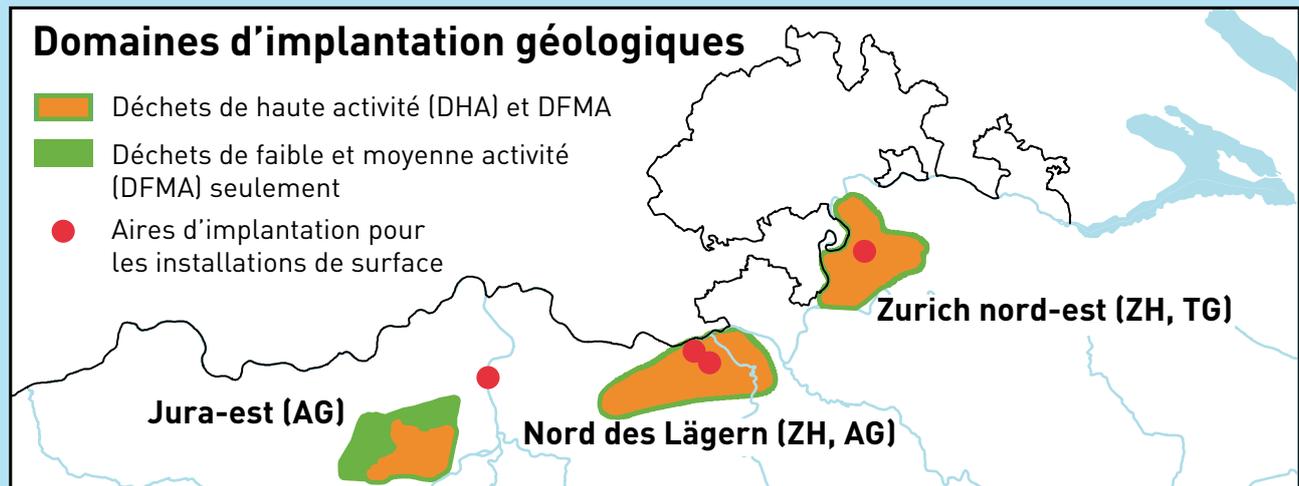


érosion

évolution géologique
à long terme
et dépôt en couches
géologiques profondes

A propos de ce cahier



Le «Plan sectoriel Dépôt en couches géologiques profondes» définit la procédure qui va conduire, en trois étapes, à la sélection des sites d'implantation pour les dépôts en couches géologiques profondes en Suisse. Pour l'identification et la comparaison des domaines d'implantation potentiels sous l'angle de la sûreté, le plan sectoriel définit treize critères. L'un d'entre eux concerne les phénomènes d'érosion à venir et leur importance pour la sûreté et la stabilité à long terme d'un dépôt en couches géologiques profondes. Pour effectuer une comparaison sur la base de ce critère, on prend en compte plusieurs facteurs qui diffèrent d'un domaine à l'autre. Il s'agit entre autres de la profondeur de l'Argile à Opalinus en tant que la roche d'accueil (voir glossaire), de la résistance à l'érosion des couches rocheuses situées au-dessus de la roche d'accueil et enfin de la topographie. De plus, on analyse la situation des domaines d'implantation potentiels du point de vue des glaciations passées et futures. A l'aide de scénarios, la Nagra a évalué, pour tous les domaines d'implantation, quelle profondeur devait avoir l'Argile à Opalinus pour être protégée des répercussions futures de l'érosion. Ces scénarios se basent sur une analyse de l'évolution passée de la topographie, en particulier sur la vitesse de creusement des grandes rivières et les effets de l'érosion glaciaire en profondeur.

Au cours des prochaines années, la géologie des trois domaines d'implantation potentiels Zurich nord-est, Nord des Lägern et Jura-est fera l'objet d'un examen approfondi, dont l'un des objectifs sera d'analyser et d'affiner les scénarios relatifs à l'érosion. Les résultats seront intégrés dans la comparaison des domaines effectuée à l'étape 3 du plan sectoriel.

Erosion – Evolution géologique à long terme et dépôt en couches géologiques profondes

La Nagra publie à différentes occasions des cahiers thématiques sur la gestion des déchets radioactifs
Octobre 2018

| | |
|---|---------|
| Quelques mots d'introduction L'érosion – la dégradation de la roche – et la modification de la topographie qu'elle provoque jouent un rôle important dans la sûreté à long terme d'un dépôt en couches géologiques profondes pour déchets radioactifs. | 4 – 5 |
| L'érosion Les processus d'érosion modifient la surface terrestre sur de longues périodes et doivent être pris en considération pour la sûreté à long terme d'un dépôt en couches géologiques profondes. | 6 – 9 |
| Les cours d'eau Les cours d'eau façonnent le paysage. Qu'il s'agisse de grands fleuves tels que le Rhin ou de petits ruisseaux, tous modifient la topographie. | 10 – 13 |
| Les glaciers Les glaciers sont des masses de glace formées par le tassement de couches de neige accumulée. En Suisse, de vastes étendues étaient autrefois recouvertes par des glaciers, dont les traces subsistent encore aujourd'hui dans le paysage. | 14 – 17 |
| L'érosion et les dépôts géologiques Pour délimiter les domaines d'implantation dans lesquels la roche d'accueil a la profondeur idéale, il faut émettre des hypothèses concernant l'érosion future. | 18 – 19 |
| Les recherches géologiques Pour vérifier et affiner les scénarios sur l'érosion à venir, la Nagra effectue des recherches géologiques dans les domaines d'implantation retenus pour la suite de la procédure. | 20 – 21 |
| Conclusions Dans les domaines d'implantation géologiques, la topographie future sera avant tout influencée par les rivières et les glaciers. | 22 – 23 |
| Glossaire | 24 – 25 |
| Bibliographie & Pour en savoir plus | 26 – 27 |

Quelques mots d'introdu

On désigne par le terme d'érosion la dégradation de la roche. L'érosion joue un rôle important dans l'évolution à long terme des barrières géologiques d'un dépôt en couches géologiques profondes pour déchets radioactifs. Il faut en effet éviter que les cavernes du dépôt soient mises à nu par l'érosion, pendant le temps nécessaire pour que la radioactivité baisse jusqu'à des niveaux ne présentant plus de risques pour l'homme et l'environnement. Afin de pouvoir estimer l'influence de l'érosion dans divers scénarios d'évolution future, il faut comprendre le passé.

Ce que le passé nous révèle ...

Pour déduire diverses évolutions futures de l'érosion, il faut analyser les modifications de la topographie au cours des deux derniers millions d'années, où se sont alternées des périodes froides et des périodes chaudes. Chacun de ces cycles a duré entre 41 000 et 100 000 ans. Durant les périodes froides, les glaciers ont formé de nouvelles vallées et surcreusé les vallées existantes (voir pages 15 ss.) et ainsi modelé le relief actuel en Suisse. Au cours des deux derniers millions

d'années, la région de Zurich a été recouverte au moins quinze fois par un glacier. Pour les trois domaines d'implantation potentiels Zurich nord-est, Nord des Lägern et Jura-est, l'évolution du niveau de base local a pu être reconstituée sur les deux derniers millions d'années à partir des dépôts de cailloutis fluviaux et fluvio-glaciaires (voir pages 10 ss.). Le niveau de base local est déterminé par l'altitude des grands fleuves comme le Rhin, l'Aar ou le Danube. Les rivières locales s'orientent à leur tour en fonction de ces principaux cours d'eau, tout comme les mouvements de terrain tels que les éboulements. Par le passé, le lit des rivières s'est creusé suite, par exemple, au soulèvement du sous-sol ou à un débit d'eau accru dû au changement climatique. Au cours des cinq à dix derniers millions d'années, les abaissements les plus rapides et les plus marqués du niveau de base local ont eu lieu dans le Nord de la Suisse, du fait d'un changement des lignes régionales de partage des eaux. Les cours d'eau du Nord de la Suisse s'écoulaient à l'origine vers le Danube, puis furent drainés par le Rhin. Comme ce dernier coulait à un niveau beaucoup plus bas que le Danube, le niveau de base local s'est abaissé de manière nette et rapide.



Figure 1

Près de Schaffhouse, le Rhin chute d'une falaise composée de calcaire dur et massif, relativement résistant à l'érosion. Photo: Beat Müller

ction

... sur le futur

On ne peut pas exactement prédire dans quelle mesure les grands cours d'eau vont à l'avenir entailler le substrat rocheux. C'est pourquoi plusieurs scénarios sont envisagés en fonction du soulèvement du sous-sol, de l'évolution climatique et de l'érosion (voir page 8).

Les glaciers, la force d'érosion des grands cours d'eau, mais aussi les processus d'érosion locaux (petits cours d'eau, glissements de terrain) sont essentiellement influencés par le climat, dont l'évolution future fait l'objet de nombreuses hypothèses. La poursuite de l'alternance entre des périodes froides et chaudes constitue le scénario le plus probable. Des modèles de calcul pour le climat des 130 000 prochaines années montrent que l'on peut s'attendre à une période glaciaire intense, avec une progression des glaciers jusque dans les Préalpes – soit jusque dans les domaines d'implantation –, au plus tôt dans 50 000 à 60 000 ans. L'augmentation de la température globale due aux émissions anthropogéniques de CO₂ peut contribuer à retarder ce phénomène (voir pages 6 ss.).

La progression des glaciers se produirait dans tous les cas à un moment où une grande partie des matières radioactives du dépôt géologique profond se seraient désintégrées (voir pages 18 ss.).

Les glaciers s'établissent de préférence dans le lit des anciennes vallées, qu'ils creusent et élargissent. Toutefois la formation de vallées entièrement nouvelles, situées plus bas que le niveau de base local, est aussi prise en considération (voir pages 10 ss.).

Une profondeur suffisante pour un dépôt profond

En tenant compte de divers scénarios concernant l'érosion et le climat, il est possible de définir une profondeur minimale pour la roche d'accueil, l'Argile à Opalinus, dans laquelle les déchets radioactifs devront être stockés en Suisse. La roche d'accueil fournira ainsi une protection suffisante contre l'érosion. Au cours de l'étape 2 du plan sectoriel, divers scénarios ont été pris en considération pour l'évolution des grandes rivières et l'érosion glaciaire en profondeur.



Figure 2

Le glacier d'Aletsch régresse à cause du changement climatique.

Photo: Danieloizo | Dreamstime.com

L'érosion

Les processus d'érosion modifient la surface terrestre sur de longues périodes et doivent être pris en considération pour la sûreté à long terme d'un dépôt en couches géologiques profondes.

L'érosion fait partie intégrante du cycle de la roche (voir encadré page 9). Par érosion, on désigne le détachement et l'abrasion de roches concassées et altérées chimiquement, de roches meubles ou des sols. Les roches peuvent être érodées par divers mécanismes. Les principaux moteurs en sont l'eau, la glace, le vent et la gravité.

L'érosion peut aplanir les sols sur une grande surface ou – si elle est causée par des cours d'eau ou des glaciers – entailler la roche et former des vallées. Il faut aux cours d'eau et aux glaciers des milliers d'années pour modifier la surface de la terre. D'autres processus sont plus rapides, tels que les éboulements qui déplacent de grandes quantités de roche en quelques secondes.

L'érosion sera plus ou moins rapide selon le climat, les caractéristiques de la roche ou le soulèvement du sous-sol.

Climat et érosion

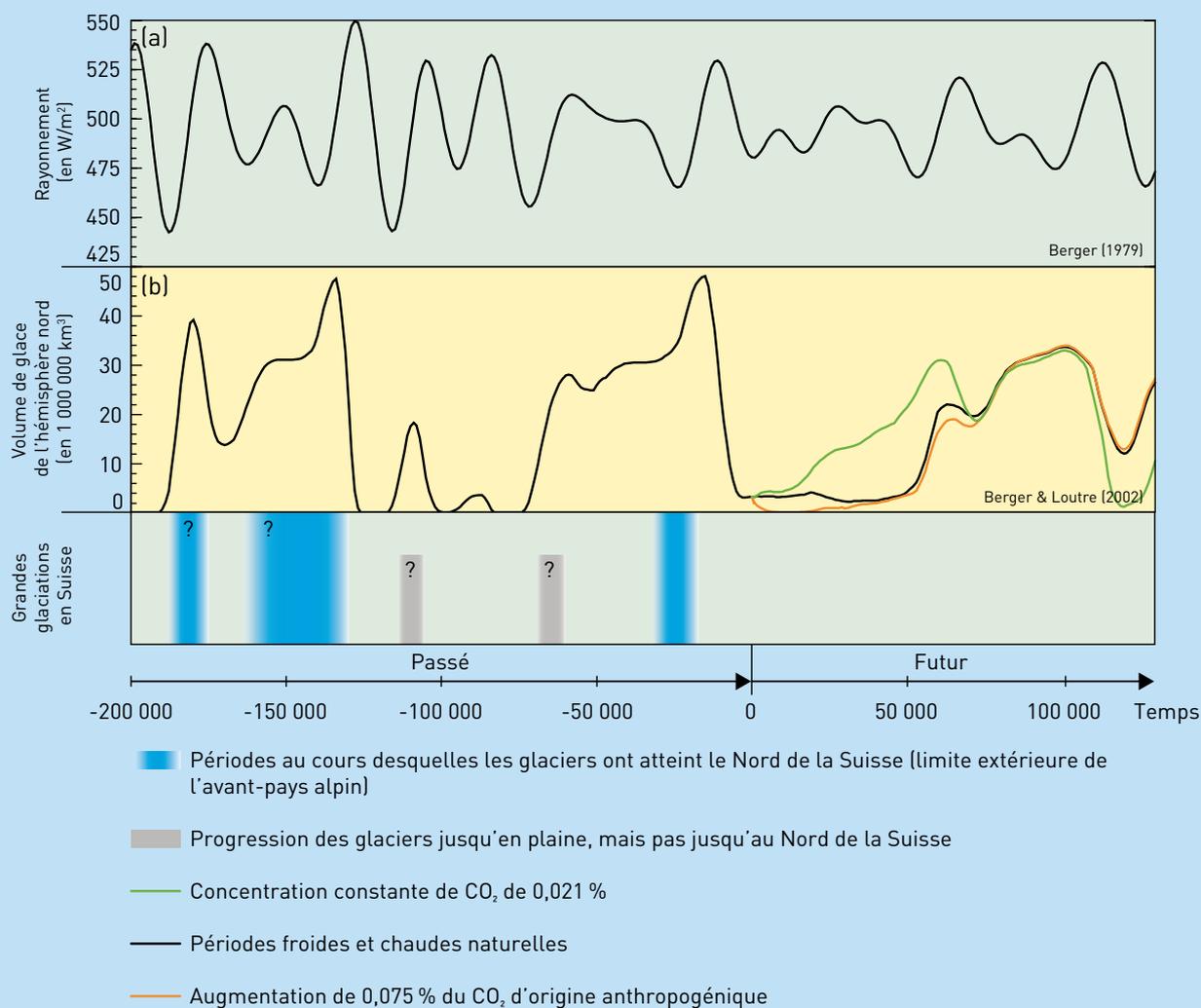
Les phénomènes d'érosion sont largement influencés par le climat. Le fait que les conditions dans une région soient par exemple humides-chaudes ou sèches-froides a des conséquences sensibles sur les taux d'érosion. Les différences de rayonnement solaire, causées par des fluctuations de l'orbite et de l'axe de la terre, déterminent pour une grande part l'évolution du climat. Ces fluctuations sont l'une des causes de l'alternance de périodes chaudes et de périodes froides. Le climat est aussi influencé par l'interaction complexe entre l'atmosphère, les océans et les divers organismes tels que les coraux et les arbres.

La concentration de CO₂ joue ici un rôle capital. Alors que le rayonnement solaire peut être prédit de manière relativement exacte, l'évolution future du CO₂ dans l'atmosphère est quant à elle très incertaine. Il en va de même des autres facteurs qui influencent le climat (voir encadré page 7).

Modèles climatiques

Durant le million d'années à venir, le climat sera vraisemblablement constitué d'une alternance de périodes froides et de périodes chaudes. Le rayonnement à un endroit donné de la terre peut être calculé pour de longues périodes (a). En se basant sur des modèles de calcul, on peut s'attendre à une intense période de glaciation au plus tôt dans environ 50 000 à 60 000 années (b). Le niveau des émissions de CO₂ anthropogéniques est par contre difficilement prévisible. Une forte concentration des gaz à effet de serre pourrait retarder la prochaine période glaciaire. Au moyen de modèles numériques, on a calculé les répercussions possibles de concentrations différentes de CO₂ sur le volume de glace de l'hémisphère nord (b). Pour pouvoir tenir compte correctement des incertitudes au niveau de l'évolution du climat, les effets d'autres évolutions climatiques (par ex. un climat humide et chaud en permanence) sur l'érosion future dans le Nord de la Suisse ont été analysés.

Rayonnement solaire et simulations par ordinateur du volume de glace de l'hémisphère nord durant les 200 000 dernières années et au cours des 130 000 ans à venir



Caractéristiques de la roche et érosion Soulèvement et érosion

Toutes les roches ne sont pas égales au regard des différents types d'érosion. Les roches cristallines ou calcaires sont en général plus difficiles à abraiser que les roches argileuses ou sableuses. Un glacier peut par exemple plus facilement dégrader les roches molassiques (voir glossaire) que le calcaire du Jurassique supérieur, plus dur, qui se trouve en dessous.

La solubilité des différents minéraux présents dans la roche est un autre facteur de résistance. Elle détermine à quelle vitesse un minéral peut être dissout par l'eau. Par exemple, le calcaire se dissout plus facilement que le quartz.

Actuellement, la région alpine se soulève chaque année d'environ un millimètre par rapport au Nord de la Suisse. Les taux de soulèvement diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne des Alpes en direction du Plateau. En revanche, le fossé rhéan au nord de Bâle s'abaisse légèrement (voir figure 3). De manière générale, le soulèvement du sous-sol influence la vitesse avec laquelle l'érosion «travaille». En principe, le creusement des rivières est plus rapide dans les régions où le soulèvement est plus marqué.

Diverses causes peuvent être à l'origine du soulèvement du sol. Le soulèvement des Alpes est d'une part une conséquence directe de la convergence des plaques eurasienne et africaine. Dans d'autres cas, le poids d'un glacier comprime la croûte terrestre. Une fois que le glacier se retire, la croûte terrestre se soulève à nouveau. On trouve l'exemple d'un tel phénomène en Scandinavie. En raison de la fonte de la calotte glaciaire, le soulèvement du sous-sol atteint actuellement jusqu'à un centimètre par an.

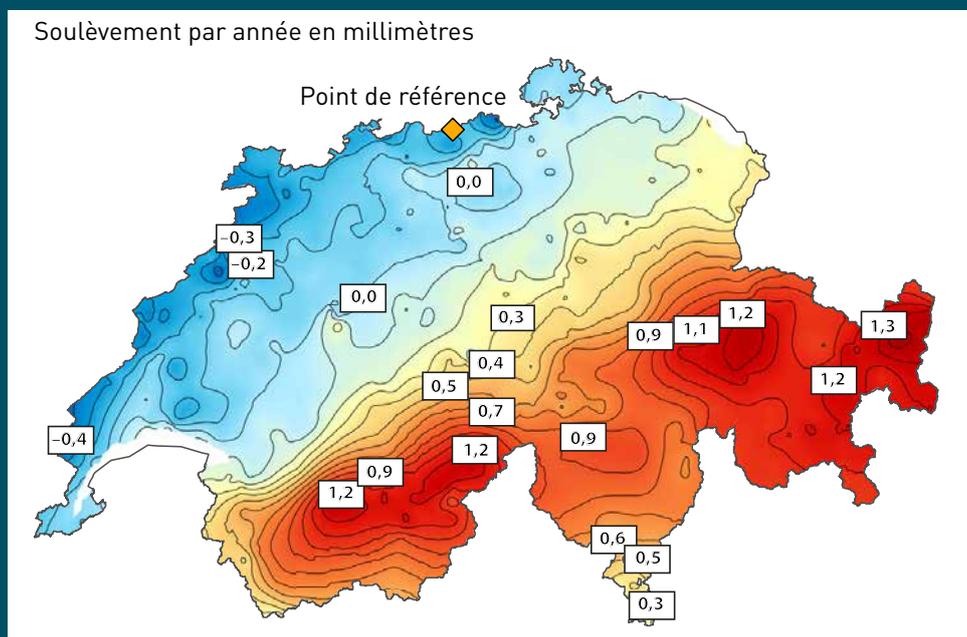


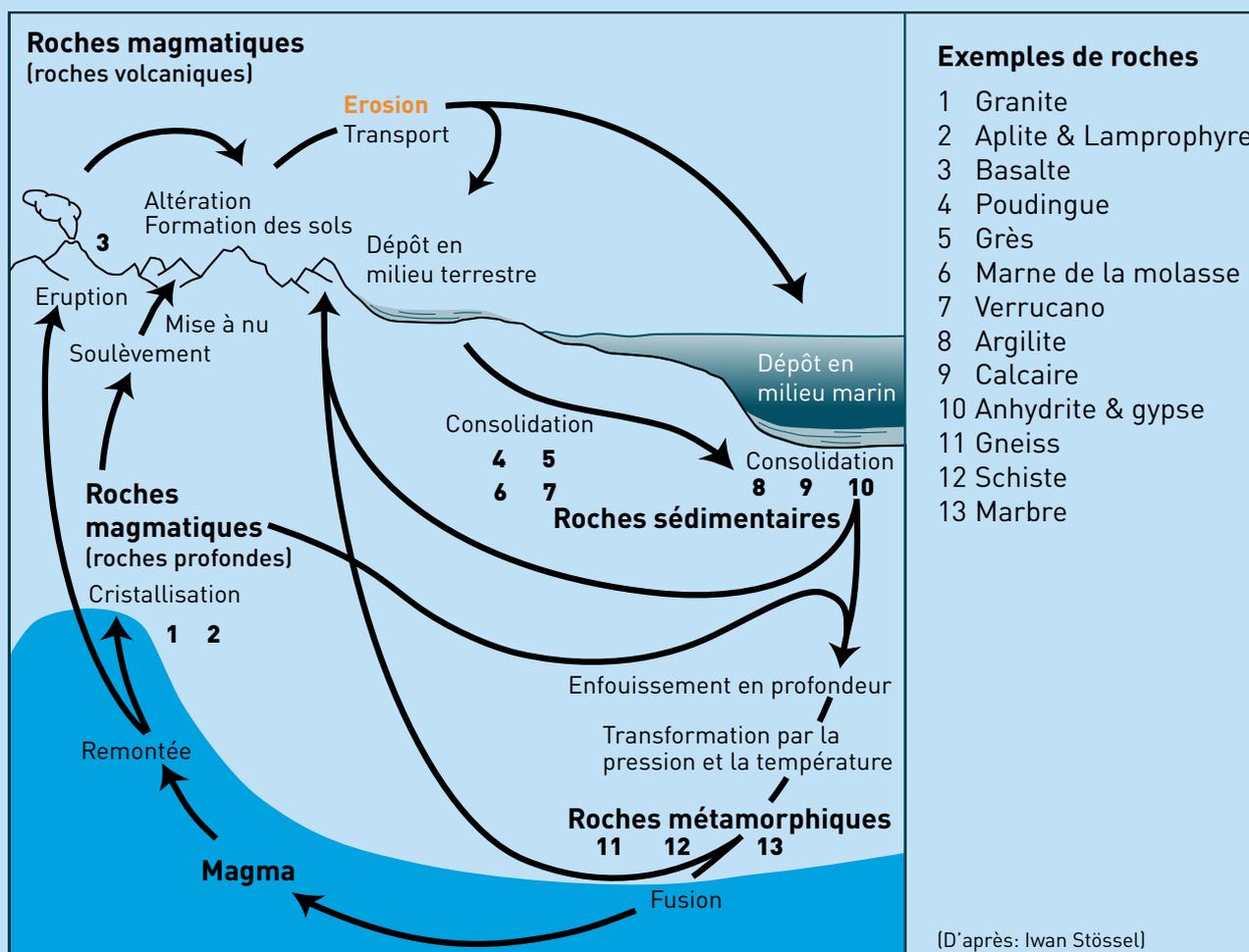
Figure 3

Les mesures effectuées en Suisse au cours des 100 dernières années montrent que les Alpes se soulèvent d'environ un millimètre par an par rapport au Plateau. Graphique: swisstopo

Le cycle des roches

Les roches présentes dans les 30 à 60 premiers kilomètres de la terre, ce que l'on nomme la croûte terrestre, sont régies par un cycle perpétuel. Cette évolution continue forme une roche à partir d'une autre. L'érosion fait partie de ce processus.

Des montagnes se forment et leur surface s'érode. A partir de ces débris d'érosion se forment des roches sédimentaires. Toutes les roches peuvent être enfouies à de grandes profondeurs, où elles peuvent fondre ou se transformer en roches métamorphiques du fait de la pression et des températures élevées. La roche en fusion (magma) se solidifie en profondeur ou en surface sous forme de roches magmatiques. Puis le cycle recommence.



Les cours d'eau

Les cours d'eau façonnent le paysage. Qu'il s'agisse de grands fleuves comme le Rhin ou de petits ruisseaux, tous modifient la topographie.

Avant l'intervention de l'homme, le parcours des grands fleuves sur le territoire de la Suisse actuelle était soumis à de constantes fluctuations. Les cours d'eau débordaient et inondaient les terrains avoisinants sur de vastes surfaces. Le lit d'une rivière se déplaçait parfois rapidement – par exemple à la suite d'une brusque montée des eaux – ou plus lentement sur de nombreuses années. Les processus d'érosion causés par les rivières peuvent être mécaniques ou chimiques. Ils entraînent la mobilisation du matériel rocheux, son transport et sa décomposition chimique. Les sédiments fluviaux ont généralement une forme arrondie, causée par l'entrechoquement des pierres dans l'eau. La trace d'anciens cours d'eaux est ainsi reconnaissable sur le terrain.

L'érosion due aux cours d'eau

Le niveau de base d'un cours d'eau correspond au niveau le plus bas auquel il peut éroder son lit. Ce point est situé généralement à son embouchure dans la mer, mais peut aussi se trouver dans un lac. De la source à son niveau de base, tout cours d'eau tend vers un profil d'équilibre, c'est-à-dire une pente «idéale». Il compensera les irrégularités qu'il rencontre soit en érodant le sol, soit en déposant des sédiments. Les zones localisées au-dessus du profil d'équilibre seront plus facilement érodées. Si le lit du cours d'eau se situe au-dessous, les sédiments s'accumuleront dans son lit.

Les petits cours d'eau et les mouvements de terrain tels que les éboulements ou les coulées de boue s'orientent en fonction du cours d'eau principal le plus proche et l'érosion entraînée ne se poursuivra pas en dessous de son niveau. L'altitude des principaux fleuves détermine ainsi le niveau de base local en fonction duquel le terrain évolue (voir figure 4).



Figure 4
Profil d'équilibre
d'un cours d'eau
(D'après: Press &
Siever 2003)

Qu'est-ce qui influence le niveau de base?

Divers facteurs influencent le niveau de base local:

A la suite **d'un soulèvement ou d'un abaissement** tectonique du sol, le cours d'eau va creuser le terrain ou au contraire déposer des sédiments. Si le soulèvement est supérieur à l'érosion, il en résulte un profil plus marqué. Au contraire, la déclivité s'atténue si l'érosion est plus forte que le soulèvement.

Le type, la taille et la quantité **des sédiments** charriés par un cours d'eau vont avoir un impact sur la force d'érosion de ce dernier. Si la quantité et la taille des granulats augmentent, le pouvoir d'abrasion du cours d'eau sera supérieur, ce qui conduira, à partir d'un certain seuil, à l'augmentation des sédiments transportés. En revanche, de trop grandes quantités de sédiments ou une taille trop élevée du matériel charrié entraîneront le dépôt des sédiments dans le lit de la rivière.

Le **climat** influence aussi le profil d'un cours d'eau. De fortes précipitations favorisent l'érosion et le transport des sédiments. Un climat humide avec beaucoup de précipitations donne lieu à une érosion plus forte et donc à un niveau de base local plus bas.

Le tracé des cours d'eau

Une modification du partage des eaux peut aussi conduire des rivières à inciser la roche environnante (voir figure 5). La déviation de plusieurs cours d'eau vers le Rhin, puis vers la mer du Nord en sont un exemple. De nombreuses rivières du Nord de la Suisse se jetaient autrefois dans le Danube, puis dans la Mer noire. L'agrandissement du bassin versant du Rhin au détriment de celui du Danube se poursuit encore aujourd'hui. Ce phénomène est dû au fait que le Rhin (environ 390 m au-dessus du niveau de la mer près de Schaffhouse) coule à un niveau nettement plus bas que le Danube, qui est encore à 650 m au-dessus du niveau de la mer au nord de Schaffhouse.

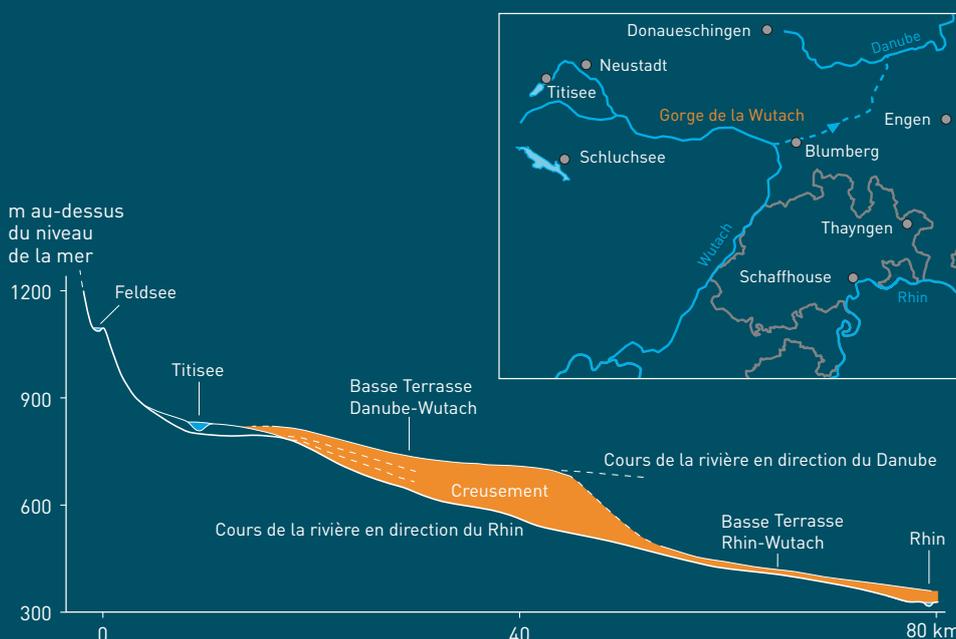


Figure 5

La dernière déviation d'une rivière a eu lieu il y a quelque 18 000 années: la Wutach a dévié son cours en direction du Rhin près de Blumberg, en entaillant la roche pour former les gorges du même nom. (D'après: Einsele & Ricken 1993)

Des témoignages de l'érosion

Sur le terrain, les paysages en terrasse témoignent de l'érosion exercée autrefois par un cours d'eau. Les terrasses alluviales se disposent en plans étagés, généralement de part et d'autre d'une rivière. Ces gradins correspondent aux positions successives du lit du cours d'eau, qui s'est modifié par exemple suite à une augmentation de sa force d'érosion ou à un soulèvement de la surface terrestre. Si la charge sédimentaire est trop importante au regard de la vitesse d'écoulement, le lit du cours d'eau va se remplir à nouveau de roches meubles. Dans le Nord de la Suisse, le creusement continu des rivières est documenté par les dépôts fluviaux (voir figure 6), par exemple au Irchel près de Tössegg ou sur le Cholfirst au sud de Schaffhouse. Ces dépôts nous permettent de reconstituer comment les cours d'eau ont creusé leur lit.

L'horloge géologique fonctionne autrement

Grâce à l'étude des dépôts fluviaux, on observe qu'au cours des quelque deux millions d'années

passées, les rivières au Nord de la Suisse ont entaillé la roche sur des profondeurs allant de 150 à 300 mètres. Les résultats de ces recherches ont été intégrés dans la préparation des scénarios d'érosion et pris en compte pour la délimitation et l'évaluation des périmètres des dépôts dans l'étape 2 du plan sectoriel.

Naissance des sillons d'écoulement fluvio-glaciaires

Les glaciations peuvent entraîner, sur une période de temps relativement courte, d'importantes modifications du cours des rivières locales. Une vallée existante peut être obturée ou comblée par des moraines, de la glace ou des cailloux, ce qui contraint l'eau à chercher de nouveaux passages. Par le passé, il est possible que la formation de nouvelles vallées ait été rapide. La percée du Rhin entre Rüdlingen et l'embouchure de la Töss en est un exemple. Cette vallée est née au cours de la dernière glaciation suite à la formation d'une moraine entre Rüdlingen et le Rafzerfeld. Auparavant, le drainage s'effectuait de Rüdlingen vers l'ouest directement dans le Rafzerfeld (voir figure 7).

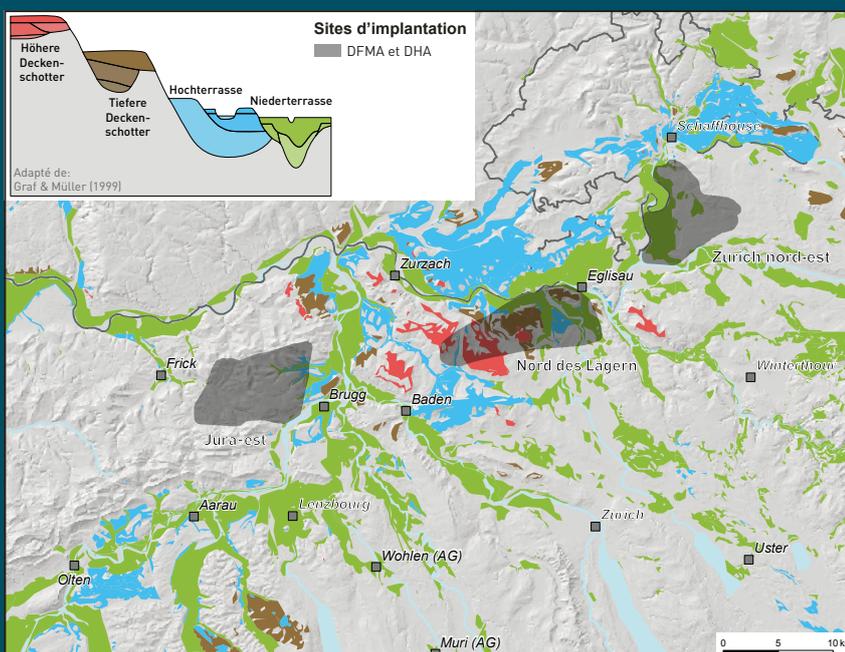


Figure 6

En Suisse, il existe des terrasses fluviales étagées, formées par le creusement successif des rivières. D'une manière générale, les terrasses les plus hautes (Höhere Deckenschotter) sont plus anciennes que les terrasses les plus basses. Elles témoignent des processus de creusement passés. Les dépôts des terrasses inférieures (Niederterrassen) s'étendent largement (en vert). Les dépôts des terrasses supérieures (Höhere Deckenschotter, en rouge) ne sont plus présents qu'à de rares endroits. (D'après: Nagra 2014)

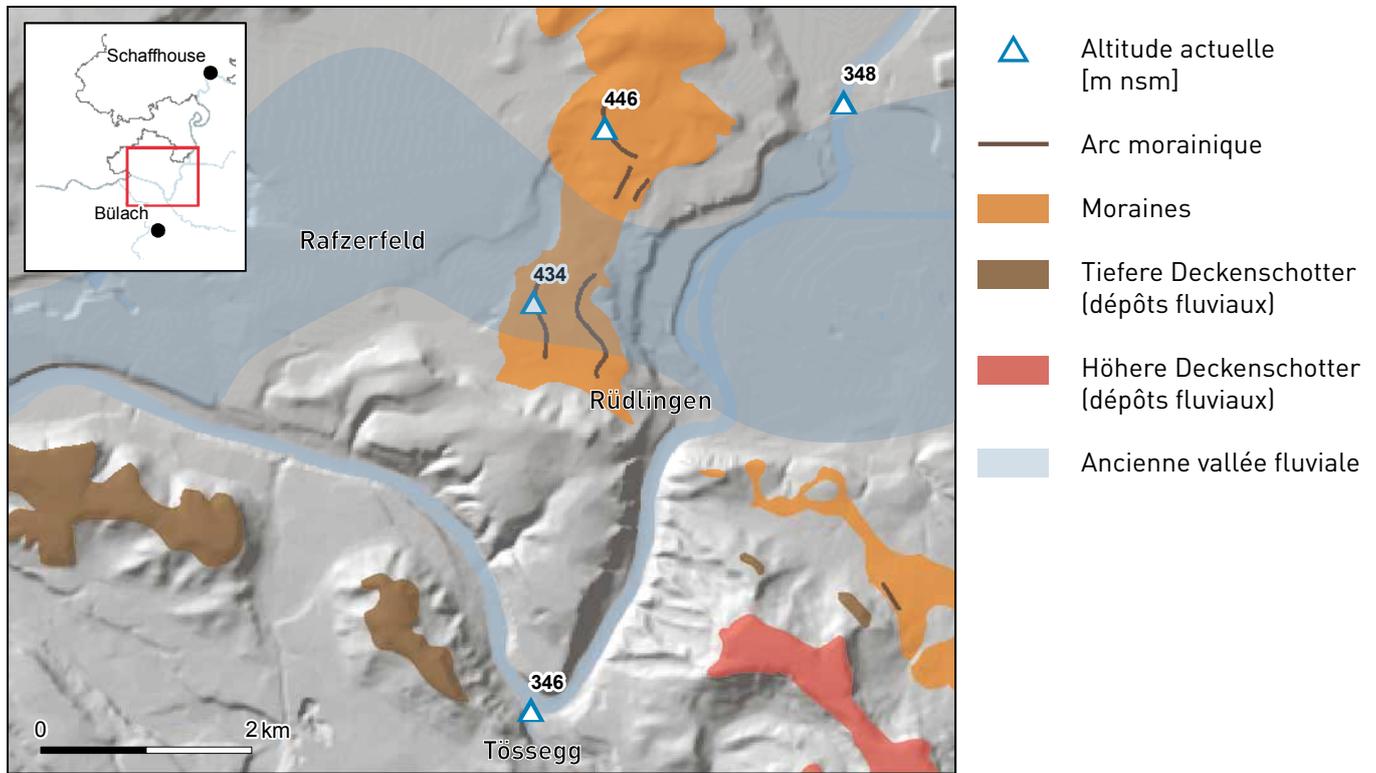


Figure 7

Percée du Rhin entre Rüdlingen et l'embouchure de la Töss: suite à la formation de la moraine, l'eau s'est accumulée et a été déviée à l'endroit le plus bas, à Rüdlingen, en direction de Tössegg. A la suite de quoi, la rivière a rapidement creusé la roche. [D'après: Nagra 2014a]

Les mêmes roches qu'autrefois se forment encore aujourd'hui

On observe le mélange de galets et de sable aussi bien dans les rivières actuelles que dans des dépôts anciens (Höhere Deckenschotter).

Dépôts des terrasses les plus anciennes



Dépôts fluviaux actuels du Rhin



Les glaciers

Les glaciers sont des masses de glace formées par le tassement de couches de neige accumulées. En Suisse, de vastes étendues étaient autrefois recouvertes par des glaciers, dont les traces subsistent encore aujourd'hui dans le paysage.

Comment naissent les glaciers?

Les glaciers se forment lorsqu'il tombe plus de neige qu'il n'en fond. La pression sur les couches de neige plus anciennes augmente alors. La neige se transforme en névé, puis en glace. Ce processus peut prendre de nombreuses années. Si la masse de la glace est suffisamment importante, elle commence à glisser dans le sens de la pente. Un glacier est né.

Quelle est la structure des glaciers?

Dans l'aire d'accumulation, la masse du glacier augmente (voir figure 8). Dans cette zone, les apports en glaces compensent les pertes dues à la fonte. Dans l'aire d'ablation, le glacier perd de son épaisseur du fait de la fonte de la glace.

Comment fonctionne l'érosion glaciaire?

Divers types d'érosion peuvent avoir lieu sous un glacier. Un glacier peut détacher de la roche gelée du sous-sol ou encore abraser le sous-sol par l'intermédiaire de la roche transportée. L'érosion peut abaisser la surface du sol en dessous du niveau de base local.

Les traces laissées par un glacier

Lorsqu'un glacier se retire et libère la roche qui se trouvait en dessous, il subsiste des formes de relief caractéristiques, par exemple des moraines ou des lacs (voir glossaire).

Les masses de glace déplacées créent aussi de nouvelles vallées, approfondissent ou modifient celles qui existent déjà. Ces vallées sont appelées vallées en auge, ou vallées en U, du fait de leur forme caractéristique: leurs parois sont raides, tandis que le fond est plat. On trouve des vallées en auge telles que celle de Lauterbrunnen dans la zone alpine (voir figure 9).

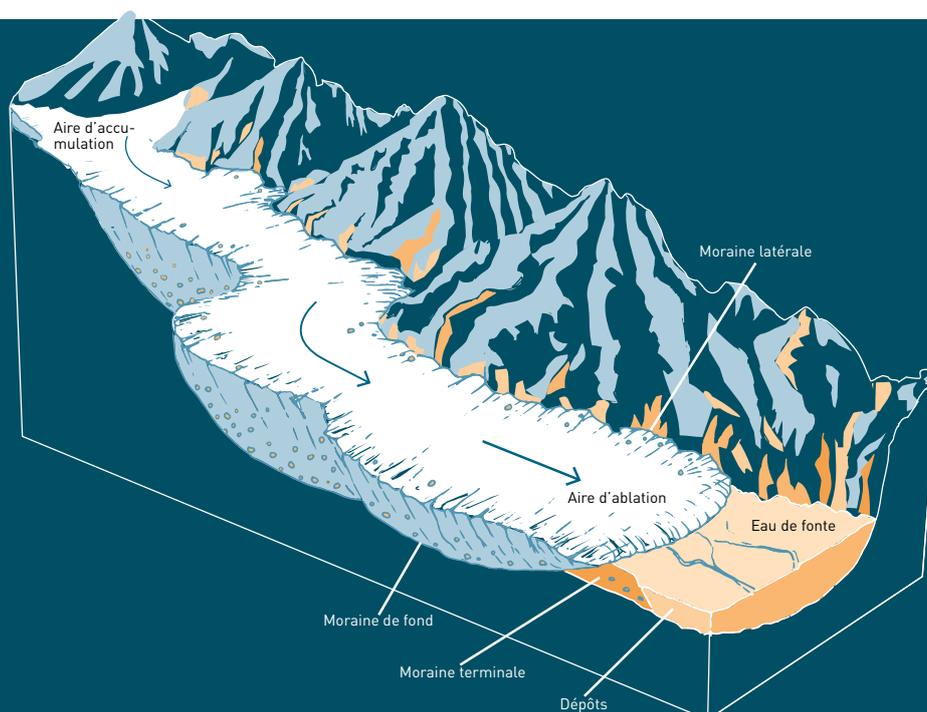


Figure 8

Constitution schématique d'un glacier
[D'après: Press & Siever 2003 | Julia Buschbeck –Illustration scientifique]

Surcreusements glaciaires

Les grandes quantités d'eau de fonte qui s'écoulent sous les glaciers peuvent entraîner une forte érosion. L'eau et les sédiments circulant sous la couverture de glace peuvent franchir la pente d'un obstacle, engendrant en cas d'érosion continue des «sillons surcreusés» dans le lit du glacier (voir pages 16 ss.). Ces sillons peuvent atteindre une profondeur de plusieurs centaines de mètres, en fonction de divers facteurs tels que le type de la roche, le débit d'eau, la vitesse d'écoulement et l'épaisseur du glacier. L'influence exacte de chacun de ces facteurs sur la formation des «surcreusements» fait encore l'objet de recherches.

Un surcreusement d'origine glaciaire se remplit d'eau une fois que le glacier recule. Le lac des Quatre-Cantons ou le lac de Zurich en sont des exemples. Au cours de longues périodes (mille à dix mille ans), les surcreusements apparus se remplissent à nouveau d'alluvions qui sont avant tout transportés dans les lacs par les rivières alpines.

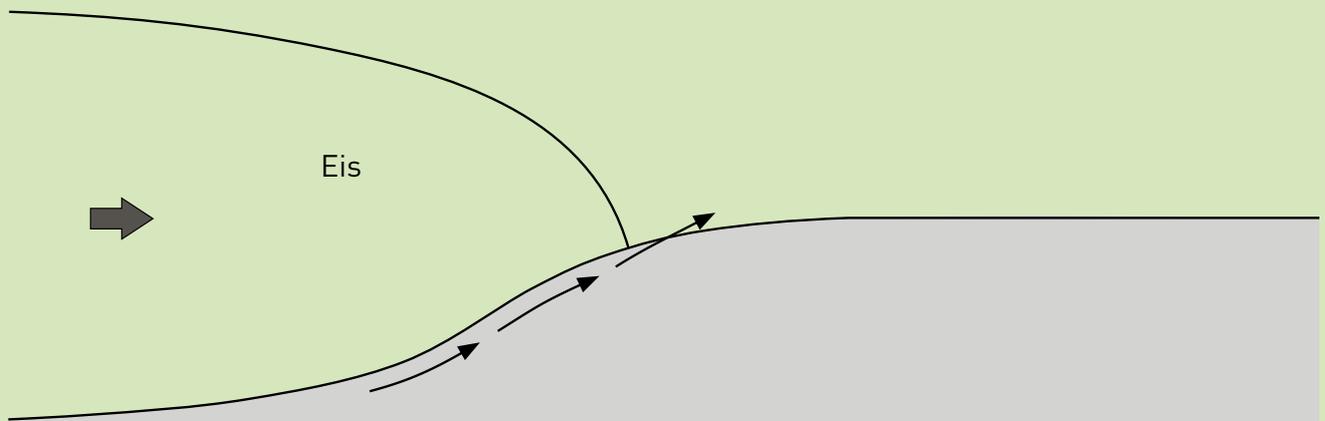
On sait par des forages que les grands surcreusements glaciaires dans le Nord de la Suisse sont généralement profonds de 100 à 300 mètres. Les surcreusements dans la zone des sites d'implantation pour les déchets hautement radioactifs (DHA) font l'objet de plus amples évaluations. Des campagnes sismiques ont déjà été effectuées et des forages exploratoires sont prévus à partir de 2019 (voir pages 20 ss.).



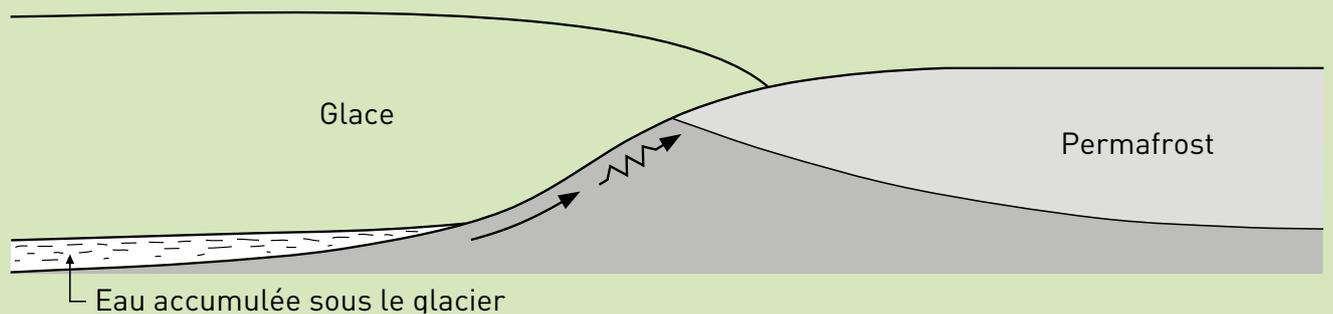
Figure 9

La vallée de Lauterbrunnen est une vallée en U classique avec des parois abruptes. Photo: Jakub Jirsák | Dreamstime.com

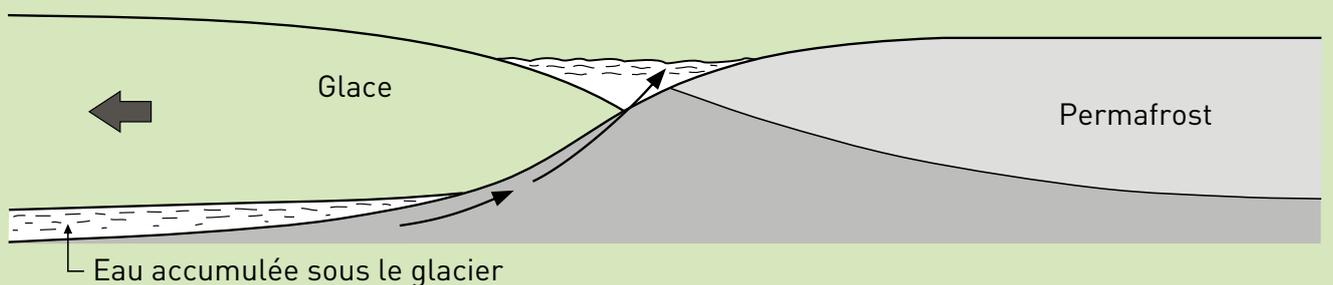
Comment se forme un «surcreusement glaciaire»



Si un glacier avance au cours d'une ère glaciaire, le gradient de pression élevé provoque un écoulement d'eau rapide et un taux d'érosion élevé. Des surcreusements peuvent se former.



Dans des conditions climatiques froides et sèches, un permafrost se forme autour du glacier. Le pergélisol et le glacier peuvent geler ensemble, bloquant sous le glacier l'eau de fonte qui s'accumule.



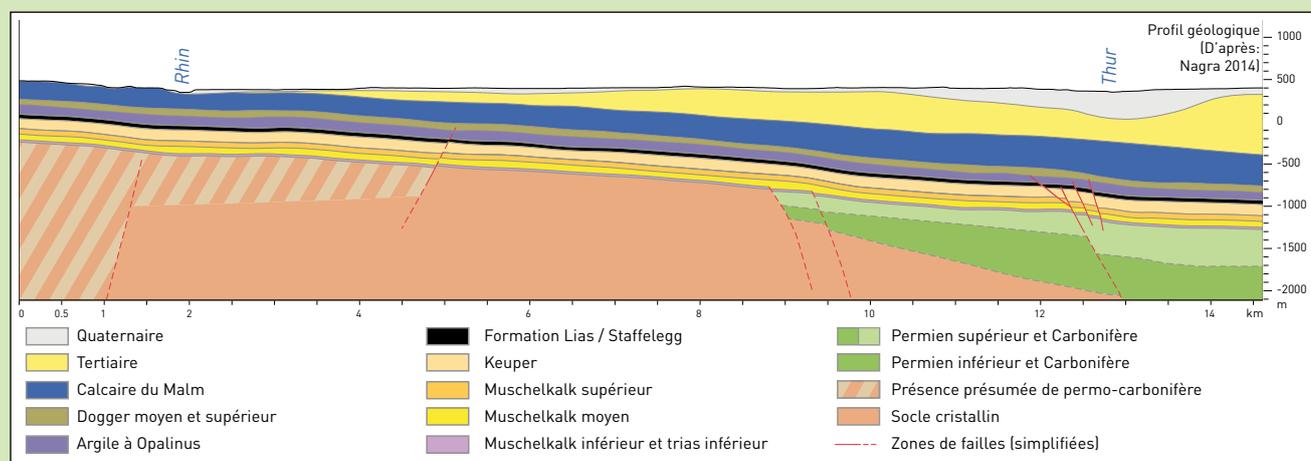
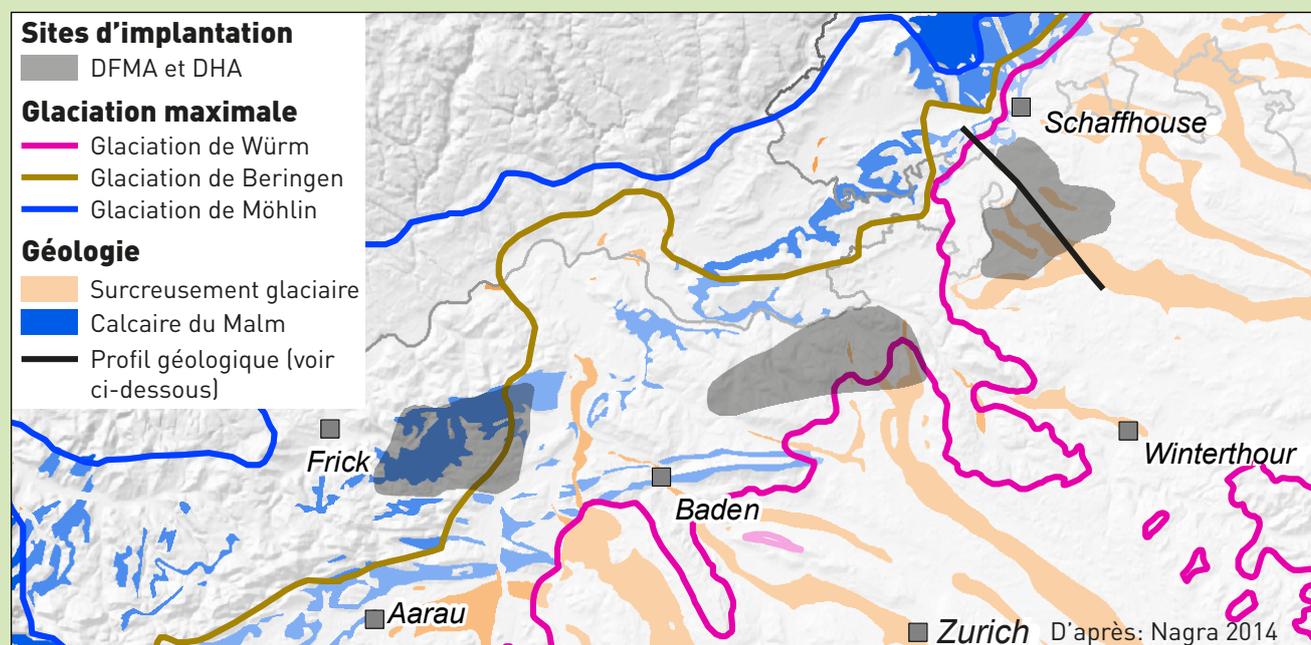
Si le climat se réchauffe, le glacier se retire et le permafrost commence à fondre. L'eau accumulée sous le glacier peut alors s'évacuer. Ceci entraîne une forte érosion au cours de laquelle peuvent se former des surcreusements glaciaires.

(D'après: Piotrowski 1994 et Hooke & Jennings 2006)

Un facteur dans la sélection du site d'implantation

Au cours de l'ère glaciaire, les glaciers ont entaillé la molasse (voir glossaire) du Plateau. Les surcreusements ainsi formés se sont par la suite remplis de roches meubles. Les glaciers futurs suivront de préférence le tracé des vallées existantes. Il est toutefois possible, notamment là où il n'existe pas encore de vallées, que de nouveaux surcreusements se forment.

Ces surcreusements glaciaires ont été pris en considération pour la délimitation des périmètres des dépôts en couches géologiques profondes. Une distance de 500 mètres entre le fond des plus grands surcreusements glaciaires et la couche d'Argile à Opalinus a été respectée lorsque l'on a fixé les périmètres des dépôts pour déchets de haute activité. Cette couverture rocheuse se compose entre autres d'épaisses couches de calcaire (calcaire du Malm; voir figure ci-dessous) qui présentent une plus grande résistance à l'érosion glaciaire en profondeur (voir glossaire) que les roches molassiques situées au-dessus.



L'érosion et les dépôts g

Pour délimiter les domaines d'implantation où la roche d'accueil est à une profondeur idéale, il faut émettre des hypothèses sur l'érosion future.

Pour les processus d'érosion futurs, on étudie divers scénarios qui, s'ils ne constituent pas des prévisions exactes, permettent toutefois de mener une discussion scientifique solide. Reposant sur diverses hypothèses (évolution climatique, taux d'érosion), ces scénarios servent à déterminer la profondeur à laquelle l'Argile à Opalinus, en tant que roche d'accueil, doit se trouver pour que le dépôt géologique soit protégé de manière adéquate et sur les périodes de temps nécessaires.

Au cours de l'étape 2 du plan sectoriel, les aspects suivants ont été pris en considération lors de la délimitation des périmètres de dépôt:

- dégradation homogène du terrain par les cours d'eau et les mouvements de terrain
- glaciations futures avec transport de débris et accentuation des surcreusements glaciaires existants

- apparition de nouvelles vallées et de nouveaux surcreusements au cours de glaciations futures

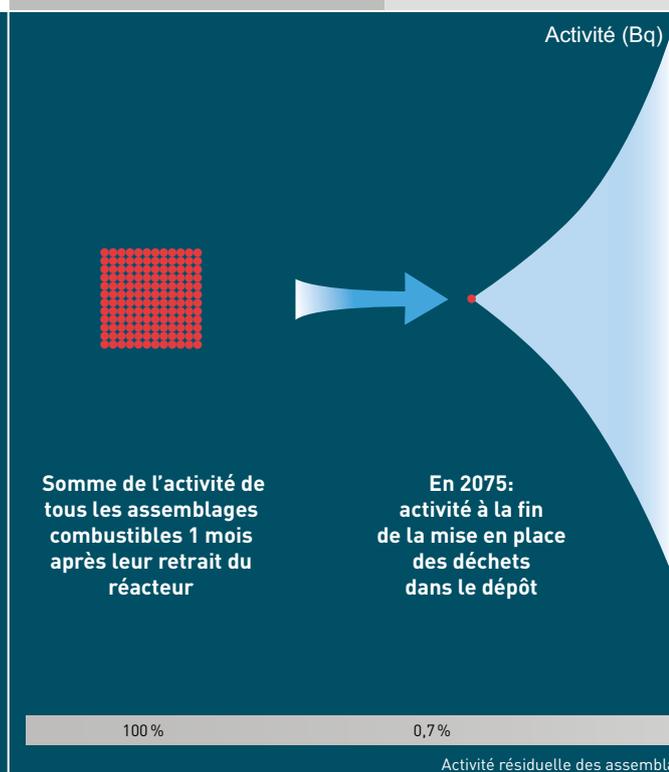
Creusement des principaux cours d'eau

Dans les scénarios, on part du principe que le terrain continuera de se soulever et que les principaux cours d'eau continueront de creuser le substrat rocheux. Le niveau de base local est déterminé par les cours d'eau principaux. L'érosion due aux petites rivières et aux mouvements de terrain n'abrasera pas la roche en dessous de ce niveau. Le creusement futur des cours d'eau principaux est estimé en fonction de l'évolution passée.

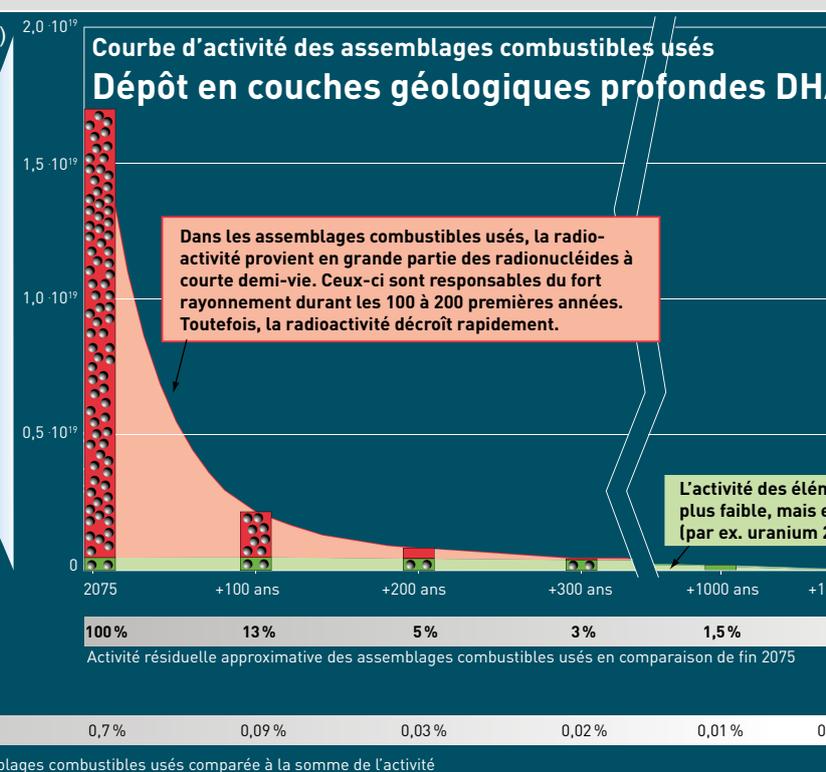
Surcreusements glaciaires

Dans les Alpes et à proximité, les vallées et les surcreusements glaciaires sont souvent très marqués et constituent de ce fait la voie d'écoulement préférentielle pour un nouveau glacier. Sur les terrains plats, la formation de nouveaux glaciers affluents ou de surcreusements sera plus facile.

Déchets dans des dépôts intermédiaires



Déchets dans un dépôt en couches géologiques profondes (stockage terminé en 2075)



éologiques

Dans le bassin molassique au Nord de la Suisse (voir figure 12, page 24), on trouve, en plus de surcreusements plusieurs fois remplis par des débris, divers surcreusements nouvellement créés, ainsi que de nouveaux affluents de surcreusements existants. Ce phénomène peut aussi survenir dans les domaines d'implantation.

C'est pour cette raison que, lors de la délimitation des périmètres de dépôt dans le cadre de l'étape 2 du plan sectoriel, l'érosion glaciaire en profondeur a été prise en considération à double titre, pour Zurich nord-est et le Nord des Lägern:

- En rapport avec l'accentuation des surcreusements existants, la distance entre le fond des plus grands sillons surcreusés et la couche d'Argile à Opalinus doit être au minimum de 500 mètres
- En rapport avec la formation de nouveaux surcreusements, le niveau de base local actuel doit être situé à une distance minimale de 450 mètres dans le périmètre de référence du dépôt (voir glossaire) pour les déchets de haute activité.

La glaciation a été autrefois nettement moins marquée dans le domaine d'implantation Jura-est que les deux autres domaines. A l'avenir également, le phénomène sera plus rare et la couverture glaciaire moins épaisse. Pour la période de confinement d'un million d'années, on a toutefois envisagé la formation d'un sillon d'écoulement fluvio-glaciaire et d'un surcreusement glaciaire au milieu de ce domaine d'implantation. En conséquence, on a respecté une distance minimale de 200 mètres par rapport au niveau de base local.

Apparition de nouveaux sillons

La formation de sillons d'écoulement en rapport avec les glaciations joue un rôle important dans l'érosion du terrain. Si un tel sillon se forme, le creusement est relativement rapide. L'emplacement de nouveaux sillons ne peut pas être prédit exactement. Toutefois, ces sillons n'entailleront pas le substrat rocheux plus profondément que le niveau de base local.



Figure 10

Courbe de l'activité dans un dépôt en couches géologiques profondes pour déchets de haute activité: on estime que des cycles de forte glaciation surviendront dans les Préalpes au plus tôt dans 50 000 à 60 000 années. A ce moment-là, une part considérable des substances radioactives dans le dépôt en couches géologiques profondes se sera désintégrée.

Quelle doit être la durée de confinement des déchets?

La plus grande partie des déchets radioactifs se désintègre rapidement. Après environ 300 ans, la radioactivité dans le dépôt a considérablement baissé. La part des substances radioactives à longues demi-vies rayonne plus faiblement, mais sur une longue période. Dans 200 000 ans, la radiotoxicité des déchets de haute activité (DHA) sera identique à celle de la quantité correspondante de minerai d'uranium naturel utilisé pour produire les assemblages combustibles. La radiotoxicité des déchets de faible et moyenne activité (DFMA) s'abaisse après 30 000 ans au niveau de celle du granite.

Les recherches géologiq

Pour vérifier et affiner les scénarios sur l'érosion à venir, la Nagra effectue des recherches géologiques dans les domaines d'implantation retenus pour la suite de la procédure.

La Nagra examine le sous-sol dans les domaines d'implantation restants par des méthodes telles que la sismique 3D et les forages exploratoires. Ces derniers sont prévus à partir de 2019.

De 2015 à 2017, des campagnes de sismique 3D (voir glossaire) ont été réalisées dans les domaines d'implantation Zurich nord-est, Nord des Lägern et Jura-est. Cette méthode fournit une image en trois dimensions des couches rocheuses du sous-sol. Les données obtenues seront évaluées et intégrées dans la prochaine étape du plan sectoriel.

Les forages fournissent des informations sur les caractéristiques de la roche d'accueil et sur les couches aquifères. Elles servent aussi à l'étalement des mesures sismiques.

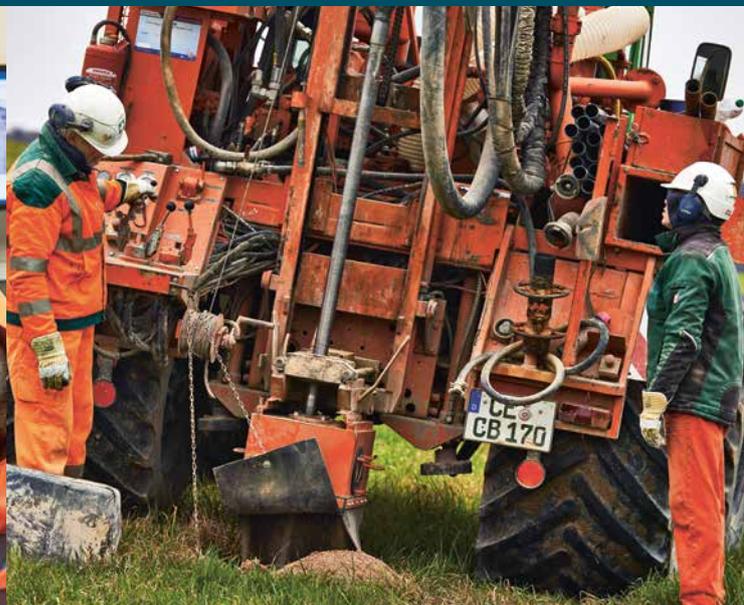
L'érosion est intégrée dans les recherches

Les forages profonds permettront d'obtenir des indications plus précises sur la profondeur de la couche d'Argile à Opalinus, données pertinentes pour évaluer la protection contre l'érosion future. Par ailleurs, en rapport avec l'évolution de l'érosion dans le Nord de la Suisse, la Nagra y effectue en 2018 également des forages quaternaires. Les données de ces forages – dans les roches meubles des surcreusements – permettront de reconstituer les processus d'érosion passés et de faire des prévisions pour l'avenir. Sur cette base, les scénarios d'érosion élaborés seront examinés et affinés au cours de l'étape 3 du plan sectoriel Dépôt en couches géologiques profondes.

Parmi les autres méthodes de recherche utilisées figurent la cartographie géologique et la vérification des affleurements, c'est-à-dire des lieux, par exemple des gravières, où les roches sont visibles



Sismique 3D: contrôle des opérations dans un véhicule de mesure; photo: Beat Müller



Sismique: forage destiné à la charge explosive; photo: Beat Müller

ues

à la surface du sol. L'examen de ces affleurements permet aussi de faire des pronostics sur l'évolution future du relief, en particulier de définir l'influence de l'érosion.

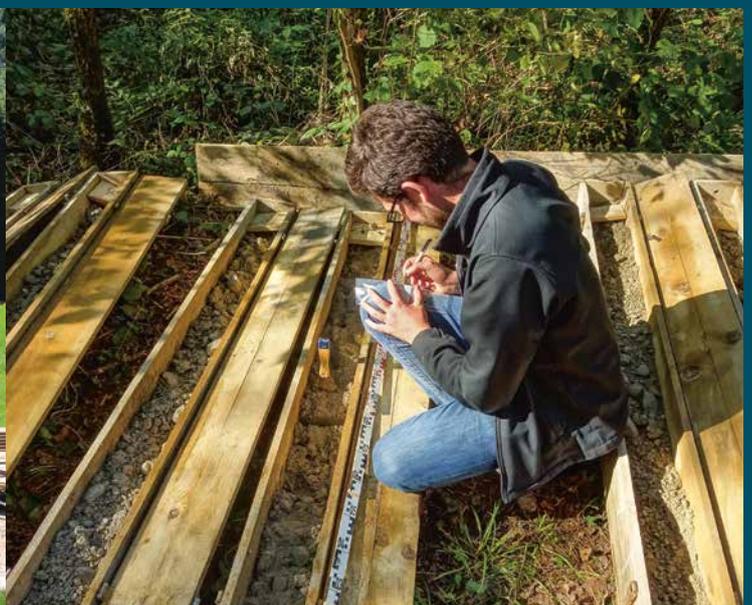
Les résultats seront utilisés pour comparer les domaines d'implantation sous l'angle de la sûreté à l'étape 3 du plan sectoriel. Le but de ces recherches est de constituer une base de données fiable pour étayer les demandes d'autorisation générales (voir ci-dessous).

La poursuite des travaux

Sur la base de ces investigations géologiques, la Nagra annoncera vers 2022 les domaines d'implantation pour lesquels elle formulera des demandes d'autorisation générales pour un dépôt DHA et un dépôt DFMA, ou encore pour un dépôt combiné.

La Nagra soumettra les demandes d'autorisation générales vraisemblablement en 2024. Pour poursuivre la planification concrète de l'infrastructure de surface nécessaire pour le dépôt géologique profond, une collaboration est auparavant prévue avec les cantons d'implantation, les régions et les communes concernées. Suivront un examen des dossiers par les autorités et une large consultation publique. La décision du Conseil fédéral est attendue autour de 2029.

Le Parlement devra ensuite approuver cette décision. La décision du Parlement sera à son tour soumise au référendum facultatif. Si un référendum est lancé, le peuple suisse décidera vers 2031 des sites d'implantation pour dépôts géologiques profonds.



Forage; photo: © Comet Photoshopping, Dieter Enz

Description des roches; photo: Nagra

Conclusions

Dans les domaines d'implantation géologiques, la topographie future sera avant tout influencée par les cours d'eau et les glaciers. L'Argile à Opalinus est protégée de l'érosion par les couches de roches qui la recouvrent et le fait qu'elle soit à une profondeur suffisante.

Les cours d'eau

Pour l'évolution future du niveau de base local, on élabore divers scénarios à partir des connaissances dont on dispose sur le réseau hydrographique passé et actuel. Ces scénarios varient en fonction du type de déchets (différentes périodes de confinement pour DHA et DFMA) et selon les domaines d'implantation.

Les glaciers

Dans les domaines d'implantation Zurich nord-est et Nord des Lägern, on observe des surcreusements glaciaires d'une profondeur de 200 et 300 mètres dans la molasse. Des surcreusements

dans des roches calcaires plus dures, comme il en existe entre la molasse et l'Argile à Opalinus, sont rares et moins profonds.

L'évolution passée montre que l'érosion affecte de préférence les régions où préexistent des vallées et des surcreusements, qu'elle peut accentuer ou élargir. Toutefois, en particulier dans les régions où le terrain est plus plat, de nouveaux surcreusements peuvent aussi se former. C'est pourquoi les scénarios relatifs à l'érosion tiennent compte aussi bien de l'approfondissement ou de l'élargissement que de la formation de nouveaux sillons et surcreusements glaciaires.

Situation dans les domaines d'implantation

Les domaines d'implantation qui sont pris en considération pour l'étape 3 du plan sectoriel pour un dépôt en couches géologiques profondes (Zurich nord-est, Nord des Lägern et Jura-est) se présentent comme suit au regard de l'érosion future:

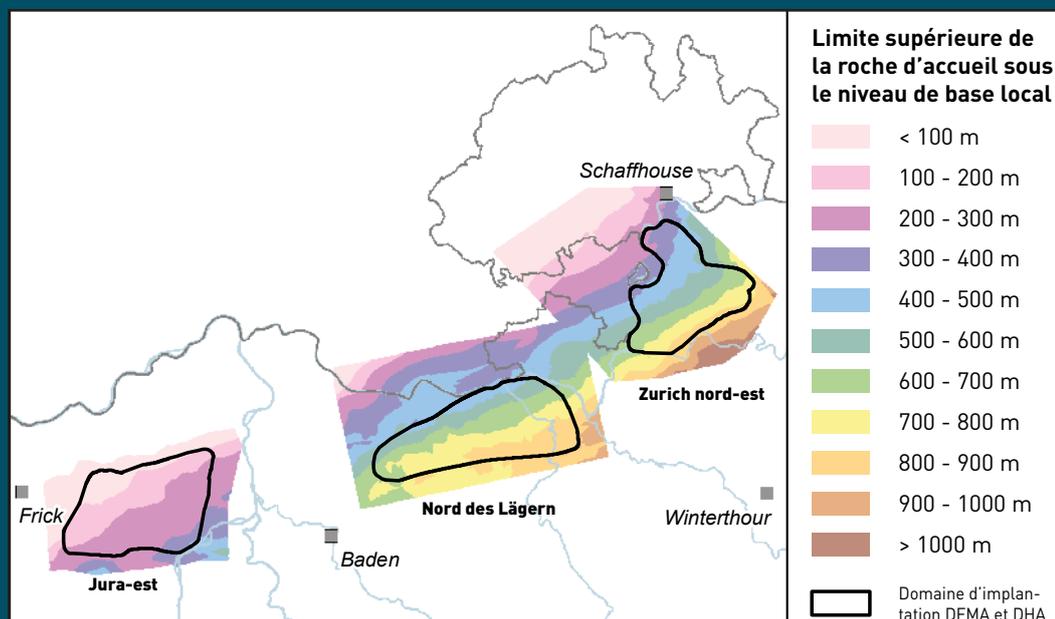


Figure 11
Emplacement de la limite supérieure de la roche d'accueil Argile à Opalinus sous le niveau de base local (D'après: Pietsch & Jordan 2014)

Les glaciations passées ont nettement plus affecté les domaines d'implantation Zurich nord-est et Nord des Lägern que Jura-est. Les deux premiers domaines présentent des surcreusements d'origine glaciaire. En raison du relief assez plat, l'apparition de nouveaux surcreusements y est aussi relativement facile. Les périmètres de dépôt proposés comme référence dans l'étape 2 sont au moins à 450 mètres (Zurich nord-est) et 550 mètres (Nord des Lägern) en dessous du niveau de base local. Dans les deux domaines, il est possible de déterminer des périmètres de dépôts plus profonds (voir figure 11). De plus, d'épaisses couches calcaires sont présentes au-dessus de l'Argile à Opalinus. Leur résistance à l'érosion est nettement plus élevée que celle des marnes et du grès de la molasse.

Le domaine d'implantation Jura-est se présente différemment au regard de l'érosion future. La couche d'Argile à Opalinus y est située à une moins grande profondeur que dans les autres domaines. Dans les périmètres de dépôt proposés, l'Argile à

Opalinus est au moins à 200 mètres en dessous du niveau de base local. Toutefois, le plateau du Bözberg a subi moins de glaciations par le passé et l'épaisseur de glace y était nettement inférieure. Raison pour laquelle le potentiel d'apparition de surcreusements est estimé plus faible pour la période de confinement envisagée. Le creusement d'une nouvelle vallée d'origine glaciaire a toutefois été envisagé dans les scénarios d'érosion: on a supposé que la vallée inférieure de l'Aar serait obturée à la suite d'une glaciation et que l'Aar coulerait dans une nouvelle vallée au milieu du domaine d'implantation. Même dans ce scénario pessimiste, le dépôt ne serait pas mis à nu dans le prochain million d'années.

De ce fait, les trois domaines d'implantation sont protégés suffisamment longtemps contre l'érosion.

Où le dépôt en couches géologiques profondes peut-il être construit?

En principe, tous les domaines remplissent les exigences de sûreté élevées imposées par la Confédération et sont aptes à l'implantation de dépôts profonds. L'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN) l'a confirmé dans son expertise en avril 2017.

A présent, les domaines d'implantation seront examinés plus en détail et comparés entre eux. La Nagra proposera ensuite les sites les mieux adaptés du point de vue de la sûreté pour réaliser les dépôts en profondeur.

Glossaire

Activité

L'activité est le nombre de noyaux d'atomes désintégrés par seconde dans une substance radioactive.

Période de confinement

Par période de confinement, on désigne la période prise en considération pour les analyses de sûreté pour un dépôt en couches géologiques profondes. La période de confinement s'élève à un million d'années pour le dépôt DHA et à 100 000 ans pour le dépôt DFMA.

Sillon d'écoulement fluvio-glaciaire

Si une rivière est bloquée ou une vallée remplie de débris, un sillon d'écoulement fluvio-glaciaire peut se former. L'eau se cherchera un nouveau passage à travers l'obstacle.

Surcreusement glaciaire

Les vallées du Plateau suisse présentent parfois des surcreusements profonds remplis de roches meubles (sables et graviers), qui ont été érodés par des glaciers jusque sous le niveau de base des cours d'eau actuels. L'influence de tels sillons profonds est prise en considération dans le choix du site.

Erosion

La dégradation de la roche et du sol par l'eau, le vent et la gravité.

Erosion glaciaire en profondeur

Formation de sillons d'écoulement rocheux profonds et de vallées surcreusées sous la glace du front glaciaire.

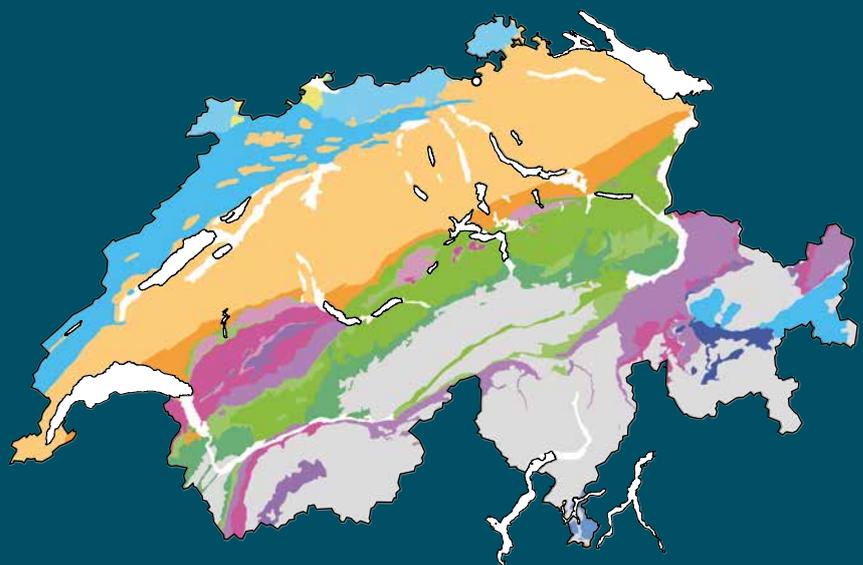
Demi-vie

La demi-vie est la période durant laquelle la quantité et donc la radioactivité d'un certain radionucléide se réduit de moitié par rapport à sa valeur d'origine.

Périmètre de dépôt

Le périmètre de dépôt comprend la zone de la roche d'accueil dans le sous-sol d'un domaine d'implantation la plus adéquate du point de vue de la sûreté pour accueillir un dépôt en couches géologiques profondes. Des périmètres de dépôt de référence ont été utilisés pour comparer les sites sous l'angle de la sûreté à l'étape 2 du plan sectoriel.

- Roches meubles récentes
- Tertiaire du fossé rhénan
- Jura tabulaire
- Jura plissé
- Molasse du Plateau
- Molasse subalpine
- Helvétique nord
- Helvétique au sens strict
- Ultrahelvétique
- Pennique inférieur
- Pennique moyen
- Pennique supérieur
- Nappe de flysch du Pennique supérieur
- Austroalpin inférieur
- Austroalpin supérieur
- Versant sud des Alpes
- «Molasse» sur le versant sud des Alpes
- Couches et massifs cristallins



Basé sur la carte géologique de la Suisse, 1:500 000 © swisstopo

Figure 12
Géologie de la Suisse

Molasse

Débris d'abrasion des Alpes (voir figure 12).

Moraine

Alluvions déposées par les glaciers, comprenant diverses roches de différentes tailles, des particules d'argile aux grands blocs rocheux.

Argile à Opalinus

Roche dans laquelle les déchets radioactifs de la Suisse doivent être confinés. L'Argile à Opalinus s'est déposée il y a environ 173 millions d'années sur le plateau continental de la période jurassique.

Radionucléide

Noyau atomique instable qui se désintègre en émettant un rayonnement radioactif. Il existe des radionucléides naturels et d'autres générés artificiellement.

Radiotoxicité

Désignation de la toxicité radioactive que peut subir un organisme, notamment par ingestion ou inhalation.

«Plan sectoriel Dépôt en couches géologiques profondes»

Le domaine d'implantation pour un dépôt géologique profond est sélectionné en trois étapes dans le cadre du «Plan sectoriel Dépôt en couches géologiques profondes» selon la loi sur l'énergie nucléaire et la loi sur l'aménagement du territoire (voir figure 13).

Sismique

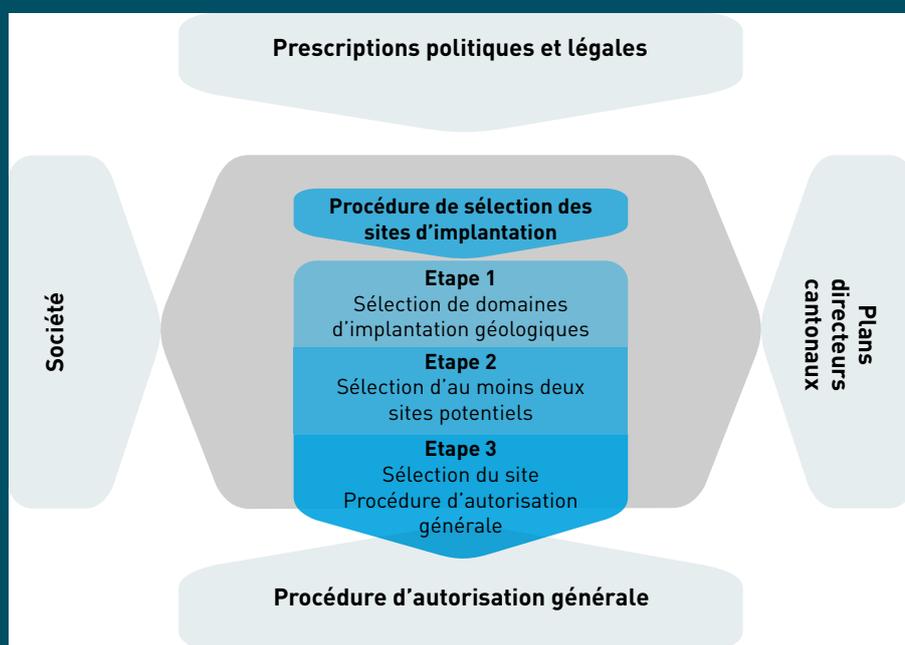
Le sous-sol géologique est étudié par des méthodes de mesures sismiques au moyen d'ondes générées artificiellement.

Profondeur du dépôt

Un dépôt en couches géologiques profondes isole les déchets de l'espace vital de l'homme. Le dépôt doit être implanté à une profondeur suffisante pour que la roche d'accueil et les déchets radioactifs demeurent suffisamment protégés de l'érosion.

Roche d'accueil

La roche d'accueil renferme les tunnels du dépôt profond et joue un grand rôle dans la rétention des radionucléides.

**Figure 13**

Étapes et interdépendances selon le «Plan sectoriel Dépôt en couches géologiques profondes» (graphique selon l'Office fédéral de l'énergie)

Bibliographie

Berger, A. (1979): Long-Term Variations of Daily Insolation and Quaternary Climatic Changes. *J. Atmos. Sci.*, 35, 2362 – 2367.

Berger, A. & Loutre, M.-F. (2002): An Exceptionally Long Interglacial Ahead? *Science*, 297, 1287 – 1288.

Einsele, G. & Ricken, W. (eds.) (1993): Eintiefungsgeschichte und Stoffausttrag im Wutachgebiet (SW-Deutschland). *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe C*, 15.

Graf, H. R. & Müller, B. U. (1999): Das Quartär: Die Epoche der Eiszeiten. In: Bolliger, T. (ed.): *Geologie des Kantons Zürich*. Ott Verlag, Thun, 71 – 95.

Hooke, R. LeB. & Jennings, C. E. (2006): On the formation of the tunnel valleys of the southern Laurentide ice sheet. *Quaternary Science Reviews*, 25, 1364 – 1372.

Pietsch, J. & Jordan, P. (2014): Digitales Höhenmodell Basis Quartär der Nordschweiz – Version 2014 (SGT E2) und ausgewählte Auswertungen NAB 14-02.

Piotrowski, J. A. (1994): Tunnel-valley formation in northwest Germany – geology, mechanisms of formation and subglacial bed conditions for the Bornhöved tunnel valley. *Sedimentary Geology*, 89, 107 – 141.

Press, F. & Siever R. (2003): *Allgemeine Geologie, Einführung in das System Erde*, 3. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg – Berlin.

Pour en savoir plus

Nagra (2014): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage – Geologische Grundlagen Dossier III – Geologische Langzeitentwicklung; NTB 14-02.

Nagra (2014a): Erosion und Landschaftsentwicklung Nordschweiz – Zusammenfassung der Grundlagen im Hinblick auf die Beurteilung der Langzeitstabilität eines geologischen Tiefenlagers (SGT Etappe 2); NAB 14-25.

«Standortgebiete für geologische Tiefenlager – Sondierbohrungen für Etappe 3», August 2017

«Radioaktive Abfälle – Woher, wieviel, wohin?», März 2017

«Bohrungen für Quartäruntersuchungen», März 2017

«Langzeitsicherheit – Die Hauptaufgabe der Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle», Oktober 2015

«Domaines d'implantation pour dépôts géologiques profonds – Evaluation comparative de la sûreté: propositions pour l'étape 3», janvier 2015

Vous pouvez télécharger ou commander ces documents sur www.nagra.ch à la rubrique «Téléchargements / Publications».

Nationale Genossenschaft für die
Lagerung radioaktiver Abfälle
(Société coopérative nationale pour le
stockage des déchets radioactifs)

Hardstrasse 73
Case postale 280
5430 Wettingen
Suisse

Tél. 056 437 11 11
Fax 056 437 12 07

info@nagra.ch
www.nagra.ch
www.nagra-blog.ch

nagra.