

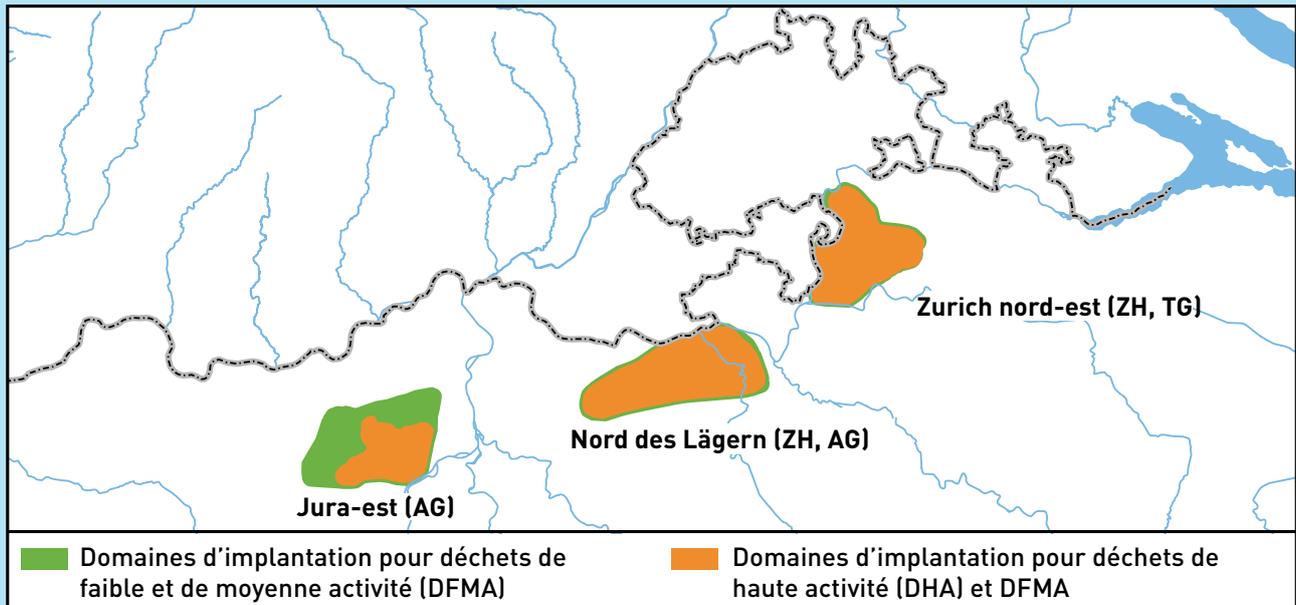
# les forages profonds

pour  
les investigations  
géologiques



nagra.

## À propos de ce cahier



La Nagra prévoit une série de forages d'exploration (plus précisément de forages profonds) dans les trois domaines d'implantation potentiels, Jura-est, Nord des Lägern et Zurich nord-est. Les travaux doivent commencer début 2019.

Le présent cahier explique les objectifs de ces forages et leur déroulement. Il présente en outre différentes méthodes utilisées pour étudier la géologie. Il évoque enfin comment les résultats vont servir à la comparaison des domaines d'implantation du point de vue de la sûreté, comparaison que la Nagra réalisera dans le cadre de la troisième et dernière étape de sélection des sites pour les dépôts en couches géologiques profondes.

Pour la définition des termes techniques utilisés, reportez-vous au glossaire (pages 24 s.).

### Les forages profonds pour les investigations géologiques

La Nagra publie à intervalles irréguliers des cahiers thématiques relatifs au stockage des déchets radioactifs.

Septembre 2018

Photo de couverture: Julia Buschbeck – Illustration scientifique

**Les étapes de la procédure**

4 – 5

La recherche de sites d'implantation pour le(s) dépôt(s) en profondeur en Suisse est définie dans le plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes» de la Confédération. La sélection des domaines pour les déchets de faible et de moyenne activité ainsi que pour les déchets de haute activité se fait en trois étapes. Chaque étape se conclut par une décision du Conseil fédéral.

**La comparaison des sites du point de vue de la sûreté**

6 – 7

Pour comparer les domaines d'implantation entre eux, la Nagra se basera sur les investigations géologiques pour répondre à plusieurs interrogations relatives au sous-sol.

**Les informations fournies par les forages profonds**

8 – 15

Les investigations se concentrent sur la roche d'accueil, l'Argile à Opalinus, et sur les formations encaissantes situées juste au-dessus et en dessous. Il s'agit notamment de déterminer l'épaisseur des couches, leur profondeur, leur composition ou leur perméabilité.

**Les différentes phases d'un forage**

16 – 17

Un forage en profondeur de la Nagra est un projet complexe, divisé en plusieurs phases.

**Comment se déroule un forage profond?**

18 – 23

Le travail proprement dit commence une fois le site aménagé et le dispositif de forage installé.

**Glossaire**

24 – 25

**Les demandes d'autorisation de forage?**

26 – 27

# Les étapes de la procéd

La recherche de sites d'implantation pour le(s) dépôt(s) en profondeur en Suisse est définie dans le plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes» de la Confédération.

L'Office fédéral de l'énergie (**OFEN**) dirige la procédure du plan sectoriel. L'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (**IFSN**), en sa qualité d'autorité de surveillance, contrôle les investigations menées

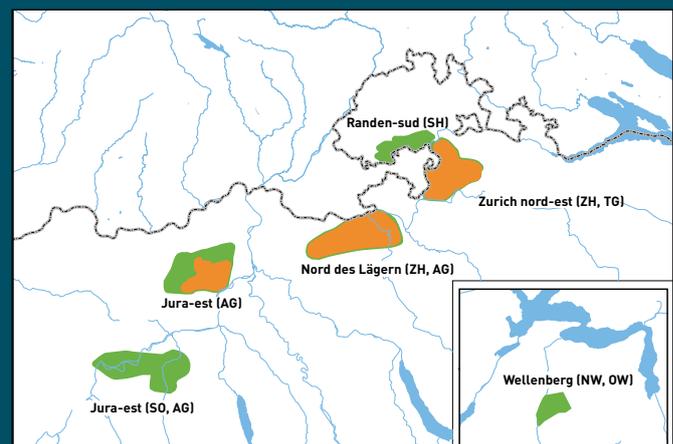
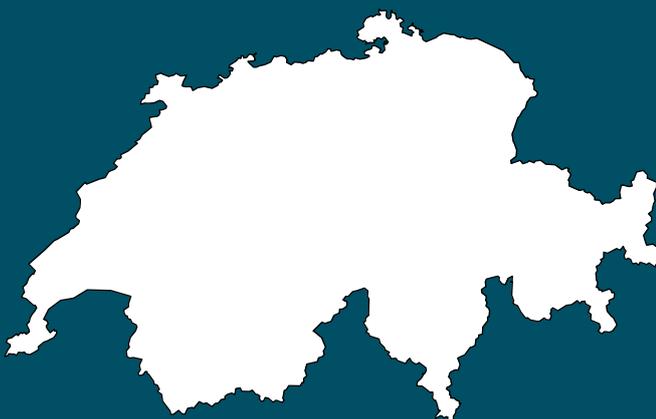
par la **Nagra** dans les domaines d'implantation. Le groupe d'experts Stockage géologique en profondeur (**GESGP**) soutient l'IFSN. La Commission de sécurité nucléaire (**CSN**) guide le Conseil fédéral, le Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (**DETEC**) ainsi que l'IFSN. Les cantons, les communes des régions d'implantation, les États voisins et la population participent également à la procédure.

Au cours de la **première étape** du plan sectoriel, la Nagra a déterminé – en partant du territoire suisse dans son ensemble – plusieurs grands domaines géologiques et des roches d'accueil potentielles. En **2008**, elle a proposé les domaines d'implantation suivants: pour un dépôt DHA et DFMA, Jura-est, Nord des Lägern et Zurich nord-est; en outre, pour un dépôt DFMA, Pied sud du Jura, Randen-sud et Wellenberg. À l'issue d'une vaste consultation concernant les résultats de l'étape 1, le Conseil fédéral a décidé, fin novembre **2011**, de retenir la totalité des propositions pour la suite de la procédure.

Au cours de la **deuxième étape**, la Nagra a procédé à une comparaison des domaines du point de vue de la sûreté, proposant alors de retenir Jura-est et Zurich nord-est pour les investigations géologiques de l'étape 3. En **2016**, les cantons et l'IFSN ont recommandé d'inclure également le domaine d'implantation Nord des Lägern dans la sélection. La décision du Conseil fédéral concernant l'étape 2 est attendue fin **2018**.

Point de départ: Le territoire suisse / Critères de sélection : Sûreté et faisabilité tec

Décision du Conseil fédéral à l'étape 1



# ure

Au cours de la **troisième et dernière étape** de la sélection des sites d'implantation pour dépôts en profondeur, les trois domaines retenus seront étudiés plus en détail. Ces investigations sont nécessaires afin de comparer plus précisément les domaines sélectionnés sur le plan de la sûreté.

Les investigations géologiques visent entre autres à déterminer la profondeur et l'épaisseur de la roche (Argile à Opalinus) qui accueillera le dépôt profond, sa perméabilité et sa composition. On s'intéressera également aux caractéristiques des formations encaissantes, à savoir les roches situées en dessous et au-dessus de l'Argile à Opalinus.

Le programme de recherches englobe notamment les campagnes sismiques déjà effectuées ainsi que les investigations quaternaires et les forages profonds. Ces derniers viendront compléter les connaissances géologiques dont on dispose déjà sur les régions d'implantation.

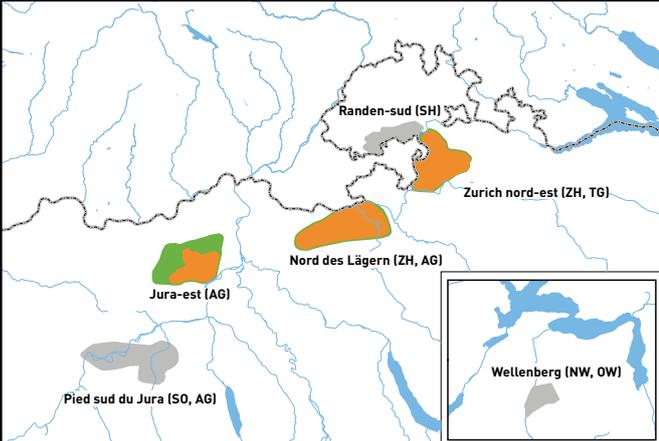
Grâce à ces données supplémentaires, la Nagra pourra procéder à une sélection des domaines d'implantation en vue des demandes d'autorisation générale\* (cf. glossaire, encadré). Ces demandes seront probablement déposées en **2024**. Après un examen approfondi par l'IFSN, le Conseil fédéral se prononcera en **2029** environ, puis les demandes d'autorisation générale seront soumises au Parlement. La décision de l'Assemblée fédérale est elle-même soumise au référendum facultatif.

\* Dépôts DFMA et DHA ou dépôt combiné

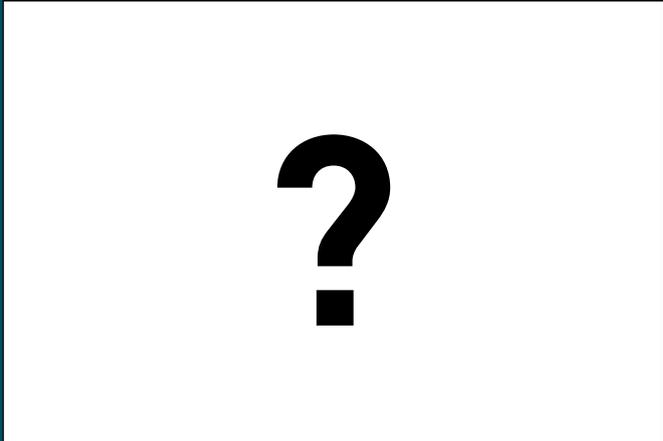


## hnique

Propositions de la Nagra et rapport d'expertise de l'IFSN relatif à l'étape 2



Demandes d'autorisation générale pour un dépôt DFMA et un DHA ou pour un dépôt combiné



# La comparaison des sites sûreté

Pour comparer les domaines d'implantation entre eux, la Nagra se basera sur les investigations géologiques pour répondre à plusieurs interrogations relatives au sous-sol, par exemple :

## Quel est l'espace disponible pour un dépôt en profondeur ?

Les mesures sismiques fournissent une image précise du sous-sol géologique. Grâce aux campagnes sismiques 3D, il est par exemple possible de connaître la situation des couches rocheuses sur un vaste territoire. Ces informations permettent de déterminer l'espace disponible et de savoir par exemple si cet espace est limité par des perturbations.

## Quelle est l'épaisseur de la roche d'accueil et des formations encaissantes ?

Un forage profond va permettre d'explorer la barrière géologique ou la «zone de confinement géologique» sur un site donné. Cette zone comprend l'Argile à Opalinus ainsi que les formations imperméables situées directement en dessous et au-dessus (roches encaissantes) qui vont retenir les

substances radioactives appelées radionucléides (cf. glossaire). Grâce aux forages profonds, on pourra connaître précisément l'épaisseur des couches traversées.

## Quelle est la structure des roches ?

Les forages profonds permettent également de prélever des échantillons de roches. En analysant ces derniers et en effectuant différentes mesures dans le forage, il sera ainsi possible de déterminer la perméabilité des roches et leur composition chimique.

## À quelle profondeur placer le dépôt ?

Les campagnes sismiques et les forages profonds dans les domaines d'implantation ne sont pas suffisants. Pour apprécier la sûreté à long terme d'un dépôt profond, il faut également étudier les dépôts quaternaires. Ceux-ci documentent l'histoire récente de la Terre, par exemple l'érosion liée aux glaciers dans les régions concernées. Grâce à ces données, on pourra estimer à quelle profondeur un dépôt restera suffisamment protégé de l'érosion à l'avenir.



**Tableau**

Différents types d'investigations fournissent des informations pour comparer les domaines d'implantation du point de vue de la sûreté.

**Figure 1**

De gauche à droite et de haut en bas : expériences menées dans des laboratoires souterrains, forages quaternaires, études sur le terrain et mesures sismiques (photos : © Comet Photoshopping, Dieter Enz ; Nagra ; Ernst Müller ; Beat Müller)

# s du point de vue de la

Le plan sectoriel énonce un total de 13 critères répartis en quatre groupes, sur la base desquels les domaines d'implantation devront être comparés du point de vue de la sûreté.

Critères		Investigations				
		Forages profonds	Campagnes sismiques 3D	Investigations quaternaires	Essais en laboratoire souterrain	Essais en laboratoire, analogues naturels
<b>Propriétés de la roche d'accueil</b> (ou de la zone de confinement géologique)	Extension géographique	●	●	●		
	Capacité de confinement hydraulique	●			●	●
	Conditions géochimiques	●			●	●
	Cheminements préférentiels (cf. glossaire)	●	●		●	
<b>Stabilité à long terme</b>	Stabilité des caractéristiques du site et des roches	●	●	●		
	Érosion	●		●		●
	Perturbations provoquées par le dépôt	●			●	●
	Conflits d'exploitation (cf. glossaire)	●	●			
<b>Fiabilité des informations géologiques</b>	Caractérisation des roches	●			●	
	Exploration des conditions spatiales	●	●			
	Prévision de l'évolution à long terme			●		
<b>Adéquation sur le plan de construction</b>	Propriétés et conditions géomécaniques	●			●	●
	Ouvrages d'accès souterrains et maîtrise des eaux (cf. glossaire)	●	●			

● Source d'information principale

● Complément d'information important

● Information supplémentaire

# Les informations livrées



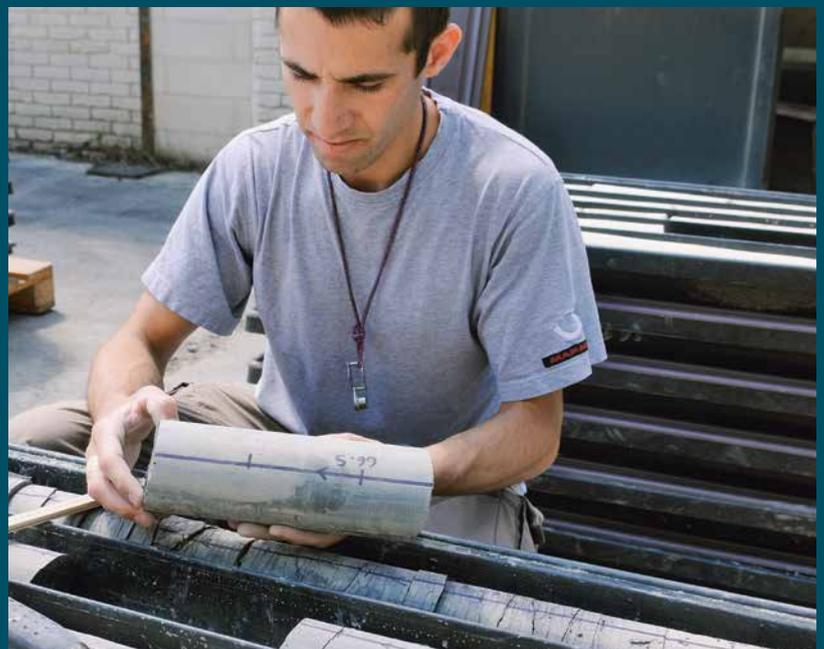
Les investigations se concentrent sur la roche d'accueil, l'Argile à Opalinus, et sur les formations encaissantes situées juste au-dessus et en dessous. Il s'agit notamment de déterminer l'épaisseur des couches, leur profondeur, leur composition ou leur perméabilité.

## Quelle est l'épaisseur des formations et à quelle profondeur se situent-elles?

Les carottes issues des forages profonds (voir fig. 2) ainsi que les débris de forage sont traités et étudiés par un géologue (cf. page 18). Celui-ci documente le forage et établit un profil le plus complet possible.

L'identification des roches se fait directement sur place. Il est ainsi possible de constater au fur et à mesure l'épaisseur des différentes couches traversées et la profondeur à laquelle elles se situent.

Ces paramètres (épaisseur et profondeur) doivent être déterminés très exactement pour la roche d'accueil, l'Argile à Opalinus, dans laquelle le dépôt



# par les forages profonds

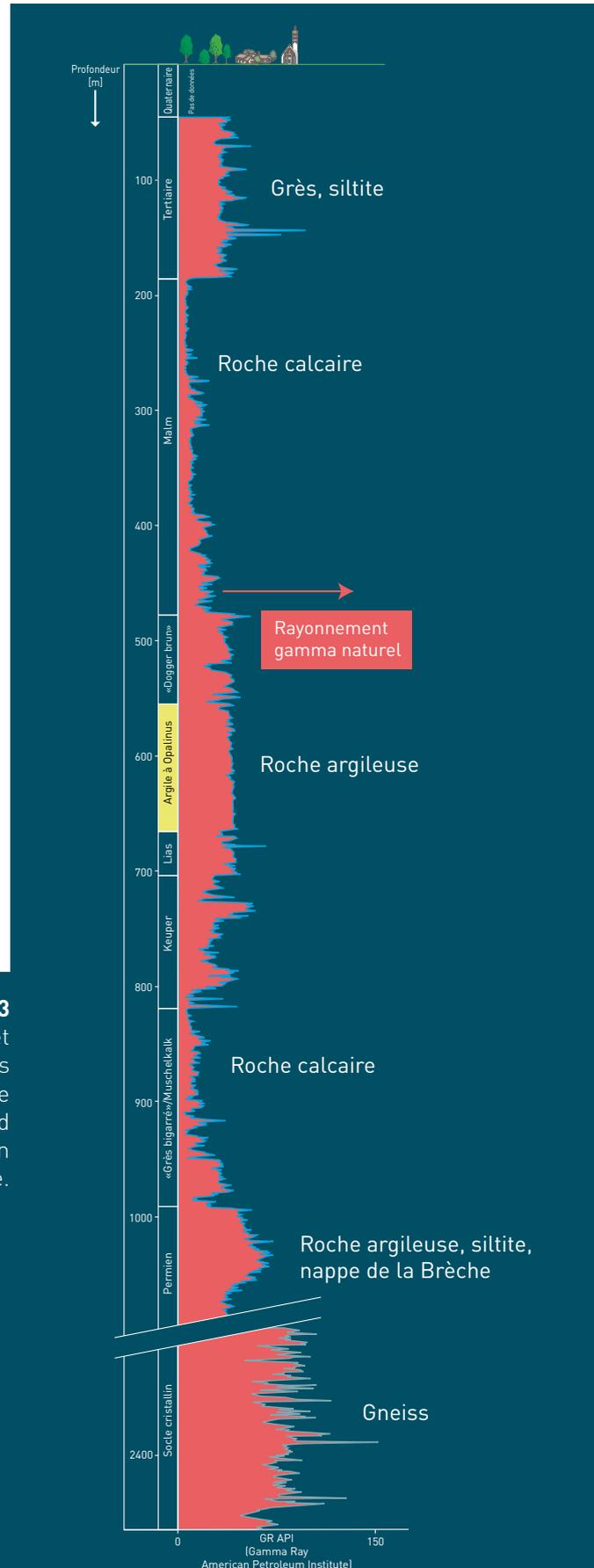
doit être aménagé. Selon l'état actuel des connaissances, la couche d'Argile à Opalinus a une épaisseur d'environ 100 m dans les trois domaines d'implantation potentiels. La profondeur est importante également pour garantir dans le futur une protection adéquate contre l'érosion.

## Quelle est la composition des formations rocheuses?

Pendant la phase d'exploitation, des mesures sont effectuées dans forage et en laboratoire afin de déterminer la composition des roches, par exemple leur type, les proportions des différents minéraux, la teneur en argile, etc.

### Rayonnement gamma naturel: indication de la perméabilité et de la teneur en argile

La mesure du rayonnement gamma naturel de la roche est un examen important dans le forage (voir fig. 3). Toute roche contient des isotopes (cf. glossaire) radioactifs naturels, qui émettent des rayons gamma en se désintégrant. En passant par exemple d'une roche calcaire à une formation argileuse, on



**Figure 3**

La mesure du rayonnement gamma naturel permet de déterminer les transitions entre les formations rocheuses à l'intérieur du forage. L'exemple ci-contre montre le forage profond de Weiach (Unterland zurichois). L'Argile à Opalinus, roche d'accueil d'un dépôt en profondeur, est signalée en jaune.

**Figure 2**

Page 8 à gauche: les carottes de forage sont nettoyées, puis photographiées. Celle qui est représentée ici provient du forage de Benken, à une profondeur d'env. 945 m (photo: Nagra).  
Page 8 à droite: un géologue mesure et documente les carottes obtenues (photo: © Comet Photoshopping, Dieter Enz).

observe une variation de la radioactivité naturelle. Il est ainsi possible de repérer la transition entre les différents types de roche. Les résultats permettent de déduire la teneur en argile des roches, car les minéraux argileux contiennent du potassium. Or, ce dernier comprend une part importante d'isotopes radioactifs. La teneur en argile d'une roche détermine son degré d'imperméabilité. Les minéraux argileux sont en outre importants pour la rétention des radionucléides issus des déchets radioactifs.

### Les roches sous le microscope

Sur les carottes, on prélève à la scie des échantillons à partir desquels on produira des lames minces. Ces dernières ont une épaisseur d'environ trente micromètres, soit la moitié du diamètre d'un cheveu humain. Ces lames minces sont examinées avec des microscopes spéciaux. Il est ainsi possible de déterminer la répartition des différents minéraux dans la roche et leur orientation, puis sur cette base, le type de roche, son âge (grâce aux fossiles), ainsi que les cheminements préférentiels potentiels des radionucléides.

### Quel est le degré de perméabilité des roches?

La perméabilité de la roche d'accueil devrait être la plus faible possible. C'est l'une des propriétés essentielles de l'Argile à Opalinus et des roches encaissantes. Cette caractéristique empêche que des radionucléides ne soient transportés par l'eau. On peut mesurer la perméabilité à l'aide d'essais faisant intervenir des obturateurs appelés «packers».

Les packers (voir fig. 4) sont des outils primordiaux pour les examens réalisés dans les forages. Ils permettent d'isoler une section particulière (section d'essai, voir fig. 5 ci-contre). Des conduites assurent l'accès à la section isolée, par exemple pour des capteurs de mesure.



**Figure 4**

La partie sombre du packer, située entre les deux parties métalliques bleues, est faite de caoutchouc et permet d'obstruer le forage (photo: Nagra).

**Figure 5**

Page 11 à droite: représentation schématique d'un système à deux packers. Dans la partie du forage ainsi isolée, il est possible de déterminer la perméabilité de la roche ou, dans les roches perméables, de prélever des échantillons d'eau.

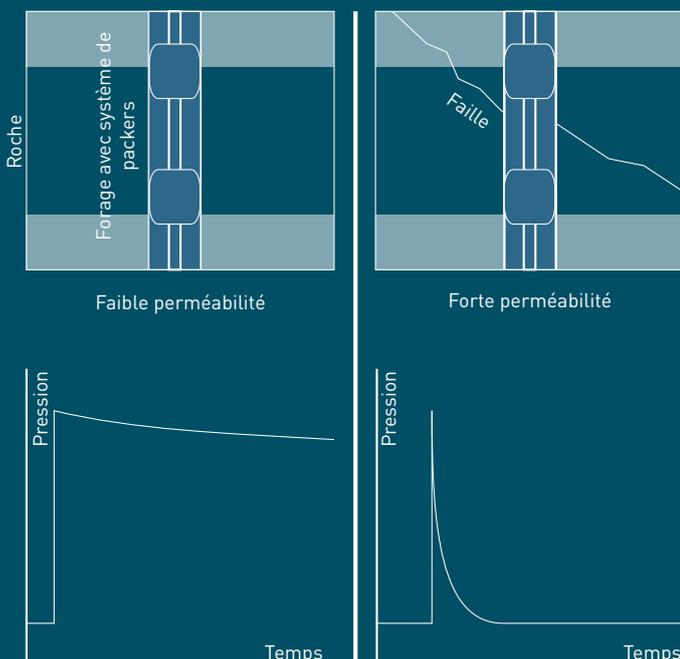
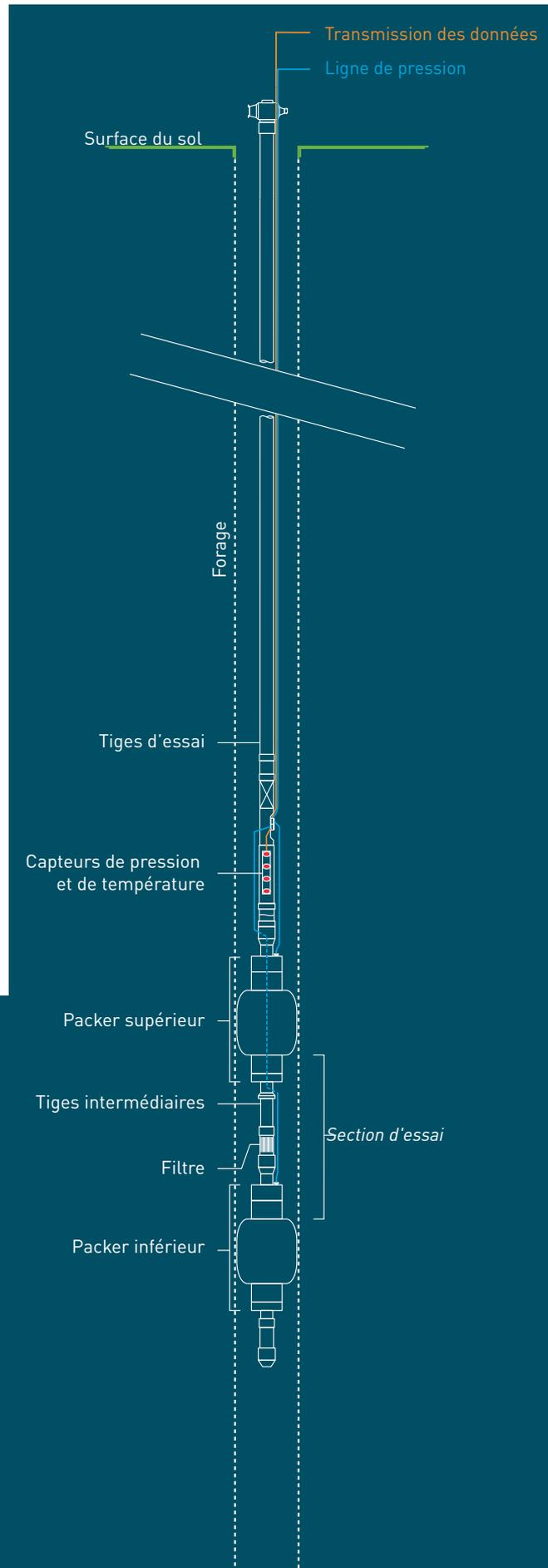
Page 11 à gauche: schéma de la mesure de la perméabilité dans deux roches différentes.

**Perméabilité: mobilité de l'eau dans la roche**

Pour déterminer la perméabilité, on augmente la pression dans la section d'essai. Si la roche présente une faible perméabilité, la pression reste constante ou ne diminue que lentement. En revanche, si la roche est très perméable, la pression baisse rapidement (voir fig. ci-dessous).

**Hydrochimie: analyse chimique d'échantillons d'eau**

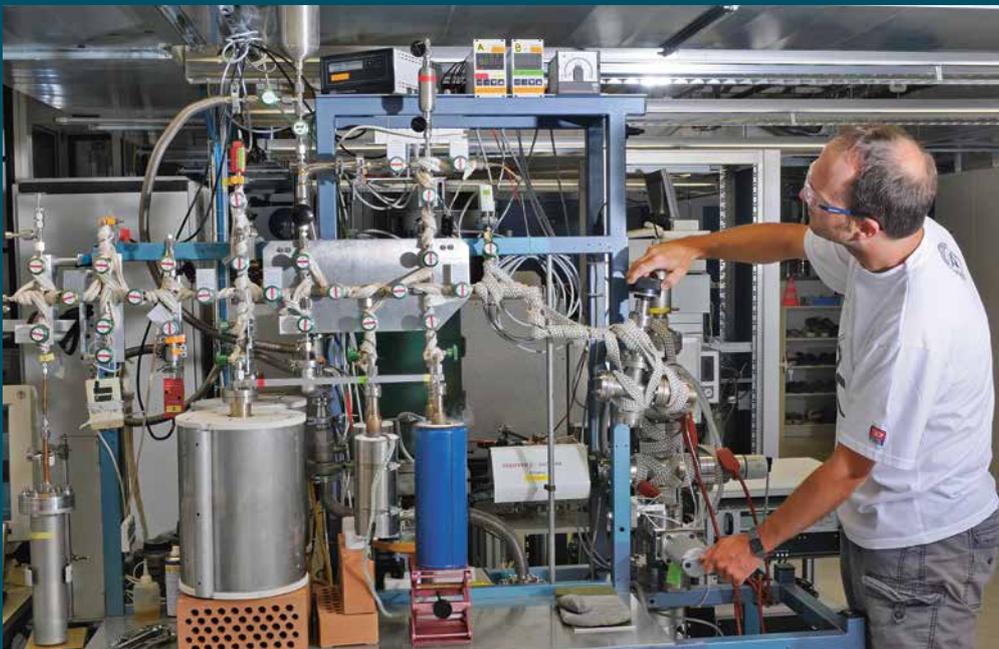
Dans les roches perméables, on peut prélever des échantillons d'eaux souterraines et les analyser, c'est-à-dire déterminer les substances et les gaz qui y sont dissouts. Ces informations permettent notamment de déterminer l'âge et les temps de résidence des eaux.



Dans les roches imperméables telles que l'Argile à Opalinus, il est difficile de prélever un échantillon d'eau afin de l'analyser. L'eau dite « interstitielle » piégée dans les pores de la roche doit être extraite à l'aide de procédés complexes (voir fig. 6). Les substances que l'on y trouve fournissent des indices précieux sur son âge. L'examen de cette eau apporte des informations sur la manière dont les matières dissoutes peuvent se déplacer dans la roche par diffusion. Ces données servent de base pour mieux évaluer la capacité de rétention.

### **L'âge de l'eau interstitielle permet d'estimer la sûreté à long terme**

Prenons l'exemple de l'Argile à Opalinus. Cette formation vieille d'environ 173 millions d'années contient encore 10 à 20 grammes de sel dissout par litre d'eau interstitielle. Ce sel provient de la mer où l'Argile à Opalinus a sédimenté. Cette eau de mer, enfermée dans la roche depuis des dizaines de millions d'années, montre à quel point l'Argile à Opalinus peut confiner des substances sur de très longues périodes.



**Figure 6**

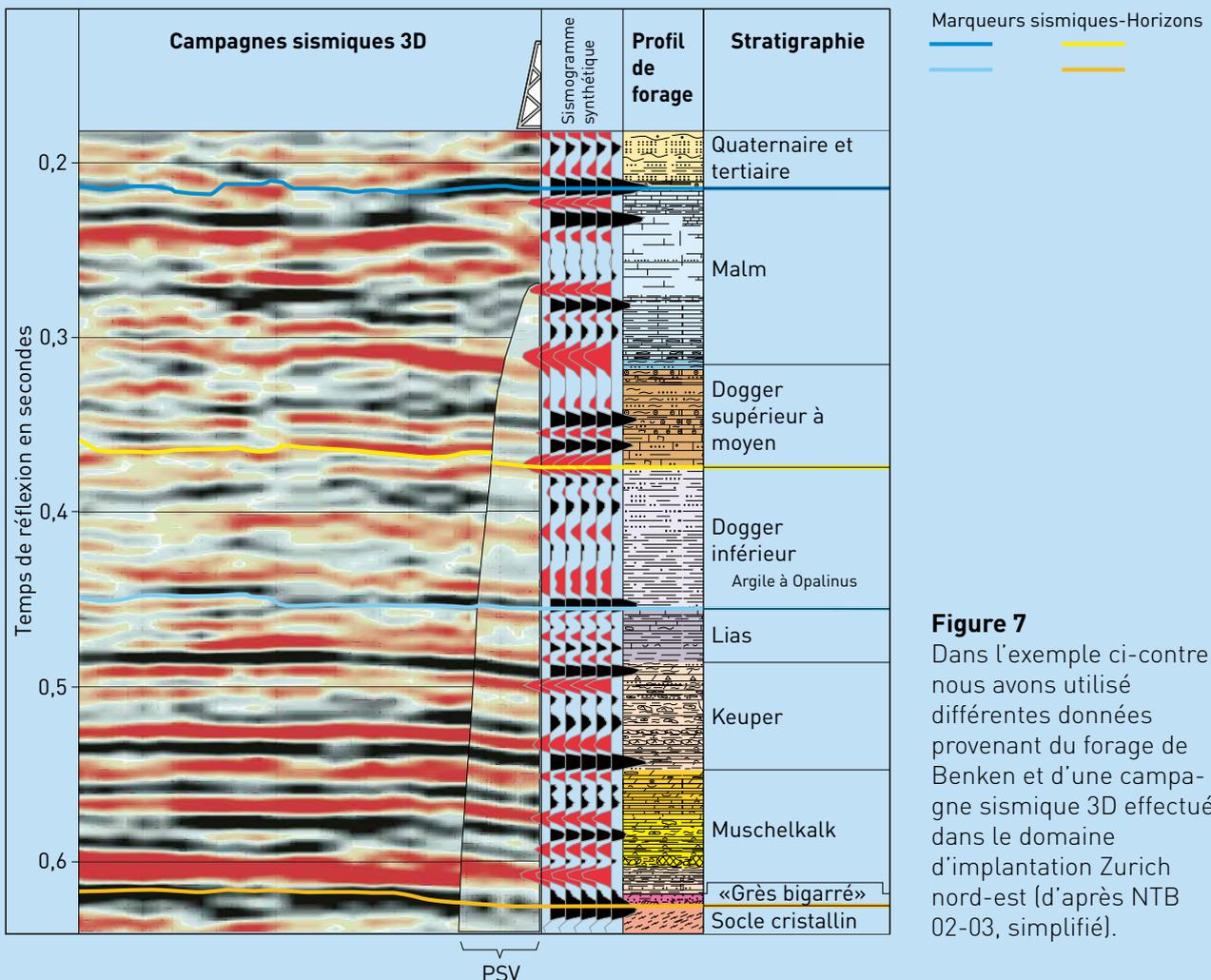
L'eau interstitielle doit être extraite des roches par des procédés parfois très complexes afin d'en déterminer les composants (photo: © Comet Photo-shopping, Dieter Enz).

## Sismique et forages se complètent mutuellement

Les campagnes sismiques 3D visent à déterminer la géométrie du sous-sol, à savoir les limites entre les couches rocheuses (partie gauche de la fig. ci-dessous). Elles ne permettent toutefois pas de connaître en détail les propriétés des roches. Pour ce faire, il faut des forages (partie droite de la fig. ci-dessous). Combinés, ces deux examens fournissent une image fiable du sous-sol géologique.

Les roches traversées par le forage (profil de forage) sont analysées et leurs propriétés physiques déterminées. Sur la base de ces informations, un sismogramme synthétique est calculé. Dans le forage, une sismique de puits est effectuée et un profil sismique vertical (PSV) est établi. Les données fournies par ces examens permettent de calibrer les résultats des campagnes sismiques 3D.

Il en résulte une connaissance approfondie des couches rocheuses et de leur répartition spatiale ainsi que de la tectonique.



**Figure 7**  
 Dans l'exemple ci-contre, nous avons utilisé différentes données provenant du forage de Benken et d'une campagne sismique 3D effectuée dans le domaine d'implantation Zurich nord-est (d'après NTB 02-03, simplifié).

## Autres mesures

Un grand nombre d'autres mesures sont effectuées directement dans le forage, sur place ou, ultérieurement, dans un laboratoire externe.

En font partie notamment:

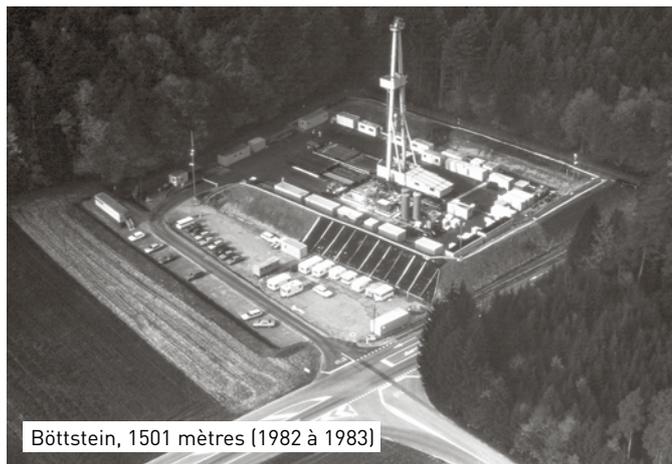
- Détermination de la densité et de la porosité des roches dans le forage
- Mensuration du forage et détermination de l'état du cuvelage (voir glossaire) et du ciment qui l'entoure (cf. pages 20 et 21).
- Mesure en laboratoire des propriétés géomécaniques d'échantillons de roche

## Pas de fracturation hydraulique

Aucun type de stimulation n'est prévu dans le cadre des travaux de forage et d'expérimentation. Lors de l'extraction de pétrole et de gaz naturel ainsi que pour l'exploitation de l'énergie géothermale, le but est d'augmenter la perméabilité des roches par la fracturation hydraulique ou fracking. Ce n'est pas le cas pour les essais de la Nagra. Il n'y a par conséquent pas lieu de craindre que les forages déclenchent des tremblements de terre.

### Figure 8

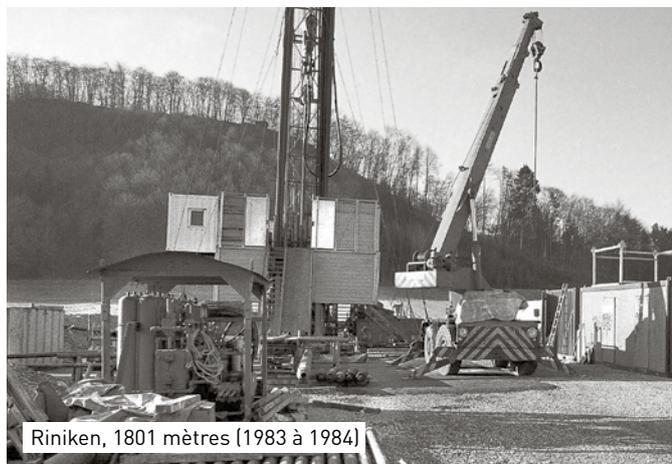
Une vaste expérience: la Nagra a réalisé jusqu'ici, dans le nord de la Suisse, huit forages d'une profondeur de 1000 à 2500 mètres (toutes les photos: © Comet Photoshopping, Dieter Enz; sauf deuxième rangée à droite: Nagra).



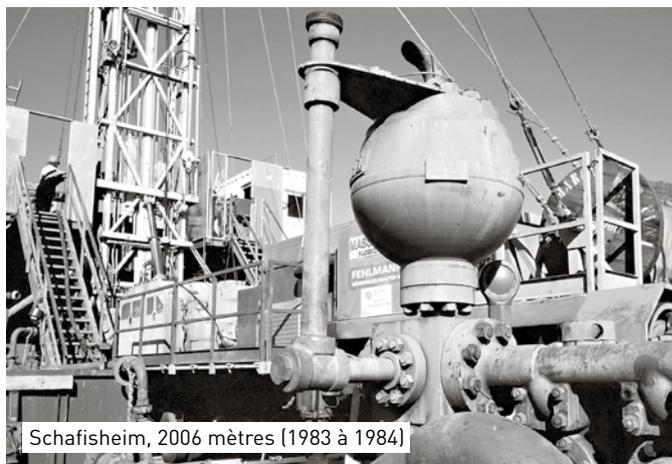
Böttstein, 1501 mètres (1982 à 1983)



Weiach, 2482 mètres (1983)



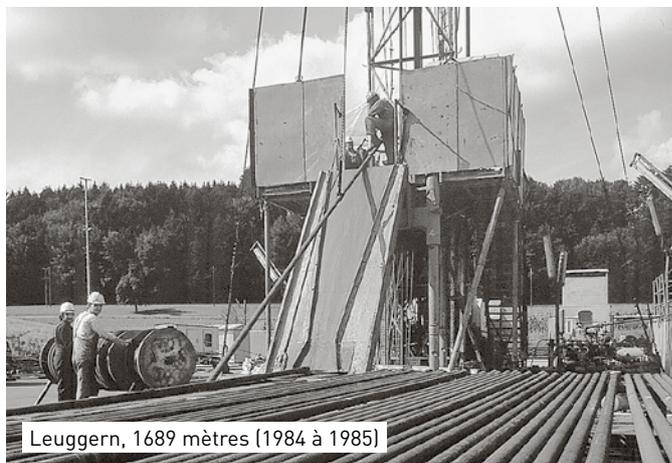
Riniken, 1801 mètres (1983 à 1984)



Schafisheim, 2006 mètres (1983 à 1984)



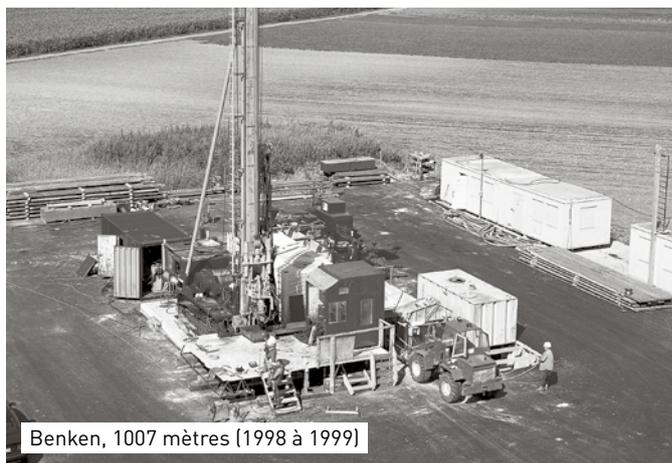
Kaisten, 1306 mètres (1984)



Leuggern, 1689 mètres (1984 à 1985)



Siblingen, 1522 mètres (1988 à 1989)



Benken, 1007 mètres (1998 à 1999)

# Les différentes phases

Un forage profond réalisé par la Nagra est un projet complexe, divisé en plusieurs phases.

## Le site de forage est déterminé en fonction des objectifs

Dans un premier temps, les objectifs du forage sont définis: il peut s'agir d'étudier les propriétés de confinement de l'Argile à Opalinus ou encore les conditions dans le sous-sol dans le périmètre d'un futur dépôt en profondeur, en vue de sa construction. En fonction des objectifs, on va déterminer une zone d'emplacement. Pour trouver un site de forage approprié dans cette zone, une pesée des intérêts est effectuée. Sont prises en compte notamment les distances minimales par rapport aux habitations ainsi que l'accessibilité du site. La protection de l'environnement et des considérations techniques relatives à la construction jouent également un rôle. Lorsqu'un site de forage adéquat a été trouvé, une demande d'autorisation est déposée auprès du DETEC.

Il faut compter environ deux ans et demi pour identifier les sites et obtenir les autorisations nécessaires.

## Construction et aménagement du site de forage

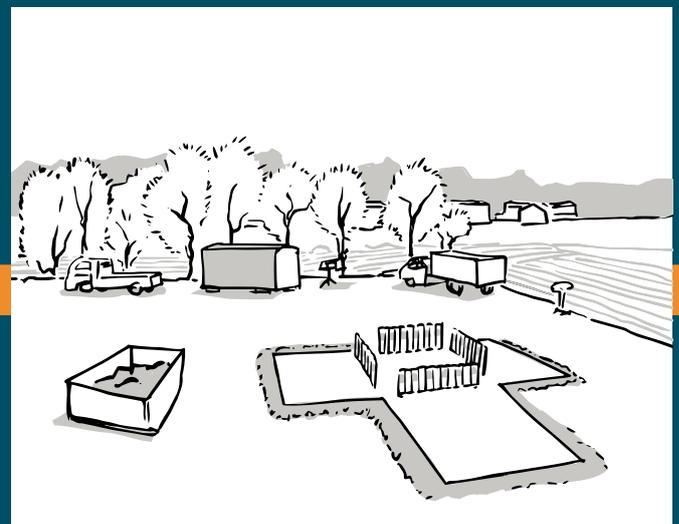
Une fois le forage en profondeur autorisé, le site peut être construit. La zone de travail est étanchéifiée et scellée afin d'empêcher une pollution éventuelle du sol et des eaux souterraines par les fluides utilisés. Les matériaux excavés sont en partie stockés aux abords du forage et seront utilisés ultérieurement pour la remise en état du site. Si nécessaire, ces dépôts de matériaux d'excavation sont disposés de manière à faire obstacle au bruit.

Une «cave de forage» est aménagée au centre du site. Réalisée en béton, elle fait partie des fondations. Les fondations doivent supporter le poids de la machine de forage et des tiges. Sur le reste de la surface étanchéifiée, on met en place différentes machines et des conteneurs.

La tour de forage est érigée au-dessus de la cave de forage. L'installation du site prend environ trois mois.



**Phase 1 du projet (phase de demande d'autorisation)**  
Sélection d'un site de forage approprié et autorisation par le DETEC.



**Phase 2 du projet (phase de construction)**  
Construction et aménagement du site de forage

# d'un forage

## Travaux de forage

Pendant la phase de forage, les activités sont nombreuses: le forage en lui-même, l'extraction et le traitement des carottes (cf. page 18) ainsi que les mesures effectuées dans le forage.

Les travaux doivent être réalisés en continu afin d'assurer la stabilité du forage. Ils sont conçus afin de limiter au maximum les nuisances sonores dans le voisinage proche et de respecter les dispositions légales. De même, on veille à utiliser les sources de lumière artificielle de manière ciblée, à savoir limiter l'éclairage à la zone de travail et éviter la lumière parasite. La population peut venir s'informer sur place, dans un conteneur d'information, sur l'état d'avancement des travaux.

La phase de forage dure entre six et neuf mois.

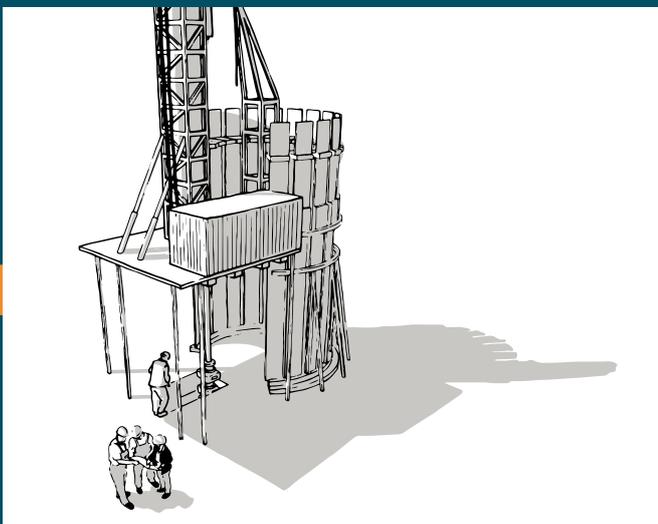
## Après le forage

À l'issue du forage, il y a deux possibilités.

Si aucune observation à long terme n'est prévue, le forage sera comblé et la totalité du périmètre retournera à son état initial.

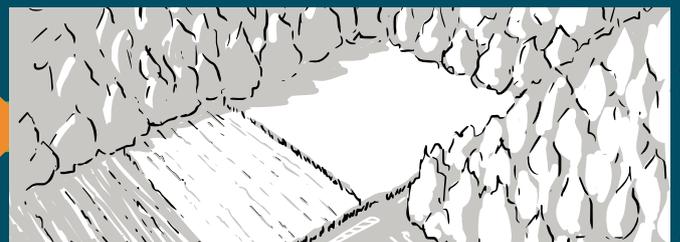
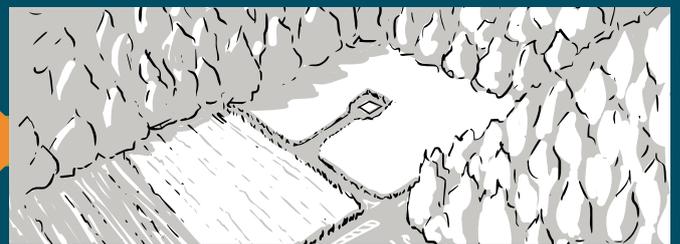
Dans le cas contraire, des systèmes de suivi seront mis en place pour la surveillance à long terme de la température et de la pression des eaux souterraines. Il subsistera une voie d'accès et une cave de forage à hauteur du terrain. Le maintien de ces structures dépendra de la suite de la procédure de sélection pour les sites des dépôts en profondeur. Lorsqu'une autorisation de construire et d'exploiter aura été octroyée pour les dépôts, l'observation à long terme ne sera poursuivie que sur les sites choisis.

La cave de forage et les systèmes de suivi peuvent rester sur place pendant cinquante ans ou plus.



### Phase 3 du projet (phase de forage)

Forage et investigation des couches rocheuses



### Phase 4 du projet (observation et remise en état)

C'est lors de la sélection des sites que la décision est prise concernant l'observation à long terme.

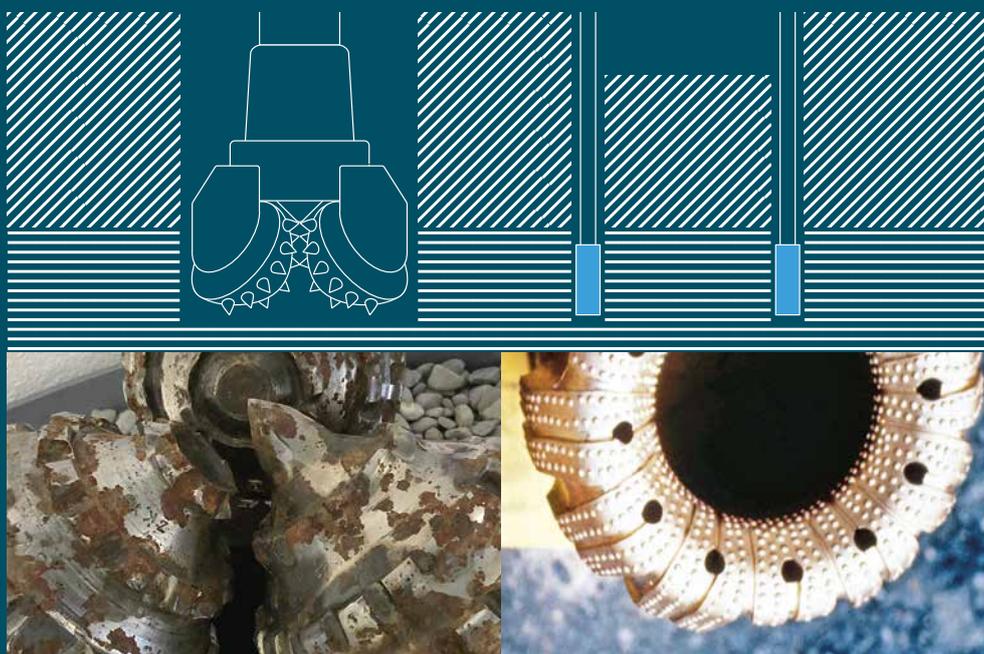
# Comment se déroule un

Les travaux commencent une fois le site aménagé et la machine de forage installée.

Tout d'abord, un « cuvelage guide » est enfoncé dans le sol meuble jusqu'à la roche (voir fig. 12, page 21). Ce tube protège les eaux souterraines d'une pollution potentielle. Pour le forage proprement dit, on utilise un trépan ou une couronne creuse. Ces outils sont fixés à l'extrémité des tiges de forage, mises en rotation par un moteur électrique. Sous l'effet de cette rotation et du poids du trépan, ce dernier commence à broyer la roche. On rajoute des tiges au fur et à mesure. Le forage est interrompu brièvement pour cette opération.

## Forer avec une couronne ou un trépan

La Nagra utilise deux techniques de forage largement répandues: avec un trépan, la roche est broyée au fur et à mesure. Le fluide de forage (voir section suivante) remonte les débris à la surface. Dans la technique du forage carotté, plus coûteuse, les couronnes creuses ne broient la roche que sur le pourtour du forage. Au centre, un cylindre de roche, la carotte, reste intact (voir fig. ci-dessous). La poudre de roche qui est produite est également remontée à la surface à l'aide du fluide de forage. Cette deuxième technique est utilisée pour les couches rocheuses que la Nagra souhaite étudier plus en détail. Les carottes ainsi obtenues sont analysées sur place ou plus tard en laboratoire.



**Figure 9**

Gauche: trépan de forage (photo: Nagra)  
Droite: couronne creuse (photo: © Comet Photo-shopping, Dieter Enz)

# forage profond?

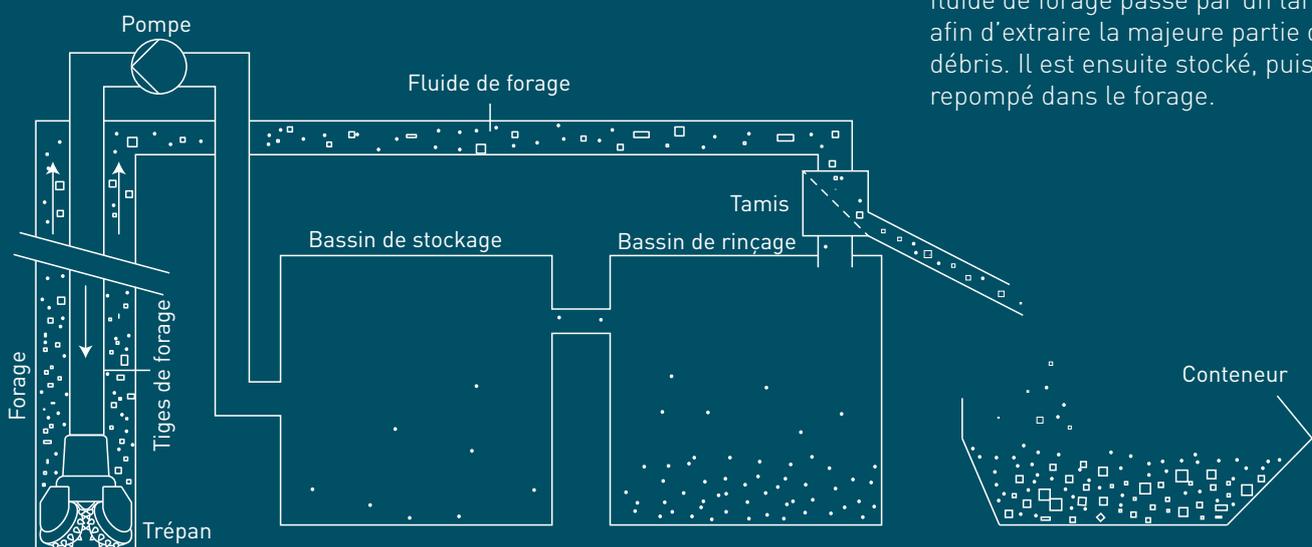
## Le fluide de forage remplit différentes fonctions

Un fluide est utilisé pour les forages profonds. Il est pompé vers le bas au travers des tiges de forage et remonte à l'extérieur de celles-ci, en transportant les résidus à la surface. En outre, il assure la stabilité du forage et sert à refroidir et lubrifier la couronne. Il se compose généralement d'eau et de bentonite (minéraux argileux naturels).

En surface, le fluide est filtré et stocké dans des bassins spéciaux. Il est ensuite repompé dans le forage (voir fig. ci-dessous).

## Précautions en cas de présence de gaz

Lorsque l'on traverse les couches rocheuses, il peut arriver que des gaz pénètrent dans le forage. À faible concentration, ce phénomène ne pose pas de problème, car le gaz se mélange à l'air ambiant lorsqu'il arrive en surface. Toutefois, si les quantités sont plus importantes, le forage peut être équipé de valves de sécurité, par exemple d'un bloc obturateur. Le gaz est alors dérivé de manière contrôlée ou brûlé. On ne s'attend pas à rencontrer de gisements de gaz exploitables dans les forages prévus.



**Figure 10**

Schéma du circuit de rinçage: le fluide de forage passe par un tamis afin d'extraire la majeure partie des débris. Il est ensuite stocké, puis repompé dans le forage.

## Comment la carotte est-elle remontée à la surface?

Pour récupérer les carottes, la Nagra utilise un carottier à câble (voir fig. ci-dessous).

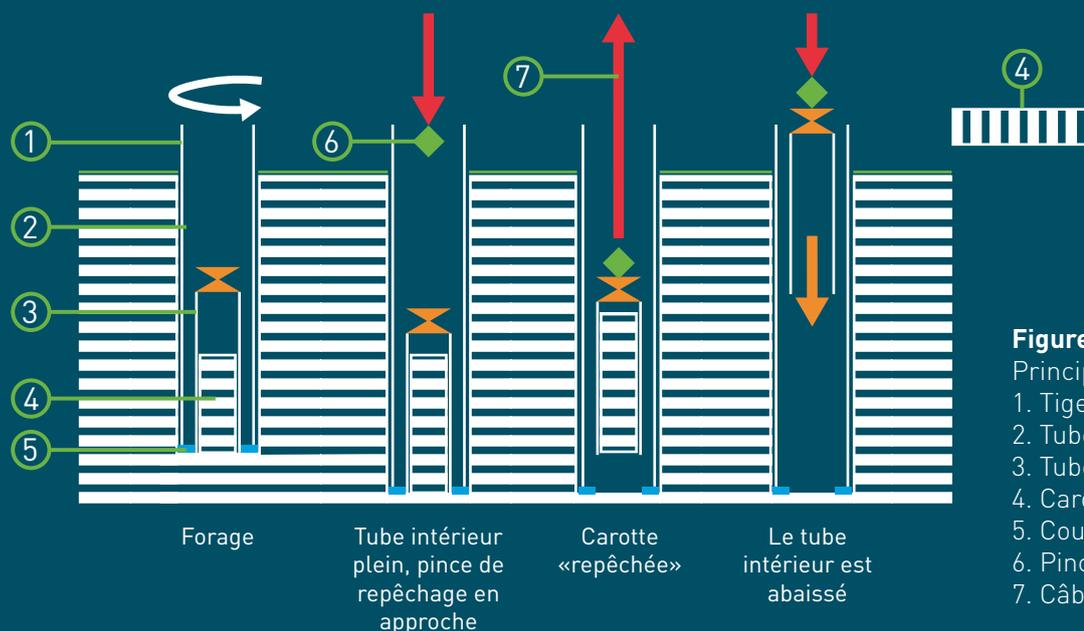
Un tube est placé à l'intérieur des tiges de forage. Au fur et à mesure de l'avancement des travaux, la nouvelle carotte «grandit» dans ce tube. Lorsque la carotte est suffisamment longue, le forage est interrompu. La carotte est maintenue à l'intérieur du tube par des ressorts. Le tube intérieur est «attrapé» à l'aide d'un câble et d'une pince de repêchage, puis tiré vers le haut, ce qui entraîne la rupture de la carotte à sa base. À la surface, la carotte est extraite du tube, lequel est redescendu à l'intérieur des tiges. Le forage est poursuivi jusqu'à ce que la nouvelle carotte soit assez longue.

## Sécuriser le forage

Pour sécuriser le forage, différents cuvelages sont mis en place (voir fig. de droite). À cet effet, on introduit un long tube en acier dont le diamètre est légèrement inférieur au forage ou à un cuvelage déjà en place. Ensuite, l'espace entre la paroi du forage et le cuvelage est comblé avec du ciment. Cette mesure garantit que le forage reste stable.

## Autres activités sur le site de forage

Sur le site, divers autres travaux sont effectués quotidiennement, à côté du forage lui-même. En étudiant sur place les débris et les carottes prélevées, un géologue détermine au fur et à mesure les roches traversées. Les carottes sont mesurées et les roches décrites avec précision. Différents échantillons sont prélevés sur les carottes pour les analyses en laboratoire.



**Figure 11**

Principe d'un carottier à câble

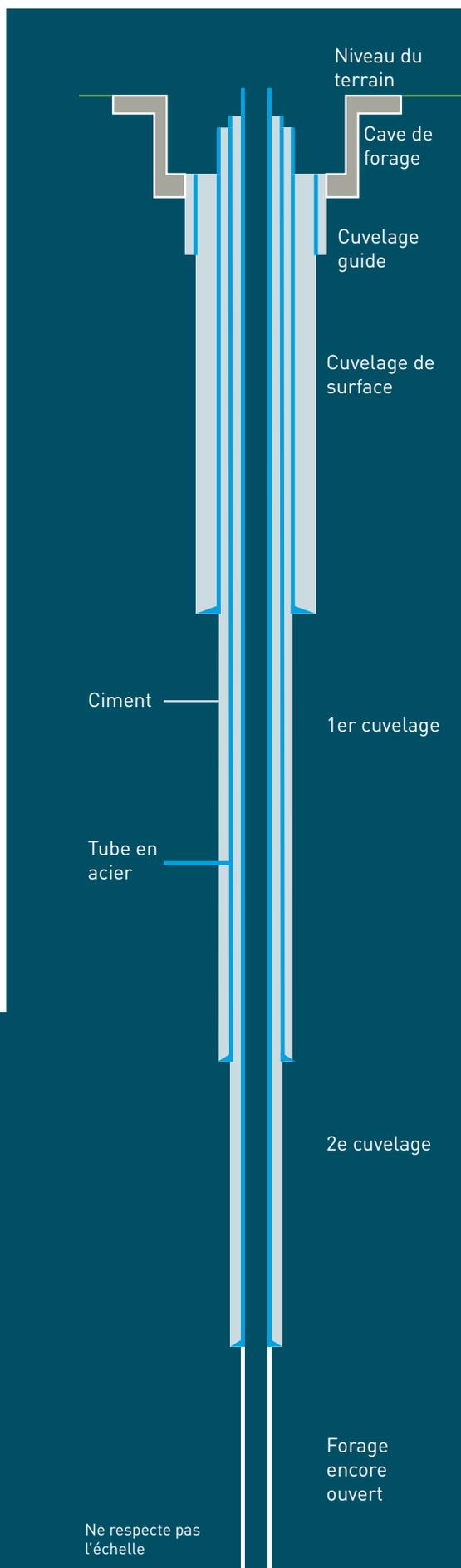
1. Tiges de forage
2. Tube extérieur
3. Tube intérieur
4. Carotte
5. Couronne de forage
6. Pince de repêchage
7. Câble

En outre, des données concernant le fluide de forage, la présence de gaz et la technique de forage sont surveillées et enregistrées en continu pour des questions de sécurité et à des fins scientifiques.

Pendant la phase d'exploitation, des mesures sont régulièrement effectuées dans le forage. Pour cela, on attend généralement que les travaux soient interrompus et que les tiges aient été relevées.

### Protection des eaux souterraines

Les risques de pollution des eaux souterraines sont minimisés ou exclus dès la phase préparatoire. Le site est étanchéifié et adapté spécifiquement à l'environnement local. Dans le forage, le cuvelage guide (fig. à droite) protège les eaux souterraines. La cimentation de l'espace entre le tube en acier et le terrain assure l'étanchéité du forage vis-à-vis des aquifères (cf. glossaire) traversés.



**Figure 12**  
Structure schématique d'un forage avec cuvelage installé

## Un site de forage

### Bassin de rinçage

Le circuit de rinçage compte plusieurs bassins. Le fluide de forage y est filtré et stocké en vue de sa réutilisation.

### «Top Drive» (tête d'entraînement)

Puissant entraînement électrique pour les tiges de forage.

### Pompes de rinçage

Pompes pour le circuit de rinçage.

### Conteneur d'information et contrôle de l'accès

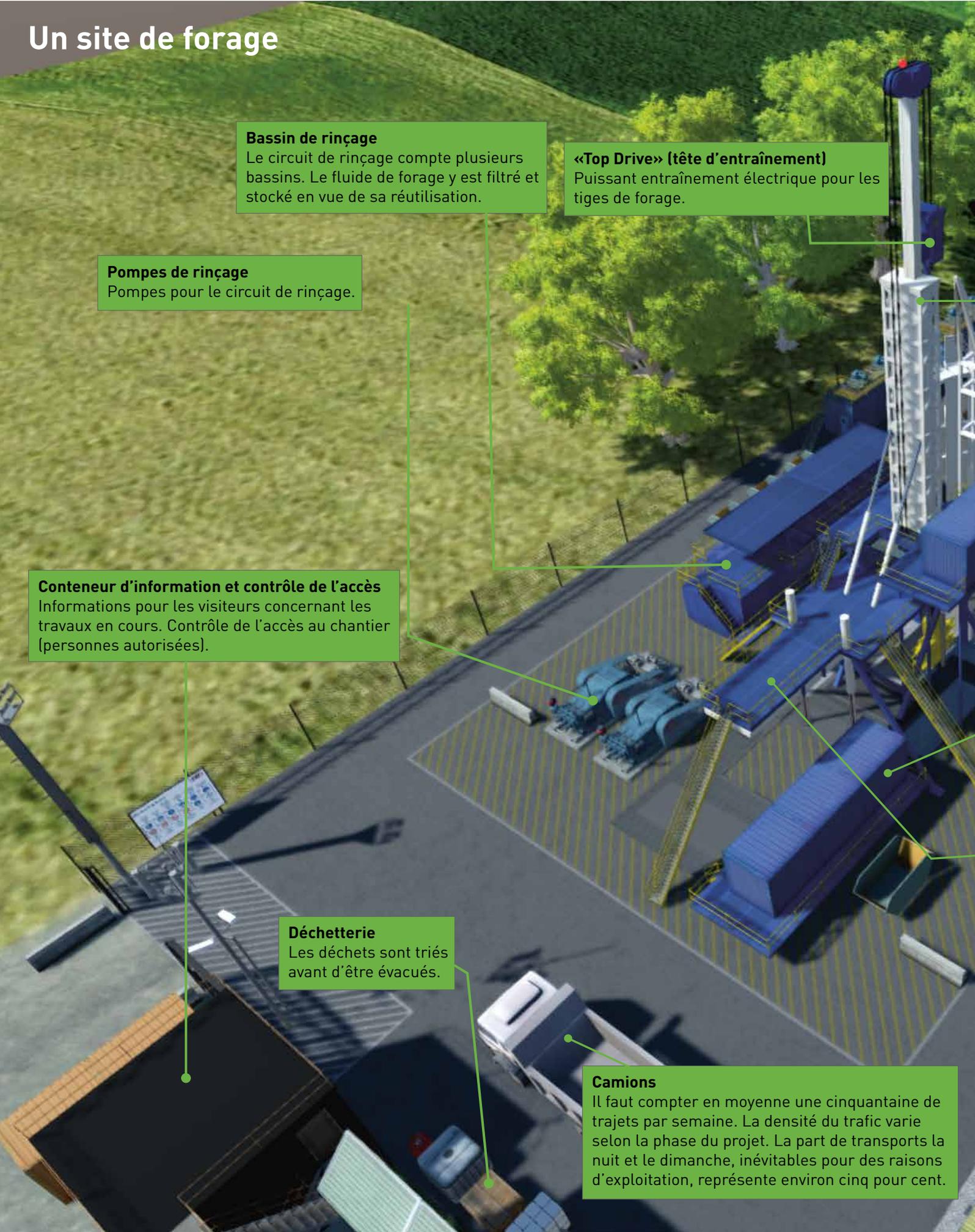
Informations pour les visiteurs concernant les travaux en cours. Contrôle de l'accès au chantier (personnes autorisées).

### Déchetterie

Les déchets sont triés avant d'être évacués.

### Camions

Il faut compter en moyenne une cinquantaine de trajets par semaine. La densité du trafic varie selon la phase du projet. La part de transports la nuit et le dimanche, inévitables pour des raisons d'exploitation, représente environ cinq pour cent.



**Tour de forage**

L'élément central du forage: la tour supporte le poids de la totalité des tiges de forage. Elle a une hauteur d'environ 27 mètres.

**Porte-tiges**

Le porte-tiges vertical est une réserve de tiges qui fonctionne comme le barillet d'un revolver.

**Dépôt de tiges**

Réserve de tiges de forage qui seront utilisées ultérieurement.

**Bassins d'accumulation**

Réserve de bassins pour l'eau et le fluide de forage.

**«Doghouse» (commandes)**

C'est la centrale de commande du dispositif de forage.

Si nécessaire, des **parois antibruit** sont érigées.

**Approvisionnement en énergie**

Énergie pour l'appareil de forage.

**Conteneur**

Des bureaux sont aménagés dans les conteneurs. Des instruments de mesure et du matériel pour les géologues et le personnel de chantier y sont stockés.

**Plateforme de travail**

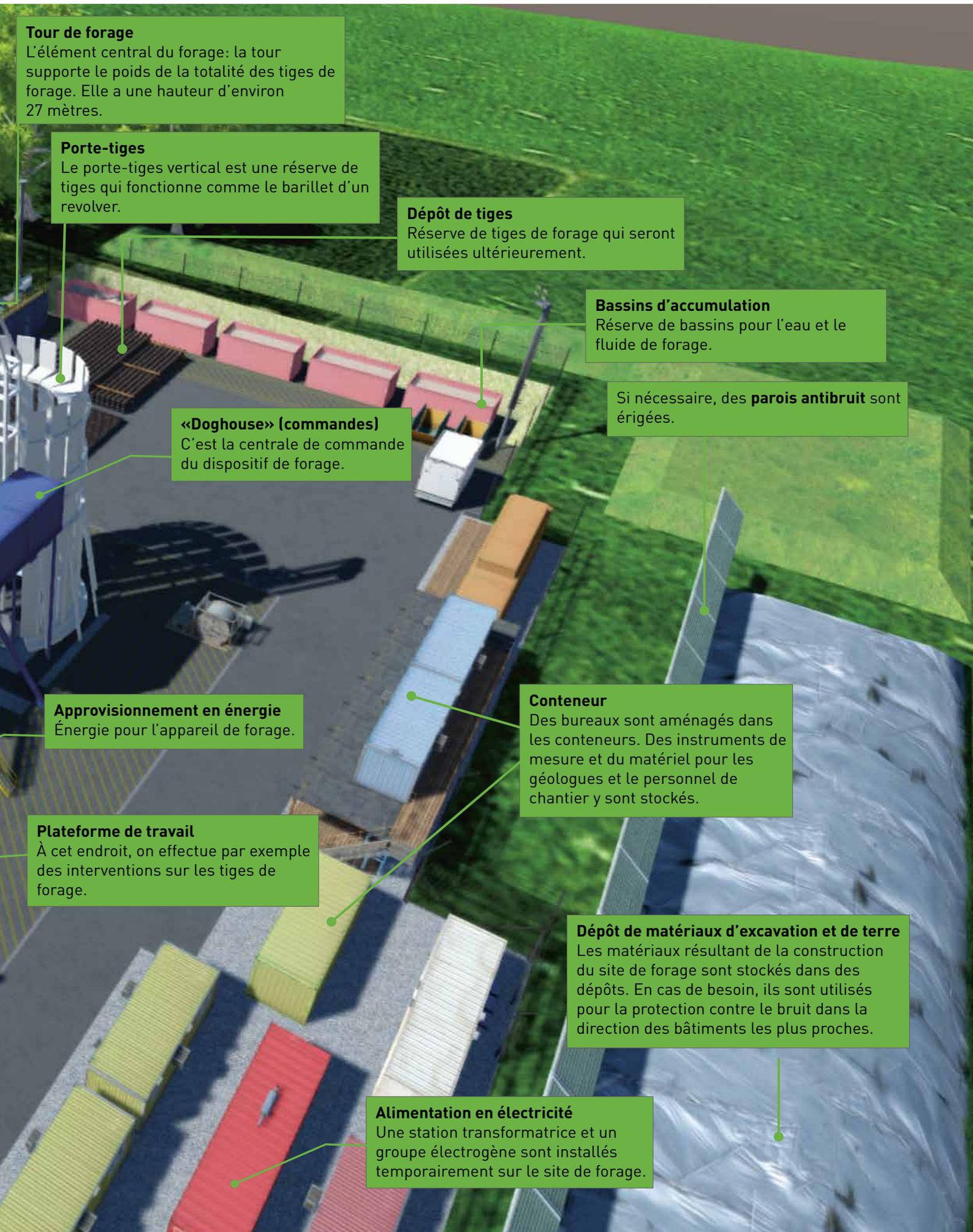
À cet endroit, on effectue par exemple des interventions sur les tiges de forage.

**Dépôt de matériaux d'excavation et de terre**

Les matériaux résultant de la construction du site de forage sont stockés dans des dépôts. En cas de besoin, ils sont utilisés pour la protection contre le bruit dans la direction des bâtiments les plus proches.

**Alimentation en électricité**

Une station transformatrice et un groupe électrogène sont installés temporairement sur le site de forage.



# Glossaire

## Analogues naturels

Les analogues naturels, à la différence des expériences en laboratoire, permettent d'observer des évolutions qui se sont déroulées parfois sur des millions d'années.

## Aquifères et aquitards

Un aquifère est une formation ou une roche suffisamment poreuse ou fissurée pour que les eaux souterraines puissent y circuler. Un aquitard au contraire ne permet guère la circulation de l'eau.

## Cheminements préférentiels

Il s'agit des voies – espaces interstitiels reliés, fissures ou zones perturbées – que pourraient emprunter les radionucléides pour parvenir jusqu'à la biosphère.

## Conflits d'exploitation

La loi sur l'énergie nucléaire exige qu'un dépôt en couches géologiques profondes destiné aux déchets radioactifs soit protégé contre les intrusions, ce qui entraîne des restrictions pour les autres utilisations potentielles. Un dépôt profond ne doit cependant pas limiter inutilement de futures exploitations prévisibles de ressources naturelles ou minières.

## Qu'est qu'une demande d'autorisation générale?

Les dépôts en couches géologiques profondes requièrent une autorisation générale du Conseil fédéral. Les demandes d'autorisation générale que déposera la Nagra devront décrire dans leurs grandes lignes les installations sur les sites proposés. L'autorisation générale fixera l'emplacement, la taille et la situation approximative des infrastructures principales. La description détaillée de l'installation, des processus et des technologies sera fournie plus tard, dans le cadre de la demande d'autorisation de construire ou d'exploitation.

## Cuvelage

Introduction successive de tubes en acier, fixés par du ciment injecté dans les espaces annulaires. Le cuvelage a pour objectif d'assurer l'étanchéité du forage.

## Demande d'autorisation de forage

La demande d'autorisation comprend notamment la justification du choix concret de l'emplacement et l'aménagement prévu du site de forage.

## Dépôt en couches géologiques profondes

Le dépôt en profondeur est une installation aménagée dans des couches rocheuses stables et imperméables, où les déchets radioactifs peuvent être stockés à long terme et de manière sûre.

## Evolution géologique à long terme

Il s'agit du développement à long terme à la surface de la terre, par exemple sous l'effet de l'érosion.

## GR API

Cette unité est utilisée pour mesurer la radioactivité naturelle dans les roches. Il est ainsi possible de déterminer la transition entre les différents types de roche.

## Hydrogéologie

L'hydrogéologie est la science de la terre qui étudie les eaux souterraines.

## Isotope

Les isotopes sont des atomes d'un même élément chimique, mais dont le noyau contient différents nombres de neutrons.

## Périmètre de dépôt

Ce périmètre couvre, dans le sous-sol d'un domaine d'implantation, la zone de la roche d'accueil qui est la plus appropriée, du point de vue de la sûreté, pour l'aménagement d'un dépôt en couches géologiques profondes.

## Perturbations provoquées par le dépôt

Impact sur la roche d'accueil (p. ex. production de chaleur, échanges chimiques) provoqué directement par le dépôt.

**Profondeur**

Les couches rocheuses entre le dépôt et la surface du sol assurent la séparation spatiale entre les déchets et notre environnement vital. Le dépôt doit être implanté à une profondeur suffisante pour éviter un impact trop important de l'érosion; pour des raisons de faisabilité technique, elle ne doit toutefois pas non plus être excessive.

**Quaternaire**

Le quaternaire est une période géologique qui a débuté il y a environ 2,5 millions d'années.

**Radionucléide**

Noyau atomique instable, qui se décompose en émettant un rayonnement ionisant. Certains radionucléides existent à l'état naturel, d'autres sont créés artificiellement.

**Roche d'accueil, roches encaissantes, zone de confinement géologique**

La roche d'accueil abrite l'infrastructure de stockage du dépôt en profondeur et contribue de manière déterminante à la rétention des radionu-

cléides. Les formations encaissantes situées au-dessus et en dessous de la roche d'accueil peuvent être légèrement perméables. Ensemble, ces entités constituent ce que l'on appelle la «zone de confinement géologique».

**Sismique**

Des méthodes de mesure sismiques permettent d'obtenir une image du sous-sol géologique à l'aide de vibrations générées artificiellement.

**Sûreté à long terme**

La sélection du site et la conception du dépôt en profondeur assurent une sûreté à long terme. De cette façon, on peut exclure les dangers pour l'homme et l'environnement, même sur de très longues périodes.

**Type de dépôt**

On distingue les dépôts en profondeur pour déchets de faible et de moyenne activité (DFMA) et les dépôts pour déchets de haute activité (DHA). Une troisième option est un dépôt combiné pouvant recevoir les deux types de déchets.

**Pour en savoir plus**

Nagra (2016): Konzepte der Standortuntersuchungen für SGT; Etappe 3 – Nördlich Lägern; NAB 1628

Nagra (2014): Konzepte der Standortuntersuchungen für SGT Etappe 3; NAB 1483

Nagra (2002): Projet Argile à Opalinus - Synthèse des recherches géologiques - Démonstration de la faisabilité du stockage géologique des assemblages combustibles usés, des déchets de haute activité vitrifiés et des déchets de moyenne activité à vie longue; NTB 02-03.

**Brochures et cahiers thématiques**

«Érosion - Évolution géologique à long terme et dépôt en couches géologiques profondes», octobre 2018

«Bohrungen für Quartäruntersuchungen», février 2018

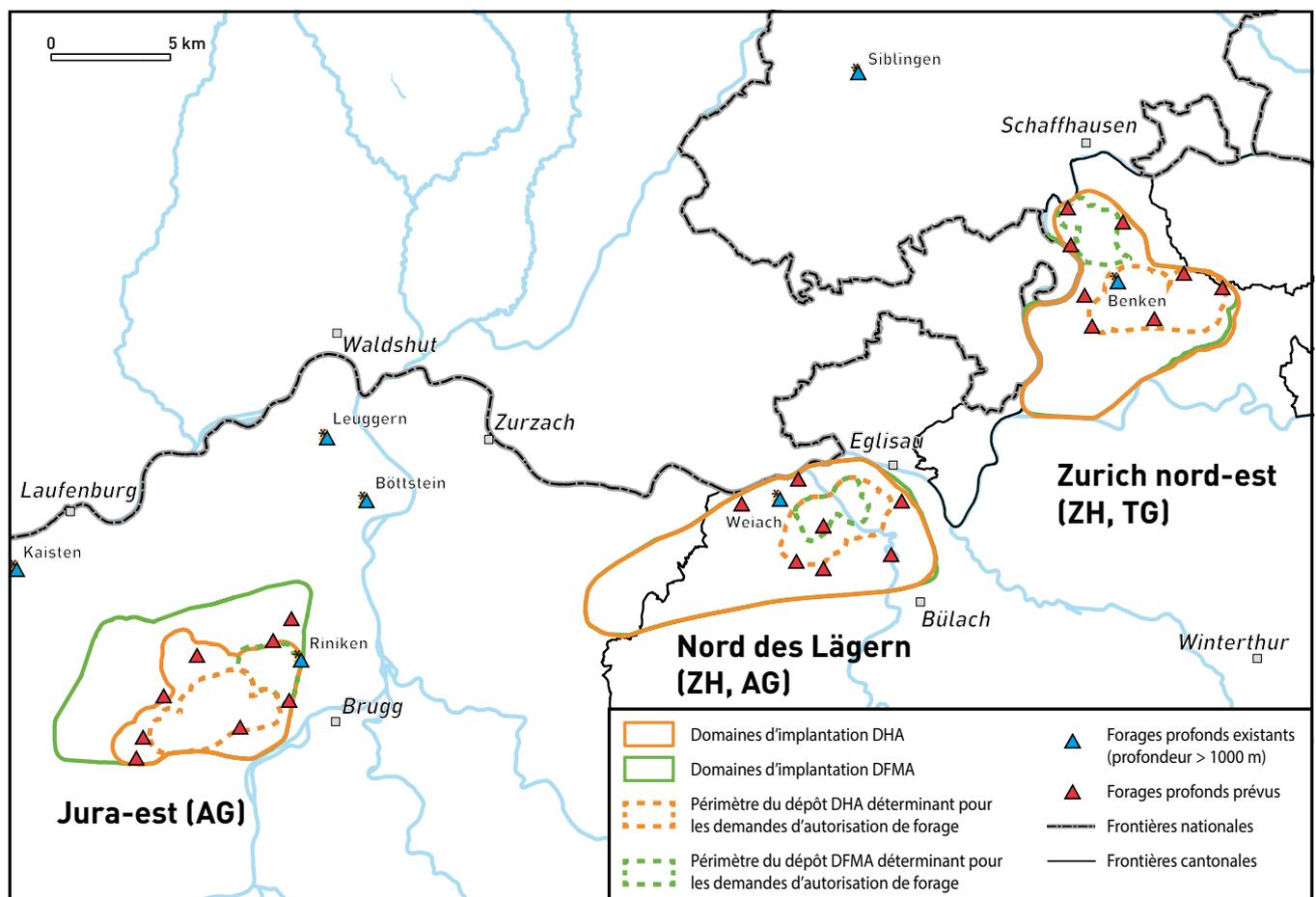
«Déchets radioactifs - Provenance, quantité, destination», mars 2017

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

**Vous pouvez télécharger ou commander ces documents sur le site [www.nagra.ch](http://www.nagra.ch), dans la rubrique «Téléchargement/Publications».**

# Les demandes d'autoris

En septembre 2018, un total de 22 demandes d'autorisation pour des forages profonds avaient été déposées dans les trois domaines d'implantation. Actuellement, une demande supplémentaire est en préparation pour le Nord des Lägern. Les forages ne seront vraisemblablement pas tous réalisés. En effet, les investigations effectuées fournissent en continu de nouvelles connaissances. C'est pourquoi la Nagra dépose un nombre de demandes supérieur à celui des projets qui seront effectivement menés à bien. Elle jouit ainsi d'une certaine flexibilité pour décider quels forages sont nécessaires pour atteindre ses objectifs de recherche.



**Figure 13**

Les sites de forage sont placés tout autour du périmètre du dépôt. Si l'objectif est bien de caractériser aussi précisément que possible la roche d'accueil, l'Argile à Opalinus, il faut éviter d'effectuer des forages à l'intérieur du périmètre afin de ne pas l'endommager.

# ation de forage

## Fiches d'information – Forages profonds

### «Beschreibung Bohrplatz und Ziel der Sondierbohrungen»

Jura-est

Nord des Lägern

Zurich nord-est

Toutes les fiches d'information (en allemand) peuvent être téléchargées sur le site [www.nagra.ch](http://www.nagra.ch)  
> Téléchargements / Publications > Publications thématiques.

**Nationale Genossenschaft für die  
Lagerung radioaktiver Abfälle**

**(Société coopérative nationale pour  
le stockage des déchets radioactifs)**

Hardstrasse 73  
Case poste 280  
5430 Wettingen  
Suisse

Tél. 056 437 11 11

Fax 056 437 12 07

[info@nagra.ch](mailto:info@nagra.ch) [www.nagra.ch](http://www.nagra.ch) [www.nagrablog.ch](http://www.nagrablog.ch)

[info@nagra.ch](mailto:info@nagra.ch)

<http://www.nagra.ch/>

**nagra.**