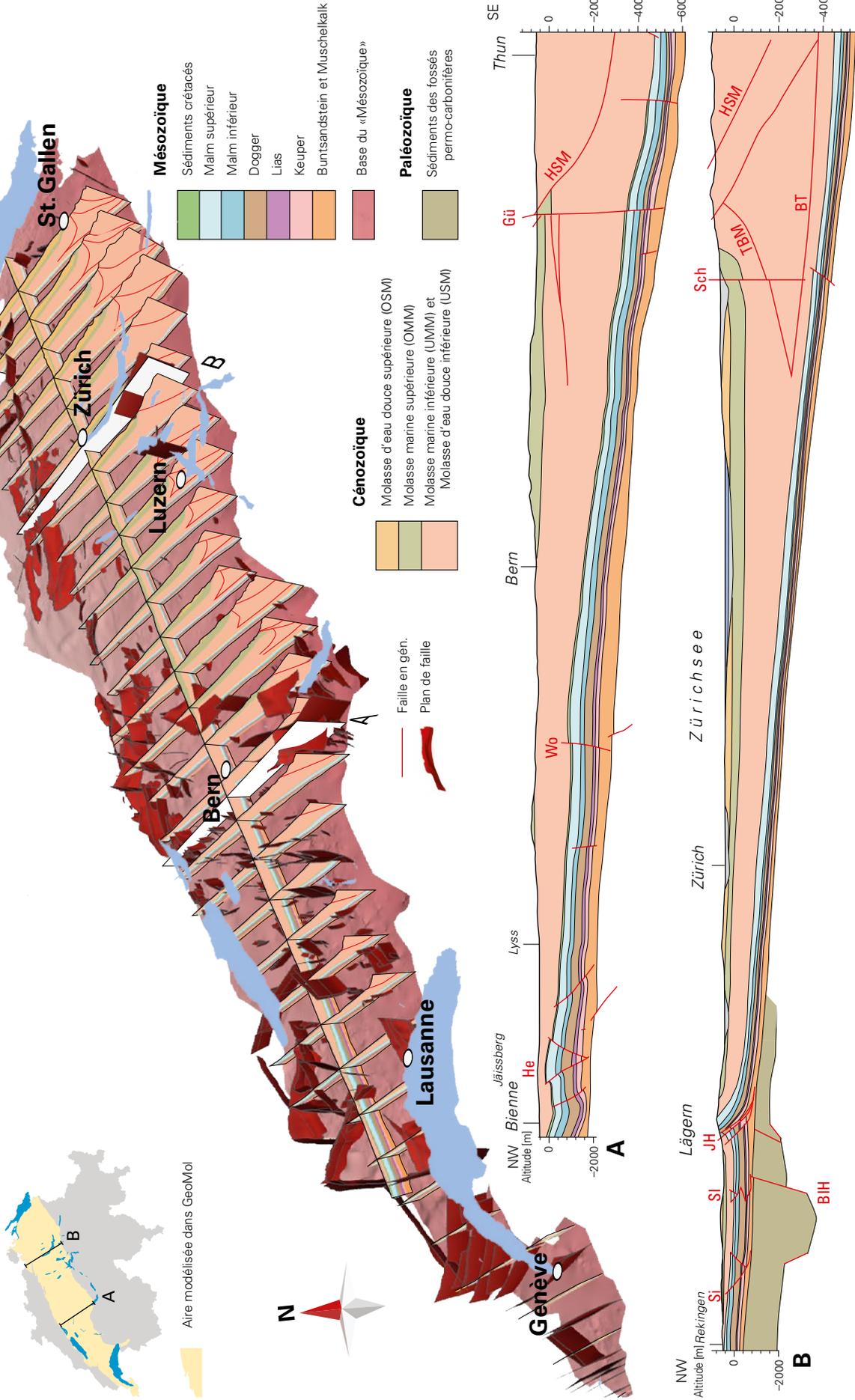


Fig. 6-6: Aperçu du modèle GeoMol17. Les coupes et la représentation 3D des plans de failles exposent la constitution interne du modèle GeoMol17 avec une exagération verticale d'un facteur quatre. Les profils A et B illustrent bien le caractère détaillé de la modélisation des failles dans GeoMol17. Ils peuvent être comparés avec ceux de GeoMol15 (fig. 6-1). Zones de failles modélisées: BIH = Baden - Irchel - Herdern, BT = chevauchement basal de la zone triangulaire, Gü = Gürbetal, He = Hermmrigen, HSM = chevauchement principal de la molasse subalpine, JH = chevauchement principal du Plateau, SI = Siglistorf, Sch = Schindellegi, St = Stadel - Irchel, TBM = limite tectonique sud de la molasse du Plateau, Wo = Wohlen.

500, ont été modélisées d'une manière très détaillée. L'apparence générale des plans de failles varie d'une sous-aire modélisée à l'autre en raison des différences entre les méthodes appliquées pour les modéliser. Ces différences se manifestent en particulier par la forme des failles, qui dépend étroitement de la manière dont elles ont été prolongées et terminées latéralement (tab. 5-2). Dans les sous-modèles Genève, Vaud, Fribourg et Lac de Constance, les failles modélisées ont été coupées à angle droit, aussi ont-elles une forme anguleuse. Dans les sous-modèles Berne et Service géologique national, les plans de failles ont été prolongés en tenant compte du rapport déplacement-longueur (point 5.3.6.2), aussi présentent-ils des extrémités irrégulièrement arrondies à elliptiques. Les failles atteignant la surface topographique ont été terminées verticalement en tenant compte de l'intersection de leur plan avec le modèle altimétrique décrivant le toit du rocher. Les failles ne traversant pas entièrement les sédiments molassiques ont généralement été prolongées dans une certaine mesure au-dessus de la base du «Cénozoïque». Les failles ont été prolongées verticalement vers le bas de la même manière, sauf quand elles étaient raccrochées à un décollement basal situé dans les sédiments triasiques. Dans ce cas, elles ont été modélisées de manière à se terminer dans le Keuper ou le Muschelkalk.

De nombreux petits plans de failles modélisés, ayant une longueur limitée à quelques kilomètres, ont été construits individuellement. Les autres failles, en particulier les grandes zones tectonisées qui s'étendent sur 20 à 30 km, forment conjointement des systèmes continus. Ils ont généralement été modélisés de manière simplifiée, à l'exemple des structures en éventail liées aux failles décrochantes.

Les points suivants donnent une vue d'ensemble du modèle de failles de GeoMol17, qui est ensuite décrit en détail et discuté sur la base d'un choix de zones de failles.

6.2.1.1 Vue d'ensemble

Différents types de failles ont été modélisés dans le bassin molassique suisse: failles normales, failles inverses et chevauchements ainsi que failles décrochantes. Ils apparaissent en nombre sensiblement égal à la base du «Cénozoïque»: un tiers de toutes les failles modélisées atteignant cet horizon sont normales, un tiers inverses et un tiers décrochantes (fig. 6-7). La répartition des failles à la base du «Mésozoïque» se modifie en revanche fortement. La diminution de la qualité des données sous les unités mésozoïques ainsi que les priorités assignées à la construction du modèle ont conduit à ce que les failles entaillant le socle cristallin soient modélisées très différemment dans les divers sous-modèles.

La description des zones de failles qui suit se réfère aux résultats obtenus dans le cadre du modèle GeoMol17.

Failles normales

La plupart des failles normales modélisées ont une orientation NE-SW parallèle à l'orientation principale du bassin d'avant-pays nord-alpin. En règle générale, elles décalent les couches mésozoïques en abaissant relativement les compartiments situés sur leur flanc sud-est. Quelques failles anti-

thétiques ont été modélisées essentiellement dans le sud du bassin. Il arrive que les grandes failles y déplacent considérablement les sédiments mésozoïques (jusqu'à 400 m).

L'orientation ENE-WSW est aussi courante parmi les failles normales. Apparaissant surtout au nord-est de l'aire modélisée, elle est liée au fossé permo-carbonifère du nord de la Suisse.

Des failles normales d'orientation N-S qui décalent les unités mésozoïques en abaissant relativement les compartiments situés sur leur flanc est ont aussi été modélisées, principalement dans la partie orientale du bassin molassique suisse (p.ex. zone de failles de Saint-Gall). Leur déplacement vertical modélisé atteint 230 m à certains endroits.

Dans le sous-modèle Berne, une grande importance a été accordée aux failles affectant le socle cristallin, c'est pourquoi l'orientation des failles normales touchant la base du «Cénozoïque» (fig. 6.8) et la base du «Mésozoïque» (fig. 6-9) y diffère parfois sensiblement.

Failles inverses et chevauchements

L'orientation spatiale des failles inverses et des chevauchements affectant le bassin molassique suisse présente une tendance marquée du NE-SW à l'ENE-WSW (fig. 6-7). La plupart des chevauchements apparaissent dans la zone subjurassienne, soit dans le domaine distal du bassin. Ces failles à vergence nord-ouest et à vergence sud-est sont parallèles aux anticlinaux du Jura plissé et elles tournent d'environ 30° de l'ouest à l'est du bassin molassique suisse.

Les chevauchements apparaissent souvent en lien avec d'autres failles. C'est ainsi que, dans la région Bienne-Soleure, des chevauchements d'orientation NE-SW et à vergence nord-ouest passent à des rampes latérales d'orientation N-S, comme dans la zone de failles de Hermrigen. Dans la zone de Stadel-Irchel, des chevauchements se ramifient en une structure complexe «en queue de poisson» (point 6.2.1.5).

La plupart des chevauchements et des failles inverses sont reliés à des décollements dans les évaporites du Trias. C'est pourquoi l'ampleur du déplacement dans les unités mésozoïques affectées varie souvent pour diminuer généralement vers le haut au-dessus du Trias.

Le chevauchement principal de la molasse subalpine dans la partie méridionale du bassin molassique suisse et la limite tectonique sud de la molasse du Plateau à l'est de la vallée de l'Aar ont une orientation NW-SE et forment ensemble une zone triangulaire (point 6.1.1). Ces chevauchements ne décalent que les sédiments cénozoïques, c'est pourquoi ils ne sont pas reportés sur la carte de la figure 6-8.

Failles décrochantes

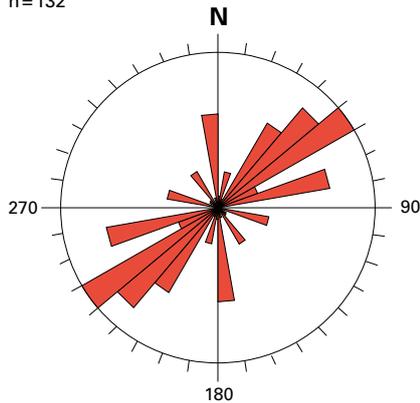
Trois orientations principales de failles décrochantes sont bien visibles au niveau de la base du «Cénozoïque». La plupart d'entre elles ont une orientation NNW-SSE, la deuxième orientation la plus fréquente étant WNW-ESE et la troisième NNE-SSW (fig. 6-7). En règle générale, les failles décrochantes sont très raides et traversent l'ensemble de la couverture sédimentaire. On ne sait pas encore exactement si elles atteignent le socle cristallin, c'est pourquoi elles se terminent dans les évaporites du Trias dans la plupart des sous-modèles. Les données sismiques relatives aux aires

Types de failles

Base du «Cénozoïque»

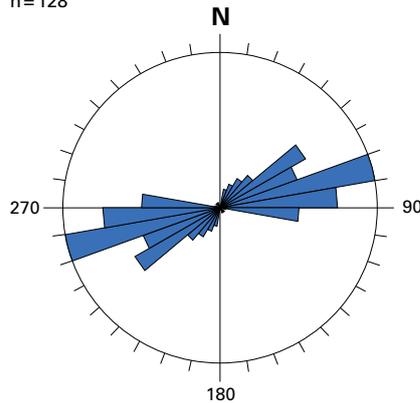
Failles normales

n=132



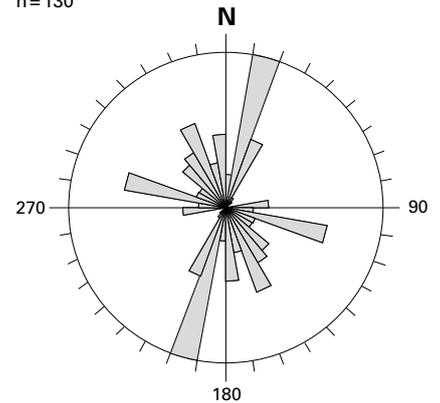
Failles inverses et chevauchements

n=128



Failles décrochantes

n=130

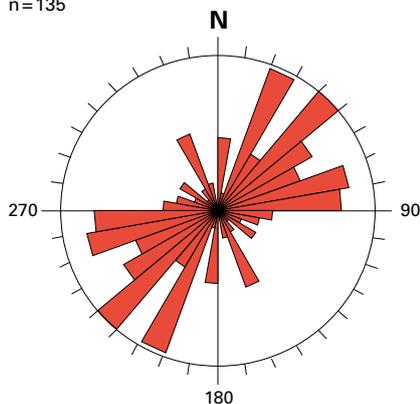


Types de failles

Base du «Mésozoïque»

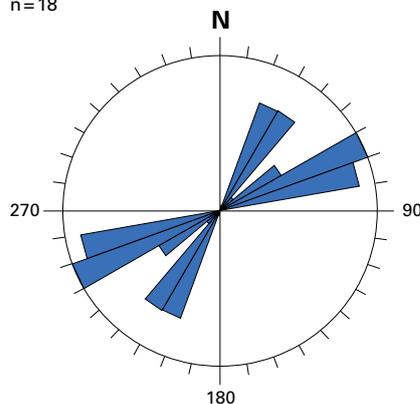
Failles normales

n=135



Failles inverses et chevauchements

n=18



Failles décrochantes

n=36

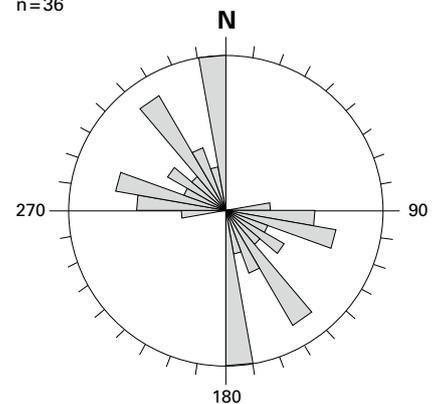


Fig. 6-7: Rosaces des failles normales, inverses et décrochantes modélisées à la base du «Cénozoïque» et à la base du «Mésozoïque» (GeoMol17). L'indication de leur orientation a été pondérée en fonction de leur longueur.

modélisées Genève et Vaud révèlent que ces accidents y atteignent le socle cristallin.

La plupart des failles décrochantes d'orientation NNE-SSW indiquent des mouvements de sens senestre. Les deux autres orientations principales correspondent au vaste système de failles conjuguées composé de failles décrochantes dextres d'orientation WNW-ESE et senestres d'orientation NNW-SSE.

Dans les données sismiques, des failles décrochantes sont repérables sous la forme de zones diffuses d'une largeur pouvant aller jusqu'à plusieurs kilomètres. Elles se composent souvent d'une seule faille principale profonde qui se ramifie de plus en plus vers le haut pour former une structure en éventail complexe.

Décollement basal

La présence d'un décollement basal dans les évaporites du Keuper et du Muschelkalk est généralement admise (point 2.4.4). Mais il a été renoncé à associer une faille conti-

nue à cet horizon dans le modèle GeoMol17. D'une part, une faille horizontale parallèle à la stratification est difficile à détecter dans les données sismiques et, d'autre part, la terminaison orientale de ce niveau de décollement n'a pas encore été tirée définitivement au clair. Il faut aussi admettre que ce décollement correspond plutôt à une large zone de déformation qu'à un seul plan de faille discret.

Un décollement basal a certes été modélisé dans GeoMol17, mais il a plutôt valeur d'horizon de construction. Ainsi, les plans de failles modélisés qui ne traversent pas la base du «Mésozoïque» ont pu être interrompus à l'aide de cet horizon.

6.2.1.2 Zones de failles dans le bassin molassique suisse

L'agencement spatial des zones de failles modélisées dans GeoMol17 est décrit aux points suivants, d'ouest en est, pour les sédiments cénozoïques, les sédiments mésozoïques et le socle cristallin.

Zones de failles modélisées dans les unités cénozoïques

Des zones de failles affectant uniquement les sédiments molassiques n'ont été modélisées qu'aux alentours de la zone triangulaire subalpine (point 6.1.1). Toutes les autres failles touchant le «Cénozoïque» sont des structures enracinées dans le «Mésozoïque» ou dans le socle cristallin. Certaines d'entre elles atteignent la surface topographique et d'autres se terminent à l'intérieur de la molasse.

Zones de failles modélisées dans les unités mésozoïques

À l'intérieur des unités mésozoïques, on observe non seulement une diminution générale du degré de déformation d'ouest en est, mais aussi un changement marqué des caractéristiques structurales. Cela ressort clairement sur la carte de l'ensemble des zones de failles modélisées au niveau de la base du «Cénozoïque» (fig. 6-8). Les principales zones de failles modélisées dans GeoMol15 ont été présentées au point 6.1.1 et cette description s'applique également à la plupart des zones de failles de GeoMol17, bien qu'elles y soient modélisées plus en détail.

À l'ouest, ce sont de grandes failles transformantes, parfois conjuguées (p. ex. Pontarlier-Vallorbe-Aubonne et La Sarraz), qui prédominent. La zone de Fribourg comprend une série de petites failles en échelons d'orientation N-S.

La bordure sud du bassin molassique suisse comprend des failles normales d'orientation WSW-ENE, alors que des failles inverses et des chevauchements apparaissent principalement en bordure nord du bassin, au sud du Jura. Dans la région Bienne-Soleure, ces chevauchements sont parfois décalés par de grandes failles transformantes d'orientation NNE-SSW. Dans la partie centrale et orientale du bassin, quelques failles revêtant la plupart du temps la forme de petites failles normales en échelons ont été modélisées.

Il y a également lieu de signaler les failles transformantes dextres d'orientation NNW-SSE des vallées de l'Aar et de la Gürbe (Aaretal- et Gürbetal-Transformstörung). Elles définissent ensemble une zone tectonisée de plus de 5 km de largeur qui décale les unités mésozoïques et cénozoïques. Les structures compressives de l'anticlinal de Stadel-Irchel, qui forment un édifice complexe «en queue de poisson», sont traitées en détail au point 6.2.1.5. Au nord-est de ces structures se trouvent la faille de Neuhausen, d'orientation NW-SE, et la faille du Randen, située une dizaine de kilomètres plus à l'ouest. L'interprétation des données sismiques indique, dans le secteur de ces deux failles normales, un déplacement marqué de la base des unités mésozoïques en direction du nord-est (NAGRA 2008, EGLI et al. 2016).

Zones de failles modélisées dans le socle cristallin

La modélisation des failles situées sous la base du «Mésozoïque» n'était pas prioritaire dans le cadre de GeoMol17. C'est pourquoi ces accidents tectoniques ont été modélisés avec une précision variable selon l'aire considérée.

Le style structural à l'ouest du lac Léman est marqué par de grandes failles décrochantes majoritairement senestres. Observables sans ambiguïté dans les unités mésozoïques, elles peuvent être reliées avec des failles affectant le socle cristallin dans le modèle GeoMol17. Mais cette continuité entre failles de la couverture sédimentaires et du socle cris-

tallin n'était pas clairement perceptible dans les données sismiques. C'est pourquoi ces surfaces tectoniques ont certes été modélisées, mais sans décaler l'horizon Base du «Mésozoïque».

Des interactions entre failles décrochantes conjuguées, senestres d'orientation NNW-SSE et dextres d'orientation NE-SW, peuvent être discernées plus loin vers l'est, entre Aubonne et Yverdon. Les zones tectonisées de Pontarlier-Vallorbe-Aubonne, du Suchet, de Rances-Baulmes et d'Essertines comptent parmi les failles senestres et celles de La Sarraz, de Baulmes-Chamblon et de La Lance parmi les failles dextres. Outre les failles transversales, des failles inverses à vergence nord-ouest ou vers le sud-est sont également observables entre deux. Ces failles ont été prolongées jusque dans le socle cristallin en admettant que des failles locales du socle étaient actives après la phase de poussée à distance (MARCHANT & BAUER 2016; pl. I, profils 4, 5 et 6).

D'après des études récentes, les failles décrochantes de la zone de Fribourg (point 6.1.1), avec les zones de failles senestres de Rossens, St. Silvester et Fendingen (fig. 6-8), ne se poursuivent pas dans le socle cristallin (SOMMARUGA et al. 2016, VOULLAMOZ et al. 2017, GRUBER 2017). GRUBER et al. (2016) ont donné la priorité aux failles affectant les sédiments mésozoïques et cénozoïques dans GeoMol17, mais ils n'excluent pas la présence de structures dans le socle. La manière dont elles sont reliées aux structures de la couverture sédimentaire ne peut toutefois pas être expliquée de manière univoque sur la seule base des données sismiques.

Plusieurs failles normales d'orientation NNE-SSW, qui ne décalent que le socle cristallin, ont été modélisées dans la région située entre Bienne et Soleure.

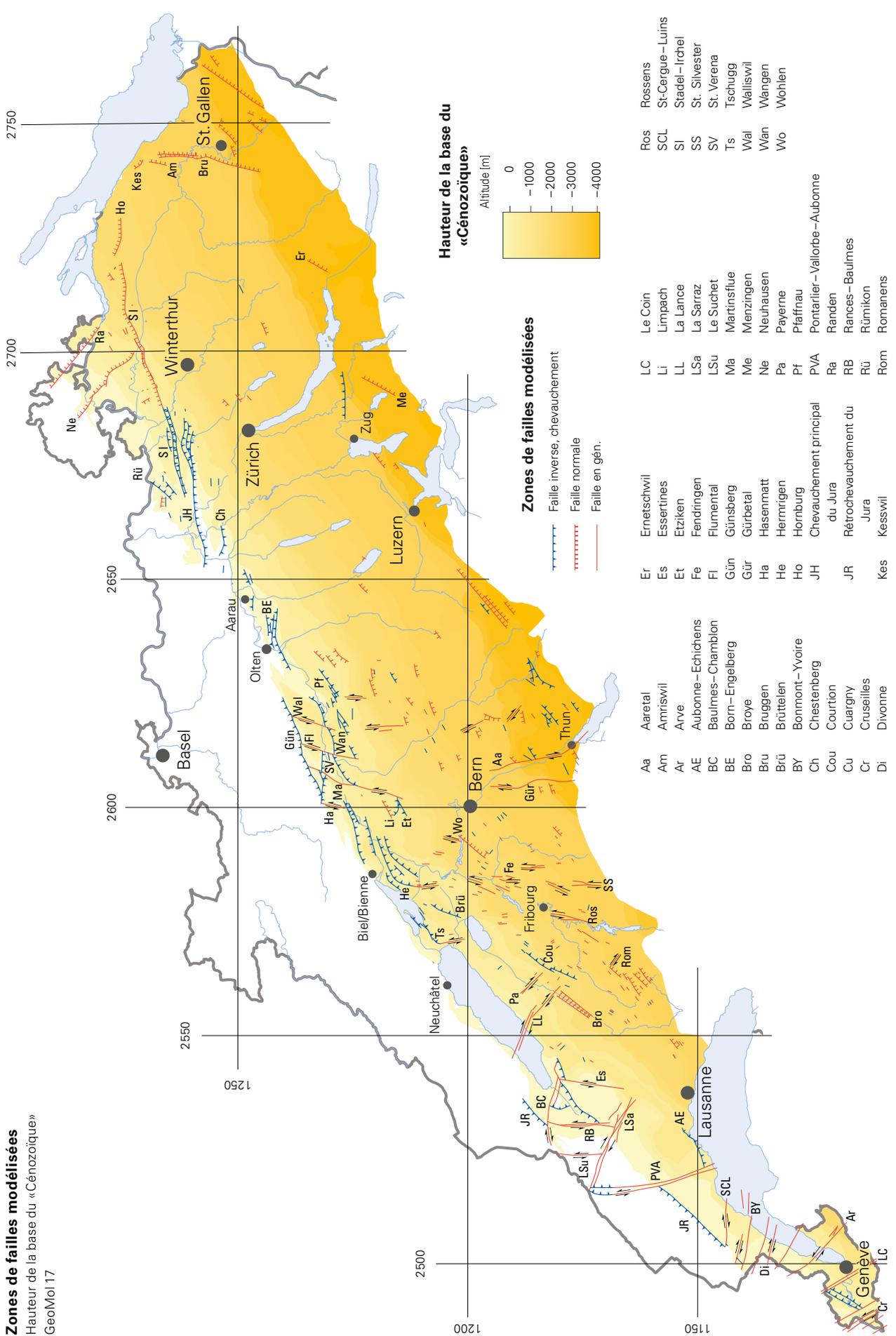
Des chevauchements partant du socle cristallin, qui décalent toute la pile de sédiments mésozoïques, prédominent à l'est de la vallée de l'Aar. Toutefois ils ne peuvent plus être suivis dans les sédiments de la Molasse marine inférieure (pl. I et II, profils 12 et 13).

Au sud du Jura, entre Soleure et Aarau, des profils géologiques (NAGRA 2008, JORDAN et al. 2011) indiquaient la présence de failles normales dans le socle cristallin. Mais ces interprétations fournissaient trop peu de points d'accrochage pour permettre une modélisation 3D. Ces structures du socle n'ont donc pas été modélisées dans ce secteur.

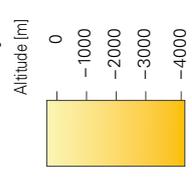
La plupart des structures modélisées dans le socle cristallin se trouvent dans la partie nord-est de l'aire modélisée et elles sont liées pour la plupart aux structures du fossé permo-carbonifère du nord de la Suisse (point 6.2.1.5). Mais il reste une grande marge d'interprétation pour réaliser une modélisation 3D malgré la bonne couverture de la région en données grâce à l'interprétation sismique provenant de la deuxième étape du plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes». C'est pourquoi ces structures ont été modélisées en tenant étroitement compte des interprétations sous-tendant la carte tectonique conceptuelle du fossé permo-carbonifère du nord de la Suisse (NAEF & MADRITSCH 2014). Les structures entourant le linéament de Baden-Irchel-Herdern sont traitées en détail au point 6.2.1.5.

Dans la partie orientale du bassin molassique, on a admis que le décollement basal manquait dans les unités triasiques, c'est pourquoi les structures du socle cristallin n'ont pas été dissociées de celles de la couverture sédimentaire. Les failles

Zones de failles modélisées
 Hauteur de la base du «Cénozoïque»
 GeoMol 17



Hauteur de la base du «Cénozoïque»



Zones de failles modélisées



Aa	Aaretal	Er	Ernetschwil	LC	Le Coin	Ros	Rossens
Am	Amriswil	Es	Essertines	Li	Limpach	SCL	St-Cergue-Luins
Ar	Arve	Et	Etziken	LL	La Lance	SI	Stadel-Irchel
AE	Aubonne-Echichens	Fe	Fendingen	LSa	Le Sarraz	SS	St. Silvester
BC	Baulmes-Chamblon	Fl	Flumet	LSu	Le Suchet	SV	St. Verena
BE	Born-Engelberg	Gün	Günsberg	Ma	Martinsflue	Ts	Tschugg
Bro	Broye	Gür	Gürbetal	Me	Menzingen	Wal	Walliswil
Bru	Bruggen	Ha	Hasenmatt	Ne	Neuhausen	Wan	Wängen
Brü	Brüttelen	He	Hermrigen	Pa	Payerne	Wo	Wohlen
BY	Bonmont-Yvoire	Ho	Hornburg	Pf	Pfärfrau		
Ch	Chestenberg	JH	Chevauchement principal du Jura	PVA	Pontarlier-Valloire-Aubonne		
Cou	Courtion	JR	Rétrochevauchement du Jura	Ra	Randen		
Cu	Cuarny	JR	Rétrochevauchement du Jura	RB	Rances-Baulmes		
Cr	Crusilles	Kes	Kesswil	Rü	Rümikon		
Di	Divonne			Rom	Romanens		

Fig. 6-8: Vue d'ensemble des failles modélisées au niveau de la base du «Cénozoïque» dans GeoMol17. Les plans de failles représentés par des lignes correspondent aux intersections entre ces surfaces et l'horizon modélisé Base du «Cénozoïque».

Zones de failles modélisées
Hauteur de la base du «Mésozoïque»
GeoMol 17

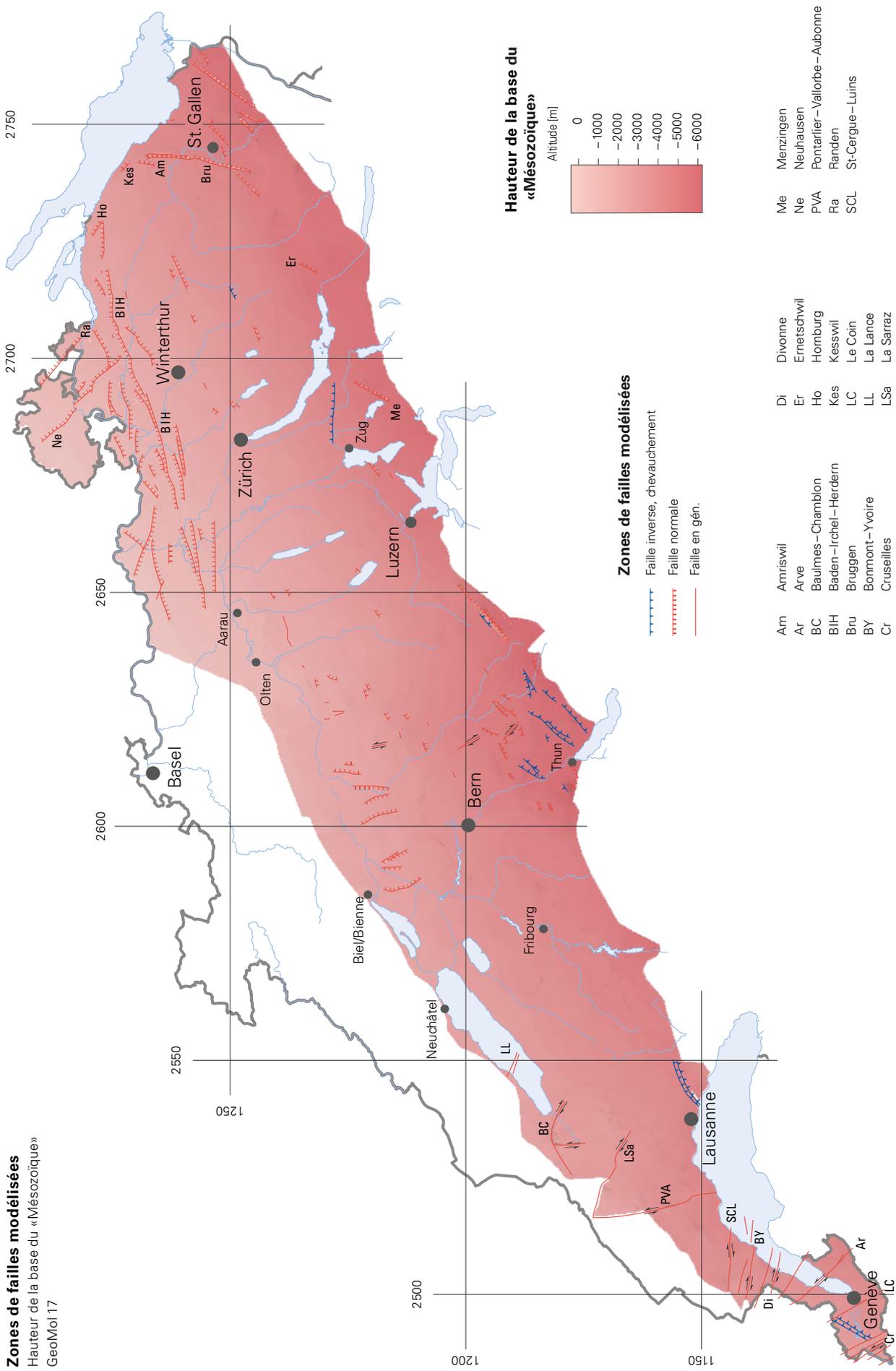


Fig. 6-9: Vue d'ensemble des failles modélisées au niveau de la base du «Mésozoïque» dans GeoMol 17. Les plans de failles représentés par des lignes correspondent aux intersections entre ces surfaces et l'horizon modélisé Base du «Mésozoïque». Comme les zones de failles n'ont pas pu être cartographiées systématiquement à l'aide de la sismique, celles qui affectent le socle cristallin n'ont pas été modélisées dans toutes les régions du bassin molassique suisse.

Zone de failles de Born-Engelberg

GeoMol 17

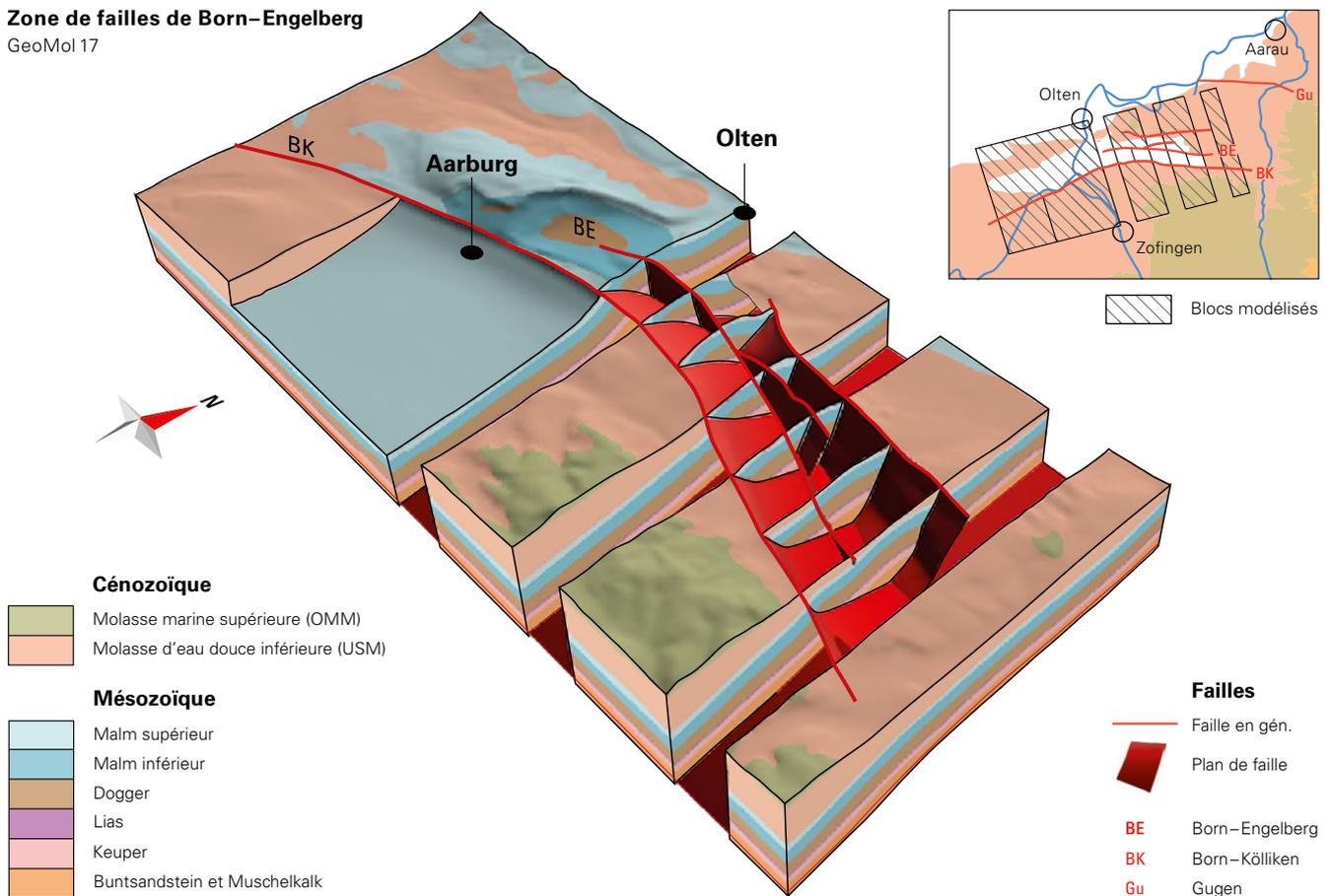


Fig. 6-10: Vue du modèle dans la région de la zone de failles de Born-Engelberg à l'aide de blocs et de coupes.

normales d'orientation NNE-SSW de la région de Saint-Gall (point 6.2.1.4) s'enracinent dans les failles de bordure de petits fossés permo-carbonifères (HEUBERGER et al. 2016).

6.2.1.3 Zone de failles de Born-Engelberg

L'anticlinal de Born-Engelberg, long d'une douzaine de kilomètres, tourne d'une orientation WSW-ENE sur son côté ouest à une orientation W-E sur son côté est. À l'est, cette structure se subdivise en deux bombements: l'anticlinal de Born-Engelberg au nord et l'anticlinal de Born-Kölliken au sud. Le flanc sud de ces anticlinaux chevauche asymétriquement l'avant-pays situé au sud. Leur flanc nord devient de plus en plus raide d'ouest en est pour former finalement un chevauchement qui s'avance vers le nord. La structure de Born-Engelberg est en outre recoupée par plusieurs grandes failles transversales (JORDAN et al. 2011).

La cluse de l'Aar, située entre Aarburg au sud et Olten au nord, offre un aperçu de l'intérieur de cette structure anticlinale et expose les unités stratigraphiques jusqu'à la base de la Formation de Wildeggen (modélisée en tant qu'horizon Toit du Dogger, fig. 6-10).

La modélisation de la structure de Born-Engelberg se fonde sur les cartes et profils géologiques de l'AG25 (feuille 1089 Aarau, JORDAN et al. 2011, feuille 1108 Murgenthal, JORDI et al. 2003, et GeoCover) ainsi que sur des forages. Les failles modélisées comprennent les deux chevauche-

ments de Born-Engelberg et Born-Kölliken, dirigés vers le sud, ainsi que, au nord de ceux-ci, deux chevauchements de plus petite dimension dirigés vers le nord. Les nombreuses petites failles transversales n'ont pas été modélisées dans GeoMol17.

La figure 6-10 montre les plans de chevauchement modélisés à l'aide de blocs et de profils. La vue sur le modèle à partir du sud-est illustre les relations entre les chevauchements ainsi que le passage d'une structure anticlinale simple à un double pli qui s'atténue progressivement vers l'est. Pour mieux voir les structures, la figure 6-10 présente les horizons stratigraphiques modélisés sous la forme de blocs incluant la zone de failles de Born-Engelberg. Les coupes à travers le modèle aident à représenter la topographie des failles et les horizons décalés à l'intérieur de la zone tectonisée. La surface supérieure du modèle correspond au modèle altimétrique du toit du rocher et elle présente les lithologies modélisées localement sans les roches meubles de la couverture quaternaire.

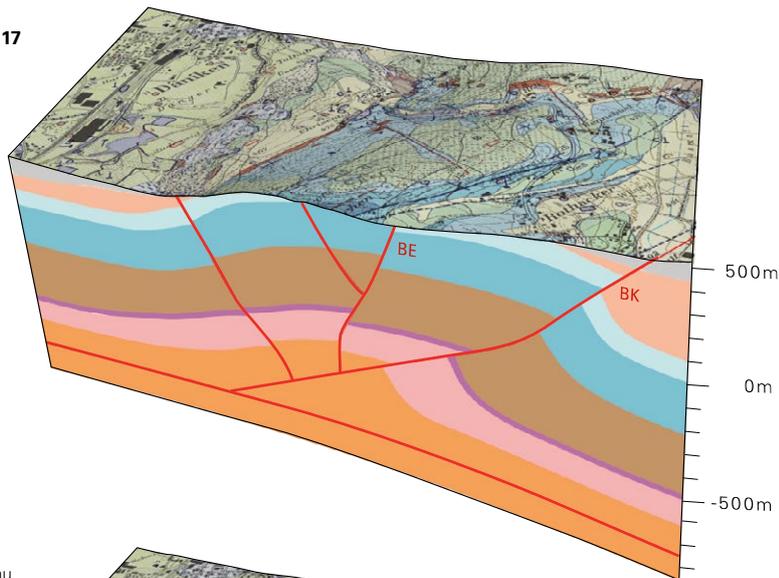
Les caractéristiques géologiques superficielles de la structure de Born-Engelberg sont assez bien connues du fait de sa position topographique élevée. Son prolongement en profondeur n'est toutefois pas parfaitement élucidé à cause de la faible densité de données disponibles. La figure 6-11 présente les diverses interprétations de la zone de Born-Engelberg, basées sur différentes données. Les trois profils, établis selon la même trace en surface, présentent

Zone de failles de Born-Engelberg

Différentes interprétations

A

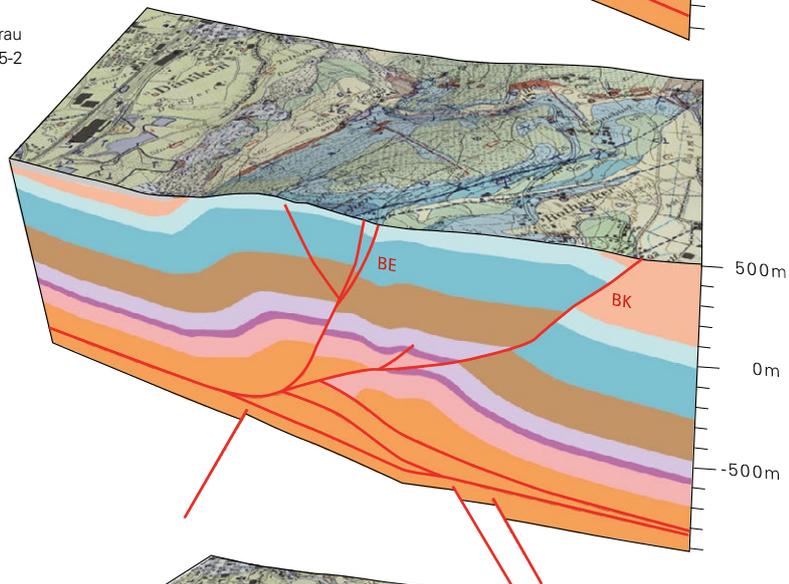
GeoMol 17



B

AG 25

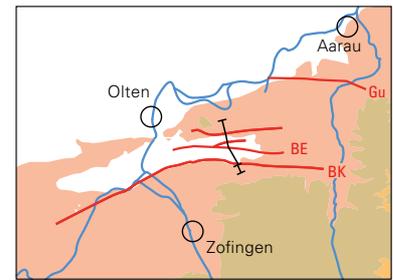
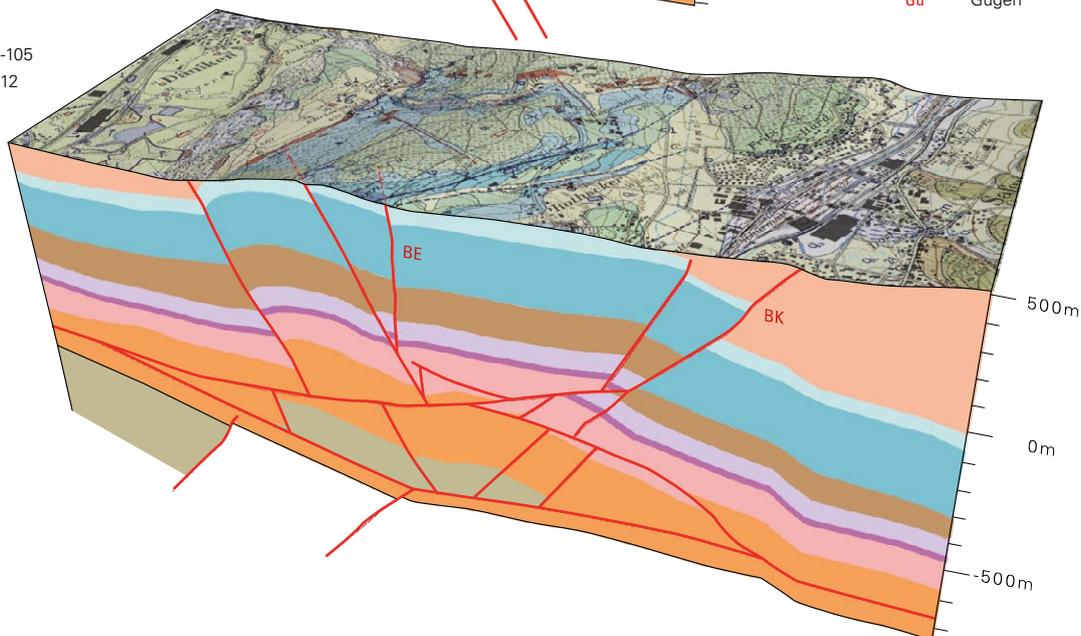
1089 Aarau
Profil 135-2



C

Nagra

NAB 14-105
Profil 6-12



Trace des profils

Cénozoïque

- Molasse marine supérieure (OMM)
- Molasse d'eau douce inférieure (USM)

Mésozoïque

- Malm supérieur
- Malm inférieur
- Dogger
- Argile à Opalinus
- Lias
- Keuper
- Buntsandstein et Muschelkalk

Paléozoïque

- Sédiments permien

Failles

- Faille en gén.
- Plan de faille
- BE Born-Engelberg
- BK Born-Kölliken
- Gu Gugen



Fig. 6-11: Coupes dans des modèles 3D reflétant différentes interprétations. La coupe A est extraite du modèle GeoMol17, la coupe B de l'interprétation de l'AG25 (JORDAN et al. 2011) et la coupe C de celle de la Nagra (JORDAN et al. 2015).

des coupes à travers (A) le modèle GeoMol17, (B) l'interprétation de l'AG25 (JORDAN et al. 2011) et (C) l'interprétation de la Nagra (JORDAN et al. 2015). La différence entre les profils B et C réside principalement dans le fait que le profil issu de l'AG25 (B) est fondé sur les données sismiques relevées lors de la première étape du plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes» (SGT, NAGRA 2008), tandis que le profil de la Nagra (C) est en revanche fondé sur des données sismiques relevées lors de la deuxième étape du plan sectoriel, plus denses et migrées plus récemment en profondeur (NAGRA 2014).

Les différences structurales sont essentiellement imputables au motif que le profil C tient compte d'une écaïlle inconnue jusqu'à alors atteinte par de nouveaux forages. Le «véritable» chevauchement de la structure de Born-Engelberg sur la partie sud du bassin molassique avait été interprété plus au sud en fonction des données de la deuxième étape du SGT. Les principales différences concernent l'intérieur de la structure. C'est ainsi que le profil B admet un dédoublement des couches dans le Muschelkalk. Dans le profil C en revanche, des considérations relatives à l'équilibrage du profil suggèrent que des sédiments permien d'un fossé comprimé pourraient se trouver au cœur de l'anticlinal (JORDAN et al. 2015).

La version de l'AG25 a été utilisée pour modéliser la zone tectonisée de Born-Engelberg dans GeoMol17 (profil B de la fig. 6-11). Cela est dû au fait que le modèle a principalement été calé à l'aide de cartes et de profils géologiques (chap. 5.3). Les données récentes de la deuxième étape du SGT (NAGRA 2014), ayant été converties en profondeurs en appliquant un autre modèle de vitesses, ne pouvaient pas être harmonisées avec la plupart des autres jeux de données.

6.2.1.4 Zone de failles de Saint-Gall

La zone de failles de Saint-Gall, longue de plus de 30 km, se trouve juste à l'ouest de la ville de Saint-Gall. Des failles normales marquées orientées NNE-SSW y ont été repérées lors de l'interprétation détaillée d'un nouveau jeu de données sismiques 3D. Toute la pile de sédiments mésozoïques a subi un décalage pouvant aller jusqu'à 300 m. De plus, des variations significatives de l'épaisseur des sédiments mésozoïques le long de cette zone de failles témoignent d'une activité synsédimentaire réitérée. Des tremblements de terre récents – naturels et induits – indiquent que la zone de failles de Saint-Gall est actuellement active comme faille décrochante senestre (HEUBERGER et al. 2016).

Comme dans le modèle GeoMol15, la zone de failles de Saint-Gall a été modélisée d'une manière très simplifiée dans GeoMol17. Mais, contrairement au plan de faille unique de GeoMol15 (zone de failles de Saint-Gall-Romanshorn, fig. 6-2), elle est composée ici des quatre plans de failles de Bruggen, Häggenschwil, Amriswil et Kesswil (fig. 6-12). Ces zones tectonisées ont été modélisées en modifiant légèrement l'interprétation de ROTH et al. (2010). La raison en est que les résultats relatifs au jeu de données sismiques 3D acquis dans le cadre du projet géothermique de la ville de Saint-Gall n'étaient pas encore tous disponibles au moment de la modélisation. Le modèle 3D de la région de Saint-Gall pourrait encore être affiné à l'avenir en fonction de ces données.

La figure 6-12 donne un aperçu du modèle 3D dans le secteur de la zone de failles de Saint-Gall. Cette vue comprend trois parties. La partie gauche (W) présente l'horizon Base du «Mésozoïque» et les plans de failles modélisés le touchant. La partie centrale expose sous forme de bloc les unités mésozoïques du Buntsandstein et du Muschelkalk jusqu'au Malm inférieur y compris. On y voit également les horizons de la molasse sous la forme de surfaces ainsi que les plans de failles. Ses limites nord, ouest et sud correspondent chacune à un profil. Les failles de la zone triangulaire sont indiquées dans le profil faisant face à l'ouest. Dans cette partie centrale, le forage profond de Saint-Gall recoupe les horizons supérieurs et les plans de failles de la zone triangulaire pour s'achever contre la faille de Bruggen. La partie droite (E) de la vue de la figure 6-12 est un bloc qui comprend toutes les couches modélisées ainsi que les failles modélisées de la zone triangulaire. Les plans des failles normales de Bruggen, Häggenschwil et Amriswil ont une orientation SSW-NNE et ils décalent la pile de sédiments mésozoïques de la base du «Mésozoïque» à la base du «Cénozoïque» vers l'ESE. La zone de failles de Bruggen passe sous le chevauchement basal de la zone triangulaire à partir du NNE. Elle a été prolongée vers le sud-ouest en dérogeant à l'interprétation de ROTH et al. (2010). Cette modification découle d'une nouvelle observation, faite dans une section sismique plus récente, qui n'avait pas été intégrée dans cette étude. Le forage profond de Saint-Gall tel qu'il est situé confirme qu'une connexion linéaire entre les failles interprétées dans cette section sismique simplifie considérablement le plan de faille effectif. Le plan de faille de Bruggen a donc été modélisé en tenant compte des données du forage, le fond du puits atteignant les niveaux sous-jacents conformément au levé du forage (HUGGENBERGER et al. 2016).

À la différence des cartes structurales de ROTH et al. (2010), la partie la plus septentrionale du plan de faille oriental a été dissociée et modélisée de manière indépendante. Cette séparation entre les failles de Kesswil et de Häggenschwil correspond à l'interprétation des sections sismiques de la Nagra dans cette région (HUGGENBERGER et al. 2016). Le plan modélisé de la faille normale de Kesswil a une orientation SE-NW et déplace aussi bien la pile de sédiments mésozoïques que le toit de la Molasse d'eau douce inférieure et le toit de la Molasse marine supérieure en direction du nord-est. Deux autres failles normales situées au-dessus de la faille de Häggenschwil, également d'orientation SE-NW, ne décalent toutefois que le toit de l'USM et de l'OMM vers le nord-est.

6.2.1.5 Zones de failles dans la région du fossé permocarbonifère du nord de la Suisse

Le fossé permocarbonifère du nord de la Suisse s'étend probablement à travers tout le nord du pays, de l'Ajoie au lac de Constance (DIEBOLD et al. 1991). Une partie de ce fossé, située dans la région Aarau-Laufenburg-Benken-Winterthur, a été modélisée dans GeoMol17. Comme aucune interprétation sismique convertie en profondeurs n'existait pour modéliser l'horizon Base du «Permo-carbonifère» faute de vitesses d'intervalles (point 5.3.5.4), les altitudes du fossé permocarbonifère du nord de la Suisse tel qu'il a été

Zone de failles de Saint-Gall

GeoMol 17

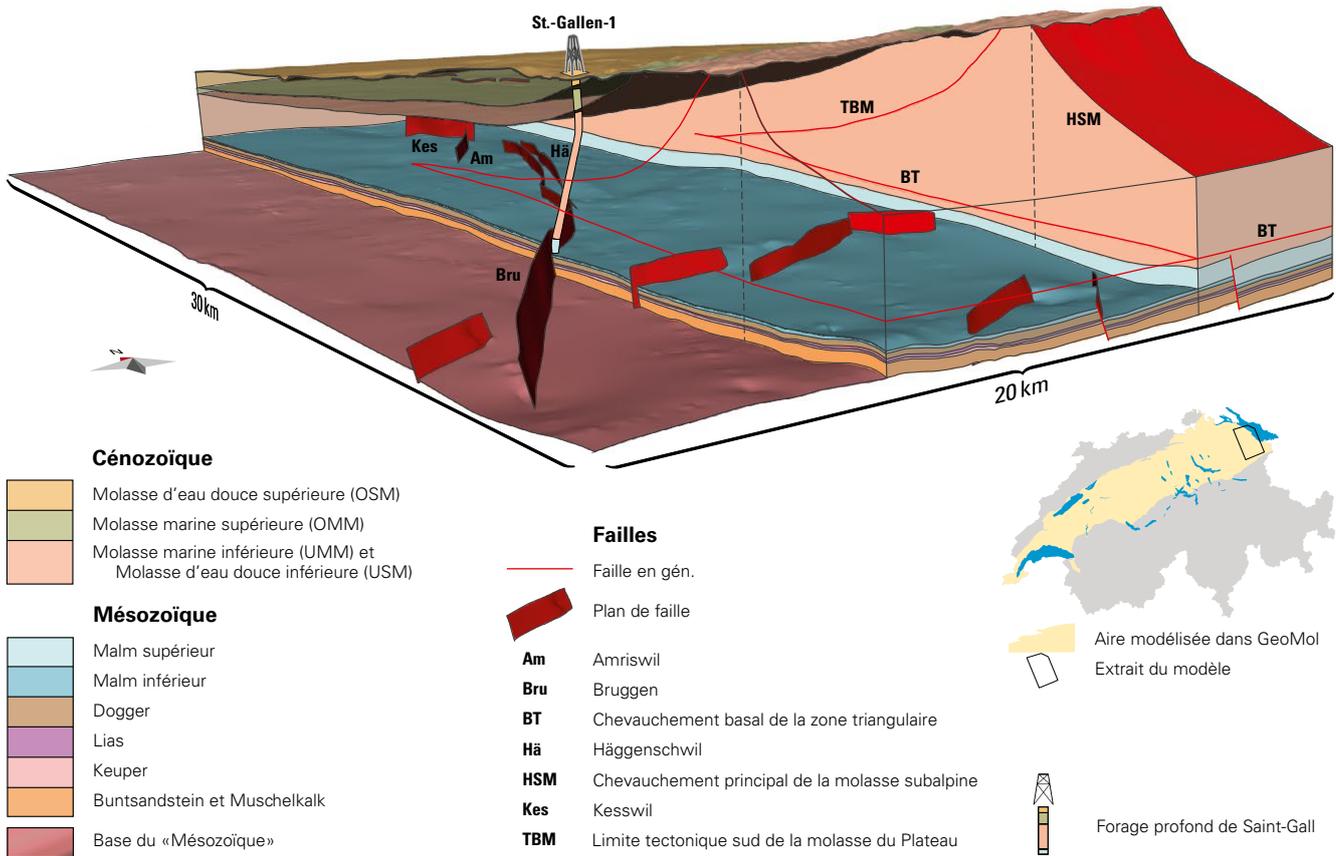


Fig. 6-12: Vue du modèle 3D GeoMol17 aux environs de la zone de failles de Saint-Gall, qui se compose de plusieurs failles normales (description dans le texte).

modélisé ainsi que des failles l'affectant sont entachées d'incertitudes. C'est pourquoi ce modèle ne devrait être utilisé que dans un but de visualisation.

La figure 6-13 donne un aperçu du modèle 3D du fossé permo-carbonifère du nord de la Suisse. Le modèle à couches continues a été évidé pour montrer les horizons modélisés Base du «Permo-carbonifère» et Base du «Mésozoïque», ce dernier toutefois seulement dans le segment oriental du modèle. Cette représentation comprend également les failles modélisées et cinq coupes générées à travers le modèle 3D. Ces profils orientés NNW-SSE montrent les dix horizons modélisés et les failles recoupées.

Les zones de bordure du fossé permo-carbonifère correspondent à une transition entre la partie centrale profonde et des épaulements moins profonds (NAGRA 2014). La partie centrale atteint une profondeur maximale de 4000 m sous le niveau de la mer d'après les conversions en profondeurs simples effectuées pour modéliser l'horizon Base du «Permo-carbonifère». Sa profondeur diminue légèrement de l'ouest jusqu'au milieu de la coupe, puis elle augmente à nouveau vers l'est. Elle se rétrécit constamment vers l'est. La partie centrale du fossé est limitée au sud par le linéament de Baden-Irchel-Herdern, faille normale enracinée dans le socle cristallin (JORDAN et al. 2015, MALZ et al. 2016) qui décale aussi l'horizon Base du «Mésozoïque».

La zone de failles de Siglistorf se trouve à l'aplomb de la bordure nord de la partie centrale du fossé permo-carbonifère. Elle s'étend de Lengnau à Rafz en passant par Siglistorf, selon une orientation WSW-ENE environ, et se compose de plusieurs plans de chevauchement et de rétrochevauchement qui forment l'anticlinal de Siglistorf.

Un peu plus au sud-est se trouve la zone de failles d'Eglisau, qui s'étend sur plusieurs kilomètres selon une orientation WNW-ESE environ, d'Eglisau à l'ouest en direction de l'est (JORDAN et al. 2015). Elle se compose également de plusieurs plans de chevauchement et de rétrochevauchement dans sa partie ouest. En direction de l'est, c'est le plan de chevauchement le plus septentrional qui a été modélisé comme étant le plus long. La zone de failles d'Eglisau semble avoir un lien avec un gradin dans le socle cristallin (MADRITSCH et al. 2013).

Au-dessus du linéament de Baden-Irchel-Herdern, la zone de failles complexe de Stadel-Irchel, avec ses chevauchements à vergence nord aussi bien que sud, s'est formée dans les sédiments mésozoïques. Cette structure «en queue de poisson» est à l'origine de l'anticlinal de Stadel-Irchel.

Au sud de ces zones tectonisées se trouve le chevauchement principal du Jura, qui comprend trois plans de faille dans le modèle GeoMol17. Ils sont supplantés progressivement par le chevauchement de la Lägern en direction de

Fossé permo-carbonifère du nord de la Suisse

GeoMol 17

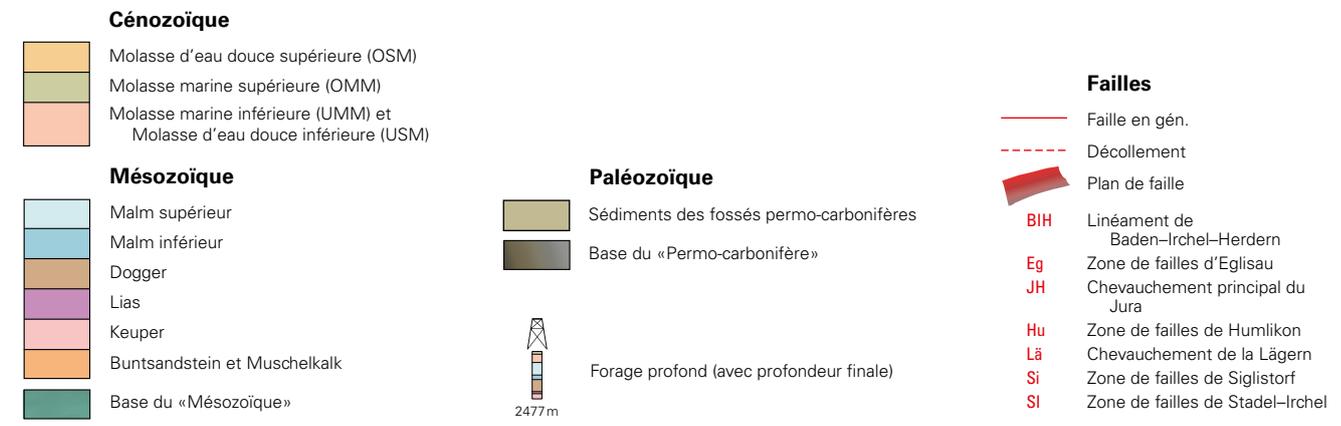
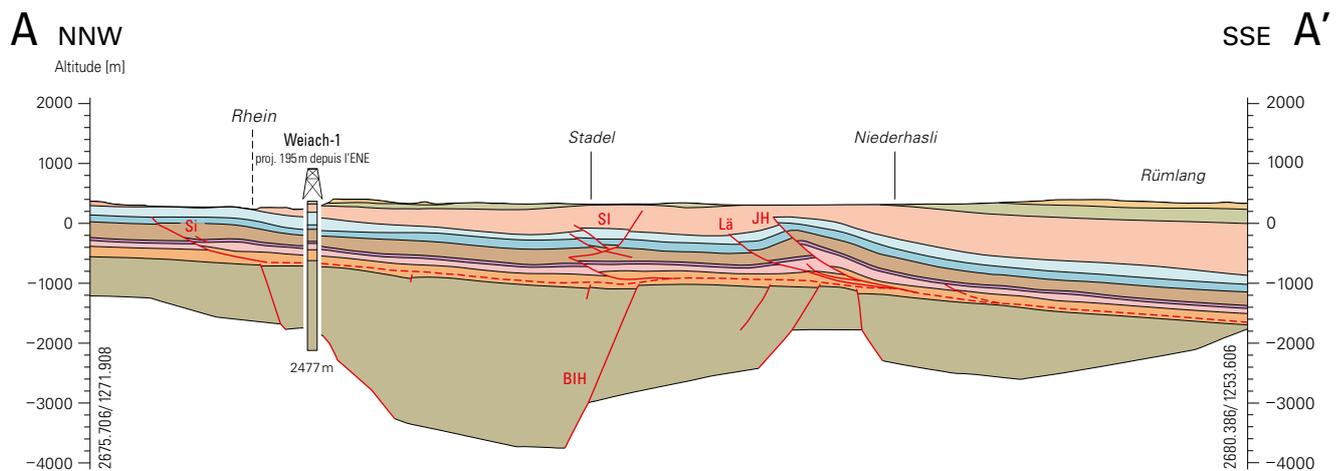
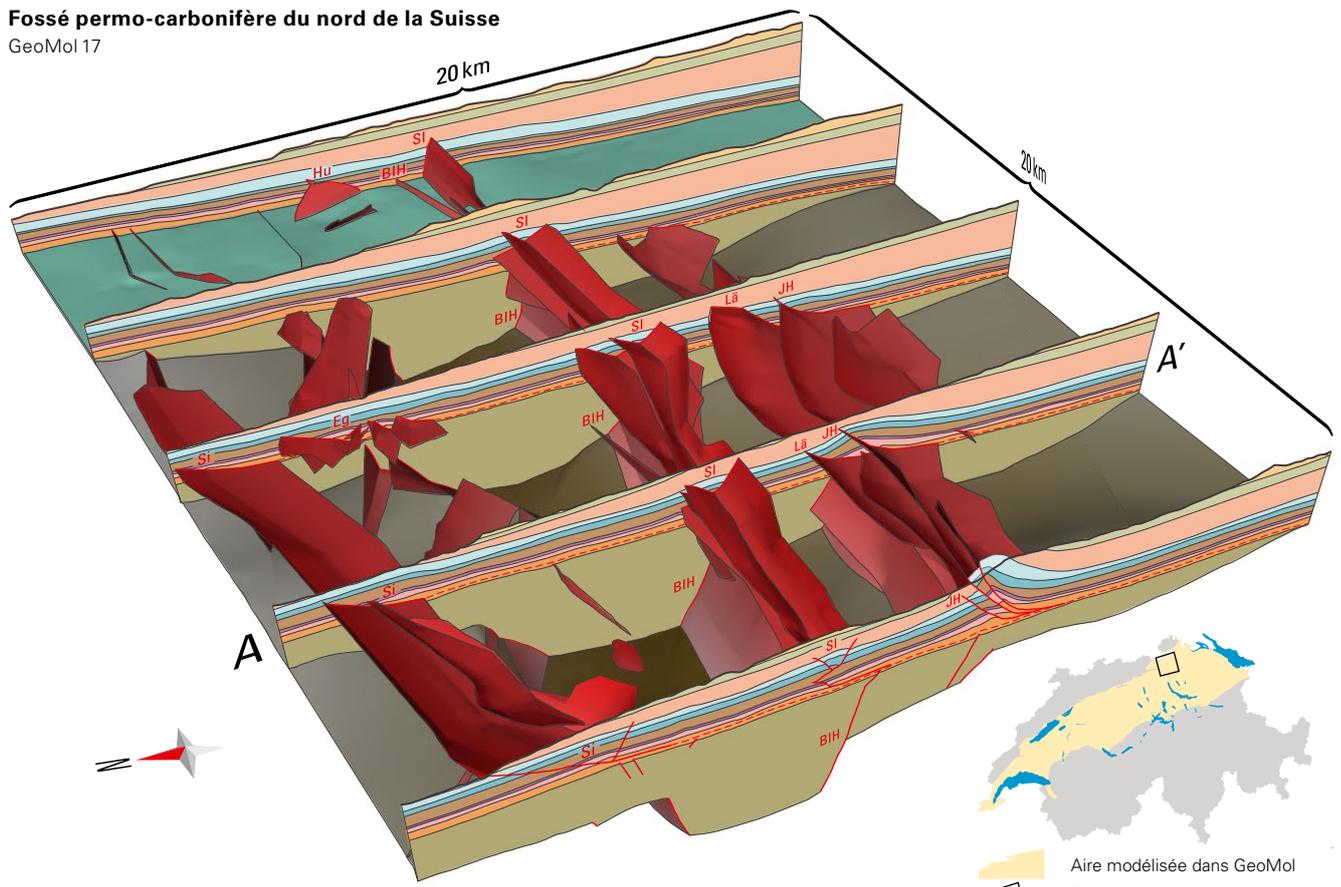


Fig. 6-13: Vue dans une partie du modèle 3D décrivant le fossé permo-carbonifère du nord de la Suisse (GeoMol17), qui fait apparaître des coupes générées à partir du modèle, avec le profil A-A' représenté sous la forme habituelle (description dans le texte).

Linéament de Baden–Irchel–Herdern

Évolution conceptuelle des failles

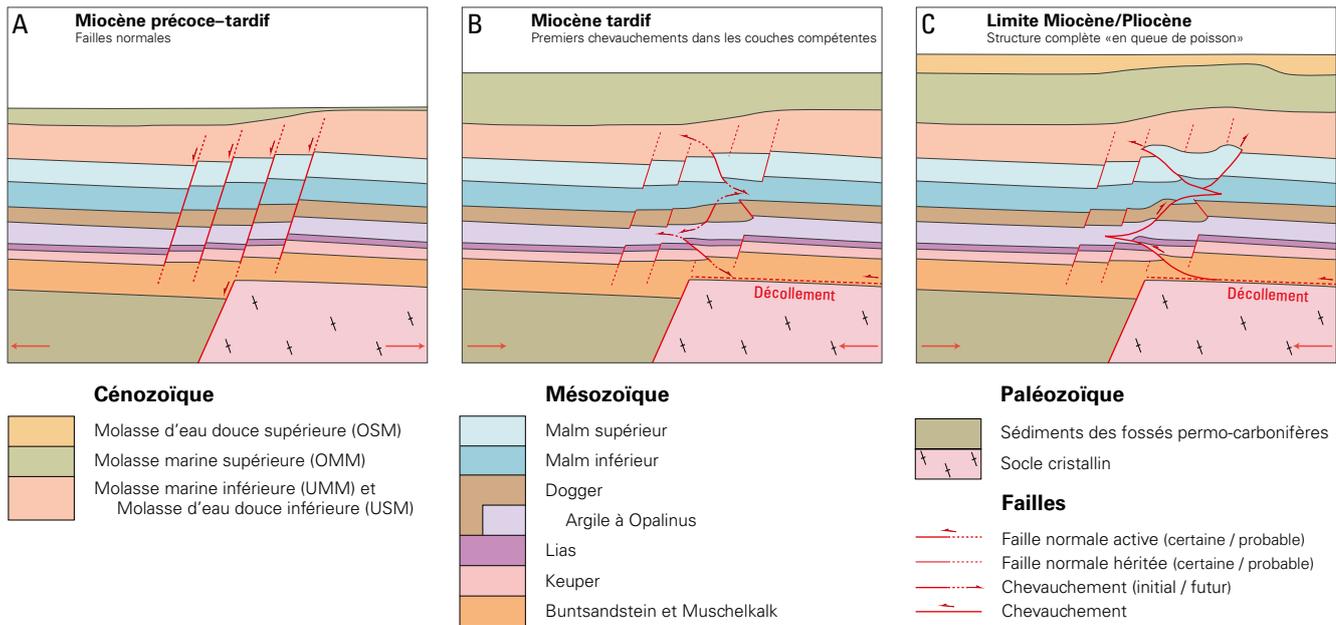


Fig. 6-14: Évolution conceptuelle des failles formant la structure «en queue de poisson» de l'anticlinal de Stadel–Irchel dans la zone d'influence du linéament de Baden–Irchel–Herdern. A) Failles normales: structures d'extension qui génèrent une zone de faiblesse mécanique dans la pile de sédiments. B) Formation dans les couches compétentes des premières rampes de chevauchement qui se terminent par des plans horizontaux à l'intérieur de couches incompétentes. C) Structure complète «en queue de poisson». Certains de ces chevauchements sont dus à la réactivation de failles normales préexistantes (MALZ et al. 2016, remanié).

l'est. Ces chevauchements forment ensemble l'anticlinal de la Lägern, le plus oriental des précurseurs du Jura plissé visibles en surface (BITTERLI-DREHER et al. 2007). Encore perceptible dans les deux profils occidentaux, il disparaît dans celui du milieu. La position des chevauchements qui constituent l'anticlinal de la Lägern semble également correspondre à un gradin dans le socle cristallin (JORDAN et al. 2015).

Le décollement basal passant dans les sédiments triasiques figure en traits-tirés dans les profils, mais il n'a pas été modélisé. Il est très difficile de modéliser tridimensionnellement cet horizon – et en particulier ses limites – dans cette région, car il ne s'appuie que sur un nombre très restreint de points d'accrochage. Il y a en outre des indications que des niveaux de décollement supplémentaires sont présents dans d'autres couches incompétentes (voir la discussion relative à la fig. 6-14).

Profil A–A'

Le profil A–A', long d'environ 19 km et d'orientation NNW–SSE (fig. 6-13), s'étend depuis le nord du Rhin jusqu'à l'est de Rümmlang en passant par Stadel, Neerach et Niederhasli. Le forage profond Weiach-1 a été projeté dans le plan de coupe, sur une distance de 195 m à partir de l'ENE. L'épaisseur des horizons modélisés est plus ou moins constante, sauf au niveau des zones de failles. La partie centrale du fossé permo-carbonifère dont la présence est présumée atteint une profondeur de près de 3700 m sous le niveau de la mer dans ce profil.

Le plan de chevauchement de la zone de failles de Siglistorf, qui se trouve à l'aplomb de la limite nord de la partie centrale du fossé permo-carbonifère, est représenté dans ce profil comme étant la limite nord du décollement basal.

Plus loin au sud-est, le profil recoupe la structure «en queue de poisson» de la zone de failles de Stadel–Irchel, qui se trouve à l'aplomb du linéament de Baden–Irchel–Herdern, bordure méridionale présumée de la partie centrale du fossé permo-carbonifère.

On distingue bien le bombement des sédiments mésozoïques, formant l'anticlinal de la Lägern, qui est dû au chevauchement principal du Jura et au chevauchement de la Lägern. Au-dessous de lui se trouve le gradin du socle cristallin déjà évoqué précédemment.

La zone de failles de Stadel–Irchel a été interprétée dans les données sismiques comme étant une structure «en queue de poisson» (MADRITSCH et al. 2013, MEIER et al. 2014) et modélisée comme telle dans GeoMol17 (fig. 6-13). La figure 6-14 illustre une évolution possible de cette structure à l'aplomb du linéament de Baden–Irchel–Herdern, conforme à l'interprétation de MALZ et al. (2016).

D'après des observations empiriques faites dans d'autres ceintures de chevauchement (p.ex. DROZDZEWSKI 1979, SANS & VERGÉS 1995), ces structures «en queue de poisson» impliquent la présence de niveaux de décollement secondaires (MADRITSCH et al. 2013). DIEBOLD et al. (1991) avaient déjà observé que le décollement dont il est question ici devait être subdivisé en plusieurs niveaux dans le «Mésozoïque» entre l'anticlinal de Stadel–Irchel et la bordure nord de la chaîne jurassienne près de Dielsdorf.

La coïncidence spatiale entre la zone de failles de Stadel–Irchel et l'accident normal plus ancien et réactivé plusieurs fois du linéament de Baden–Irchel–Herdern (fig. 6-14A) indique en outre que ce dernier a une grande incidence sur la configuration géométrique et l'évolution cinématique de la structure complexe «en queue de poisson» (MADRITSCH et al. 2013, MALZ et al. 2016).

De petites rampes de chevauchement initiales se sont développées dans les couches compétentes de cette zone déjà sollicitée mécaniquement (fig. 6-14B). Se prolongeant dans les couches incompétentes, elles ont constitué des niveaux de décollement secondaires dans l'Argile à Opalinus, dans la Formation de Wildegg et à la base de la Molasse d'eau douce inférieure pendant la phase de raccourcissement (MALZ et al. 2016).

La structure «en queue de poisson» ainsi formée s'enracine dans le décollement basal situé dans les sédiments triasiques et elle recoupe le Keuper et le Lias sous la forme d'un chevauchement à vergence nord. À l'intérieur de l'Argile à Opalinus s'enracine un rétrochevauchement à vergence sud qui recoupe les unités du Jurassique tardif pour s'achever par une structure en *pop-up*. Cette dernière est édifiée à partir d'un chevauchement à vergence nord enraciné dans le Malm inférieur et d'un chevauchement à vergence sud (fig. 6-14C, JORDAN et al. 2015).

6.2.2 Horizons

Quatorze horizons géologiques ont été modélisés dans le cadre de GeoMol17 en exploitant les données de base existantes (chap. 3 et 4). Ils diffèrent des résultats obtenus dans GeoMol15 aussi bien par leur degré de détail que par la densité des données auxquelles ils se sont référés. Un nouveau modèle de vitesses a en outre été élaboré tout spécialement pour convertir les données sismiques en profondeurs.

L'épaisseur des diverses unités stratigraphiques a été dérivée des horizons modélisés. Les modèles altimétriques des surfaces et/ou les cartes des épaisseurs des unités concernées sont exposés et décrits ci-après pour chaque horizon modélisé. Le support de données annexé comprend des figures qui présentent le modèle altimétrique de chacun des horizons modélisés et les cartes des épaisseurs des unités correspondantes à un grand format.

6.2.2.1 Toit du rocher

Le modèle altimétrique du toit du rocher (fig. 6-15) est formé d'une grille de largeur de maille égale à 25 m. La carte des épaisseurs des roches meubles (fig. 6-16) en est un produit dérivé (modèle altimétrique de la topographie moins modèle altimétrique du toit du rocher). Sa grille a également une largeur de maille de 25 m.

Le modèle altimétrique du toit du rocher et la carte des épaisseurs des roches meubles ont été étendus hors des limites du bassin molassique suisse. Seuls y manquent les cantons de Bâle-Ville, de Bâle-Campagne et du Jura ainsi que des parties des cantons des Grisons et de Soleure.

La plupart des sillons qui entaillent profondément la surface du rocher ainsi que les roches meubles généralement

très épaisses qui vont de pair ont le même ordre de grandeur que dans les grandes vallées actuelles occupées par d'importants cours d'eau et lacs. Cette configuration reflète l'érosion accrue qui a régné pendant les différentes périodes glaciaires du Pléistocène, lors desquelles des glaciers se sont avancés dans les vallées alpines et dans l'avant-pays alpin.

Dans les grandes vallées alpines (Rhône, Aar, Reuss, Linth, Rhin, Tessin), le toit du rocher est à une profondeur inférieure au niveau actuel de la mer. Les surcreusements sont un peu moindres sur le Plateau, mais l'épaisseur des roches meubles peut également y atteindre plusieurs centaines de mètres.

La carte des épaisseurs des roches meubles (fig. 6-16) doit cependant être considérée avec circonspection. L'épaisseur calculée est trop importante là où se trouvent des lacs à l'heure actuelle, car le modèle numérique de terrain MNT25 représente la surface des lacs et non leur plancher. Il faudrait donc soustraire la tranche d'eau de l'épaisseur calculée pour obtenir l'épaisseur réelle des roches meubles.

6.2.2.2 Horizons de la molasse

La Molasse d'eau douce inférieure (USM), la Molasse marine supérieure (OMM) et la Molasse d'eau douce supérieure (OSM) affleurent dans le bassin molassique suisse (fig. 6-17), tout en étant érodées à divers endroits. La Molasse marine inférieure (UMM) n'a été rencontrée que dans un très petit nombre de forages profonds réalisés dans le bassin molassique suisse – molasse subalpine exceptée (SOMMARGA et al. 2016).

Les quatre horizons de la molasse (toits de l'UMM, de l'USM, de l'OMM, respectivement de l'OSM) ont été modélisés dans GeoMol17 là où cela était possible. Les modèles altimétriques respectifs sont décrits succinctement ci-après, les cartes correspondantes étant disponibles dans le support de données annexé.

L'horizon Toit de l'UMM n'a pas pu être modélisé partout faute d'informations. Il n'a été décrit que dans les sous-modèles Vaud et Fribourg. Le modèle altimétrique de cet horizon s'étend donc du lac Léman à l'ouest à la vallée de la Gürbe à l'est. Il présente un plongement régulier vers le sud-est. L'altitude de la Molasse marine inférieure (UMM) va de –1150 m dans la région lausannoise à –4630 m au front des Alpes. Elle se biseaute à la base du «Cénozoïque», le long d'une ligne Lausanne–Fribourg.

Le modèle altimétrique de l'horizon Toit de l'USM, lorsqu'il est érodé, correspond au modèle altimétrique du toit du rocher. L'altitude du toit de l'USM, lorsqu'il n'est pas érodé, varie entre 1500 m et –870 m environ. Le modèle altimétrique de l'horizon Toit de l'OMM érodé correspond également au modèle altimétrique du toit du rocher. L'altitude du toit de l'OMM non érodé varie entre 1250 m et –350 m environ.

Le plongement général vers le sud-est de la molasse subhorizontale du Plateau est bien reconnaissable dans les modèles altimétriques décrivant les horizons Toit de l'USM et Toit de l'OMM. La molasse du Plateau se redresse contre la zone triangulaire et la molasse subalpine. Les axes des plis présents dans le bassin molassique suisse se reflètent dans les deux modèles altimétriques. C'est ainsi que les

Modèle altimétrique

Toit du rocher dans GeoMol17

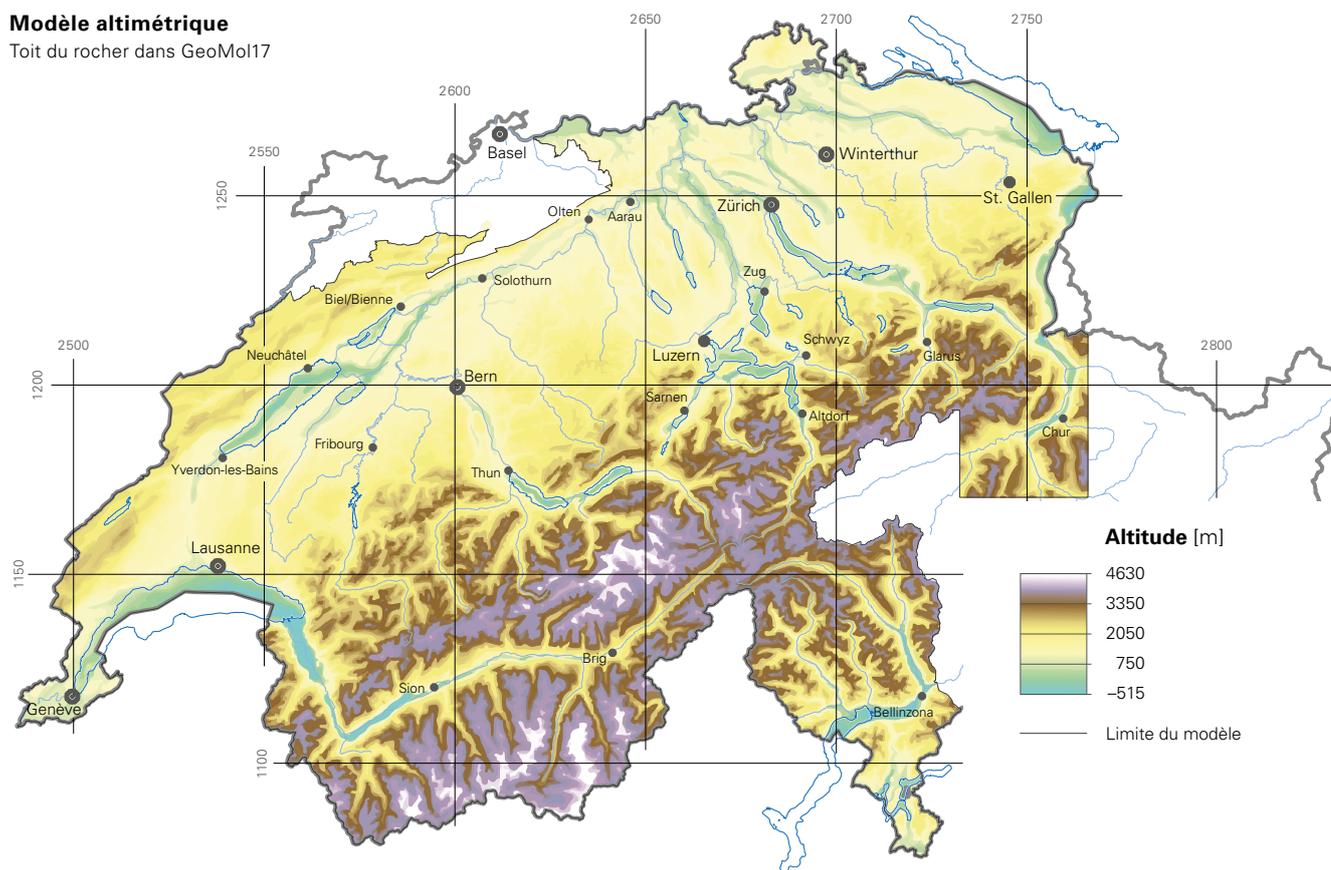


Fig. 6-15: Modèle altimétrique du toit du rocher (maillage de 25x25 m).

Carte des épaisseurs

Roches meubles quaternaires dans GeoMol 17

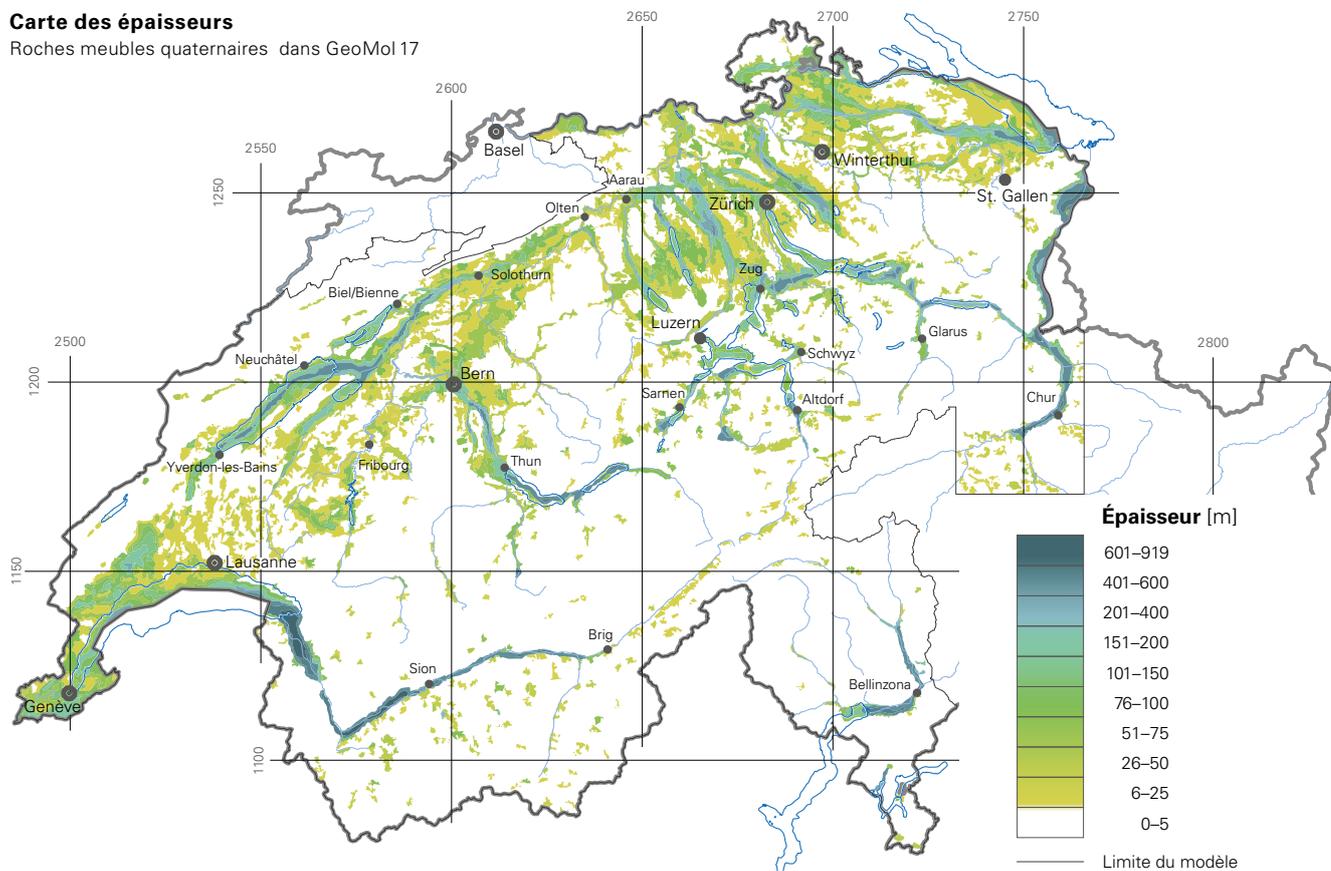


Fig. 6-16: Carte des épaisseurs des roches meubles: un produit dérivé du modèle du toit du rocher (fig. 6-15).

Modèle altimétrique

Toit du rocher dans GeoMol 17

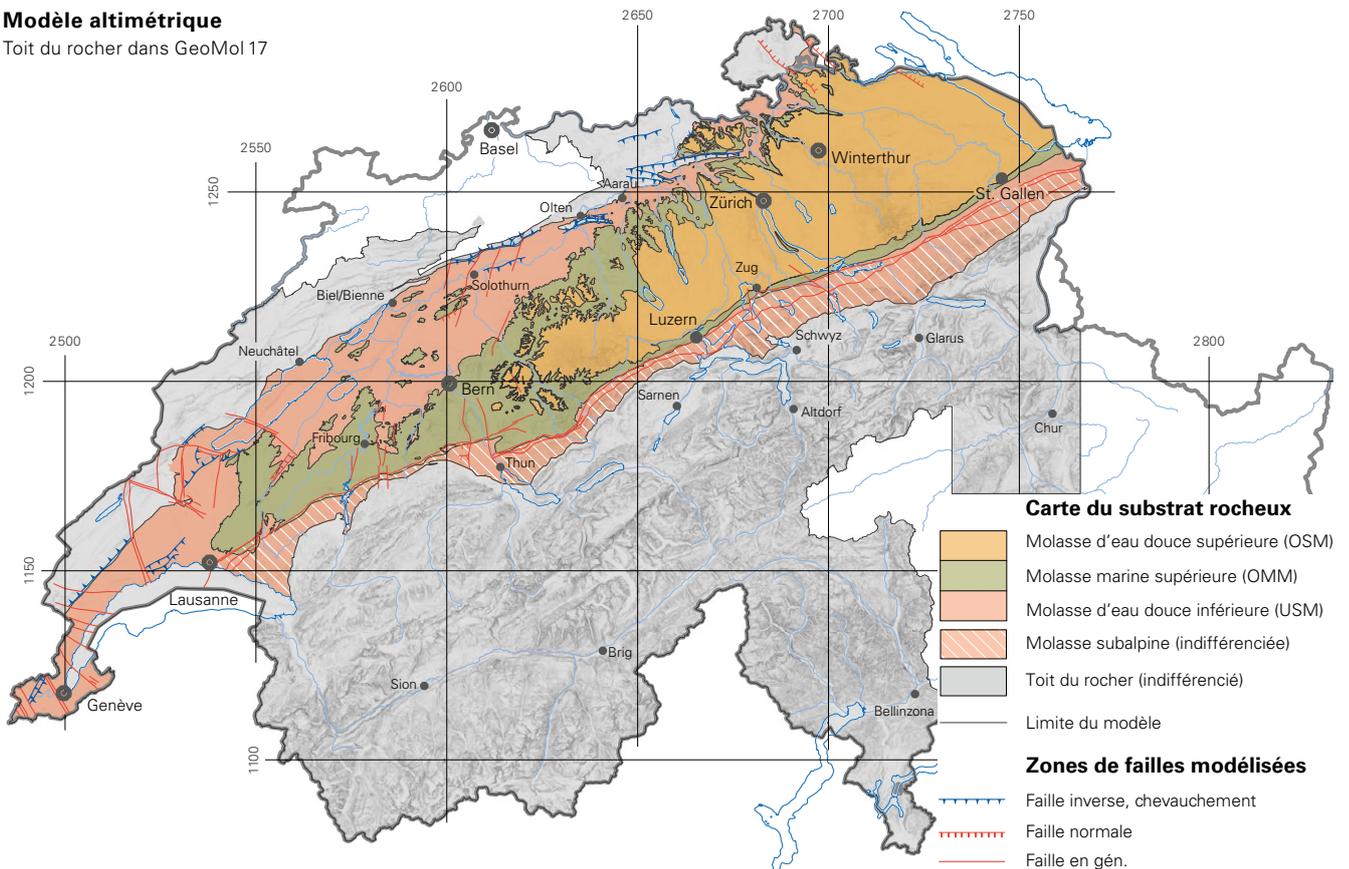


Fig. 6-17: Modèle altimétrique du toit du rocher avec indication de la répartition actuelle des unités de la molasse à ce niveau. Il correspond à la carte dérivée du modèle 3D.

secteurs les plus profonds de l'horizon Toit de l'USM sont formés par des synclinaux, entre Lucerne et Zoug, ainsi que dans la région du lac de Zurich. L'altitude diminue généralement en direction du lac de Constance dans les deux modèles altimétriques.

Comme la limite supérieure de l'OSM est partout érosive l'horizon Toit de l'OSM correspond – là où il existe – au modèle altimétrique du toit du rocher.

L'épaisseur totale des sédiments cénozoïques augmente considérablement vers le sud-est, de 0 m le long du Jura à plus de 5500 m dans le secteur de la molasse subalpine (point 6.1.2.2). Elle varie quelque peu à l'échelle locale du fait de l'érosion.

6.2.2.3 Horizons mésozoïques

Les modèles altimétriques des horizons de GeoMol17 qui vont de la base du «Cénozoïque» à la base du «Mésozoïque» présentent un plongement régulier vers le sud-est à l'échelle du bassin. Les isolignes ont une orientation SW-NE et le pendage varie entre 3° et 6°. Les modèles altimétriques respectifs sont décrits succinctement ci-après, les cartes correspondantes étant disponibles dans le support de données annexé.

Les horizons ont un aspect différent selon la région modélisée (chap. 1.3) et le déroulement de la modélisation. C'est ainsi, par exemple, que le déplacement des horizons au contact des failles a été modélisé sous la forme de gra-

dins dans certaines aires, tandis qu'il a été modélisé sous forme de polygones de failles découpés dans d'autres régions (chap. 5.3). Rappelons qu'il y avait des différences d'altitude pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres avant l'ajustement des horizons aux jonctions entre les sous-modèles (points 5.3.7 et 6.2.3). Ces différences n'apparaissent plus dans les horizons finaux, car ils ont été entièrement harmonisés lors de l'ajustement des limites entre sous-modèles.

Modèle altimétrique de la base du «Cénozoïque»

L'horizon Base du «Cénozoïque» marque la séparation entre les sédiments cénozoïques et mésozoïques. Il affleure en bordure nord du bassin molassique actuel. Son altitude va environ de 1600 m à –5100 m, ce qui reflète l'épaisseur totale des sédiments cénozoïques (point 6.1.2.2).

Des déplacements dus à des failles décrochantes marquées (p. ex. zones de failles de Pontarlier–Vallorbe–Aubonne, La Sarraz et Baulmes–Chamblon, voir le point 6.2.1.2) sont nettement visibles du côté ouest. Plus à l'est, des structures plissées généralement accompagnées de chevauchements ou de rétrochevauchement sont prédominantes en bordure nord du modèle altimétrique (au sud du Jura plissé, entre Bienne et Bülach). Dans sa partie nord-est, le modèle altimétrique présente des déplacements imputables à des zones de failles normales (Neuhausen et Randen). On distingue au sud de cette zone un léger déplacement qui s'étend

de la Lägern à l'ouest jusqu'à proximité du lac de Constance à l'est. Il a un lien avec la zone de failles de Stadel-Irchel, qui est associée au linéament de Baden-Irchel-Herdern. Quelques failles normales sont identifiables en bordure sud du modèle altimétrique.

Modèle altimétrique du toit du «Crétacé»

Des sédiments crétacés n'apparaissent qu'à l'ouest de la ligne reliant Bienne à Thoune. Le modèle altimétrique du toit du «Crétacé» y correspond à celui de la base du «Cénozoïque». L'altitude de cet horizon va environ de 1600 m à -5100 m.

Modèle altimétrique du toit du Malm supérieur

Le modèle altimétrique du toit du Malm supérieur correspond à celui du Malm supérieur non érodé à l'ouest de la ligne reliant Bienne à Thoune (base du «Crétacé») et au modèle altimétrique de la base du «Cénozoïque» à l'est de cette ligne, où il est érodé. L'altitude de cet horizon va environ de 1400 m à -5100 m. Les structures qui apparaissent dans le modèle altimétrique de la base du «Cénozoïque» sont également visibles ici.

Modèle altimétrique du toit du Malm inférieur

L'altitude du toit du Malm inférieur va environ de 1400 m à -5500 m dans son modèle altimétrique. Les structures qui apparaissent dans le modèle altimétrique de la base du «Cénozoïque» sont également visibles ici.

Modèle altimétrique du toit du Dogger

La figure 6-18 présente le modèle altimétrique du toit du Dogger dans GeoMol17. Son altitude va environ de 1300 m à -5700 m. Les failles décrochantes prédominent dans la partie ouest (point 6.2.1.1). Les structures plissées, généralement accompagnées de chevauchements et de rétrochevauchements, sont visibles au sud du Jura plissé, entre Bienne et Bülach. Au nord-est, deux failles normales décalent le modèle altimétrique. On distingue au sud de cette zone un déplacement lié à la zone de failles de Stadel-Irchel, associée au linéament de Baden-Irchel-Herdern. Les failles décrochantes des vallées de la Gürbe et de l'Aar (Gürbetal et Aaretal-Störungzone) sont discernables dans le sud du modèle altimétrique. D'autres failles normales décalent également le modèle entre Thoune et Lucerne ainsi qu'au sud de Saint-Gall.

Modèle altimétrique du toit du Lias

Le modèle altimétrique du toit du Lias affiche des altitudes d'environ 1200 m à -5800 m. Les structures décrites dans le modèle altimétrique du toit du Dogger sont également visibles ici.

Modèle altimétrique du toit du Keuper

Le modèle altimétrique du toit du Keuper affiche des altitudes d'environ 1100 m à -5900 m et présente un pendage régulier vers le sud-est. Les structures décrites dans le modèle altimétrique du toit du Dogger sont également visibles ici.

Modèle altimétrique du toit du Muschelkalk

Le modèle altimétrique du toit du Muschelkalk montre un pendage régulier vers le sud-est, avec des altitudes variant entre 500 m et -6100 m environ. Il ne ressemble plus à celui des horizons sus-jacents dans sa partie ouest. Le toit du Muschelkalk a en effet été moins tectonisé du fait que l'horizon de décollement basal se trouve dans les évaporites du Keuper et que quelques failles s'y enracinent. La plupart des structures plissées visibles dans les horizons sus-jacents n'influencent pas non plus cet horizon (CLERC 2016, MARCHANT & BAUER 2016). On retrouve plus à l'est les structures décrites dans le cadre du modèle altimétrique du toit du Dogger.

Modèle altimétrique de la base du «Mésozoïque»

Le modèle altimétrique de la base du «Mésozoïque» montre également un pendage régulier vers le sud-est, avec des altitudes variant entre 600 m et -6700 m environ. Il ne comprend plus que quelques déplacements le long de failles dans sa partie ouest, comme le modèle altimétrique du toit du Muschelkalk. Sa bordure nord est exempte de structures plissées, car le décollement basal se trouve dans le Muschelkalk. Sa partie nord-est présente différentes failles normales, dont certaines ont été modélisées comme des failles de bordure du fossé permo-carbonifère à l'instar du linéament de Baden-Irchel-Herdern (point 6.2.1.5). Des failles normales sont visibles au sud de ce modèle altimétrique, entre Thoune et Lucerne ainsi qu'au sud de Saint-Gall.

Modèle altimétrique de la base du «Permo-carbonifère»

L'horizon Base du «Permo-carbonifère» n'a été modélisé que dans la région d'Aarau-Laufenburg-Benken-Winterthur. Il fait partie du fossé permo-carbonifère du nord de la Suisse (point 6.2.1.5). L'altitude de cet horizon va environ de 200 m à -5100 m.

Épaisseur totale des unités mésozoïques

L'épaisseur totale des unités mésozoïques diminue de plus de 3500 m près de Genève à environ 2500 m près de Fribourg et moins de 1000 m en Suisse orientale (point 6.1.2.3). L'épaisseur des différentes unités lithostratigraphiques est traitée brièvement ci-après, les cartes correspondantes étant disponibles dans le support de données annexé. Les cartes décrivant les épaisseurs des diverses unités ont été discutées dans les rapports traitant des sous-modèles Genève (CLERC 2016), Vaud (MARCHANT & BAUER 2016), Fribourg (GRUBER et al. 2013) et Berne (MOCK 2016). Les points qui ont fait l'objet de ces discussions sont repris succinctement ici.

Les cartes des épaisseurs ont été calculées, à l'aide de Move™, sur la base des épaisseurs stratigraphiques. Pour ce faire, la différence d'altitude entre deux horizons consécutifs a été déterminée perpendiculairement à la surface de l'horizon supérieur en chaque point de la surface réticulée – et non sous la forme d'épaisseur verticale. Mais l'épaisseur calculée peut ne pas être purement stratigraphique et se trouver influencée par des structures tectoniques. L'épaisseur stratigraphique n'a par exemple pas pu être différenciée en cas de dédoublement de couches dû à un chevauchement.

Modèle altimétrique

Toit du Dogger dans GeoMol17

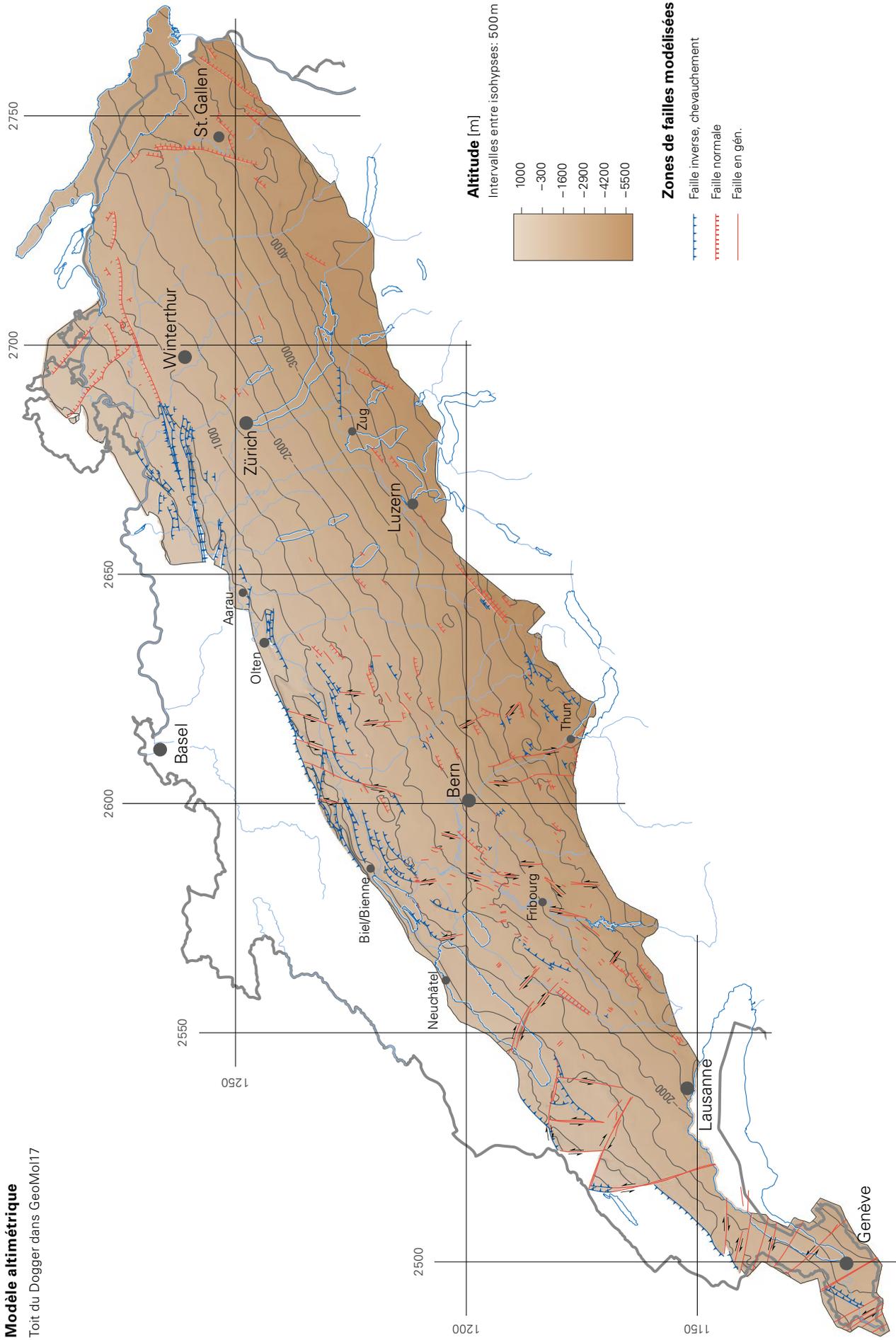


Fig. 6-18: Modèle altimétrique du toit du Dogger dérivé de GeoMol17, avec les zones de failles qui recoupent cet horizon (description dans le texte).

Les cartes des épaisseurs ont aussi été utilisées pour contrôler la qualité du modèle (point 5.3.4.1 et chap. 7.1) en détectant des anomalies d'épaisseur artificielles ou naturelles. En règle générale, les variations dans l'image sismique (p. ex. qualité de la modélisation ou (dis)continuité latérale des réflecteurs) se répercutent directement dans les variations de la surface de l'horizon final (MOCK 2016). D'autres anomalies d'épaisseur artificielles se manifestent par exemple sous la forme de boudinage de certaines unités vues en coupe. Cela peut se produire à proximité d'un forage dans lequel une unité apparaît dédoublée, lorsque ce dédoublement est simplifié et que seul le toit et la base de l'unité sont considérés dans l'interpolation. Cette unité s'amincit à nouveau à côté du forage. Cet effet provient parfois également du mode de modélisation.

Dans la modélisation basée sur les données, les différents horizons sont modélisés indépendamment les uns des autres et non en tant que membres de groupes d'horizons. Toutes les données existantes entrent alors dans les interpolations. Il est possible que cette méthode influence les modèles altimétriques des horizons et les cartes des épaisseurs des unités. Les modèles sont par conséquent affectés d'incertitudes non quantifiables (chap. 7.2).

Dans la modélisation conceptuelle, ces anomalies d'épaisseur artificielles ont déjà pu être évitées partiellement en ne modélisant pas les différents horizons indépendamment les uns des autres (point 5.3.5.3). Ce mode de modélisation se réfère par ailleurs à une conception géologique, si bien que les interpolations n'intègrent pas toutes les données ponctuelles. De plus, les anomalies d'épaisseur artificielles subsistant après l'interpolation des horizons ont été levées à l'aide de profils d'accrochage dans la méthodologie appliquée ici.

Carte des épaisseurs des sédiments crétacés

L'épaisseur des sédiments crétacés diminue généralement du sud-ouest vers le nord-est. Ils se biseautent le long d'une ligne Bienne–Thoune. Leur épaisseur atteint environ 560 m au maximum. Elle varie dans l'aire modélisée de Genève à cause d'une érosion prononcée antérieure au dépôt de la molasse. La faible épaisseur d'une soixantaine de mètres au nord de Genève pourrait cependant aussi être due en partie à des problèmes d'interpolation à l'intérieur de la grille et non à l'érosion locale (CLERC 2016). L'épaisseur des sédiments crétacés est sensiblement constante dans les aires modélisées Vaud et Fribourg. Font exception quelques segments situés entre les failles décrochantes, où l'épaisseur augmente en direction du Jura (MARCHANT & BAUER 2016).

Carte des épaisseurs du Malm supérieur

L'épaisseur du Malm supérieur diminue généralement de l'ouest vers l'est et du sud vers le nord. Elle atteint un maximum à l'ouest de Lausanne, avec environ 1250 m.

Des variations d'épaisseur sont observables le long de quelques structures tectoniques majeures de la partie occidentale du bassin molassique suisse, comme les zones de failles de Pontarlier–Vallorbe–Aubonne, Baulmes–Chamblon ou Fribourg. Elles pourraient indiquer la présence de failles synsédimentaires ou la réactivation d'anciennes failles,

mais ces hypothèses n'ont pas encore été tirées définitivement au clair (GRUBER et al. 2013, MARCHANT & BAUER 2016).

Carte des épaisseurs du Malm inférieur

L'épaisseur du Malm inférieur diminue généralement de l'ouest vers l'est, avec toutefois quelques variations locales. Elle varie de 750 m à 10 m. Les variations d'épaisseur indiquent un amincissement irrégulier des faciès dans le bassin sédimentaire (SOMMARUGA et al. 2012).

Dans le sous-modèle Genève, l'épaisseur du Malm inférieur est sensiblement constante, sauf aux alentours du forage profond Thônex-1, où elle est moindre (CLERC 2016).

Dans le sous-modèle Vaud, l'épaisseur diminue de plus de 300 m à proximité du Jura jusqu'à moins de 100 m au sud-ouest. La progradation du Malm inférieur en direction du sud-est s'explique par le soulèvement dû à l'ouverture du bassin valaisan (STAMPFLI 1993). La diminution d'épaisseur susmentionnée est ainsi liée à cet événement géodynamique (MARCHANT & BAUER 2016).

Dans le sous-modèle Fribourg, l'augmentation d'épaisseur du Malm inférieur pourrait avoir un rapport avec la forte subsidence qui a eu lieu à l'Oxfordien moyen à tardif (p. ex. LOUP 1992, WETZEL et al. 2003). L'origine des variations d'épaisseur le long de la zone de Fribourg n'a pas encore été tirée définitivement au clair. La présence de failles synsédimentaires est présumée, mais cette hypothèse nécessite des études plus poussées (GRUBER et al. 2013).

Dans le sous-modèle Berne, le Malm inférieur a une épaisseur maximale au sud-ouest de l'aire modélisée et il s'amincit en direction du nord-est. La diminution d'épaisseur jusqu'à environ 65 m à l'est du forage profond Hermrigen-1 est incertaine. Elle est probablement imputable à des incohérences entre les profils géologiques décrivant la tranche modélisée peu profonde et les données sismiques rasterisées décrivant la tranche modélisée profonde (MOCK 2016).

Carte des épaisseurs du Dogger

La figure 6-19 présente la carte des épaisseurs du Dogger dérivée du modèle GeoMol17. L'épaisseur du Dogger diminue généralement du nord-ouest vers le sud-est, de plus de 600 m à environ 40 m. Son maximum de 600 m est atteint à proximité des forages profonds Éclépens-1, Treycovagnes-1, Essertines-1 et Cuarny-1. Cela est dû à des structures liées à des chevauchements qui dédoublent le Dogger (SOMMARUGA et al. 2012). Un autre maximum, d'environ 570 m, apparaît au niveau du forage profond Courtion-1. L'épaisseur du Dogger est minimale autour des forages profonds Entlebuch-1 et Weggis ainsi qu'au sud de Tuggen.

Carte des épaisseurs du Lias

Le Lias est nettement plus épais dans la partie occidentale du bassin molassique suisse que dans sa partie centrale et orientale, où il a toutefois encore une épaisseur de 30–80 m. La carte des épaisseurs du Lias de GeoMol17 diffère légèrement de celle du SASMB (SOMMARUGA et al. 2012, Enclosure 20). L'atlas indique une épaisseur maximale le long du Jura, au nord-ouest du lac Léman. On ne peut pas exclure la présence de chevauchements, avec les augmenta-

tions d'épaisseur d'origine tectonique qu'ils impliquent (SOMMARUGA et al. 2012). Dans le modèle GeoMol17, l'épaisseur maximale, d'environ 900 m, est atteinte au nord de Genève, à proximité de la structure du Mont Mourex (CLERC 2016). Elle diminue à partir de là en direction du sud-ouest et du sud-est.

Les variations d'épaisseur du Lias ont été attribuées aux argilites du Toarcien et aux marnes du Pliensbachien (p. ex. PAOLACCI 2012). La diminution d'épaisseur en direction du sud-ouest avait déjà été mise en évidence par GORIN et al. (1993).

Dans le sous-modèle Vaud, les variations d'épaisseur du Lias, de 150 m environ au nord et au sud-est à 700 m environ dans la région d'Aubonne-Morges, reflète probablement la phase de rifting qui a provoqué l'ouverture de la Téthys (STAMPFLI 1993). La zone de failles de Baulmes-Chamblon pourrait avoir été active pendant le dépôt des sédiments liasiques (MARCHANT & BAUER 2016).

Dans le sous-modèle Berne, l'épaisseur du Lias diminue légèrement d'ouest en est. Une épaisseur maximale, semblant artificielle, apparaît au nord de Berne. Étant située à l'extrémité d'une ligne sismique, elle est vraisemblablement due à une erreur d'interpolation. L'épaisseur minimale affichée au nord-est du forage profond Hermrigen-1 est très probablement imputable à une incohérence d'épaisseur entre le modèle peu profond et le modèle profond (MOCK 2016).

Carte des épaisseurs du Keuper

Le Keuper a une épaisseur maximale entre le lac Léman et le Jura. Elle atteint 1400 m dans le compartiment tectonisé situé entre les zones de failles de St-Cergue - Luins et Pontarlier-Vallorbe-Aubonne et le chevauchement du Jura. Elle diminue depuis là jusqu'à environ 400 m vers le sud-ouest et 40 m vers le sud-est.

La carte des épaisseurs du Keuper de GeoMol17 diffère de celle du «Late Triassic» du SASMB à l'ouest de la ligne de coordonnées 2550000 (SOMMARUGA et al. 2012, Enclosure 20). Le Keuper est beaucoup plus épais dans GeoMol17 que dans le SASMB. La raison réside dans la position conceptuelle du décollement basal. Il se trouve à la base de la pile de sédiments mésozoïques dans le SASMB (SOMMARUGA et al. 2012) mais dans les évaporites du Keuper dans les sous-modèles Genève et Vaud (p. ex. BURKHARD 1990). En conséquence de ce décollement, le Keuper est fortement tectonisé et présente dans les données sismiques des réflecteurs chaotiques qui indiquent la présence localisée de chevauchements internes et de structures doublées ou triplées. De telles structures expliquent la présence d'importants maxima locaux de l'épaisseur du Keuper, par exemple à proximité du forage Treycovagnes-1, où il apparaît trois fois (SHELL 1978), ou au sud-ouest du sous-modèle Vaud, où son épaisseur dépasse 1200 m. Le Keuper s'amincit jusqu'à 300 m vers l'est et s'affine encore plus loin vers le nord-est (180 m au forage profond Courtion-1), tandis que les évaporites du Muschelkalk s'épaississent. Cela reflète le fait que le décollement basal passe dans le Muschelkalk dans cette région (SOMMARUGA 1997, MARCHANT & BAUER 2016).

L'origine des variations d'épaisseur le long de la zone de Fribourg n'a pas encore été tirée définitivement au clair. La présence de failles synsédimentaires est présumée, mais cette hypothèse nécessite des études plus poussées (GRUBER et al. 2013).

Dans le sous-modèle Berne, le Keuper présente des oscillations d'épaisseur sans tendance claire. On observe à proximité des deux forages profonds Thun-1 et Linden-1 une augmentation d'épaisseur probablement liée au plissement dû à la présence du décollement basal dans le Muschelkalk et à la tectonique salifère subie par le Keuper. Cette unité contenant la séquence évaporitique de la Formation du Bänkerjoch, elle est sensible à la tectonique salifère et peut donc être sujette à des variations d'épaisseur d'origine tectonique (MOCK 2016).

Carte des épaisseurs du Buntsandstein et du Muschelkalk

La carte des épaisseurs du Buntsandstein et du Muschelkalk présente généralement de nombreuses oscillations. L'épaisseur est maximale dans la région des sous-modèles Fribourg et Berne, avec des valeurs allant jusqu'à 700 m, et elle diminue vers le sud-ouest et vers l'est. Elle est minimale dans la région genevoise (environ 80 m), dans celle du Napf au nord du forage profond Entlebuch-1 (environ 60 m), au forage profond Küsnacht-1 (environ 65 m) et à l'est du forage profond de Tuggen (environ 40 m).

La carte des épaisseurs du Buntsandstein et du Muschelkalk de GeoMol17 diffère de celle du «Early-Middle Triassic» du SASMB à l'ouest de la ligne de coordonnées 2550000 (SOMMARUGA et al. 2012, Enclosure 20). Le Buntsandstein et le Muschelkalk sont moins épais dans GeoMol17 que dans le SASMB. La raison réside dans la position conceptuelle du décollement basal (comme pour le Keuper). Il se trouve à la base de la pile de sédiments mésozoïques dans le SASMB (SOMMARUGA et al. 2012) mais dans les évaporites du Keuper dans les sous-modèles Genève et Vaud. C'est pourquoi l'épaisseur du Buntsandstein et du Muschelkalk y est sensiblement constante. Elle est toutefois susceptible de varier localement, pour passer de 80 m à 300 m, suite au remplissage d'un paléorelief (base érodée de l'horizon Base du «Mésozoïque») (MARCHANT & BAUER 2016). Ces variations peuvent parfois aussi être dues à la difficulté d'interpréter les horizons Toit du Muschelkalk et Base du «Mésozoïque» dans les données sismiques (point 5.3.2), c'est pourquoi ils sont entachés d'incertitudes (CLERC 2016).

Dans les sous-modèles situés plus à l'est, le décollement basal se trouve dans les évaporites du Muschelkalk (Formation de Zeglingen). C'est pourquoi elles sont fortement sujettes à des variations d'épaisseur (p. ex. lentilles de sel, régions avec des accumulations ou des migrations de sel, MOCK 2016). La déformation liée au décollement peut ainsi expliquer partiellement l'augmentation d'épaisseur du Muschelkalk dans les sous-modèles Fribourg et Berne. Les variations d'épaisseur le long de la zone de Fribourg pourraient indiquer la présence de failles synsédimentaires, mais cette hypothèse n'a pas été tirée définitivement au clair (GRUBER et al. 2013). Certaines variations pourraient être artificielles ici également, car l'horizon Base du «Mésozoïque» est sensible aux erreurs d'interprétation (MOCK 2016).

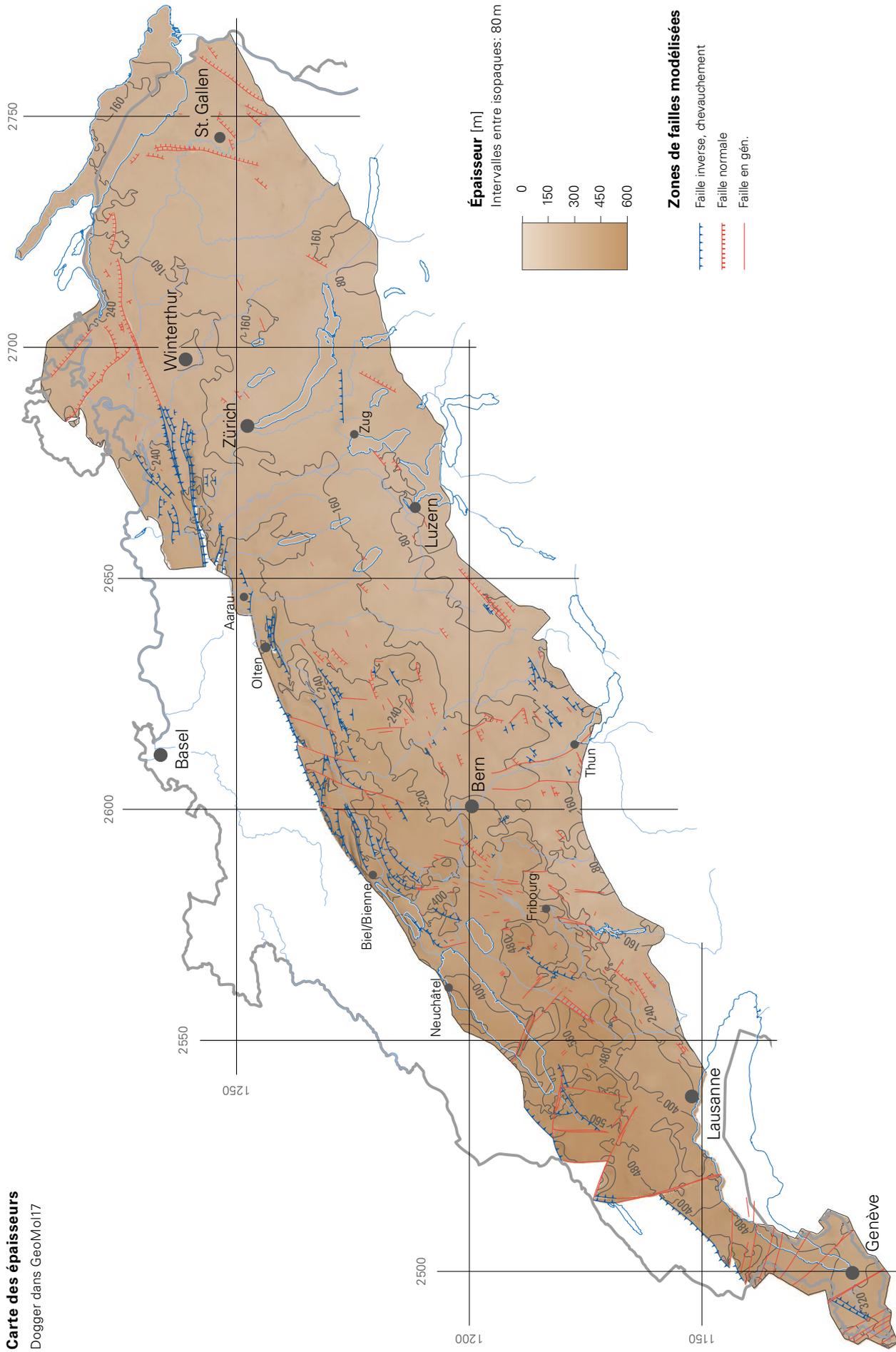


Fig. 6-19: Carte des épaisseurs du Dogger dérivée de GeoMol17 (description dans le texte).

Une augmentation d'épaisseur est visible le long du Jura dans les sous-modèles Fribourg et Berne. Elle est due à la présence du décollement basal dans le Muschelkalk, car ce plan n'influence pas l'horizon Base du «Mésozoïque» ici. Quelques augmentations et diminutions d'épaisseur de forme allongée et d'orientation SW-NE sont perceptibles entre les forages profonds Hermrigen-1 et Weiach-1. Elles témoignent de la présence de structures anticlinales et synclinales. Les augmentations d'épaisseur se trouvent au cœur des anticlinaux, généralement liés à des chevauchements, qui ont leur origine dans le décollement basal.

6.2.3 Ajustements à la jonction entre les sous-modèles

Les différents sous-modèles, qui avaient été délimités avant le début de la modélisation, ont été assemblés le long des lignes de jonction lors d'une dernière étape de travail. Une grande partie de ces lignes de jonction coïncident avec des sections sismiques et certaines d'entre elles incluent des forages profonds, sont situées à proximité de tels forages ou sont définies partiellement par des zones de failles.

Des régions limites à l'intérieur desquelles les sous-modèles se recouvrent ont en outre été définies le long de ces lignes de jonction. Les plans de failles et les horizons ont été ajustés à l'intérieur de ces régions (point 5.3.7).

Les modèles géologiques 3D peuvent avoir différents aspects en fonction de la conception géologique retenue, de la méthode de modélisation retenue et des connaissances géologiques du modélisateur, bien que les données de base utilisées aient été les mêmes. Ce problème s'est aussi manifesté, dans le cadre du projet GeoMol17, par le fait que certains horizons présentaient parfois des différences d'altitude de plusieurs centaines de mètres d'un sous-modèle à l'autre avant l'ajustement aux jonctions. Les diverses raisons en sont expliquées succinctement ci-après.

La qualité et la densité des données de base utilisées (levés sismiques, forages, cartes, etc.) ainsi que les possibilités de les corrélérer jouent un rôle important (chap. 7.1). La modélisation est aussi influencée selon que les données de base ne décrivent que des endroits situés à l'intérieur des aires modélisées ou également d'autres tombant à l'extérieur.

Différentes interprétations d'horizons et de failles contenus dans une section sismique génèrent logiquement différents modèles (point 7.2.2). Des divergences d'altitude peuvent aussi découler des cartes géologiques utilisées. Lorsque deux cartes non harmonisées ont été utilisées pour construire deux sous-modèles contigus, les lignes d'affleurement ne concordaient pas et les horizons étaient rattachés différemment à la surface.

La présence de forages profonds à l'intérieur ou à proximité des régions limites influence le modèle altimétrique des horizons. Ce point est crucial du fait que les limites entre les sous-modèles ont été déterminées autant que possible à partir de sections sismiques dont l'interprétation a été corrélée avec des forages profonds. Cela se répercute à son tour sur l'emplacement des horizons interprétés dans les sections sismiques.

Le choix des logiciels utilisés, des méthodes d'interpolation mises en œuvre, des paramètres introduits et des mailles

de rasterisation des horizons ont également une incidence sur le résultat de la modélisation.

Le modèle de vitesses appliqué pour convertir les interprétations sismiques en profondeurs joue un rôle important dans le bon ajustement des limites à la jonction entre les sous-modèles. La méthode mise en œuvre pour adapter ensuite les horizons aux marqueurs des forages profonds (calibrage à l'aide des forages) est également cruciale pour le positionnement altimétrique des horizons. Ce qui est déterminant ici, c'est le nombre de forages utilisés et leur emplacement à l'intérieur ou à l'extérieur des régions modélisées.

La conception géologique a une grande incidence sur la modélisation des failles et elle peut générer des différences notables entre les modèles. Influençant l'interprétation des données de base existantes, elle a aussi d'autres effets sur la modélisation, sur les modèles et sur l'ajustement des limites à leurs jonctions. Exemples:

- Une zone de failles ou une structure plissée a été modélisée dans un seul des deux sous-modèles contigus.
- Une faille a été modélisée dans deux sous-modèles contigus, mais pas à la même profondeur.
- Deux sous-modèles contigus n'ont pas été traités selon le même niveau de détail (nombre de plans de failles différent dans une même zone tectonisée).
- Les horizons ont été modélisés avec des failles en escalier dans l'un des deux sous-modèles contigus et ils ont été coupés au contact des failles dans l'autre (point 5.3.6.1).

La figure 6-20 présente les régions limites entre les paires de sous-modèles contigus. Les plans de failles et les horizons qu'ils décrivent ont été ajustés entre eux (point 5.3.7). Le long des lignes de contact (A-E dans la fig. 6-20), les différences d'altitude entre les modèles altimétriques de l'horizon Toit du Dogger appartenant aux paires de sous-modèles contigus ont été colorées avant l'ajustement des limites. La plupart des dénivellations sont liées à des failles. Trois régions présentant d'importantes différences d'altitude ressortent cependant (fig. 6-20, n°1-3). Celles-ci sont expliquées ci-dessous.

Entre les sous-modèles Vaud et Genève, les altitudes divergent le plus largement aux abords du Jura (fig. 6-20, n°1). Cela est principalement dû à la manière différente de modéliser les horizons et les failles ainsi qu'à l'emplacement de la jonction entre les sous-modèles. L'extension de l'ensemble de l'aire modélisée est définie par celle du bassin molassique. Comme cette extension peut être interprétée de diverses manières, le rétrochevauchement du Jura a été inclus dans le sous-modèle Vaud, tandis qu'il n'a pas été intégré dans le sous-modèle Genève.

Entre les sous-modèles Fribourg et Berne, les divergences d'altitude au sud de la zone de contact (fig. 6-20, n°2) sont en partie imputables aux différentes interprétations des horizons sismiques. L'application de différentes conceptions tectoniques est susceptible de générer des divergences entre les interprétations des failles et par conséquent les déplacements des horizons (point 6.2.1). Il n'existe par ailleurs dans cette région aucune section sismique recoupant la section sismique utilisée comme limite et se prolongeant dans les

GeoMol 17

Ajustements à la jonction entre les sous-modèles

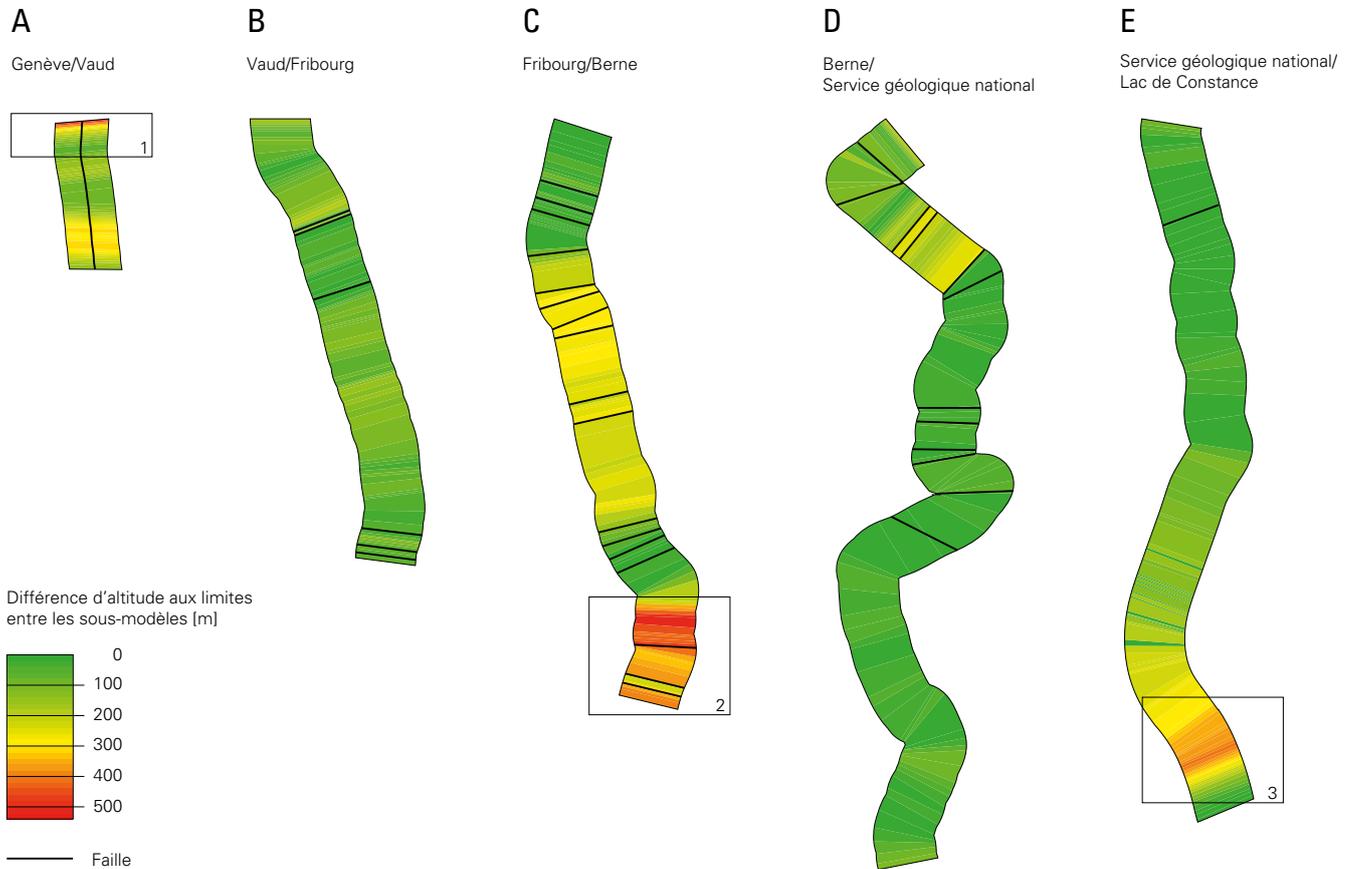
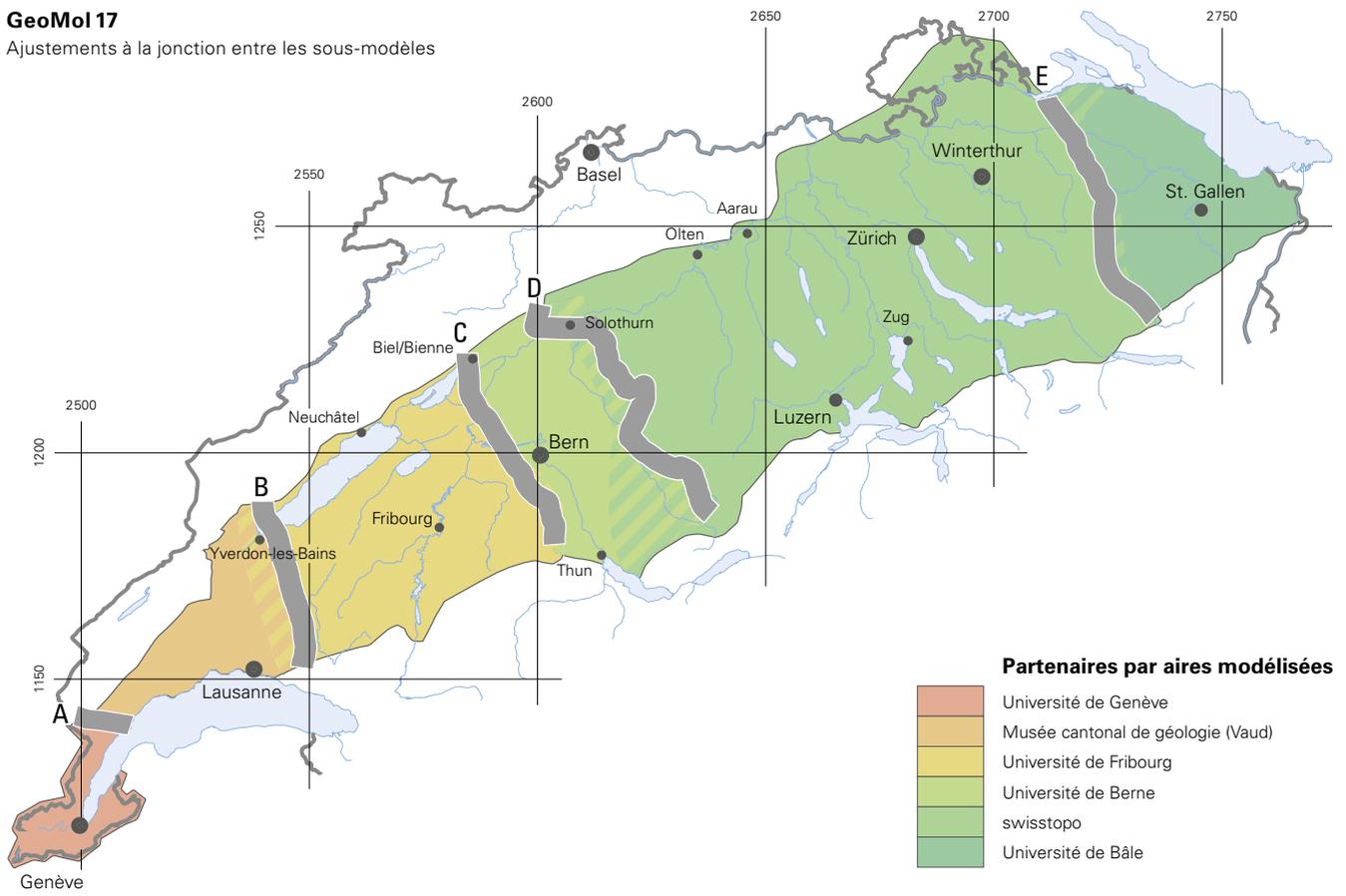


Fig. 6-20: Ajustements à la jonction entre les sous-modèles. Représentation des régions limites avec les divergences d'altitude affectant le modèle altimétrique du toit du Dogger le long des lignes de contact entre les différents sous-modèles géologiques (description dans le texte).

deux sous-modèles (fig. 4-1 et 4-2). En conjugaison avec l'absence de points d'accrochage, tels que des forages profonds, ces divergences entre les interprétations ne peuvent pas être levées sur de longs tronçons.

Entre les sous-modèles Service géologique national et Lac de Constance, les divergences d'altitude au sud de la zone de contact (fig. 6-20, n°3) sont imputables aux différences entre les modèles de vitesses et entre les calibrages à l'aide de forages qui s'ensuivent. Dans le sous-modèle Lac de Constance, les horizons ont été convertis en profondeurs en appliquant un premier modèle de vitesses, les conversions réalisées dans le sous-modèle Service géologique national ayant fait appel à une version plus récente. Par ailleurs, les forages utilisés pour calibrer le sous-modèle Lac de Constance étaient tous situés à l'intérieur de l'aire qu'il couvre, alors que le sous-modèle Service géologique national a aussi exploité des forages situés à l'extérieur de l'aire modélisée.

6.2.4 Modèle de vitesses

Les vitesses d'intervalles établies dans le cadre de GeoMol17 correspondent au modèle de vitesses le plus récent décrivant les principaux horizons marqueurs du bassin molassique suisse. Mais un tel modèle n'est jamais définitif. Chaque nouveau tir de calage permet de compléter le modèle et ainsi les connaissances au sujet de la géologie du sous-sol profond. Les différences avec le modèle de vitesses de SOMMARUGA et al. (2012) sont décrites au point 5.3.4.

En règle générale, les isochrones qui figurent dans les cartes des vitesses décrivant chacun des horizons modélisés (annexes 4.1–4.12) sont sensiblement parallèles à l'axe du bassin molassique suisse. Les vitesses sont faibles le long du pied sud du Jura et elles augmentent vers le sud-est en direction des Alpes. Cette tendance est due à l'épaisseur croissante de la pile de sédiments du bassin molassique du nord-ouest vers le sud-est et à la compaction supérieure qui va de pair. La répartition des forages comprenant des données de vitesses dans le bassin molassique a également une incidence sur l'aspect des cartes des vitesses. On voit en particulier ressortir la région située en rive sud-ouest du lac de Neuchâtel où se trouvent plusieurs forages profonds comprenant des vitesses considérées comme fiables (annexes 4.7, 4.8 et 4.11). Cette région comprend aussi plusieurs structures tectoniques susceptibles d'influencer le calcul de vitesses d'intervalles représentatives. Il est par exemple imaginable que le forage Treycovagnes-1 fournisse des vitesses supérieures aux valeurs attendues parce que la structure traversée a été soulevée lors du plissement du Jura (MARCHANT & BAUER 2016). Des roches originellement plus profondes et par conséquent plus compactes sont ainsi de nature à influencer le tracé des isochrones. Un effet similaire pourrait être responsable de l'anomalie bien visible sur la carte des vitesses d'intervalles du Dogger (annexe 4.9) au voisinage du forage Hermrigen-1. Quelques anomalies apparaissent également sur territoire allemand à proximité du lac de Constance, mais elles n'ont pas été étudiées de près.

7. Assurance qualité et incertitudes

L'élaboration d'un modèle géologique 3D dépend notamment de la nature, de la quantité et de l'ancienneté des données de base disponibles ainsi que de l'expérience et des connaissances des concepteurs du modèle. En particulier, les données de base ne peuvent généralement plus être influencées, ou alors seulement dans une mesure très limitée, lors du processus d'élaboration du modèle. Cela peut être dû au fait que le relevé des données est achevé ou que les données originales ne sont plus disponibles. Le processus de production d'un modèle doit donc toujours être adapté seulement aux circonstances, sans négliger les buts de l'assurance qualité (chap. 7.1) (LANDESGEOLOGIE 2011). La qualité est une notion fluctuante, qui ne se réfère pas seulement ici à l'absence d'erreurs visée lors de l'élaboration d'un modèle géologique 3D. Sa cohérence, son exhaustivité et son niveau de détail ainsi que la manière de le visualiser comptent également parmi les critères de qualité, laquelle dépend en outre de l'échelle dans le présent contexte.

Les processus de décision appliqués par l'économie, l'administration et la recherche recourent de plus en plus souvent à des modèles géologiques 3D, c'est pourquoi les informations relatives aux incertitudes affectant cette forme de représentation sont extrêmement importantes (LARK et al. 2013). Les modèles géologiques 3D sont toujours fondés sur des interprétations et ils constituent eux-mêmes des interprétations du sous-sol. Ils ne peuvent ainsi pas être incontestablement «justes» ou «faux». Un modèle n'est qu'une approximation de la réalité, qu'il ne prétend par conséquent jamais restituer d'une manière exacte. Tout modèle géologique 3D est donc affecté d'incertitudes. Les données de base utilisées, les méthodes appliquées et l'expertise des auteurs constituent les principaux facteurs d'incertitude. Ces derniers doivent impérativement être identifiés, décrits et quantifiés avant, pendant et après la modélisation, puis documentés de manière transparente. Cela permet de transmettre aux utilisateurs des indications au sujet de la fiabilité des modèles et des possibilités de les appliquer (WELLMANN et al. 2014).

Le projet GeoMol a privilégié une modélisation géologique tridimensionnelle basée sur des données provenant de tiers. Le présent chapitre décrit l'approche suivie et les solutions trouvées pour assurer la qualité de GeoMol Suisse (chap. 7.1) et pour en gérer les incertitudes (chap. 7.2).

7.1 Assurance qualité

Conformément à la définition de la qualité selon la norme EN ISO 9000, les modèles géologiques 3D doivent être géologiquement, géométriquement et cinématiquement corrects et complets. Cela dépend toujours de la question posée et de l'échelle considérée. Lorsque les modèles satisfont à ces conditions, ils sont à même de servir à l'usage souhaité par leurs utilisateurs.

Ces exigences théoriques se heurtent aux difficultés pratiques suivantes:

- Plus de 95% des jeux de données utilisés dans GeoMol15 et GeoMol17 ont été mis à disposition par des tiers. Il n'a souvent pas été possible d'accéder aux données originales.
- La provenance et l'usage initial des données de base utilisées dans les deux modèles étaient très hétérogènes. Elles consistaient en interprétations et évaluations de diverses informations (levés sismiques, levés de forages, cartes et profils géologiques, etc.) datant de différentes années et revêtant des degrés de qualité et de détail inégaux.
- La collecte, le traitement, l'interprétation et l'utilisation des données mises à disposition par les différentes sources n'étaient pas harmonisés avant leur réception. Il a donc fallu les harmoniser et éventuellement les simplifier pour pouvoir les mettre en œuvre.
- Les modèles GeoMol15 et GeoMol17 sont composés de sous-modèles. Les équipes qui les ont élaborés ont parfois suivi différentes approches techniques.
- Les travaux de modélisation proprement dits (préparation, traitement, interprétation, interpolation et/ou extrapolation de données) ont été accomplis par un grand nombre de personnes, dont l'approche technique était tributaire des connaissances en géologie et des expériences spécifiques.

La qualité d'un modèle géologique 3D, très complexe dans la pratique, ne peut pas être définie précisément sous tous ses aspects ni toujours confrontée à des faits. Le véritable but de l'assurance qualité consiste à susciter la confiance dans le produit «modèle géologique 3D». Pour y parvenir, l'assurance qualité doit se fonder sur des facteurs clairement définis et transparents. C'est pourquoi quatre éléments susceptibles de garantir la qualité des modèles géologiques 3D de swisstopo ont été définis préalablement (tab. 7-1).

Les exemples suivants montrent dans quels domaines des mesures d'assurance qualité ont été mises en œuvre.

Tab. 7-1: Les quatre volets de l'assurance qualité des modèles géologiques 3D (d'après LANDESGEOLOGIE 2011), avec description des principes respectifs.

Volets	Principes	Exemple
Qualité de l'exécution et principes de modélisation	La qualité de l'exécution des modèles géologiques 3D est garantie en soumettant la modélisation à certains principes et étapes de travail standardisés. Les principes régissant l'élaboration des modèles sont formulés de manière ouverte et transparente et ils sont accessibles à un endroit centralisé.	Point 7.1.1
Qualité des données de base	La qualité des données de base est vérifiée séparément pour chaque type de données. Des éléments et des listes de contrôle appropriés sont élaborés à cet effet. Les données de base sont classées selon leur qualité lorsque cela est possible et pertinent. Celles qui ont une mauvaise qualité sont mentionnées comme telles et améliorées dans la mesure du possible avant d'être utilisées le cas échéant.	Point 7.1.2
Qualité des ressources mises en œuvre (aides techniques et personnel)	L'actualité et les performances des aides techniques utilisées (appareils et logiciels informatiques) sont vérifiées régulièrement. Elles sont mises à jour et remplacées si nécessaire. En outre, les collaboratrices et les collaborateurs bénéficient d'une formation en sciences de la Terre, d'un savoir spécialisé en modélisation 3D et de connaissances au sujet des aides techniques utilisées. L'échange interne d'expériences est un élément essentiel de l'assurance qualité	–
Contrôles relatifs à l'assurance qualité	La garantie interne de la qualité est soumise à révision à intervalles réguliers et adaptée aux nouvelles exigences si nécessaire.	Point 7.1.5

7.1.1 Qualité de l'exécution

Une part essentielle des travaux a consisté à élaborer et à développer les procédures et les méthodes manquantes. Le Service géologique national a documenté par écrit chaque procédure et méthode conçue ou adaptée. Les partenaires (fig. 1-2) ont en outre documenté les travaux qu'ils ont accomplis dans un journal pour assurer leur reproductibilité. Cette démarche a permis de réaliser la modélisation d'une manière transparente et vérifiable, contribuant ainsi grandement à garantir sa qualité.

7.1.2 Qualité des données de base

Aucun nouveau levé de données n'était prévu dans le cadre du projet GeoMol. Il a donc été possible d'émettre d'emblée des lignes directrices régissant le contrôle de la qualité des données ainsi que des indications concernant leur utilisation ultérieure. Les données existantes ont été améliorées moyennant un engagement modeste lorsque c'était possible et pertinent. Il s'est avéré important de retravailler notamment les points de données isolés, principalement en raison de la densité variable des données. Les corrections des données entrantes ont été mentionnées et documentées comme telles.

7.1.2.1 Procédure générale

Des informations extraites de nombreuses données de base (p.ex. levés sismiques, cartes et profils géologiques, données de forages) ont été utilisées pour élaborer les modèles 3D GeoMol15 et GeoMol17. Leur contenu était la plupart du temps complémentaire, mais leur qualité présentait des différences spécifiques. Il y a lieu de remarquer généra-

lement que la qualité des données de base utilisées était très diverse et qu'il a fallu les évaluer avant de pouvoir les exploiter. Un organigramme détaillé a été établi afin d'assurer la qualité des données de base (fig. 7-1).

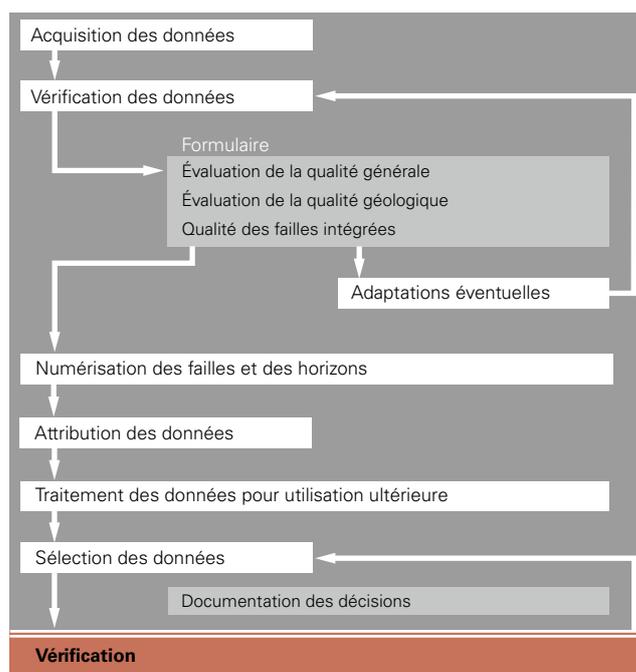


Fig. 7-1: Organigramme « Assurance qualité lors de la reprise de données » mis en œuvre pour élaborer des modèles géologiques 3D.

7.1.2.2 Données de forages

Les données de forages représentent la source la plus sûre d'informations au sujet du sous-sol. Elles en donnent un aperçu ponctuel très précis, qui doit être le plus fiable possible (coordonnées, altitude, inclinaison, orientation et but des forages). Des informations comme l'année et le type de forage contribuent également à la qualité de ces données. Un guide a été élaboré pour indiquer la manière d'intégrer les données de forages dans la banque de données ad hoc de GeoMol (LANDESGEOLOGIE 2014a). Il définit les critères de qualité à respecter, fixe la détermination de l'imprécision verticale des profils de forages et indique des méthodes complémentaires visant à garantir la qualité des résultats. Cela a permis de décrire d'une manière homogène la qualité requise des données de forages utilisées pour établir les modèles.

7.1.2.3 Données sismiques

La qualité des sections sismiques exploitées dans le cadre de GeoMol15 et de parties de GeoMol17 n'a pas été classifiée. La continuité des réflecteurs avait en revanche été appréciée dans d'autres travaux (p.ex. SOMMARUGA et al. 2012) afin d'évaluer la représentation visuelle des sections sismiques. Cette évaluation n'a pas été réalisée ici, car les discontinuités des réflecteurs peuvent aussi être imputables à des problèmes rencontrés lors de l'acquisition sismique ou à un traitement insuffisant des données résultantes. C'est ainsi, par exemple, que des corrections insuffisantes des vitesses dans les roches meubles quaternaires sont susceptibles de générer des artefacts dans le sous-sol profond, qui induiront ensuite des discontinuités dans les réflecteurs. Mais ces discontinuités peuvent aussi être causées par des phénomènes géologiques présents dans le sous-sol. Au vu de ces considérations, l'évaluation des données sismiques en fonction de la continuité des réflecteurs indique seulement dans quelle mesure ces données sont susceptibles d'être interprétées, mais elle est insuffisante pour classifier leur qualité de manière pertinente.

D'autres facteurs influencent considérablement l'interprétation des sections sismiques:

- Proximité d'un forage pour lequel des tirs de calage ont fourni des données fiables. Lorsqu'une campagne sismique est menée à l'écart de tout forage, il faut s'attendre à l'apparition d'autres incertitudes dues à l'absence de possibilités de corrélation.
- Possibilités de corrélation avec des sections obtenues lors d'autres campagnes. Les réflecteurs présentent généralement des écarts au niveau des croisements des sections sismiques provenant de différentes campagnes et traitées de manières différentes.

7.1.2.4 Profils géologiques

Les profils géologiques (transects) de SOMMARUGA et al. (2012), ayant fait l'objet d'une appréciation avant d'être utilisés pour élaborer le modèle GeoMol15, ont ainsi été soumis à une estimation de la qualité (LANDESGEOLOGIE 2014b). Cela a permis de détecter des incohérences affectant éventuellement des profils destinés à l'élaboration future de

GeoMol15. En outre, des incohérences repérées lors de l'exploitation tridimensionnelle des interprétations sismiques bidimensionnelles ont pu être corrigées en vue de la modélisation 3D.

Des profils géologiques existants de divers âges et provenances ont été traités pour élaborer le modèle GeoMol17 (chap. 4.3). Ils n'ont pas été classés explicitement selon leur qualité dans le cadre de l'assurance qualité, mais une recommandation concernant l'utilisation future de GeoMol17 (possible, avec réserve) a été émise selon les traitements respectifs décrits.

7.1.3 Assurance qualité des sous-modèles

Les travaux relevant du projet GeoMol17 ont été accomplis par le Service géologique national en collaboration avec plusieurs partenaires. Les résultats présentés (modèles 3D et journaux de travaux, voir le point 7.1.1) ont été vérifiés en appliquant une procédure standard. C'est ainsi que chaque sous-modèle a été recoupé par des profils à intervalles réguliers pour établir des cartes des épaisseurs des unités stratigraphiques présentes. Cela a permis d'évaluer la traçabilité du contenu et de la géologie des divers modèles ainsi que leur exhaustivité. Les critères suivants ont fait l'objet de contrôles:

- méthode appliquée pour modéliser les zones de failles (modèle de failles «étanche», soit topologiquement correct, modélisation des déplacements) et les horizons (connexions «étanches» au contact des failles, raccordements entre les données souterraines et superficielles);
- concordance entre les contacts stratigraphiques dans les forages et les horizons modélisés;
- cohérence topologique des plans de failles et des horizons.

Les résultats de ces vérifications ont été documentés et discutés avec les partenaires, puis les sous-modèles ont été améliorés lorsque c'était nécessaire et pertinent.

7.1.4 Toit du rocher

La qualité des données de base (cartes géologiques et topographiques, modèles numériques de terrain) utilisées pour modéliser le toit du rocher sur le Plateau suisse et dans les grandes vallées alpines n'a pas été évaluée. Elles ont été utilisées telles quelles (LANDESGEOLOGIE 2015). Les données introduites directement (levés de forages, modèles existants du rocher) n'ont pas non plus été réévaluées, mais il a été renvoyé aux guides (LANDESGEOLOGIE 2013) et aux publications existantes (point 7.1.2) pour trouver une appréciation de la qualité. Celle des données de forages n'a été contrôlée que lors de la modélisation (point 5.3.5.1).

7.1.5 Vérifications relatives à l'assurance qualité

Une part essentielle de l'assurance qualité concernant GeoMol Suisse a consisté à faire vérifier certains résultats partiels par des entités externes. L'ensemble du projet (gestion, travaux scientifiques, marketing) a en outre été soumis

régulièrement à une révision externe. Les trois exemples suivants illustrent cette démarche:

- Modèle de vitesses: le tout nouveau modèle de vitesses conçu dans le cadre de GeoMol17 (points 5.3.4 et 6.2.4) a été vérifié par des experts externes en 2015 avant d'être utilisé pour la modélisation.
- Révision du projet: les travaux réalisés dans le cadre de GeoMol Suisse ont été présentés deux fois par année à un groupe d'experts international pendant toute la durée du projet. Chaque séance a été consignée et les recommandations formulées par le groupe d'experts ont été enregistrées et traitées. Cela a permis d'acquérir de précieuses indications concernant le contenu et l'organisation des travaux.
- Groupe de suivi: les partenaires du projet, qui faisaient partie du groupe de suivi comme convenu, ont également été conviés à une discussion deux fois par année. L'avancement du projet a été présenté par tous les partenaires impliqués lors de ces séances. Elles ont mis l'accent sur les échanges, consistant notamment à transmettre des informations au sujet de l'évolution du projet.

7.2 Incertitudes affectant les modèles géologiques 3D

L'élaboration de modèles géologiques 3D, tels que GeoMol15 et GeoMol17, requiert des connaissances expertes en géologie. Elle implique la combinaison de nombreuses données de base avec les connaissances de la géologie régionale et l'expérience des géologues chargés de la modélisation. La qualité des données entrantes joue un rôle crucial, car elle influence la fiabilité de l'interprétation géologique qui en découle. La modélisation géologique 3D à composante manuelle ne peut faire l'objet d'aucun indice de qualité garanti mathématiquement, contrairement aux processus de production automatiques. L'incidence du facteur humain lors de l'élaboration d'un modèle peut par exemple conduire à évaluer différemment les mêmes bases ou à interpréter différemment les mêmes données. Il est important de décrire l'incertitude affectant les modèles géologiques 3D pour fournir à l'utilisateur des indications au sujet de leurs possibilités d'application et de leur fiabilité (GUNNINK et al. 2010).

La description et la quantification de la fiabilité des modèles sont des thèmes majeurs dans la modélisation géologique 3D (p.ex. DAVIS & KELLER 1997, PANG et al. 1997, TACHER et al. 2006, WYCISK et al. 2009, WELLMANN et al. 2010, WELLMANN et al. 2011). L'estimation de l'incertitude affectant les modèles géologiques 3D (p.ex. TACHER et al. 2006, ZHU & ZHUANG 2010, WELLMANN et al. 2011) et la description des approches méthodologiques mises en œuvre (p.ex. TACHER et al. 2006, KAUFMANN et al. 2008, BISTACCHI et al. 2009, BISTACCHI 2010) sont également très importantes. L'incertitude entachant les données de base n'a en revanche guère été décrite jusqu'ici. Or elles jouent justement un rôle essentiel dans l'incertitude affectant les modèles géologiques 3D, aussi doivent-elles faire l'objet d'une grande attention.

Dans le cadre du projet GeoMol, l'incertitude n'a pas été évaluée pour toutes les données de base. Il n'a pas non plus été possible de mettre en œuvre ni d'élaborer une méthode applicable aux résultats obtenus. C'est pourquoi les points suivants se limitent à exposer les motifs de l'application ou non d'évaluations de l'incertitude ainsi qu'à évoquer les difficultés rencontrées.

7.2.1 Incertitudes affectant les données de base

Les données de base sont désormais subdivisées en trois catégories, conformément à la version révisée de l'ordonnance sur la géologie nationale (OGN, art. 2):

- Données géologiques primaires: données au sens de mesures ou de descriptions directes, de levés, de documentation sur des caractéristiques géologiques, notamment mais pas exclusivement, de signaux et de valeurs de mesures non traités, de descriptions lithologiques et géotechniques de carottes et de déblais de forage, de cartes des affleurements, d'analyses de laboratoire.
- Données géologiques primaires traitées: données géologiques qui ont été traitées en vue d'une interprétation, notamment mais pas exclusivement, des données géophysiques traitées, des profils de forages.
- Données et informations géologiques secondaires: données et informations géologiques qui résultent de l'interprétation de données géologiques primaires et de données géologiques primaires traitées, notamment mais pas exclusivement, des interprétations de données géophysiques, des cartes géologiques, des coupes géologiques, des modèles géologiques.

L'incertitude devrait pouvoir être indiquée à chaque point dans l'espace d'un modèle géologique 3D. L'évaluation et la description de l'incertitude liée à toutes les données entrantes revêtent donc une grande importance, mais des raisons de capacité n'ont pas permis d'y procéder pour chaque donnée utilisée, et encore moins pour une combinaison de toutes ces données. La vue d'ensemble suivante a pour but d'attirer l'attention des utilisateurs de modèles géologiques 3D sur le fait que l'incertitude doit être considérée dès le stade de l'acquisition des données de base et non seulement lors de l'évaluation des résultats.

7.2.1.1 Données géologiques primaires

Aucune donnée géologique primaire n'a été traitée ni utilisée dans le cadre du projet GeoMol.

7.2.1.2 Données géologiques primaires traitées

Les données géologiques primaires traitées suivantes étaient à disposition pour élaborer les modèles GeoMol15 et GeoMol17:

- Sections sismiques (traitées): les données obtenues auprès de leurs possesseurs différaient largement par leur qualité, leur âge et leur but (point 7.1.2.3) ainsi que par les étapes de traitement accomplies antérieurement. Il a été renoncé

à estimer l'incertitude affectant ces données dans le cadre de GeoMol, notamment parce que l'équipe en charge du projet n'a généralement pas eu connaissance des particularités de l'acquisition et du traitement des données sismiques, condition essentielle pour procéder à une telle estimation.

- Données de forages: dans le cadre de GeoMol, l'incertitude liée aux forages eux-mêmes n'a pas été décrite sur la base des profils relevés (informations géologiques contenues), mais en estimant l'incertitude technique (coordination, profondeur des horizons, pendage des couches) (LANDESGEOLOGIE 2014).

7.2.1.3 Données et informations géologiques secondaires

Les données et les produits géologiques ne peuvent être ni acquis ni élaborés sans le travail de personnes qualifiées. Au cours du temps, des doctrines se sont établies, des conceptions géologiques se sont développées ou modifiées et la qualité des données a donc augmenté considérablement. Les différents spécialistes sont confrontés à ces évolutions dans une mesure variable. Le savoir en géologie n'est pas diffusé uniformément et il est influencé par la doctrine dominante. Pour ces différentes raisons, il n'est souvent guère possible de quantifier, pour toutes les données et informations géologiques secondaires, l'incertitude liée aux connaissances en géologie des collaboratrices et des collaborateurs impliqués (p. ex. BOND et al. 2007, 2015, GUNNINK et al. 2010).

Dans le cadre du projet GeoMol, les données géologiques secondaires suivantes ont été utilisées:

- Profils géologiques: pour élaborer un profil géologique, les spécialistes interprètent des données géologiques primaires traitées et les placent dans un contexte. Leurs connaissances expertes jouent un rôle crucial, outre le type, la quantité et la qualité des données de base. Les possibilités d'utiliser des profils issus de l'AG25 et d'autres sources pour élaborer les modèles dans GeoMol ont été examinées selon divers critères (p. ex. emplacement, géoréférencement, stratigraphie). Aucune autre incertitude affectant les profils géologiques n'a été estimée.
- Sections sismiques (interprétées): l'incertitude générale affectant les données sismiques a été décrite dans MEIER et al. (2014). On y lit que «les incertitudes affectant les profondeurs des horizons sismiques interprétés géologiquement revêtent une grande importance. Elles résultent des différentes étapes de traitement et d'interprétation des données, telles que corrections statiques lors du traitement de données exprimées en temps ou interprétation de géologies complexes ou d'images sismiques défavorables, mais aussi et surtout des modèles de vitesses utilisés pour les conversions en profondeurs» [trad.]. Pour ces raisons, l'incertitude liée à l'interprétation des sections sismiques n'a pas été estimée dans le cadre de GeoMol.
- Données raster (p. ex. cartes, modèles numériques de terrain, orthophotos): les informations contenues dans certaines cartes géologiques ont été intégrées dans les modèles GeoMol15 et GeoMol17. Elles ont pu être utili-

sées directement sous la forme de données vectorielles ou elles ont dû être numérisées à la main. La résolution spatiale des données raster influence directement la perte de précision pendant la numérisation manuelle (BAUMBERGER 2015). L'incertitude affectant les données raster exploitées n'a pas été estimée.

- Données vectorielles 2D: l'élaboration des modèles dans GeoMol a principalement recouru aux données vectorielles contenues dans les produits de swisstopo (GeoCover, GéoCartes 500, etc.). Les points y figurant étaient trop rapprochés pour la modélisation géologique 3D, aussi a-t-il fallu les espacer (fig. 7-2). On a projeté les données vectorielles sur le modèle altimétrique swissALTI^{3D} pour adapter les zones de failles et les horizons modélisés (SWISSTOPO 2017). L'incertitude ainsi induite dépend de la densité de points dans les lignes projetées et de la résolution du modèle altimétrique (BAUMBERGER 2015, voir aussi la fig. 7-2). L'incertitude affectant les données vectorielles utilisées n'a pas été estimée.

7.2.2 Incertitudes affectant les résultats

Autant GeoMol15 que GeoMol17 constituent des représentations instantanées. Les deux modèles ont été élaborés à un moment donné, à partir d'un jeu de données défini, en appliquant la conception géologique alors en vigueur et dans un but précis. Des données de différents types ont été reliées et combinées pour les confectionner. Les données entrantes avaient un degré de qualité et d'incertitude variable, qui n'a pas pu être quantifié, ou alors moyennant un travail considérable (chap. 7.2). L'élaboration d'un modèle des incertitudes applicable à GeoMol Suisse se fonderait donc sur des éléments d'incertitude non ou insuffisamment descriptibles.

Aucune méthode appropriée n'a pu être trouvée ni développée au cours du projet pour décrire l'incertitude affectant les combinaisons de données de base et par conséquent les modèles géologiques 3D. C'est pourquoi il a été renoncé à assortir les résultats d'une incertitude numérique dans le cadre de GeoMol Suisse. Les calculs nécessaires se heurtent à deux difficultés au moins. D'une part, ils n'aident pas à diminuer les incertitudes, car il faudrait, au vu de la diversité des données entrantes (données primaires «solides» ou interprétations), intégrer les interprétations et les incertitudes entachant les données obtenues indirectement dans le calcul de l'incertitude globale. D'autre part, ils doivent se limiter à des incertitudes relatives, car la détermination d'incertitudes absolues (p. ex. écarts en mètres) requiert du modèle une fiabilité qu'il n'est pas du tout à même d'assurer. Ces deux points vont à l'encontre du but consistant à donner à l'utilisateur d'un modèle des données fiables au sujet de sa précision et des possibilités de l'appliquer.

Les auteurs sont d'avis que chaque point d'un modèle géologique 3D devrait faire l'objet d'une indication concernant son incertitude. Mais cela n'a pas été possible compte tenu de la démarche appliquée et du temps à disposition.

Au lieu d'un modèle des incertitudes, une méthode permettant à l'utilisateur de se faire une idée de la fiabilité des horizons modélisés dans GeoMol17 a été élaborée sous la forme de cartes d'ensemble des données (chap. 4.1).

Densité de points

Diagramme X-Z du chevauchement «Kronberg-Süd»

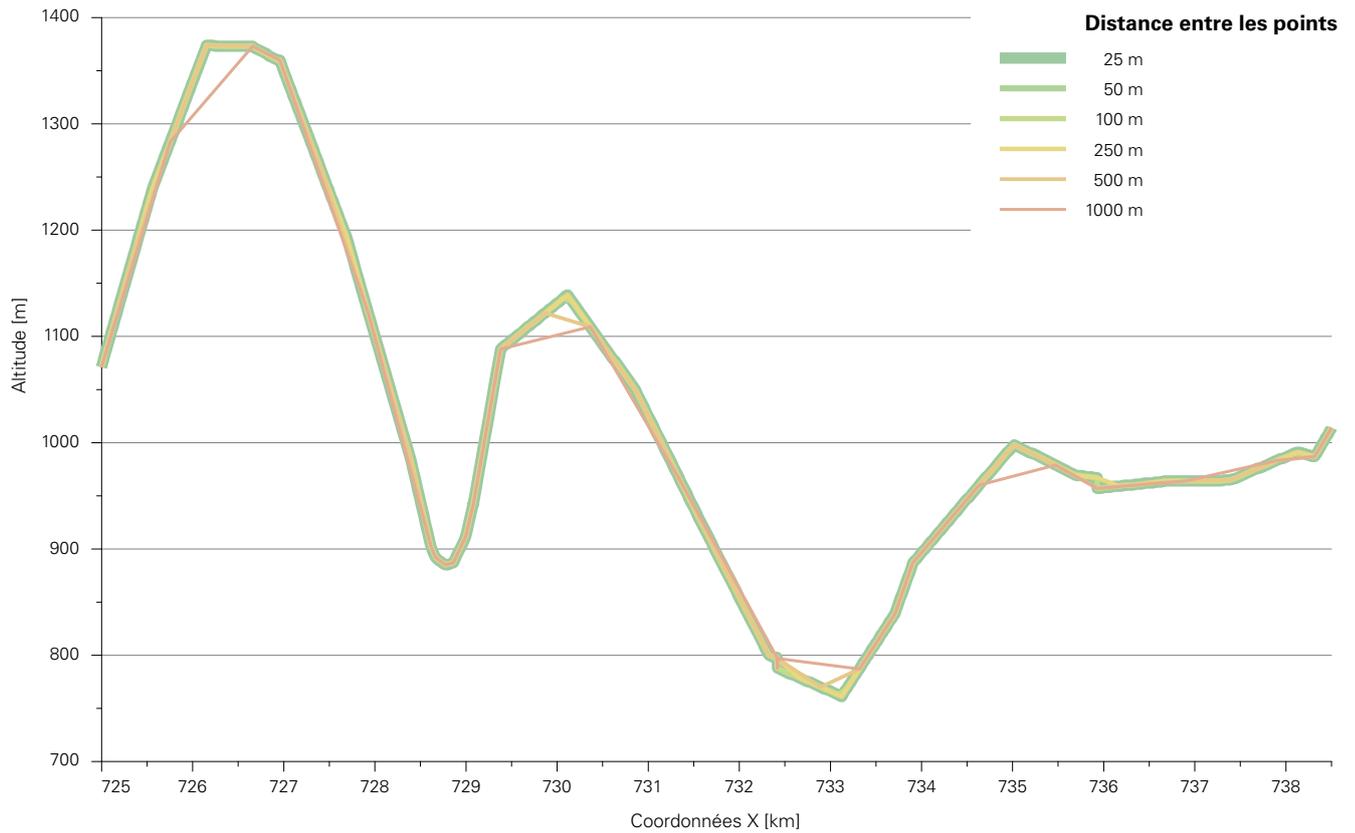


Fig. 7-2: Diagramme X-Z du chevauchement «Kronberg-Süd» avec la répartition des nœuds du maillage pour différents espacements (25 m, 50 m, 100 m, 250 m, 500 m et 1000 m). L'espacement de 25 m confère un haut degré de détail au tracé de la ligne ainsi décrite par de nombreux points (612), si bien qu'elle sert de référence dans cette étude. Les espacements de 50 m, 100 m et 250 m, correspondant à un nombre largement inférieur de données, génèrent pourtant un tracé similaire à celui de la ligne de référence. À partir d'un espacement de 500 m, le tracé de la ligne est en revanche trop simplifié pour satisfaire aux exigences de GeoMol (selon l'approche de BAUMBERGER 2015).

8. Applications

Les deux modèles géologiques 3D GeoMol15 et GeoMol17 peuvent être utilisés dans différents buts: pour visualiser ou communiquer des caractéristiques géologiques, comme premières bases sommaires de planification d'infrastructures, pour décrire et déterminer le potentiel du sous-sol et comme aides à la gestion de ressources en matières premières et en énergie. Leur niveau de détail est adapté à leur usage prévu d'échelle régionale. Dans GeoMol15, les zones de failles, les déplacements et les horizons ont été représentés de manière simplifiée ou n'ont pas été considérés. Dans GeoMol17, ces éléments ont par contre été modélisés en détail. En raison de leur couverture régionale, ces deux modèles ne peuvent pas servir à des études locales détaillées sans ajout de nouvelles données.

Ce chapitre décrit le potentiel géologique du bassin molassique et présente des exemples d'application des deux modèles géologiques tridimensionnels.

8.1 Application dans un but de communication et de visualisation

La géologie est tridimensionnelle par essence; sa visualisation 3D ouvre des perspectives fascinantes à la communication et aux interactions entre spécialistes et profanes. Mais il faut impérativement tenir compte des limites des modèles géologiques 3D. Ils ne sont pas toujours simples à visualiser et à comprendre pour de nombreux intéressés. Des représentations simplifiées des relations géologiques sont cependant susceptibles d'étayer des actions pratiques, telles que décisions dans le domaine de l'économie et de l'administration. Ces applications revêtiront d'autant plus d'importance à l'avenir que les conflits entre usages concurrents de potentiels géologiques deviendront de plus en plus fréquents. Les spécialistes doivent donc être en mesure de transmettre simplement leurs connaissances au sujet du sous-sol et de sa constitution aux profanes. Cette démarche est notamment confrontée à deux difficultés: d'une part, il faut élaborer des modèles géologiques 3D corrects et porteurs d'informations; d'autre part, il faut les rendre accessibles à un public aussi large que possible.

Les modèles GeoMol15 et GeoMol17 ne sont pas seulement applicables pour analyser ou pour visualiser des questions concrètes lors de processus de décision. Ils sont aussi appropriés pour exposer des faits et des relations géologiques dans la recherche, dans l'enseignement scolaire ou dans des musées. Ces deux modèles géologiques 3D sont disponibles sur plusieurs plates-formes de manière à être accessibles aux différents groupes de personnes visés: sur le portail de géo-

données de la Confédération (<http://map.geo.admin.ch>) pour les non-spécialistes et sur un visualiseur de données 3D perfectionné (<https://viewer.geomol.ch>, voir le chap.9.1) pour les spécialistes et les experts.

8.2 Application dans la planification de projets

Les projets fondés sur des investigations du sous-sol (p. ex. production d'énergie, stockage de déchets, construction d'infrastructures) demandent beaucoup de temps et d'argent. Ils doivent considérer divers thèmes (p. ex. caractère économique, rapport coût-efficacité, impact sur l'environnement) en sus des questions purement techniques (p. ex. caractéristiques géologiques, technique appliquée, génie civil, construction). La figure 8-1 présente le déroulement schématique de la planification d'un projet hypothétique de géothermie et l'évolution de ses coûts cumulés. Notons que le calendrier autant que la planification des coûts peuvent varier de projet en projet.

D'après la figure 8-1, les coûts augmentent considérablement dès le début de la phase d'exploration, les phases antérieures (étude préliminaire et étude de faisabilité) apparaissant relativement peu onéreuses en comparaison. L'investissement total nécessaire pour achever le projet géothermique d'Unterhaching, près de Munich, s'est monté à 80 millions d'euros (VON HARTMANN et al. 2015), tandis que les projets avortés de Bâle et de Saint-Gall ont coûté environ 60 millions de francs chacun (interviews sur Internet³, STADT ST. GALLEN 2014).

La simple existence d'un modèle géologique 3D dans une région ne garantit pas encore la réussite d'un projet. Les modèles tridimensionnels présentent cependant l'avantage d'accélérer la collecte et la présentation des caractéristiques géologiques lors de l'étude préliminaire et de l'étude de faisabilité. Des questions géologiques et techniques peuvent ainsi être résolues plus rapidement et à un prix plus favorable à ce stade du projet.

Les modèles GeoMol15 et GeoMol17 peuvent déjà être utilisés comme bases d'étude dans des phases précoces de projets de toutes sortes. Ces outils structuraux et géométriques tridimensionnels permettent en outre de mieux cibler les programmes de recherche et d'exploration, d'où une économie de temps et d'argent. Les nouvelles données géologiques acquises dans le cadre d'un projet peuvent être intégrées dans le modèle existant, qui est ainsi amélioré constamment. Cette démarche a déjà été mise en œuvre

³ <http://archiv.onlinereports.ch/2006/GeothermieErdbebenMedienkon.htm> (consulté le 23.03.2017).

Déroulement d'un projet hypothétique de géothermie

Évolution des coûts avec le temps

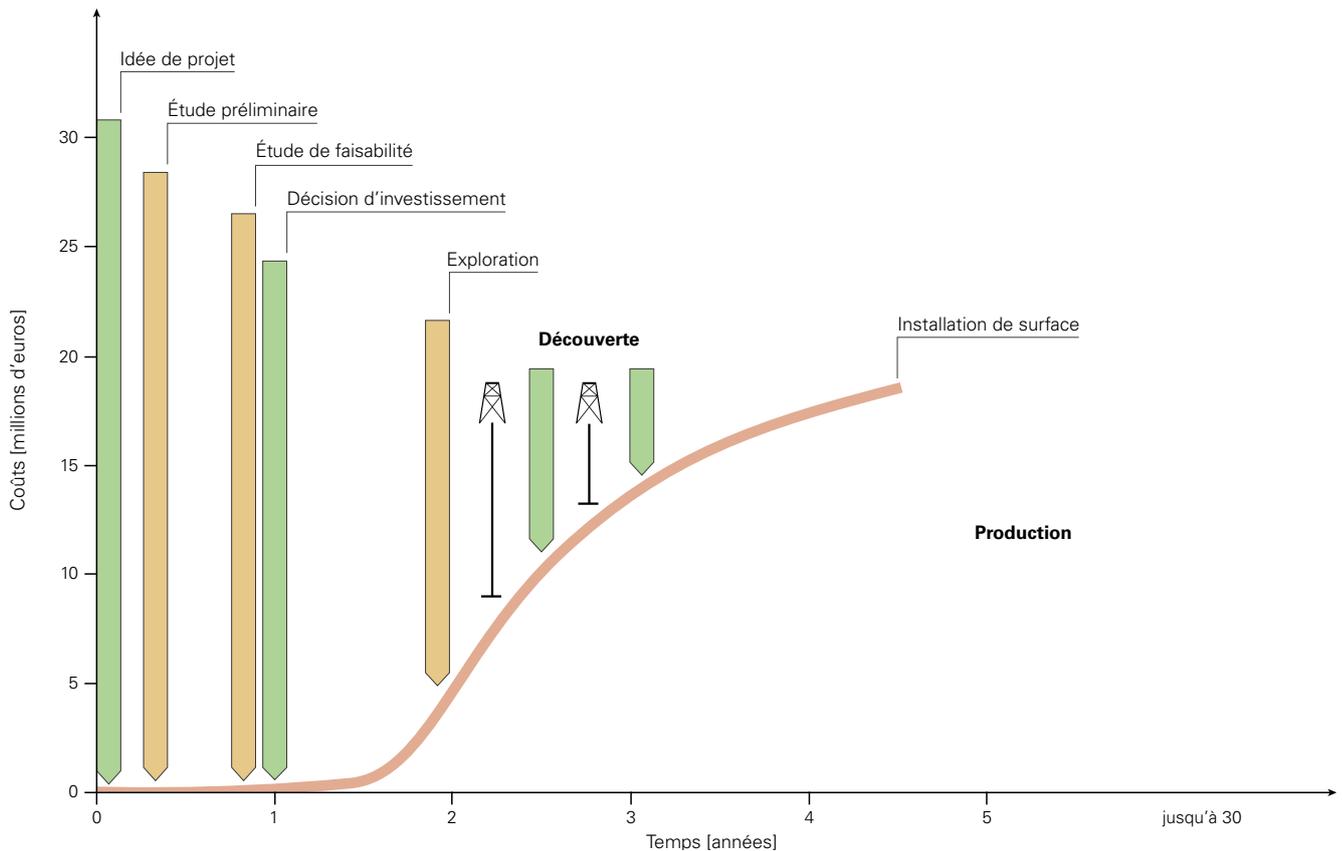


Fig. 8-1: Schéma de la planification d'un projet hypothétique de géothermie. Les coûts et le temps nécessaire à la réalisation peuvent varier considérablement d'un projet à l'autre (VON HARTMANN et al. 2015, remanié).

dans le canton de Genève, avec le programme GEothermie 2020 (fig. 8-2), qui se base en grande partie sur le modèle 3D élaboré dans le cadre de GeoMol-UE. Le modèle 3D existant est adapté et affiné par l'ajout de nouvelles données acquises pendant la phase de recherche, principalement par des levés sismiques et des forages profonds. La planification de projets géothermiques dans la région de La Côte et de Lausanne a déjà bénéficié de GeoMol15.

8.3 Application dans l'évaluation de conflits entre utilisations du sous-sol

L'utilisation croissante du sous-sol requerra de plus en plus un aménagement tridimensionnel du territoire (BAUMBERGER et al. 2015). Cela ne nécessite pas seulement des dispositions légales. Des conceptions existantes et futuristes, comme le transport de marchandises sans conducteur ou le projet Deep Cities (PARRIAUX et al. 2010), ont besoin de données de base géologiques détaillées. Elles doivent être disponibles de manière simple et rapide, au prix le plus bas possible, et bénéficier d'une bonne qualité. Les intérêts liés à l'exploitation de potentiels géologiques sont très sectoriels à l'heure actuelle. Cela signifie que l'accent est mis sur la prévention de conflits touchant à un seul et même type d'utili-

sation (p. ex. la géothermie), l'exploitation de potentiels géologiques concurrents (p. ex. production d'énergie contre stockage de déchets) n'étant discutée qu'entre spécialistes. Pour optimiser l'exploitation du sous-sol à l'avenir, il faudra la considérer par-delà les différents usages et en fonction de la profondeur. Les exigences posées à l'octroi d'autorisations de construire se sont aussi renforcées avec la croissance des utilisations concurrentes du sous-sol. L'importance de données géologiques fiables accessibles au public a par conséquent fortement crû. Les résultats de GeoMol contribuent de plusieurs manières à la réalisation de ces objectifs:

- Des bases de décision sont élaborées plus rapidement, plus simplement et sous une forme mieux étayée lors de procédures de planification et d'octroi d'autorisations.
- Les décideurs, les concepteurs, les autorités en charge de la planification, les maîtres d'ouvrages et le grand public acquièrent un aperçu aisément accessible du sous-sol du Plateau suisse.
- L'accès public de GeoMol15 et GeoMol17 (dès la fin 2018) améliore la transparence et l'acceptation de projets et de procédures politiques et juridiques.
- La visualisation du sous-sol favorise la compréhension vis-à-vis de la géologie et l'intérêt pour les questions géologiques.

- La faculté de consulter les bases disponibles suscite une réflexion approfondie de la part de toutes les personnes impliquées dans l'exploitation du sous-sol et dans les risques qui l'accompagnent.

Les spécialistes en sciences de la Terre seront de plus en plus tenus d'élaborer des solutions aisément compréhensibles et de fournir des explications cohérentes.

8.4 Application dans la caractérisation de potentiels géologiques

Les potentiels géologiques décrivent généralement les ressources naturelles de la Terre en tenant compte de leur caractère exploitable. Cette définition inclut les ressources utilisables comme non utilisables, qu'elles présentent un danger ou non (p. ex. MANHENKE 1999). Les potentiels géologiques dangereux peuvent être considérés comme des risques géologiques qui restreignent ou empêchent l'exploitation du sous-sol. Au cours des dernières décennies, l'être humain a en outre créé (par l'extraction et l'utilisation de ressources, principalement dans le secteur primaire, le domaine de l'élimination des déchets et de la construction) des potentiels géologiques qui peuvent maintenant servir de ressources (p. ex. stocks urbains) (GEO MOL TEAM 2015).

D'après certaines estimations, 60 à 80% de toutes les données ont un caractère spatial (WILLIAMS & VAN DENMARK 1987, COOPERS AND LYBRAND 1996, HAHMANN & BURGHARDT 2013). Or de nombreuses décisions politiques et économiques se fondent actuellement sur des données spatiales exprimées en deux dimensions (WILLIAMS & VAN DEMARK 1987, SWISSTOPO 2004). Dans la plupart des cas, les décisions concernant des objets tridimensionnels ne disposent pas de données de base 3D librement accessibles. Les attentes envers le sous-sol, l'exploitation des potentiels géologiques existants et la recherche de potentiels présumés (p. ex. infrastructures, production d'énergie, stockage de déchets, matières premières) se sont de plus en plus diversifiées au cours des dernières années. La présence de plusieurs potentiels dans la même formation géologique occasionne des conflits entre usages, susceptibles de générer des confrontations au sein de la société (BAUMBERGER & ALLENBACH 2016). Outre la lithostratigraphie, de nombreux paramètres (p. ex. profondeur, situation tectonique, variations lithologiques locales, histoire de l'enfouissement) jouent un rôle important dans l'identification et la caractérisation des potentiels géologiques. L'existence de données de base géologiques tridimensionnelles revêt donc une grande importance dans le traitement des conflits entre usages du sous-sol.

8.4.1 Géothermie profonde

Le potentiel de géothermie profonde dépend de la chaleur présente dans le sous-sol (en corrélation avec la température ambiante et les caractéristiques de la roche, LANDESGEOLOGIE en prép.). Son exploitation est pour sa part tributaire de la faisabilité technique du prélèvement de chaleur en profondeur et de son transport en surface (HIRSCHBERG et al. 2015). En Suisse, plusieurs formations se prêtent à l'exploita-

tion géothermique, comme le Malm supérieur, le Muschelkalk et le socle cristallin jusque vers 5500 m de profondeur (LANDESGEOLOGIE en prép.). Le potentiel théorique est confronté à un risque d'échec imputable à des facteurs ne pouvant pas être influencés, comme la température, la perméabilité, la porosité ou le volume des aquifères. Mais seules des mesures directes effectuées dans des puits de forages sont susceptibles de fournir des données fiables à leur sujet (p. ex. HIRSCHBERG et al. 2015). La réussite est donc toujours subordonnée à un risque résiduel.

8.4.1.1 Possibilités d'exploitation

La géothermie peut être exploitée pour produire de la chaleur ou de l'électricité en fonction des conditions (hydro) géologiques:

- Production de chaleur: les systèmes de production géothermiques fonctionnent en principe à des températures supérieures à 70°C (ce qui correspond à une profondeur un peu supérieure à 2 km selon le gradient géothermique), de la même manière que les sondes géothermiques dans le sous-sol peu profond. Ces températures permettent de produire de la chaleur sans pompe à chaleur (HIRSCHBERG et al. 2015). En Suisse, les sédiments du Crétacé (LANDESGEOLOGIE en prép.), du Malm supérieur et de la Formation de Schinznach (RYBACH 1992, SIGNORELLI et al. 2004, SIGNORELLI & KOHL 2006, BAUJARD et al. 2007) ainsi que le socle cristallin (LANDESGEOLOGIE en prép.) sont appropriés à cet effet.
- Production d'électricité: la production d'électricité d'origine géothermique nécessite une température de 120-180°C (p. ex. HIRSCHBERG et al. 2015, LANDESGEOLOGIE en prép.). Un forage géothermique de 4-6 km doit donc convenir si le gradient géothermique est de 30°C/km. À cette profondeur, les ressources géothermiques naturelles sont suffisantes et renouvelées en continu (dans la plupart des cas). Le facteur limitatif est alors la quantité d'eau présente (géothermie hydrothermale) ou la perméabilité de la roche (géothermie pétrothermale). Le risque existe en outre que les ressources soient épuisées après une trentaine d'années (HIRSCHBERG et al. 2015). Certains auteurs estiment que les sédiments du Crétacé, du Malm supérieur et de la Formation de Schinznach ainsi que le socle cristallin sont appropriés pour produire de l'électricité à partir du potentiel géothermique qu'ils renferment (RYBACH 1992, SIGNORELLI et al. 2004, SIGNORELLI & KOHL 2006, BAUJARD et al. 2007, LANDESGEOLOGIE en prép.).

8.4.1.2 Application de GeoMol dans la région pilote Genève - Savoie

L'exploitation du sous-sol pour en retirer de l'eau thermale et de l'énergie géothermique a été étudiée dans la région pilote Genève - Savoie. Pour ce faire, les bases hydrogéologiques concernant cinq sources thermales situées dans l'aire modélisée ont été regroupées et visualisées. Puis le potentiel géothermique a été établi en évaluant les données fournies par quinze forages profonds. Elles ont servi à calculer un modèle de température tridimensionnel (CAPAR et al. 2015).

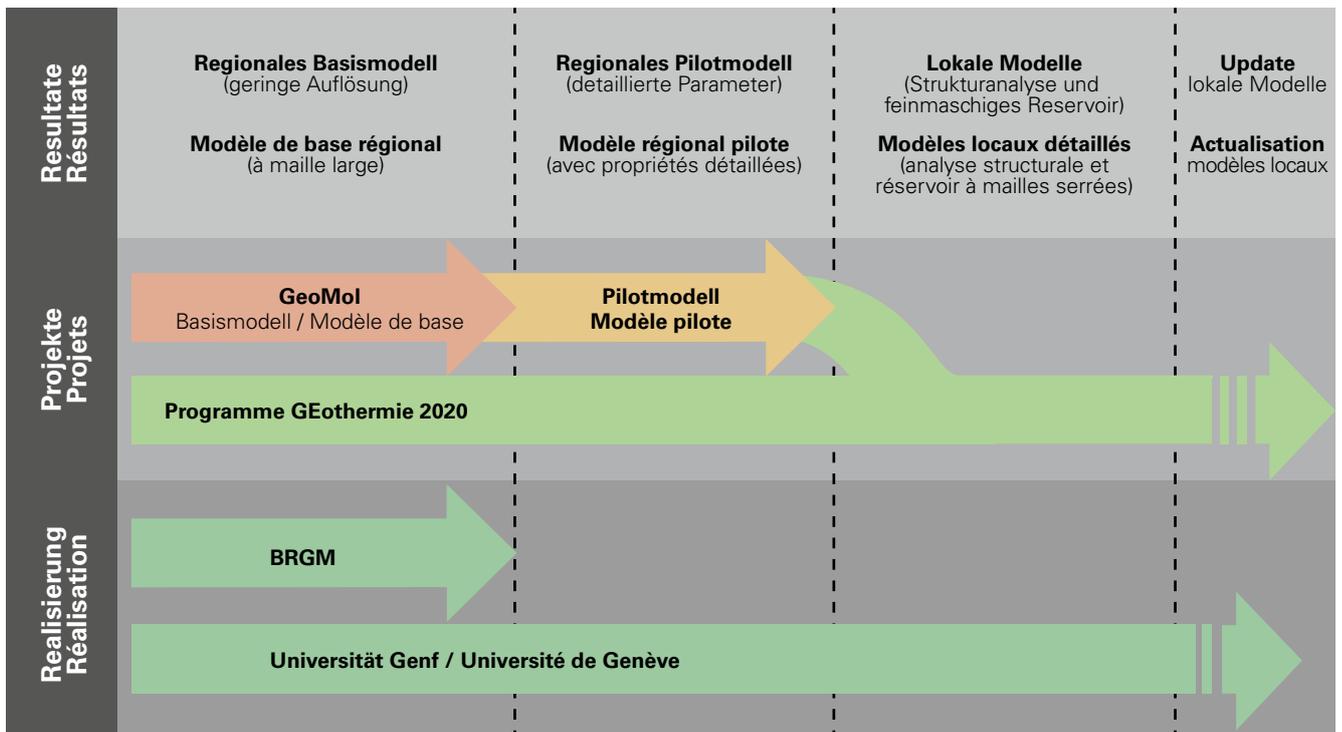


Fig. 8-2: Points communs entre le projet GeoMol et le programme GEothermie 2020. GeoMol a élaboré des bases qui ont servi à la planification de travaux relevant du programme de recherche du canton de Genève (source: canton de Genève, remanié).

GeoMol a poursuivi les mêmes objectifs que le programme GEothermie 2020 du canton de Genève (www.geothermie2020.ch): améliorer les connaissances au sujet du sous-sol, préciser son potentiel géothermique et définir l'utilisation des différents potentiels géologiques (prospection, exploration, production). GeoMol a ainsi contribué directement à la première phase de GEothermie 2020 en fournissant les bases géologiques nécessaires à la planification de la suite du programme (fig. 8-2). Ses résultats peuvent également servir, par exemple, pour la communication entre les spécialistes et les autorités ou entre les autorités et la population. GeoMol a aussi suscité la création d'une banque de données transfrontière harmonisée et l'établissement d'une collaboration transnationale dans la région du Grand Genève.

8.4.1.3 Application de GeoMol dans la région pilote Lac de Constance - Allgäu

Les aquifères profonds de la partie bavaroise de la région pilote Lac de Constance - Allgäu permettent de retirer de l'énergie géothermique d'une manière économique malgré un gradient géothermique moyen (GEO-MOL LCA-PROJEKTTEAM 2015). La géothermie constitue de ce fait le principal potentiel d'utilisation du sous-sol dans cette région pilote. Il n'est actuellement exploité que par des puits équipant des aquifères profonds, treize utilisations thermiques étant décrites dans la Molasse marine supérieure et dans le Malm et une à but énergétique dans le Malm (GEO-MOL LCA-PROJEKTTEAM 2015).

GeoMol a servi à harmoniser les bases géologiques existantes en vue d'exploiter la chaleur du sous-sol sous la forme d'eau thermale et d'énergie géothermique. Un modèle géo-

logique 3D permettant de décrire et de visualiser ces bases a d'abord été élaboré à cet effet. Puis il a été utilisé pour calculer un modèle de température 3D en exploitant également les valeurs de température mesurées dans des forages profonds. Cela a permis de générer de nombreuses cartes (position et épaisseur des couches, potentiels géologiques) qui peuvent être consultées sur le site web du projet GeoMol-UE (<http://maps.geomol.eu>). Ces cartes ne servent pas seulement à visualiser des caractéristiques géologiques, mais aussi à faciliter la communication entre les spécialistes et le public intéressé.

8.4.2 Stockage de CO₂

8.4.2.1 Étude fondamentale dans le Plateau suisse

DIAMOND et al. (2010) considèrent que la région Fribourg-Berne-Soleure-Lucerne offre un grand potentiel théorique de stockage de CO₂. Les paires potentielles de roches réservoir et de couverture définies par ces auteurs sur des bases bidimensionnelles ont été modélisées et représentées en trois dimensions. Ces travaux ont été accomplis dans le cadre du projet pilote GeoMol-UE «Plateau suisse» (GEO-MOL TEAM 2015).

La position du Dogger, susceptible de servir de roche réservoir pour le stockage de CO₂, est représentée à l'avant-plan sous forme de volume (en brun). Les zones de failles introduites dans le modèle de cette région pilote proviennent de GeoMol15. Les forages indiqués sont représentés schématiquement. Les limites supérieure et inférieure de la fenêtre de stockage de CO₂ (surfaces en vert et en violet, représentées d'une manière simplifiée) signalent à quelle profondeur on doit trouver des conditions de tem-

Région pilote «Plateau suisse»

Aperçu du modèle (Exagération verticale 4x)

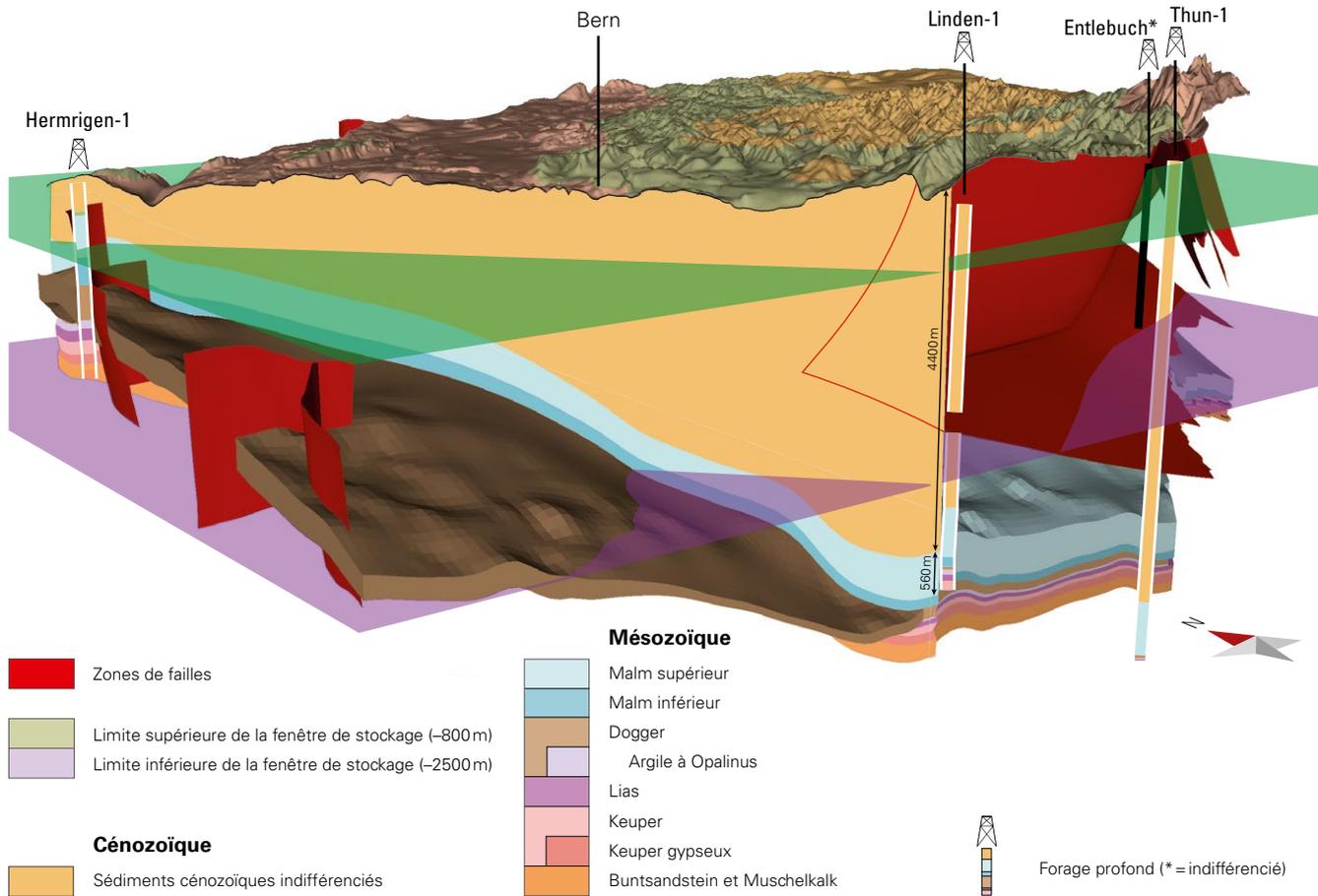


Fig. 8-3: Modèle géologique 3D de la région Fribourg–Berne–Soleure–Lucerne (exagération verticale d’un facteur quatre). La position du Dogger, susceptible de servir de roche réservoir pour le stockage de CO₂, est représentée à l’avant-plan sous forme de volume (en brun). Les zones de failles introduites dans le modèle de cette région pilote proviennent de GeoMol15. Les forages indiqués sont représentés schématiquement. Les limites supérieure et inférieure de la fenêtre de stockage de CO₂ (surfaces en vert et en violet, représentées d’une manière simplifiée) signalent à quelle profondeur on doit trouver des conditions de température et de pression optimales pour stocker du CO₂ (DIAMOND et al. 2010).

pérature et de pression optimales pour stocker du CO₂ (DIAMOND et al. 2010).

8.4.2.2 Application de GeoMol

DIAMOND et al. (2010) se fondent sur les données de base existantes pour déterminer le potentiel de stockage de CO₂ en Suisse. Le modèle 3D de la région pilote «Plateau suisse» (fig. 8-3) fournit les bases tridimensionnelles pour des recherches ultérieures et des études détaillées dans cette région qui présente le plus grand potentiel de stockage. Les résultats actuels montrent que les bases géologiques existantes en 2D et 3D ne suffisent pas pour procéder à une évaluation fiable des sites susceptibles de servir au stockage sûr et durable de CO₂. Pour y parvenir, il faut encore acquérir des données géologiques et réaliser des études (p.ex. CARMA⁴ 2012, MAZZOTTI et al. 2013). Le Swiss Competence Center for Ener-

gy Research – Supply of Electricity (SCCER-SoE⁵) effectue des recherches fondamentales et développe des solutions innovantes, notamment dans le domaine du stockage de CO₂. Les études menées en Suisse à l’avenir devraient aussi tenir compte des standards et méthodes appliqués à ce sujet au plan international (International Energy Agency Greenhouse Gas Research and Development Programme⁶). Parallèlement à l’élargissement des données de base, il y a lieu d’étudier la situation juridique et de tester l’acceptation de la population.

La combinaison du modèle 3D de GeoMol et de résultats d’études supplémentaires permettrait de constituer, dans un périmètre spécifique, une solide banque de données susceptible d’étayer des travaux futurs.

8.4.3 Aquifères profonds

Des aquifères profonds sont présents dans tous les grands domaines tectoniques de Suisse. Ils s’écoulent à faible vitesse sur de grandes distances et leur température est supérieure à

⁴ CARMA (Carbon Management in Power Generation): projet de recherche (2009–2012) visant à étudier le potentiel et la faisabilité de la séquestration de CO₂ en Suisse.

⁵ <http://www.sccer-soe.ch> (consulté le 04.04.2017)

⁶ <http://www.ieaghg.org> (consulté le 04.04.2017)

celle des aquifères superficiels et indépendante de la saison (WABER et al. 2015). D'après WABER et al. (2015), l'eau des aquifères profonds satisfait à trois au moins des critères suivants: (1) minéralisation dans des unités rocheuses profondes, (2) température supérieure ($\Delta T > 5^\circ\text{C}$) à celle de la nappe superficielle voisine, (3) temps de séjour de plusieurs dizaines d'années au moins, (4) cheminement souterrain sur de grandes distances. Par conséquent, les aquifères profonds revêtent une grande importance économique du fait de leur extension et des grands volumes d'eau qu'ils renferment. Toutefois, la quantité d'eau contenue dans les aquifères profonds de Suisse ainsi que leur emplacement dans l'espace sont mal connus (BURGER 2016).

8.4.3.1 Application de GeoMol

Le potentiel d'aquifères profonds n'a été examiné que régionalement, dans la partie nord du canton d'Argovie (en mettant l'accent sur les eaux thermales). D'après REISDORF (2017), les aquifères profonds de cette région, situés dans le Buntsandstein, le «Permo-carbonifère» et le socle cristallin, contiennent principalement du sulfate (ainsi que chlorure et bicarbonate) de sodium ou du chlorure (et sulfate) de sodium (et calcium). Tous les échantillons analysés proviennent de forages implantés dans la «zone d'influence» du fossé permo-carbonifère du nord de la Suisse. Des températures témoignant d'eaux hyperthermales ($>37^\circ\text{C}$) ont été mesurées dans deux forages: Zurzach (37,8–39,5 $^\circ\text{C}$; socle cristallin; épaulement nord du fossé) et Riniken (29,4–70,0 $^\circ\text{C}$; fossé permo-carbonifère; intérieur du fossé). Tous deux ont révélé des aquifères aux chimismes susmentionnés (REISDORF 2017). Le fossé permo-carbonifère du nord de la Suisse, les émergences d'eau chaude et la minéralisation des eaux thermales sont corrélés géographiquement, ce qui laisse supposer que le fossé et les zones de failles associées influencent la circulation d'eau (comm. pers. de REISDORF). Du fait de la faible dimension de la zone étudiée, on ne peut pas non plus exclure l'existence de cette circulation en se fondant sur la présence d'eau froide moins minéralisée. Cela nécessiterait une investigation plus détaillée.

Les modèles géologiques 3D du bassin molassique suisse (GeoMol15 et GeoMol17) peuvent être mis en œuvre pour étudier fondamentalement l'extension des aquifères profonds et les quantités d'eau qu'ils renferment. Cela permettra de représenter l'extension géométrique et spatiale d'aquifères et d'aquitards profonds. Le volume d'eau contenu pourra aussi être estimé en considérant en plus certains paramètres de la roche. Sur cette base, il sera possible d'étudier le potentiel d'exploitation d'aquifères profonds et d'analyser les conflits entre utilisations de leurs eaux.

8.4.4 Risques géologiques

Tous les événements naturels imputables à des processus géologiques, tels que tremblements de terre, éruptions volcaniques, mouvements de terrain (glissements de terrain, chutes de pierres) ou inondations, s'accompagnent de risques géologiques. Les modèles GeoMol15 et GeoMol17 se concentrent sur le sous-sol profond. Compte tenu de cette restriction, ce sont les séismes naturels et induits ainsi que

leurs conséquences qui représentent le principal risque géologique sur le Plateau suisse. Les secousses perceptibles par les personnes sont certes assez rares, mais il s'en produit tout de même régulièrement. En 2016, le Service sismologique suisse (<http://seismo.ethz.ch>) a enregistré plus de 900 tremblements de terre, dont 30 d'une magnitude supérieure ou égale à 2,5. FÄH et al. (2011) montrent, en se fondant sur des données sismiques historiques et sur des observations paléosismiques, que des événements de magnitude 6 surviennent en moyenne tous les 50 à 150 ans en Suisse.

8.4.4.1 Vue d'ensemble du Plateau molassique suisse

Le bassin molassique suisse est situé géographiquement entre les Alpes et le Jura. Des processus tectoniques continus et le soulèvement permanent des Alpes qui va de pair génèrent régulièrement des tremblements de terre. Des champs de tension ne pouvant être estimés qu'indirectement se développent dans le sous-sol là où des tensions accumulées ne se relâchent pas sous la forme de séismes (HERGERT et al. 2015). Or il est important de connaître les champs de tension locaux pour mener à bien de nombreuses applications fondamentales et pratiques (p. ex. HEIDBACH & REINECKER 2013, HERGERT et al. 2015). Ces champs de tension sont principalement influencés par la topographie (relief et surcharge tectonique), par la présence de zones de failles actives (atténuant les tensions) et par les différences d'élasticité à l'intérieur des sédiments mésozoïques (HERGERT et al. 2015). D'une part, les tremblements de terre naturels se produisent préférentiellement le long de failles géologiques mises naturellement sous contrainte. Mais, d'autre part, les projets géothermiques se concentrent sur les formations rocheuses perméables et sur les zones tectonisées du sous-sol profond où de l'eau circule déjà dans le cas idéal. La stimulation d'un réservoir situé à proximité d'une faille ou directement dans une faille est susceptible d'induire un tremblement de terre, comme c'est arrivé en 2006 dans le cas du projet géothermique de Bâle (HIRSCHBERG et al. 2015). Un tremblement de terre est également survenu à Saint-Gall en 2013, après l'injection d'eau et de boue de forage supplémentaire, rendue nécessaire par le fait que du gaz s'était échappé dans le puits de forage en y générant une surpression (HIRSCHBERG et al. 2015).

Outre les dommages directement occasionnés par les secousses, les phénomènes sismiques induits (p. ex. liquéfaction du sol, glissements de terrain, tsunamis) suscitent des risques particuliers. Dans l'aire modélisée dans GeoMol, la liquéfaction du sol menace principalement les profondes vallées d'origine glaciaire du Plateau, remplies de roches meubles quaternaires aisément mises en mouvement sous l'effet des ébranlements sismiques. Mais des éboulements déclenchés par des tremblements de terre qui atteignent des lacs sont aussi susceptibles de générer des tsunamis catastrophiques (SIEGENTHALER et al. 1987, BUSSMANN & ANSELMETTI 2010).

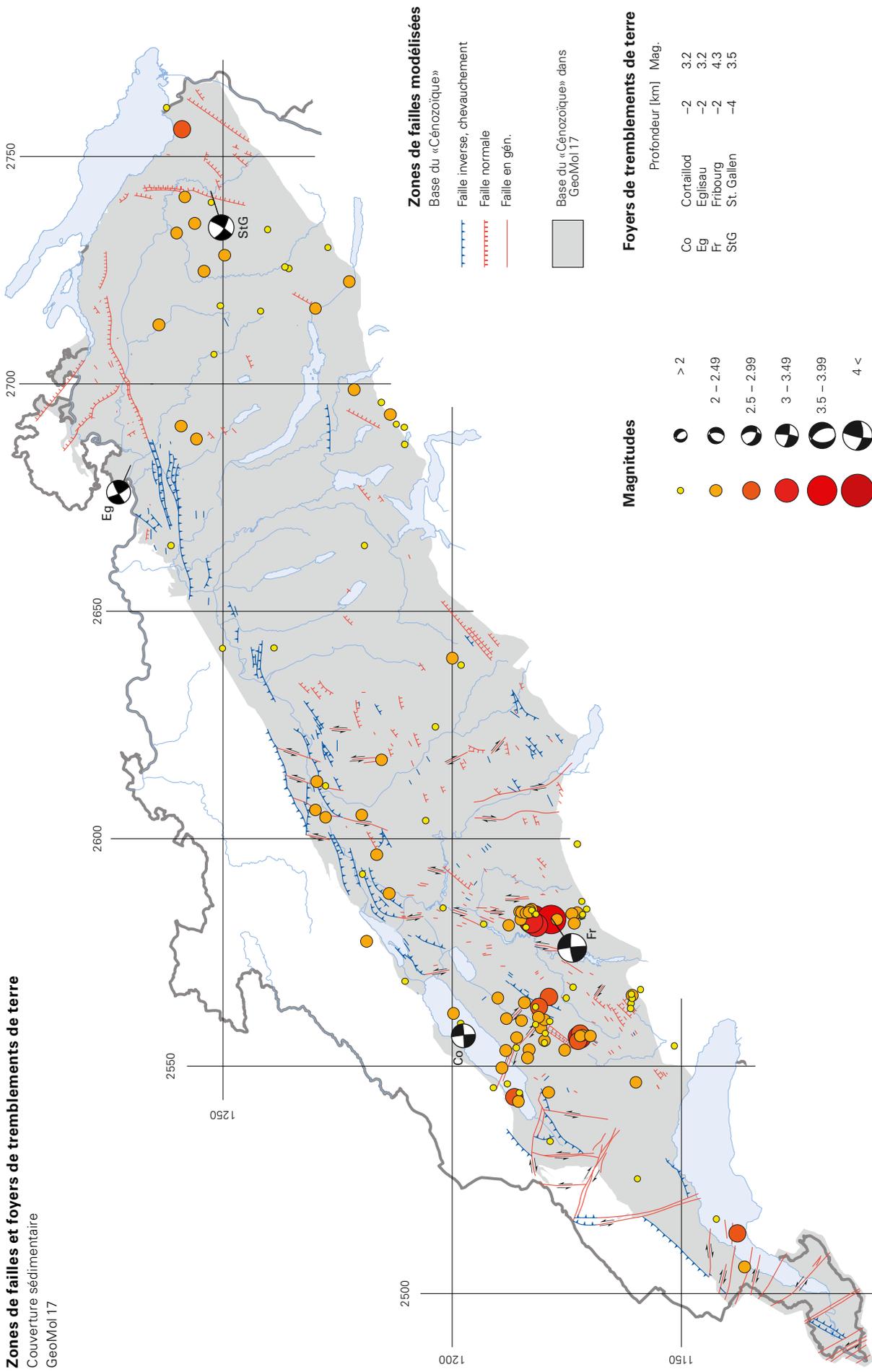
Le risque sismique est défini comme étant une combinaison de plusieurs facteurs (HIRSCHBERG et al. 2015):

- aléa sismique;
- caractéristiques géologiques locales;
- dommages potentiels (p. ex. densité de la population);
- vulnérabilité des infrastructures.

Zones de failles et foyers de tremblements de terre

Couverture sédimentaire

GeoMol 17



Zones de failles modélisées

Base du «Cénozoïque»

- Faille inverse, chevauchement
- Faille normale
- Faille en gén.

Base du «Cénozoïque» dans GeoMol 17

Foyers de tremblements de terre

	Profondeur [km]	Mag.
Co	-2	3.2
Eg	-2	3.2
Fr	-2	4.3
StG	-4	3.5

Magnitudes

- > 2
- 2 - 2.49
- 2.5 - 2.99
- 3 - 3.49
- 3.5 - 3.99
- 4 <

Fig. 8-4: Représentation des foyers sismiques (magnitude >2) situés dans la couverture sédimentaire, sur fond du modèle de failles de GeoMol17, au niveau de la base du «Cénozoïque». Les données sismiques ont été triées en se fondant sur l'horizon Base du «Mésozoïque» modélisé dans GeoMol17. L'aire modélisée dans GeoMol présente une bonne corrélation entre l'emplacement des failles et l'occurrence de tremblements de terre dans les régions du sud du lac de Neuchâtel, de Fribourg, Soleure et Saint-Gall. Catalogue sismique ECOS-09 (FÄH et al 2011). État des données: 1975-2008. Mécanismes au foyer (DIEHMANN et al. 2000, BAER et al. 2007, DIEHL et al. 2014).

Zones de failles et foyers de tremblements de terre

Socle cristallin
GeoMol 17

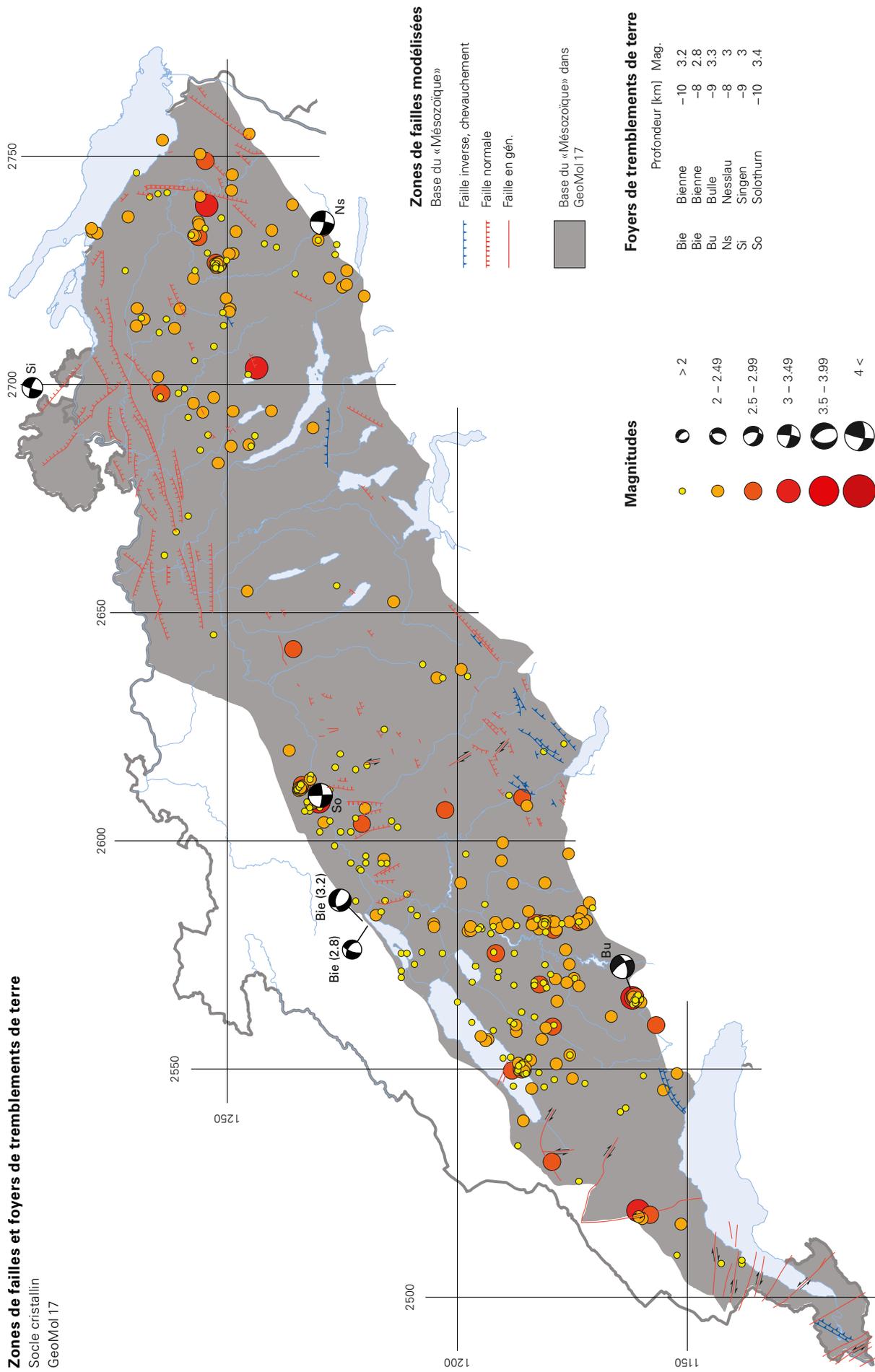


Fig. 8-5: Représentation des foyers sismiques (magnitude >2) situés dans le socle cristallin (jusqu'à une profondeur de 15 km), sur fond du modèle de failles de GeoMol17, au niveau de la base du «Mésozoïque». Les données sismiques ont été triées en se fondant sur l'horizon Base du «Mésozoïque» modélisé dans GeoMol17. Catalogue sismique ECOS-09 (FÄH et al. 2011). État des données: 1975–2008. Mécanismes au foyer (BAER et al. 1997, 2001, 2005, DEICHMANN et al. 2004, DIEHL et al. 2015).

Il faut donc distinguer clairement l'aléa et le risque sismique. C'est ainsi que des régions sujettes à un aléa sismique élevé, comme le canton du Valais ou la région bâloise, sont exposées à un risque local aussi important que les grandes agglomérations du Plateau suisse (HIRSCHBERG et al. 2015).

8.4.4.2 Application de GeoMol

Le projet GeoMol n'a pas traité spécifiquement les risques géologiques affectant la Suisse. Les travaux effectués dans le cadre du projet GeoMol-UE ont mis l'accent sur l'analyse du risque sismique et sur l'amélioration des modèles de l'aléa sismique dans la région pilote Brescia–Mantoue–Mirandola.

Les modèles GeoMol15 et GeoMol17 constituent des bases de géologie structurale régionale en 3D pouvant être appliquées au domaine de l'aléa et du risque sismique – notamment pour améliorer les bases de calcul – ainsi qu'à la sismotectonique. Il est en outre possible de combiner les cartes des failles de GeoMol17 avec le lieu des foyers sismiques pour identifier les zones de failles actives (fig. 8-4 et 8-5).

8.4.5 Hydrocarbures

L'historique de la prospection pétrolière et gazière en Suisse est consigné dans LAHUSEN & WYSS (1995) et GISLER (2011). Seuls de petits gisements économiquement inintéressants ont été découverts à ce jour sur le Plateau suisse. En fournissant environ 74 millions de mètres cubes de gaz naturel, Entlebuch-1 est le seul forage à avoir été exploité commercialement jusqu'ici (LAHUSEN & WYSS 1995). Toutefois, des investigations récentes (LEU 2014) montrent que le Plateau suisse présente des possibilités d'extraction d'hydrocarbures conventionnels et non conventionnels. De nouveaux forages d'exploration sont impérativement nécessaires pour démontrer leur rentabilité, principalement pour extraire du gaz naturel (~25 milliards de m³ à partir de veines de charbon, 4,5–6,0 milliards de m³ sous la forme d'extraction conventionnelle et 50–65 milliards de m³ à partir de sédiments permio-carbonifères) (LEU 2014). Dans une prochaine publication actuellement en préparation, le Service géologique national donnera un aperçu du caractère théoriquement exploitable des potentiels les plus courants entrant en ligne de compte pour l'extraction d'hydrocarbures et l'exploitation de géothermie profonde selon les connaissances actuelles.

Le potentiel d'hydrocarbures n'a pas été traité dans le cadre de GeoMol.

8.4.6 Stockage de déchets radioactifs

En Suisse, en vertu de la loi sur l'énergie nucléaire, les déchets radioactifs doivent être évacués par ceux qui les ont produits (art. 31 LENu). Les sites concrets pour le faire sont recherchés dans le cadre du Plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes». Cette procédure est dirigée par la Confédération. La Nagra a été mandatée en 1972 pour rechercher des sites de stockage sûr des déchets radioactifs produits en Suisse dans le passé et à l'avenir et

pour procéder aux études géologiques et techniques nécessaires (www.nagra.ch).

De vastes études menées à bien au cours des dernières décennies ont montré que c'est le Plateau suisse qui présente les meilleures possibilités de dépôt en couches géologiques profondes. Les roches sédimentaires suivantes satisfont aux exigences requises pour la roche hôte (www.nagra.ch): Argile à Opalinus (Jurassique), Formation du Passwang et Formation de Klingnau (Jurassique), Membre d'Effingen (Jurassique) et formations marneuses de l'Helvétique (Crétacé).

Le potentiel de stockage de déchets radioactifs n'a pas été traité dans le cadre de GeoMol.

8.4.7 Construction d'infrastructures

Des infrastructures d'échelle régionale ou nationale ont déjà été planifiées par le passé dans le sous-sol du Plateau suisse. L'idée d'un Swissmetro avait été lancée dans les années 1970. Son but consistait à réduire considérablement la durée des trajets entre les grands centres helvétiques en faisant circuler des trains à sustentation magnétique sous terre selon des axes N–S et W–E. Mais ce projet avait été abandonné au terme d'importants travaux de planification. Le sous-sol du Plateau suisse fait à nouveau l'objet de grands projets d'infrastructures. Des prévisions estiment que le trafic marchandises pourrait augmenter d'ici 2030 jusqu'à 45% par rapport à 2010. La croissance du trafic en surface oblige les planificateurs et les responsables à trouver de nouvelles approches pour résoudre le problème. Sous la désignation Cargo sous terrain, il est prévu que des trains de marchandises entièrement automatisés relient sous terre, dès 2030, les centres logistiques et urbains du Plateau suisse. La réalisation de ce projet permettrait d'absorber en sous-sol une grande partie de la croissance future du trafic marchandises et de délester ainsi les voies de communication déjà parfois surchargées à l'heure actuelle (www.cargosousterrain.ch).

Le potentiel de construction d'infrastructures n'a pas été traité dans le cadre de GeoMol. Mais ses résultats peuvent servir de base au projet Cargo sous terrain.

GeoMol dans la pratique

Johannes Graf, sous-directeur du département Stratégie et développement, CSD Ingenieure AG, 8021 Zurich

«Cargo sous terrain est un nouveau type d'infrastructure marchandises souterraine qui a pour but de compléter le réseau routier et ferroviaire suisse et de le délester aux endroits critiques d'ici une bonne dizaine d'années. Il s'agit là d'un système logistique complet, durable et automatisé, permettant de transporter souplement des palettes, des récipients et des paquets sous la terre. Des tunnels raccorderont des sites de production et de logistique aux centres urbains. Un premier tronçon devra relier la région Härkingen–Niederbipp et la ville de Zurich, au centre du Plateau suisse, dès 2030. Puis il est prévu de construire un réseau d'ensemble allant du lac de Constance au lac Léman, avec des embranchements vers Bâle et Lucerne.

⁷ <http://www.nagra.ch/fr/rochesdaccueil.htm> (consulté le 23.03.2017)

Lors de l'étude de faisabilité de Cargo sous terrain, un certain nombre de points d'accès superficiels déterminés, sièges d'une importante activité logistique, ont été connectés de manière à ce que le tracé soit aussi court que possible tout en traversant un minimum de roches meubles aquifères du Plateau. La longueur des lignes et les contraintes techniques posées à la construction sont les facteurs de coûts essentiels de cet ouvrage souterrain, à raison d'environ 75% de l'investissement total. Il était donc important d'émettre des prévisions fiables au sujet des conditions géologiques en profondeur.

En appliquant GeoMol pour définir et optimiser le tracé dans le plan horizontal et vertical, nous avons pu examiner plusieurs variantes dans un modèle géologique 3D et déterminer leur incidence sur les coûts de revient dans un court délai. Puis le tracé a été fixé en collaboration étroite entre le géologue et l'ingénieur civil. Le choix de la profondeur a aidé à planifier l'avancement des machines de chantier et à l'optimiser pour limiter au maximum les temps d'attente impu-

tables au déplacement des tunneliers et le nombre de types d'engins nécessaires. Ces facteurs permettent de raccourcir la durée de la construction et d'avancer la mise en service du système. Toutes ces considérations débouchent sur un tronçon souterrain légèrement plus long que les liaisons directes et passant à près de 85% dans la roche consolidée.

Du point de vue de la direction générale de l'étude de faisabilité, GeoMol s'est avéré un outil très utile pour optimiser le tracé de la ligne dans un modèle 3D du sous-sol en fonction des contraintes liées à la géologie et à la construction. La précision de GeoMol s'est révélée suffisante pour la première phase du projet, puisqu'il y avait essentiellement lieu de distinguer la roche consolidée de la roche meuble et de tenir compte du niveau des nappes souterraines. Elle a permis de comparer l'incidence financière des variantes examinées et de formuler des recommandations claires concernant la meilleure variante à l'attention de l'organisme responsable.» [trad.]

9. Accès aux résultats

Tous les résultats obtenus dans le cadre du projet sont accessibles sur Internet via différents canaux:

- Visualiseur de données 3D: visualisation et analyse interactive des deux modèles 3D GeoMol15 et GeoMol17 dans un navigateur (dès la fin 2018).
- map.geologieportal.ch: visualisation des résultats du projet en 2D dans un navigateur (p. ex. cartes des épaisseurs, modèles altimétriques, cartes des vitesses), avec possibilité d'analyses interactives en combinaison avec plus de 500 autres thèmes.
- Portail géologique: accès au présent rapport.
- Web Map Service: possibilité d'intégrer la visualisation 2D des résultats du projet dans un système SIG et dans des applications web de tiers, pour autant qu'elles soient disponibles.
- Site web du projet GeoMol-UE: accès aux rapports finaux concernant le projet GeoMol-UE et les régions pilotes.

9.1 Visualiseur de données 3D

swisstopo utilise le logiciel cadre GST (Geosciences in Space and Time) pour publier les modèles 3D sur Internet. Cela permet de visualiser et d'analyser les modèles 3D indépendamment du type de navigateur, sans devoir utiliser des plug-ins spécifiques. GST se base sur une banque de données 3D consignnant les géodonnées utilisées, applique des standards OGC et supporte différents systèmes de gestion de banques de données relationnelles (p. ex. Postgres, Oracle, MS SQL). GABRIEL et al. (2011), LE et al. (2013) et GEOMOL TEAM (2015), par exemple, décrivent des bases techniques et des fonctions de GST.

Le visualiseur 3D des modèles géologiques 3D de swisstopo peut être consulté en plusieurs langues à l'adresse <https://viewer.geomol.ch>. Les objets sont affichés directement à partir de la banque de données 3D, ce qui autorise des requêtes et des analyses dynamiques, non calculées au préalable. Les données de GeoMol15 sont déjà disponibles et celles de GeoMol17 le seront dès la fin 2018.

9.1.1 Vue 3D avec le visualiseur 3D

La vue 3D correspond à l'accès standard aux modèles 3D (GeoMol15 et GeoMol17). L'utilisateur obtient ainsi un premier aperçu des modèles 3D disponibles. La langue par défaut est celle du navigateur, mais elle peut être modifiée en haut à droite de la fenêtre.

La construction générale de la vue 3D obtenue avec le visualiseur de données 3D comprend la scène 3D (A dans la fig. 9-1), l'arborescence de navigation (B dans la fig. 9-1), la barre de menu (C dans la fig. 9-1) et le sélecteur de langue (D dans la fig. 9-1).

- A) La scène 3D présente les objets sélectionnés selon une orientation spatiale modifiable avec la souris.
- B) L'arborescence de navigation située sur le bord gauche de la fenêtre du navigateur permet de sélectionner ou de désélectionner certains groupes et objets (p. ex. horizons, zones de failles). Un double clic sur les coordonnées figurant sous l'arborescence de navigation permet d'afficher des coordonnées spécifiques à l'utilisateur, situant par exemple des localités ou des bâtiments sur lesquels il souhaite se focaliser (zoom).
- C) La barre de menu comprend deux onglets proposant des choix contextuels qui assistent la visualisation.
- D) Les langues disponibles sont le français, l'allemand et l'anglais.

La barre de menu associée à l'onglet «Géologie 3D» (C dans la fig. 9-1) propose différentes possibilités de paramétrage ainsi que des aides susceptibles d'assister la visualisation des objets dans la scène 3D (de gauche à droite):

- Vues: commutation entre diverses vues prédéterminées avec la possibilité d'enregistrer la sienne propre.
- Exagération verticale: modification du facteur d'agrandissement de la hauteur pour mieux voir des objets à faible relief.
- Coupe dynamique 3D (Slicer): possibilité interactive de générer des coupes à travers le modèle en direction X, Y et Z (voir aussi le point 9.1.2.2 concernant les profils).
- Couleur de fond: modification de la couleur de l'arrière-plan.
- Web Map Services (WMS): affichage ou intégration de WMS prédéfinis ou propres à l'utilisateur pour combiner les modèles 3D avec des informations supplémentaires.
- Modifier la présentation des objets: passage à une présentation des objets sous la forme de surfaces ou de nuages de points.
- Information: affichage d'informations générales à propos du visualiseur 3D et téléchargement du manuel d'utilisation.
- Partage de la vue sous la forme de lien (*permalink*): la position de «l'appareil photo» peut être envoyée à des tiers ou enregistrée sous la forme de lien.
- Vue en plein écran: commutation entre la vue en plein écran et la vue normale.

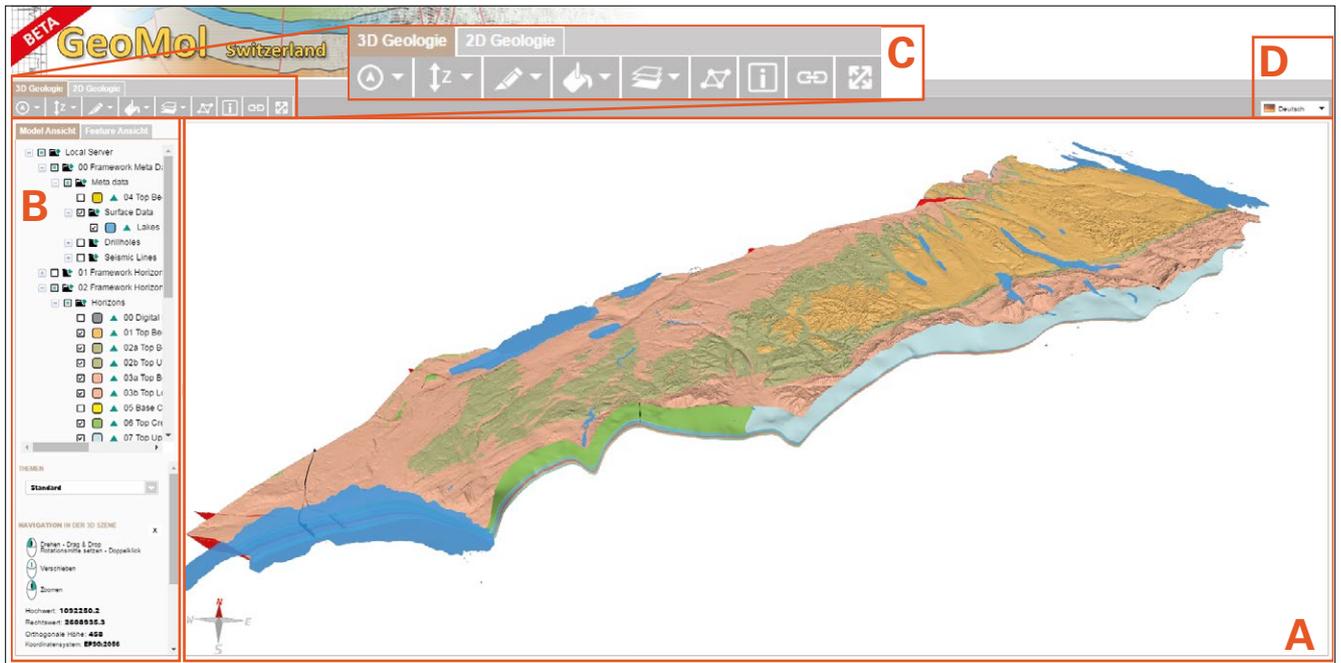


Fig. 9-1: La construction générale du visualiseur de données 3D (<https://viewer.geomol.ch>) comprend la scène 3D (A), l'arborescence de navigation (B), la barre de menu (C) et le sélecteur de langue (D).

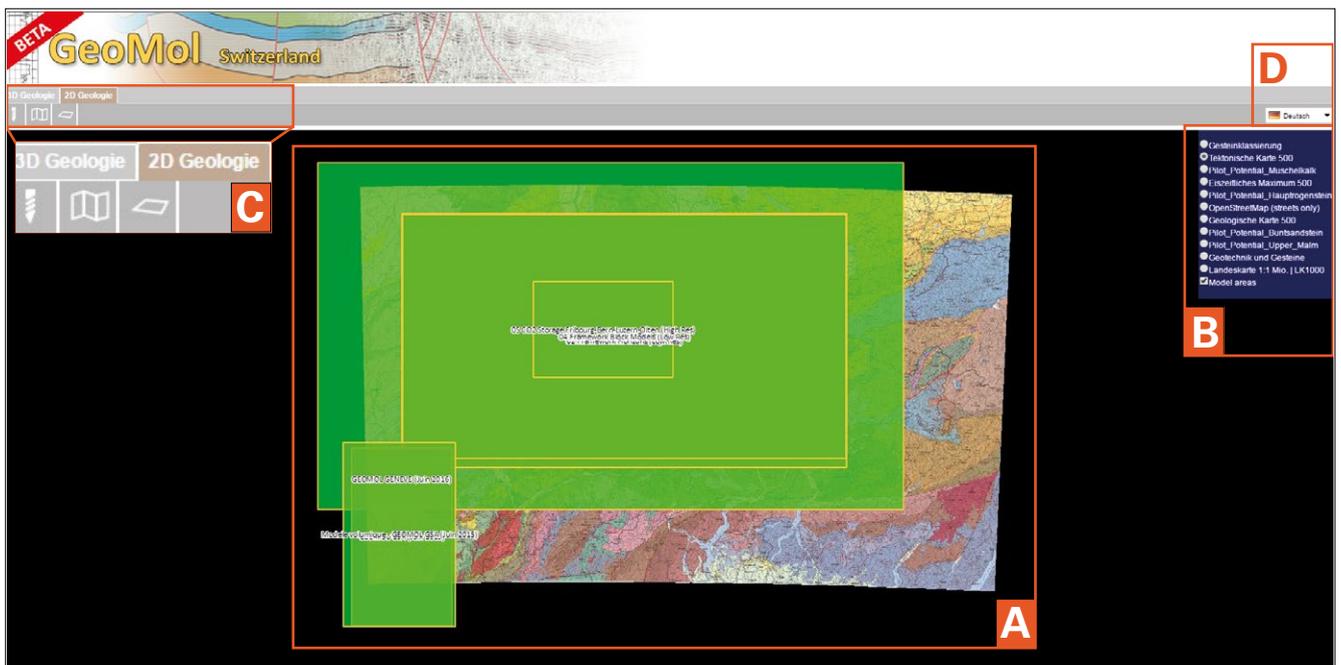


Fig. 9-2: Vue de l'onglet «Géologie 2D». Le périmètre des modèles 3D disponibles (surfaces vertes) est affiché sur fond d'une carte pouvant être sélectionnée.

9.1.2 Vue 2D avec le visualiseur 3D

La vue 2D peut être utilisée pour soumettre des requêtes détaillées incluant des forages virtuels ou des coupes verticales ou horizontales. Sa construction est similaire à celle de la vue 3D: fenêtre d'affichage des cartes (A dans la fig. 9-2), sélection des cartes de fond (B dans la fig. 9-2), barre de menu (C dans la fig. 9-2) et choix de la langue (D dans la fig. 9-2).

- A) Les cartes de fond sélectionnées sont présentées dans la fenêtre d'affichage des cartes.
- B) Différents WMS prédéfinis peuvent être sélectionnés et le périmètre des modèles 3D disponibles (surfaces vertes) peut être affiché.
- C) La barre de menu propose des possibilités pour générer des profils de forages, des coupes géologiques ou des cartes géologiques en profondeur. Les profils et les coupes proviennent directement de la banque de données 3D et ne sont donc pas calculés au préalable.
- D) Les langues disponibles sont le français, l'allemand et l'anglais.

Le manuel d'utilisation explique en détail comment élaborer des coupes (chap. 9.1).

9.1.2.1 Forages virtuels

Des profils de forages virtuels peuvent être générés à partir de forages verticaux et inclinés – ces derniers requérant des indications supplémentaires. Il est possible d'insérer directement leurs points de départ sur la carte par un clic de souris ou d'introduire manuellement leurs coordonnées dans la fenêtre de saisie. On peut aussi assigner facultativement un titre (qui apparaîtra dans le profil de forage), une échelle, un format de données et une résolution. L'option «Modèles sélectionnés» permet de fixer en détail les objets d'un ou plusieurs modèles 3D à analyser. La commande «Créer» lance l'élaboration d'un profil de forage virtuel. Le temps de calcul dépend du type des objets choisis (surfaces ou volumes), de leur nombre et de l'éventuelle attribution d'une échelle. Il est ensuite possible d'afficher et de télécharger le profil de forage dans une autre fenêtre du navigateur.

9.1.2.2 Profils

Deux points au moins (point de départ et point d'arrivée) sont nécessaires pour élaborer une coupe verticale. Des coupes peuvent aussi être calculées le long de lignes brisées. Trois points ou plus sont alors introduits. Comme pour les forages, ces différents points peuvent être insérés directement sur la carte par un clic de souris ou introduits manuellement dans la fenêtre de saisie. Les autres indications possibles sont les mêmes que pour les forages virtuels, y compris l'affichage et le téléchargement de la représentation des profils.

9.1.2.3 Cartes en profondeur

L'établissement d'une carte horizontale en profondeur est un cas particulier d'élaboration de coupe. Le domaine à analyser peut être fixé par rapport à la trace d'un profil –

ligne fixée par deux points au maximum – en fournissant une largeur librement définissable. Il faut en outre introduire la profondeur à laquelle la carte sera élaborée. La définition des points et les saisies facultatives ainsi que l'affichage et le téléchargement de la carte se déroulent comme pour les deux autres modes d'élaboration de coupes.

9.2 map.geologieportal.ch

Les données géologiques peuvent être consultées à l'adresse map.geologieportal.ch. Ce visualiseur de données propose plus de 500 jeux de géodonnées regroupés par thèmes, ainsi que la possibilité d'afficher les données souhaitées dans une vue 3D (A dans la fig. 9-3).

Le thème «Géologie» (B dans la fig. 9-3), qui comprend environ 80 jeux de données, couvre de nombreux sujets liés aux sciences de la Terre, de l'AG25 aux dangers naturels en passant par la géophysique et la géotechnique. Certains jeux de données peuvent être téléchargés directement et sans frais alors que d'autres sont proposés dans le shop en ligne de swisstopo. Chaque layer est décrit par des métadonnées affichables dans une infobox (C dans la fig. 9-3).

Les différents horizons et failles contenus dans le modèle GeoMol17 pourront être consultés dans ce visualiseur de données sous la forme de cartes des isohypses 2D dès la fin 2018.

9.3 Portail géologique

Le portail géologique (www.geologieportal.ch) est la plate-forme d'information au sujet de la géologie en Suisse. Elle prodigue de nombreuses informations thématiques importantes et utiles portant sur les bases de la géologie, les matières premières minérales, l'eau, l'énergie, les dangers géologiques, la géologie au quotidien, etc. L'onglet «Données» permet de consulter des données géologiques (visualiseur de données, modèles 3D, etc.) et l'onglet «Connaissance» des modèles de données, des lexiques, des normes, etc.

Le présent rapport avec ses annexes peut être téléchargé sur le portail géologique (> Données > Modèles géologiques 3D).

9.4 Web Map Service

Les modèles GeoMol15 et GeoMol17 sont mis à disposition progressivement et gratuitement en 2D en recourant à un Web Map Service (WMS), protocole standard de transfert de données cartographiques sur Internet. Les WMS relatifs à GeoMol CH satisfont aux standards de l'OGC (Open Geospatial Consortium). Proposés dans le cadre des géoservices de swisstopo, ils peuvent être insérés rapidement et simplement dans un système SIG ou dans une application Internet externe.

Les données disponibles répondent au système de référence EPSG 2056 (CH1903+/MN95) et les métadonnées

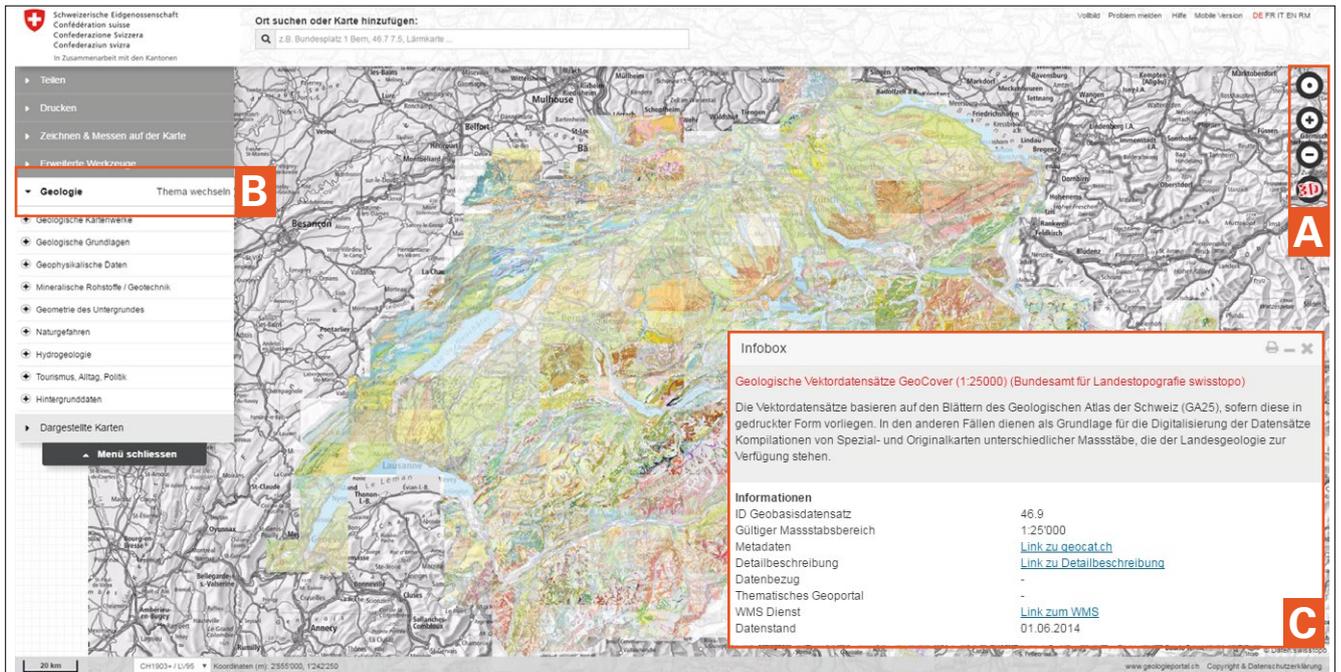


Fig. 9-3: Le site map.geologieportal.ch, accès centralisé à la visualisation 2D des données géologiques concernant la Suisse.

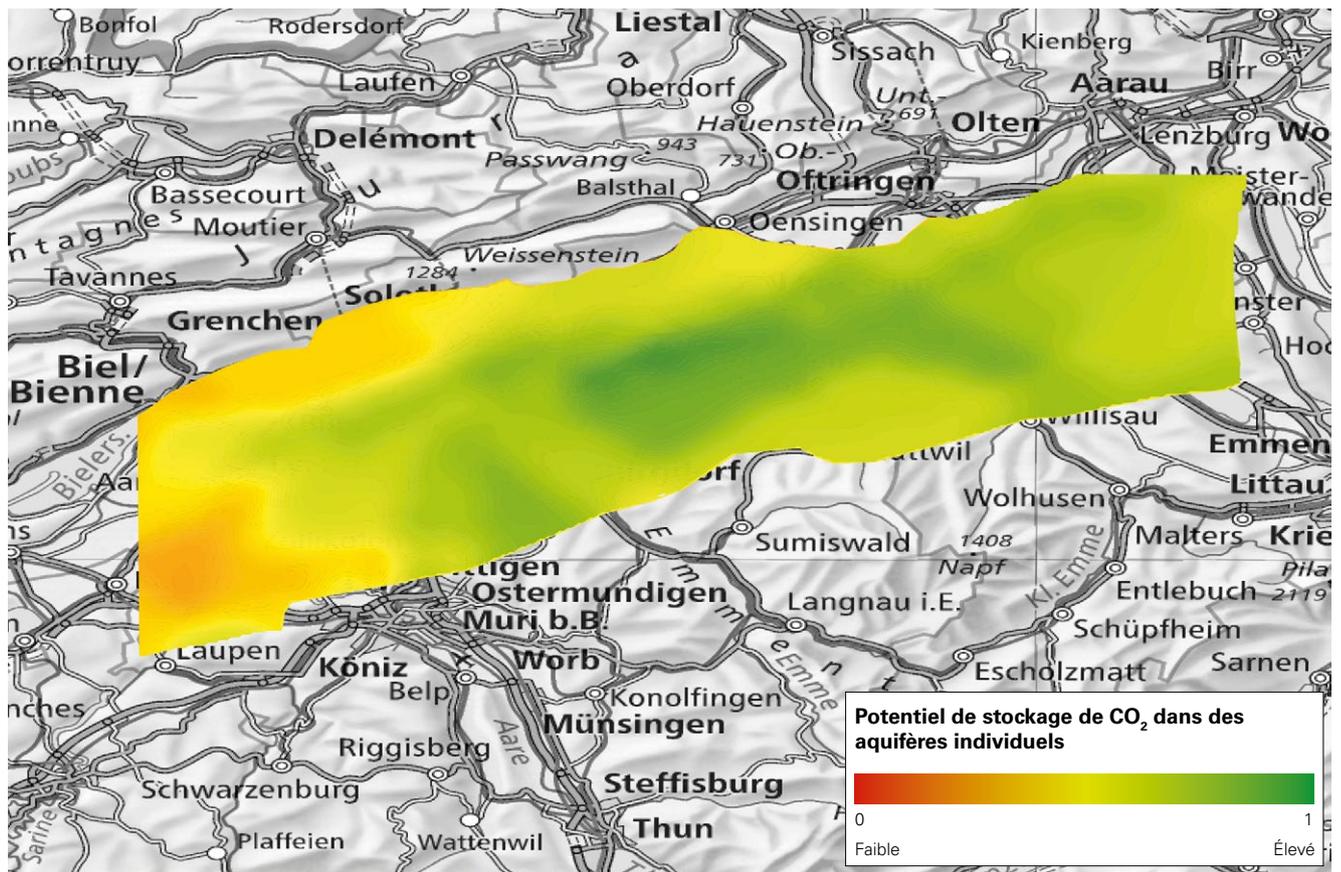


Fig. 9-4: Layer WMS «Potentiel de stockage de CO₂ dans le Hauptrogenstein (Dogger, roche hôte) et dans le Membre d'Effingen (Malm, roche de couverture) dans la région pilote Plateau suisse» sur fond de carte topographique de la Suisse au 1:1 000 000, incorporé dans un système SIG.

sont décrites selon les prescriptions du catalogue de géodonnées geocat (www.geocat.ch). Certains layers de GeoMol15 (fig. 9-4) sont déjà disponibles via un WMS (<http://swiss-topo.geops.ch/geoserver/geomol/wms>).

9.5 Site web du projet GeoMol-UE

Le site web www.geomol.eu donne accès à tous les résultats obtenus dans le cadre du projet GeoMol-UE:

- Onglet «Report»: téléchargement des rapports finaux concernant l'ensemble du projet et les différentes régions pilotes.
- Onglet «Mapviewer»: aperçu des cartes thématiques élaborées dans les différentes régions pilotes, y compris possibilités d'analyse, de téléchargement et d'impression. Les métadonnées des différentes cartes sont consultables via le «SearchCatalogue».
- Onglet «3D-Explorer»: accès aux modèles 3D élaborés dans les régions pilotes, y compris possibilités d'analyse.

Le document GEOMOL TEAM (2015) comprend des informations détaillées au sujet du contenu de ce site web.

9.6 Annexes au texte

9.6.1 Planches

Trois planches sont annexées au présent texte. Les planches I et II présentent douze coupes générées à intervalles réguliers dans le modèle GeoMol17, qui ont été retravaillées géologiquement et cartographiquement.

La planche III présente trois cartes des failles au niveau des horizons Toit du rocher, Base du «Cénozoïque» et Toit du Dogger.

9.6.2 Support de données

Le support de données annexé au présent rapport comprend l'ensemble des données relatives aux sections sismiques et aux forages profonds exploités. Les cartes énumérées dans le tableau 9-1 y sont également disponibles sous la forme de fichiers PDF. Ces documents ne sont disponibles qu'en version allemande.

Tab.9-1: *Vue d'ensemble des données cartographiques disponibles dans le support de données annexé.*

Titre	Contenu
Cartes d'ensemble des données	Description du type de données de base et de leur position spatiale par horizon modélisé
Modèles altimétriques	Altitude et extension des différents horizons modélisés
Cartes des épaisseurs	Épaisseur des différentes unités entre les horizons modélisés
Cartes des vitesses	Vitesses d'intervalles de chacune des unités entre les horizons modélisés

10. Perspectives

Les modèles GeoMol15 et plus particulièrement GeoMol17 proposent pour la première fois des visualisations 3D détaillées, à haute résolution, du sous-sol du bassin molassique suisse. Les bases techniques élaborées dans le cadre de ces projets peuvent également servir à d'autres buts: extension et mise à jour des modèles existants, élaboration de nouveaux modèles et dérivation de nouveaux produits.

Le succès de GeoMol sur le long terme nécessite de maintenir à jour les modèles. Cela signifie que les données existantes mais non encore exploitées doivent être intégrées rapidement dans GeoMol17. Quant aux nouvelles données obtenues, elles devront être insérées dans GeoMol17 selon un rythme régulier dès qu'elles seront disponibles.

Autant GeoMol15 que GeoMol17 constituent des bases susceptibles de faire l'objet d'extensions thématiques. La conception des deux modèles, incluant des caractéristiques importantes des roches (densité, conductivité thermique, porosité, perméabilité, etc.), permet d'élaborer de nombreux nouveaux modèles. Par exemple, aucun modèle de température concernant le Plateau suisse n'est encore accessible au public. Il n'existe pas non plus de données de base 3D en suffisance pour décrire le potentiel effectif de stockage de CO₂ en Suisse. Des thèmes en relation avec GeoMol17 pourront en outre être modélisés en utilisant de nouvelles données de base.

La combinaison des résultats de GeoMol avec d'autres projets du Service géologique national accroît mutuellement les applications possibles. Il sera possible, conjointement avec le projet intitulé «GeoQuat – Système d'information sur les roches meubles quaternaires en Suisse», de représenter complètement le sous-sol profond et subsuperficiel ainsi que ses différentes caractéristiques (seulement régionales dans

un premier temps) et d'utiliser les résultats obtenus pour procéder à des analyses. Le projet «GeoTherm» met à la disposition du public des données de base concernant la géothermie profonde en Suisse. Il peut ainsi contribuer notablement à la réussite de la stratégie énergétique 2050.

De nombreux nouveaux produits peuvent être dérivés des résultats du projet GeoMol. Les outils d'analyse permettent de constituer des profils configurables individuellement ou de pratiquer des forages virtuels. Ceux-ci pourront servir à leur tour pour confectionner des modèles sous forme de blocs (modèles voxel), paramétrés de toutes sortes de manières, pour autant que les modèles volumiques pertinents existent.

En recourant au produit GST (Geosciences in Space and Time), le Service géologique national est à même de stocker tous ses modèles 3D dans une banque de données sous une forme harmonisée, structurée et indépendante du découpage des feuilles pour les rendre directement accessibles sur Internet (chap. 9). Mais le Service géologique national utilise aussi ce logiciel pour assurer la collaboration interne lorsque plusieurs personnes travaillent conjointement sur les mêmes données. Comme premier effet de GeoMol, l'extension des fonctionnalités a déjà débuté dans le sens du stockage de modèles voxel.

GeoMol17 est l'une des bases essentielles du Modèle géologique national, grâce auquel les produits et les données diffusés par le Service géologique national et par ses partenaires pourront être visualisés à l'avenir dans un espace géoréférencé. Le but consiste moins à élaborer et à publier des modèles spécifiques du sous-sol profond et subsuperficiel qu'à établir un standard pour la représentation tridimensionnelle intégrée du sous-sol, facilitant ainsi sa visualisation et son analyse sur la base de données harmonisées.

11. Conclusions

La Suisse, et surtout la région du Plateau, sont sujets à une croissance démographique et économique constante. Cette évolution implique la construction d'infrastructures (transports, énergie, communication), l'exploitation de ressources (eau, matières premières, énergie) ainsi que l'élimination et le stockage de déchets. Le Plateau suisse revêt donc un grand intérêt pour la sphère politique, la société et les milieux techniques et scientifiques. Les développements et les défis relevant de ces domaines se concentrent toujours plus dans cette région.

La pénurie croissante de place en surface accentue considérablement l'importance du sous-sol et de ses possibilités d'utilisation. Cela signifie que l'aménagement du territoire doit impérativement le prendre en considération. Pour être à même de l'optimiser, il faut disposer de données de base géologiques concernant le sous-sol.

Les résultats obtenus par le projet GeoMol permettent pour la première fois de mettre à la disposition du public des modèles géologiques 3D harmonisés du bassin molassique. Le modèle GeoMol15, consultable gratuitement, peut être utilisé à des fins très diverses.

Les modèles GeoMol15 et GeoMol17 ont été établis à partir de données de base – provenant principalement de forages et d'investigations sismiques – acquises à un prix de plusieurs centaines de millions de francs. Un montant dont profitent les partenaires et les clients du Service géologique national. Ils bénéficient de la possibilité d'analyser des modèles en ligne ou de les exploiter dans leurs propres projets. Des études portant sur l'utilité économique des cartes géologiques montrent qu'elle correspond à six à huit fois la valeur des données de base exploitées (SPINATSCH 2011). GeoMol contribue ainsi largement à l'accroissement de l'intérêt économique des géodonnées en Suisse.

À l'avenir, le marché des géodonnées en Suisse s'orientera moins sur l'élaboration de nouveaux produits que sur le

traitement de données existantes dans de nouveaux contextes (FRICK et al. 2016). GeoMol fournit une contribution importante dans ce domaine également, car de nombreux nouveaux produits, standardisés ou individualisés, peuvent être dérivés de ses modèles.

Rien n'illustre mieux le changement d'attitude vis-à-vis des modèles géologiques 3D que l'application de GeoMol15 aux travaux de planification de Cargo sous terrain. Que de tels modèles soient intégrés aujourd'hui dans la préparation d'un projet aussi innovant était inimaginable il y a quelques années seulement. L'avènement du BIM (Building Information Modeling) comme base de travaux interconnectés dans le domaine de la construction accentuera encore cette tendance.

La mise à disposition de GeoMol15 et de GeoMol17 constitue la première étape de la démarche visant à documenter le sous-sol suisse à l'aide de modèles géologiques 3D. Mais il y a maintenant lieu d'en accomplir d'autres pour couvrir tout le pays d'une manière harmonisée. Il faut en particulier entretenir les modèles existants et les compléter régulièrement par de nouvelles données. Il convient également d'ajouter des thèmes aux modèles 3D actuels, traitant par exemple des paramètres des roches, pour fournir des éléments de réponse à de nouveaux questionnements. La surface couverte par les modèles doit enfin être agrandie pour englober les autres régions suisses. Ces développements requièrent du temps et de l'argent.

Ces investissements en valent la peine, car ils permettent d'instaurer les conditions nécessaires pour que les modèles géologiques 3D deviennent une référence incontournable dans les processus de décision, de planification et de réalisation de projets dans le domaine politique, sociétal, technique et scientifique.

12. Remerciements

Un projet de l'ampleur de GeoMol ne peut pas être réalisé sans l'aide d'un grand nombre de sociétés, offices, institutions de recherche et spécialistes ni sans le travail des collaboratrices et collaborateurs qui en sont chargés.

Le projet GeoMol n'aurait pas pu être mené à bien sans le soutien financier des offices fédéraux de topographie swisstopo, de l'énergie (OFEN), de l'environnement (OFEV) et du développement territorial (ARE) ainsi que des cantons d'Argovie, Fribourg, Genève, Lucerne, Soleure, Vaud et Zurich.

Nous adressons de vifs remerciements à la SEAG et à la Nagra, qui ont mis de nombreuses données (investigations sismiques et forages profonds) à notre disposition. C'est aussi grâce aux cantons d'Argovie, Appenzell Rhodes Extérieures et Intérieures, Berne, Fribourg, Genève, Glaris, Grisons, Lucerne, Neuchâtel, Nidwald, Obwald, Schaffhouse, Schwytz, Soleure, Saint-Gall, Tessin, Thurgovie, Uri, Vaud, Valais, Zoug et Zurich que le projet a pu se fonder sur des jeux de données d'une telle ampleur. Les services industriels de Saint-Gall, les CFF, Swissgas, l'Office national des routes (OFROU), l'EPF Zurich, l'EAWAG, Geo-Energie Suisse, la maison Grob Gemüsebau à Schlattigen, ExxonMobil, le Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau du Bade-Wurtemberg (LGRB) et le Bureau de recherche géologique et minière (BRGM, France) nous ont également donné accès à leurs données.

Ce sont des personnes avec leurs connaissances qui ont produit deux modèles cohérents à partir d'une énorme quantité de données diverses. Plusieurs spécialistes externes ont accompagné le projet en transmettant généreusement leur savoir au groupe de spécialistes du Service géologique national impliqué dans le projet. Mentionnons en particulier Patrick Lahusen (SEAG), Philip Birkhäuser, Michael Schnellmann et Herfried Madritsch (Nagra), Werner Leu (Geoform), Armelle Kloppenburg (4DGeo), Gianreto Manatschal (Université de Strasbourg), Philippe Roth (Service sismologique suisse), Andreas Hölker (Geophytec), Heinrich Schwendener (†, Swissgas), Olivier Zingg (Geo-Energie Suisse) et Thomas Bloch (services industriels de la ville de Saint-Gall).

Le projet a été piloté par Olivier Lateltin (swisstopo), Gunter Siddiqi (OFEN), Bernard Loup (OFEV), Nathalie Andenmatten (canton de Genève), Patrick Lahusen (SEAG), Werner Leu (Geoform), Nils Oesterling (swisstopo) et Urs Marti (swisstopo). Qu'elle et ils soient remerciés pour leur soutien et leur pilotage stratégique du projet.

Les travaux accomplis dans le cadre de GeoMol ont été vérifiés deux fois par année par un groupe de réviseurs composé de Philip Birkhäuser, Michael Schnellmann et Herfried Madritsch (Nagra), Armelle Kloppenburg (4DGeo) et Gianreto Manatschal (G-Geo Margins-M). Nous leur sommes

reconnaisants pour leur suivi critique, leur pilotage technique et la vérification du contenu technique.

Les partenaires du projet se sont régulièrement rencontrés dans le cadre du groupe d'accompagnement pour exposer l'avancement des travaux et pour discuter des résultats intermédiaires obtenus. Nous souhaitons remercier ici les membres de ce groupe pour leur intérêt à l'endroit de GeoMol, à savoir Hans Burger, Andreas Märki et Daniel Schaub (canton d'AG), Marco Schwab (canton de FR), Nathalie Andenmatten et Michel Meyer (canton de GE), Felix Renner (canton de LU), Martin Brehmer et Yvonne Kaufmann (canton de SO), David Giorgis (canton de VD), Werner Blüm et Kurt Nyffenegger (canton de ZH).

Le modèle GeoMol17 a été élaboré conjointement avec cinq institutions partenaires. Nous exprimons notre gratitude aux collègues suivants pour leur collaboration, pour les nombreuses discussions et pour les échanges d'expériences intenses concernant les données, le déroulement des travaux et les logiciels: Nicolas Clerc (Université de Genève), Robin Marchant (Musée cantonal de géologie (Vaud)), Marius Gruber, Jon Mosar et Anna Sommaruga (Université de Fribourg), Samuel Mock (Université de Berne), Birte Anders, Horst Dresmann et Peter Huggenberger (Université de Bâle).

Nous remercions aussi nos collègues et voisins étrangers avec lesquels nous avons collaboré dans le cadre du projet GeoMol-UE.

Nous sommes reconnaissants à nos collègues du Service géologique national pour les discussions animées que nous avons eues avec elles et eux et pour leur soutien technique. Nos remerciements s'adressent en particulier à Reto Burkhalter, Yves Gouffon, Daniel Kälin, Oliver Kempf, Alain Morard et Stefan Strasky. Nous sommes également redevables à Reto Burkhalter qui a formulé des suggestions critiques et affiné le style du texte.

La traduction française du rapport a été assurée par Christian Marro. La préface et le résumé ont été traduits en italien et en anglais par Alessia Vandelli et Lance Reynolds. La composition du rapport a été réalisée par Renato Howald.

Outre les auteurs, Bastien Delacou, Gennaro Di Tommaso, Mirjam Dürst Stucki, Pascal Kuhn, Melina Manzini, Angelo Milani, Maria Ponzio, Philip Wehrens et Valentin Zuchuat ont complété temporairement l'équipe GeoMol de swisstopo. Chacune et chacun ont contribué notablement à la réussite du projet. Il aurait été impossible de mener GeoMol à bien sans leur engagement et leur conviction.

Nous remercions toutes les intervenantes et tous les intervenants pour le travail qu'ils ont accompli, pour les contributions qu'ils ont apportées et pour les informations qu'ils ont transmises.

Liste bibliographique

- ABDEFETTAH, Y., SCHILL, E. & KUHN, P. (2014): Characterization of geothermally relevant structures at the top of crystalline basement in Switzerland by filters and gravity forward modelling. – *Geophys. J. int.* 199, 226–241.
- ABEDNEGO, M. (2015): Microseismic tomography analysis of the lager Fribourg area (western Swiss Molasse Basin). – PhD Thesis Univ. Fribourg.
- ALLENBACH, R. (2001): Synsedimentary tectonics in an epicontinental sea: A new interpretation of the Oxfordian basins of northern Switzerland. – *Ecol. geol. Helv.* 94, 265–287.
- (2002): The ups and downs of «Tectonic Quiescence» – recognizing differential subsidence in the epicontinental sea of the Oxfordian in the Swiss Jura Mountains. – *Sediment. Geol.* 150, 323–342.
- BACHMANN, G.H., DOHR, G. & MÜLLER, M. (1982): Exploration in a classic thrust belt and its foreland: Bavarian Alps, Germany. – *Bull. amer. Assoc. Petroleum Geol.* 66, 2529–2542.
- BACHMANN, G.H. & KOCH, K. (1983): Alpine front and Molasse Basin, Bavaria. In: BALLY, A.W. (Ed.): *Seismic Expression of Structural Styles* (p.21–32). – *Bull. amer. Assoc. Petroleum Geol.* 15/3.
- BACHMANN, G.H. & MÜLLER, M. (1983): Sedimentary and structural evolution of the German Molasse Basin. – *Ecol. geol. Helv.* 85, 519–530.
- BACHMANN, G.H., MÜLLER, M. & WEGGEN, K. (1987): Evolution of the Molasse basin (Germany, Switzerland). – *Tectonophysics* 137/1–4, 77–92.
- BAER, M., DEICHMANN, N. & BRAUNMILLER, J. (2001): Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2000. – *Ecol. geol. Helv.* 94, 253–264.
- BAER, M., DEICHMANN, N., BRAUNMILLER, J., CLINTON, J., HUSEN, S., FÄH, D., GIARDINI, D., KÄSTLI, P., KRADOLFER, U. & WIEMER, S. (2007): Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2006. – *Swiss J. Geosci.* 100, 517–528.
- BAER, M., DEICHMANN, N. & FÄH, D. (1997): Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 1996. – *Ecol. geol. Helv.* 90, 557–567.
- BAUJARD, C., SIGNORELLI, S. & KOHL, T. (2007): Atlas des ressources géothermiques de la Suisse Occidentale. – *Matér. Géol. Suisse, Géophys.* 40.
- BAUMBERGER, R. (2015): Quantification of lineaments: Link between internal 3D structure and surface evolution of the Hasli valley (Aar massif, Central Alps, Switzerland). – PhD Thesis Univ. Bern.
- BAUMBERGER, R. & ALLENBACH, R. (2016): 3D model of the Swiss Molasse Basin – A first step towards a national geological 3D model. – *Swiss Bull. appl. Geol.* 21/1, 17–28.
- BAUMBERGER, R., ALLENBACH, R. & VOLKEN, S. (2015): From wallflower to eye-catcher: 3d geological modelling in Switzerland – more than XYZ, less than a Swiss Army knife. – *Proc. 3D Modelling Workshop, Geol. Soc. Amer. annu. Conf. 2015, Baltimore.*
- BAUMBERGER, R. & MICHAEL, C.S. (2013): GeoMol questionnaire for stakeholder survey – evaluation for Switzerland (unpubl.).
- BECK, P. (1945): Über den Mechanismus der subalpinen Molassetektonik. – *Ecol. geol. Helv.* 38, 353–368.
- BENZ, C. (2003): Der würmeiszeitliche Rheingletscher-Maximalstand: Digitale Rekonstruktion, Modellierung und Analyse mit einem Geographischen Informationssystem. – Masterarb. Univ. Zürich. (unpubl.).
- BERGER, J.-P., KÄLIN, D. & KEMPF, O. (2010): Swiss Molasse lithostratigraphy. – 8th Swiss Geosci. Meet., Abstr. Vol., 127.
- BERGER, J.-P., REICHENBACHER, B., BECKER, D., GRIMM, M., GRIMM, K., PICOT, L., STORNI, A., PIRKENSEER, C., DERER, C. & SCHAEFER, A. (2005a): Paleogeography of the Upper Rhine Graben (URG) and the Swiss Molasse Basin (SMB) from Eocene to Pliocene. – *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rdsch.)* 94, 697–710.
- BERGER, J.-P., REICHENBACHER, B., BECKER, D., GRIMM, M., GRIMM, K., PICOT, L., STORNI, A., PIRKENSEER, C. & SCHAEFER, A. (2005b): Eocene–Pliocene time scale and stratigraphy of the Upper Rhine Graben (URG) and the Swiss Molasse Basin (SMB). – *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rdsch.)* 94, 711–731.
- BERNASCONI, R. (2011): Anpassungsvorschlag Grundwasserkarte St. Gallen – Raum Sargans.
- BERTSCHY, R. (1958): Geologie der Kreide und Molasse in der Umgebung von Grandson (Kt. Waadt). – *Ecol. geol. Helv.* 5/1, 217–263.
- BISTACCHI, A. (2010): Three-dimensional characterization of a crustal-scale fault zone: the Pusteria and Sprechenstein fault system (Eastern Alps). – *J. struct. Geol.* 32, 2022–2041.
- BISTACCHI, A., MASSIRONI, M., DAL PIAZ, G.V., DAL PIAZ, G.D., MONOPOLI, B., SCHIAVO, A. & TOFFOLON, G. (2009): 3D fold and fault reconstruction with an uncertainty model: An example from an Alpine tunnel case study. – *Computers & Geosci.* 34, 351–372.
- BITTERLI-DREHER, P., GRAF, H.R., NAEF, H., DIEBOLD, P., MATOUSEK, F. & BURGER, H. (2007): Blatt 1070 Baden. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Erläut. 120.
- BLÄSI, H.R., DEPLAZES, G., SCHNELLMANN, M. & TRABER, D. (2013): Sedimentologie und Stratigraphie des «Braunen Doggers» und seiner westlichen Äquivalente. – *Nagra Arbeitsber. NAB* 12-51.
- BLAU, R.V. (1966): Molasse und Flysch im östlichen Gurnigelgebiet (Kt. Bern). – *Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.]* 125.
- BODMER, P., GUNZENHAUSER, B., ISELI, B.-F. & MANSER, M. (1996): Quartärmächtigkeiten in den Haupttälern der Zentralschweiz. – *Bull. angew. Geol.* 1/1, 37–53.
- BOND, C.E., JOHNSON, G. & ELLIS, J.F. (2015): Structural model creation: the impact of data type and creative space on geological reasoning and interpretation. – *Spec. Publ. geol. Soc. London* 421, 83–97.
- BOND, C.E., SHIPTON, Z.K., JONES, R.R., BUTLER, R.W.H. & GIBBS, A.D. (2007): Knowledge transfer in a digital world: Field data acquisition, uncertainty, visualization, and data management. – *Geosphere* 3/6, 568–576.
- BONNET, C. (2007): Interactions between tectonics and surface processes in the Alpine foreland: Insights from analogue model and analysis of recent faulting. – PhD Thesis Univ. Fribourg, GeoFocus 17
- BURGER, H. (2016): Nutzung und Schutz von Tiefengrundwasser im Spannungsfeld von Chancen, Risiken, Konflikten und regulatorischen Anforderungen. – *Swiss Bull. angew. Geol.* 21/1, 69–90.
- BURKHALTER, R.M. (1996): Die Passwang-Allformation (unteres Aalénien bis unteres Bajocien) im zentralen und nördlichen Schweizer Jura. – *Ecol. geol. Helv.* 89, 875–934.

- BURKHARD, M. (1990): Aspects of the large-scale Miocene deformation in the most external part of the Swiss Alps (Subalpine Molasse to Jura fold belt). – *Eclogae geol. Helv.* 83, 559–583.
- BUSSMANN, F. & ANSELMETTI, F. (2010): Rossberg landslide history and flood chronology as recorded in Lake Lauerz sediments (Central Switzerland). – *Swiss J. Geosci.* 103, 43–59.
- CAPAR, L., COUËFFÉ, R., BRENOT, A., COURRIOUX, G., DEZAYES, C., GABALDA, S., LOPEZ, S., MARC, S., RAMBOURG, D., SIMÉON, Y., ANDENMATTEN, N., CLERC, N., MEYER, M. & RUSILLON, E. (2015): GeoMol – Évaluation des ressources naturelles dans les bassins d'avant-chaine alpins pour une utilisation et une gestion durable du sous-sol; Zone Pilote Genève–Savoie. – *Rapp. Bur. Rech. géol. min. [BRGM] Orléans* 64744-FR.
- CAUMON, G., COLLON-DROUAILLET, P., LE CARLIER DE VESLUD, C., VISEUR, S. & SAUSSE, J. (2009): Surface-based 3D modeling of geological structures. – *Math. Geosci.* 41, 927–945.
- CHAROLLAIS, J., PLANCHEREL, R., MONJUVENT, G., DEBELMAS, J., avec la collaboration de DEVILLE, Q., DONZEAU, M., GALLAY, A., GORIN, G., NICOD, G., KINDLER, P., RUCHAT, C., TURREL, C. & WERNLI, R. (1998): Feuille 654 Annemasse. – *Carte géol. France 1:50000, Notice expl. 654, Bur. Rech. géol. min. [BRGM] Orléans*.
- CLERC, N. (2016): GeoMol-CH project: Interpretation and modeling report of the Geneva area. – *Univ. Genève (unpubl.)*.
- COOPERS AND LYBRAND (1996): Economic aspects of the collection, dissemination and integration of government's geospatial information, a report arising from work carried out for Ordnance Survey. – *Ordnance Survey, Southampton*.
- COWIE, P.A. & SCHOLZ, C.H. (1992): Physical explanation for displacement-length relationship for faults using a post-yield fracture mechanics model. – *J. struct. Geol.* 14, 1133–1148.
- CROSETTO, M., TARANTOLA, S. & SALTELLI, A. (2000): Sensitivity and uncertainty analysis in spatial modelling based on GIS. – *Agriculture, Ecosystems and Environment* 81, 71–79.
- DAVIS, T.J. & KELLER, P. (1997): Modelling and visualizing multiple spatial uncertainties. – *Computers & Geosci.* 23/4, 397–408.
- DEICHMANN, N., BAER, M. & BRAUNMILLER (2000): Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 1999. – *Eclogae geol. Helv.* 93, 305–406.
- (2004): Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2003. – *Eclogae geol. Helv.* 97, 447–458.
- DEPLAZES, G., BLÄSI, H.R., SCHNELLMANN, M. & TRABER, D. (2013): Sedimentologie und Stratigraphie der Effinger Schichten. – *Nagra Arbeitsber. NAB 13-16*.
- DIAMOND, L., LEU, W. & CHEVALIER, G. (2010): Studie zur Abschätzung des Potenzials für CO₂-Speicherung in der Schweiz. – *Schlussber. z. H. Bundesamt f. Energie BFE*.
- DIEBOLD, P. & NAEF, H. (1991): Der Nordschweizer Permokarbondrog. – *Nagra informiert* 12/2, 29–36.
- DIEBOLD, P., NAEF, H. & AMMANN, M. (1991): Zur Tektonik der zentralen Nordschweiz. Interpretation aufgrund regionaler Seismik, Oberflächengeologie und Tiefbohrungen. – *Nagra tech. Ber. NTB 90-04*.
- DIEBOLD, P. & NOACK, T. (1997): Late Paleozoic troughs and Tertiary structures in the eastern Folded Jura. In: PFIFFNER, O.A., LEHNER, P., HEITZMANN, P., MUELLER, S. & STECK, A. (Ed.): *Deep structure of the Swiss Alps: Results of NRP 20* (p. 59–63). – *Birkhäuser, Basel*.
- DIEHL, T., CLINTON, J., KRAFT, T., HUSEN, S., PLENKERS, K., GUILHELM, A., BEHR, Y., CAUZZI, C., KÄSTLI, P., HASLINGER, F., FÄH, D., MICHEL, C. & WIEMER, S. (2014): Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2013. – *Swiss J. Geosci.* 107, 359–375.
- DIEHL, T., DEICHMANN, N., CLINTON, J., KÄSTLI, P., CAUZZI, C., KRAFT, T., BEHR, Y., EDWARDS, B., GUILHEM, A., KORGER, E., HOBIGER, M., HASLINGER, F., FÄH, D. & WIEMER, W. (2015): Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2014. – *Swiss J. Geosci.* 107, 425–443.
- DONZEAU, M., WERNLI, R., CHAROLLAIS, J. & MONJUVENT, G. (1997a): Feuille 653 Saint-Julien-en-Genevois. – *Carte géol. France 1:50000, Carte 653, Bur. Rech. géol. min. [BRGM] Orléans*.
- (1997b): Feuille 653 Saint-Julien-en-Genevois. – *Carte géol. France 1:50000, Notice expl. 653, Bur. Rech. géol. min. [BRGM] Orléans*.
- DROZDZWESKI, G. (1979): Grundmuster der Falten und Bruchstrukturen im Ruhrkarbon. – *Z. dtsh. geol. Ges.* 130, 51–67.
- DUPUY, D. (2005): Etude des sédiments Quaternaires, de la Molasse et sa tectonique, dans le Grand Lac (Lac Léman) à partir de données sismiques 2D et 3D. – *Thèse Univ. Lausanne*.
- DUPUY, D., MARILLIER, F., PLANCHEREL, R. & WEIDMANN, M. (2014): Analyse structurale de la région lémanique basée sur la sismique réflexion dans le Léman (Grand Lac et Haut Lac) et la géologie des rives nord et sud. – *Matér. Carte géol. Suisse [n.s.] 170*.
- DÜRST STUCKI, M. & SCHLUNEGGER, F. (2013): Identification of erosional mechanism during past glaciations based on a bedrock surface model of the central European Alps. – *Earth and planet. Sci. Lett.* 384, 57–70.
- EGLI, D., MOSAR, J., IBELE, T. & MADRITSCH, H. (2016): The role of precursory structures on Tertiary deformation in the Black Forest–Hegau region. – *Int. J. Earth. Sci. (Geol. Rdsch.)*, DOI 10.1007/s00531-016-1427-8.
- ENGLER, R. & SOMMARUGA, A. (2013): User guide to the methodology of the Seismic Atlas of the Swiss Molasse Basin. – *Univ. Fribourg (unpubl.)*.
- FÄH, D., GIARDINI, D., KÄSTLI, P., DEICHMANN, N., GISLER, M., SCHWARZ-ZANETTI, G., ALVAREZ-RUBIO, S., SELLAMI, S., EDWARDS, B., ALLMANN, B., BETHMANN, F., WÖSSNER, J., GASSNER-STAMM, G., FRITSCH, S. & EBERHARD, D. (2011): ECOS-09 Earthquake Catalogue of Switzerland, release 2011. Report and database. Public catalogue, 17.04.2011. – *Rep. SED/RISK/R/001/20110417. Swiss seismol. Serv. ETH Zürich*.
- FAURE, M. (1995): Late orogenic carboniferous extensions in the Variscan French Massif Central. – *Tectonics* 14/1, 132–153.
- FINCKH, P., KELTS, K. & LAMBERT, A. (1984): Seismic stratigraphy and bedrock forms in perialpine lakes. – *Bull. geol. Soc. Amer.* 95, 1118–1128.
- FIORE, J. (2007): Quaternary subglacial processes in Switzerland: geomorphology of the Plateau and seismic stratigraphy of western Lake Geneva. – *PhD Thesis Univ. Geneva*.
- FRANK, S., FREIMOSER, M. & WILDBERGER, A. (2011): Felsisohypsenkarte des Gebietes von Atlasblatt Winterthur (Taf. III). In: WILDBERGER, A., REY, R., FRANK, S. & FREIMOSER, M. (2011): *Blatt 1072 Winterthur. – Geol. Atlas Schweiz 1:25000, Erläut.* 140.
- FRICK, R., STRAHM, M. & NOTTER, B. (2016): Geoinformationsmarkt Schweiz – Marktanalyse und Wirtschaftsmonitoring. *Schlussbericht. – Bundesamt f. Landestopogr. swisstopo, SOGI*.
- GABRIEL, P., GIETZEL, J., LE, H.H. & SCHAEUBEN, H. (2011): A network based data store for geoscience data and its implementation. – *Proc. 31st Gocad Meet., Nancy*.
- GEO MOL LCA-PROJEKTTEAM (2015): GeoMol – Geopotenziale für die nachhaltige Nutzung des tieferen Untergrunds in den alpinen Vorlandbecken. *Abschlussbericht des Pilotgebiets Bodensee–Allgäu. – LGRB-Informationen 30*.
- GEO MOL TEAM (2015): GeoMol – Assessing subsurface potentials of the Alpine Foreland Basins for sustainable planning and use of natural resources. – *Proj. Rep., bayer. Landesamt f. Umwelt*.
- GILLESPIE, P.A., WALSH, J.J. & WATTERSON, J. (1992): Limitations of dimension and displacement data from single faults and the consequences for data analysis and interpretation. – *J. struct. Geol.* 14, 1157–1172.
- GISLER, M. (2011): *Erdöl in der Schweiz, eine kleine Kulturgeschichte, Jubiläumspublikation Erdöl-Vereinigung. – Ver. f. wirtschaftshist. Stud., Zürich*.

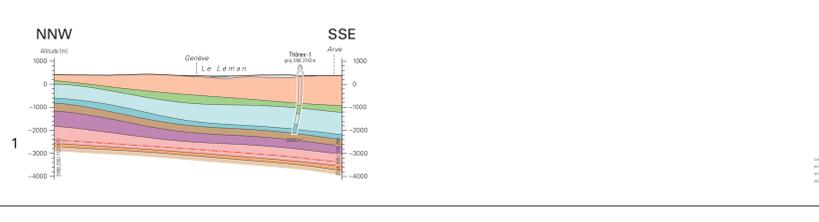
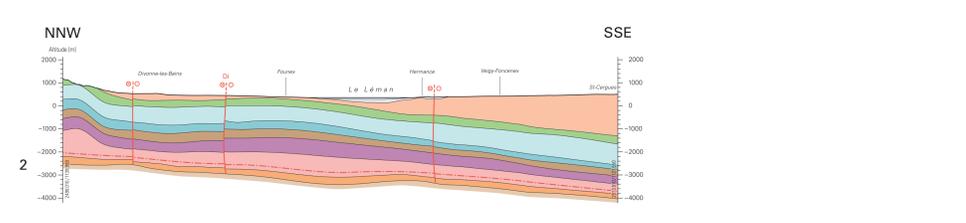
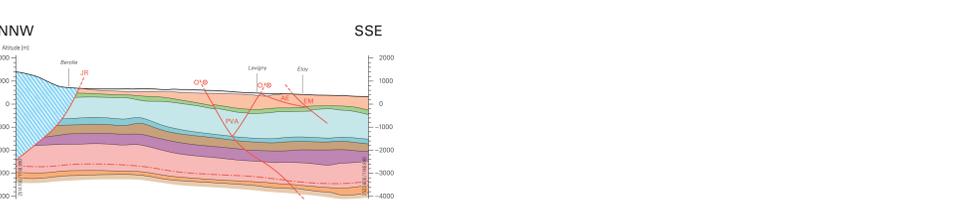
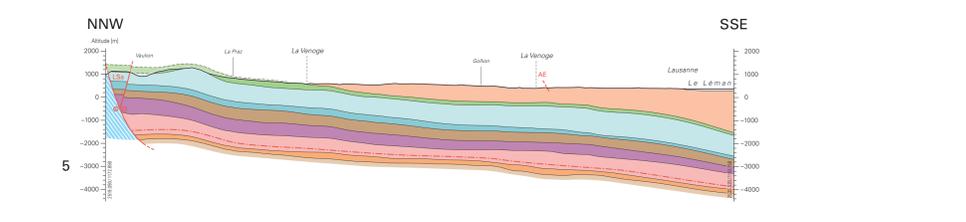
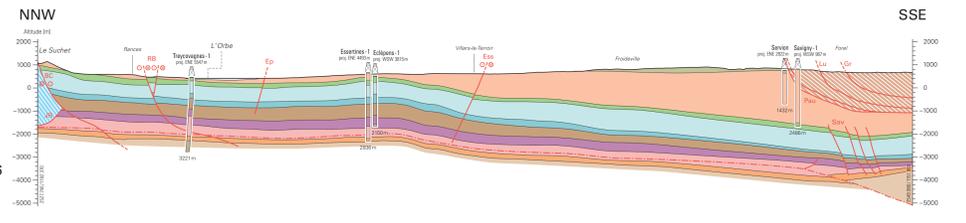
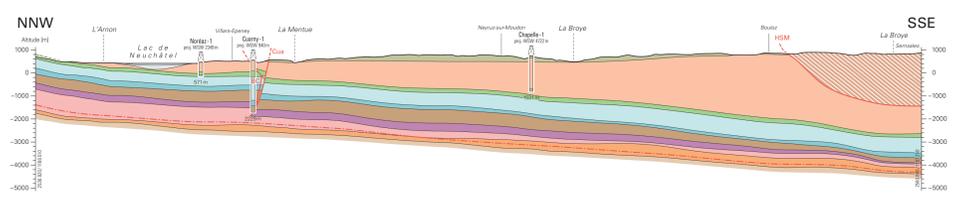
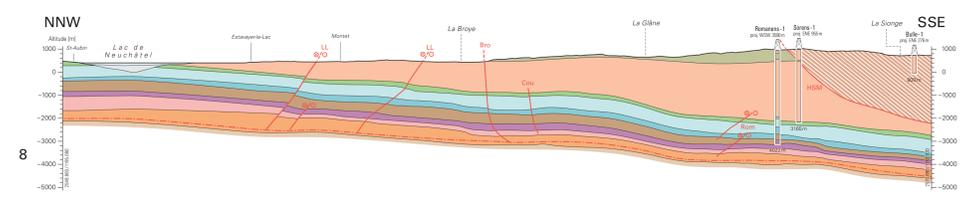
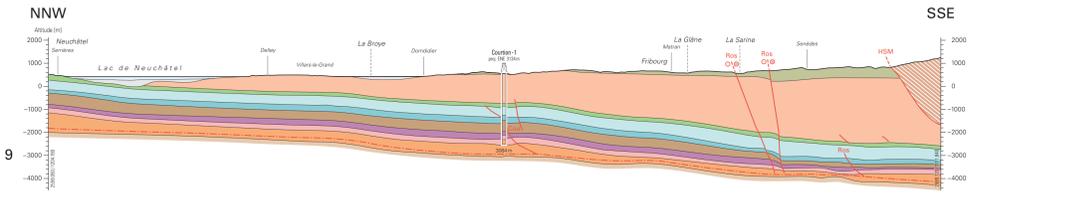
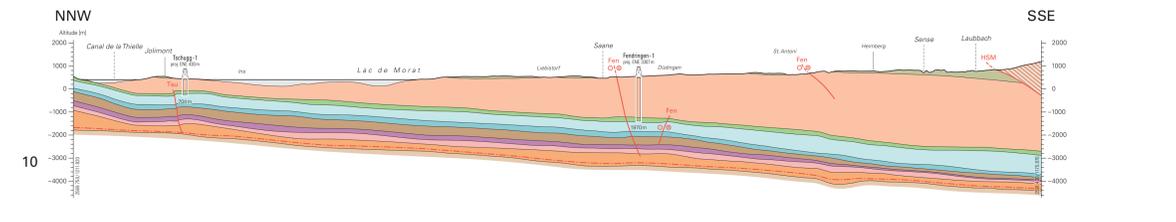
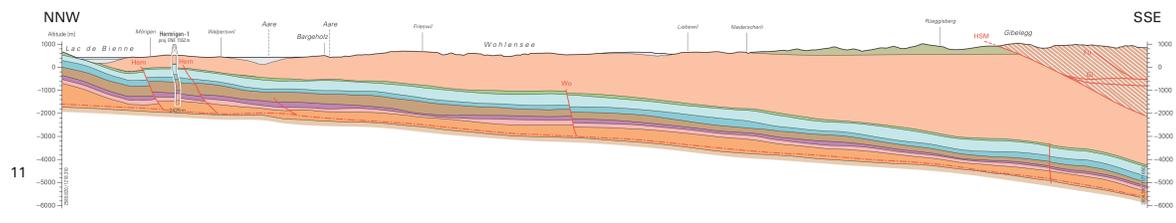
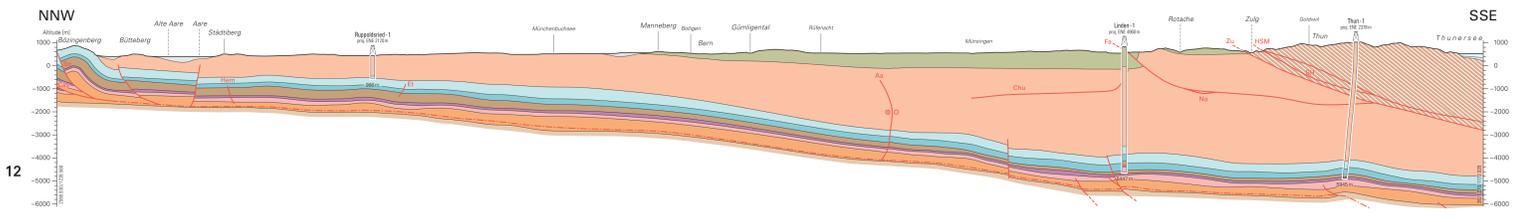
- GORIN, G. (1989): Interprétation géologique de la campagne sismique GG 87 dans le canton de Genève. – Serv. cantonal Géol., Dépt de l'Intérieur et de l'Agriculture (inéd.).
- (1992): Rapport sur l'interprétation de la campagne de sismique réflexion 1990 dans le canton de Genève (périmètre Vernier–One x–Sezegnin–Avully–Vernier). – Serv. industriels Genève (inéd.).
- GORIN, G., MOREND, D. & PUGIN, A. (2003): Bedrock, Quaternary sediments and recent fault activity in central Lake Neuchâtel, as derived from high-resolution reflection seismics. – *Eclogae geol. Helv.* 96, 3–10.
- GORIN, G., SIGNER, C. & AMBERGER, G. (1993): Structural configuration of the western Swiss Molasse Basin as defined by reflection seismic data. – *Eclogae geol. Helv.* 86, 693–716.
- GRAF, H.R. (2007): Isohypsenkarte der plio-pleistozänen Rinnen und Becken im Gebiet von Atlasblatt Baden (Taf. II). In: BITTERLI-DREHER, P., GRAF, H.R., NAEF, H., DIEBOLD, P., MATOUSEK, F., BURGER, H. & PAULI-GABI, T. (2007): Blatt 1070 Baden. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Erläut. 120.
- (2009): Stratigraphie von Mittel- und Spätpleistozän in der Nordschweiz. – *Beitr. geol. Karte Schweiz* [N.F.] 168.
- GRAF, H.R. & WILLENBERG, H. (2011a): Isohypsenkarte der pleistozänen Rinnen und Becken im Gebiet von Atlasblatt Aarau (Taf. III). In: JORDAN, P., GRAF, H.R., EBERHARD, M., JOST, J., KÄLIN, D. & BITTERLI-DREHER, P.H. (2011): Blatt 1089 Aarau. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Erläut. 135.
- (2011b): Isohypsenkarte der pleistozänen Rinnen und Becken im Gebiet von Atlasblatt Murgenthal (Taf. II). In: BITTERLI, T., JORDI, H.A., GERBER, M.E., GNÄGI, C. & GRAF, H.R. (2011): Blatt 1108 Murgenthal. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Erläut. 113.
- (2012): Isohypsenkarte des Felsuntergrunds im Gebiet von Atlasblatt Schöftland (Taf. III). In: GRAF, H.R., JOST, J., EBERHARD, M., KRUYSSÉ, H. & KEMPF, O. (2012): Blatt 1109 Schöftland. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Erläut. 150.
- (2014): Isohypsenkarte der pleistozänen Rinnen und Becken im Gebiet von Atlasblatt Balsthal und Nordteil von Atlasblatt Solothurn 1:50000 (Taf. IV). In: BLÄSI, H.R., GYGI, R., GNÄGI, C., GRAF, H.R., JORDAN, P., LAUBSCHER H.P., HEROLD, T., SCHLANKE, S., BURKHALTER, R. & KÄLIN, D. (2014): Blatt 1107 Balsthal. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Erläut. 139.
- GREEN, A.G., MERZ, K., MARTI, U. & SPILLMANN, T. (2013): Gravity data in northern Switzerland and southern Germany. – *Nagra Arbeitsber. NAB* 13-40.
- GRUBER, M. (2017): Structural investigations of the western Swiss Molasse Basin – From 2D seismic interpretation to a 3D geological model. – PhD Thesis Univ. Fribourg (in prep).
- GRUBER, M., SOMMARUGA, A., ABEDNEGO, M., VOUILLAMOZ, N. & MOSAR, J. (2013): 3D modeling of the Fribourg area – western Swiss Molasse Basin, Switzerland. – *Alpine Workshop 2013, Schlading*.
- GRUBER, M., SOMMARUGA, A. & MOSAR, J. (2016): Modelling journal of the 3D-geological model for the GeoMol CH project in Canton Fribourg (Switzerland). – Univ. Fribourg (unpubl.).
- GRÜNENFELDER, T. (1989): Gravimetrische Bestimmung der Quartärmächtigkeit am Zusammenfluss von Rhein und Seez. – *ETH Zürich*.
- GUBLER, T. (2009): Blatt 1111 Albis. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Karte 134.
- GUNNINK, J., MALJERS, D. & HUMMELMAN, J. (2010): Quantifying uncertainty of geological 3D layer models, constructed with a-priori geological expertise. In: *Proceedings of the Int. Assoc. math. Geosci. gen. Assembly 2010, IAMG 2010*.
- HABICHT, K. (1945): Geologische Untersuchungen im südlichen sanktgallisch-appenzellischen Molassegebiet. – *Beitr. geol. Karte Schweiz* [N.F.] 83.
- HABICHT, J.K.A. (1987): Internationales stratigraphisches Lexikon, Bd. I: Europa, Fasz. 7 Schweiz, 7b Schweizerisches Mittelland (Molasse). – *Schweiz. geol. Komm. und Landeshydrol. u. -geol.*
- HAHMANN, S. & BURGHARDT, D. (2013): How much information is geospatially referenced? Networks and cognition. – *Int. J. geogr. Inform. Sci.* 27/6, 1171–1189.
- HANTKE, R., WYSSLING, G. & BOLLINGER, D. (2009): Blatt 1132 Einsiedeln. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Karte 129.
- HARTMANN, H. VON, BELECKE, T., BUNESS, H., MUSMANN, P. & SCHULZ, R. (2015): Seismische Exploration für tiefe Geothermie. – *Geol. Jb. B* 104, Hannover.
- HAUS, H. (1937): Geologie der Gegend von Schangnau im oberen Emmental (Kt. Bern): ein Beitrag zur Stratigraphie und Tektonik der subalpinen Molasse und des Alpenrandes. – *Beitr. geol. Karte Schweiz* [N.F.] 75.
- HEIDBACH, O. & REINECKER, J. (2013): Analyse des rezenten Spannungsfelds der Nordschweiz. – *Nagra Arbeitsber. NAB* 12-05.
- HEILBRONNER, R. & BARRETT, S. (2014): Image analysis in earth sciences – microstructures and textures of earth materials. – Springer, Heidelberg.
- HENK, A. & TIMMERMAN, M.J. (2005): Europe/Permian Basins. In: SELLEY, R.C., COCKS, L.R. & PLIMER, I.R. (Ed.) – *Encyclopedia of Geology* (p. 95–102). – Elsevier, Hamburg.
- HERGERT, T., HEIDBACH, O., REITER, K., GIGER S.B. & MARSCHALL, P. (2015): Stress field sensitivity analysis in a sedimentary sequence of the Alpine foreland, northern Switzerland. – *Solid Earth* 6, 533–552.
- HERWEGH, M., BERGER, A., BAUMBERGER, R., WEHRENS, P. & KISSLING, E. (2017): Large-scale crustal-block-extrusion during Late Alpine collision. – *Nature sci. Rep.* 7/413.
- HEUBERGER, S., ROTH, P., ZINGG, O., NAEF, H. & MEIER, B.P. (2016): The St. Gallen Fault Zone: a long-lived, multiphase structure in the North Alpine Foreland Basin revealed by 3D seismic data. – *Swiss J. Geosci.* 109/1, 83–102.
- HINSKEN, S., USTASZEWSKI, K. & WETZEL, A. (2007): Graben width controlling syn-rift sedimentation: the Palaeogene southern Upper Rhine Graben as an example. – *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rdsch.)* 96, 979–1002.
- HIRSCHBERG, S., WIEMER, S. & BURGHERR, P. (2015): Energy from the earth – deep geothermal as a resource for the future? – *TA-Swiss* 62, Bern, 220–251.
- HOFMANN, F. (1955): Beziehungen zwischen Tektonik, Sedimentation und Vulkanismus im Schweizerischen Molassebecken. – *Bull. Ver. schweiz Petroleum-Geol. u. -Ing.* 22/62, 5–18.
- (1956): Die OSM in der Ostschweiz und im Hegau. – *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.* 23/64, 23–35.
- (1957): Pliozäne Schotter und Sande auf dem Tannenber NW, St. Gallen. – *Eclogae geol. Helv.* 50, 477–482.
- (1957): Beziehungen zwischen Tektonik, Sedimentation und Vulkanismus im Schweizerischen Molassebecken. – *Bull. Ver. schweiz Petroleum-Geol. u. -Ing.* 22/62, 5–18.
- HOMEWOOD, P., ALLEN, P.A. & WILLIAMS, G.D. (1986): Dynamics of the Molasse Basin of western Switzerland. – *Spec. Publ. int. Assoc. Sedimentol.* 8, 199–217.
- HOMEWOOD, P., RIGASSI, D. & WEIDMANN, M. (1989): Le bassin molassique Suisse. In: PURSER, B.H. (Ed.): *Dynamique et méthodes d'étude des bassins sédimentaires* (p. 299–314). – Technip, Paris.
- HUGGENBERGER, P., DRESMANN, H. & ANDERS, B. (2016): «GeoMol-CH» – Geologisches 3D-Modell des schweizerischen Molassebeckens. Pilotgebiet Bodensee–Allgäu. – Univ. Basel (unpubl.).
- IBELE, T. (2011): Tectonics of the western Swiss Molasse Basin during Cenozoic times. – PhD Thesis Univ. Fribourg, *GeoFocus* 27.
- ISPRA [Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale] (2015): Modello geologico 3D e geopotenziali della Pianura Padana centrale (Progetto GeoMol). – *Rapporti ISPRA* 234, 104 e Append.
- JORDAN, P. (2004): Felsisohypsenkarte am Jurasüdfuss zwischen Oberbuchsitzen SO und Lenzburg AG. – *Rep. Imper Geologie, Heiligkreuz*.

- JORDAN, P. (2007): Digitales Höhenmodell der Basis des Quartärs (DHM B_QU, «Felsmodell»). – Nagra Arbeitsber. NAB 07-12.
- (2010): Analysis of overdeepened valleys using the digital elevation model of the bedrock surface of northern Switzerland. – *Swiss J. Geosci.* 103, 375–384.
- (2016): Reorganisation of the Triassic stratigraphic nomenclature of northern Switzerland: overview and the new Dinkelberg, Kaiseraugst and Zeglingen formations. – *Swiss J. Geosci.* 109, 241–255.
- JORDAN, P., GRAF, H.R., EBERHARD, M., JOST, J., KÄLIN, D. & BITTERLI-DREHER, P.H. (2011): Blatt 1089 Aarau. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Erläut. 135.
- JORDAN, P., MALZ, A., HEUBERGER, S., PIETSCH, J., KLEY, J. & MADRITSCH, H. (2015): Regionale geologische Profilschnitte durch die Nordschweiz und 2D-Bilanzierung der Fernschubdeformation im östlichen Faltenjura. – Arbeitsbericht zu SGT-Etappe 2. – Nagra Arbeitsber. NAB 14-105.
- JORDI, H.A., BITTERLI, T. & GERBER, M.E. (2003): Blatt 1108 Murgenthal. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25000, Karte 113.
- KARICH, F. (2010): Erstellung eines Standalone-Programms zur Koordinatentransformation von GoCAD-Objekten im Projekt GEORG. – Bachelorarb. Univ. Freiberg. (unpubl.).
- KARNER, G.D. & WATTS, A.B. (1983): Gravity anomalies and flexure of the lithosphere at Mountain Ranges. – *J. geophys. Res.* 88, 10449–10477.
- KASTRUP, U., DEICHMANN, N., FRÖHLICH, A. & GIARDINI, D. (2007): Evidence for an active fault below the northwestern Alpine foreland of Switzerland. – *Geophys. J. int.* 169, 1273–1288.
- KAUFMANN, O. & MARTIN, T. (2008): 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. – *Computers & Geosci.* 34, 278–290.
- KEMPF, O., SCHLUNEGGER, F., STRUNCK, P. & MATTER, A. (1998): Paleomagnetic evidence for late Miocene rotation of the Swiss Alps: results from the north Alpine foreland basin. – *Terra Nova* 10, 6–10.
- KERRIEN, Y., TURREL, C., MONJUVENT, G., CHAROLLAIS, J., LOMBARD, A., BALMER, F., OLMARI, F., PAPILLON, R., FONTANNAZ, L., AMBERGER, G., RUCHAT, C., GREBERT, Y. & MARTHALER, M. (1998): Feuille 654 Annemasse. – *Carte géol. France* 1:50000, Carte 654, Bur. Rech. géol. min. [BRGM], Orléans.
- KETTIGER, D. (2016): Rechtlicher Rahmen für das Erheben, Nachführen und Verwalten von geologischen Daten. – *Ber. Landesgeol.* 9.
- KIM, Y.S. & SANDERSON, D.J. (2005): The relationship between displacement and length of faults: a review. – *Earth-Sci. Rev.* 68/3–4, 317–334.
- KLINGELÉ, E. (2009): Gravity survey of the Rhine Valley. Gravity interpretation, final report. – Amt f. Umwelt, Vaduz.
- (2012): Détermination des épaisseurs des remplissages quaternaires des vallées alpines et du Jura à l'aide de la gravimétrie – Rapp. final. *Comm. suisse Géophys. SGPK.*
- KOCAL, A., DUZGUN, H.S. & KARPUZ, C. (2007): An accuracy assessment methodology for the remotely sensed discontinuities: a case study in Andesite Quarry area, Turkey. – *Int. J. Remote Sensing* 28/17, 3915–3936.
- KUHLEMANN, J. & KEMPF, O. (2002): Post-Eocene evolution of the North Alpine Foreland Basin and its response to Alpine tectonics. – *Sediment. Geol.* 152, 45–78.
- LAHUSEN, P.H. & WYSS, R. (1995): Erdöl- und Erdgasexploration in der Schweiz: Ein Rückblick. – *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.* 62/141, 43–72.
- LANDESGEOLOGIE (2011): 3D-Geologie in der Landesgeologie, Qualitätssicherungs-Konzept (unpubl.).
- (2013): Guidelines and procedures for assessing the quality of geological cross sections (unpubl.).
- (2014a): Qualitätssicherung bei der Integration von Bohrdaten in eine Datenbank (unpubl.).
- (2014b): SASMB – Section Validation Summary Report; Report on the quality assessment of the SASMB cross sections (unpubl.).
- LANDESGEOLOGIE (2015): Schlussbericht Modellierung Felsoberfläche (unpubl.).
- (in Vorb.): Das Potenzial der Energieressourcen des tiefen Untergrunds der Schweiz.
- LARK, R.M., MATHERS, S.J., THORPE, S., ARKLEY, S.L.B., MORGAN, D.J. & LAWRENCE, D.J.D. (2013): A statistical assessment of the uncertainty in a 3-D geological framework model. – *Proc. Geologists' Assoc.* 124/6, 946–958.
- LAUBSCHER, H.P. (1961): Die Fernschubhypothese der Jurafaltung. – *Eclogae geol. Helv.* 54, 221–282.
- (2008): The Grenchenberg conundrum in the Swiss Jura: a case for the centenary of the thin-skin décollement nappe model (BUXTORF 1907). – *Swiss J. Geosci.* 101, 41–60.
- LINIGER, M., HÄNNI, R., NAGELISEN, J. & SCHNELLMANN, M. (2014): Ausgewählte Beobachtungen im Hinblick auf die geologische Langzeitentwicklung des Standortgebiets Wellenberg. – Nagra Arbeitsber. NAB 13-71.
- LE, H.H., GABRIEL, P., GIETZEL, J. & SCHAEBEN, H. (2013): An object-relational spatio-temporal geoscience data model. – *Computer & Geosci.* 57, 104–117.
- LEU, W. (2014): Potenzial der Kohlenwasserstoff-Ressourcen in der Nordschweiz. – Nagra Arbeitsber. NAB 14-70.
- LOUP, B. (1992): Evolution de la partie septentrionale du domaine helvétique en Suisse occidentale au Trias et au Lias: contrôle par subsidence thermique et variations du niveau marin. – Thèse Univ. Genève.
- LÜSCHEN, E., LAMMERER, B., GEBRANDE, H., MILLAHN, K. & NICOLICH, R. (2004): Orogenic structure of the Eastern Alps, Europe, from TRANSALP deep seismic reflection profiling. – *Tectonophysics* 388, 85–102.
- MADRITSCH, H. (2015): Outcrop-scale fracture systems in the Alpine foreland of central northern Switzerland: kinematics and tectonic context. – *Swiss J. Geosci.* 108, 155–181.
- MADRITSCH, H., MEIER, B., KUHN, P., ROTH, P., ZINGG, O., HEUBERGER, S., NAEF, H. & BIRKHÄUSER, P. (2013): Regionale strukturgeologische Zeitinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12. – Nagra Arbeitsber. NAB 13-10.
- MALZ, A., MADRITSCH, H., MEIER, B. & KLEY, J. (2016): An unusual triangle zone in the external northern Alpine foreland (Switzerland): Structural inheritance, kinematics and implications for the development of the adjacent Jura fold-and-thrust belt. – *Tectonophysics* 670, 127–143.
- MANHENKE, V. (1999): Überblick über das Geopotential des Landes Brandenburg. – *Brandenb. geowiss. Beitr.* 6, 5–20.
- MARCHANT, R. & BAUER, R. (2016): GeoMol-Vaud final report. – Direction générale de l'environnement (DGE) du canton du Vaud et musée cantonal de géologie (inéd.).
- MATTER, A. (1987): Faziesanalyse und Ablagerungsmilieus des Permokarbons im Nordschweizer Trog. – *Eclogae geol. Helv.* 80, 345–367.
- MATTER, A., HOMEWOOD, P., CARON, C., RIGASSI, D., STUIJVENBERG, J. VAN, WEIDMANN, M. & WINKLER, W. (1980): Flysch and molasse of western and central Switzerland. In: TRÜMPY, R. (Ed.): *Geology of Switzerland: a guide-book, Part B: geological excursions* (p. 261–293). – Wepf & Co., Basel.
- MATZENAUER, E. (2007): Spannungsanalyse der Mittelland Molasse des Kantons Freiburg anhand von Deformationserscheinungen an Geröllen und Bruchbildungen. – Masterarb. Univ. Freiburg.
- (2011): Tectonics of the Préalpes Klippen and the Subalpine Molasse (Canton Fribourg, Switzerland). – PhD Thesis Univ. Fribourg, *GeoFocus* 31.
- MAZZOTTI, M., BURDET, A., CONRAD, C., DIAMOND, L., HÄRING, M., LEU, W., LINIGER, H.U., SHELL, J. & ZAPPONE, A. (2013): Roadmap for a carbon dioxide capture and storage pilot project in Switzerland. – Rep. for swiss fed. Off. Energy.
- MCCANN, T. (2008): The geology of Central Europe. Vol. 1: Precambrian and Paleozoic. – *Geol. Soc. London.*

- MCCANN, T., PASCAL, C., TIMMERMAN, M.J., KRZYWIEC, P., LÓPEZ-GÓMEZ, J., WETZEL, A., KRAWCZYK, C.M., RIEKE, H. & LAMARCHE, C. (2006): Post-Variscian (end Carboniferous – Early Permian) basin evolution in Western and Central Europe. In: GEE, D.G. & STEPHENSON, R.A. (Ed.): *European lithosphere dynamics* (p.355–388). – Mem. geol. Soc. London 32.
- MEIA, J. (1966): Un accident tectonique sur le flanc sud du Mont-Aubert (Jura vaudois oriental, Suisse). – Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 89, 129–135.
- MEIER, B.P. (2010): Ergänzende Interpretation reflexionsseismischer Linien zwischen dem östlichen und westlichen Molassebecken. Gebiete Waadtland Nord, Fribourg, Berner Seeland und Jurasüdfuss zwischen Biel und Oensingen. – Nagra Arbeitsber. NAB 10-40.
- MEIER, B.P., KUHN, P., MUFF, S., ROTH, P. & MADRITSCH, H. (2014): Tiefenkonvertierung der regionalen Strukturinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12. – Nagra Arbeitsber. NAB 14-34.
- MEYER, M. (2000): Isohypses du toit de la Molasse. – Serv. géol. du canton de Genève (unpubl.).
- MOCK, S. (2016): GeoMol Bern. Final Report. – Univ. Bern (unpubl.).
- MÜLLER, B. (1995): Das Walensee-/Seeztal – eine Typusregion alpiner Talgenese, Vom Entstehen und Vergehen des grossen Rheintal/Zürichsees. – Diss. Univ. Bern.
- MÜLLER, W.H., NAEF, H. & GRAF, H.R. (2002): Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien im Zürcher Weinland. – Nagra tech. Ber. NTB 99-08.
- NAEF, H., BIRKHÄUSER, P. & ROTH, P. (1995): Interpretation der Reflexionsseismik im Gebiet nördlich Lägeren – Zürcher Weinland. – Nagra tech. Ber. NTB 94-14.
- NAEF, H. & MADRITSCH, H. (2014): Tektonische Karte des Nordschweizer Permokarbons: Aktualisierung basierend auf 2D-Seismik und Schweredaten. – Nagra Arbeitsber. NAB 14-17.
- NAGRA (2008): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA und das HAA-Lager. Geologische Grundlagen. – Nagra tech. Ber. NTB 08-04.
- (2014): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Geologische Grundlagen. Dossier II: Sedimentologische und tektonische Verhältnisse. – Nagra tech. Ber. NTB 14-02.
- OBERHAUSER, R. (1998): Geologisch-tektonische Übersichtskarte von Vorarlberg 1:200 000. – Geol. Bundesanst., Wien.
- ORTNER, H., AICHHOLZER, S., ZERLAUTH, M., PILSER, R. & FÜGENSCHUH, B. (2015): Geometry, amount, and sequence of thrusting in the Subalpine Molasse of western Austria and southern Germany, European Alps. – *Tectonics* 34, 1–30.
- PANG, A.T., WITTENBRINK, C.M. & LODHA, S.K. (1997): Approaches to uncertainty visualization. – *The Visual Computer* 13, 370–390.
- PAOLACCI, S. (2012): Seismic facies and structural configuration of the Western Alpine Molasse basin and its substratum (France and Switzerland). – Univ. Geneva (unpubl.).
- PARRIAUX, A., BLUNIER, P., MAIRE, P., DEKKIL, G. & TACHER, L. (2010): Projet Deep City – Ressources du sous-sol et développement durable des espaces urbains. – Rapp. Rech. PNR 54.
- PFIFFNER, O.A. (1986): Evolution of the north Alpine foreland basin in the Central Alps. – *Spec. Publ. int. Assoc. Sedimentol.* 8, 219–228.
- (2009): Geologie der Alpen. – Haupt, Bern.
- (2011): Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps, including Vorarlberg (Austria) and Haute Savoie (France), 1:100 000. – Geol. spec. Map 128, Explanatory notes.
- PFIFFNER, O.A., BURKHARD, M., HÄNNI, R., KAMMER, A., KLIGFIELD, R., MANCKTELOW, N.S., MENKVELD, J.W., RAMSAY, J.G., SCHMID, S.M. & ZURBRIGGEN, R. (2010): Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps, including Vorarlberg (Austria) and Haute Savoie (France), 1:100 000. – Geol. spec. Map 128.
- PFIFFNER, O.A., LEHNER, P., HEITZMANN, P., MUELLER, ST. & STECK, A. (1997): Deep Structure of the Swiss Alps: Results of NRP 20. – Birkhäuser Verlag, Basel.
- PFLEIDERER, S. (Hrsg.), GÖTZ, G., BOTTIG, M., BRÜSTLE, A.K., PORPACZY, C., SCHRELECHNER, M., EICHKITZ, C., JUD, M., SACHSENHOFER, R., ZOSSEDER, K., CASPER, S., GOLDBRUNNER, J., KRIEGL, C., KOLMER, C. & DIEPOLDER, G.W. (2016): GeoMol – Geologische 3D-Modellierung des österreichischen Molassebeckens und Anwendungen in der Hydrogeologie und Geothermie im Grenzgebiet von Oberösterreich und Bayern. – Abh. geol. Bundesanst. 70.
- PIEŃKOWSKI, G., SCHUDACK M.E., BOSÁK, P., ENAY, R., FELDMAN-OLSZEWSKA, A., GOLONKA, J., GUTOWSKI, J., HEMGREEN, G.F.W., JORDAN, P., KROBICKI, M., LATHULIERE, B., LEINFELDER, R.R., MICHALIK, J., MÖNNIG, E., NOE-NYGAARD, N., PÁLFY, J., PINT, A., RASSER, M.W., REISDORF, A.G., SCHMID, D.U., SCHWEIGERT, G., SURLYK, F., WETZEL, A. & WONG, T.E. (2008): Jurassic. In: MCCANN, T. (Ed.): *The geology of Central Europe. Vol. 2: Mesozoic and Cenozoic* (p. 823–922). – Geol. Soc. London.
- PIETSCH, J. & JORDAN, P. (2014): Digitales Höhenmodell Basis Quartär der Nordschweiz – Version 2014 und ausgewählte Auswertungen. – Nagra Arbeitsber. NAB 14-02.
- PLANCHEREL, R. (1979): Aspects de la deformation en grand dans les Préalpes médianes plastiques entre Rhône et Aar. Implications cinématiques et dynamiques. – *Eclogae geol. Helv.* 72, 145–214.
- PUGIN A. (1988): Carte des isohypses de la base des sédiments du Quaternaire en Suisse occidentale, avec quelques commentaires. – Geol. Ber. Landeshydrol. u. -geol. 3.
- REISDORF, A.G. (2017): Bericht zur Literaturrecherche hydrogeologischer Daten der Nordschweiz. – Ber. z. H. Bundesamt f. Landestopogr. swisstopo (unpubl.).
- REISDORF, A.G., WETZEL, A., SCHLATTER, R. & JORDAN, P. (2011): The Staffelegg Formation: a new stratigraphic scheme for the Early Jurassic of northern Switzerland. – *Swiss J. Geosci.* 104, 97–146.
- REVERTERA, G.J. (1927): Ein tektonisches Problem aus den Prealpen. Die Reste der Simmen- und Breccienendecke. Ihre Lage in Bezug auf die axialen Schwankungen ihres Substrats. – Diss. Univ. Freiburg.
- REY, R., WILDBERGER, A., FRANK, S. & FREIMOSER, M. (2011): Blatt 1072 Winterthur. – Geol. Atlas Schweiz 1:25 000, Karte 140.
- RIGASSI, D. (1978): Bassin molassique sud-occidental. Carte géologique interprétative (sans Quaternaire). In: JUNG, P. (Ed.) (1982): Nouveaux résultats biostratigraphiques dans le bassin molassique, depuis le Vorarlberg jusqu'en Haute-Savoie. – Doc. Lab. Géol. Univ. Lyon, Mém. h. s. 7.
- RIME, V. (2015): Étude tectonique de la structure de Hermrigen. – Trav. Bachelor Univ. Fribourg (iné.).
- ROTH, P., NAEF, H. & SCHNELLMANN, M. (2010): Kompilation und Interpretation der Reflexionsseismik im Tafeljura und Molassebecken der Zentral- und Nordschweiz. – Nagra Arbeitsber. NAB 10-39.
- RUTSCH, R. (1947): Molasse und Quartär im Gebiet des Siegfriedblattes Rüeggisberg (Kt. Bern). – Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.] 87.
- RYBACH, L. (1992): Geothermal potential of the Swiss Molasse Basin. – *Eclogae geol. Helv.* 85, 733–744.
- RYBACH, L., BÜCHI, U.P., BODMER, P. & KRÜSI, H.R. (1980): Die Tiefengrundwässer des schweizerischen Mittellandes aus geothermischer Sicht. – *Eclogae geol. Helv.* 73, 293–310.
- SANS, M. & VERGÉS, J. (1995): Fold development related to contractional salt tectonics, southeastern Pyrenean thrust front, Spain. In: JACKSON, M.P.A., ROBERTS, D.G. & SNELSON, S. (Ed.): *Salt tectonics: a global perspective* (p.369–378). – Mem. amer. Assoc. Petroleum Geol. 65.
- SCHÄLLI, L. (2012): The diffuence of the Rhine glacier at Sargans in connection to the solid-rock surface model of the Rhine and Seez valley. – Master Thesis Univ. Zürich (unpubl.).
- SCHINDLER, C., HALDIMANN, P. & FREIMOSER, M. (2015): Felsisohypsenkarte des Gebietes von Atlasblatt Zürich (Taf. V). In: PAVONI, N., SCHINDLER, C., FREIMOSER, M., HALDIMANN, P. & LETSCH, D. (2015): Blatt 1091 Zürich. – Geol. Atlas Schweiz 1:25 000, Erläut. 90.

- SCHLUNEGGER, F. (1995): Magnetostratigraphie und fazielle Entwicklung der Unteren Süsswassermolasse zwischen Aare und Limmat. – Diss. Univ. Bern.
- SCHLUNEGGER, F., JOST, J., GRÜNIG, A. & TRÜSSEL, M. (2016): Blatt 1169 Schüpfheim. – Geol. Atlas Schweiz 1:25000, Erläut. 148.
- SCHLUNEGGER, F. & KISSLING, E. (2015): Slab rollback orogeny in the Alps and evolution of the Swiss Molasse basin. – *Nature Commun.* 6/8605.
- SCHLUNEGGER, F., MATTER, A. & MANGE, M.A. (1993): Alluvial fan sedimentation and structure of the southern Molasse Basin margin, Lake Thun area, Switzerland. – *Eclogae geol. Helv.* 86, 717–750.
- SCHMID, S.M., PFIFFNER, O.A., FROITZHEIM, N., SCHÖNBORN, G. & KISSLING, E. (1996): Geophysical-geological transect and tectonic evolution of the Swiss-Italian Alps. – *Tectonics* 15/5, 1036–1064.
- SCHOOP, R.W. & WEGENER, H. (1984): Einige Ergebnisse der seismischen Untersuchungen auf dem Bodensee. – *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.* 50/118, 55–61.
- SCHULTZ, R.A. & FOSSEN, H. (2002): Displacement-length scaling in three dimensions: the importance of aspect ratio and application to deformation bands. – *J. struct. Geol.* 24/9, 1389–1411.
- SCHULZ, G., SCHRADER, H.K., BADTKE, G., BODEMANN, W. & KLONKI, S. (1982): Bericht Bodensee 1980/81 über reflexionsseismische Messungen auf dem Bodensee. – *Prakla-Seismos GmbH Hannover*, Ber. 810 670 (unpubl.).
- SCHUPPLI, H.M. (1950): Erdölgeologische Untersuchungen in der Schweiz, III. Teil. – *Beitr. Geol. Schweiz. geotech. Ser.* 26/3.
- SHELL (1978): Well report of Treycovagnes-I. – *Shell-Switzerland* (unpubl.).
- SIEGENTHALER, C., FINGER, W., KELTS, K. & WANG, S. (1987): Earthquake and seiche deposits in Lake Lucerne, Switzerland. – *Eclogae geol. Helv.* 80, 241–260.
- SIGNER, C. & GORIN, G. (1995): New geological observation between the Jura and the Alps in the Geneva area, as derived from reflection seismic data. – *Eclogae geol. Helv.* 88, 235–265.
- SIGNORELLI, S., ANDENMATTEN BERTHOUD, N. & KOHL, T. (2004): Geothermischer Ressourcenatlas der Schweiz – Erarbeitung und Bewertung des geothermischen Potentials der Schweiz. – Bundesamt f. Energie BFE.
- SIGNORELLI, S. & KOHL, T. (2006): Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz. – *Beitr. Geol. Schweiz, Geophys.* 39.
- SINCLAIR, H.D. (1997): Tectonostratigraphic model for underfilled peripheral foreland basins: An Alpine perspective. – *Bull. geol. Soc. Amer.* 109/3, 324–346.
- SINCLAIR, H.D. & ALLEN, P.A. (1992): Vertical versus horizontal motions in the Alpine orogenic wedge: stratigraphic response in the foreland basin. – *Basin Res.* 4, 215–232.
- SOMMARUGA, A. (1997): Geology of the Central Jura and the Molasse Basin: new insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt. – *Thesis Univ. Neuchâtel, Mém. Soc. neuchât. Sci. nat.* 12.
- SOMMARUGA, A., EICHENBERGER, U. & MARILLIER, F. (2012): Seismic Atlas of the Swiss Molasse Basin. – *Matér. Géol. Suisse, Géophys.* 44.
- SOMMARUGA, A., GRUBER, M. & MOSAR, J. (2016): Synthèse des données géologiques utiles pour la construction d'un modèle du sous-sol du Canton de Fribourg. – *GeoFocus* 39.
- SPINATSCH, M. (2011): Aufgabenüberprüfung Landesgeologie: Darstellung und Beurteilung der landesgeologischen Aufgaben, Ressourcen und Produkte. – *Ber. z. H. Bundesamt f. Landestopogr. swisstopo* (unpubl.).
- SPRECHER, C. & MÜLLER, W.H. (1986): Geophysikalisches Untersuchungsprogramm Nordschweiz: Reflexionsseismik 82. – *Nagra tech. Ber. NTB* 84-15.
- ŠRAM, D., RMAN, N., RIŽNAR, I. & LAPANJE, A. (2015): The three-dimensional regional geological model of the Mura-Zala Basin, northeastern Slovenia. – *Geologija (Ljubljana)* 58/2, 139–154.
- STADT ST. GALLEN (2014): Sankt Galler Stadwerke; Abschreibung des Geothermieprojekts. – *Vorlage Stadtparlament* 2471.
- STAMPFLI, G.M. (1993): Le Briançonnais, terrain exotique dans les Alpes? – *Eclogae geol. Helv.* 86, 1–45.
- STRASKY, S., MORARD, A. & MÖRI, A. (2016): Harmonising the lithostratigraphic nomenclature: towards a uniform geological dataset of Switzerland. – *Swiss J. Geosci.* 109, 123–136.
- SWISSTOPO (2004): Geoinformation – Die Ressource des 21. Jahrhunderts. Aus nützlichen Daten werden vernetzte Dienste. – *Broschüre Geoinformation, Bundesamt f. Landestopogr. swisstopo*.
- (2005): DHM25 - Das landesweite digitale Höhenmodell. – *Informationsbroschüre Bundesamt f. Landestopogr. swisstopo*.
- (2006): Neue Koordinaten für die Schweiz – Der Bezugsrahmen LV95. – *Informationsbroschüre Bundesamt f. Landestopogr. swisstopo*.
- (2017): swissALTI^{3D} – Das hoch aufgelöste Terrainmodell der Schweiz. – *Informationsbroschüre Bundesamt f. Landestopogr. swisstopo*.
- TACHER, L., POMIAN-SRZEDNICKI, I. & PARRIAUX, A. (2006): Geological uncertainties associated with 3-D subsurface models. – *Computers & Geosci.* 32/2, 212–221.
- TORABI, A. & BERG, S.S. (2011): Scaling of fault attributes: A review. – *Marine and Petroleum Geol.* 28/8, 1444–1460.
- TRÜMPY, R. (1959): Hypothesen über die Ausbildung von Trias, Lias und Dogger im Untergrund des schweizerischen Molassebeckens. – *Eclogae geol. Helv.* 52, 435–448.
- (1962): Mesozoischer Untergrund und älterer Molasse im schweizerischen und oberschwäbischen Molassebecken. – *Erdöl-Z.* 9, 523–527.
- (1980): *Geology of Switzerland: a guide-book*. – Wepf & Co., Basel.
- VOLLMAYR, T. (1992): Strukturelle Ergebnisse der Kohlenwasserstoffexploration im Gebiet von Thun, Schweiz. – *Eclogae geol. Helv.* 85, 531–539.
- VOLLMAYR, T. & WENDT, A. (1987): Die Erdgasbohrung Entlebuch 1, ein Tiefenaufschluss am Alpennordrand. – *Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.* 53/125, 67–79.
- VOUILLAMOZ, N. (2015): Microseismic characterization of Fribourg area (Switzerland) by nanoseismic monitoring. – *PhD Thesis Univ. Fribourg, GeoFocus* 38.
- VOUILLAMOZ, N., MATZENAUER, E., MOSAR, J. & ABEDNEGO, M. (2010): Tectonic map of the central western Molasse Basin. – *Rep Resun AG, Univ. Fribourg* (unpubl.).
- VOUILLAMOZ, N., MOSAR, J. & DEICHMANN, N. (2017): Multi-scale imaging of a slow active fault zone: contribution for improved seismic hazard assessment in the Swiss Alpine foreland. – *Swiss J. Geosci.* 110, 547–563.
- WABER, H.N., BISSIG, P., HUGGENBERGER, P., MEYLAN, B., MILNES, E., SCHÜRCH, M. & WALTER, U. (2015): Tiefengrundwasser – Vorkommen, Nutzungspotenzial und Schutzwürdigkeit. – *Aqua & Gas* 4, 32–41.
- WALSH, J.J. & WATTERSON, J. (1988): Analysis of the relationship between the displacements and dimensions of faults. – *J. struct. Geol.* 10/3, 239–247.
- WATTERSON, J. (1986): Fault dimensions, displacements and growth. – *Pure and appl. Geophys.* 124/1–2, 365–373.
- WELLMANN, J.F., HOROWITZ, F.G., SCHILL, E. & REGENAUER-LIEB, K. (2010): Towards incorporating uncertainty of structural data in 3D geological inversion. – *Tectonophysics* 490/3–4, 141–151.
- WELLMANN, J.F. & REGENAUER-LIEB, K. (2012): Uncertainties have a meaning: Information entropy as a quality measure for 3-D geological models. – *Tectonophysics* 526–529, 207–216.
- WETZEL, A. & ALLIA, V. (2003): Der Opalinuston in der Nordschweiz: Lithologie und Ablagerungsgeschichte. – *Eclogae geol. Helv.* 96, 451–469.
- WILDI, W. (1984): Isohypsenkarte der quartären Felstäler in der Nord- und Ostschweiz mit kurzen Erläuterungen. – *Eclogae geol. Helv.* 77, 541–551.

- WILLIAMS, R. & VAN DEMARK, P. (1987): Selling a geographical information system to government policy makers. – Pap. Annu. Conf. Urban and Reg. Inform. Syst. Assoc. 3, 150–156.
- WULLSCHLEGER, E. (2005): Das Bohnerz von Küttigen – Entstehung, Fossilien- und Mineralgehalt. – Mitt. aargau. natf. Ges. 36, 27–60.
- WYCISK, P., HUBERT, T., GOSSEL, W. & NEUMANN, C. (2009): High-resolution 3D spatial modelling of complex geological structures for an environmental risk assessment of abundant mining and industrial megasites. – Computers & Geosci. 35/1, 165–182.
- WYSSLING, G. (2008): Felsisohypsenkarten des Gebietes von Atlasblatt Uster (Taf. III). In: WYSSLING, G., GUBLER, T. & NAGY, P. (2008): Blatt 1092 Uster. – Geol. Atlas Schweiz 1:25 000, Erläut. 128.
- ZAUGG, A., BLASS, A. & WESSELS, M. (2008): Blatt 1055 Romanshorn. – Geol. Atlas Schweiz 1:25 000, Erläut. 125.
- ZIEGLER, P.A. (1990): Geological atlas of western and central Europe 1990. – Shell int. Petroleum Maatsch. B.V.
- (2005): Europe – Permian to Recent Evolution. In: SELLEY, R.C., COCKS, L.R. & PLIMER, I.R. (Ed.): Encyclopedia of Geology (p. 102–125). – Elsevier, Hamburg.
- ZHU, L. & ZHUANG, Z. (2010): Framework system and research flow of uncertainty in 3D geological structure models. – Min. Sci. and Technol. 20/2, 306–311.



- Cénozoïque**
- Dépôts quaternaires en gén.
 - Molasse d'eau douce supérieure (DSM)
 - Molasse marine supérieure (MSM)
 - Molasse marine inférieure (LMMI) et Molasse d'eau douce inférieure (LMI)
 - Sédiments molassiques, indiff. Zone d'écailles
- Mésozoïque**
- Sédiments crétacés
 - Malm supérieur
 - Malm inférieur
 - Dogger
 - Lias
 - Dévonien
 - Keuper
 - Burmanstein et Muschelkalk
 - Sédiments mésozoïques, indiff. - Jura
- Paléozoïque**
- Sédiments des fossés permio-carbonifères (en forage profond)
 - Soie perméozoïque, indiff.
- Zones de failles**
- Faillie en gîte
 - Déclivement basal (non-croisé)
 - Faillie senestre
 - Faillie dextre
- Forage profond, projeté (avec longueur)**

- Ben Benken
- Bri Birmingen-1
- Bul Bulle-1
- Cha Chapelle-1
- Con Conches-1
- Cur Cuarny-1
- Ecl Ecclens-1
- Ent Entlebuch-1
- Ess Essertines-1
- Fen Fendingen-1
- Her Herzogen-1
- Hün Hünenberg-1
- Kri Kriesslingen-2
- Lid Linden-1
- Lif Linden-1
- Nor Norze-1
- Ob Obtingen
- Pfo Pfaffau-1
- Rin Riehen
- Rom Romens-1
- Rup Ruppoldried-1
- Sch Schönbühl
- Sav Savigny-1
- Sei Sennwald
- StG St. Gallen-1
- StG Schöttlingen-1
- StG St. Gallen-1
- StG Schöttlingen-1
- Thu Thônex-1
- Thu Thun-1
- Tri Trivivogues-1
- Ts Tsamig-Sonnengarten
- Tu Tuggen
- Weg Weggig

Coups géologiques générés à intervalles réguliers dans le modèle 3D
révisés géologiquement et cartographiquement par
C. Salomé Michael et Eva Kurrmann

Echelle 1:100 000

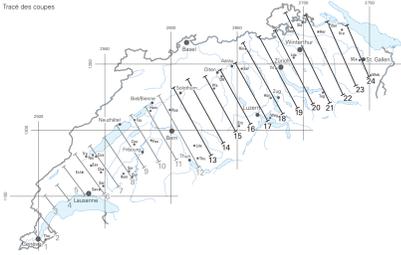


Les cartes et coupes géologiques ont été réalisées à partir du modèle GeoM3. Elles peuvent présenter des différences avec les cartes et coupes géologiques publiées par le Service géologique national (SGN) de la Confédération suisse. Ces différences sont dues à la projection des données géologiques dans le modèle 3D. Les coupes géologiques ont été générées à intervalles réguliers dans le modèle 3D.

Coupes géologiques générées à intervalles réguliers dans le modèle 3D

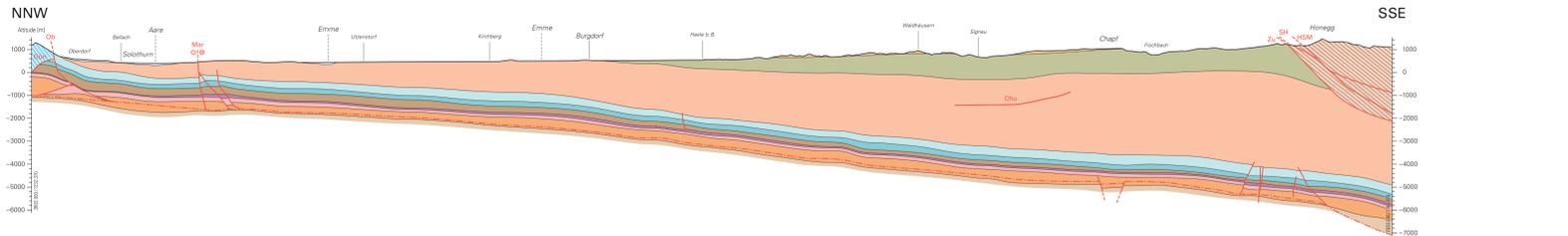
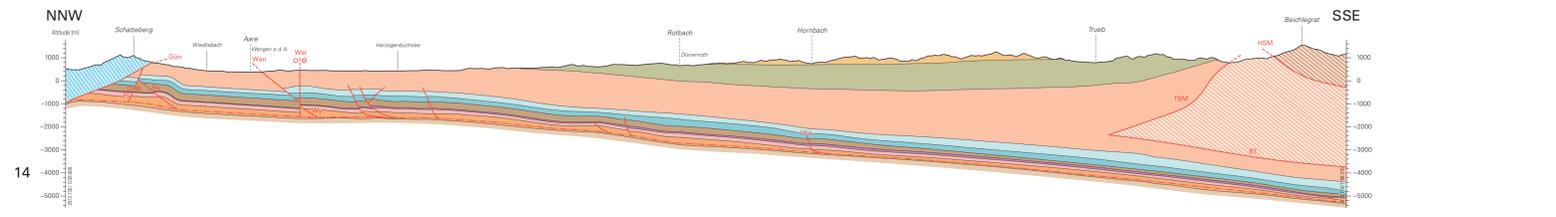
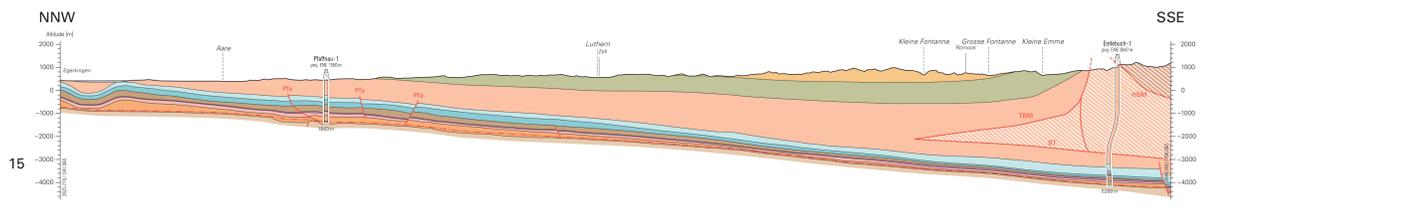
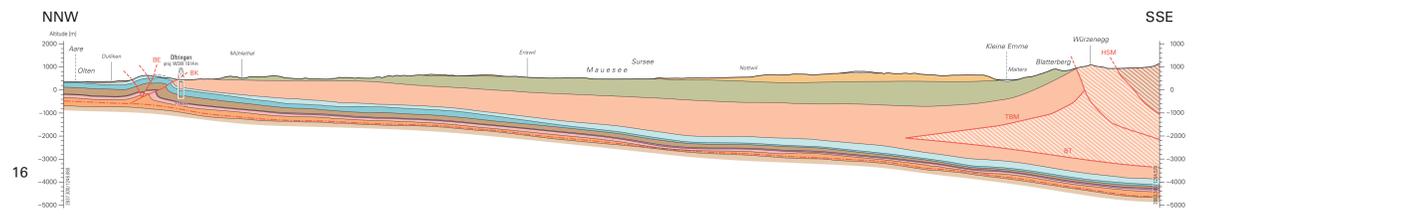
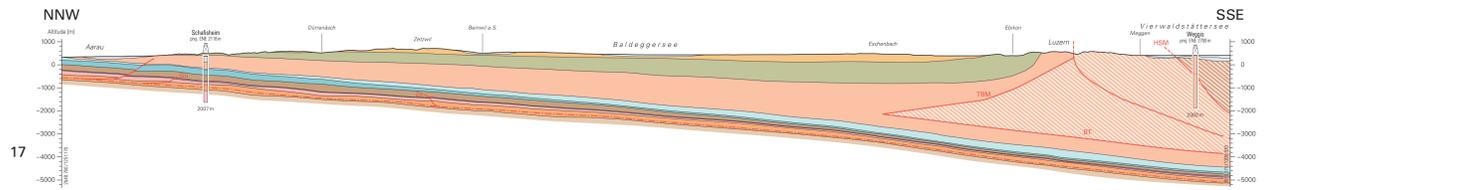
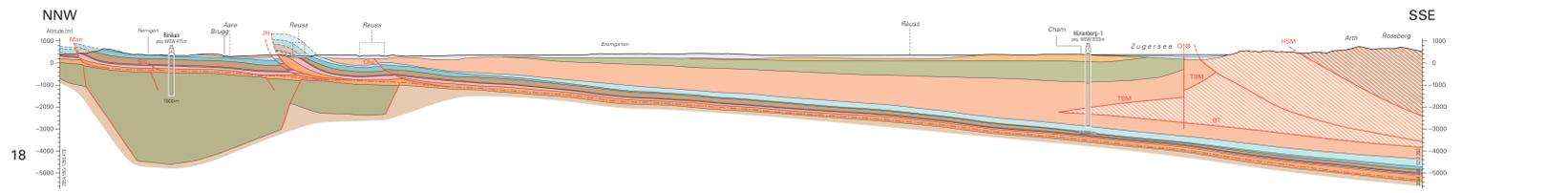
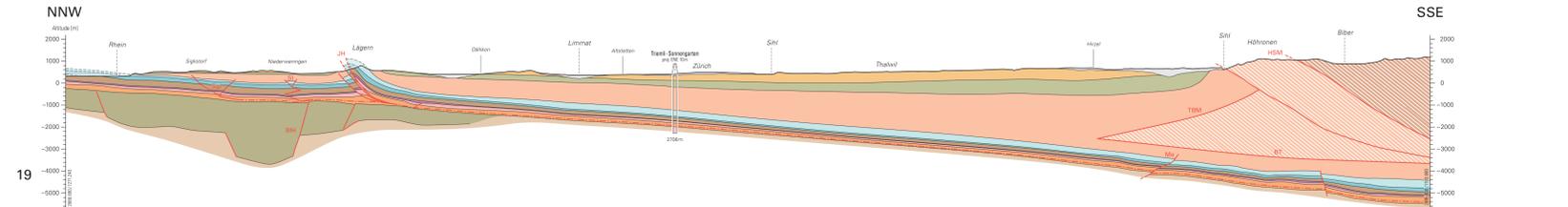
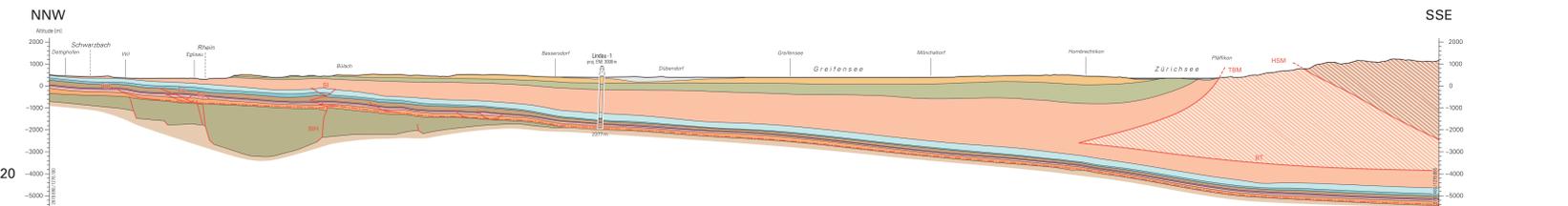
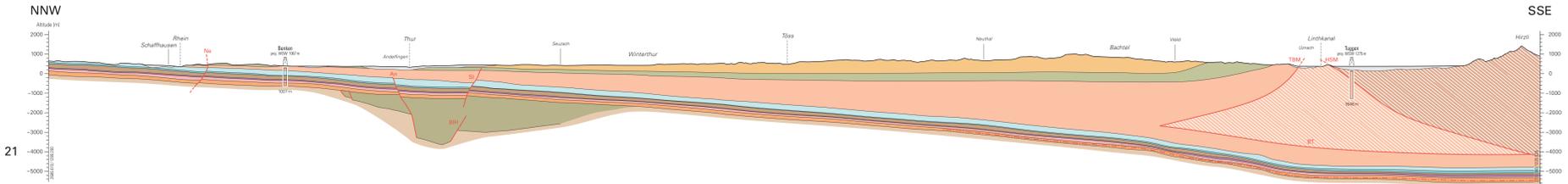
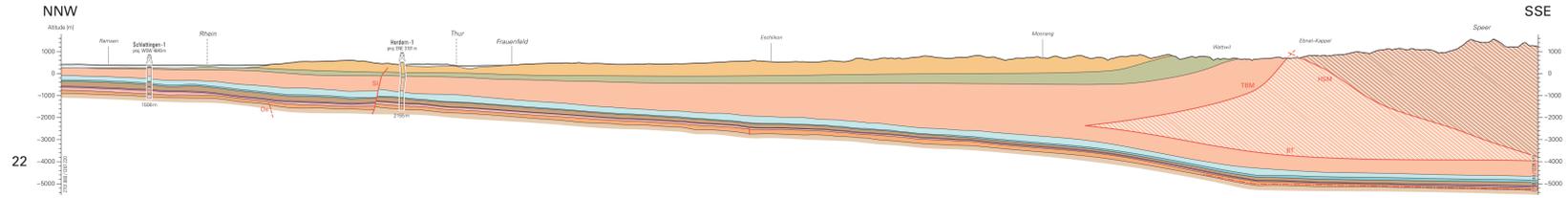
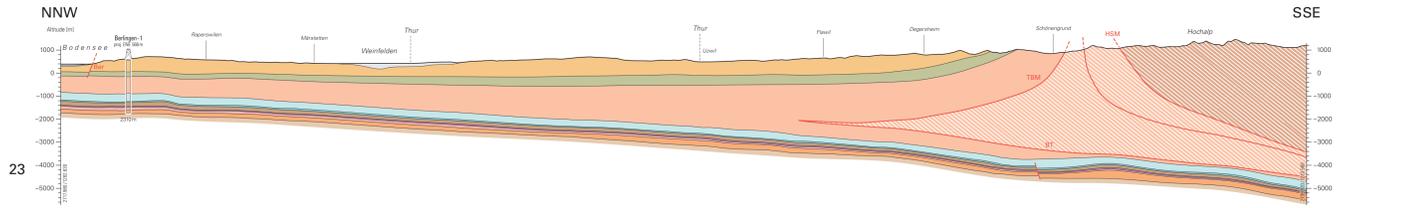
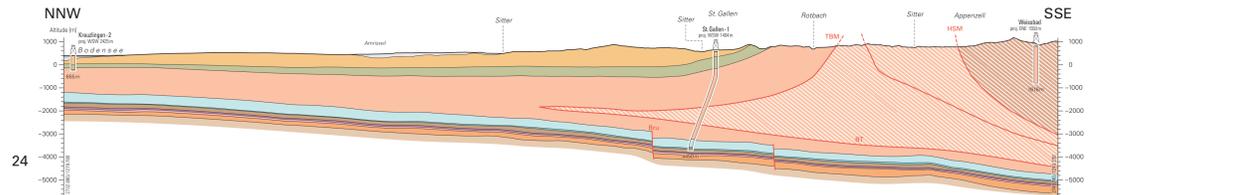
retravaillées géologiquement et cartographiquement par
C. Salomé Michael et Eva Kurrmann

Echelle 1:100 000



● Forage profond

Ben	Berlingen	Pfa	Pflauba-1
Ber	Berlingen-1	Rin	Riniken
Cha	Chapelle-1	Rom	Romanens-1
Cou	Courtopp-1	Rup	Ruppoldsried-1
Qua	Quarroy-1	Saf	Saffolden
Ent	Entlebuch-1	Sav	Savigny-1
Esp	Esplanens-1	San	Sankt Gallen-1
Fen	Fendingen-1	Sch	Schillingen-1
Hem	Herringen-1	Sor	Sorona-1
Her	Herringen-2	Thu	Thun-1
Hün	Hünenberg-1	Thu	Thun-2
Kra	Krauslingen-2	Tre	Treyvogel-1
Lid	Lindau-1	Tsu	Tschuggen-1
Lid	Lindau-2	Tsu	Tschuggen-2
Nor	Noron-1	Tog	Togggen
Ofr	Othringen	Weg	Weggis



Cénozoïque

- Depôts quaternaires en gis.
- Molasse d'eau douce supérieure (DSM)
- Molasse marine supérieure (MSM)
- Molasse marine inférieure (LMM) et Molasse d'eau douce inférieure (LDM)
- Sédiments molassiques, indiff. Zone triangulaire
- Sédiments molassiques, indiff. Zone d'aéclites

Mésozoïque

- Malm supérieur
- Malm inférieur
- Dogger
- Lias
- Bunzlauer- und Muschelkalk
- Sédiments mésozoïques, indiff. Jura

Paléozoïque

- Sédiments des fossés permocarbonifères
- Soie cristalline (en forage profond)
- Soie pré-mésozoïque, indiff.

Forage profond, projeté (avec longueur)

Zones de failles

- Faillite en gis.
- Décollement basal (conceptuel)
- Faillite senestre
- Faillite dextre

AN Andelfingen
Ase Aussenberg
BE Born-Engelberg
Bar Barlingen
BH Baden-Ischal-Hardem
BK Born-Kolliken
Bru Bruggen
BT Chevauchement basal de la zone triangulaire
Cha Chasterenberg
Chu Churtenberg
Eg Eglistraue
Fl Flumental
Gu Guppen
Gün Günzburg
Hob Hombach
Hsb Chevauchement principal de la molasse subalpine
JH Chevauchement principal du Jura
Mar Marthalen
Man Mandach
Men Menzingen
Neb Neuchâten
Ob Oberdorf
Oth Othringen
Pfa Pflauba
Pfla Pflauba
Sgl Siglistorf
SI Stadel-Ischal
Sip Sigristhal
TBM Limite tectonique sud de la molasse du Pfälzerwald
Wal Wallwil
Wen Wengen
Wyn Wynau
Zu Zuzwil
Zug Zug

