

# ANDRA

## Laboratoire Souterrain de Recherche de Meuse Haute-Marne Première phase d'extension

# ANDRA

## Meuse Haute-Marne Underground Research Laboratory First extension phase



François MARTIN  
BG Ingénieurs Conseils

Roland LAVIGUERIE  
Antea Ingénierie

Laurence RICHARD  
ANDRA

Tancrede BONNET-EYMARD  
Eiffage

Deux articles sont récemment parus dans *Tunnels et Espaces Souterrains* avec pour sujets : "Auscultation des alvéoles HA du laboratoire souterrain de recherche de l'Andra (CMHM)" et "Calculs 3D prédictifs pour la conception d'alvéoles de stockage de déchets". Ces deux articles traitent des expérimentations du laboratoire relatives aux alvéoles pour le futur stockage des déchets à Haute-Activité et Vie Longue.

L'objet du présent article est tout autre ; il présente les travaux d'extension des galeries du laboratoire depuis la fin du creusement de la première tranche par le groupement GFE. Les premiers retours d'expérience sont également exposés.

### 1 - Présentation du laboratoire souterrain de Meuse / Haute-Marne

#### 1.1 - L'Andra, Statut et missions

Dans le cadre de la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991, l'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) a réalisé la construction d'un

#### Principaux intervenants

- Maître d'ouvrage : ANDRA
- Maître d'œuvre : ANTEA et BG Ingénieurs Conseils
- Entreprises : Eiffage TP
- Principaux sous-traitants et fournisseurs : Arcanne, BASF, CFT, Heintzmann, Minova, Soci

laboratoire de recherche souterrain, situé dans le département de la Meuse, sur la commune de Bure, dans lequel sont mises en œuvre des expérimentations à caractère scientifique et technologique. Ces expérimentations ont pour but l'étude des possibilités de stockage de déchets radioactifs en formation géologique profonde.

Préalablement à sa construction, le site a fait l'objet, d'une part, d'une campagne d'investigations géologiques, d'autre part, d'une étude de conception préliminaire. Cette phase d'investigation et de conception préliminaire s'est terminée à la mi-96 par le dépôt auprès de l'administration d'un dossier de "Demande d'Autorisation d'Installation et d'Exploitation" (D.A.I.E.) du laboratoire.

Two articles were recently published in *Tunnels et Espaces Souterrains* "Auscultation des alvéoles HA du laboratoire souterrain de recherche de l'ANDRA (CMHM)" (Inspection of High-Activity cells in the ANDRA underground research lab) and "Calculs 3D prédictifs pour la conception d'alvéoles de stockage de déchets" (Predictive 3D calculations for the design of waste storage cells). These two articles described laboratory experiments relating to cells for the future storage of High-Activity and Long-Lived Waste.

This article has a completely different purpose: it presents the work to extend the laboratory tunnels beyond the end of the first set of excavations carried out by the GFE consortium. It also reports on the first experience feedback.

### 1. Presentation of the Meuse / Haute-Marne underground laboratory

#### 1.1 - Status and role of the ANDRA

Pursuant to French law 91-1381 of December 30, 1991, the National

#### Principal stakeholders

- Project owner: ANDRA
- Project manager: ANTEA et BG Ingénieurs Conseils
- Contractor: Eiffage TP
- Main subcontractors and suppliers : Arcanne, BASF, CFT, Heintzmann, Minova, Soci

Agency for the Handling of Radioactive Waste [Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, ANDRA] has had built an underground research laboratory, located in the municipality of Bure in the Meuse department. Scientific and technological experiments are organised there. The purpose of these experiments is to study the possibility of storing radioactive waste in deep geological formations.

Prior to its construction, the site was the subject of a geological investigation campaign and a preliminary design study. This preliminary design and investigation stage was completed

Un Décret pris en Conseil d'Etat le 3 août 1999 a autorisé l'installation et l'exploitation du laboratoire.

La construction du laboratoire souterrain a été effectuée de 1999 à 2007 par le Groupement Fond Est (GFE).

La loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 demande à l'Andra d'approfondir ses connaissances en vue de proposer un site de stockage d'ici 2015.

Préalablement à cette décision, un débat public devra être organisé en 2012 / 2013. Ensuite, l'Andra devra déposer une demande d'autorisation de création, qui sera soumise pour avis à l'Autorité de Sûreté Nucléaire, à la CNE et aux collectivités locales, d'une zone de stockage.

Le Parlement aura alors à se prononcer sur un projet de loi déposé par le Gouvernement en 2015 / 2016, précisant les conditions de réversibilité du stockage. Ce stockage pourrait alors ouvrir à l'horizon 2025.

### 1.2 - Objectifs du laboratoire de Meuse/Haute-Marne

Le laboratoire est un outil de recherche avec deux puits et un ensemble de galeries implantées dans la couche d'argilite du Callovo-Oxfordien à étudier.

Les objectifs des investigations conduites dans les installations souterraines sont les suivants :

- vérifier la constructibilité et les possibilités de réversibilité d'un éventuel stockage dans la formation du Callovo-Oxfordien ;
- confirmer que la portée des perturbations engendrées par un éventuel stockage dans cette formation est limitée ;
- confirmer les propriétés de confinement de cette formation ;
- vérifier sa continuité géologique ;
- vérifier la capacité à sceller les ouvrages.

Ces investigations comportent :

- des observations géologiques et des mesures réalisées au fur et à mesure

de l'avancement du creusement des ouvrages souterrains ;

- des prélèvements d'échantillons géologiques ;
- des expérimentations en forages, en puits et dans des tronçons de galeries ;
- des essais pour vérifier l'adéquation des procédés de creusement et de soutènement de cavités avec un concept de stockage réversible ;
- des essais éventuels de mise en place et de retrait de colis factices et de matériaux de remplissage.

### 1.3 - Description générale du laboratoire

L'ensemble du laboratoire dans sa configuration actuelle est constitué de 3 unités :

- les installations de surface ;
- deux puits de liaison entre la surface et les installations souterraines ;
- les installations souterraines.

Les installations de surface sont réparties sur une superficie d'environ 17 ha et comprennent principalement :

- un ensemble de bâtiments à vocation scientifique et technique dont les superstructures des deux puits de liaison sont les éléments les plus notables ;
- une zone d'une superficie de l'ordre de 4 ha sur laquelle sont stockés les matériaux issus des travaux de creusement ;
- un bassin d'orage de 10 000 m<sup>3</sup> associé à un ensemble de collecte et de traitement des eaux (bassins de décantation et station d'épuration) ;
- un ensemble de réseaux (électrique, eau, air comprimé) permettant l'approvisionnement et le fonctionnement des installations de surface et souterraines.

Les deux puits, d'environ 500 m de profondeur, assurent la liaison avec les installations souterraines du laboratoire :

- le puits d'accès (PA), de 5 m de diamètre, permet l'accès au fond des personnes et du matériel, l'extraction des matériaux et il assure l'entrée d'air pour la ventilation ;

in mid-1996, with the submission of an Installation and Operation Permit Request [Demande d'Autorisation d'Installation et d'Exploitation, D.A.I.E.] to the authorities for the laboratory. A Decree of the Council of State on August 3rd, 1999 granted permission for the laboratory to be installed and operated.

Construction of the underground laboratory was carried out between 1999 and 2007 by the Groupement Fond Est consortium (GFE).

The French law 2006-739 of June 28, 2006 called on the ANDRA to extend its knowledge, with a view to proposing a storage site by 2015.

Prior to this decision, a public inquiry is to be held in 2012/2013. Following this, the ANDRA must submit a request for a permit to set up a storage site: this will be submitted to the Nuclear Security Authority [Autorité de Sûreté Nucléaire], the CNE and to local authorities.

It will then be up to the French Parliament to vote on a draft bill to be introduced by the government in 2015/2016, specifying the conditions in which this storage may be reversed. The storage facility could then be opened by 2025.

### 1.2 - Goals of the Meuse/Haute-Marne laboratory

The laboratory is a research facility with two shafts and a set of tunnels, located in the Callovo-Oxfordian argillite layer to be studied.

The goals of the investigations conducted in the underground installations are as follows:

- checking the constructability and reversibility possibilities for potential storage in the Callovo-Oxfordian formation;
- confirming that the impact of disturbances created by any storage in this formation is minimal;
- confirming the confinement properties of this formation;

- checking its geological continuity;
- checking the ability to seal off tunnels.

These investigations include the following:

- geological observations and measurements carried out as the underground excavations have progressed;
- geological sampling;
- experiments in boreholes, shafts and tunnel sections;
- tests to check that excavation and cavity support procedures are compatible with the concept of reversible storage;
- possible tests of the installation and removal of dummy canisters and infill materials.

### 1.3 - General description of the laboratory

At present, the laboratory is composed of three units:

- the surface installations;
- two shafts connecting the underground installations to the surface;
- the underground installations themselves.

The surface installations cover a total area of approximately 17 ha. Their main components are as follows:

- scientific and technical buildings, the most distinctive parts of which are the two headframes above the link shafts;
- an area approximately 4 ha in size on which the materials from the excavation works are stored;
- a storm basin with capacity of 10,000 m<sup>3</sup>, plus a water collection and treatment unit (decanting basins and water treatment plant);
- a set of networks (electricity, water, compressed air) for the supply and operation of the surface and underground installations.

The two shafts, approximately 500 m deep, form the link with the laboratory's underground installations:

- the access shaft (AP), 5 m in diameter, provides access below ground

• le puits auxiliaire (PX), de 4 m de diamètre, assure la sortie d'air et constitue également une issue de secours pour les personnes.

Les installations souterraines sont constituées d'un ensemble de galeries localisées dans la couche du Callovo-Oxfordien avec un niveau principal situé à 490 m de profondeur et un niveau secondaire à 445 m de profondeur. Cet ensemble comporte, d'une part des galeries affectées aux investigations scientifiques, d'autre part des galeries à caractère technique.

### 1.4 - Contexte géologique et géotechnique

L'argilite du Callovo-Oxfordien est une roche composée principalement de trois types de minéraux : argile, quartz et calcite dont les teneurs massiques moyennes sont respectivement de 41 %, 25 % et 31 % au niveau principal du laboratoire.

L'état de contrainte initial au niveau du laboratoire souterrain (- 490 m) a été déterminé par des essais de fracturation hydraulique en forage :

- $\sigma_v = 12,7$  MPa
- $\sigma_h = 12,4$  MPa
- $\sigma_H \leq 16$  MPa, orientée suivant N155°E.

La valeur de la contrainte majeure horizontale correspond à une anisotropie marquée :  $1 < \sigma_H / \sigma_v < 1,3$ .

La valeur du module de déformation tangent est de l'ordre de 4000 MPa (zone de déformation élastique) avec une anisotropie de l'ordre de 1,2 par rapport à la stratification et un coefficient de Poisson de l'ordre de 0,3.

Les valeurs moyennes de la résistance à la compression uniaxiale et à la traction sont respectivement de 21 MPa et 2,7 MPa.

Les paramètres du critère de rupture de Hoek & Brown, sont :

- $\sigma_c = 33,5$  MPa
- $s = 0,128$
- $m = 2,0$

La valeur moyenne de la déformation

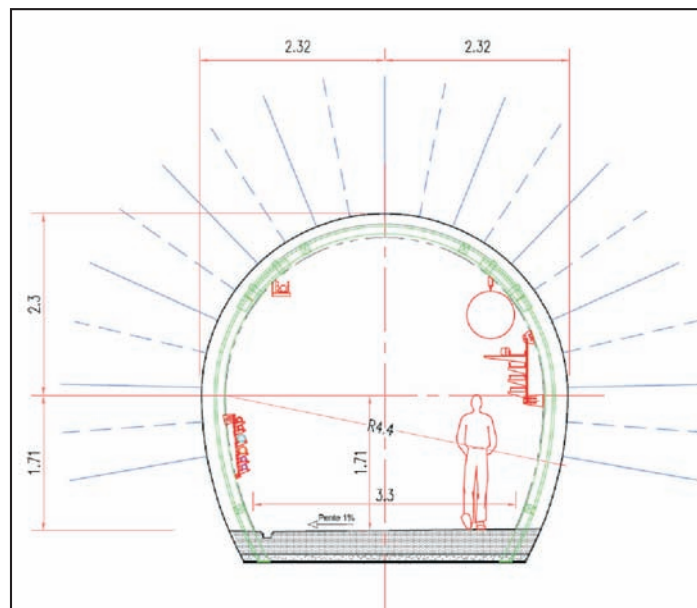


Figure 1 : section-type des galeries GFE  
Figure 1: typical cross-section of GFE tunnel

à la rupture est de 1,5 % (essai triaxiaux à pression de confinement comprise entre 6 et 20 MPa).

### 1.5 - La construction du laboratoire par le GFE

Les galeries de base du laboratoire ont été réalisées par le Groupement Fond Est (GFE) selon la coupe de principe de la Figure 1. L'excavation fut réalisée en deux-temps, par demi-section, et soutenue provisoirement par une couche de 5 cm de béton projeté associée à la réalisation d'une auréole de 9/10 boulons radiaux. Un présoutènement était souvent réalisé, constitué par un enfilage de barres HA en calotte. A chaque passe d'excavation, des cintres coulissants étaient assemblés (cintres TH29/58) en voûte et piédroits tous les mètres. Le radier était constitué de béton non-armé coulé en place.

Les intersections de galerie – appelées "carrures" – étaient confortées par la mise en place d'un portique rigide en HEB 240 muni de contrefiches. Cet élément rigide ne comportait pas de zone de coulissement.

for personnel and equipment and for the extraction of materials; it also provides air inflow for ventilation.

• the auxiliary shaft (PX), 4 m in diameter, provides air output and also serves as an emergency route for personnel.

The underground installations consist of a set of tunnels located in the Callovo-Oxfordian layer, with a primary level located at a depth of 490 m and a secondary level located at a depth of 445 m. The installations include both tunnels devoted to scientific research and technical tunnels.

### 1.4 - Geological and geotechnical context

Callovo-Oxfordian argillite is a rock which consists mainly of three types of mineral: clay, quartz and calcite, in mean proportions by mass of 41%, 25% and 31% respectively at the laboratory's primary level. Initial stress conditions at the level of the underground laboratory (- 490 m)

were determined by hydraulic fracturing tests in boreholes:

- $\sigma_v = 12.7$  MPa
- $\sigma_h = 12.4$  MPa
- $\sigma_H \leq 16$  MPa, oriented N155°E.

The major horizontal stress value is that of marked anisotropy:

$$1 < \sigma_H / \sigma_v < 1.3.$$

The related modulus of deformation is approximately 4000 MPa (elastic deformation area) with anisotropy of around 1.2 with respect to stratification and a Poisson ratio of approximately 0.3.

The mean values of uniaxial compressive strength and tensile strength are 21 MPa and 2.7 MPa respectively. The Hoek & Brown failure criterion parameters are as follows:

- $\sigma_c = 33.5$  MPa
- $s = 0.128$
- $m = 2.0$

The mean deformation at failure value is 1.5% (triaxial tests at confinement pressure of between 6 and 20 MPa).

### 1.5 - Construction of the laboratory by GFE

The basic laboratory tunnels were built by the Groupement Fond Est (GFE) consortium, as shown in the principle cross-section Figure 1. Excavation was carried out by half-section in two phases and supported temporarily by a 5 cm layer of shotcrete plus construction of a ring of 9/10 radial bolts. In many places, pre-support was carried out in the form of a ribbed rebar mesh layer. During each excavation run, TH29/58 sliding ribs were assembled into arches and side walls every one metre. The bottom slab consisted of non-reinforced concrete poured on site.

Tunnel intersections - known as "carrures" - were reinforced by installing a rigid HEB 240 frame and bracing. This rigid component did not include a slippage area.

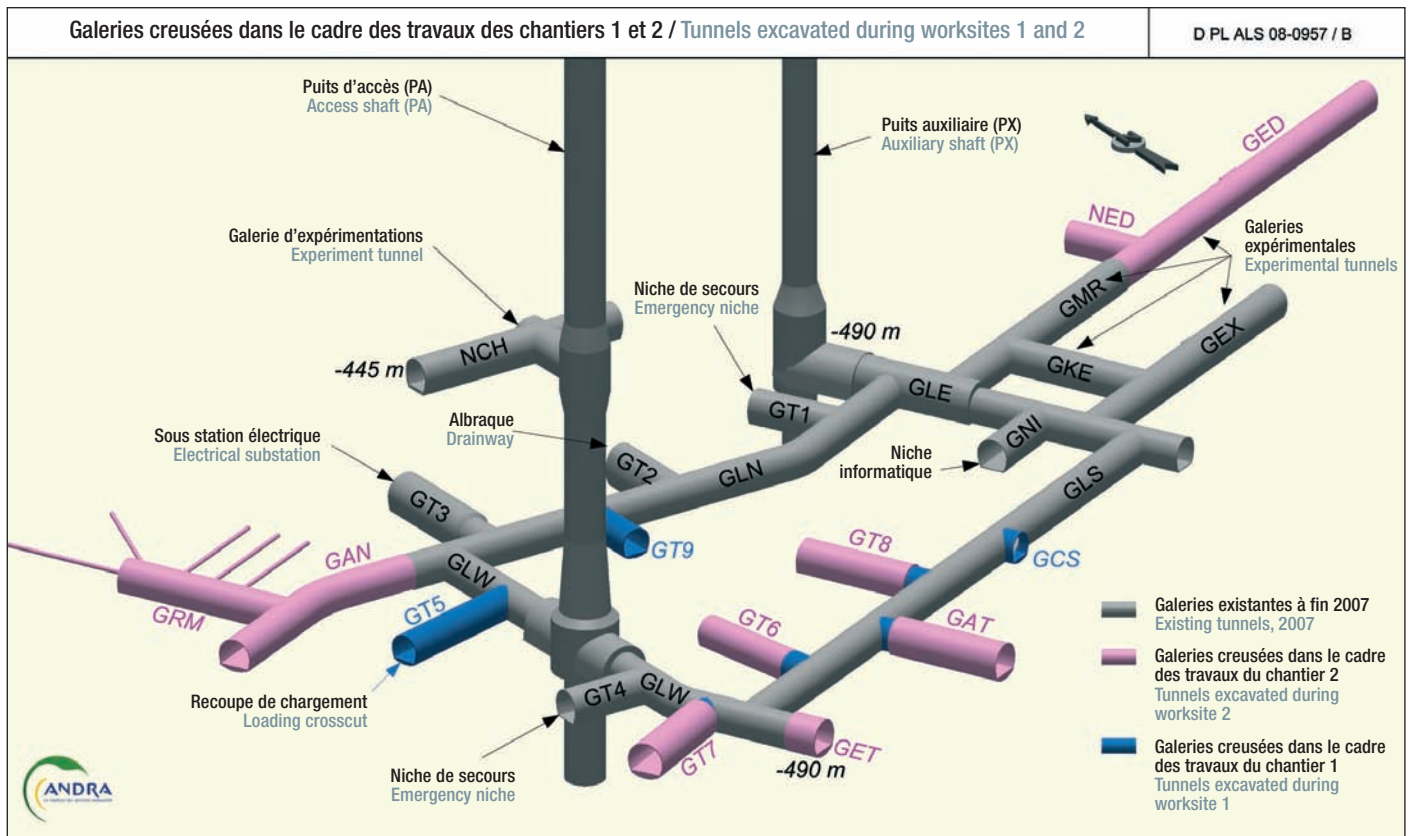


Figure 2 : plan du laboratoire souterrain fin 2009 / Figure 2: plan of the underground laboratory as of the end of 2009

**2 - La première tranche du projet d'extension - les chantiers 1 et 2**

**2.1 - Le projet**

**2.1.1 - Des galeries techniques et expérimentales**

Après les travaux de creusement et d'équipement des galeries de liaison entre puits et des premières galeries expérimentales réalisées par le GFE, une nouvelle série de travaux d'excavation ont débuté au dernier trimestre 2007. Le programme de ces travaux d'extension du laboratoire comprend la réalisation de nouvelles galeries techniques appelées GTx et de trois nouvelles zones d'expérimentations scientifiques (GAN, GET, GED), constituées de trois galeries principales et de leurs niches et carrures associées. Ces galeries sont construites dans le prolongement de rameaux de galeries précédemment construits. Ces travaux ont donné lieu à la création de nouvelles intersections nécessitant la mise en place d'ouvrages de soutènement spécifiques

appelés carrures. Les travaux de creusement ont été réalisés en deux phases par deux entreprises distinctes : Laborex dans un premier temps, puis Eiffage TP. L'Andra a attribué au groupement Antea/BG le marché de maîtrise d'œuvre travaux de cette phase d'extension du laboratoire. La Figure 2 présente l'extension du laboratoire à la fin 2009 : en bleu les galeries et intersections du chantier 1, réalisées par l'entreprise Laborex et en rose, les galeries et intersections réalisées par l'entreprise Eiffage TP.

**2.1.2 - Travaux d'excavation Laborex (Chantier 1)**

Les travaux d'excavation des galeries techniques, des amorces des nouvelles galeries et de pose des ouvrages de soutènement des intersections ou "carrures polygonales" ont été confiées par l'Andra à la société Laborex, en charge sur le site de Bure des travaux d'exploitation du laboratoire, assistée par un cotraitant, la société allemande Saar Montan.

**2 - The first phase of the extension project - worksites 1 and 2**

**2.1 - The project**

**2.1.1 - Experimental and technical tunnels**

After excavation and outfitting of the tunnels linking the shafts and the first experimental tunnels built by GFE, a new series of excavation works began in the last quarter of 2007. This programme of works to extend the laboratory included the construction of new technical tunnels (known as GTx) and three new scientific experimentation areas (GAN, GET and GED) consisting of three main tunnels along with their related niches and intersections. These tunnels are extensions of the previously constructed tunnel branches. The works resulted in the creation of new intersections, requiring the installation of specific supporting structures known as "carrures". Excavation works were carried out in

two stages by two distinct contractors: firstly, Laborex, then Eiffage TP. ANDRA awarded the Antea/BG consortium the works contractor's contract for this phase of the laboratory extension works. Figure 2 shows the laboratory extension as of the end of 2009: the worksite 1 tunnels and intersections built by Laborex are shown in blue, while the tunnels and intersections built by Eiffage TP are shown in pink.

**2.1.2 - Laborex excavation works (Worksite 1)**

Excavation works for technical tunnels, the start of new tunnels and installation of intersection supports ("carrures polygonales") were entrusted by ANDRA to Laborex, responsible for laboratory operation works on the Bure site, assisted by a German contractor, SaarMontan. Works took place from 15/10/2007 to 30/05/2008, including the preparation and design phases. These works consisted in the following:



Figure 3 : carrure de la galerie GT6

Figure 3: intersection support structure of GT6 gallery

Les travaux se sont déroulés du 15/10/2007 au 30/05/2008, phases de préparation et d'études incluses.

Les travaux ont consisté à :

- Poser 7 carrures : GT5, GT6, GT7, GT8, GT9, GAT et GCS. Cette pose impliquait la mise en place de deux cintres amorces nécessitant le début du creusement de la galerie correspondante sur une longueur de 1,2 m à 1,6 m ;
- Creuser la galerie GT5, recoupe à déblais à proximité du blindé du puits PA, d'une longueur de 20,95 m ;
- Creuser la galerie GT9 débouchant depuis la GLN, sur une longueur de 8,33 m, destinée éventuellement à accueillir une installation de dépoussiérage ;
- Amorcer le creusement de la galerie GT6 sur une longueur de 2,33 m.

### 2.1.3 - Travaux d'excavation Eiffage (Chantier 2)

L'entreprise Eiffage TP a pris le relais de la société Laborex à partir du 1<sup>er</sup> mai 2008. Le marché initial comprenait la réalisation de trois nouvelles zones d'expérimentations pour le service scientifique de l'Andra : GED, GET et GAN.

Dans un premier temps, de mai 2008 à janvier 2009, ont été creusées les galeries GAN et GRM dans le prolon-

gement de la GLN, à l'ouest puis les galeries GED/NED dans le prolongement de la galerie GMR, à l'est.

Dans un deuxième temps, du mois de mai au 17 juillet 2009, des galeries techniques qui n'avaient pas été réalisées par Laborex, ont été creusées. La galerie GET a été supprimée du chantier 2. Par ordre chronologique de creusement il s'agit :

- De la galerie GT7, dédiée à l'acheminement et/ou à la fabrication des bétons pour les futurs chantiers de creusement ;
- De la galerie GT6, qui constitue une zone sanitaire et une salle de repos pour le personnel au fond ;
- De la galerie GAT, initialement prévue pour accueillir un garage équipé, mais qui servira finalement de zone de stockage provisoire et d'amorce pour les futures extensions du laboratoire ;
- De la galerie GT8, initialement prévue pour le stockage provisoire des marins mais qui servira dans un premier temps de galerie de dépoussiérage ;
- De l'amorce de la GET, excavée pour faciliter le montage de la future machine à attaque ponctuelle du chantier 3.

### 2.1.4 - Sections-type optimisées

Suite au constat de plusieurs désordres intervenus sur les premières galeries et intersections creusées (fissurations

- Installation of 7 "carrures": GT5, GT6, GT7, GT8, GT9, GAT and GCS. This installation required two initial ribs to be installed. This in turn involved starting to excavate the related tunnel for a length of between 1.2 m and 1.6 m ;
- Excavation of the GT 5 tunnel, fresh removal of spoil around the PA shaft shielding, for a length of 20.95 m ;
- Excavation of the GT 9 tunnel opening onto the GLN, for a length of 8.33 m, possibly to accommodate a dedusting unit ;
- Starting excavation of GT gallery 6 for a length of 2.33 m.

### 2.1.3 - Eiffage excavation works (Worksite 2)

Eiffage TP took over from Laborex as of May 1st 2008. The initial tender involved building three new experiment areas for the scientific department of ANDRA: GED, GET and GAN. Initially, between May 2008 and January 2009, the GAN and GRM tunnels were excavated, extending GLN to the west, then the GED/NED tunnels as an extension of the GMR tunnel to the east.

Next, from May to July 17, 2009, technical tunnels not excavated by Laborex were constructed. The GET

tunnel was withdrawn from worksite 2. In chronological order, excavations were as follows:

- Tunnel GT7, designed for the routing and/or manufacture of concrete for future excavation works ;
- Tunnel GT6, which forms a sanitary area and rest room for personnel below ground ;
- Tunnel GAT, initially designed to accommodate an equipped garage but finally to be used as a temporary storage zone and starter area for future laboratory extensions ;
- Tunnel GT8, initially designed for temporary storage of muck but now intended to be used initially as a dedusting tunnel ;
- The start of the GET tunnel, excavated to facilitate the assembly of the future roadheader machine for worksite 3.

### 2.1.4 - Optimised standard sections

A number of anomalies were observed with regard to the first tunnels and intersections excavated (cracking of slabs and shearing of assemblies). As a result, new studies were carried out by design firm Coyne-et-Bellier to optimise retaining structures. This led to the development of new

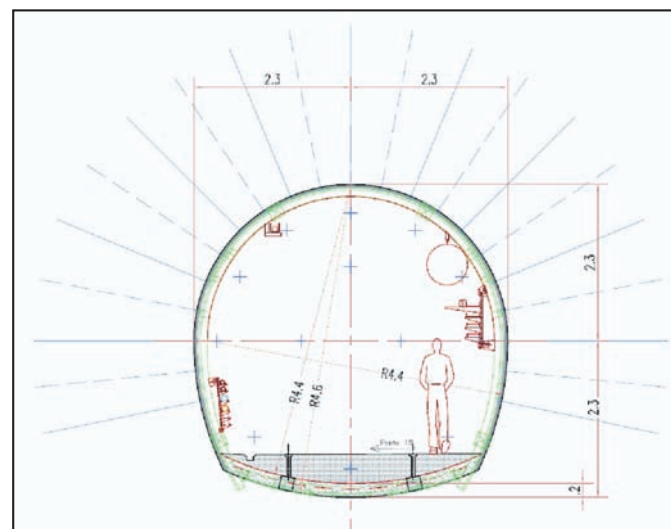


Figure 4 : section-type n°1 des chantiers 1 et 2

Figure 4: standard section 1 for worksites 1 and 2

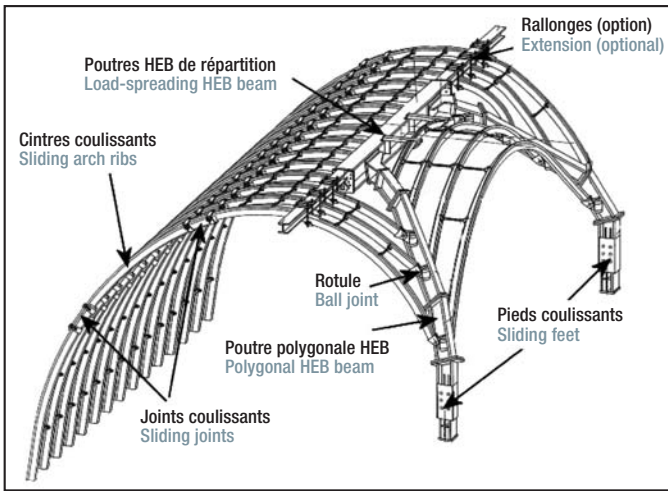


Figure 5 : principe d'une carrure polygonale  
Figure 5: principle of a polygonal "carrure"

des radiers et cisaillement des assemblages), de nouvelles études ont été faites par le bureau d'études Coyne-et-Bellier afin d'optimiser le soutènement. Elles ont abouti à l'élaboration de nouvelles sections-types (Figure 4) et de nouvelles carrures :

- Le radier a été contrevoûté par un soutènement mixte de cintres TH, de béton et de cales compressibles<sup>1</sup> dans les zones de coulissement ;

- Le front a été soutenu par 13 boulons plats de fibre de verre de 12 m (recouvrement de 6 m).

Les carrures ont été entièrement repensées. Le principe validé par l'Andra est représenté sur la Figure 5. La forme polygonale associée à la création de deux zones de coulissement à la base des montants a permis de réaliser des intersections plus souples et durables. Les montants sont constitués de poutres HEB400. Les calculs à 20 ans, tenant compte du fluage de la roche, ont permis de justifier le dimensionnement de ces carrures et valider les choix de conception.

## 2.2 - Les travaux

### 2.2.1 - Méthode d'excavation et cycle de creusement

Les travaux s'effectuent simultanément sur deux fronts de creusement, mais de façon décalée afin de ne pas

superposer les phases de marouflage ou de forage par exemple (problème de circulation ou de disponibilité des engins).

Le phasage de creusement et de soutènement donné ci-après, prend prioritairement en compte la sécurité des mineurs par rapport à la chute de blocs :

1. Boulonnage frontal : forage en diam. 76 ou 35 avec un jumbo un bras (longueur utile de la glissière 2.50 m) ;

2. Excavation avec deux Brokk 330 + BRH (dont un monté sur articulation) ;

3. Marouflage avec mini-chargeuse articulée surbaissée Manitou ML-40 et "charge et roule" Sandvik LH201 (capacité respective des godets de 450 et 540 l) ;

4. Béton projeté fibré en voûte, voie humide (pompe Aliva AL-263), fabriqué en surface à partir de mélange sec. Projection avec lance de gunitage montée sur Brokk ;

5. Protection du front de taille : fixation de panneaux de treillis soudés ST40C sur les boulons de front OU Béton projeté fibré si front instable ;

6. Boulonnage radial : forage en une seule passe (boulons de 2,40 m), scellement à la résine (cartouche bi-composant) ;

7. Marouflage de la contrevoûte : godet sur Brokk puis finition manuelle à la pelle ;

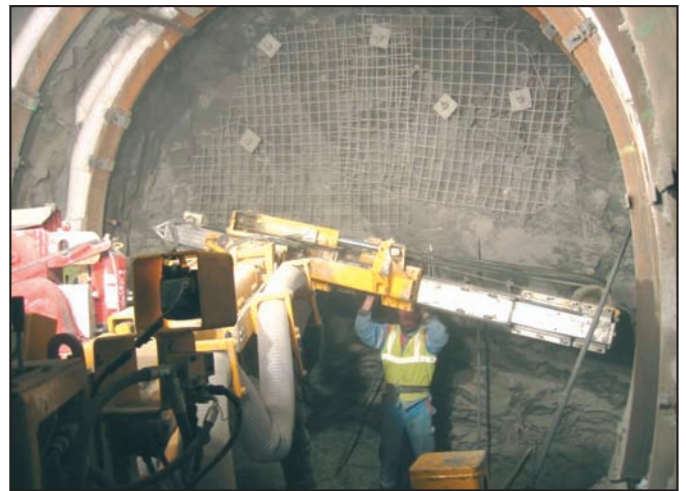


Figure 6 : jumbo de forage à front (boulonnage radial)  
Figure 6: jumbo drill at the face (radial bolting)

standard sections (Figure 4) and new carrures:

- Inverted arches were made for the slab with a retaining structure consisting of yieldable steel (TH) arches, concrete and compressible shim<sup>1</sup> in slippage areas;

- The face was supported by 13 flat fibreglass bolts, 12 m in length (with an overlap of 6 m).

The carrures were completely redesigned. The principle validated by ANDRA is shown in Figure 5.

The polygonal shape, along with the creation of two slippage zones at the base of the uprights, has made it possible to build more flexible and durable intersections. The uprights are HEB400 beams. 20-year design calculations, which take into account rock creep, were used to support the sizing of these carrures and validate the design options.

## 2.2 - Works

### 2.2.1 - Excavation method and cycle

Works were carried out on two excavation faces simultaneously but not synchronously: in this way, mucking and drilling (for instance) were not carried out at the same time, in order to avoid traffic and plant availability issues.

The security of personnel with respect to falling rocks was a priority in the excavation and support phasing shown below:

1. Face bolting: drilling at a diameter of 76 or 35 with single-boom jumbo drill (boom extension: 2.50 m);

2. Excavation using two Brokk 330 + hydraulic hammer (one mounted on an articulated jib);

3. Mucking with lowered mini-loader Manitou ML-40 and "load and drive" Sandvik LH201 (with bucket capacities of 450 and 540 l respectively) ;

4. Wet-process fibre-reinforced shotcreting of the arch (Aliva AL-263 pump) manufactured at the surface using a dry mix. Sprayed on using a Brokk-mounted gunite nozzle;

5. Protection of the workface: ST40C welded mesh panels fixed to OU bolts, fibre-reinforced shotcreting where the face was unstable;

6. Radial bolting: single-run drilling (2.40 m bolts), resin sealing (dual-component cartridge);

7. Mucking of inverse arch: bucket on Brokk followed by manual finishing with shovel;

8. Installation and adjustment of the rib arch using the "forwards-flow" principle (posts fixed to preceding ribs). Adjustment using pusher stabilisation tool and horizontal and vertical line laser;

1 - Cale compressible : élément en béton ou en acier facilement compressible mais conservant une résistance à la compression après rupture et grande déformation. Cet élément est un "fusible" qui évite une mise en compression trop élevée de la contrevoûte / Compressible shim: concrete or steel component which may be easily compressed but which retains some compressive strength after failure and major deformation. This component acts as a "fuse", preventing the inverted arch becoming too compressed.

8. Pose et réglage du cintre avec utilisation de marche-avant (poutres fixées sur les cintres précédents). Réglage au cric forestier à l'aide d'un laser "lignes horizontale et verticale" ;

9. Béton de contrevoûte : protection des zones de coulisement puis mise en place des cales compressibles métalliques ;

10. Béton projeté pour redémarrage d'un cycle plus rapidement : calage du cintre ;

11. Calage du cintre au terrain par remplissage au coulis de ciment d'une gaine de soutènement (type Bullflex).

### 2.2.2 - Interface avec les études scientifiques

La particularité de ce chantier souterrain est sa finalité scientifique pour étudier le comportement de l'argillite.

Au fur et à mesure de l'avancement du front un certain nombre d'opérations sont réalisées comme des relevés géologiques détaillés du front et en particulier la fracturation induite, la pose de sections de mesures de convergence à fil INVAR (SMC), la pose d'extensomètres en forage (SMR). Des adaptations du soutènement ou des aménagements spécifiques sont également réalisées en vue d'expériences futures : mise en place de réservations dans les coques de béton projeté pour éviter le carottage du béton lors de la réalisation de forages d'expérimentation, pose de petites « carrures » en parement pour dégager des espaces plus importants qu'un intercintre courant pour la réalisation de forages horizontaux de gros diamètre (appelés alvéoles HA), pose d'une membrane d'étanchéité PVC sur l'intrados du soutènement pour des besoins expérimentaux.

Ces opérations sont en général programmées à l'avance mais des modifications de dernière minute peuvent intervenir qui nécessitent une étroite collaboration entre l'Andra, le maître d'œuvre et l'entreprise ainsi qu'une bonne réactivité de l'ensemble des intervenants.

## 2.3 - Retour d'expérience du chantier

### 2.3.1 - Les soutènements

Les soutènements mis en œuvre dans les nouvelles galeries et qui diffèrent relativement peu d'une section à l'autre dans leur conception, sont issus d'un renforcement du premier soutènement GFE après observation de son comportement. Leur comportement actuel correspond bien à ce qui était attendu et en particulier la maîtrise des déformations en radier.

- Les auréoles de boulons radiaux mis en place à l'avancement de manière systématique ont pleinement assuré leur rôle de confinement proche de l'excavation et de "couture" des fractures et des chevrons de décompression. Ils limitent ainsi l'extension de la zone de roche endommagée. L'adaptation du plan de boulonnage localement au droit des forages scientifiques, et en particulier en clef de voûte, a mis en évidence le rôle primordial des ancrages pour la tenue locale du massif rocheux. Quelques hors-profil ont été constatés par endroit, partiellement causés par l'absence de boulons en partie supérieure de la section ;

- Dans les deux configurations d'orientation de galerie, le boulonnage de front mis en place (13 boulons horizontaux de 12 m avec un recouvrement de 6 m) est d'autant plus efficace que la répartition est homogène. Il doit toujours être associé à du béton projeté d'au moins 5 cm d'épaisseur ou provisoirement à une protection complète par treillis soudé. Les écaillages locaux en parement, entre boulons, sont en effet fréquents ;

- Les contrevoûtes réalisées à l'avancement, en béton projeté armé de treillis et de cales compressibles sont sollicitées assez rapidement. Cependant, l'élément résistant et calculé pour reprendre les efforts sous le radier est le cintre de contre-voûte qui « ferme la section ». La protection des zones de coulisement des cintres est indispen-

9. Inverted arch concrete: protection of slippage zones and installation of compressible steel wedges;

10. Shotcreting for quicker restarting of a cycle: wedging the arch rib;

11. Arch rib adjusted to the terrain using a Bullflex type inflatable seal filled with cement grouting.

### 2.2.2 - Interfacing with scientific studies

One particularity of this underground worksite is that it is the subject of scientific study of the behaviour of argillite. As the workface advanced, a number of operations were performed, such as detailed geological measurements at the face, particularly of the fracturing caused; the installations of invar wire convergence measurement sections ('SMC'); the installation of strain gauges in boreholes ('SMR'). Adaptations of the retaining walls and specific outfitting was also carried out with a view to future experimentation: installing box-outs in the shotcrete shells to prevent the concrete being cored during experimental boreholes; installation of small carrures in the lining to free up spaces larger than the standard space between ribs for large-diameter horizontal boreholes (known as HA cells); installation of a PVC waterproofing membrane on the inside of the retaining wall for experimental purposes.

In general, this type of operation are planned beforehand, but last-minute changes [may occur, then calling] for close cooperation between ANDRA, the project manager and the contractor, as well as a good degree of flexibility on the part of all those involved;

## 2.3 - Feedback from the worksite

### 2.3.1 - Retaining walls

The retaining walls installed in the new tunnels, which differ relatively

little from one section to another in terms of design, constituted a reinforcement of the first GFE retaining wall after its behaviour had been observed. Their current behaviour is in line with what was expected, particularly as regards the extent of slab deformation.

- Systematic installation of rings of radial bolts as works progressed fulfilled their role of close confinement of the excavation, as well as 'patching' together splits and stress relief chevrons. These limit the extension of the damaged section of rock. Local adjustment of the bolting plan alongside scientific boreholes, and more particularly at the top of arch section, demonstrated the key role of anchors in local strength of the rock-mass. Some sinkage was observed in places, caused partly by the absence of bolts in the upper half of the section;

- In the two tunnel orientation configurations, the effectiveness of the workface bolting installed (13 horizontal bolts 12 m in length, with an overlap of 6 m) was proportional to how uniform the layout was. It should always be combined with a layer of shotcrete at least 5 cm thick or, temporarily, with complete protection by means of welded mesh. There was frequent spalling of the lining between plugs;

- The inverse arches constructed as works progressed, using shotcrete reinforced with mesh and compressible shims, were quickly subject to stress. However, the strength component, designed to take up the stress beneath the slab, is the inverse arch rib, which completes the section. Protection of the rib slippage zones is vital to prevent rib elements being blocked by the concrete;

- The retaining wall is effective only once the rib arch is adjusted to the terrain, with wedging carried out for the whole of the arch. Worksite 2 experience revealed that shotcrete

sable pour éviter le blocage des éléments de cintre par le béton ;

- L'efficacité du soutènement n'est réelle que lorsque le cintre est calé au terrain et l'est d'autant plus que le calage est réalisé sur la totalité du cintre. L'expérience du chantier 2 a montré qu'un calage au béton projeté des cintres TH était compliqué, partiel et donc pas aussi efficace à long terme. Le boudin gonflé au coulis de ciment (marque Bullflex par exemple) a permis de réaliser ce calage avec un maximum d'efficacité tout en permettant le coulisement des différents éléments du cintre. Les cintres sont de ce fait moins « scellés » au terrain et des entretoises restent indispensables pour assurer leur position ;

- La couche de 5 cm de béton projeté prévue dans le soutènement n'a pas un rôle significatif dans le soutènement en parements et à front a pour but d'éviter un déconfinement et une altération trop rapide de l'argillite en surface et sa propagation plus en profondeur. En cela, cette couche agit comme une protection à court terme pour les mineurs en permettant de poser et caler le cintre en sécurité. Néanmoins cette épaisseur de 5 cm peut être considérée comme minimale car sur le chantier, les couches de béton d'épaisseur insuffisante ont très rapidement fissuré, et de nombreuses reprises ont dû être réalisées pour renforcer la coque.

### 2.3.2 - La méthode et les contraintes du site

La principale contrainte du chantier est constituée par le passage obligé par les puits, que ce soit le matériel mais également les matériaux (marin, béton, cintres etc.).

Cette contrainte nécessite la mise en place de réunions journalières de programmation pour planifier l'utilisation de la cage à matériel, seul lien entre le chantier et le carreau au jour.

Même si la vitesse d'avancement du

chantier n'est pas l'objectif unique de l'Andra au regard de la sécurité du chantier et de la réussite des expérimentations, cette configuration nécessite de la part de l'entreprise une grande capacité d'adaptation pour tenir les cadences contractuelles. Les cadences moyennes de creusement constatées au laboratoire sont par conséquent assez faibles en comparaison de chantiers souterrains plus classiques : entre 3 et 5 m par semaine. Les dimensions des galeries – notamment les galeries de liaison – et le fait que le laboratoire soit en exploitation pendant les travaux ont conduit à retenir des engins de petites dimensions (largeur maxi : 1,30 m). Afin de minimiser l'impact de ce choix sur la durée des opérations de marinage, l'entreprise a opté pour un marinage avec deux engins avec des zones de croisement prédéfinies.

La fabrication du béton projeté en surface dans un hangar chauffé a permis de stocker et fabriquer du béton par grand froid. La descente du béton frais par bennes de 500 l est tributaire néanmoins de la disponibilité de la cage à matériel, dans les cas de coactivité ou de maintenance.

Au cours du chantier, l'entreprise a utilisé la polyvalence du Brokk 330 avec ses divers accessoires : BRH, lance de gunitage, pince à cintre, godet, fraise, ...

bracing of TH arches was complicated, incomplete and thus less effective in the long term. Using a Bullflex type (or similar) inflatable tube filled with cement grouting enabled this bracing to be carried out with a maximum of efficiency and was possible for all the different components of the rib. This process does not "seal" the arch ribs to the terrain, and spacers remain vital to ensure their positioning;

- The 5 cm layer of shotcrete planned in the retaining wall does not play a significant role in support in the medium to long term. It was used for the linings and face to avoid stress release, over-rapid alteration of the argillite at the surface and propagation of this to greater depths. This layer therefore provides short-term protection for personnel, allowing them to install and adjust the rib arch in safety. Nevertheless, this 5 cm layer should be considered as a minimum. On this worksite, insufficiently thick layers of concrete soon cracked, and many repairs had to be carried out to strengthen the shell.

### 2.3.2 - Site methods and considerations

The key consideration for this worksite was the fact that both plant and materials had to travel via the shaft (including muck, concrete, ribs, and so on).

This restriction involved setting up daily planning meetings to schedule the use of the materials cage, the sole link between the worksite and the surface.

While the speed of progress of the worksite was not the sole aim of ANDRA (worksite security and the success of experiments also being key factors), this configuration nonetheless involved the contractor being highly flexible in order to keep to contractual rates of progress. Consequently, the average rates of progress of excavation were relatively slow compared to more traditional worksites: between 3 and 5 m per week. The tunnel dimensions - particularly those of connecting tunnels - and the fact that the laboratory was in use during the course of works meant that small plant was used (maximum width: 1.30 m). In order to minimise the impact of this choice on the length of mucking operations, the contractor decided to use two units for mucking, with pre-defined crossover areas.

Manufacturing the shotcrete at the surface in a heated hangar made it possible to manufacture and store concrete even during very cold weather. Lowering the fresh concrete in 500 l skips was nonetheless dependent on availability of the materials cage in the event of coactivity and/or maintenance.

During the worksite, the contractor made the most of the multi-purpose nature of the Brokk 330 and its various accessories: hydraulic hammer, gunité nozzle, rib claw, bucket, cutter, etc.

The most effective method of drilling through the argillite proved to be lipped rotary drilling bits.

Using inflatable grouting tubes for wedging proved effective when the space between the layer of shotcrete and the outside of the rib was between 7 and 20 cm. For larger sinkages requiring thicker sealing, two tubes

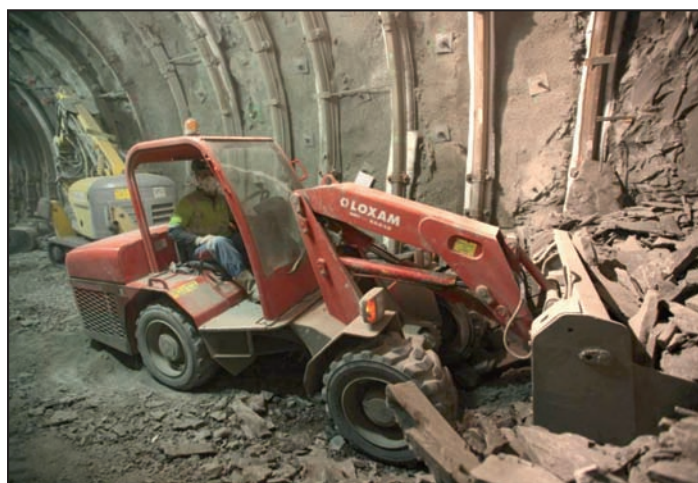


Figure 7 : marinage à la mini-chargeuse / Figure 6: mucking using the mini-loader



Figure 9 : marin à front après l'excavation  
Figure 9 : muck at the workface after excavation

Figure 8 : nacelle / Figure 8: cradle

Le forage de l'argilite a été le plus efficace avec l'utilisation de taillants à lèvres.

Le calage au moyen de boudins gonflés au coulis de ciment s'est montré efficace lorsque l'espace entre la couche de béton projeté et l'extrados du cintre est compris entre 7 et 20 cm. Pour des hors profils plus importants et donc des calages de plus forte épaisseur, deux boudins ont été utilisés avec nécessité de mettre en place un épaulement ultérieur en béton projeté pour assurer la stabilité du calage.

Pour le travail en hauteur, l'entreprise a retenu des nacelles à mât sur chenilles (largeur 1 m sans stabilisateur). Malgré le faible encombrement de ce type de nacelle, les dimensions réduites des galeries ont rendu délicates certaines phases de travaux, notamment la mise en œuvre des boulons où le jumbo et la nacelle sont à front, ou encore la pose de cintre qui nécessite le Brokk 330 et la nacelle à front.

### 2.3.3 - Le comportement du soutènement et du terrain

Dans le cas du Laboratoire souterrain de Bure, le soutènement suit la déformation du terrain en appliquant une pression de confinement estimée en moyenne à 0,2 MPa dans le cas des galeries cintrées, à comparer aux

contraintes naturelles comprises entre 12 et 16 MPa. Le soutènement n'a donc que peu d'influence sur les convergences.

La disposition du Laboratoire a été retenue pour que les deux directions privilégiées des galeries soient parallèles aux contraintes principales, soit à la contrainte majeure (galeries scientifiques GRM, GET et GCS (deux galeries réalisées dans le chantier suivant) ou techniques GAT, GT8, GT6, GT9) et donc avec des contraintes radiales quasi isotropes, soit à la contrainte mineure (galeries scientifiques GED, GAN ou techniques GT5, GT7) et donc soumises à un champ anisotrope de contraintes.

Lors du creusement des premières galeries, les convergences mesurées étaient corrélées avec l'orientation des galeries : convergences relativement isotropes pour les galeries parallèles à  $\sigma_H$  (champ de contraintes radiales isotropes) et totalement anisotropes pour les galeries orientées suivant  $\sigma_v$ , avec des valeurs de convergences verticales plusieurs fois plus grandes que les convergences horizontales.

Ce comportement a été confirmé par l'auscultation des nouvelles galeries et lors de l'excavation par l'observation en voûte d'un endommagement du terrain significativement plus important

were used, which involved subsequent installation of a shotcrete shoulder to ensure the sealing remained stable.

### 2.3.3 - Behaviour of the retaining wall and the terrain

In the Bure underground laboratory, the retaining wall follows the deformation of the ground, applying confinement pressure estimated at a mean of 0.2 MPa for ribbed tunnels, compared to natural stresses of between 12 and 16 MPa. Consequently, the retaining wall has little influence on convergences.

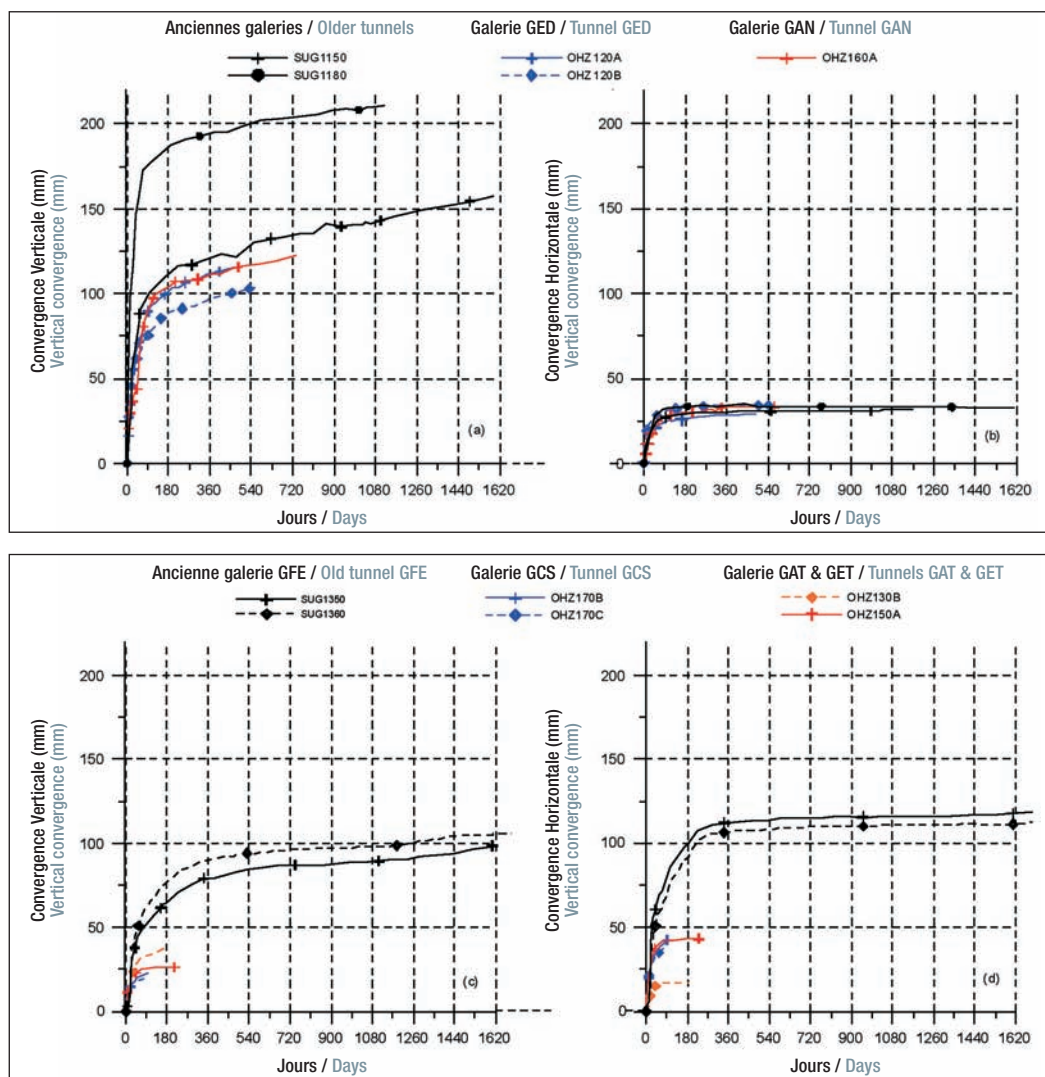
The layout of the Laboratory was designed in such a way that the two key tunnel directions lay parallel to the principal stress: either the major stresses (GRM, GET and GES scientific tunnels (two tunnels to be built in the next worksite) and the technical tunnels (GAT, GT8, GT6 and GT9) with virtually isotropic radial stress, or to the minor stress (GED, GAN scientific tunnels or GT5 and GT7 technical tunnels) and thus subject to an anisotropic stress field.

During excavation of the first tunnels, the convergences measured were correlated with the direction of the tunnels: they were relatively isotropic for tunnels running parallel to  $\sigma_H$  (isotropic radial stress field) and comple-

tely anisotropic for tunnels oriented in line with  $\sigma_v$ , with vertical convergence values several times larger than the horizontal convergence values.

This behaviour was confirmed by visual inspection of the new tunnels and during excavation, with observation at the arch of significantly greater damage to the soil in tunnels excavated in the anisotropic stress field. At present, no behavioural law enables this phenomenon, which intuition suggests is a consequence of damage to the soil at the top and bottom of the arch section, to be properly modelled.

On the above charts, a high degree of difference can be observed between the vertical and horizontal convergences for the tunnels in line with  $\sigma_v$ . Vertical convergences for the new retaining wall structure are lower than for the first tunnels, while the horizontal convergences are of the same order of magnitude. For convergences in excess of 100 mm, the convergence rate exceeds 2% of the diameter. This improvement could be attributed firstly to the installation of an inverse arch completing the section and, to a lesser degree, to the pre-supporting of the workface by means of the 12 m fibreglass



Graphiques 1 à 4 : Exemples de convergences mesurées dans les galeries du Laboratoire : (a,b) dans une galerie parallèle à la contrainte horizontale mineure, (c,d) dans une galerie parallèle à la contrainte horizontale majeure.  
 Charts 1 to 4: Examples of convergences measured in the Laboratory tunnels: (a,b) in a tunnel parallel to the minor horizontal stress, (c,d) in a tunnel parallel to the major horizontal stress

dans les galeries creusées dans le champ anisotrope des contraintes. Pour le moment aucune loi de comportement ne permet de modéliser correctement ce phénomène qui intuitivement est une conséquence de l'endommagement du terrain en voûte et contrevoûte. Sur les graphiques précédents, on constate la forte différence de valeurs entre les convergences verticales et horizontales pour les galeries orientées suivant  $\sigma_H$ . Les convergences verticales avec le nouveau soutènement sont moins élevées que dans le cas des premières galeries, alors que les convergences horizontales sont du même ordre de grandeur. Avec des valeurs de convergences supérieures à 100 mm, le taux de convergence

dépasse 2 % du diamètre. Dans un premier temps, cette amélioration peut être attribuée à la mise en place d'une contrevoûte qui ferme la section et dans une moindre mesure, au pré-soutènement du front par les boulons en fibre de verre de 12 m. L'analyse des mesures extensométriques semble confirmer que la contre voûte limite l'effet de soufflage du radier qui est plus important dans une galerie en fer à cheval avec un radier plat (anciennes galeries). Concernant les galeries (GET, GAT...) orientées suivant  $\sigma_H$ , 100 jours après l'excavation, les convergences verticales ou horizontales sont également nettement moins élevées (un facteur 2 au moins) avec le nouveau soutènement que dans le cas des premières

bolts. Analysis of the stress gauge measurements appears to confirm that the inverse arch minimises bulging of the slab - this is greater in a horseshoe tunnel with a flat base slab (older tunnels). Concerning tunnels aligned in parallel with  $\sigma_H$ , (GET, GAT, etc), 100 days after excavation, vertical and horizontal convergences were also much lower (by a factor of at least 2) for the new retaining wall system than for the first tunnels. However in this instance the question arises as to whether the convergence measurements for tunnel GLE (SUG1350 and SUG1360), the only horseshoe tunnel to be excavated in this direction prior to 2007, are representative - and whether the size of these convergences is not rela-

ted to the specific location of this tunnel, with the proximity of a pillar, a niche, an auxiliary shaft and a change in section.

**3 - Worksite 3: outline of works to 2015**

This phase of works has made it possible to improve the phasing of excavations and the supports in new tunnels.

Two types of retaining wall can be used for underground worksites at such great depths:

- A flexible support which evolves with deformations over the longer term, ensuring the excavation remains stable;

galeries. Cependant dans ce cas, on peut se demander si les mesures de convergence dans la galerie GLE (SUG1350 et SUG1360), seule galerie en fer à cheval excavée dans cette direction avant 2007, sont représentatives et si l'amplitude de ces convergences n'est pas liée à la localisation spécifique de cette galerie, avec la proximité d'un pilier, d'une niche, du puits d'auxiliaire et d'un changement de section.

## 4 - Le chantier 3 : esquisse des travaux jusqu'en 2015

Cette tranche de travaux a permis d'améliorer le phasage de creusement et le soutènement des nouvelles galeries.

Ce chantier souterrain se situant à forte profondeur, deux types de soutènements peuvent être mis en œuvre :

- Un soutènement souple pour accompagner les déformations à plus ou moins long terme, et assurer la stabilité de l'excavation ;
- Un soutènement lourd, rigide, et suffisamment dimensionné pour reprendre les fortes contraintes qui se développent en cas de blocage du terrain.

On peut considérer que le soutènement souple (avec cintres TH) mis en œuvre aujourd'hui répond correctement à la problématique du laboratoire souterrain.

Une nouvelle extension du laboratoire est prévue dans les 5 ans qui viennent. Cette extension devrait être constituée d'environ 700 à 800 m de galeries supplémentaires.

Ces nouvelles galeries garderont leur vocation expérimentale avec la mise en œuvre de nouvelles expériences de caractérisation des argillites et de leur comportement lors et surtout après l'excavation, sur le long terme.

Elles permettront également de tester d'autres techniques de creusement (du type machine à attaque ponctuelle par exemple), d'autres sections de galeries (totalement circulaire par exemple) et d'autres types de soutènement (coque de béton avec cales compressibles pour conserver la souplesse nécessaire...) et cela dans le but d'affiner le concept du futur stockage souterrain.

Un des objectifs sera également d'apprécier la possibilité de mettre en place un soutènement bloquant et surtout son délai de pose après l'excavation. ♦

- Heavy-duty, rigid support of sufficient dimensions to bear the considerable stresses which emerge if the ground becomes blocked.

It can be asserted that the flexible support system (using TH ribs) used today offers an adequate response to the particular needs of this underground laboratory.

Further extension of the laboratory is planned over the next 5 years. This extension is planned to comprise between 700 and 800 m of additional tunnels.

These new tunnels will also be used for experimental purposes, with new experiments to characterise argillites and their behaviour during and more

particularly after excavation, over the long term.

They will also allow the testing of other excavation techniques (such as roadheaders), other tunnel sections (e.g. completely circular), and other types of support (concrete shell with compressible shims to preserve the necessary flexibility, and so on) to further refine the concept of the future underground storage facility. Another goal is being able to assess the possibility of installing blocking retaining structures, and especially how long after excavation they can be installed. ♦