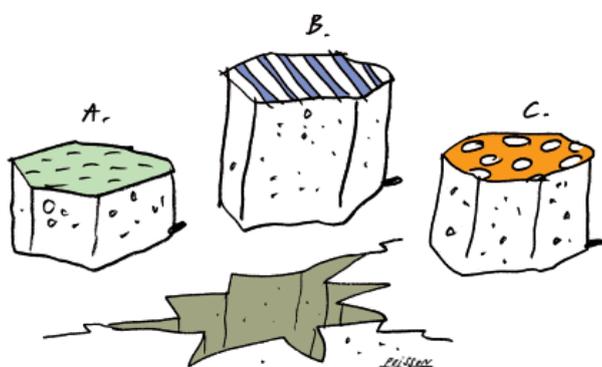


Géotypes, une relecture



La notion de « géotypes » n'est sans doute pas familière à la majorité de nos lecteurs. Il s'agit en effet d'un nouveau mode de classification pour une représentation unifiée des données géologiques à l'échelle d'un territoire. Développée par l'EPFL pour le Canton de Vaud, elle n'a pas été utilisée dans d'autres cantons à ce jour. S'agit-il dès lors d'une terminologie de plus ou juste d'un cas particulier? La démarche mérite pourtant plus d'intérêt qu'un simple haussement d'épaules.

Tout d'abord, la méthode tente de répondre concrètement à des besoins réels et reconnus en matière de données géologiques. A l'heure actuelle, les données existent notamment dans les cartes au 1/25 000^e de l'Atlas géologique de la Suisse. Malheureusement, ces cartes ne couvrent pas la

totalité du territoire helvétique et leur utilisation souffre de la diversité du vocabulaire utilisé au fil du temps pour leurs légendes¹. Si les géotypes ne comblent pas la première carence, notre dossier consacré à l'exemple de leur application sur le territoire vaudois prouve que cette nouvelle classification permet d'obtenir, dans des délais restreints, une vision uniformisée et pertinente de données géologiques à l'échelle d'un territoire.

Ensuite, il faut souligner que les cartes des géotypes ne prétendent en aucun cas remplacer les cartes géologiques, dont l'importance n'est pas remise en cause. En effet, la nouvelle classification s'adresse principalement à des questions d'aménagement du territoire ou de géologie de l'ingénieur, lesquelles ne requièrent en général qu'une exploitation partielle des données géologiques des cartes de l'Atlas. L'utilisation des géotypes pour le microzonage sismique vaudois souligne par ailleurs l'importance et la nécessité d'une interprétation propre au domaine d'application envisagé, une interprétation qui ne peut se faire sans les compétences de géologues expérimentés.

La nouvelle méthode présente encore l'avantage d'exploiter les technologies actuelles en assurant le transfert de données existantes vers des outils modernes (SIG). Elle garantit en outre un suivi de la transcription de données vers des nouveaux modes de représentation.

A nos yeux, c'est ce dernier élément – proposer un nouveau mode de représentation – qui, intellectuellement, présente le plus d'intérêt. En effet, l'utilisation des géotypes n'est finalement rien d'autre que la relecture d'une réalité existante. La fertilité d'une telle démarche n'est plus à prouver, même si elle se heurte naturellement à des réticences.

Jacques Perret

¹ Un projet national portant sur ces deux éléments est actuellement en cours. Cependant, il est à craindre que ses résultats se fassent attendre encore quelques années.

Prévention du **risque sismique** dans le Canton de Vaud

Sans autorisation spéciale préalable de l'Etablissement cantonal d'assurance contre l'incendie et les éléments naturels (ECA), aucun bâtiment localisé en zone de dangers liés aux mouvements de terrain, aux crues ou aux avalanches ne peut être construit, agrandi, transformé ou modifié. L'ECA était tout désigné pour prendre en charge la problématique du risque sismique.

Par la compétence que lui attribue l'Etat de Vaud dans le cadre de la loi sur l'aménagement du territoire et les constructions (LATC), l'ECA joue un rôle déterminant dans le processus de délivrance des permis de construire pour tout objet localisé en zone de dangers naturels. Sachant que la prévention du risque sismique n'est pas liée à des mesures d'aménagement du territoire mais à des mesures constructives devant être imposées lors de la délivrance des permis de construire, l'ECA s'est proposé, dès 2003, de mettre en oeuvre la politique de prévention définie par les recommandations fédérales en la matière [1]¹ et par les normes SIA (2003) [2]. Concrètement, il s'agissait :

- de produire les éléments scientifiques de base nécessaires, à savoir le microzonage sismique ;
- de proposer les modifications légales y relatives ;
- de mettre en place des exigences opérationnelles lors des mises à l'enquête pour demandes de permis de construire.

La cartographie

Compte tenu de l'importance des surfaces à cartographier (plus de 2800 km²), de la complexité géologique du territoire et de la nécessité de mises à jour ultérieures, l'ECA a jugé nécessaire de passer par une étape préliminaire pour la mise en place d'une méthodologie cartographique adaptée aux conditions vaudoises. Cette étude a été confiée au Laboratoire de géologie de l'ingénieur et de l'environnement (GEOLEP) et au Laboratoire de systèmes d'information géographique (LaSIG) de l'EPFL. Certaines options cartographiques de la méthodologie proposée se démarquent clairement de la recommandation fédérale mais préservent les objectifs

de qualité fixés par la Confédération. Il s'agit notamment :

- de procéder à une cartographie en trois étapes permettant un investissement proportionnel à la sensibilité sismique du territoire. Pratiquement, il s'agit de réaliser une cartographie indicative couvrant l'ensemble du canton (étape I), d'identifier les zones à risque potentiel dites « sismiquement sensibles » (étape II), puis de réaliser une cartographie détaillée de ces surfaces (étape III) ;
- de traduire l'ensemble des cartes géologiques au 1/25 000^e du canton en une seule carte homogène, la carte des géotypes, dans le but d'harmoniser l'information géologique de base et ainsi de garantir une meilleure cohérence et capacité de traitement des résultats ;
- d'intégrer d'emblée les systèmes d'information géographique (SIG) comme outil de traitement et d'actualisation dynamique des données.

La méthodologie proposée par l'EPFL a été testée dans le cadre d'une étude pilote sur le secteur de Morges. Les résultats et la performance de cette démarche ont été validés par la Confédération puis ont servi de base pour la préparation du cahier des charges de la cartographie indicative (ou conservative) à l'échelle du canton. A partir de début 2006, cinq bureaux ont travaillé en parallèle avec un suivi et une coordination des laboratoires de l'EPFL. En septembre 2006, la carte conservative des sols de fondation pour l'ensemble du territoire cantonal était achevée (fig. 1), de même que la carte des « géotypes », premier document géologique au 1/25 000^e à couvrir de manière harmonisée l'ensemble du canton (voir fig. 2, pp. 12-13). Une fois validée, la carte a été intégrée au site Internet de géodonnées de la Confédération au printemps 2007.

La deuxième étape du travail a consisté à identifier les zones sismiquement sensibles par croisement entre la carte conservative de microzonage et l'aménagement du territoire, l'objectif étant de ne conserver que les sols « défavorables » déjà construits ou présentant un intérêt notable de protection (construction future). Cette délimitation par croisement a été effectuée par SIG. Il en est ressorti que seul 18 % de la surface du canton nécessite une cartographie de détail

Fig. 1 : Carte indicative des sols de fondation du Canton de Vaud (Document ECA)

(incluant une analyse des données de forage plus conséquente), objet de la troisième étape du projet.

Pour cette dernière étape, un cahier des charges spécifique a été établi et une nouvelle adjudication a eu lieu début 2007. Trois bureaux d'études (dont un consortium) travaillent actuellement en parallèle sur ce projet, là aussi avec un suivi et une coordination de l'EPFL. Cette phase de travail se terminera en automne 2007 et finalisera ainsi, en un temps record, l'établissement des cartes de microzonage pour l'ensemble du Canton de Vaud.

Modification des bases légales

Les modifications légales nécessaires à la prise en compte du risque sismique concernent la valeur légale des normes SIA (260 et suivantes) et l'attribution à l'ECA d'une compétence en matière de prévention du risque sismique lors des demandes de permis de construire. Ces modifications sont en cours et se feront prochainement par des compléments à la LATC ainsi qu'à la loi sur la prévention des incendies et des éléments naturels (LPIEN). Elles permettront ainsi à l'ECA d'exiger, lors des demandes de permis de construire, que le dossier d'enquête comporte un minimum d'informations sur cette thématique, que des calculs parasismiques soient réalisés par un ingénieur qualifié avant le démarrage des travaux de construction et, enfin, qu'une preuve soit apportée de la réalisation adéquate des mesures.

Processus d'exigence

L'ECA travaille actuellement avec le laboratoire d'informatique et de mécanique appliqué à la construction de l'EPFL

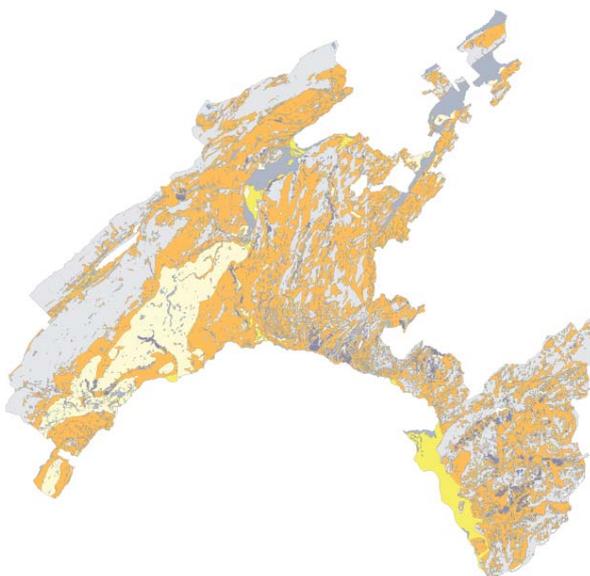
(IMAC) afin de proposer deux modèles de documents (un formulaire et un rapport de synthèse) qui seront les documents de référence pour la bonne prise en compte du risque sismique dans la construction. Le formulaire sera à joindre au dossier d'enquête et permettra, par le biais de questions simples, de savoir si la construction proposée répond aux exigences conceptuelles minimales (forme, refends, etc.); le rapport de synthèse permettra de préciser les calculs parasismiques, la définition des mesures et le contrôle de leur mise en oeuvre. Le contenu des documents et le fonctionnement complet de ce processus feront l'objet d'un document spécifique « Prescriptions ECA en matière de délivrance des autorisations spéciales et de suivi de projet pour la construction parasismique » disponible sur le site Internet de l'ECA (<www.eca-vaud.ch>) d'ici début 2008.

Un bilan positif

La démarche adoptée par le Canton de Vaud pour l'établissement des cartes de microzonage sismique a permis une collaboration scientifique et technique étroite entre l'ECA, l'EPFL, les bureaux d'études et la Confédération. La carte conservatrice a pu être réalisée de manière homogène sur l'ensemble du canton par différents mandataires et selon un processus transparent et reproductible. L'approche cartographique en trois étapes s'est avérée optimale sur les plans opérationnels et économiques: elle a notamment permis de concentrer l'investissement financier sur les surfaces sensibles du territoire. Enfin, la structuration rigoureuse, sous SIG, des différentes données liées à ce projet permet une consultation facile des documents intermédiaires et de retracer les processus d'attribution en classes de sol de fondation (traçabilité) facilitant ainsi toute future mise à jour.

En plus de positionner l'ECA comme organe compétent lors de la délivrance des permis de construire, les modifications légales et la définition d'un processus d'exigence permettront quant à eux de préciser clairement le rôle et les responsabilités de chacun. La prise en compte du risque sismique dans la construction devrait être opérationnelle dans le Canton de Vaud d'ici 2008.

Marc-Olivier Burdet, Jean-Marc Lance
ECA, Avenue du Général-Guisan 56, CH-1009 Pully



1

Bibliographie

- [1] OFEG (2004): « Principe pour l'établissement et l'utilisation d'études de microzonage en Suisse ». Directives de l'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Berne, 2004
- [2] SIA (2003): Norme suisse SN 505 261, « Actions sur les structures porteuses ». Ed. SIA, Zurich

Les géotypes, pour une représentation géologique du territoire

Les cartes géologiques fournissent des informations de qualité mais parfois difficiles à exploiter par des non spécialistes, surtout à l'échelle de tout un canton. Une méthode basée sur la notion de géotype offre une nouvelle représentation plus synthétique des données géologiques à même de répondre à divers usages en matière de gestion du territoire.

La cartographie géologique est une base indispensable de toute entité géographique puisqu'elle constitue le document scientifique fondamental qui décrit la « géodiversité » du territoire. Ceci comprend d'une part la composition du sous-sol et la géométrie de ses corps géologiques et d'autre part, indirectement, l'histoire de l'évolution d'un pays depuis des temps reculés, ses paléogéographies et paléopaysages et les processus qui transforment la géosphère (érosions, dépôts, etc.). Cette connaissance scientifique très riche (cartes, publications ou travaux de diplômes non publiés) est en outre nécessaire pour des questions pratiques comme :

- la conception des fondations d'ouvrages du génie civil,
- la gestion des ressources (eau, hydrocarbures, minerais, géomatériaux),
- la gestion des risques géologiques (sismologiques, volcaniques, glissements de terrain, etc.),
- la protection de l'environnement (eaux de boisson, sites contaminés).

La transition de l'information scientifique pure vers les domaines d'application n'est toutefois pas facile, chacun des domaines possédant des besoins spécifiques nécessitant une conversion de l'information géologique de base. La méthode des géotypes cherche à codifier ce processus de conversion.

Méthode des géotypes

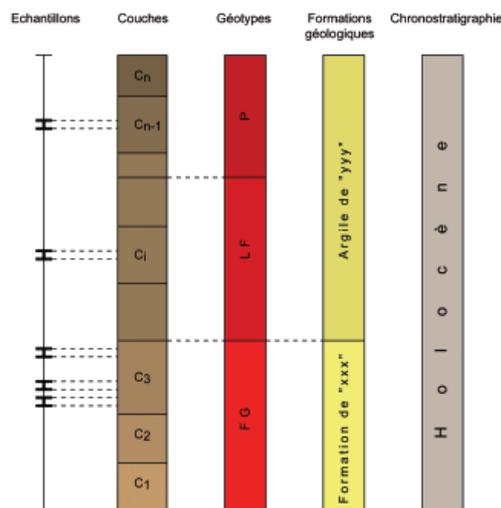
Cette méthode résulte en particulier de deux types de difficultés rencontrés lors de l'usage de l'information géologique, comme les cartes de l'Atlas géologique de la Suisse ou des cartes similaires dans d'autres pays :

- les cartes géologiques ont longtemps décrit les terrains sur la base de critères chronostratigraphiques (par ex. Molasse

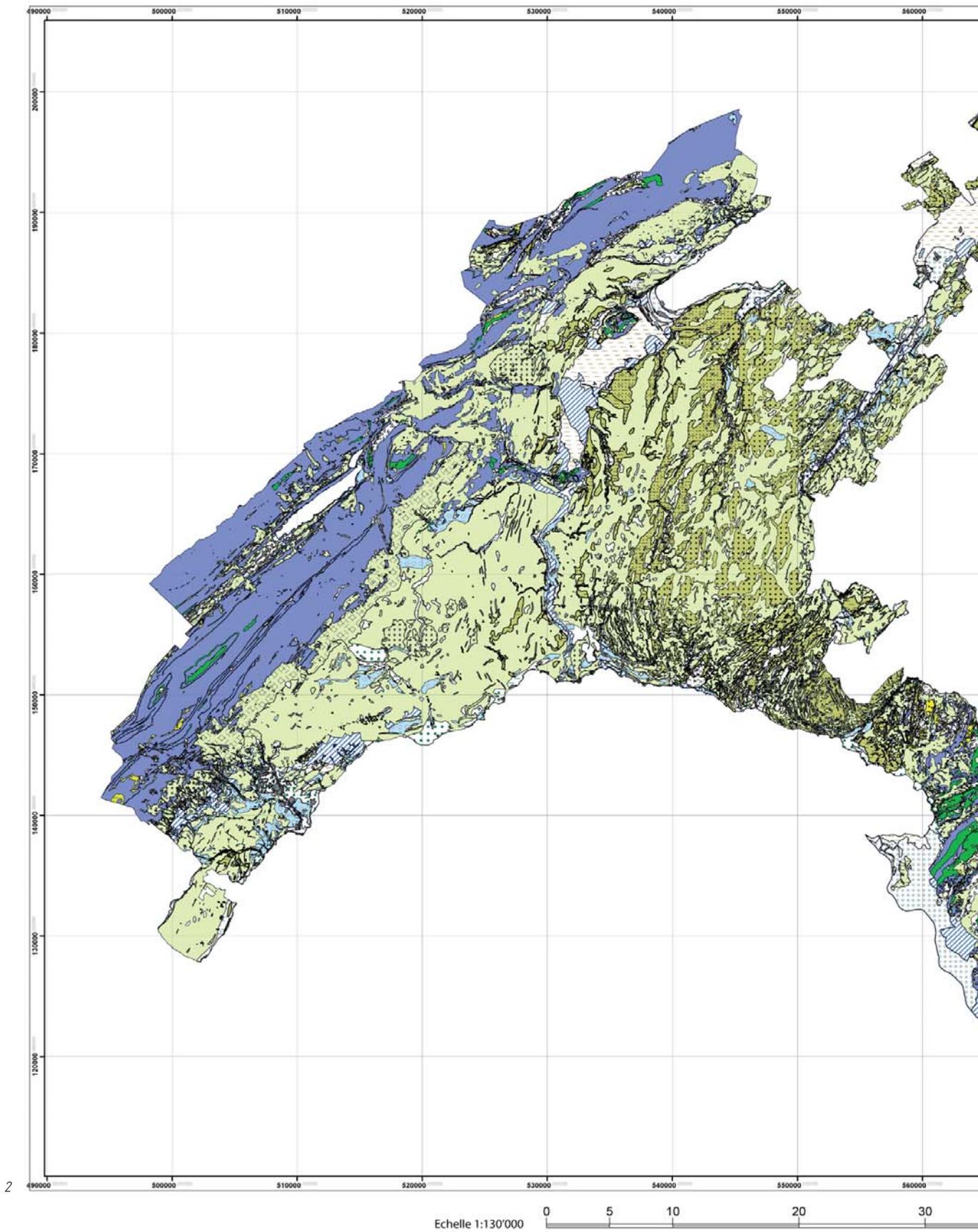
aquitaine). Bien que ce système ait été abandonné au profit d'une cartographie lithostratigraphique décrivant des formations (par ex. « Molasse grise de Lausanne », qui remplace l'étiquette « Aquitainien » [1]¹), de nombreuses cartes n'existent que dans l'ancien système. Leurs auteurs distinguent logiquement des terrains génétiquement semblables selon qu'ils appartiennent à telle ou telle époque (par ex. Moraine würmienne et Moraine rissienne), ou qu'ils sont de nature pétrographique un peu différente (par ex. Moraine de fond rhodanienne et Moraine de fond jurassienne). Cette conception cartographique n'est pas à remettre en cause sur le plan fondamental, mais, pour certains besoins touchant à la gestion territoriale, seule une partie de cette description est nécessaire ;

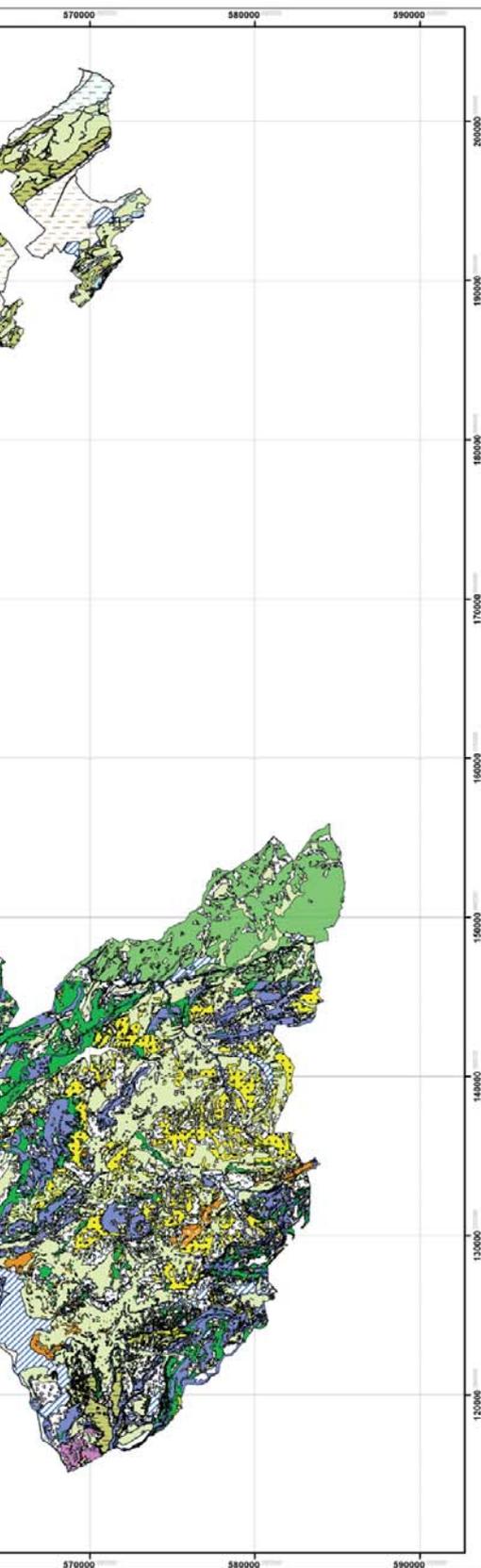
- les cartes géologiques ont été établies à des époques correspondant à des connaissances scientifiques bien différentes, par des auteurs ayant leur propre vision des processus géologiques, une sensibilité différente dans la manière de lever les cartes et des modes d'appellation variables de certains terrains (par ex. « moraine de fond » et « argile à blocs » correspondent en réalité au même type de dépôt).

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie placée en fin d'article.



CARTE DES GÉOTYPES DU CANTON DE VAUD 1 / 130 000^E





Surface cartographiée: 2820 km²
(Surface totale du canton: 3212 km²)

Assemblage des feuilles de l'Atlas national de la Suisse au 1:25'000 : 1163, 1164, 1165, 1182, 1183, 1184, 1185, 1201, 1202, 1203, 1204, 1221, 1222, 1223, 1224, 1240, 1241, 1242, 1243, 1244, 1245, 1260, 1261, 1264, 1265, 1281, 1284, 1285, 1304, 1305

Légende

Géotypes

Code	Surface [%]		Surface [%]
Remblais artificiels (R)	0.6	Conglomérat avec quelques marnes (COM)	0.7
Colluvions, eluvions (CE)	0.9	Grès (GR)	3.7
Eboulis, éboulements, écroulements (E)	4.2	Grès avec quelques marnes (GRM)	3.3
Terrain glissé, affaissé (GT)	2.0	Marnes avec quelques grès (MGR)	3.0
Tuf (T)	0.1	Alternances grès-schistes argileux (GS)	2.0
Alluvions de plaines actuelles (APA)	2.4	Argilite (A)	0.0
Alluvions de plaines en terrasses (APT)	0.1	Marne (M)	0.5
Alluvions en cônes actuelles (ACA)	3.4	Alternances marnes-calcaires (MC)	2.6
Alluvions en cônes en terrasses (ACT)	0.0	Calcaire (C)	16.9
Dépôts lacustres de delta (LD)	1.0	Calcaire siliceux (CS)	0.4
Dépôts lacustres de fond (LF)	0.7	Calcaire argileux (CA)	0.1
Craie lacustre (CRL)	0.0	Calcaire dolomitique (CD)	0.1
Dépôts palustres (P)	3.9	Dolomie (D)	0.0
Moraines superficielles (MS)	0.1	Gypse (G)	0.2
Moraines frontales (MFR)	1.9	Cornieule (CO)	0.1
Moraines latérales (MLAT)	3.5	Anhydrite (AN)	0.0
Moraines de fond (MF)	36.9	Roche salifère (RS)	0.0
Moraines aquatiques (MA)	0.1	Quartzite (Q)	0.0
Dépôts fluvio-glaciaires (FG)	1.9	Gneiss (GN)	0.1
Dépôts glacio-lacustres (GL)	0.4	Granite (GA)	0.0
Loess (LO)	0.0	Roche indéterminée (RO)	2.0
		Autres (glacier, étang)	0.2

Cadre du mandat : Prise en compte des conditions géologiques locales pour l'établissement des cartes de microzonage sismique

Mandat : Etablissement des cartes de sols de fondation sur le territoire du Canton de Vaud

Niveau d'étude : Indicatif, 1:25'000 (cartes conservatives)

Mandant, coordination administrative: Etablissement Cantonal d'Assurance contre l'incendie et les éléments naturels du canton de Vaud (ECA-VD)

Développement méthodologique et suivi des travaux liés à la géologie, coordination scientifique: Laboratoire de géologie de l'ingénieur et de l'environnement de l'EPFL (GEOLEP)

Développement méthodologique et suivi des travaux liés aux SIG: Laboratoire de systèmes d'information géographique de l'EPFL (LaSIG)

Mandataires: ABA-GEOL SA, CSD Ingénieurs Conseils SA, Groupement GEOLOSANNE, GEOTEST SA, MARIC-Marcuard Ingénieurs Conseils

Documentation cartographique et cadastrale cantonale, données géologiques cantonales: Etat de Vaud, Office de l'information sur le territoire (OIT-Vaud)

Documentation cartographique fédérale, données géologiques: Swisstopo

Document : CC-SDF-070327
REF. GEOLEP : Etude 0402

Version du : 27.03.2007
Impression / visa : 27.03.2007 / GEOLEP-PTG, EW

Fig. 1 : Les différentes échelles de la caractérisation du milieu géologique

Fig. 2 : Carte des géotypes du Canton de Vaud. Assemblage des 25 feuilles au 1/25 000^e

Fig. 3 : Dépôt fluvioglaciaire avec extension horizontale des strates géotype « Fluvioglaciaire » (Photo GEOLEP, A. Perriaux)

Dans le cadre d'un mandat pour la cartographie des dangers dans le Canton de Vaud [2], le Laboratoire de géologie de l'ingénieur et de l'environnement de l'EPFL (GEOLEP) a réfléchi aux moyens de gérer une telle diversité à l'échelle d'un grand canton – 25 feuilles au 1/25 000^e avec des formations allant du Mésozoïque du Jura au Cristallin alpin en passant par les dépôts quaternaires du Plateau –, sachant que la difficulté pourrait conduire un bureau d'études à renoncer à utiliser l'information géologique pour privilégier des approches purement morphologiques. Ces réflexions ont conduit à la création d'une classification géologique simplifiée caractérisant de manière homogène et cohérente toute la superficie du canton : les « géotypes ».

Les descripteurs du sous-sol

Les descripteurs existants du sous-sol appartiennent soit à la géologie (pétrographie, sédimentologie, lithostratigraphie, chronostratigraphie, tectonique), soit à la géotechnique (paramètres de comportement mécanique). Ils peuvent caractériser différents volumes : un échantillon, une couche – pour les sédiments – ou une formation géologique (fig 1).

La caractérisation d'un échantillon se fait en laboratoire. Celle d'une couche comprend des observations sur carottes ou affleurements, complétées par les données des échantillons. La caractérisation à l'échelle de la formation intègre les données des couches. Selon la définition du Comité suisse de stratigraphie [1], « une formation est un ensemble rocheux qui se différencie des formations encadrantes par des caractères lithologiques déterminés et/ou des discontinuités ou transitions cartographiables »². Les formations sont généralement liées à une région-type dans laquelle la coupe-type est définie. Elles sont rattachées à une durée de l'histoire géologique fixée par une caractérisation chronostratigraphique. Pour la géologie appliquée, elles ne sont pas toujours explicites au point de vue des propriétés principales des terrains qui la composent et elles intègrent parfois l'information sur de grandes épaisseurs.

Les géotypes se placent entre l'échelle de la couche et celle de la formation géologique (fig. 1). Les critères d'agrégation sont la parenté génétique pour les terrains meubles (par ex. « fluvioglaciaire »), la parenté lithologique pour les roches (par ex. « marnes avec quelques grès »). Les géotypes ne sont donc pas dépendants d'une définition locale et peuvent être utilisés dans toute une région. Ils n'ont pas non plus de lien avec une époque géologique : on peut avoir plusieurs fois le même géotype dans un profil.

² Le concept « ensemble rocheux » s'applique aussi aux terrains meubles.

Pour la gestion du territoire ou la géologie de l'ingénieur, les besoins correspondent à des agrégations selon la notion de géotype. Ceci peut s'opérer dans différents cadres géographiques :

- au niveau national, pour décrire les grands ensembles lithologiques (par ex. pour la représentation du risque d'effondrement karstique ou les grands aquifères producteurs d'eau potable);
- au niveau régional ou local, pour les besoins de gestion de ressources et de risques géologiques.

En revanche, à l'instar des caractéristiques issues des essais en laboratoire (granulométries, limites d'Atterberg, etc.), les descriptions géologiques détaillées des terrains meubles, comme par ex. celle des codes de lithofaciès [3], sont liées aux échantillons. Si une telle analyse est indispensable pour concevoir et dimensionner la fondation d'un immeuble, l'information synthétique dont on a besoin pour l'aménagement du territoire correspond plutôt à l'identification des divers groupements de terrains qui constituent le sous-sol.

Principe et définition des géotypes

Les géotypes ont été créés pour répondre à ce besoin. Il s'agit d'un nombre restreint de grands groupements typiques auxquels peuvent se rapporter les différents terrains rencontrés dans la nature et sur les cartes géologiques. Il y a lieu ici de distinguer les géotypes des terrains rocheux et ceux de la couverture meuble.

Géotypes des terrains rocheux

Le descriptif pétrographique est ici déterminant : la nature des minéraux constitutifs contrôlent la plupart des propriétés mécaniques de la matrice rocheuse (par ex. la silice d'un



Tab. A : Catégorisation et définition des 20 géotypes rocheux considérés pour la cartographie du territoire vaudois

Fig. 4 : Dépôt deltaïque avec strates fortement inclinées mais régulières, géotype « Lacustre de delta »

Fig. 5 : Dépôt dans une moraine frontale avec strates très discontinues et basculées par la tectonique glaciaire, géotype « Moraine frontale » (Photos GEOLEP, A. Parriaux)

Ensemble	Groupe	Géotype	Code	Définition
Roches	R. détritiques	Conglomérats avec quelques marnes	COM	Présence importante de bancs conglomératiques dans les cyclothèmes deltaïques. Correspond à certaines écailles de la molasse subalpine et à la série supérieure de l'OMM (hors canton de Vaud)
		Grès	GR	Séries essentiellement gréseuses. Correspond souvent à la molasse dite burdigalienne (OMM inférieure)
		Grès avec quelques marnes	GRM	Séries à dominante gréseuse avec encore des séquences marneuses importantes. Correspond souvent à la molasse dite aquitanaise (USM supérieure)
		Marnes avec quelques grès	MGR	Séries à dominante marneuse. Correspond souvent à la molasse dite chattienne (USM inférieure) et peut contenir du gypse
		Alternance grès – schistes argileux	GS	Principalement faciès schisto-gréseux du flysch
		Argilite	A	Séries à dominante argileuse. Comprend principalement les argiles à Opalinus du Jura et l'Aalénien de l'Helvétique
	R. marno-calcaires	Marnes	M	Séries à dominante marneuse pratiquement dépourvue de calcaires. Comprend les marnes de Hauterive du Jura, diverses séries marneuses de l'Helvétique s.l. et de la Nappe des Préalpes médianes
		Alternance marnes – calcaires	MC	Comprend les couches d'Effingen dans l'Argovien du Jura et de nombreuses séries de l'Helvétique s.l. et de la Nappe des Préalpes médianes
	R. carbonatées	Calcaires	C	Séries calcaires pratiquement dépourvues de marnes. Comprend le Jurassique supérieur du Jura et les calcaires massifs de l'Helvétique s.l. et de la Nappe des Préalpes médianes
		Calcaire siliceux	CS	Calcaires à imprégnation diffuse de silice ou à silex. Comprend le Lias de la Nappe des Préalpes médianes plastique
		Calcaire argileux	CA	Série à dominante calcaire contenant une part importante d'argile. Comprend les couches de Birmensdorf du Jura
		Calcaire dolomitique	CD	Séries à dominante de calcaires dolomitiques. Essentiellement Trias alpin
		Dolomie	D	Séries à dominante de dolomies. Essentiellement Trias alpin
	R. évaporitiques	Gypse	G	Séries à dominante de gypse. Essentiellement Trias alpin, à des profondeurs inférieures à 100 m
		Cornieule	CO	Brèche vacuolaire dans le Trias alpin, souvent dans les zones de contacts tectoniques
		Anhydrite	AN	Séries à dominante d'anhydrite. Essentiellement Trias alpin, à des profondeurs supérieures à quelques décimètres
		Roche salifère	RS	Roche à halite du Trias ultra-helvétique de la région de Bex
	R. métamorphique	Quartzite	Q	Roche holoquartziteuse très dure, parfois arénisée, du Trias alpin
		Gneiss	GN	Roche quartzofelspathique à micas, fortement anisotrope. Présente dans les massifs cristallins alpins
	R. magmatique	Granite	GRA	Roche quartzofelspathique à micas, isotrope. Présente dans les massifs cristallins alpins

A



4



5

Tab. B : Catégorisation et définition des 21 géotypes de terrains meubles considérés pour la cartographie du territoire vaudois

Ensemble	Groupe	Géotype	Code	Définition
Anthropique		Remblai artificiel	R	Débris mis en place par l'homme. Nature très variable allant de matériel d'excavation aux ordures ménagères. Propriétés techniques généralement très mauvaises. Les remblais peuvent contenir des substances dangereuses
Dépôts de versants		Colluvions / éluvions	CE	Débris de pente emportés par le ruissellement diffus sur les talus (colluvions) ou formations résiduelles dérivées d'autres terrains complètement altérés (éluvions). Terrains de couverture peu structurés, meubles, à dominante granulométrique sable et limon. Présence de matière organique
		Eboulis, éboulements, écroulements	E	Amas de blocs de taille décimétrique à métrique accumulés en voiles ou en cônes au pied des falaises de roche cohérente. Taille supérieures pour éboulements et écroulements
		Terrain glissé ou affaissé	GT	Terrain se déplaçant en masse ou s'étant déplacé sous l'effet de la gravité. Selon les applications, ce géotype est remplacé par celui du terrain qui est affecté par le glissement
		Tuf	T	Précipité de carbonate de calcium au droit des sources à eau bicarbonatée calcique. Géotype à n'utiliser qu'au droit des sources et non sur les encroûtements rencontrés dans les cours d'eau en aval de la source
Dépôts alluviaux s.l.	Alluvions de plaines	actuelles	APA	Dépôts fluviatiles généralement grossiers, chenalisés, créés par la divagation d'une rivière. Gravier bien roulés
		en terrasses	APT	Idem mais se trouve perché en terrasses suite à l'érosion par la rivière
	Alluvions en cônes	actuelles	ACA	Dépôt de matériel grossier mais très hétérométrique, stratification plus erratique, faible arrondi. En général en cônes de déjection. Comprend les sédiments des laves torrentielles
en terrasses		ACT	Idem mais se trouve perché en terrasse suite à l'érosion par la rivière	
	Dépôts lacustres	Delta	LD	Sédiments correspondant aux dépôts grossiers d'embouchure, groupant les topset et foreset beds. Comprend les deltas actuels et les deltas anciens aujourd'hui souvent perchés
		de fond	LF	Sédiments de fosse lacustre de granulométrie limon – argile – sable fin en fines laminations qui correspondent au bottomset beds. Faiblement à moyennement consolidés
		Craie lacustre	CRL	Dépôt très meuble de fines particules de carbonate de calcium d'origine principalement biogénique
		Dépôts palustres	P	Formations de marais riches en matière organique : tourbes, gyttja
Dépôts glaciaires s.l.	Moraines	Superficielles	MS	Débris anciennement à la surface du glacier, déposés au toit de la moraine. Blocs épars en horizon très discontinu
		Frontales	MFR	Croissant de débris formé au front de la langue glaciaire, soumis à un fort délavage par les eaux du torrent. Gravier à blocs avec sédimentation fortement perturbée par la tectonique glaciaire
		Latérales	MLAT	Crête de débris, moins fortement lavés que ceux de la moraine frontale
		De fond	MF	Coussin de débris à la base du glacier. Terrain très hétérogranulaire, non stratifié, fortement surconsolidé. Les éléments grossiers sont imbriqués dans la matrice fine (matrix supported textures)
		aquatique	MA	Dépôt de granulométrie fine, riche en argile, sans stratification, peu consolidé. Les galets morainiques sont rares
	Périglacière	Fluvioglaciaire	FG	Alluvions grossières à stratification parfois perturbée par des affaissements dus à la glace morte. Eléments moins arrondis et moins ségrégués au point de vue de leur résistance à l'usure que dans les dépôts fluviatiles
		Glaciolacustre	GL	Alternance de limons et d'argiles en fines laminations similaires au lacustre de fond mais avec présence de galets épars (dropstones). Peuvent être parfois fortement surconsolidés
		Loess	LO	Limons et sables fins quartzeux d'origine éolienne

B

calcaire siliceux) ou le type de phénomènes d'altération déterminant (par ex. la karstification). Pour une composition pétrographique, le géologue peut déduire un grand nombre de qualités ou défauts pour les usages potentiels de la roche (géomatériaux, fondations, hydrogéologie, etc.).

Pour le Canton de Vaud, 20 géotypes rocheux ont été définis (tab. A). Peu de place est donné au Cristallin compte tenu de sa faible présence (Massif des Aiguilles rouges à Lavey), mais la liste peut être complétée pour un autre canton ou une autre région.

Géotypes des terrains meubles

L'exercice a été plus difficile vu la diversité des dépôts quaternaires dans nos régions. En effet, il est a priori tentant de se limiter à une représentation du territoire sur la base de caractéristiques de composition (par ex. les régions graveleuses ou argileuses) ou de cartographier directement un critère géotechnique tel le code USCS (par ex. régions à sols ML, etc.).

Si elle semble séduisante, une telle démarche conduit à l'échec car elle n'intègre aucune information sédimentologique; cette difficulté se présente concrètement lorsqu'il est question de représenter le type de structure du dépôt: un gravier bien trié de code GW n'aura pas du tout la même structure selon qu'il correspond aux *foresets beds* d'un delta (stratifications fortement obliques) ou à un dépôt fluvial avec ses sédiments chenalisés. De même, les relations géométriques entre deux ensembles dépendent plus de leur origine sédimentologique que de leurs propriétés géotechniques. Ces deux problématiques se rencontrent couramment en géologie de l'ingénieur, notamment lorsque l'on veut interpoler entre des profils de sondages. Les figures 3 à 5 illustrent la distinction par les géotypes de trois dépôts de gravier, de granulométrie similaire, où le milieu de formation contrôle très différemment la structure géométrique des couches, agissant directement sur la façon d'interpoler les informations entre deux sondages dans des graviers.

La solution choisie est une typologie basée sur les conditions génétiques de la formation. Même si elle ne donne pas d'information directe sur la nature du terrain, elle donne beaucoup d'indications indirectes sur sa composition, sa texture, sa structure, la continuité des dépôts, etc. Par exemple, le géotype « fluvio-glaciaire » décrit des terrains faits de sables et graviers, dont la stratification est irrégulière et dont les éléments sont peu arrondis. Ce choix génétique est le même que celui que nous avons fait pour la classification géologique simplifiée pour les ingénieurs [4], classification reprise en partie par l'Union des professionnels suisse de la route [5].

Les terrains meubles du Canton de Vaud peuvent se répartir en 21 géotypes (tab. B).

Limites et potentiel des géotypes

Il est important de spécifier que la classification en géotypes ne remplace pas la classification complète et détaillée des formations géologiques, notamment celles de l'Atlas géologique de la Suisse. De même, les cartes de géotypes ne remplacent pas les cartes géologiques. Ces dernières restent la base scientifique fondamentale de référence. Il est donc indispensable de poursuivre et même d'intensifier l'effort de

levé de telles cartes. Sans cette couverture, il sera difficile d'intégrer la connaissance géologique dans l'aménagement du territoire. La carte des géotypes permet de traduire cette information scientifique sous une forme plus synthétique répondant plus directement à des besoins ciblés de la géologie appliquée.

La méthode des géotypes a démontré qu'elle permettait d'homogénéiser, en le simplifiant, le mode de description géologique du territoire et donc de faciliter la valorisation de cette information pour différents usages (voir encadré p. 22). Elle se prête, de plus, à une utilisation optimale des fonctionnalités de requêtes des SIG et garantit la traçabilité de la démarche, facilitant ainsi les révisions. La grande diversité géologique du Canton de Vaud (fig. 2) a validé la capacité d'adaptation de cette méthode à d'autres régions, quel que soit leur contexte géologique.

La méthode des géotypes présente un potentiel d'application à d'autres représentations du territoire où le sous-sol joue un rôle important: les recherches en cours sur le potentiel ressource du sous-sol urbain [6] confirment la capacité de cette méthode à faciliter la représentation tridimensionnelle du sous-sol, enjeu des années à venir.

Aurèle Parriaux, prof. dr géologue
Pascal Turberg, dr géologue
GEOLEP – Laboratoire de géologie de l'ingénieur
et de l'environnement
EPFL, Ecublens, CH – 1015 Lausanne

Bibliographie

- [1] REMANE J., ADATTE T., BERGER J. P., BURKHALTER R., DALL'AGNOLO S., DECROUZÉ D., FISCHER H., FUNK H., FURRER H., GRAF H. R., GOUFFON, Y., HECKENDORN W., WINKLER W. (2005): « Directives pour la nomenclature stratigraphique », Comité suisse de stratigraphie, *Eclogae geol. Helv.* 98 385-405
- [2] CADANAV (2002): « Projet CADANAV. Etablissement d'une méthodologie de mise en œuvre des Cartes de Dangers Naturels du Canton de Vaud ». Collectif EPFL: HYDRAM, LMS, LMR, GEOLEP, LASIG, SLF, WSL. Rapport final, 31 Octobre 2002. Non publié
- [3] KELLER B. (1996): Lithofacies-Codes für die Klassifikation von Lockergesteinen, « Publications de la Société suisse de mécanique des sols et des roches », Réunion de printemps, 12 avril 1996, no 132
- [4] DYSLI, M., FONTANA, A., PARRIAUX, A., SCHLÜCHTER, CH. (1990): « Une classification géologique des sols suisses ». *Route et trafic*, 1/90
- [5] VSS (1995): « Norme Suisse SN 670 009. Terminologie géologique des terrains meubles ». Union des professionnels suisses de la route (VSS), 30 mars 1995
- [6] BLUNIER P., MAIRE P., PARRIAUX A., TACHER L. (2006): « Deep City: ressources du sous-sol urbain ». *TRACÉS* n° 05, 15 mars 2006, pp. 6-9

La méthode des géotypes pour le **microzonage** sismique

A la demande de l'Etablissement d'assurance contre l'incendie et les éléments naturels du canton de Vaud (ECA), une méthodologie utilisant la classification par géotypes a été appliquée pour réaliser rapidement la carte indicative du danger sismique pour les 25 feuilles du canton [1]¹.

La démarche utilisée s'est axée sur la traçabilité, c'est-à-dire que l'affiliation d'une formation à une classe de sol se fait toujours à partir de critères prédéfinis. Le travail de rédaction des feuilles peut alors être effectué par différents bureaux privés de géologues-conseils sans crainte d'être biaisé par des éléments subjectifs. Il s'agit de la première application totalement opérationnelle des géotypes pour passer de l'échelle régionale à l'échelle locale.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie placée en fin d'article.

Rappelons d'abord que l'établissement de la carte des sols de fondation pour le microzonage consiste à attribuer aux terrains servant de fondation aux constructions une des six classes de sol (tab. A) définies par la norme SIA 261 [2], ces classes fixant ensuite leur vulnérabilité aux effets de site.

Problématique

Au contraire des directives fédérales en la matière qui procèdent en une seule étape, une première carte dite conservatrice, de niveau indicatif, a été dressée sur l'entier du territoire au 1/25 000^e. Dans une seconde étape, des cartes de danger au 1/5000^e sont établies sur les régions d'intérêt en fonction de l'occupation du territoire.

La carte conservatrice a été établie sur la base d'un investissement financier réduit. Il s'agissait davantage de mettre l'accent sur les zones à risques devant être traitées lors de la seconde étape. Il s'agissait de traduire l'information des cartes

Classe de sol de fondation	Description
A	Roches dures (p.ex. granite, gneiss, quartzite, calcaire siliceux, calcaire) ou roches tendres (p.ex. grès, conglomérats, marne du Jura) sous une couverture maximale de 5 m de sol lâche
B	Dépôts de graviers grossiers et sables cimentés et/ou roches meubles surconsolidées d'une épaisseur de plus de 30 m
C	Dépôts de graviers et sables normalement consolidés et non cimentés et/ou matériau morainique, d'une épaisseur de plus de 30 m
D	Dépôts de sables fins, silts ou argiles non consolidés, d'une épaisseur de plus de 30 m
E	Couche alluviale superficielle des classes de sols de fondation C ou D d'une épaisseur comprise entre 5 et 30 m, surmontant une couche plus rigide des classes de sols de fondation A ou B
F1	Structures sensibles et dépôts organiques (p.ex. : tourbes, craie lacustre) d'une épaisseur supérieure à 10 m
F2	Glissements de terrain actifs ou susceptibles d'être réactivés

Fig. 1 : Démarche d'établissement de la carte conservatrice des sols de fondation comprenant en particulier l'utilisation des géotypes

géologiques en classes de sol le plus simplement possible, en limitant fortement les investigations complémentaires à la carte (sondages, géophysique, etc.). Les bureaux impliqués dans cette étape ont été choisis en fonction de leur connaissance de la région afin de bénéficier de leur expérience.

Le Canton de Vaud a la chance d'avoir pratiquement la totalité de son territoire cartographié (Atlas géologique de la Suisse au 1/25 000^e). Cependant, ces cartes sont d'époques et de précision très différentes. Les appellations géologiques d'une formation donnée varient souvent d'une carte à l'autre. L'assemblage de deux cartes voisines fait ressortir de nombreuses incohérences qui ne traduisent pas un défaut de qualité du travail de cartographie : elles proviennent de différences d'interprétation des auteurs des cartes, de méthodes d'investigations qui n'étaient pas les mêmes au gré des époques, de conceptions scientifiques qui ont également varié selon les progrès de la science.

La plupart des cartes n'étaient disponibles que sous forme papier et leur vectorisation préalable a été nécessaire. Cette opération a été faite par l'Institut de Géomatique et d'Analyse du Risque (IGAR) de la Faculté des géosciences et de

l'environnement de l'Université de Lausanne, sur mandat et sous la responsabilité du Service géologique national (Office fédéral de la topographie Swisstopo). Le résultat est une surface vectorisée de plus de 2800 km² découpée en plusieurs dizaines de milliers de polygones aux appellations très diverses, qui correspondent au contenu d'une vingtaine de feuilles de l'Atlas géologique, publiées entre 1935 et 2006. Comment traduire ces polygones en classes de sols de fondation de manière optimale ?

Rôle des géotypes

C'est pour faciliter cette traduction des polygones géologiques en classes de sols de fondation que les géotypes ont été introduits. La démarche (fig. 1) comprend cinq opérations successives qui peuvent se résumer à :

- la traduction² de la carte géologique vectorielle (données SIG) en carte des géotypes (opérations 1 à 2)
- la traduction de la carte des géotypes en carte des sols de fondation (opérations 3 à 5).

Cette suite d'opérations distinctes a pour effet d'apporter une grande transparence dans le processus de traitement des données, avec comme objectif de pouvoir actualiser les cartes en toute connaissance de cause.

Traduction des formations géologiques en géotypes

Chaque polygone, caractérisé par une appellation propre à la carte dont il fait partie, reçoit une appellation géotype de manière automatique grâce à une matrice de correspondance établie pour chaque feuille en fonction de la légende, de la notice explicative, de la littérature régionale et de la connaissance des terrains du canton. Cette traduction doit ensuite être vérifiée par le bureau de géologie en charge de la feuille en question. Ce dernier teste la cohérence de la traduction automatique et la corrige si nécessaire en fonction de son expérience. Le résultat est une carte géologique simplifiée et homogénéisée sur l'entier du territoire, appelée « carte des géotypes » (voir fig. 2, pp. 12-13).

Traduction des géotypes en classes de sol de fondation

Une deuxième matrice de correspondance a été établie entre les géotypes et les sols de fondation, également sur la base de la connaissance des terrains du canton. Il s'agit cette fois d'une seule matrice pour tout le canton puisque les différences entre cartes ont été gommées lors du passage par les géotypes. Cette matrice permet une cartographie automatique des classes de sol (la classe E mise à part). Là encore, le bureau de géologie doit contrôler la cohérence de cette carte et corriger (suite en page 24)

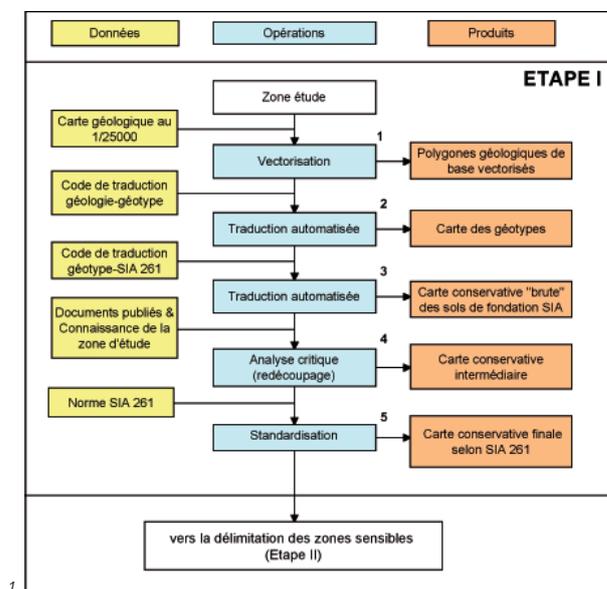
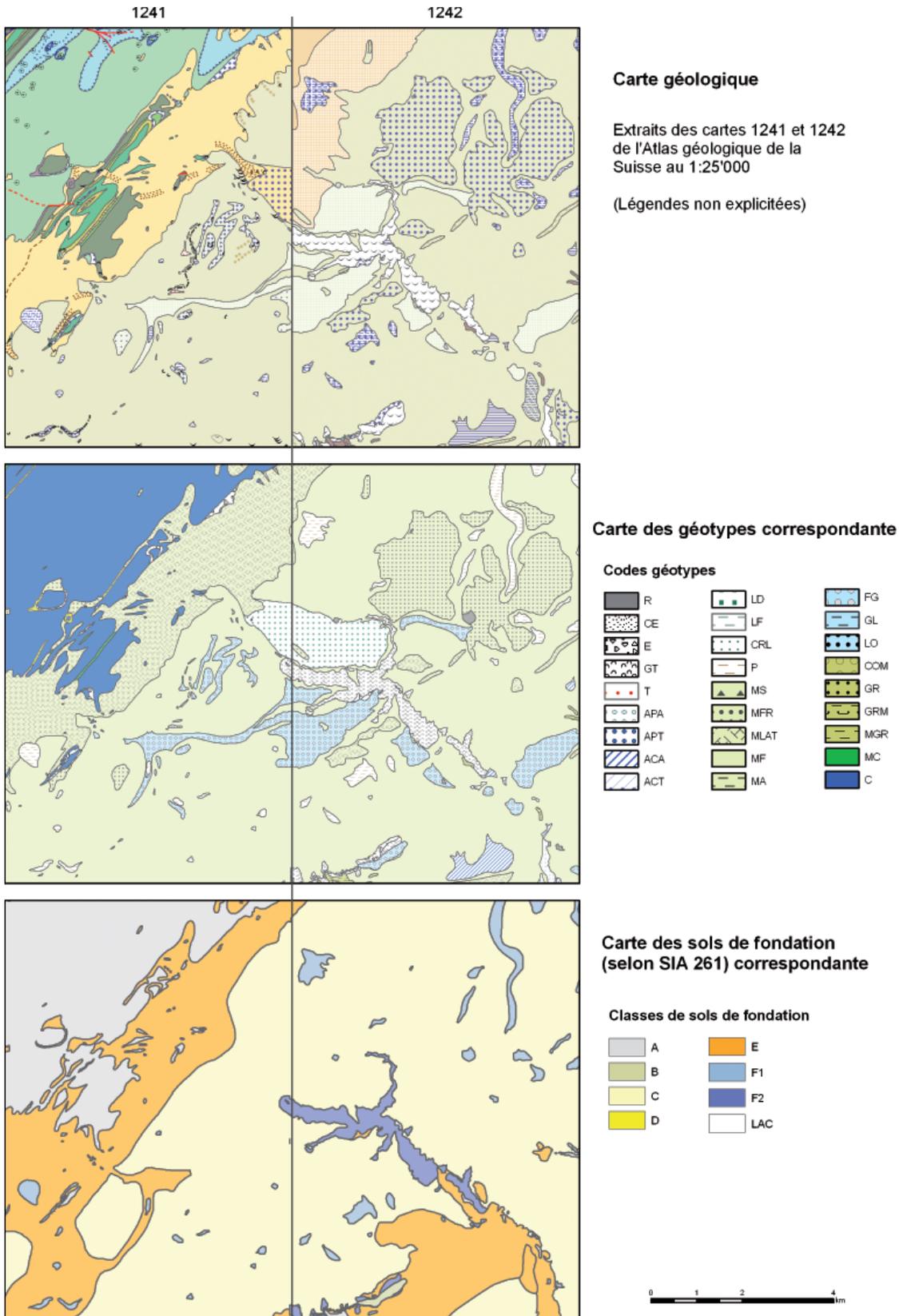


Fig. 2 : Exemple du passage de la carte géologique à la carte des sols de fondation en passant par les géotypes pour la zone de contact entre les cartes 1241 du Marchairuz à gauche, et 1242 de Morges à droite (Document AG25-SIG@swisstopo)



Autres applications des géotypes

Projet CADANAV

Le développement de la notion de géotypes et les premières applications ont été faites dans l'étude méthodologie CADANAV (Carte des dangers naturels du canton de Vaud) [6], dans le but de fournir une base harmonisée sur la nature et le comportement des terrains par rapport aux dangers naturels. Dans ce projet, les géotypes ont été définis à différentes échelles :

- géotypes généraux (liste réduite à douze géotypes cartographiés au 1/500 000^e). Ils représentent les grandes régions géologiques du canton et permettent de prendre conscience immédiatement des principaux dangers géologiques rencontrés dans ces régions (par exemple régions à éboulements, régions à glissements) ainsi que des ressources (par exemple ressources en eau dans les terrains karstiques);
- géotypes de détail (cartographiés au 1/25 000^e). Ils sont la véritable base de gestion du territoire. Ces mêmes géotypes s'appliquent à des échelles plus locales (par exemple au 1/5 000^e) dans la cartographie de détail et permettent finalement de décrire les conditions du sous-sol d'une parcelle.

Secteurs de protection des eaux souterraines

Le Canton de Vaud possède des cartes de secteurs de protection des eaux datant des années 1970. Elles ont été établies, comme cela se faisait à l'époque, sans traçabilité des raisons d'attribution d'un polygone à tel ou tel type de secteur. Elles nécessitent aujourd'hui d'être révisées en fonction de la nouvelle ordonnance sur la protection des eaux (OPE) et des connaissances actuelles de l'hydrogéologie du canton. Les conditions sont semblables à celles du microzonage sismique, notamment des moyens financiers réduits.

La carte des géotypes établie à l'occasion du microzonage sismique étant disponible, une méthodologie de révision des secteurs de protection des eaux a été développée partant de cette information homogène et cohérente au niveau de toute la superficie du canton. En incluant aux géotypes

quelques critères supplémentaires, en bonne partie déjà sous forme SIG (la topographie, la résistivité électrique, la carte des sources, le voisinage du polygone, etc.), il est possible de traduire la carte des géotypes en secteurs de protection, une traduction pouvant être opérée automatiquement. Là encore, le contrôle du géologue est indispensable en ayant recours à la carte géologique de l'Atlas géologique de la Suisse et à sa connaissance personnelle du terrain; des corrections manuelles sont apportées ainsi en cas de besoin. Dans cette même opération, une carte des ressources en eaux souterraines est établie.

Risques d'instabilité de versants

Comme mentionné plus haut, c'est ce type de problèmes qui est à l'origine des géotypes. La situation est toutefois différente de l'époque du projet CADANAV puisque la cartographie intégrale du canton en géotypes est maintenant disponible. Cette base est un point de départ appréciable pour la cartographie de la sensibilité des terrains aux glissements et autres phénomènes associés. Complétée par une analyse détaillée des caractéristiques géologiques des terrains, la carte des géotypes permet de mieux prendre en compte les propriétés du matériel, donc leurs effets spécifiques sur les instabilités potentielles.

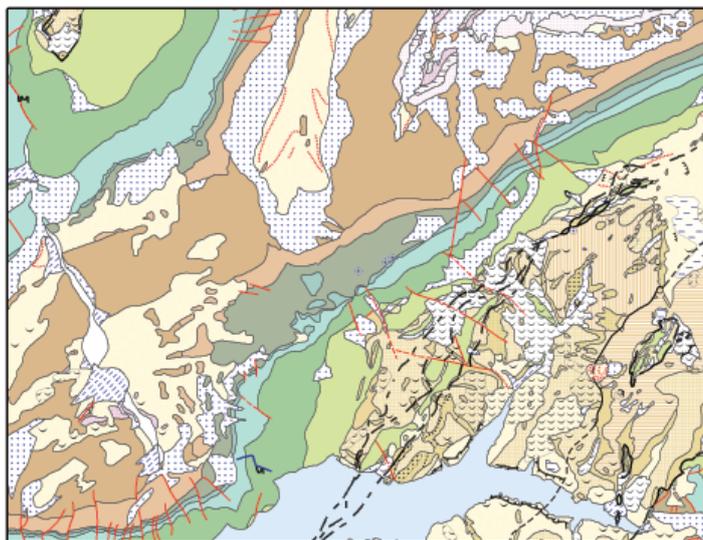
Cette caractérisation de terrain des affleurements a nécessité des recherches intensives ([7], [8], [9] et [10]) depuis le dépôt du rapport CADANAV, le but étant toujours d'utiliser une démarche la plus objective possible à moindres coûts.

Le système des géotypes a également été appliqué dans le contexte géologique complètement différent du Nicaragua [11], prouvant ainsi sa souplesse et sa robustesse face à des conditions autres que celles du Canton de Vaud.

Risques d'effondrements karstiques

L'étude de faisabilité d'une cartographie graduée du risque d'effondrement karstique [12], effectuée pour le compte de l'ECA-Vaud, confirme la potentialité d'utilisation des géotypes pour cette problématique puisque les terrains sensibles à la karstification s'identifient facilement dans la liste des géotypes rocheux.

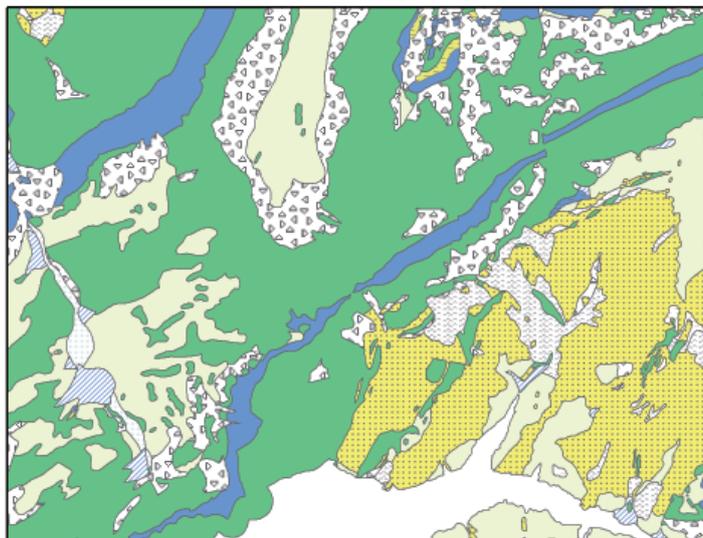
Fig. 3 : Exemple du passage de la carte géologique à la carte des sols de fondation en passant par les géotypes pour une zone complexe des Préalpes sur la carte 1265 des Mosses (Document AG25-SIG@swisstopo)



Carte géologique

Extraits de la carte 1265 de l'Atlas géologique de la Suisse au 1:25'000

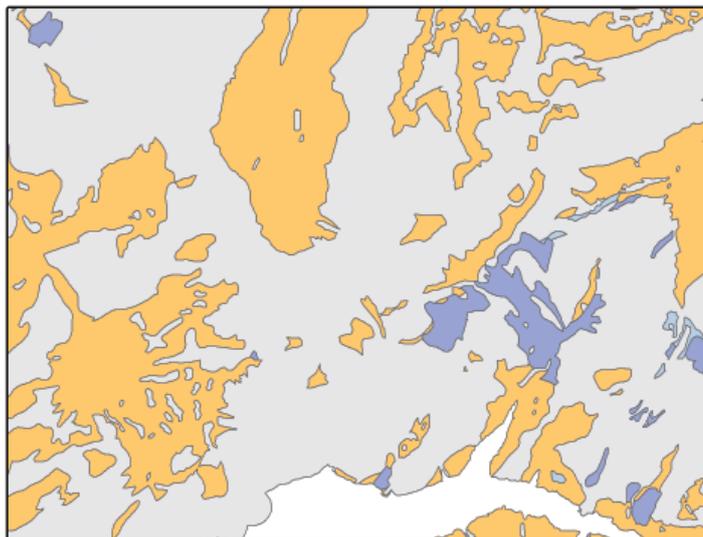
(Légendes non explicitées)



Carte des géotypes correspondante

Codes géotypes

R	ACA
CE	ACT
E	MF
GT	GS
T	M
APA	MC
APT	C



Carte des sols de fondation (selon SIA 261) correspondante

Classes de sols de fondation

A	E
B	F1
C	F2
D	LAC



(suite de la page 20) tel ou tel polygone s'il le juge nécessaire. En cas de doute, le géologue choisit la classe la plus prudente. En introduisant ensuite la notion d'épaisseur des formations, il réaffecte certains polygones des classes C et D en classe E. La carte indicative finale est ainsi obtenue.

Exécution pratique

Le test de la méthode [4] sur la feuille pilote 1242 Morges [5], puis le suivi des travaux des bureaux de géologues mandatés par lots pour toutes les feuilles du canton ont montré que la rédaction de la carte conservative des classes de sol de fondation était parfaitement opérationnelle. Le GEOLEP, qui assurait la coordination des bureaux et l'homogénéité du traitement, a eu passablement de travail pour réaliser une jointure cohérente des cartes géologiques aux limites. Cette harmonisation a été faite au niveau de la carte des géotypes, évitant ainsi que ces difficultés ne soient répercutées plus en aval. En revanche, les cartes géologiques n'ont pas été modifiées, puisqu'elles doivent rester le document scientifique de référence.

Deux applications de cette démarche sont montrées sur les figures 2 et 3. On y a représenté de haut en bas :

- un extrait de l'Atlas géologique de la Suisse au 1/25 000^e,
- la traduction en géotypes à partir de la géologie,
- la traduction en carte des sols de fondation à partir de la carte des géotypes.

Le premier exemple (fig. 2) souligne l'intérêt des géotypes pour la mise en cohérence rapide et simplifiée des formations géologiques aux contacts de deux cartes différentes (cartes 1241 du Marchairuz et 1242 de Morges). Le second exemple (fig. 3) montre quant à lui l'agrégation apportée par les géotypes dans le cas d'une zone à géologie complexe dans les Préalpes (carte 1265 des Mosses).

A noter que, pour le strict usage des sols de fondation, le passage par les géotypes en milieu rocheux n'était pas indispensable ; il a été décidé toutefois de constituer la carte des géotypes sur tout le canton afin de disposer d'une couverture homogène.

Les géotypes ont permis, en un temps record, d'établir les cartes de microzonage sismique de l'entier du Canton de Vaud de manière opérationnelle. Plusieurs bureaux privés ont participé à cette œuvre (voir article p. 26). Bien qu'ils ne connaissaient pas la méthode des géotypes, ils l'ont assimilée et ont réussi à produire, en collaboration avec le GEOLEP, un document de haute qualité qui constitue un pas important

vers la prévention du risque sismique du canton, mais également une base géologique cohérente du territoire qui sera fort utile à son développement.

Aurèle Parriaux, prof. dr géologue
Pascal Turberg, dr géologue
GEOLEP – Laboratoire de géologie de l'ingénieur
et de l'environnement
EPFL, Ecublens, CH – 1015 Lausanne

Jean-Marc Lance
ECA, Avenue du Général Guisan 56, CH – 1009 Pully

David Giorgis, dr géologue
OIT – Office de l'information sur le territoire
Etat de Vaud, Département des infrastructures
Av. de l'Université 3, CH – 1014 Lausanne

Bibliographie

- [1] GEOLEP (2004) : « Microzonage sismique du canton de Vaud ». Etablissement de la carte des sols de fondation selon SIA 261. Etude préliminaire. GEOLEP. Rapport final
- [2] SIA 261 (2003) : Norme suisse SN 505 261, « Actions sur les structures porteuses ». Ed. SIA, Zurich
- [3] OFEG (2004) : « Principe pour l'établissement et l'utilisation d'études de microzonage en Suisse ». Directives de l'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Berne
- [4] PHILIPPE, E. (2003) : « Méthode et réalisation de cartes indicatives de microzonage sismique du canton de Vaud (Suisse) ». Mémoire de diplôme postgrade en géologie de l'ingénieur. GEOLEP, non publié
- [5] VERNET, J. P. (1972) : « Atlas géologique de la Suisse au 1 / 25 000 », feuille 1242, Morges, Commission géologique suisse
- [6] CADANAV (2002) : Projet CADANAV. « Etablissement d'une méthodologie de mise en œuvre des Cartes de Dangers Naturels du Canton de Vaud ». Collectif EPFL : HYDRAM, LMS, LMR, GEOLEP, LASIG, SLF, WSL. Rapport final, 31 Octobre 2002. Non publié
- [7] SCHNEIDER, TH. (2001) : « Caractérisation multicritère des formations géologiques du canton de Vaud et de leurs prédispositions face aux dangers naturels ». Mémoire de diplôme postgrade en géologie de l'ingénieur. GEOLEP, non publié
- [8] POUYT, M. (2004) : « Développement et test d'identification de terrain, dans le domaine des instabilités de versant ». GEOLEP. Travail de diplôme UNIL-EPFL, non publié
- [9] PANTET, A. (2005) : « Valorisation des facteurs lithologiques et hydrogéologiques dans l'élaboration des cartes de dangers naturels. GEOLEP, rapport interne de stage, non publié
- [10] PANTET, A., PARRIAUX, A., THÉLIN, PH. (2007) : « New method for in situ characterization of loose material for landslide mapping purpose ». *Engineering Geology*. Elsevier. Sous presse
- [11] HAEBERLIN, Y., TURBERG, P., RETIERE, A., SENEGAS, O., PARRIAUX, A. (2003) : « Validation of SPOT-5 satellite imagery for geological hazard identification and risk assessment for landslides, mud- and debris flows in Matagalpa, Nicaragua ». Actes de Congrès ISPRS 2004, Istanbul
- [12] GEOLEP (2003) : « Expertise géologique des phénomènes d'effondrement et de subsidence karstiques dans le cadre de permis de construire ». GEOLEP, rapport final, non publié

Participation des géologues à l'usage des géotypes vaudois

GÉOLOGIE

La méthodologie utilisée dans le Canton de Vaud pour le microzonage sismique utilise la notion de géotypes. L'application de cette méthode de transposition des données géologiques conventionnelles en géotypes nécessite une connaissance détaillée des conditions géologiques in situ et notamment des données en profondeur. Dépositaires de ce savoir, les bureaux privés jouent donc un rôle clé dans ces travaux menés pour le compte de l'Etablissement cantonal d'assurance contre l'incendie et les éléments naturels (ECA).

En Suisse, 90 % des constructions ont été réalisées avant 1989, 70 % avant 1970. Jusque dans les années septante, aucune norme parasismique n'avait été éditée pour les constructions dans le pays. Par ailleurs, les tremblements de terre de Mexico (1985) et Loma-Prieta (San Francisco, USA, 1989) ont engendré des dommages très variables pour un même événement sismique touchant une région limitée. Ces différences s'expliquent entre autres par des variations dans la composition locale du sous-sol : c'est ce que l'on appelle l'effet de site.

L'investigation de site vise à déterminer comment un sous-sol se comportera sous l'action d'un tremblement de terre. Il est par exemple possible qu'un terrain amplifie les mouvements du sol, se liquéfie ou se mette en mouvement translationnel.

Microzonage

La prise en compte des effets de la géologie et de la topographie locales sur la sollicitation sismique se fait par un microzonage. L'objectif est d'obtenir un niveau de sécurité homogène pour les nouveaux ouvrages, quelle que soit la zone sismique ou la géologie locale. L'ancien Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG) a édité des directives à cet effet dans la brochure « Principe pour l'établissement et l'utilisation d'études de microzonage en Suisse » [1]¹. Sur la base de ces recommandations, les cantons sont responsables de la bonne réalisation du projet.

Le premier niveau de microzonage est basé sur la norme de construction SIA 261 « Actions sur les structures porteuses » [3], qui définit les sollicitations sismiques sur la base

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie placée en fin d'article.

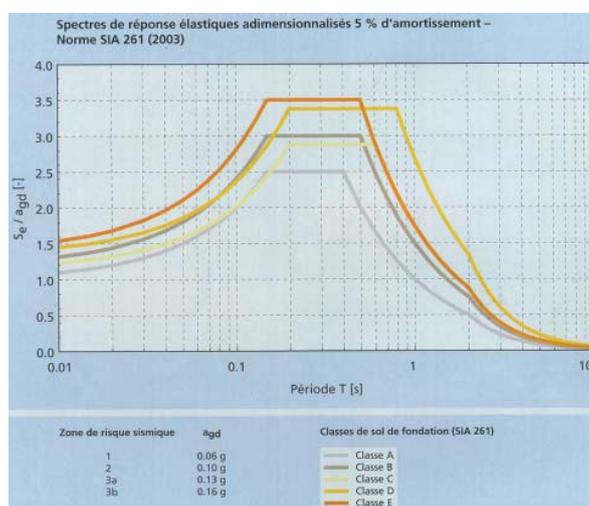
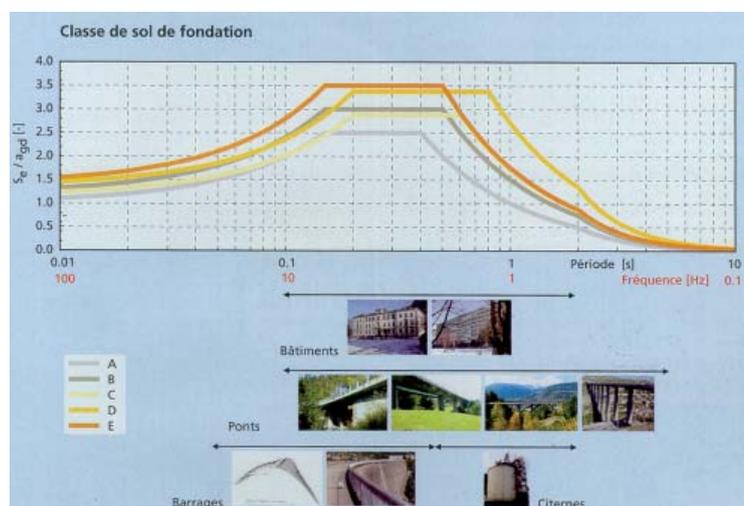


Fig. 1 : Domaine de périodes fondamentales de certains types d'ouvrages en relation avec les spectres de réponse des sols de fondation selon SIA 261 (Source [1])

Fig. 2 : Spectre de réponse associé aux diverses classes de sol selon SIA 261 (Source [1])

d'une carte des zones sismiques et des classes de sols de fondation.

Un second niveau de microzonage concerne le microzonage spectral (fig. 1 et 2), qui correspond à une étude quantitative de détail réservée aux zones ou objets à fort potentiel de risque. Il se réalise par l'acquisition directe in situ de paramètres physiques propre aux terrains en présence (mesures de vibrations, de vitesses sismiques des ondes de cisaillement, de densité des sols, des valeurs SPT ou CPT, etc.)².

Relevons par ailleurs d'une manière plus générale que, sur la base des expériences réalisées dans le cadre de l'accomplissement du mandat de l'ECA, le choix des classes de sol de fondation proposé par la norme SIA 261 ne définit pas, à notre avis, de façon satisfaisante la géologie des formations quaternaires propres à notre pays, par exemple en corrélant de manière univoque la description granulométrique avec les compacités. Ceci a souvent exigé une interprétation de notre part pour la transposition des sols dans les différentes classes prévues par cette norme.

L'exemple vaudois

Dans le Canton de Vaud, l'étude a débuté à l'initiative de l'ECA. Du fait de l'inexistence d'un service géologique cantonal et de l'absence d'une base de données des sondages en début d'étude, l'ECA a mandaté l'EPFL comme coordinateur technique et a eu recours aux compétences de certains bureaux privés du Canton de Vaud pour la réalisation des cartes des sols de fondation. Des bureaux spécialisés en géologie et en géotechnique ont ainsi été appelés à appliquer une méthodologie mise au point par l'EPFL [2] (voir article p. 19). Elle prévoyait notamment l'utilisation de la notion de géotypes, ce qui constituait une première pour les bureaux. Elle se basait en outre sur une réalisation en trois étapes (voir article p. 7).

L'objectif déclaré de l'étape I était la réalisation, dans un délai très court (huit mois), d'une carte du sous-sol spécifique au microzonage sismique recouvrant l'ensemble du territoire cantonal, ceci à partir de l'analyse de documents géologiques existants (cartes géologiques, études régionales, connaissances du territoire).

Les données géologiques de base pour ce travail se trouvent dans les cartes au 1/25 000^e de l'Atlas géologique de la Suisse datant de 1935 (feuille Cossonay) à 2007 (feuille Grandson), rédigées selon des standards et des nomenclatures géologiques pour le moins divers. Cette disparité est d'autant

plus frappante que les récentes études du sous-sol (chantiers, ouvrages souterrains, forages) sont réalisées en appliquant des codes de description de nomenclature et de classification décrites dans les normes internationales (ISO, SIMR), européennes (EN) et nationales (SN) actuellement en vigueur.

Autres exemples cantonaux

Les cantons limitrophes du Canton de Vaud ont également entrepris la réalisation de cartes conservatives des sols de fondation selon des processus assez distincts qui n'utilisent pas la notion de géotype.

Dans le Canton de Genève, qui dispose d'un Service géologique et d'un cadastre informatisé avec près de 13 000 données de forages, ces cartes ont été réalisées par un traitement numérique³, complété par une analyse critique.

Dans le Canton de Fribourg, ce type de carte a été établi par une application de la norme, l'information géologique étant directement traduite en classe de sol de fondation.

En Valais, la cartographie n'a été réalisée que dans la vallée du Rhône et dans certaines vallées densément peuplées. La norme y a également été appliquée. Cela a permis d'éliminer rapidement (comme dans le cas fribourgeois) de grandes surfaces de sols ne présentant pas de problèmes au niveau sismique, comme les zones en rocher ou en rocher subaffleurant. Des cartes de microzonage spectral – qui représentent la forme la plus aboutie du microzonage du sous-sol puisqu'on obtient le spectre de dimensionnement élastique (SDE) – ont également été réalisées ou sont en cours d'élaboration.

Ainsi, l'utilisation de la notion de géotype appliquée dans le Canton de Vaud, introduisant un stade intermédiaire dans le processus d'établissement des cartes des sols de fondation, constitue à notre connaissance une première en Suisse.

Le rôle des bureaux

Les produits issus des opérations de la méthode de microzonage devaient être compatibles avec le Système d'Information sur le Territoire de l'Administration Cantonale Vaudoise (SIT-ACV), puisque l'objectif à terme est d'utiliser ces données pour les processus de mise à l'enquête, d'autorisation de construire, de gestion et d'aménagement du territoire. Le recours à un outil de système d'information géographique (SIG) était donc impératif pour effectuer ce mandat.

Les bureaux privés avaient pour tâche de valider ou corriger les codes de traduction proposés par l'EPFL, d'abord pour le passage des cartes géologiques aux géotypes, puis pour celui des géotypes aux classes de sol de fondation.

Pour parvenir à ce résultat, l'interprétation et l'exploitation des connaissances spécifiques des bureaux privés se sont

² Ce second niveau de microzonage ne fait pas partie de l'étude.

³ Utilisation de ArcGIS®

Fig. 3 : Vue sur le quartier de la Cité à Lausanne
(STRAESSLE, J. : « Lausanne », éd. La Bibliothèque des Arts, Lausanne)

Fig. 4 : Profil du sous-sol lausannois avec indication des anciennes carrières de molasse
(CHOFFAT PH. (1984): « Observations géologiques dans la région Lausannoise », documents inédits, Musée cantonal de géologie, Lausanne)

avérées indispensables, notamment pour l'analyse critique des cartes géologiques et des codes de traduction automatiques de l'EPFL. Après vérification des géotypes fournis par traduction automatique, nous avons mis en évidence des divergences de résultats par rapport à nos connaissances du terrain et avons ainsi pu adapter ponctuellement le code de traduction. Notre façon de traiter l'information lorsque le code de traduction était en contradiction avec notre connaissance de la région peut être illustrée par les deux exemples qui suivent.

Sur la carte géologique Lausanne (N° 1243), la composition granulométrique de la terrasse glaciolacustre élevée (dite de 30m) évolue d'ouest en est. Ainsi, dans la région d'Ecublens, où les dépôts sont essentiellement fins, le géotype attribué à la formation est GL (glacio-lacustre). En revanche, pour la basse vallée du Flon à Lausanne, compte tenu de la nature plus sablo-graveleuse des sols en présence, nous avons adopté le géotype FG (fluvio-glaciaire). Cette formation géologique a donc été scindée en deux entités géotypiques différentes pour un gain de cohérence.

Sur la carte Echallens (N° 1223), le code de traduction fournissait pour la Molasse chattienne le géotype COM (conglomérats avec quelques marnes). Notre expérience de cette formation nous a fait modifier cette attribution automatique en géotype MGR (Marnes avec quelques grès) ou GRM (Grès avec quelques marnes), selon que les faciès rencontrés ont une composition à prédominance marneuse ou gréseuse.

Une autre difficulté concernait l'analyse des épaisseurs des formations, un élément fondamental pour la définition des classes de sol de fondation. Nous avons ainsi parfois effectué un redécoupage des classes de sol en tenant compte de ces épaisseurs, par exemple en bordure de la plaine de la Venoge, dans les zones où les collines molassiques sont au

contact de dépôts alluviaux. Dans ces cas, pour éviter un contact entre les classes de sols A et C/D (voir tab. A, p. 19), une frange de classe de sols E a été systématiquement intercalée, pour prendre en compte l'épaississement progressif de la couverture quaternaire déposée sur la roche en place. En effet, cet épaississement progressif conduit à ce que le toit du rocher se situe à une profondeur comprise entre 5 et 30 mètres, ce qui correspond à la classe E. Dans l'exemple, cette situation traduit le plongement de la Molasse sous la plaine de la Venoge.

Dans les cas ambigus ou mal connus, l'interprétation la plus sécuritaire a été retenue pour garder une approche conservatrice. Les incohérences aux limites entre certaines cartes géologiques d'époques très différentes ont été réglées par les bureaux en collaboration avec le coordinateur technique, alors que les limites entre les lots des divers bureaux ont été réglées uniquement par ce dernier.

Application en milieu urbain

En milieu urbain, on retrouve les difficultés majeures de la cartographie géologique puisque les affleurements rocheux et la morphologie naturelle du terrain sont dissimulés par les modifications anthropiques du territoire (fig. 3). Si l'on prend comme exemple la zone de la Cité à Lausanne, les archives ou des données recueillies lors de chantiers ont parfois permis de reconstituer l'historique de l'occupation du territoire. On a ainsi pu déceler des particularités du sous-sol non mentionnées par la carte géologique existante, pouvant mener à l'affectation d'une classe de sol différente. En ville de Lausanne, par exemple, des anciennes carrières de pierre de taille pour les bâtisseurs de la Cathédrale sont aujourd'hui dissimulées sous le quartier de Marterey (fig. 4 et 5). Des données essentielles à la reconstitution stratigraphique et à la caractérisa-

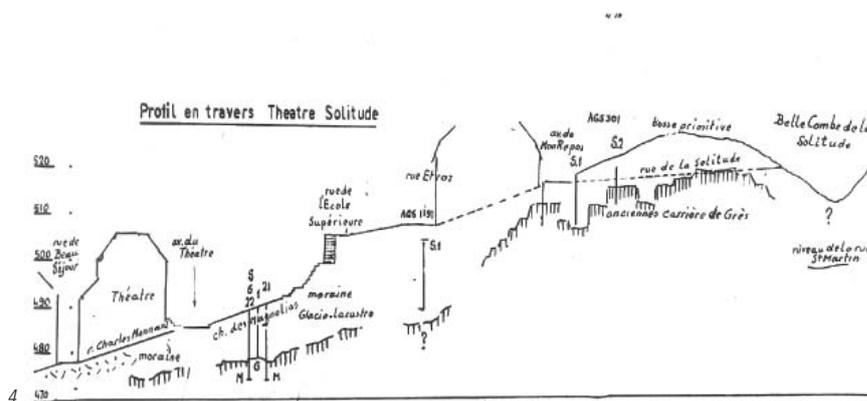


Fig. 5 : Carte géologique de Lausanne, zone du Pont Bessières
 Gris bleuté : remblais modernes des vallons du Flon et de la Louve ; Jaune verdâtre :
 Moraine rhodanienne ; Beige strié : molasse sous une faible couverture de sol
 Rose : affleurements rocheux de la Molasse grise de Lausanne
 (Weidmann, M. (1988) : Atlas géologique de la Suisse au 1/25 000°)

Fig. 6 : Tunnel de Langallerie (quartier de Marterey, 15 m sous la route) front de taille dans les sables fluvio-glaciaires, terrains meubles non cohésifs stabilisés lors de l'excavation par des colonnes injectées de ciment (Photo G. Franciosi)

Fig. 7 : Carte conservative des sols de fondation pour la Cité à Lausanne selon SIA 261 (ECA – Vaud, Géotest SA)

tion lithologique du sous-sol ont aussi pu être obtenues par l'intermédiaire de divers chantiers (construction de la nouvelle ligne de métro m2 (fig. 6), liaison ferroviaire pour l'usine de traitement des déchets TRIDEL, ligne de métro m1, etc.). Outre ces cas qui illustrent le rôle des recherches d'archives pour la reconstitution de la géologie du sous-sol urbain, le recours aux forages existants est indispensable lorsque l'on fait intervenir la notion d'épaisseur.

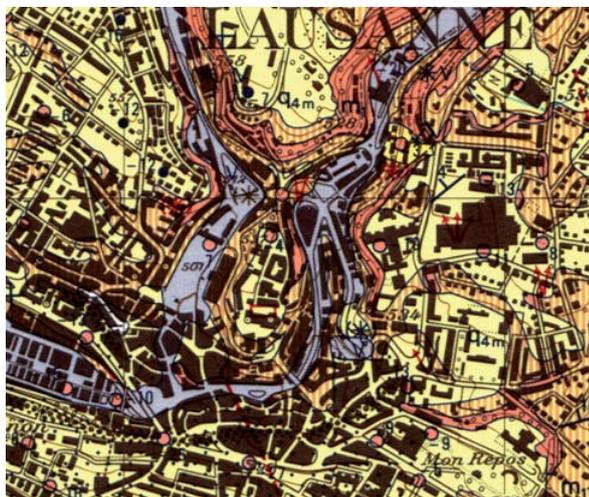
La traduction en classes de sol de fondation (fig. 7) des informations géologiques analysées met en évidence, au beau milieu du centre urbain, des zones pouvant produire une amplification modérée des ondes sismiques (classe E, en orange) et des zones pouvant amplifier notablement le signal incident ou provoquer des effets induits dommageables (classes F1 et F2, en bleu). Cette situation se concrétise dans le cas présent par la zone des remblais (bleu) des vallées du Flon et de la Louve, notamment autour de la Cité. On retrouve des cas similaires pour d'autres rivières de la périphérie lausannoise (Vuachère, Mèbre, Sorge, Galicien, etc.).

Application en milieu rural

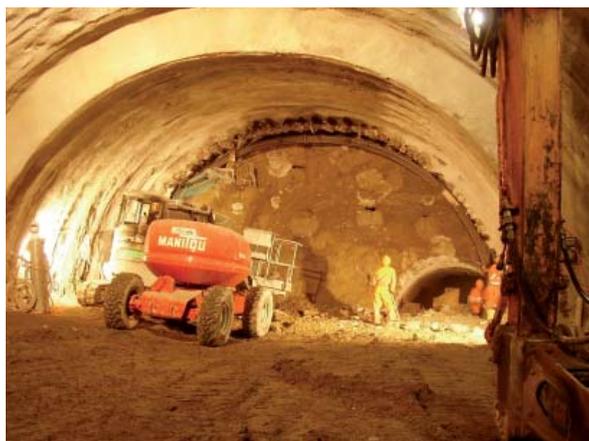
En milieu non construit, la cartographie se heurte à une limitation de l'information géologique disponible sur la base d'investigations profondes. Alors que la densité des sondages dans une ville comme Lausanne peut être estimée à quelques dizaines par km², la densité affichée dans les zones rurales y est de quelques unités, généralement concentrées le long d'axes de transport et d'activité.

Bien que théoriquement plus accessible, notamment en milieu alpin et dans la chaîne du Jura, la reconnaissance du sous-sol des régions de plaines alluviales et du Plateau suisse est en fait plus complexe à cause de l'absence d'affleurement rocheux et de la variété des dépôts quaternaires existants. Elle implique une certaine interprétation et, par conséquent, une marge d'incertitude quant à la limite des formations géologiques, en particulier pour les terrains quaternaires. Ainsi, les études concernant la construction de l'autoroute A1 entre Lausanne et Yverdon ont permis la réinterprétation de certaines limites géologiques le long du tracé.

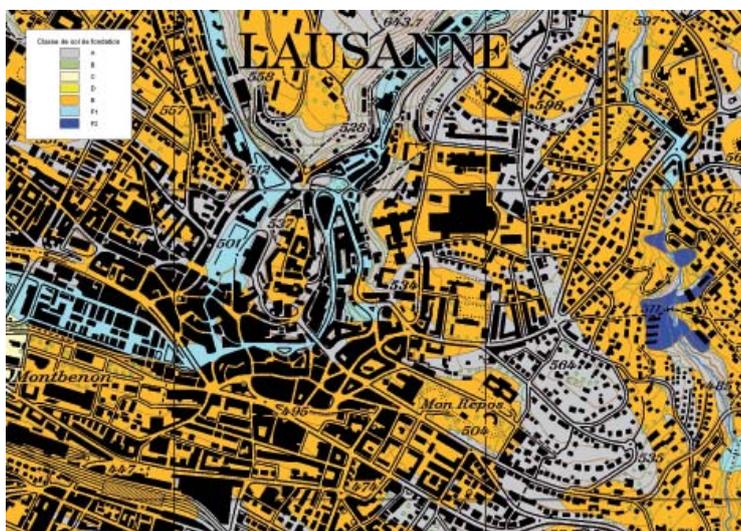
Sur le site des collines du Mormont à Eclépens, les calcaires exploités sont directement au contact de zones marécageuses de la plaine (fig. 8). Selon la carte conservative des sols de fondation obtenue (fig. 9), cette zone de la classe A (gris) est au contact direct de la classe sensible F1 (bleu) : en cas de séisme, les dégâts potentiels seront plus importants dans la zone des marais. Au nord-est de cette carte, on observe un cordon jaune clair qui correspond à la gorge enterrée du Mormont située sur l'axe du tunnel CFF de la ligne



5



6



7

Fig. 8 : Vue aérienne de la colline du Mormont, Eclépens (Image H. Leuenberger)

Fig. 9 : Carte conservative des sols de fondation selon SIA 261 (ECA – Vaud, Groupement Geolosanne)



8

Lausanne-Bienne. Cette gorge, qui a été reconnue dans le cadre d'une étude datant de 2003 pour l'assainissement du tunnel, a mené à une modification du polygone concerné en classe C.

Cartes détaillées

Faisant suite à la phase intermédiaire d'identification des zones « sismiquement sensibles » (étape II, réalisée directement par le coordinateur technique), la troisième étape concernant les cartes détaillées est en cours. Sa méthodologie reprend les opérations appliquées pour les cartes conservatives en y intégrant l'analyse et l'interprétation des données de sondages (notamment par l'introduction d'un géotype à chaque lithologie des forages), voire de chantiers souterrains.

A l'aide d'une importante quantité de documents d'archive (études géotechniques, études des dangers naturels, études hydrogéologiques, sondages, etc.), nous pourrions affiner et réinterpréter certaines limites de formations actuelles des cartes géologiques digitalisées, notamment en ce qui concerne les cartes les plus anciennes. Ces modifications seront réalisées sur la carte des géotypes et ainsi répercutées sur la carte détaillée des classes de sol de fondation.

Bilan de l'étude et perspectives

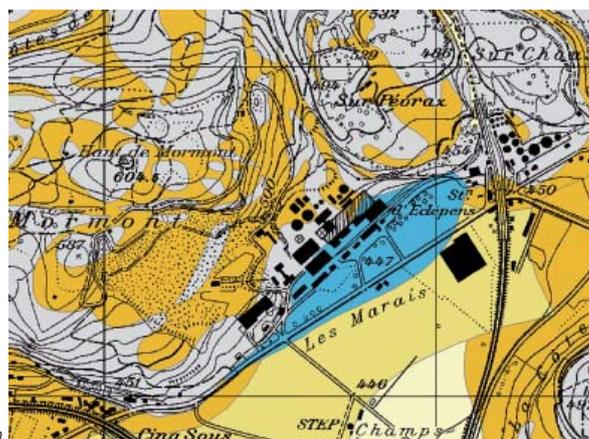
Nos connaissances géologiques régionales et l'étude de cas ponctuels du sous-sol ont permis d'élaborer la cartographie

conservative des sols de fondation du Canton de Vaud dans le délai imparti. Cette étude, qui a mis en relation occupation du territoire et dangers naturels (sensibilité aux séismes), met à disposition des professionnels de la construction et de l'aménagement du territoire une carte des sols de fondation selon la norme SIA 261, ainsi qu'une nouvelle vision unifiée des données géologiques du canton : la carte des géotypes.

Ce nouveau procédé consistant à décrire le « territoire géologique » en géotypes présente des avantages, dans la mesure où il propose une homogénéisation de l'information géologique du canton qui n'est pas assurée par les cartes géologiques publiées à ce jour. A ce sujet, les géotypes offrent une alternative aux légendes géologiques, dont le projet d'harmonisation (en cours au niveau suisse en parallèle avec l'établissement des cartes géologiques manquantes) sera réalisé dans un délai incompatible avec les exigences du canton. Par contre, avec les géotypes, les bureaux privés se sont vus imposer un nouveau standard qui n'a pour le moment pas d'équivalent dans les normes nationales et internationales en vigueur dans la profession.

Dans le cadre du mandat, l'utilisation des géotypes a compliqué la tâche des bureaux par l'introduction d'une étape supplémentaire (carte des géotypes) dans la transcription de la géologie en classes de sol de fondation et par l'application imposée de plusieurs géotypes pour la roche, bien que celle-ci ne fasse l'objet d'aucune différenciation dans la norme SIA 261. A noter enfin que la traduction en géotype de chaque horizon géologique des forages lors de leur saisie informatique n'a eu que peu d'influence sur le résultat final.

Il convient encore de rappeler qu'à l'origine (projet CADANAV, voir encadré p. 22), l'objectif du concept des géotypes était d'offrir une transposition de l'information



9

géologique de base en entités géotypiques spécifiques à chaque domaine d'utilisation (par exemple les instabilités de versant, les phénomènes de chutes rocheuses, les érosions, etc.). Cependant, la définition actuelle des géotypes reposant uniquement sur une traduction homogène des entités des cartes géologiques, ceux-ci peuvent, selon les circonstances, constituer une base transposable à d'autres domaines d'application dans le cas d'étude à l'échelle régionale. Toutefois, le cas échéant, la carte des géotypes ne peut être utilisée telle quelle et devrait être croisée et interprétée avec des paramètres propres au domaine d'application envisagé, par exemple la rigidité et la compacité pour le microzonage sismique. A l'instar de ce qui a été fait dans ce cas, ce travail devrait faire appel à des bureaux d'études spécialisés, dépositaires de connaissances indispensables à l'application et à la validation des paramètres étudiés.

Stéphane Affolter, géologue dipl. UNINE
Emmanuel Marclay, géologue dipl. UNIL
Groupement Géolosanne
De Cérenville Géotechnique SA, CH – 1024 Ecublens
Karakas & Français SA, CH – 1010 Lausanne
Bureau technique Norbert
géologues-conseils SA, CH – 1003 Lausanne

Giuseppe Franciosi, géologue dipl. UNIL
Geotest SA, CH – 1052 Le Mont-sur-Lausanne

Alexandre Vallotton, géologue dipl. UNIL,
hydrogéologue dipl. University of Birmingham
ABA-Géol SA, CH – 1700 Fribourg

- [1] OFEG (2004): « Principe pour l'établissement et l'utilisation d'études de microzonage en Suisse », directives de l'OFEG, Bienne
- [2] EPFL ENAC LASIG, ECA-VD, EPFL ENAC ICARE GEOLEP (2006): « Etablissement des cartes des sols de fondation sur le territoire du canton de Vaud – Guide pratique », version préliminaire
- [3] SIA 261 (2003): Norme suisse SN 505 261, « Actions sur les structures porteuses ». Ed. SIA, Zurich