

RESTAURATION DES REMPARTS DU FRONT NORD DU CHATEAU DE SAUMUR

RESTORATION OF THE NORTH FACE RAMPARTS OF THE CHATEAU DE SAUMUR

François BAILLY, Stéphane MALGORN
ARCADIS

1. INTRODUCTION

Le 22 avril 2001, vers 2 heures du matin, une importante portion de la partie Ouest du rempart Nord du château de SAUMUR s'est écroulée. Ce front de 45 mètres de long sur 35 mètres de haut, qui s'est effondré sur lui-même, comprenait le rempart haut de 17 mètres et son soubassement de tuffeau haut de 18 mètres.

L'architecte en Chef des Monuments Historiques (ACMH), Monsieur MESTER DE PARAJD, en collaboration étroite avec la société d'ingénierie ARCADIS (anciennement EEG SIMECSOL) se sont immédiatement associés aux services de la Ville de SAUMUR et de la Direction Régionale des Affaires Culturelles (DRAC), d'une part pour la sécurisation rapide du site et en particulier du château, et d'autre part pour la stabilisation provisoire du sinistre en vue d'une réparation à l'identique.



1. INTRODUCTION

On 22 April 2001, at 2 o'clock in the morning, a large section of the western part of the north rampart of the Château de Saumur collapsed. This face, measuring 45 metres long and 35 metres high, which collapsed on itself, consisted of the 17-metre high rampart and its 18-metre freestone base.

The Architecte en Chef des Monuments Historiques (ACMH), Mr. MESTER DE PARAJD, in close collaboration with the ARCADIS engineering company (formerly EEG SIMECSOL) immediately joined with the services of the town of Saumur and with the Direction Régionale des Affaires Culturelles (DRAC), firstly for the rapid shoring up of the site and in particular of the Château, and secondly for the temporary stabilisation of the incident with a view to restoring it to its former condition.



2. LE CONTEXTE DU CHATEAU DE SAUMUR

2.1. Situation

La Ville de Saumur est implantée à la confluence du Thouet et de la Loire. Le château est établi en crête du coteau, en rive droite de la Loire.

2.2. Géologie

Géologiquement, au droit de Saumur on rencontre successivement de haut en bas :

- Des remblais sableux avec de nombreux vestiges anciens qui ont été reconnus sur une épaisseur de 0 à 17 m sur le site ;
- Des sables du Sénonien sur 10 à 15 m d'épaisseur ;
- La craie marneuse du Turonien inférieur sur 10 à 15 m ;
- La craie Tuffeau souvent friable, qui a été exploitée par carrières souterraines et dont la puissance est évaluée entre 30 et 35 m environ ;
- Les sables glauconieux du Turonien supérieur sur 13 à 15 m.

2.3. Géomorphologie

Le château est situé à l'extrémité nord-ouest d'un massif constituant un promontoire limité au Nord par la vallée de la Loire et à l'Ouest par la rivière Thouet. Ces 2 cours d'eau coulent à une cote approximative de 30 m, alors que le plateau se situe à environ 67 m d'altitude au niveau du château.

La base de ce promontoire est constituée de tuffeau Turonien qui constitue une falaise marquée en rive sud de la Loire. A noter qu'il s'agit d'une falaise « jeune » (au sens géologique), ce qui rend probable la présence de diaclases de décompression dans la falaise...

Le massif présente une topographie marquée avec un ruissellement majoritairement orienté vers la vallée du Thouet, ce qui limite les apports d'eau vers la falaise.

2.4. Hydrogéologie

Au niveau de la vallée alluviale, le niveau de la nappe s'établit vers la cote + 27. Il existe une nappe phréatique à la base du tuffeau, dans la craie Turonienne, vers la cote + 32 avec un faible gradient vers la Loire.

2. THE CONTEXT OF THE CHÂTEAU DE SAUMUR

2.1. Location

The town of Saumur is located at the confluence of the Thouet and the Loire. The Château is built at the crest of a slope close to the right bank of the Loire.

2.2. Geology

Geologically, in the area of Saumur one encounters successively from top to bottom:

- *Sandy infill, with many ancient trace elements which have been recognised over a thickness of 0 to 17 m on the site;*
- *Senonian sands over a thickness of 10 to 15 m;*
- *Marly chalk of the Lower Turonian over 10 to 15 m;*
- *Frequently friable freestone chalk, which was quarried by underground mining and whose power is assessed as between about 30 and 35 m;*
- *The glauconitic sands of the Upper Turonian over 13 to 15 m.*

2.3. Geomorphology

The Château is located at the north-west extremity of a rocky bed comprising a promontory which is limited to the North by the Loire Valley and to the west by the river Thouet. These 2 water courses flow at an approximate elevation of 30 m, while the plateau is located at some 67 m of altitude at the Château.

The base of this promontory is composed of Turonian freestone which constitutes a significant escarpment on the south bank of the Loire. It should be noted that this is a "young" escarpment (in the geological sense), which renders probable the presence of decompression diaclases within the escarpment.

The bedrock presents a topography that is marked by a water run-off that is mostly oriented toward the Thouet Valley, which limits the accumulation of water in the escarpment.

2.4. Hydrogeology

In alluvial valley, the level of the water table is at an elevation of + 27. There exists a phreatic water table at the base of the freestone, in the Turonian chalk, at an elevation of + 32, with a small gradient to the Loire.

2.5. Fracturation

Dans ce contexte géologique du Saumurois, deux familles de faille dominant :

- celles qui sont d'orientation Armoricaïne (Sud- Est – Nord-Ouest) et qui sont illustrées notamment par le parcours rectiligne de la Loire dans le secteur,
- celles de directions perpendiculaires à la première famille (Nord-Est – Sud-Ouest), moins importantes dans leur ampleur, mais plus nombreuses.

La densité de la fracturation semble rester relativement modérée dans ce secteur, bien qu'à priori plus dense en bordure de falaise, de par le phénomène de décompression du tuffeau lié à l'érosion naturelle par la Loire au cours de l'Holocène (dix derniers milliers d'années).

2.6. Comportement de la craie tuffeau

Sur le site, le tuffeau est une craie siliceuse très poreuse du Turonien et du Sénonien. La masse volumique du tuffeau est variable mais faible et de l'ordre de 1,3 t/m³. Lorsque le tuffeau se sature d'eau, il peut doubler son poids et sa résistance à la compression diminuer de plus de moitié.

Par ailleurs, cette roche est fortement fissurée et fracturée. Les plans de fracture sont subverticaux et orientés Ouest-Est sensiblement, soit parallèlement au plan de la falaise et du rempart. Cette disposition des plans de fracture est très défavorable pour la stabilité propre de la falaise.

3. DÉROULEMENT DE L'OPÉRATION

3.1. L'écroulement du rempart

Le 22 avril 2001, vers 2 heures du matin, une importante portion de la partie Ouest du rempart Nord du château de SAUMUR s'est écroulée quelques minutes après l'effondrement de son terrain de support. Cette muraille de 45 mètres de long sur 35 mètres de haut, qui s'est effondrée sur elle-même, comprenait le rempart haut de 17 mètres et son soubassement de tuffeau haut de 18 mètres.

L'éboulement a emporté dans son élan, en contrebas, une partie du foyer des jeunes travailleurs, la maison de l'artisanat et provoqué de nombreux désordres structurels irréversibles sur les bâtiments de l'îlot Raspail ; il a par ailleurs laissé suspendu au-dessus du vide les énormes masses de maçonneries des remparts ainsi privées d'appui et laissé l'aile Nord et la tour Nord-Ouest du château en limite de l'effondrement.

2.5. Fracturing

In this geological context of the Saumurois, two fault families dominate:

- *those which are of Armorican orientation (south-east – north-west) and which are illustrated in particular by the rectilinear trajectory of the Loire in this sector,*
- *those in the directions which are perpendicular to the first family (north-east – south-west), and which are smaller in magnitude, but more numerous.*

The density of the fracturing appears to remain relatively moderated in this sector, though appearing to be more dense at the edge of the escarpment, due to the decompression phenomenon in the freestone associated with the natural erosion by the Loire during the Holocene (the last ten thousand years).

2.6. Behaviour of the freestone chalk

On the site, the freestone is a very porous siliceous chalk of the Turonian and the Senonian. The density of the freestone is variable but low and of the order of 1.3 t/m³. When the freestone saturates with water, it can double its weight, and its resistance to compression also reduces by more than half.

Furthermore, this rock is highly fissured and fractured. The fracture planes are subvertical and oriented more or less west-east, which is parallel to the plane of the escarpment and of the rampart. This arrangement of the fracture planes is very unfavourable in relation to the inherent stability of the escarpment.

3. DESCRIPTION OF THE INCIDENT

3.1. The collapse of the rampart

On 22 April 2001, at 2 o'clock in the morning, a large portion of the western part of the north rampart of the Château de Saumur collapsed a few some minutes after the collapse of its underlying bedrock. This wall, measuring 45 metres long by 35 metres high, which collapsed on itself, included the 17-metre high rampart and its 18-metre high bedrock of freestone.

In its rush, the landslide carried downwards with it a part of the young workers' accommodation and the handicrafts centre, and gave rise to a great deal of irreversible structural damage to the buildings of the Raspail islet. In addition, it left suspended above the resulting chasm enormous masses of stone of the ramparts thus deprived of support and left the north wing and the north-west tower of the Château on the verge of collapse.

3.2. Procédure d'urgence

Le jour même, une procédure d'urgence pour les travaux de sécurisation et de stabilisation en première urgence des remparts du château était engagée avec :

- les Services de Secours, les travaux de dégagement et de recherche des personnes,
- les Services de la Ville, les travaux de sécurisation des bâtiments des îlots touchés par l'effondrement,
- l'Architecte en Chef des Monuments Historiques, assisté du Bureau d'Ingénierie ARCADIS et le BRGM.

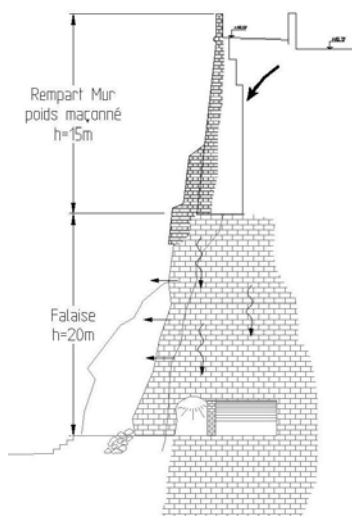
L'état de catastrophe naturelle est reconnu par l'arrêté du 06 juillet 2001 publié au Journal Officiel du 18/07/01.

3.3. Explication de l'effondrement

Les observations effectuées immédiatement après le sinistre ont mis en évidence que le remblai en arrière du rempart ne présentait pas de venue d'eau. Le matériau apparaît sec, pulvérulent et légèrement cohérent. De même, dans les matériaux effondrés, aucune trace de forte humidité n'a été mise en évidence.

L'eau agissant comme un élément moteur en exerçant une poussée sur le mur ne peut être incriminée comme élément exerçant directement un effort supplémentaire sur le rempart.

Ainsi, il apparaît que le facteur déclenchant serait la falaise de craie tuffeau dont le matériau gorgé d'eau à la suite de la saison très pluvieuse a perdu une partie de sa résistance mécanique. Écrasée sous la charge du rempart et des sols en remblai, sous son poids propre également, elle a cédé et entraîné la muraille (celle du côté Ouest) qui s'est retrouvée sans appui.



3.2. The emergency procedure

On the same day, an emergency procedure for the works, for the most urgent shoring-up and stabilisation of the Château ramparts, was undertaken with:

- *the emergency services, for clearance work and the search for victims,*
- *the services of the town, for the shoring work on the buildings of the islets affected by the collapse,*
- *the Architecte en Chef des Monuments Historiques, assisted by the Arcadis Engineering Office and the BRGM.*

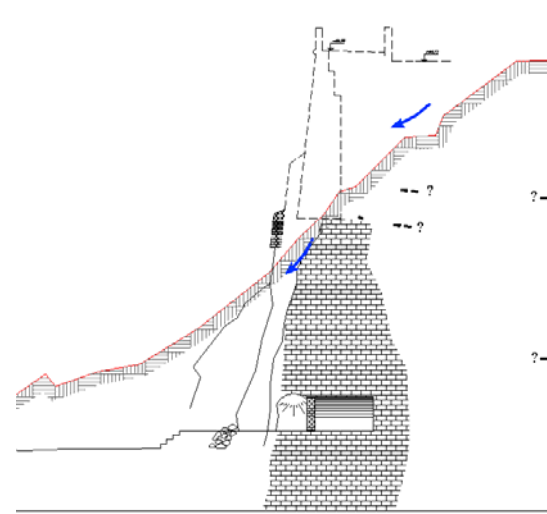
A state of natural disaster was recognised by the order dated 06 July 2001, published in the Journal Officiel (official gazette) on 18/07/01.

3.3. Explanation of the collapse

The observations recorded immediately after the incident have highlighted the fact that the infill at the rear of the rampart did not give any indication of water. The material appeared to be dry, powdery and slightly cohesive. Likewise, in the collapsed materials, no trace was found of serious dampness.

Water acting as a causative element, by exerting pressure on the wall, therefore cannot be incriminated as an element that might have directly applied additional force to the rampart.

Thus, it appears that the trigger factor was probably the escarpment of freestone chalk, whose material, saturated with water following the very rainy season, had lost part of its mechanical strength. Weighed down under the loading of the rampart and the infill materials, and also under its own weight, it gave way and pulled down the wall (that on the west side), which was then left with no support.



3.4. Travaux de sécurisation immédiate et mise en sécurité du château

Des travaux de sécurisation avec démontage de maçonnerie et clouage ont été immédiatement réalisés par une équipe de techniciens acrobates spécialisée (QUEST-ACCRO).

Très rapidement, la décision de reconstruire le rempart à l'identique est prise mais le risque de nouveau glissement est important et l'on doit donc stabiliser rapidement un talus sur près de 30 m de haut en plein centre ville.

ARCADIS a procédé aux études préalables et à la maîtrise d'œuvre complète de la sécurisation du rempart nord au moyen d'un buton en pied de talus permettant d'assurer le fretage de la craie tuffeau de la falaise et de faire obstacle à un grand glissement.

Le buton a été conçu comme un massif en sol renforcé par nappes de géosynthétique.

Le remblai – 10 000 m³ – est armé par des nappes de géosynthétique réparties tous les 0,50 m et de longueur 5 à 14 m selon les niveaux. Les talus extérieurs sont dressés à une pente de 70° à 75° pour limiter les emprises.

Son aménagement avec des rampes d'accès – pente à 12 % sur un linéaire de 170 m – et une plate-forme de travail au niveau du pied du rempart, permet de prendre en compte le projet futur.

La partie haute de la falaise est confortée par clouage, puis bâchée pour éviter les infiltrations d'eau.



4. ÉTUDES DE RECONSTRUCTION À L'IDENTIQUE

Avec la procédure d'urgence ARCADIS a réalisé avec l'ACMH et le BRGM une étude préalable de diagnostic puis une étude préalable opérationnelle.

ARCADIS a procédé à toute une série de sondages géotechniques de reconnaissance des sols et fondations du château et synthétisé les différentes interventions.

3.4. Immediate works for shoring up the Château and making it safe

Shoring work, with the removal of stonework and nailing, were carried out immediately by a team of specialist acrobatic technicians (WEST-ACCRO).

Very rapidly, the decision was taken to re-build the rampart to its former state, but the risk of fresh slippage was considerable, and it was therefore necessary to rapidly stabilise an embankment that measured some 30 m in height, right in the centre of the town.

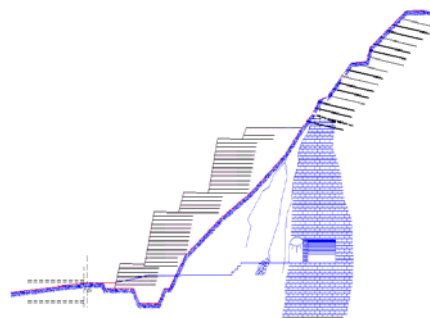
Arcadis carried out preliminary studies, and acted as prime contractor (project manager) for the complete shoring of the north rampart by means of a strut at the foot of the embankment, designed to act as a brace for the freestone chalk of the escarpment, and to act as an obstacle to a major landslide.

The strut took the form of an earth foundation reinforced by layers of geosynthetic fabric.

The infill, of some 10,000 cubic metres, was reinforced with layers of geosynthetic fabric laid every 0.50 m and measuring 5 to 14 metres in length depending on the level concerned. The external embankments were dressed to a slope of 70 to 75 degrees in order to limit any tendency to slip.

Its arrangement with access ramps having a slope of 12 % over a length of 170 m and a working platform at the foot of the rampart, took account of future works.

The upper part of the escarpment was stabilised by nailing, then covered to prevent the entry of water.



4. STUDIES FOR RECONSTRUCTION AS FORMERLY

With the emergency procedure, Arcadis, with ACMH and BRGM, carried out a preliminary diagnostic study, and then a preliminary operational study.

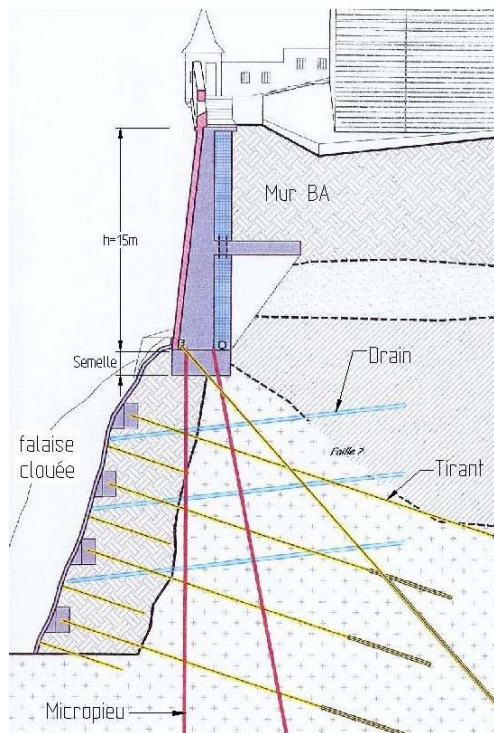
Arcadis performed a series of geotechnical soundings, in order to ascertain the nature of the ground and foundations of the Château, and prepared the various works.

L'ensemble de ces pré-études ont permis de lancer un appel d'offre européen pour la maîtrise d'œuvre et l'OPC de ces travaux.

Ces deux appels d'offres ont été remportés par ARCADIS.

4.1. APSS de reconstruction

Une première phase d'étude a conduit à préconiser la reconstruction du rempart avec un mur poids depuis la plateforme supérieure du buton ; il a été envisagé la construction d'un ouvrage en béton armé fondé au sein du substratum peu altéré compact par l'intermédiaire de fondations profondes de type micropieux (de type 4 suivant les règles du fascicule 62, titre V). La base du mur en béton armé était prévue d'être établie à la cote + 51,50 m NGF, l'espace disponible pour la construction de l'ouvrage étant réduit, la semelle du mur avait une largeur de 3,50 m pour une hauteur de voile de 13 à 14,50 m. Afin de limiter les actions liées au renversement d'un tel ouvrage, il a été intégré à ce mur une dalle de répartition à mi hauteur reposant sur des contreforts inversés. La coupe type de l'ouvrage est présentée ci après.



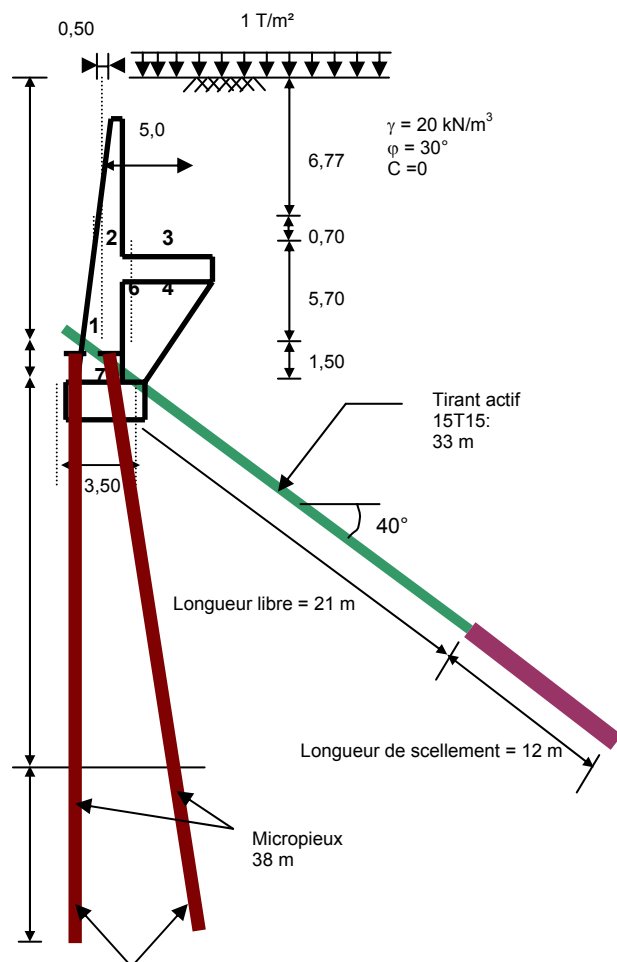
En complément des micro pieux, afin de parfaire la stabilité globale de l'ouvrage, des tirants précontraints permettaient de reprendre les efforts horizontaux et une partie des moments de renversement. Le pré dimensionnement de l'ouvrage conduisait à prévoir deux micro pieux sous la base de la semelle avec un espacement longitudinal de 2 m. Les tirants étaient également prévus d'être réalisés suivant un espacement de 2 m avec une inclinaison voisine de 40° par rapport à l'horizontale.

All of these pre-studies led up to the launch of a European invitation to tender for the project management (prime contractor) and the programming, management and coordination of these works.

These two tenders were won by Arcadis.

4.1. The reconstruction process

The first phase of study led to recommending the reconstruction of the rampart with a gravity wall from the upper platform of the bracing strut. The construction of a structure in reinforced concrete was envisaged, founded within the compact and little-damaged substratum, using deep foundations of the micropile type (type 4 according to the rules of the book 62, title V). The base of the reinforced concrete wall was designed to be established at the elevation of + 51.50 m NGF (French standard geographical level), since the space available for building the structure was small, with the foundation of the wall having a width of 3.50 m for a wall height of 13 to 14.50 m. In order to limit the actions associated with the overturning of such a structure, this wall had built into it a dividing slab at mid-height, resting upon reverse buttresses. The typical section of the structure is presented below.



Le remblaiement en arrière de l'ouvrage neuf était prévu avec des matériaux d'apport.

Afin de satisfaire l'aspect esthétique de l'ouvrage, qui doit être parfaitement intégré à l'environnement historique du château, le mur faisait l'objet d'un doublage en maçonnerie qui prendrait appui sur le talon de 0,50 m de la semelle du mur en béton armé.

4.2. Passage sous Réquisition

Dans le cadre de la procédure d'urgence, les façades et remparts nord et ouest du château ont été instrumentées par un suivi des mouvements en X,Y et Z. le suivi de l'évolution des mouvements sur l'année 2001 – 2002 a fait craindre un nouveau sinistre et une réquisition d'état a été mise en place pour accélérer les travaux de renforcement avec un phasage sur 3 ans.

Dans ce cadre d'intervention très spécifique où l'élaboration du projet se fait en collaboration avec tous les intervenants - Maître d'ouvrage (DRAC), ACMH, AMO,... Entreprises, bureau de contrôle.

4.3. Evolution du projet

ARCADIS a alors examiné une nouvelle solution de rempart qui ne servirait plus de soutènement afin d'alléger le système et rester dans l'enveloppe financière de la pré-étude malgré les risques d'aléas.

En remplacement d'un soutènement avec remblais arrière, la plateforme est prévue d'être rétablie par l'intermédiaire d'une dalle générale, en surplomb du talus d'éboulement.

Cette dalle supérieure prend appui en crête de talus sur une poutre chevêtre en béton armé, fondée sur deux files de micro pieux. Côté pied de talus, la dalle repose, sur une structure porteuse « verticale » constituée d'un ensemble semelle, poteaux, et chevêtre en béton armé. Cette structure assure parallèlement l'assise de l'habillage en maçonnerie du rempart. La fondation de cet ensemble est elle aussi constitué par deux files de micro pieux.

A son extrémité Ouest, le rempart « se retourne » à l'équerre suivant le même principe structurel, pour former le rempart ouest.

La structure de la dalle supérieure est réalisée en poutres précontraintes à fils adhérents, surmontés d'un hourdis en béton armé coulé sur pré-dalles.

Côté Est l'angle du rempart nord se termine par une structure de type caisson en béton armé, elle aussi fondée sur micro pieux. Cette structure sert de support à la tour d'angle en maçonnerie (échauguette).

As a complement to the micropiles, and in order to ensure the overall stability of the structure, pre-stressed ties were used to take the horizontal forces and part of the overturning moments. The pre-dimensioning of the structure led to the provision of two micro-piles under the base of the foundation with a longitudinal spacing of 2 m. The ties were also designed to be placed with a spacing of 2 m and a slope approximating to 40 degrees from the horizontal.

The infill at the rear of the new structure was provided by imported materials.

In order to satisfy the aesthetic aspects of the structure, which must be perfectly incorporated into the historical environment of the Château, the wall was provided with a stone facing which rested on the 0.50 m heel of the foundation of the reinforced concrete wall.

4.2. Acceleration requisition

In the context of the emergency procedure, the north and west frontages and ramparts of the Château were monitored by measuring their movements in X,Y and Z. Monitoring the progression of these movements during 2001 – 2002 gave rise to the fear of a new incident, and a state requisition was put in place in order to accelerate the reinforcement works, with staging over a 3-year period.

In this context of very specific intervention, the project was prepared by a collaboration between all those involved in it – the proprietors (DRAC), ACMH, AMO, etc., the contractors, and the inspection authority.

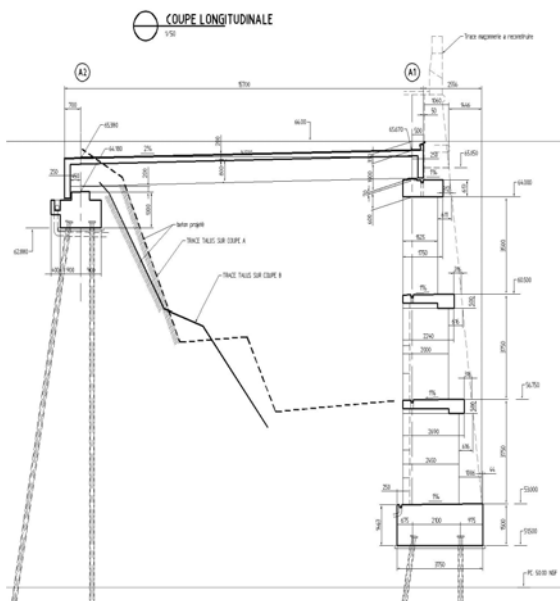
4.3. Advancement of the project

Arcadis then looked at a new rampart solution which would no longer act as a retaining structure, in order to slim down the system and to remain within the financial envelope of the pre-study, despite the risks of unforeseens.

As the replacement for a retaining structure with rear infill, the platform is designed to be rebuilt by means of a general foundation slab overhanging the embankment of the landslide.

This upper slab rests on top of the embankment on a reinforced concrete header joist, resting on two rows of micro-piles. At the foot end of the embankment, the slab rests on a "vertical" load-bearing structure composed of a combination of foundation, posts, and load-bearing joist in reinforced concrete. This structure also supports the stone lining of the rampart. The foundation for this overall structure is also composed of two rows of micro-piles.

At its western extremity, the rampart turns at right angles using the same structural principle, to form the western rampart.



4.4. Reconstitution de la falaise en craie tuffeau

La géométrie de la falaise à restituer a été définie par Monsieur MESTER DE PARAJD (ACMH). Les terrassements relatifs à la restitution de ce profil en travers intéresseront les matériaux en remblais du massif buton et les matériaux éboulés lors de l'effondrement d'avril 2001.

Le pré dimensionnement a conduit à prévoir un dispositif de confortement composé de lignes de clous destinés au confortement intermédiaire des remblais et matériaux éboulés. Les lignes de tirants seront reliées en tête par des poutres en béton armé. Au stade actuel, les lignes de tirants sont au nombre de 4 avec un espacement horizontal de 4 m pour un espacement vertical de 4 m (inclinaison 15°). La réalisation d'un béton projeté de parement et de clous permettra de compléter le dispositif de confortement. Réalisé sur la totalité de la surface de la falaise, le béton projeté (épaisseur voisine de 15 cm à 30 cm) permettra la projection d'une poudre de pierre destinée à imiter la falaise de tuffeau.

L'aspect hydraulique et hydrogéologique étant la cause principale de l'altération de la falaise de tuffeau, le dispositif de confortement est complété par la mise en œuvre de drains subhorizontaux de 20 à 25 m de longueur tous les 16 m² de parement.

Un dispositif de récupération et d'évacuation des eaux pluviales de toute la plateforme supérieure complète le captage des eaux du parement.

The structure of the upper slab is created from prestressed beams with stressing wires, surmounted by a reinforced concrete slab poured on pre-slabs.

On the eastern side, the angle of the north rampart ends with a structure of the caisson type in reinforced concrete, also resting on micro-piles. This structure acts as a support for the stone corner tower (bartizan).



4.4. Reconstitution of the escarpment in freestone chalk

The geometry of the escarpment to be restored was determined by Mr. MESTER DE PARAJD (ACMH). The earthworks relating to the restoration of this crosswise profile will involve the infill materials from the bracing structure and the materials that caved in during the collapse of April 2001.

Pre-dimensioning led to the design of a supporting arrangement composed of lines of nails intended for intermediate stabilisation of the infill and caved-in materials. The lines of ties will be connected at the top by reinforced concrete beams. At the current stage, the lines of ties are 4 in number, with a horizontal spacing of 4 m and a vertical spacing of 4 m (a slope of 15 degrees). The creation of a facing of sprayed concrete and nails will complete the stabilising arrangement. When applied over the whole surface of the escarpment, the sprayed concrete (with a thickness of some 15 to 30 cm) will allow the projection of a stone powder designed to simulate the freestone escarpment.

Since the hydraulic and hydrogeological aspects are the main reason for altering the freestone escarpment, the stabilising arrangement is completed by the provision of sub-horizontal drains measuring some 20 to 25 m in length every 16 m² of facing.

An arrangement for the collection and removal of rainwater from the whole of the upper platform completes the catchment of water on the facing.

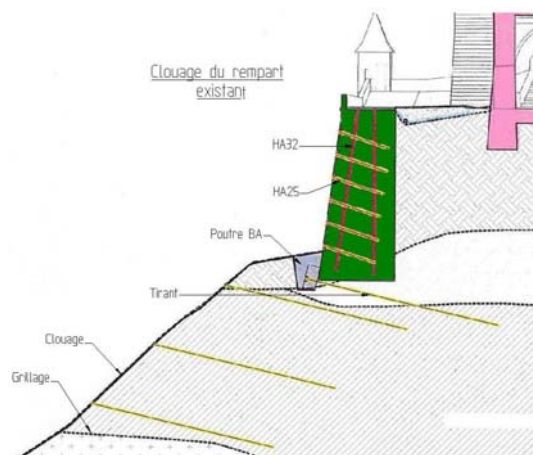
5. COMPLEMENT DE RENFORCEMENT DES REMPARTS

Les remparts en maçonnerie des fronts Nord-Ouest et Nord-Est sont composés de matériaux de très mauvaise qualité par suite d'une altération très importante des moellons et des mortiers dans le temps. La stabilité de ce rempart était précaire de par la perte de résistance mécanique des matériaux constitutifs.

Les risques encourus pour ce type d'ouvrage sont principalement liés en un effondrement du rempart sur lui-même avec chute de grandes zones du parement.

Compte tenu de l'état d'avancement d'altération de l'ouvrage, il a été procédé à une amélioration globale des résistances mécaniques de l'ouvrage par l'intermédiaire de travaux de clouage des maçonneries au moyen de barres scellées verticalement et horizontalement avec une faible injection de coulis.

Le talus aval du rempart nord est sera conforté par un clouage systématique avec grillage et une poutre en béton armé cloué sera prochainement établi à la base du rempart maçonné.



6. RENFORCEMENT DES ASSISES DU CHATEAU PAR JET GROUTING

Les fondations de la façade nord du château étant peu profondes et reposant sur des 10 m de remblais très peu compacts, MENARD SOL TRAITEMENT a procédé à leur reprise en sous œuvre avec un traitement de sol par Jet Grouting.

La technique consiste à réaliser des colonnes de béton de sol par l'exécution d'un forage destructif de petit diamètre sur toute la hauteur des terrains à traiter, puis à injecter un coulis de ciment à travers une buse disposée au pied du train de tiges associé à une rotation et une remontée de l'outil par pas de 40 cm.

5. ADDITIONAL REINFORCING OF THE RAMPARTS

The stone ramparts of the north-west and north-east frontages are composed of materials of very poor quality as a result of a very significant deterioration of the ragstone and mortar over time. The stability of this rampart was precarious due to the loss of mechanical strength of the materials of which it was composed.

The risks associated with this type of structure are mainly that of a collapse of the rampart onto itself, and disintegration of large areas of the facings.

In the light of the advanced state of deterioration of the structure, an overall upgrading of the mechanical strength of the structure was undertaken by means of works aimed at nailing the stonework with bars, anchored both vertically and horizontally, with a small injection of grout.

The embankment downstream of the north rampart will also be stabilised by general nailing with grillage and a nailed, reinforced concrete brace will shortly be put in place at the base of the stone rampart.



6. STRENGTHENING THE BASE OF THE CHATEAU BY JET GROUTING

Since the foundations of the north frontage of the Château are rather shallow and rest on 10 m of poorly compacted infill, the MENARD SOL TRAITEMENT company has carried out reinforcement work using a jet grouting process.

This technique consists of creating concrete ground columns by a de-structuring drilling process with small diameters over the full depth of the ground to be treated, and then injecting a cement grout through a nozzle placed at the foot of the line of rods, combined with rotation and raising of the tool in steps of 40 cm.

Les fondations en maçonnerie sont systématiquement carottées sur toute leur hauteur pour s'assurer de leur niveau d'assise ; en final la maçonnerie est injectée au coulis pour régénération.

Le diamètre des colonnes est de 70 à 80 cm et un plan de phasage détaillé a été mis en place pour limiter les tassements du fait que pendant la période de séchage, il n'y a pas de reprise de la charge. Les colonnes ont été réalisées en quinconce suivant une maille de 80 cm.



7. PRINCIPAUX INTERVENANTS

Dans le cadre de la réquisition sont intervenus les principaux acteurs suivants :

- Maître d'ouvrage : Direction Régionale des Affaires Culturelles (J. Mazeirat)
- Maître d'œuvre Monuments Historiques : Mester De Parajd (avec X. Simonot)
- Maître d'œuvre Géotechnique et Structure : Arcadis (F. Bailly ; S. Malgorn ; B. Rance et B. Nigen)
- OPC : Arcadis (F. Bailly)
- AMO surveillance : Arcadis (astreinte 24/24) ; ACMH ; BRGM
- Entreprises GC : Semen ; Ménard Sol Traitement ; Tpl
- Entreprises MH : Fonteneau ; Hory Chauvelin

The stone foundations are cored everywhere over all of their height in order to examine the quality of the bedplate, and then grout is injected into the stonework as a means of regeneration.

The diameter of the columns is 70 to 80 cm, and a detailed phasing scheme was put in place in order to limit any compaction, since no load support is provided during the drying period. The columns were positioned in a staggered manner, taking the form of an 80 cm matrix.

7. THE MAIN PARTICIPANTS

In the context of this requisition, the following are the main entities involved:

- *Proprietary contractor (owner): Direction Régionale des Affaires Culturelles (DRAC - J. Mazeirat)*
- *Prime contractor for Historical Monuments: Mr. Mester de Parajd (with X. Simonot)*
- *Prime contractor for Geotechnical and Structural aspects: Arcadis (F. Bailly; S. Malgorn; B. Rance and B. Nigen)*
- *Programming, management and coordination: Arcadis (F. Bailly)*
- *Assistance to Proprietary Contractor (surveillance): Arcadis (24/24 shifts); ACMH; BRGM*
- *Civil engineering contractors: Semen; Ménard Sol Traitement; Tpl*
- *Historic Monuments contractors: Fonteneau; Hory Chauvelin*

