ETUDE GEOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE DU SITE DE LA FONTAINE DE LOULIÉ DANS LE MASSIF DU PUY D'ISSOLUD

Vayrac, Lot
Juillet 2005

Par
Hubert Camus (société Hypogée)

SOMMAIRE

INTRODUCTION

1. Historique de l'intervention de la Société HYPOGEE
2. Programme de recherche
3. Conditions de l'intervention
4. Exposé des problèmes posés

I. Cadre géographique et géologique du site de la Fontaine de Loulié

1. Site et situation du terrain d'étude
2. Contexte géologique
3. Héritages paléokarstiques
4. Spécificités des sites travertineux
   Signification morphodynamique des travertins au sein des systèmes karstiques
   Typologie et enchaînements de faciès
   Anthropisation du milieu et sites travertineux

II. Analyse morphosédimentaire des coupes et des sondages

1. Distribution des sondages et types de coupes
2. Description des coupes et des sondages
   Secteur 1 : la surface et la corniche du plateau
   Coupe D
   Secteur 2 : le versant dominant le site
   Sondages E24 à E 30 et sondage E 36
   Secteur 3 : le pied de versant au Nord du site
   Sondage E 53
   Secteur 4 : la surface du massif de travertin
   Sondages de la BU2 et de la BU10
   Secteur 5 : le pied de versant au Sud du site
   Diaclase aménagée du « Petit Petra » et sondages E44, E45 et 54
   Secteur 6 : la rive droite du ru au pied du massif de travertin
   Sondages S1 à S5
   Secteur 7 : la rive gauche du ru au pied du massif de travertin
   Sondages E55 et E56
   Secteur 8 : la rive droite du ru en aval du site
   Sondage S6 et sondages S10 à S12
   Secteur 9 : la rive gauche du ru en aval du site
   Sondages S7 à 9 et sondage S13
   Secteur 10 : les coupes en galerie
   Réseau de galeries Nord :
   - *Description du tronçon G2*
   - *Description du tronçon G1*
   - *Description du tronçon G3*
   - *Description du tronçon G4*
   - *Description du tronçon G5*

   Description de la galerie Cessac

III. Interprétation des surfaces et restauration des profils morphosédimentaires

1. La surface du plateau :
Formations superficielles de plateau : altérites et alluvions résiduelles
Implications hydrogéologiques : structuration du système karstique et paléo-hydrologie

2. Le versant, le pied de versant et les formations alimentées par les dépôts de pente :
Etats de surface du versant
Faciès et typologie des dépôts
La chronostratigraphie et significations morphodynamiques des dépôts
Restauration des profils de versants et recul des cirques
Analyse des surfaces de discordance
Reconstitution de la physiographie anté-travertin

3. Le massif travertineux et son extension en aval :
Le travertin de source et le travertin de barrage
- *Les dômes stromatolithiques*
- *Les barrages à faciès bryophytiques : cascades et retenues*

L'aval du système en connexion avec la plaine alluviale
- *Typologie et significations morphodynamiques des faciès travertineux ou associés en aval du système*
- *Analyse des surfaces de discordance et correspondances chronostratigraphiques*
- *Restitution des profils d'écoulement : niveaux des bassins et des barrages*

IV. Mise en évidence d'un aménagement hydraulique

1. Anthropisation du milieu karstique et aménagements hydrauliques

2. Spécificité du site de la fontaine de Loulié

3. Description et zonation des ouvrages hydrauliques

4. Schéma de fonctionnement de l'aménagement hydraulique

5. Contexte et arguments stratigraphiques en relation avec les occupations humaines
L'anthropisation du bassin d'alimentation du travertin
La fontaine de Cessac et la diaclase paléokarstique du « Petit Petra » : indices d'aménagements antérieurs à la couche de bataille gauloise
« Site A » : pérennité du griffon amont pendant et après le fonctionnement de l'aménagement
Implications chronologiques et perspectives archéologiques

V. Evolution et synthèse

Les karstifications anciennes et l'évolution de la physiographie pré-travertin
Les systèmes travertineux anciens et l'anthropisation du milieu karstique
Le système de travertin antique à moderne depuis l'époque de la bataille d'Uxellodunum

VI. Bibliographie

Liste des figures

Figure n°1 : Localisation du site d'étude dans le département du Lot et relief du massif karstique du Puy d'Issolud.
Figure n°2 : Carte géologique des environs du Puy d'Issolud à l'entrée du canyon de la Dordogne entre le Causse Martel et le Causse de Gramat (d'après carte BRGM à 1:50 000ème - Feuille de Souillac).
Figure n°3 : Coupes géologiques et hydrogéologiques du Puy d'Issolud et de la fontaine de Loulié.
Figure n°4 : Typologies des travertins (d'après Casanova, 1981)
Figure n°5 : Plan de sondages et des coupes géologiques
Figure n°6 : Perte aménagée dans le talweg karstique du ru" (coupe D) - Secteur 1
Figure n°7 : Plan et coupe de la fontaine de Cessac d'après rapport 2004 - Secteur 2
Figure n°8 : Coupe et vue du site du Petit Petra dessinée d'après photo - Secteur 5

Figure n°9 : Sondages E 24 à E 36 sur le versant dominant le site de la fouille (données antérieures à l'étude HYPOGEE)
Figure n°10 : Sondage archéologique de la butte BU2, paroi Sud
Figure n°11 : Coupe géologique et archéologique de la butte BU 10 modifiée d'après Girault 2004
Figure n°12 : Sondages S1, S2, S3 et S4 levés par J.G ASTRUC, 1998
Figure n°13 : Sondage S5
Figure n°14 : Sondage E55
Figure n°15 : Sondage E56
Figure n° 16 a : Sondage S6
Figure n° 16 b : Géométrie des discordances et dynamique de sédimentation des bassins de retenue recoupés par le sondage S6
Figure n°17 : Sondages S10, S11 et S12
Figure n°18 : Sondage S7, S8 et S13
Figure n°19 : Sondage S9
Figure n°20 : Plan et coupes du réseau des galeries de la fontaine de Loulié
Figure n°22 : Plan et coupe de la Galerie de Cessac
Figure n°23 : Insertion du massif travertineux dans le site de Loulié d'après les données archéologiques de la butte BU10
Figure n°24 : Principaux aménagements hydrauliques du "ru" sur le plateau et en aval de la cascade
Figure n°25 : Schéma de fonctionnement de l'aménagement hydraulique du site de la Fontaine de Loulié

Annexe : Carte géologique et géomorphologique du site de la fontaine de Loulié au 1/2000ème

III. Interprétation des surfaces et restauration des profils morphosédimentaires

1. La surface du plateau :

Les formations superficielles du plateau : altérites et alluvions résiduelles

Les formations allochtones tertiaires constituent une couverture karstique résiduelle. Ces formations appartiennent à des dépôts fluviatiles qui s'étendent largement de part et d'autre du Puy d'Issolud sur le Causse de Martel l'Ouest et sur les affleurements liasiques à l'Est (figure n°2). Ces dépôts silicoclastiques sont remaniés par les ruissellements de surface, parfois jusqu'à l'exhumation du substratum calcaire sous-jacent. Sur le Causse de Martel, cette dynamique de décapage entraîne la concentration de ces dépôts dans les points bas de la topographie des plateaux. Sur le Puy d'Issolud, l'isolement topographique de la butte a permis de conserver une partie de ces dépôts en position sommitale, le reste étant remanié dans la gouttière Est-Ouest drainée en surface par le ru.

Ces formations de surface provoquent une corrosion sous couverture intense qui exploite la fracturation et qui est caractérisée par des brèches de karstification associées à une morphologie cryptokarstique. Cette morphologie est portée à l'affleurement par le décapage des couvertures superficielles qui dégage les pinacles karstiques de leurs résidus d'altérations représentés par les brèches karstiques (clichés n°1 et n°2). Partout où la couverture superficielle est toujours en place, elles constituent avec les brèches sous-jacentes un aquifère épikarstique.

Implications hydrogéologiques : structuration du système karstique et paléo-hydrologie

Il en résulte en termes de fonctionnement de l'aquifère karstique :

- La mise en place d'une zone de recharge caractérisée par une alimentation mixte :
  - liée à la concentrations des eaux de surface qui ruissellent sur les couvertures allochtones en direction de points d'infiltration rapides au niveau des pertes reliées au réseau souterrain ;
  - et les infiltrations lentes par restitution différée des eaux à travers l'aquifère superficiel constitué par les couvertures allochtones et surtout par la zone de brèche d'altération cryptokarstique.
- Un fonctionnement hydrodynamique très tamponné en moyennes et basses eaux qui soutient les débits d'alimentation des sources travertineuses. Par ailleurs, la zone de source reste préservée des destructions lors des épisodes de crue dont la majeure partie des écoulements est évacuée par le réseau de surface, en l'occurrence, le ru dont le cours passe au Nord de la zone de source.

Ce karst couvert présente donc deux composantes de drainage correspondant à deux phases d'évolution :

- l'organisation d'un réseau paléokarstique de couloirs de brèches ;
- l'organisation d'un réseau de conduits alimentés par des pertes dont la répartition est contrôlée par l'érosion de la couverture au cours de l'incision de la vallée de la Dordogne.

Le fonctionnement conjoint de ces deux réseaux de drainage s'est organisé en système karstique en direction du point le plus bas de la topographie : c'est-à-dire à l'intersection de la surface avec le contact des marnes du Toarcien et des calcaires sus-jacents. Le fonctionnement de ce système d'écoulement a soutenu une dynamique de recul du versant Ouest du Puy d'Issolud. Le petit cirque situé au Sud du site pourrait être une sortie de ce système antérieurement à la mise en place des travertins. De même, la diaclase paléokarstique du Petit Pétra a pu constituer un ancien accès potentiel à un point d'eau.

S'en sont suivis l'installation, puis le développement du système travertineux de Loulié dès que les conditions bioclimatiques ont été favorables à la charnière du Boréal et de l'Atlantique d'après une datations 14C (Degaugue, 2001).
Des sorties temporaires localisées dans le ru et en relation avec des aménagements hydrauliques et le trop plein de la fontaine Cessac font l'objet d'un chapitre particulier dans la suite de ce rapport. (figure n°24).
Cette interprétation remet partiellement en cause les travaux précédents concernant la nature et le rôle de la zone de recharge, le système d'infiltrations et de circulations karstiques (figure n°3).

2. Le versant, le pied de versant et les formations alimentées par les dépôts de pente :

Etats de surface du versant

Le versant Ouest du Puy d'Issolud sur le site du hameau et de la fontaine de Loulié présente des états de surface et des dépôts variés.
Les calcaires massifs du Bajociens forment une double corniche en haut de versant (figure n°24). Les calcaires plus détritiques de la base du Bajocien et les calcaires bioclastiques de l'Aalénien forment un versant régularisé avec des modelés de surcreusement liés aux circulations d'eau concentrées : pied de cascade du ru, diaclase aménagée de la fontaine Cessac, Petit Petra, petit cirque au Sud du site de fouille.
La double corniche du Bajocien présente trois types de modelés :

- des surfaces d'écaillages par gélifraction associées à deux niveaux d'encorbellements en forme d'encoches métriques modelées par dissolution différentielle sous l'action du gel ; ces deux niveaux d'encoches affectent respectivement chacun des deux abrupts (figure n°24),
- des surfaces d'arrachement liées aux éboulements gravitaires déclenchés par des circulations d'eau et par la croissance des racines d'arbres dans les fractures de détente, éventuellement par l'action humaine,
- des ensellements occupés par les brèches de karstification et les remplissages entre les pinacles cryptokarstiques qui constituent des zones de faiblesse mécanique et des volumes de roche non cohérente propices à une mobilisation par l'action conjointe des ruissellements et la gravité.

Les formations superficielles corrélatives de l'évolution morphologique de ce versant ont été :

- soit scellées par le travertin, elles sont donc antérieures et liées aux agents morphoclimatiques de la fin de la dernière glaciation et du début de l'Holocène,
- soit interstratifiées avec des couches archéologiques, elles traduisent donc l'impact de l'activité humaine sur ce versant entre le Néolithique Final et l'Age du Bronze (figures n°10, n°11 et n°23).

Hormis les parois des abrupts, ce versant est recouvert d'un sol de type rendzine qui se développe directement sur l'encaissant au-dessus du site de fouille et sur les dépôts de versant au Nord et au Sud du site.

Faciès et typologie des dépôts

Les éboulis gravitaires mettent en évidence un fonctionnement de couloirs d'éboulis lié au recoupement par le versant et à la purge des brèches karstiques en bordure de plateau (cliché n°2).

Les éboulis de gélifracts reconnus sous l'édifice travertineux sont corrélés avec les modelés d'abrupt avec encoches de karstification/gélifraction.

Les blocs effondrés sont fournis par des secteurs soumis à l'ablation et la mise à nu de surfaces d'arrachement et éboulement (Carte géologique et géomorphologique en annexe).

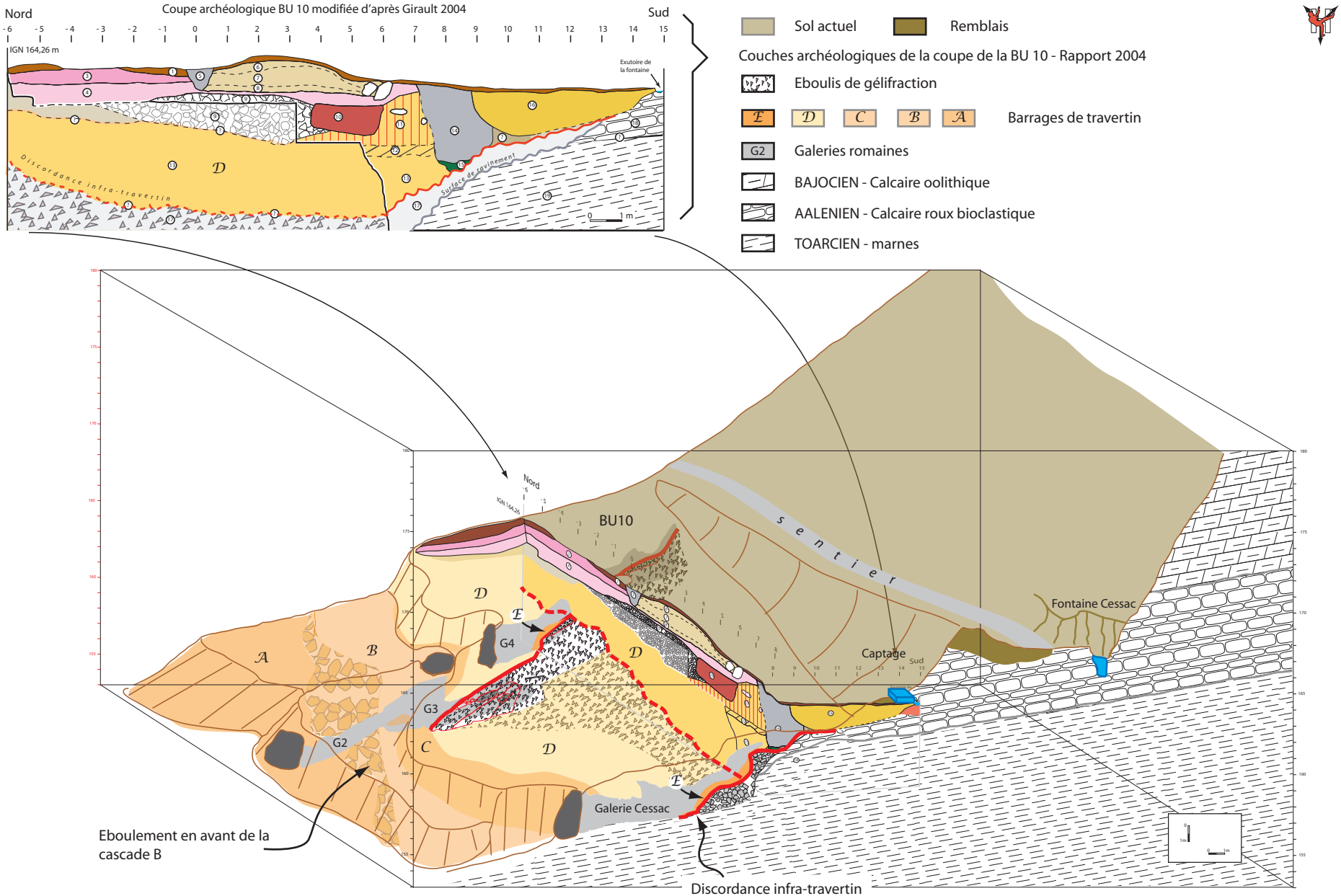

Figure n°23 : Insertion du massif travertineux dans le site de Loulié d'après les données archéologiques de la butte BU10

Les éboulements de blocs et la formation de brèches en pied de versant au pied de l'escarpement au Nord du ru ont été remobilisés par un glissement ancien dans les marnes noires du Toarcien (Carte géologique et géomorphologique en annexe).

Le bombement topographique situé au Sud du site pourrait correspondre à une loupe de glissement dans les marnes noires du Toarcien et les formations meubles sus-jacentes (terre, limons, travertins ?). Ce mouvement de terrain sub-actuel serait alors déclenché par des venues d'eau occultes provenant du contact calcaires-marnes. En l'absence de sondages dans ce secteur, le bombement topographique pourrait correspondre à un lobe latéral de travertin ou encore à un monticule anthropique (Carte géologique et géomorphologique en annexe).

La formation d'argile altérée à gros blocs infra-travertin traduit la remobilisation par des écoulements de surface et une redistribution des dépôts de bas de versant. La disposition géométrique de cette formation est restituée par les sondages. Leur sédimentation est commandée par les processus de ravinement dans les dépôts de versants et par l'incision dans les marnes en aval du site en conditions de bas niveau de base. Cela correspond à la construction d'un cône de déjection. On note que cette formation est affectée par une surface d'altération (figures n°3, n°17, n°18 et n°19).

Chronostratigraphie et significations morphodynamiques des dépôts

Les éboulis de versant, blocs d'effondrement, les modelés de glissement de terrain et les formations à blocs remaniées en pieds de versant répondent à des logiques de répartition distinctes.

En premier lieu, la gravité dicte la répartition des différents types de formations superficielles en fonction de la pente et du binôme roche dure perméable sur roche tendre imperméable. Les profils de versant expliquent donc les modalités de l'ablation et du transport des blocs et cailloutis mobilisés par gélifraction ou par l'action clastique du sol et des racines dans les calcaires. Le bas de versant est soumis à l'imbibition et à la solifluxion dans les marnes et les argiles d'altération.

En second lieu, la répartition de ces formations est corrélée aux différents modelés de la corniche du Nord au Sud (Carte géologique et géomorphologique en annexe).

Au Nord du ru, un escarpement unique domine un versant où l'on observe de gros blocs d'effondrement et des brèches consolidées visibles jusque dans l'épingle à cheveux sous le hameau de Loulié. Ces brèches sont antérieures à l'installation du travertin. Un éboulis remaniant du matériel antérieur à l'Age du Fer s'appuie sur l'épaulement formé par ces brèches anciennes, comme le montre le sondage E53.

Dans l'axe du ru et sur le versant dominant le site travertineux, le versant est décapé. La double corniche en surplomb a conservé des modelés de gélifraction et des surfaces d'arrachement. Les brèches reconnues sous le travertin dans les galeries de mine (figures n°21, n°22 et n°23) sont corrélatives des modelés de gélifraction des corniches. Ces modelés et ces brèches sont donc antérieurs aux travertins. Par contre, les blocs et les cailloutis interstratifiés dans les couches archéologiques traduisent des phases de déstabilisation du versant et de sa corniche à corréler avec le décapage du versant et des effondrements consécutifs. Ces dépôts de versant sont postérieurs à une phase importante de croissance du travertin. Les sondages de la BU2, de la BU10 montrent que la phase d'accumulation principale de blocaille s'est produite avant le Bonze final IIIb. Mais ces sondages n'ont pas permis d'établir les relations chronostratigraphiques existant entre les dépôts de versant et les couches archéologiques antérieures dont la plus ancienne est attribuée du Néolithique Final (rapport 2004). Le site du « Petit Petra » permet de préciser que le versant immédiatement surplombant était décapé lors du colmatage de la diaclase paléokarstique par des dépôts anthropiques « post-chalcolithique » d'après le rapport de fouille 2004.

Enfin au Sud du site, le versant est régularisé en aval d'un couloir de brèches karstiques (Carte géologique et géomorphologique en annexe). Le profil de ce versant présentait le même type de pente lors de la chute du bloc découvert à 2m dans le sondage E55 (figure n°14).

Restauration des profils de versants et recul des cirques :

Le versant Ouest du Puy d'Issolud est assez linéaire et présente des variations topographiques bien marquées dans le secteur du hameau de Loulié et de la source éponyme (Carte géologique et géomorphologique en annexe).

Au Nord du massif de travertin, le hameau est construit sur la formation bréchique emballant de gros blocs d'effondrement au pied d'un rentrant dans la corniche de calcaire du Bajocien. L'étendue de la bosse topographique formée par cette formation et sa physiographie en loupe, bien visible sur la carte IGN au 1/25 000ème, suggèrent que ce secteur a été mis en place ou affecté par un glissement de terrain. Ce secteur est limité au Sud par l'accident N95° à N100° exploité par l'incision du ru et le drainage karstique du système travertineux.

Au Sud du massif travertineux, un ensellement de la corniche bajocienne révèle la position d'un couloir de brèche karstique contrôlé par la fracturation N120° à N150°. Le matériel bréchique est purgé par recoupement du versant et alimente un éboulis régularisé selon une pente gravitaire qui borde le Sud du site travertineux. Immédiatement au Sud, cet éboulis régularisé est interrompu par un petit escarpement en fer à cheval armé par le calcaire biodétritique de l'Aalénien. L'aval-versant est occupé par un cône de déjection qui forme le bombement en pied de versant du cirque. En aval de ce cirque, on observe une légère dépression méridienne qui sépare le pied de versant d'un bombement d'amplitude métrique et de 25 à 30 m de diamètre (figure n°5 et carte géologique et géomorphologique en annexe). En première analyse et compte tenu de la proximité du massif travertineux d'une part, et d'un substratum marneux d'autre part, deux hypothèses s'imposent. Dans un premier cas de figure, ce bombement pourrait être un ancien lobe latéral du système travertineux établi par déversement en rive gauche. Dans un second cas de figure, il pourrait s'agir d'une loupe de glissement affectant les marnes noires du Toarcien et les formations superficielles sus-jacentes. Deux arguments suggèrent cette deuxième hypothèse :

- l'effet de symétrie avec le relief bréchique supportant le hameau de Loulié ; le système travertineux s'insérant dans l'incision creusée entre ces deux zones instables ;
- le témoignage de l'agriculteur qui laboure ce champ et qui décrit des phénomènes d'instabilité et de mouvements de terrain à cet endroit précis.

Dans les deux cas de figure, la dynamique de mise en place de ces deux types de phénomènes implique une alimentation en eau suffisamment importante. Une sortie d'eau en pied de versant au Sud du site de la source actuelle et dans l'axe de drainage constitué par un important couloir de brèche karstique est de nature à conforter le modèle paléo-hydrologique à l'origine de la structuration du système karstique de Loulié que cette étude met en évidence (*cf.* ¤§. III.1).

Analyse des surfaces de discordance

Le mégalapiés ruiniforme est une forme d'exhumation correspondant à l'érosion des altérites de cryptokarstification comme les brèches et de la couverture allochtone selon une dynamique de retrait du front de couverture commandé par l'incision de la vallée de la Dordogne.

Cette phase d'érosion ancienne aboutit à la mise en place de la surface de discordance qui ravine les marnes du Toarcien et sur laquelle reposent les dépôts de versant et de pied de versant constitués par des brèches et une formation à gros blocs (figures n°3, n°17, n°18 et n°19).

Dans la partie basse du site, cette formation à gros blocs et le substratum marneux ont été fortement altérés. Cette surface d'altération souligne la discordance anté-travertin reconnue dans les galeries de mines ainsi que dans les sondages des secteurs 8 et 9 (figures n°17, n°18 et n°19). Cette discordance est représentée en rouge sur les figures du rapport.

Reconstitution de la physiographie anté-travertin

Le système travertineux s'insère donc dans une topographie de reculée en aval d'un système karstique développé à la faveur du recul de la couverture du plateau. Cette physiographie de reculée est elle-même induite par le recul de la bordure du plateau par effondrement-glissement et par ravinement et la redistribution des dépôts de blocs calcaires dans l'axe de drainage du ru.
Cette physiographie correspond à une dynamique de bas niveau de base. Elle est ennoyée dans le fond de la vallée par la remontée du niveau d'inondation de la Tourmente à l'Holocène et elle est scellée en amont par les premiers stades d'incrustation de dômes stromatolithiques (figure n°23).

3. Le massif travertineux et son extension en aval :

L'analyse des enchaînements de faciès travertineux (§ I.4. et ¤§ II.2) permet de restituer la structure du massif travertineux de la Fontaine de Loulié et son extension vers l'aval.
L'amont du système, comprenant la zone de sources et la partie rocheuse du travertin, est étudié à partir des coupes de surface et en galerie, ainsi que sur la foi des sondages archéologiques. La partie crayeuse représentant l'aval du système a été étudiée grâce aux sondages à la pelle mécanique réalisés en 2005 qui mettent en évidence des retenues de travertin de plaine alluviale.

Le travertin de source et le travertin de barrage

- *Les dômes stromatolithiques*

Les dômes stromatolithiques ne sont pas visibles sur les coupes extérieures. En revanche, le creusement de la Galerie Cessac et du tronçon G4 des galeries Nord a révélé des dômes stromatolithiques scellés par des travertins plus récents liés à l'accrétion d'importants barrages à faciès bryophytiques. Ces dômes stromatolithiques seront appelés « *E* ».
Le plus important de ces dômes est exhumé dans la partie terminale de la Galerie Cessac entre 156 m et 158 m NGF (figures n°22 et n°23). Epais, de 30 à 50 cm au minimum, il présente un faciès rubané très induré et moule une rupture de pente générée par un éboulis très grossier reposant sur les marnes noires du Toarcien en place. Le contact stratigraphique entre ce dôme stromatolithique et l'éboulis sous-jacent représente la discordance infra-travertin dont l'âge se situe dans une fourchette calée entre le début de l'Holocène et la charnière Boréal-Atlantique. La discordance entre l'éboulis et le substratum toarcien est probablement pré-Holocène.
Le haut de ce dôme est situé 6,5 m sous la côte de la source qui alimente le captage actuel et à 9 m de distance du bassin et c'est la seule structure de concrétionnement qui suggère la proximité de la source ou de l'axe de drainage principal sur l'ensemble du site de Loulié.
En raison de sa position stratigraphique apparente par rapport au substratum, de son faciès et de sa situation par rapport à la source, il s'agit vraisemblablement du témoin connu le plus ancien du système travertineux de la Fontaine de Loulié. La qualité lithique de cette concrétion pourrait permettre une datation isotopique U/Th et permettre de préciser l'âge de l'installation du système travertineux.
Ces observations sont en accord avec la coupe livrée par la paroi Nord de la Galerie G4. On y observe un petit dôme stromatolithique prolongé par un plancher d'épaisseur décimétrique qui moule une rupture de pente et le profil d'un éboulis réglé et brèchifié composé de gélifracts triés (figures n°21 et n°23). La position du substratum n'est pas connue dans ce secteur du réseau de galeries si ce n'est par une coupe levée par le précédent géologue (Degaugue, 2001) qui fait référence à un faciès de « calcaire toarcien » qui n'a pas été observé lors du levé géologique de l'équipe HYPOGEE en 2005. A l'endroit désigné pour cet affleurement de « calcaire toarcien », il n'a été observé qu'une brèche indurée par un enduit de calcite.
Ces dômes stromatolithiques moulent l'éboulis probablement périglaciaire bien visible dans la galerie Cessac et dans les tronçons G3 et G4 du réseau de galeries Nord (figure n°21 et n°22). Elles sont recouvertes par les faciès de retenue et les mousses des barrages plus récents.

- *Les barrages à faciès bryophytiques : cascades et retenues*

Les coupes extérieures et en galeries permettent d'observer la structure des barrages de travertin successifs à faciès bryophytique de cascade. Les barrages identifiés sont indéxés *A*,*B*,*C* et *D* du plus récent au plus ancien (figures n°21 et n°23). Ils sont séparés les uns des autres par des discordances internes dont on a seulement retenu les principales. L'ensemble constitue l'ossature de le massif de travertin construit et repose en discordance sur les premiers témoins de travertinisation, à savoir, les dômes stromatilithiques appelés « *E* » en référence aux barrages de mousse *A*,*B*,*C* et *D* (figure n°23).
Le barrage A est visible au niveau de l'entrée Ouest du tronçon G2. Il est recoupé en biais par un front de taille sur une quinzaine de mètres et disparaît au-delà en direction de l'entrée de la Galerie Cessac située au Sud.
On le retrouve dans les galeries G1 et G2 où l'on remarque qu'il s'appuie sur un complexe de gours et de retenues colmatés par des sables travertineux.
Cet ensemble de faciès de retenue recouvre en discordance une zone de brèche à gros blocs de travertin provenant du démantèlement du barrage *B* (figure n°23) et visible sur la paroi sud de la galerie G2. Dans la galerie G1, plusieurs sondages par carottage n'ont pas rencontré les marnes noires du Toarcien en place telles que décrites dans les rapports antérieurs (Degaugue, 2001). Dans la partie terminale, on observe en effet des argiles de couleur brune à ocre qui ont été traversées par le carottier (sondage G2S1) pour retrouver quelques centimètres plus loin des sables travertineux.
Le barrage *B* est visible à l'Est du tronçon G2 sur la paroi sud et en plafond. La coupe en trois dimensions permet d'observer la partie aval du barrage affectée par des effondrements et le talus d'éboulis qui en résulte. Ce barrage se prolonge vers le Sud et pourrait être à raccorder avec le prolongement du front de taille déjà observé entre le barrage *A* et l'entrée de la Galerie Cessac. On retrouve dans ce secteur un faciès de mousse de cascade présentant des indices de déstructuration. Pour l'instant aucun autre argument ne permet d'attribuer cet affleurement de faible extension au barrage *B* ou à un barrage plus ancien.
Le barrage *C* est identifié dans la paroi Sud du puits d'effondrement situé entre les galeries G2 et G3 (figure n°21). A cet endroit, on observe une section rectangulaire métrique de travertin à faciès de mousse de cascade. Visible en coupe, ce bloc apparaît noyé en position d'olistolithe dans un remplissage de sables travertineux. En surface, des déblais de fouille et un dépôt de galets allochtones empêchent de suivre le prolongement de ce bloc apparent et de vérifier son éventuel raccordement avec un faciès de cascade en place. Le barrage *C* constitue en fait une zone perturbée dont les limites ne sont pas établies, mais qui représente manifestement une discordance interne majeure entre les faciès de cascade du barrage *B* et ceux du barrage *D*.
Le barrage *D* forme l'escarpement supérieur du massif travertineux entre le ru et le secteur du « pseudo-menhir ». A l'extérieur, il est dégradé par l'exploitation des carrières de tuf. En galerie, on peut l'observer dans la moitié inférieure du tronçon G4 et dans le tronçon G5. La galerie G4 présente une forte pente et son orientation EW permet de dégager une coupe amont-aval du barrage *D* et de ses faciès de retenue. La galerie G5 est horizontale et perpendiculaire à G4 ce qui permet d'observer le prolongement vers le Sud du barrage *D* à l'intérieur du massif et de vérifier son antériorité stratigraphique par rapport aux barrages *C*, *B* et *A*.
La coupe dégagée par la galerie G4 permet d'observer que le barrage *D* est composé d'une succession d'au moins trois ensembles d'accrétion formant des cascades à faciès essentiellement bryophytique. Dans le détail, ces trois corps de cascade sont soulignés à leur front par un dépôt stromatolithique et s'appuient en arrière sur des faciès algaires et empreintes foliaires. Ils se confondent en un barrage massif unique qui retient des sables travertineux visibles dans la partie supérieure du tronçon G4 juste avant un effondrement de voûte. C'est à cet endroit, au niveau d'un bloc métrique posé au sol (figure n°21), qu'on observe sur la paroi Nord, le remplissage du barrage *D* ennoyer le dôme *E*, ce dernier scellant la pente de l'éboulis anté-travertin suivie par les sapeurs romains pour le creusement de la galerie.
Enfin, la partie indurée du barrage *D* présente des cassures importantes visibles sur tout le pourtour de la galerie excepté au sol (figure n°21). Dans la partie médiane du tronçon, cette fracturation se présente comme deux diaclases d'écartement rectilignes, parallèles entre elles et perpendiculaires au conduit. Elles sont colmatées par des limons brun foncé provenant de la surface. Dans la partie basse du tronçon G4 et dans le tronçon G5, on observe que les surfaces de contact entre les travertins

stromatolithiques et les mousses de cascade sont affectées par des fentes de décollement elles aussi colmatées par des limons brun foncé.
Ce diaclasage est dû à un mouvement de masse par basculement-affaissement du front travertineux vers l'Ouest, c'est-à-dire dans la zone d'instabilité déjà décrite au sujet du barrage *C* et du barrage *B*. Les colmatages de limon dans les fentes de décollement et les diaclases indiquent que cette partie du massif travertineux n'était plus parcourue par des écoulements incrustants lorsque cette phase d'instabilité est survenue. Ceci suggère que le niveau des écoulements au sein du massif a connu un rabattement important au moins dans sa partie Nord. Ce rabattement des circulations est probablement lié à une incision du travertin et s'est produit après la mise en place du barrage *B*. Il n'a pas été possible de vérifier dans les délais de la campagne 2005, si cette incision s'était produite dans l'axe du talweg actuel du ru ou dans l'axe des écoulements issus de la zone de source. En tout état de cause, cet épisode d'érosion importante de la partie Nord du massif travertineux, a été suivi par un ennoyage de toute la zone par le barrage *A* et d'éventuels barrages postérieurs disparus depuis.

L'aval du système en connexion avec la plaine alluviale :

Les levés de sondages sur les pentes cultivées à l'Ouest du site de fouille ont révélé l'extension du système travertineux jusqu'au niveau de la plaine alluviale de la Tourmente. Les faciès et les géométries observés indiquent plusieurs phases de sédimentation dans de vastes bassins de retenue disposés en gradins entre 150-155 m et 120 m NGF.

-Typologie et significations morphodynamiques des faciès travertineux ou associés en aval

Les témoins de sédimentation travertineuse les plus récents rencontrés lors du creusement des sondages sont des faciès à joncs qui colmatent des fossés de drainage (figures n°16a et n°16b, faciès 7 de S6). Ils indiquent l'arrêt du fonctionnement hydrologique des bassins de retenue colmatés et drainés en surface par des fossés de drainage parfois moulés par des enduits stromatolithiques (figure n°19).

Avant cette phase d'écoulements concentrés dans des fossés, on observe des faciès crayeux liés au confinement des parties en eau dans les retenues traduisant la fin du fonctionnement en bassins (figures n°16a et 16b, faciès 6 de S6).

Les sables travertineux et débris remaniés caractérisent des écoulements turbulents empêchant l'édification des formes construites (figures n°13, n°15, n°16a et b, n°17 ; faciès 2, 4 et 5 des S5, S6, S12 et S9). Ces écoulements à forts courants correspondent à des crues du ru ou des arrivées d'eau affluentes des versants et chargées en matériel terrigène déposé en chenaux (figures n°17 et n°19, faciès chenalisés des S12 et S9). Ces faciès indiquent des périodes de colmatage et un milieu agité ce qui provoque la régularisation du profil d'écoulement : soit par comblement des bassins, soit par incision des barrages, c'est-à-dire une certaine irrégularité du régime hydrologique.

En alternance, on observe des faciès à oncolites, manchons et empreintes foliaires traduisant un fonctionnement hydrologique stable des bassins en milieu plus ou moins ouvert.
Ces témoins de stabilité indiquent l'existence et une certaine pérennité des barrages de gours et des cascades situés en aval. Cette dynamique d'accrétion du système barrage-retenue provoque la diminution de la pente du profil d'écoulement par édification d'un système de gradins qui implique une très grande régularité hydrologique.

Les faciès rubanés des dômes et des enduits stromatolithiques indiquent des phases d'installation et/ou de reprise de croissance du système travertineux sur des ruptures de pente. Ces faciès se construisent sous une faible lame d'eau et impliquent la pérennité des écoulements.

Les sondages à la pelle suffisamment profonds ont recoupé des faciès marécageux formant la semelle du système travertineux. Il s'agit de formations composées de limons carbonatés parfois altérés par un

sol hydromorphe à pseudo-gley. Ces formations participent à la préparation du milieu carbonaté en aval du système travertineux avant et au cours de sa progradation vers la confluence avec la Tourmente.

Les surfaces d'émersion et des indices de sols enfouis ou d'accumulation de matière organique ont été observés sur des surfaces de ravinement, dans des chenaux ou au toit des colmatages de bassins. Ces indices d'assèchement du milieu représentent respectivement :

- des phases d'incision et de déstabilsation du système travertineux,
- la fréquence de phases d'émersion et d'écoulement dans des chenaux,
- la fin d'une séquence de sédimentation normale qui atteint le niveau maximum d'inondation.

L'anthropisation du milieu se manifeste par l'apparition d'artefacts dans des faciès anthropisés, mais surtout avec l'apparition de faciès anthropiques :

- les limons bruns foncés, plus ou moins hydromorphes rencontrés dans les sondages archéologiques (figures n°9 et n°10) sont des indicateurs de la stabilité du couvert végétal sur les versants. Ils marquent l'anthropisation du milieu dans certains cas. Associés à des indices archéologiques, ils indiquent soit une préférence pour des pratiques et des occupations des secteurs bas ou plats de la topographie, soit une déprise agricole des versants et éventuellement une phase d'abandon du site de dépôt.
- les argiles de confinement gris bleu retrouvées dans les fossés et les galeries semblent constituer un indicateur spécifique des ouvrages militaires de drainage lié à la bataille sans plus de précision sur leur origine et leur couleur particulière, mais elles peuvent aussi relever d'une évolution naturelle en milieu réducteur.
- les brûlis et les foyers, contrairement aux charbons de bois flottés par exemple, impliquent un assèchement du milieu.
- les blocs et cailloutis grossiers rencontrés dans les sondages et portés à l'affleurement lors des intempéries de 2001 (?) et recoupés en sondages (figures n°16a, n°18 et n°19) pourraient bien représenter les vestiges de l'agger romain ou des infrastrucutres militaires associées. Plusieurs caractéristiques les distinguent de la formation à gros blocs infra-travertin : ils ne sont pas altérés, ils sont emballés dans des sédiments argileux laminés et non dans une argile d'altération, ils sont associés à une malacofaune terrestre et à un foyer en place.

On note enfin, que la surface topographique forme une troncature sommitale qui recoupe plusieurs de ces faciès. Cette troncature est soulignée par des dépôts colluviaux qui présentent des faciès plus caillouteux lorsqu'ils comblent des parties en creux (figure n°17 et n°18 ; sondages S11 et S8) et des faciès plus terrigènes à leur sommet. Cette partie supérieure terrigène peut-être assimilée à une semelle de labour.

- Analyse des surfaces de discordance et correspondances chronostratigraphiques

L'analyse des surfaces de discordance et des surfaces d'érosion ou d'émersion recoupées par les sondages géologiques, permet de reconstituer la géométrie des corps sédimentaires de l'aval du système travertineux. Le modèle géométrique qui en résulte fait apparaître dans l'ordre chronostratigraphique les modalités de mise en place de ces corps sédimentaires.

Les sondages les plus profonds ont atteint le substratum marneux du Toarcien sur lequel la formation d'argiles altérée à gros blocs repose en discordance.

La discordance infra-travertin s'appuie à la fois sur cette formation à gros blocs et sur les marnes du Toarcien. Elle est caractérisée par un paléosol évolué, argileux et oxydé, donc peu ou pas soumis à la saturation en eau lors de sa formation.

Dans la partie aval du système travertineux, la sédimentation commence par une semelle de travertinisation constituée par des limons d'inondation et de colluvionnement carbonatés (figures n°17 ; sondages S11 et 12 au Nord ; figure n°18 et n°19 ; sondages S7, S8, S9 et S13 au Sud) qui passent en amont à des sables travertineux (figure n°15 ; sondage E56). Le rapprochement chronostratigraphique de ce passage latéral de faciès d'amont en aval est déterminé par la présence d'un horizon hydromorphe à pseudo-gley qui affecte indifféremment les sables travertineux et les limons carbonatés.

Au-dessus de cette semelle de travertinisation, se développe un complexe de bassins de retenue correspondant à plusieurs phases d'accrétion de barrages de gours en aval. Certaines de ces phases d'accrétion sont séparées par des épisodes d'assèchement liés soit au comblement des bassins par des décharges détritiques remaniant les dépôts travertineux en provenance de l'amont, soit à des incisions détruisant les seuils hydrauliques constitués par les barrages en aval. A l'issue de ces phases d'émersion, on observe parfois des épisodes de remise en eau des bassins.

La dynamique de remplissage de ces bassins de retenue est restituée par l'analyse séquentielle des sondages S5, S6, S11 et S12 (figure n°11b).

A la base du sondage S6, on observe un remplissage de retenue, le faciès de craie 1, qui subi un épisode d'émersion. Cette émersion est exprimée par la présence d'un foyer au-dessus duquel une nouvelle phase de sédimentation, celle du faciès 2, prouve la remise en eau du bassin.
Cette remise en eau s'opère progressivement avec une sédimentation laminée qui s'achève par une accumulation d'oncolites en constituant un complexe trasgressif sur les blocs anthropiques de la formation Fb. Cette dynamique correspond au fonctionnement d'un premier barrage post-blocs contemporain du faciès 2 du sondage S6.
Dans la retenue où se dépose ce faciès 2, on observe des arrivées chenalisées remaniant des débris travertineux ou faciès 3. L'ensemble s'achève brutalement et est raviné par la séquence 4, plus détritique qui traduit un comblement par des écoulements turbulents et s'achève par une surface d'émersion oxydée. Le passage des séquences 2 et 3 à la séquence 4 suggère la dégradation d'un barrage en aval par incision, suivi d'une régularisation du profil d'écoulement traduite par la séquence 4.

Dans les sondages S12 et S9 on observe des chenaux ou des fossés colmatés qui pourraient correspondre à la même phase d'incision. Cette phase d'incision se caractérise par :

- un abaissement du seuil hydraulique en aval,
- la perduration d'écoulements assez puissants pour remanier et transporter des débris arrachés aux affleurements travertineux et aux versants situés en amont,
- une récurrence de la sédimentation détritique dans ces chenaux qui traduit la régularisation du profil d'écoulement et non une érosion régressive.

La séquence 5 repose en discordance sur les séquences 2,3 et 4. Elle présente un faciès comparable à celui de la séquence 2 ce qui suggère la reprise de l'accrétion d'un nouveau barrage en aval. On y observe comme en 2, des arrivées détritiques dans de petits chenaux qui indiquent une certaine tendance au comblement. Mais le barrage qui soutient le niveau de ce bassin reste en activité et le comblement s'achève par une phase de confinement représentée par la sédimentée crayeuse du faciès 6.

Cette fin de comblement est acquise lorsque les incisions en forme de fossés recueillent les eaux incrustantes qui ont permis la construction des faciès à joncs, faciès 7 du sondage 6 (figure n°16b), et les enduits stromatolithiques des fossés du sondage S9 (figure n°19). Cette phase aboutit à l'assainissement des terrains humides.

Fossés militaires et marqueurs anthropiques :
Une succession de phases d'incision a été identifiée dans les sondages S8 et S9 où des aménagements de fossés de drainage et des structures archéologiques en creux sont mis en évidence.

La surface d'installation d'un agro-système colluvial et la troncature sommitale des faciès travertineux correspondent à une utilisation postérieure du site par comblement des parties en creux et étalement par redistribution des colluvions comme le montrent les coupes des sondages S11 et S8 (figures n°17 et n°18). L'imputation de la redistribution des fines de ces colluvions à la mise en place d'une semelle de labour ne repose que sur l'observation a priori des pratiques agricoles actuelles.

- Restitution des profils d'écoulement : niveaux des bassins et des barrages

L'ensemble de l'aval du système travertineux est démantelé et non fonctionnel. Les faciès de retenue composés de sables travertineux et de craies sont tronqués par la surface topographique qui correspond à un système de redistribution colluvial affecté par une semelle de labour.

Aucun des barrages travertineux qui soutenaient le niveau des bassins de retenue n'a été retrouvé, mais ils ont forcément existé. On en conclut, à titre d'hypothèse, qu'ils ont été détruits avec l'établissement du système de drainage identifié en dans les sondages S6 et S9, puis de l'agro-système correspondant à la troncature de la pente colluviale, ou encore, qu'ils ont été exploités en carrière.

Sur la base des reconstitutions des corps sédimentaires, de leurs dynamiques de dépôt et des discordances qui les séparent, on peut restituer les profils d'écoulements, c'est-à-dire le niveau du barrage correspondant à un corps sédimentaire donné.

Les sondages S2,S3 et S4 décrits par J.-G. Astruc en 1998 correspondent à un barrage ancien se situant vers 155 m. Il s'agit d'affleurements de travertin altéré et plus ou moins remaniés sur une pente. Le Sondage S5 montre des faciès de retenue qui occupe le pied de cette pente probablement à la place de cet ancien barrage.

Les faciès de retenue du sondage S5 et la séquence 5 du sondage S6 semblent appartenir au même corps sédimentaire en arrière d'un barrage situé entre 142 m et 145 m.

La séquence 2 du sondage S6 indique la remise en eau du bassin qui s'achève avec une phase d'émersion indiquée par la séquence 4. Cette remise en eau correspond à la reprise d'activité d'un barrage situé vers 138-139 m et qui ennoie les blocs anthropiques de Fb.