

ECHELLES DE TEMPS ET DEMARCHE DE CONCEPTION DU PROJET CIGEO

TIME SCALES AND DESIGN PROCESS FOR THE CIGEO PROJECT

Odile OZANAM¹, Gilles ARMAND¹, Jean-Michel HOORELBEKE¹,

¹ Andra, Chatenay-Malabry, France

RÉSUMÉ – Pour répondre aux enjeux de la démonstration de sa sûreté après fermeture sur des durées de plusieurs centaines de milliers d'années, et de sa réversibilité sur cent ans, le projet Cigéo de stockage géologique profond de déchets radioactifs français implique la mise en œuvre d'une démarche itérative de conception, basée sur l'acquisition de connaissances, la modélisation phénoménologique et les méthodes d'ingénierie

ABSTRACT – To meet with the requirements associated to its post closure safety over several hundreds of thousands years 'time scale and its reversibility during 100 years, the design of the Cigéo deep geological disposal facility for French radioactive waste is based on an iterative process considering knowledge acquisition, phenomenological modelling and engineering approaches.

1. Introduction

Le centre industriel de stockage géologique Cigéo est conçu pour mettre en sécurité définitive et passive les déchets radioactifs français de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MAVL), à environ 500 mètres de profondeur dans une couche de roche argileuse, à la limite des départements de la Meuse et de la Haute-Marne. Les déchets radioactifs concernés proviennent essentiellement du traitement des combustibles usés déchargés des centrales nucléaires, ainsi que de l'exploitation des installations nucléaires. Les études et recherches sur le stockage géologique profond ont été initiées et confiées à l'Andra par la loi du 30 décembre 1991. La loi de programme du 28 juin 2006 a confirmé la poursuite de ces travaux en vue de choisir un site d'implantation et de concevoir un centre de stockage « réversible ». A partir de 1998, la construction et l'exploitation du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne ont permis de collecter les données nécessaires pour les évaluations de faisabilité et de sûreté menées tout au long du projet. Depuis 2010, les études ont adopté un caractère plus industriel pour préparer le débat public organisé en 2013 sur le projet Cigéo. Elles visent maintenant à préparer à l'horizon 2018 la demande d'autorisation de création (DAC). Suite au débat public, pour tenir compte des avis et attentes qui ont été exprimés, l'Andra a proposé notamment d'intégrer au démarrage de l'installation une « phase industrielle pilote ».

Si elle est autorisée, Cigéo (Figure 1) sera une installation nucléaire atypique, construite et exploitée durant une période dépassant cent ans. Cette longue durée conduit à concevoir un développement progressif des ouvrages de stockage, autorisant une flexibilité de l'exploitation, particulièrement au plan calendaire, ainsi qu'une adaptabilité de l'installation à des évolutions futures (Figure 2). A l'issue de cette phase de développement et d'exploitation, le stockage doit être fermé pour jouer pleinement son rôle de confinement de la radioactivité sur une très longue durée correspondant à la dangerosité des déchets, à savoir de plusieurs dizaines à centaines de milliers d'années.

La conception du stockage géologique profond de déchets radioactifs nécessite donc la mise en œuvre d'une démarche spécifique de conception et comporte des enjeux particuliers associés à la justification des choix effectués et à la démonstration de la sûreté du stockage après sa fermeture pendant des milliers d'années. Il s'y ajoute une exigence de réversibilité sur une durée séculaire.

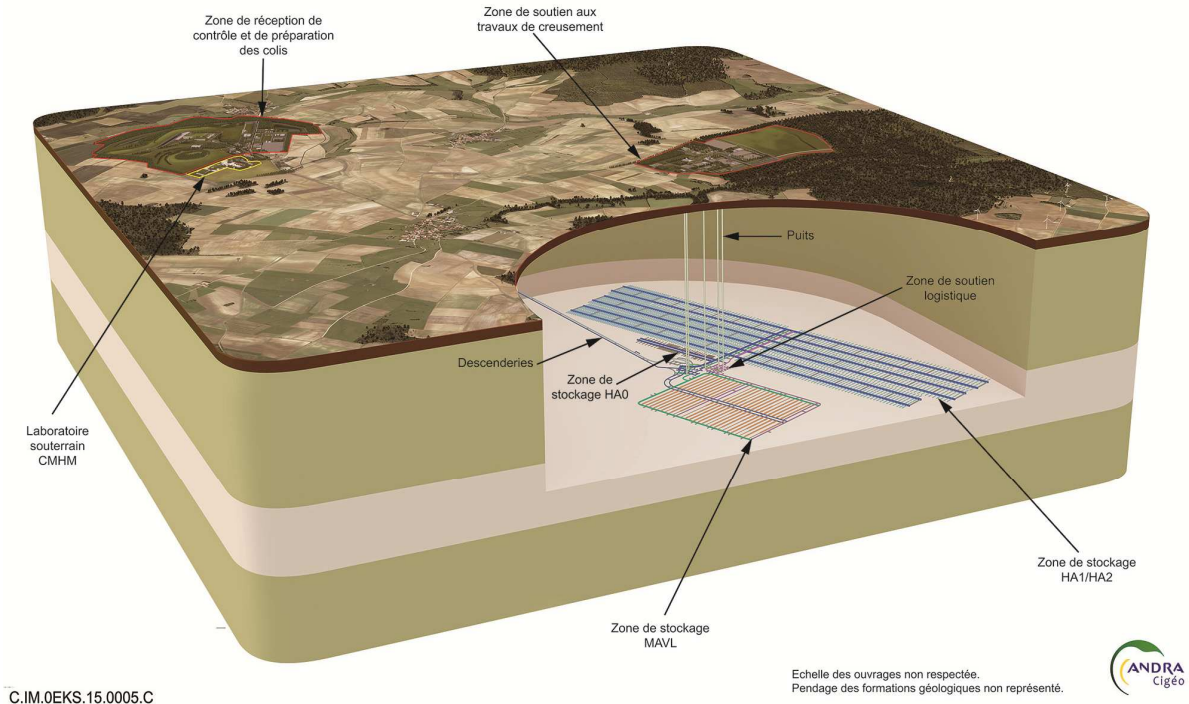


Figure 1 : Représentation du centre de stockage Cigéo

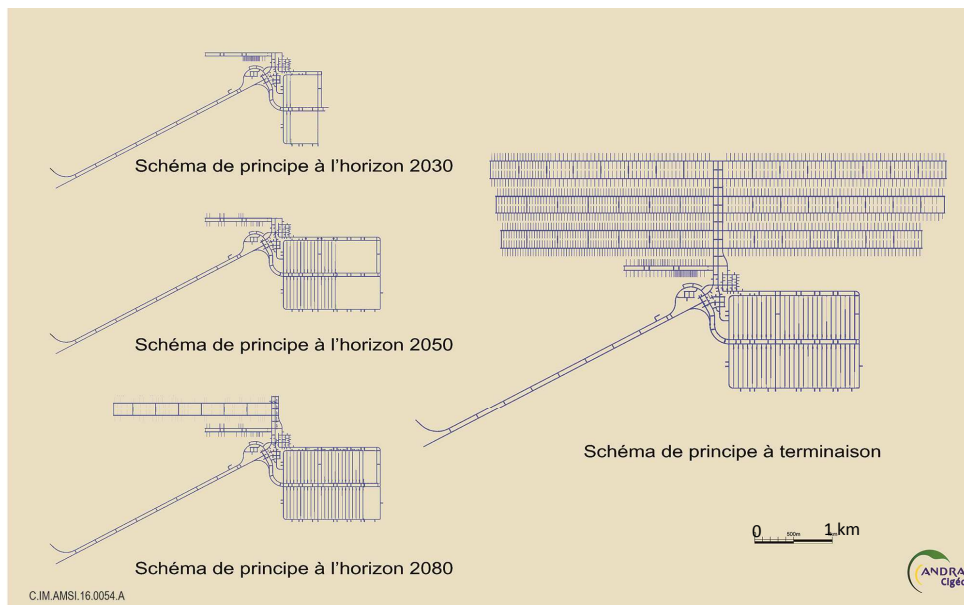


Figure 2 : Illustration du développement progressif de l'installation souterraine de Cigéo au cours du temps

2. Démarche de conception en lien avec la sûreté après fermeture

L'objectif à long terme du stockage est de confiner la radioactivité sur une très longue durée. Ainsi la grande majorité des radionucléides présents dans les déchets n'atteindront jamais la surface. Seuls quelques radionucléides particulièrement mobiles et dont la durée de vie est très longue (essentiellement l'iode 129 et le chlore 36) pourront être relâchés par les ouvrages de stockage et migrer jusqu'aux limites de la couche d'argile qu'ils atteindront après plusieurs dizaines de milliers d'années, puis potentiellement atteindre ensuite la surface après plus de 100 000 ans, en concentration suffisamment faible pour ne pas entraîner d'impact sanitaire. En effet les propriétés de très faible perméabilité et de rétention des argilites de la couche d'au moins 140 m d'épaisseur, formée il y a 160 millions d'années, permettent de confiner les radionucléides au plus près des déchets stockés puis de retarder et d'atténuer leur migration jusqu'à l'environnement et l'homme. Conformément au guide de sûreté établi par l'Autorité de Sûreté Nucléaire, « *après la fermeture de l'installation de stockage, la protection de la santé des personnes et de l'environnement ne doit pas dépendre d'une surveillance et d'un contrôle institutionnel qui ne peuvent pas être maintenus de façon certaine au-delà d'une période limitée* ». Cela implique une compréhension de l'évolution du stockage après sa fermeture, permettant de rendre celui-ci le plus robuste possible aux événements internes (défaillances de composants) et externes (intrusions d'origine humaine, événements naturels) susceptibles d'intervenir sur des échelles de temps très longues. Cette compréhension s'appuie sur les données expérimentales acquises notamment grâce au Laboratoire souterrain de l'Andra, sur l'observation d'analogues naturels dont certains remontent à plusieurs millions d'années et sur des modélisations numériques.

Cigéo doit être conçu pour éviter d'altérer les propriétés de la couche argileuse hôte mobilisées pour la sûreté à long terme. De plus, l'organisation de l'installation souterraine et la composition de certains composants tels que les colis de déchets et les scellements contribuent également à limiter les circulations d'eau dans le stockage après sa fermeture et au confinement de la radioactivité. La conception du stockage nécessite donc la mise en œuvre d'une démarche spécifique. Elle implique, par des itérations successives, d'intégrer, dans les études de définition industrielle des ouvrages souterrains confiées par l'Andra à des ingénieries, les acquis scientifiques et les résultats des évaluations de sûreté après fermeture menées sur des durées allant jusqu'à un million d'années. Cette démarche, illustrée sur la Figure 3, a conduit à mettre en œuvre quatre itérations principales depuis 1997, en complément des itérations spécifiques à la conception de certains composants.

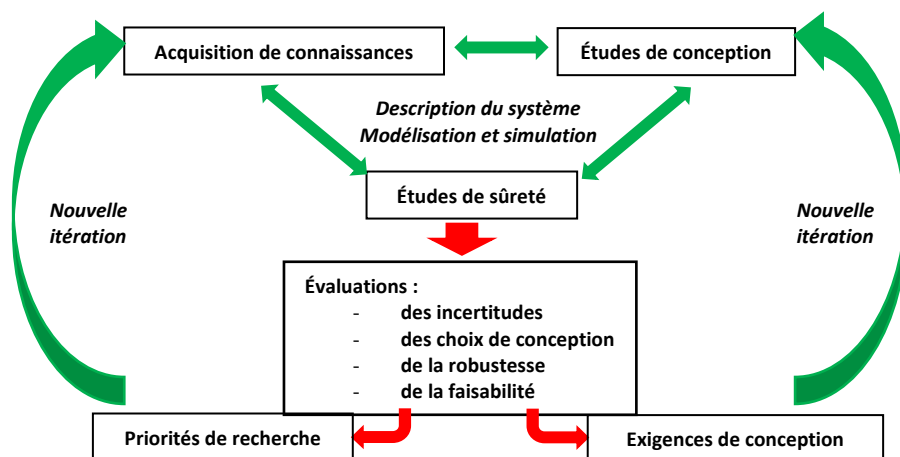


Figure 3. Démarche de conception du stockage géologique.

Ainsi, tous les ouvrages de liaison entre la surface et le fond (descenderies et puits) sont regroupés au fond dans une zone limitée et séparée des quartiers regroupant les alvéoles de stockage de déchets. Les alvéoles de stockage sont organisés en quartiers globalement borgnes c'est-à-dire dont les points d'entrée sont peu nombreux et proches les uns des autres. L'architecture actuellement envisagée est illustrée sur la Figure 1.

Après une période d'entreposage en surface d'au moins 60 ans, les colis de déchets de haute activité (HA), fortement exothermiques, sont reconditionnés dans des conteneurs épais en acier qui visent à retarder l'arrivée d'eau de la roche sur les déchets, pendant au moins plusieurs siècles ; ces conteneurs sont ensuite placés dans des micro-tunnels horizontaux, espacés de manière à répartir la charge thermique pour limiter l'échauffement de la roche et les risques éventuels d'endommagement thermo-hydrromécanique (Fig. 4). Les autres colis de déchets (MAVL) sont introduits dans des conteneurs en béton puis placés dans des tunnels de stockage (Fig. 4 et 6); les dimensions de la chambre de stockage sont ajustées pour limiter le volume des vides résiduels après fermeture tout en maintenant des jeux suffisants pour l'exploitation (manutention des colis pour leur mise en place et leur récupération éventuelle sur une durée séculaire, ventilation tant que l'alvéole n'est pas définitivement fermé).

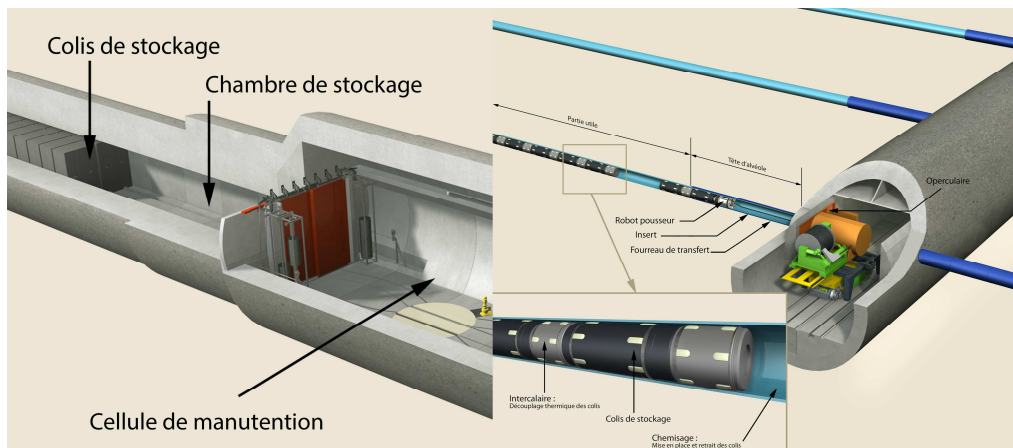


Figure 4 : Les deux types d'alvéoles de stockage pour déchets MAVL (à gauche) et pour déchets HA (à droite)

3. Démarche de dimensionnement des ouvrages souterrains

3.1. Enjeux du dimensionnement des ouvrages souterrains de Cigéo

L'installation souterraine est prévue d'être creusée à environ 500 m de profondeur par tranches successives de travaux. Outre les exigences issues des évaluations de sûreté après fermeture, la conception de l'architecture souterraine et des ouvrages est significativement impactée par les exigences de sécurité et de sûreté en construction et en exploitation, notamment par la recherche d'une séparation physique des zones nucléaires en exploitation et des zones en travaux et d'une réduction drastique du risque incendie.

Dans le cadre de la conception de l'installation souterraine, le dimensionnement des ouvrages souterrains constitue un enjeu notable car il doit être à la fois robuste et raisonnable d'un point de vue technico-économique. Le dimensionnement robuste vise à permettre une justification de la tenue des ouvrages à l'échelle séculaire, qui intègre les incertitudes résiduelles au moment de leur construction. L'installation souterraine de

Cigéo est constituée de différents types d'ouvrages souterrains : des puits, des descenderies, des alvéoles de stockage, des galeries de transfert de colis, des galeries de travaux, des galeries de soutien logistique. Certains seront exploités pendant plus de 100 ans. Les possibilités de maintenance ou de jouvence en zone nucléaire sont fortement contraintes. En particulier la tenue mécanique des tunnels de stockage de déchets MAVL doit être assurée sur la durée sans qu'il ne soit possible d'y réaliser des opérations de jouvence.

Un des enjeux du dimensionnement est donc de déterminer spécifiquement pour chaque type d'ouvrage son diamètre utile et son mode de creusement et de soutènement/revêtement qui soient adaptés aux fonctions de l'ouvrage.

Le dimensionnement des ouvrages de Cigéo dépend aussi de la date de leur construction. Pour les premiers ouvrages construits, le dimensionnement doit rester prudent et être robuste. Il doit en effet intégrer les incertitudes actuelles sur le comportement des futurs ouvrages, notamment en ce qui concerne le comportement différé des argilites. Le dimensionnement doit aussi limiter les contraintes pour le développement ultérieur du stockage et ainsi permettre des évolutions de conception pour les tranches ultérieures. Le dimensionnement des ouvrages des tranches ultérieures bénéficiera du retour d'expérience de la phase industrielle pilote (première tranche) puis des travaux suivants. Leur dimensionnement pourrait donc vraisemblablement être optimisé au moment où il sera décidé de construire ces nouveaux ouvrages.

3.2. Principes de la démarche de conception

Pour répondre à ces enjeux de dimensionnement, la démarche de l'Andra repose sur trois processus complémentaires :

- l'acquisition de connaissances scientifiques et techniques qui fournit à intervalles réguliers un état des lieux sur le comportement des argilites et des ouvrages,
- la modélisation phénoménologique des ouvrages au mieux de la connaissance déjà acquise,
- le dimensionnement par des maîtrises d'œuvre, basé sur des approches plus classiques d'ingénierie.

Ces processus sont coordonnés et interfacés par des points de rendez-vous réguliers, fixés en fonction des jalons du projet. Les travaux de ces trois processus sont régulièrement évalués par l'expertise disponible au sein de l'Andra ainsi que par des experts externes mobilisés par l'Andra ou dans le cadre d'évaluations indépendantes.

Les évaluations régulières visent à vérifier que les travaux menés permettent de réduire les incertitudes de connaissances. Elles visent également à vérifier que les résultats des travaux d'acquisition de connaissances ont bien été pris en compte dans les modélisations phénoménologiques et dans les travaux de dimensionnement des maîtrises d'œuvre. Elles visent enfin à vérifier la robustesse du dimensionnement tel que défini vis-à-vis des incertitudes résiduelles, tout en tenant compte de la réduction progressive de ces incertitudes avec le développement incrémental de Cigéo.

En parallèle des contrôles sont effectués par une assistance à maîtrise d'ouvrage réglementaire pour vérifier que le dimensionnement des maîtrises d'œuvre est conforme à l'état de l'art et aux réglementations et recommandations de la profession.

3.3. Acquisition de connaissances et modélisation phénoménologique

Les deux processus d'acquisition de connaissances et de modélisation phénoménologique sont étroitement liés car la modélisation contribue à l'interprétation

continu du modèle limite la représentation du comportement de la zone endommagée ; les convergences anisotropes pour les galeries orientées suivant la contrainte horizontale majeure ne sont pas reproduites par le modèle isotrope et enfin les paramètres de comportement différé ne sont calés que sur des données de relativement court terme, c'est-à-dire de quelques années seulement sur les galeries expérimentales. L'extrapolation à 100 ans présente encore des incertitudes. Aussi les travaux de recherche se poursuivent pour disposer d'autres modèles de comportement basés sur des approches différentes (Pardoen *et al*, 2015, Guayacán-Carillo *et al.*, 2015,...) et ainsi pouvoir évaluer les marges entre les modélisations phénoménologiques et les modèles de dimensionnement de type ingénierie. Cette évaluation est menée au moyen de divers exercices de comparaison.

L'acquisition de connaissances se poursuivra sur différents types d'ouvrages dans le Laboratoire souterrain puis pendant la phase industrielle pilote dès que les premiers ouvrages de Cigéo seront construits. En continuité avec la stratégie mise en œuvre au Laboratoire souterrain depuis 2006 (Armand *et al*, 2015), de nouvelles galeries seront construites au Laboratoire en 2016-2017 puis à l'horizon de 2019, de manière à pouvoir étudier et suivre sur la durée le comportement des différents types d'ouvrages envisagés : des ouvrages rigides ou souples, orientés suivant l'une ou l'autre des deux directions principales des contraintes in situ et construits soit à la machine à attaque ponctuelle soit au tunnelier. Au cours de la phase industrielle pilote, des données supplémentaires seront acquises notamment au sein d'un démonstrateur d'alvéole MAVL, prévu au pied des descenderies. La surveillance des premiers alvéoles MAVL, des galeries et des liaisons surface-fond dès leur construction fournira également des connaissances supplémentaires.

3.3. Dimensionnement par les approches d'ingénierie

Le dimensionnement par les maîtrises d'œuvre s'appuie d'abord sur l'expertise et le retour d'expérience de leurs bureaux d'études, qui orientent les choix de la méthode de creusement et le système de soutènement/revêtement pour chaque type d'ouvrage. Ensuite, la démarche de vérification consiste à évaluer par la modélisation numérique des ouvrages la valeur maximale de la contrainte moyenne dans les sections des éléments de soutènement et de revêtement à 100 ans puis à vérifier que cette contrainte induit des sollicitations admissibles dans les composants de la structure. Cette vérification est menée en appliquant les Eurocodes conformément à la recommandation AFTES GT29R2F1 (AFTES, 2007). Cela se traduit par l'introduction de coefficients de sécurité choisis en fonction des incertitudes de connaissances. La Figure 6 illustre deux sections d'ouvrages, déterminées lors de l'avant-projet sommaire. Ces dimensionnements seront revus et optimisés si possible lors de la phase d'avant-projet détaillé.



Figure 6 : Exemples de sections types d'ouvrages souterrains de Cigéo

4. Conclusion

L'Andra a établi et expérimenté une démarche de conception originale adaptée aux échelles de temps du projet Cigéo et à la gestion des incertitudes associées. Cette démarche combine acquisitions de connaissances scientifiques et techniques principalement au Laboratoire souterrain, développement de modélisations et études d'ingénierie. Elle repose sur la programmation de points de rendez-vous réguliers et d'itérations, ponctués par des évaluations indépendantes.

A ce stade les acquisitions de connaissances reposent fortement sur l'exploitation du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, qui offre d'ores et déjà un retour d'expérience de travaux souterrains dans les argilites du Callovo-Oxfordien de plus de dix années. De nouveaux travaux expérimentaux y sont planifiés dans les prochaines années, en particulier un prototype représentatif d'alvéole MAVL.

L'Andra prévoit de déposer une demande d'autorisation de création de Cigéo en 2018. En fonction des évaluations qui en seront faites et sous réserve d'autorisation, la construction initiale puis une phase industrielle pilote de Cigéo permettront de prolonger l'acquisition de connaissances et les observations sur des ouvrages réels, notamment en termes dimensionnels. La conception et le développement industriel de Cigéo s'inscrivent dans une logique incrémentale. Les tranches ultérieures de Cigéo verront la mise en œuvre d'opportunités d'optimisation.

5. Références bibliographiques

- AFTES (2007). Compatibilité des recommandations AFTES relatives aux revêtements des tunnels en béton avec les Eurocodes – Recommandations de l'AFTES GT29R2F1 – *Tunnels et Ouvrages Souterrains n°204*, pp.378-390.
- Armand G., Noiret A., Zghondi J., Seyedi D.M.,(2013), Short- and long-term behaviors of drifts in the Callovo-Oxfordian claystone at the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 5,pp 221–230.
- Armand G., Plas F., Bosgiraud J-M (2015). L'apport du laboratoire souterrain de l'Andra pour le choix et la mise au point des techniques de creusement des ouvrages souterrains du projet de stockage de déchet radioactif Cigéo, *Tunnels et ouvrages souterrain*, n°250, p251-268.
- Guayacán-Carillo L.M., Sulem J., Seyedi D.M., Ghabezloo S., Noiret A., Armand G. (2015). Analysis of long-term anisotropic convergence in drifts excavated in Callovo-Oxfordian claystone. *Rock Mech Rock Eng* , 24 March 2015, Springer.
- Hingant P., Guerpillon Y. (1986). La construction du tunnel autoroutier de Chamoise. *Tunnels et ouvrages souterrains n°77*, pp. 206-221.
- Pardoën B., Levasseur S., Collin F. (2015). Using local second gradient model and shear strain localisation to model the excavation damaged zone in unsaturated claystone, *Rock Mechanics and Rock Engineering, Volume 48, Issue 2*, pp 691-714.
- Putz-Perrier M.W., Gilleron N., Bourgeois E., Saitta A. (2015). Attaque en pleine section ou section divisée ? Le cas du tunnel de Chamoise sur l'A40. *Tunnels et Espace Souterrain*, n°250, pp.271-281.
- Souley M, Armand G, Su K, Ghoreychi M. (2011). Modelling of the viscoplastic behaviour including damage for deep argillaceous rocks. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36,pp.1949–59.