

MLA 3 : Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager

Recommandations : prélèvement, caractérisation, modélisation des argiles du Beaumont à des fins d'ingénierie



UNION EUROPÉENNE

Fonds Européen de Développement Régional



PROVENCE ALPES CÔTE D'AZUR



le Massif Alpin

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE RHÔNE ALPES

Projet soutenu par l'Union Européenne au travers du Fonds Européen de Développement Régional – Programme Opérationnel Interrégional du Massif des Alpes et de la région Provence Alpes Côte d'Azur en partenariat avec la Région Auvergne Rhône Alpes



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Opérations soutenues par l'Etat

FONDS NATIONAL D'AMÉNAGEMENT

ET DE DÉVELOPPEMENT

DU TERRITOIRE

Projet soutenu par l'Etat – Fonds National d'Aménagement et de Développement du Territoire, Convention Interrégionale du Massif des Alpes

LIVRABLE N° L-R1

Date : Mars 2023

MLA3 – Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager

Recommandations : prélèvement, caractérisation, modélisation des argiles du Beaumont à des fins d'ingénierie

Références du projet	
Acronyme du projet :	MLA3
Nom complet du projet :	Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager
AAP :	FEDER – POIA
Num. convention :	PA0014948
AAP cofinancement :	FNADT CIMA
Cofinancement num. convention :	2019_D38_83 et 2021_D38_208
Chef de file :	Cerema Centre-Est
Partenaires :	ISTerre – UMR CNRS 5275, Université Grenoble Alpes EV-RIVES – UMR CNRS 5600, ENTPE.

Références du livrable	
Nature du livrable :	Rapport (R)
Diffusion :	Public (PU)
Intitulé :	Recommandations : prélèvement, caractérisation, modélisation des argiles du Beaumont à des fins d'ingénierie
Date d'édition :	Mars 2023
Nombre de pages :	18 p.
Coordinateur :	F.Rojat (Cerema)
Rédacteurs du rapport :	F.Rojat (Cerema)
Avec la participation de :	-
Relecteur :	Y.Péru (Cerema)
Valideur :	F.Rojat (Chef du projet MLA3)

Résumé du livrable

Le présent livrable L-R1 a permis de rassembler les principales recommandations qui ressortent des expérimentations menées dans le cadre du projet MLA3 sur la caractérisation des argiles glacio-lacustres du Beaumont. Ces recommandations couvrent :

- les méthodes de prélèvement ;
- le conditionnement et la conservation des échantillons ;
- l'observation et la préparation des échantillons ;
- les essais d'identification géotechnique ;
- les essais œdométriques ;
- les essais de cisaillement (boîte de Casagrande et appareil triaxial) ;
- les principes de modélisation.

Elles pourront utilement être employées par les maîtres d'ouvrages et gestionnaires dans leurs cahiers des charges d'études de mouvements de terrain sur la zone du Beaumont, ou mises en œuvre par les bureaux d'études intervenant dans ce contexte géologique.

Mots clés

MLA3	Charlaix
Essais de laboratoire	Quet-en-Beaumont
Prélèvement	Le Motty
Corps	Argiles glacio-lacustres
Les Touches	Modélisation

Statut de communication du rapport

Ce document est accessible librement au public sur internet. Il est capitalisé sur la plateforme documentaire [CeremaDoc](https://doc.cerema.fr/) : <https://doc.cerema.fr/>

Contexte du rapport

Le présent rapport fait partie des livrables du projet MLA3 « Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager », cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional – Programme Opérationnel Interrégional du Massif des Alpes (FEDER – POIA) ainsi que par le Fonds National d'Aménagement et de Développement du Territoire – Convention Interrégionale du massif des Alpes (FNADT – CIMA).

Le projet MLA3 s'articule autour de 5 sites pilotes de glissements de terrain lents le long de la RN85, au niveau des communes de Saint-Laurent-en-Beaumont (38), Quet-en-Beaumont (38), Les Côtes-de-Corps (38), Corps (38), Aspres-les-Corps (05), Saint-Firmin (05). Ces sites présentent une similarité d'origine géologique, les terrains en mouvement étant majoritairement issus de dépôts accumulés aux époques glaciaires et interglaciaires du Würm (vers -50 000 ans) dans de grands lacs d'obturation aujourd'hui disparus.

Le projet comprend trois axes (A, B, C) orientés vers la géologie / géotechnique, visant à la caractérisation des phénomènes, à leur suivi, à leur évolution dans le temps, et un axe sociologique (D) associant largement les habitants et les acteurs locaux, pour mettre en place des conditions de dialogue entre savoirs techniques et d'usage sur la compréhension et la gestion des mouvements de terrain.

- Axe A – Connaissance des phénomènes : préciser la géologie et les propriétés des argiles afin de comprendre les mécanismes de glissements à l'œuvre ;
- Axe B – Instrumentation : comparer les méthodes de suivi adaptées à des glissements lents et identifier les limites de ces méthodes ;
- Axe C – Modélisation du comportement mécanique et analyse d'incertitudes (annulé) ;
- Axe D – Approche humaine et sociale du risque : Questionner les places respectives de l'expert et du citoyen dans la gestion des risques provoqués par les glissements lents.

Le projet MLA3 associe 3 partenaires : le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema - direction territoriale Centre-Est), l'Université Grenoble Alpes (UGA - Laboratoire ISTerre – UMR CNRS 5275), l'École Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE – Laboratoire RIVES – UMR CNRS 5600). Il a bénéficié de la participation ou de la contribution ponctuelle de multiples acteurs externes au cours de son déroulement (DIR Med¹, RTM, PARN, communes, conseils départementaux, habitants, acteurs économiques locaux, etc.).

¹ DIR Med : Direction Interrégionale des Routes Méditerranée – RTM : Service de Restauration des Terrains de Montagne de l'Office National des Forêts – PARN : Pôle Alpin d'études et de recherche pour la prévention des Risques Naturels.

Sommaire

1	Généralités.....	7
2	Recommandations pour les prélèvements.....	7
3	Recommandations pour les essais de laboratoire	9
3.1	Conditionnement et conservation des échantillons	9
3.2	Observation et préparation des échantillons	9
3.3	Essais d'identification géotechnique	11
3.4	Essais œdométriques	12
3.5	Essais de cisaillement (boîte de Casagrande et triaxial).....	12
4	Recommandations pour la modélisation.....	14
5	Conclusion.....	16

1 GENERALITES

Le présent rapport fait suite aux livrables L-A2, L-A3, L-A4 et L-A5 du projet « Mouvements Lents dans les Alpes – Anticiper et Aménager » (MLA3), qui ont permis de décrire les argiles glacio-lacustres du Beaumont impliquées dans les glissements de terrains et d’aborder le sujet de la modélisation géotechnique des sites. Au cours de ces travaux, de multiples « bonnes pratiques » techniques ont pu être citées pour permettre d’obtenir des données sur les matériaux et les sites les plus représentatives possibles. Parfois également des expérimentations moins fructueuses ont conduit à identifier les pratiques à éviter.

L’objectif de ce livrable L-R1 est donc de **synthétiser l’ensemble des recommandations** pouvant être formulées quant à **la caractérisation puis la modélisation** des argiles glacio-lacustres du Beaumont, à des fins d’ingénierie (diagnostics de stabilité des pentes, préservation du patrimoine construit, méthodes de confortement, etc.). On rappellera que le livrable L-B2-R2 comporte par ailleurs des recommandations sur le suivi instrumenté des glissements lents, complément indispensable à la connaissance des propriétés géotechniques des matériaux abordée ici.

Le lecteur pourra se référer aux livrables L-A1 à L-A4 pour la description du contexte géologique des 5 sites d’étude du projet, qui ne sera donc pas rappelé ici. Pour mémoire, tous ces sites sont soumis à des glissements lents de grande ampleur, pour lesquels les couches d’argiles glacio-lacustres se sont avérées être les principales formations incriminées.

2 RECOMMANDATIONS POUR LES PRELEVEMENTS

Les prélèvements réalisés au carottier poinçonneur ou au carottier triple ont permis d’obtenir dans l’ensemble des échantillons de bonne qualité dans le cadre du projet MLA3. Cependant, deux défauts principaux ont pu être retrouvés sur certaines carottes à l’ouverture des conteneurs :

- un plissement des varves lié au poinçonnement ;
- une couronne remaniée, parfois appelée « cake » par les géotechniciens, sur le pourtour de la carotte.

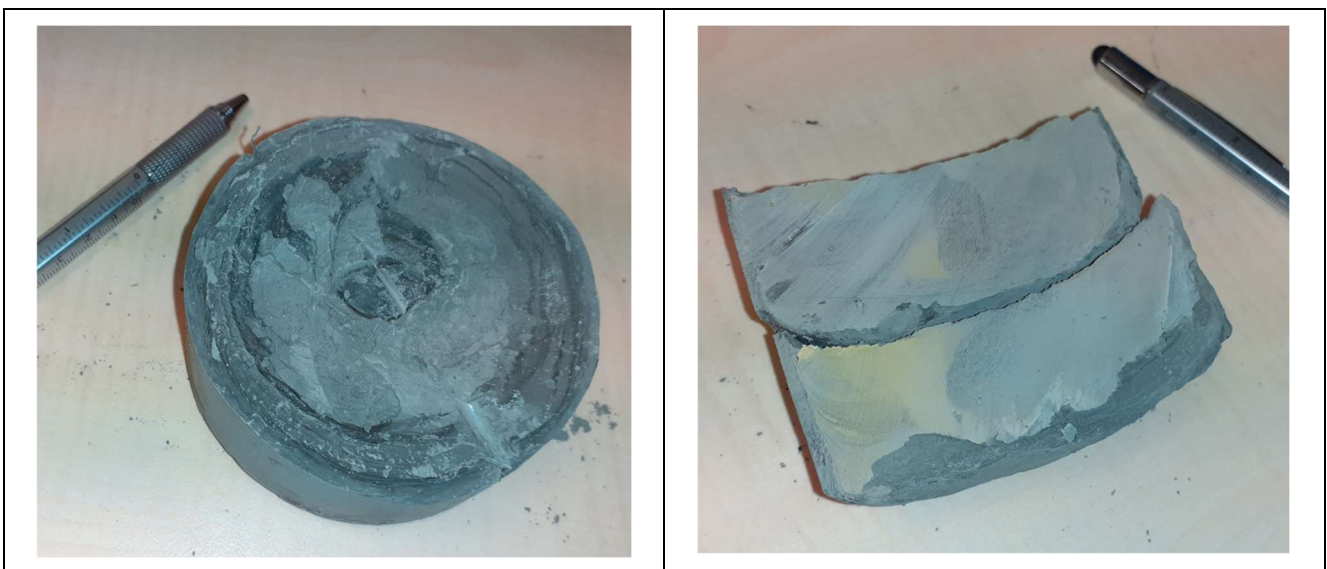


Figure 1 : (à gauche) couronne de matériaux remaniés en périphérie de carotte et (à droite) litages incurvés par le mode de prélèvement. Photographies prises sur échantillons secs d’argiles litées glacio-lacustres.

MLA 3 : Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager

Recommandations : prélèvement, caractérisation, modélisation des argiles du Beaumont à des fins d’ingénierie

Date : Mars 2023

Ces deux défauts sont illustrés sur la Figure 1. Ils génèrent un remaniement partiel de l'échantillon, en particulier sur ses bords (le centre étant généralement correctement préservé), susceptible d'être nuisible à la représentativité de certains essais mécaniques. Ils sont donc à éviter au maximum.

Les techniques de prélèvements possibles pour ce type de sol argileux et lité sont nombreuses et varient en fonction des pays ou des opérateurs (entreprises de sondages). Le maître d'ouvrage ou le gestionnaire soucieux d'obtenir des échantillons dits « non remaniés », qui lui donneront des résultats d'essais réalistes au regard des comportements *in situ*, peut toutefois imposer un certain nombre de précautions dans son cahier des charges de sondages.

La première recommandation sera d'utiliser des **carottages de diamètre élevé**, supérieur à 100 mm intérieur autant que possible, afin que malgré les éventuelles perturbations le cœur de la carotte reste suffisamment peu remanié pour être exploitable. Pour mémoire, les échantillons utilisés dans les essais mécaniques (œdomètre, appareil triaxial, boîte de Casagrande) ont fréquemment des diamètres de 50 à 60 mm.

La seconde recommandation sera de **privilégier impérativement pour les essais mécaniques les techniques de forage permettant des prélèvements de catégorie A** suivant la norme NF EN ISO 22475-1. Pour des échantillons destinés uniquement à des essais de perméabilité, porosité ou masse volumique, la catégorie B pourra toutefois être admise.

Le **carottier à piston stationnaire** constitue une référence pour le prélèvement de sols mous non remaniés. Cependant, dans le cas des argiles glacio-lacustres du Beaumont, qui présentent *in situ* des variations de consistance importantes (certains passages pouvant être très fermes et compacts), et comportent parfois des passages graveleux, son usage apparaît peu réaliste de manière générale. Il pourra toutefois rester indiqué pour les zones les plus molles.

Dans les autres cas, on privilégiera :

- l'usage de **carottiers triples**, de préférence avec fluide de forage pour éviter la dessiccation des échantillons par l'échauffement de la tête de forage lors d'un travail à sec ;
- l'usage de carottiers préleveurs par « poinçonnement », avec des **outils à paroi mince et étui intérieur**, et un **fonçage lent** pour limiter les déformations en bordure d'éprouvette.

Au-delà de ces recommandations visant les échantillons pour essais mécaniques, il peut également être utile de disposer de **prélèvements « remaniés » destinés par exemple à de simples mesures de granulométrie, d'indice de plasticité, de valeur au bleu, etc.**, qui nécessitent l'entièreté du sol mais pas nécessairement de préserver sa structure. Dans ce cas, des techniques de **carottage moins exigeantes** (carottier simple par exemple) ou des prélèvements à la **tarière**, permettant la récupération d'échantillons de catégorie D à moindre frais resteront indiquées. On notera toutefois que la tarière présente une incertitude plus importante sur la localisation précise des prélèvements en profondeur.

Dès lors que les forages sont destinés à l'analyse géotechnique ou même l'identification visuelle des sols, **on écartera en revanche pour les argiles du Beaumont toutes les méthodes de forage destructif remontant de simples « cuttings »** (prélèvements de catégorie E). Elles éliminent en effet une grande part de la fraction fine ici essentielle, et s'avèrent trop approximatives tant sur l'identification des matériaux que sur leur localisation en profondeur. Dans le cadre du projet MLA3, lorsque ce type d'échantillon était disponible, il s'est avéré au final **inexploitable et non représentatif**.

3 RECOMMANDATIONS POUR LES ESSAIS DE LABORATOIRE

3.1 Conditionnement et conservation des échantillons

La conservation des échantillons dépend de leur mode de conditionnement. Trois types principaux d'échantillons ont été exploités durant le projet MLA3 :

- des échantillons remaniés en sacs issus de prélèvements à la tarière ;
- des échantillons carottés en caisses PVC ;
- des échantillons carottés sous gaines étanches paraffinées.

Les **échantillons en sacs** nécessitent d'imposer à l'entreprise de forage réalisant les prélèvements une **fermeture rapide et soignée des sacs** si l'on souhaite pouvoir en conserver la teneur en eau. Toutefois, malgré tout le soin apporté, ces échantillons ont tendance à se dessécher au cours du temps. On privilégiera donc leur **ouverture rapide en laboratoire**, avec réalisation des essais au plus proche de leur date de réception. S'il n'est pas possible de réaliser les essais rapidement, il conviendra de les conserver dans une pièce thermo-régulée, voire idéalement thermo-hygro-régulée, à l'abri du soleil, en attendant leur exploitation.

Les **échantillons carottés en caisses PVC** se dessèchent rapidement, ce qui peut rendre plus difficile la réalisation des coupes de terrain (l'argile une fois sèche ayant un aspect, une consistance et un volume pouvant être fortement modifiés). On essaiera donc de les exploiter peu de temps après leur réception au laboratoire. Dans le cas contraire, les mêmes préconisations que précédemment s'appliquent, mais avec un risque d'évolution du matériau plus important du fait de l'absence de fermeture « étanche » des conteneurs. Quelles que soient les conditions de conservation, ces échantillons en caisse ne pourront toutefois pas présenter des teneurs en eau représentatives, compte-tenu de leur possible dessiccation sur le chantier et/ou lors du transport. Des valeurs indicatives peuvent éventuellement être recherchées en n'utilisant que le cœur de carotte, dans les quelques jours suivant le prélèvement. Ces échantillons **resteront en revanche parfaitement appropriés pour des identifications géotechniques** (granulométrie, valeur au bleu, limites d'Atterberg, etc.)

Les **échantillons carottés sous gaines étanches paraffinées** sont les seuls à avoir été véritablement utilisables pour les essais mécaniques en laboratoire durant le projet MLA3. Ce mode de conservation permet de préserver la structure, la texture, la consistance / teneur en eau du matériau et approximativement les contraintes en place. Pour les argiles du Beaumont, ce type de conditionnement est à exiger des entreprises de forage lorsque des prélèvements de catégorie A sont recherchés. Sur le long terme, une légère dessiccation ou des migrations d'eau peuvent toutefois se produire. Si de tels prélèvements sont à conserver plusieurs mois avant ouverture, on privilégiera alors leur stockage dans un **espace thermo-hygro-régulé, à l'abri du soleil, en position horizontale** pour limiter les transferts hydriques entre couches². Il est possible également de tourner de temps en temps les carottes pour éviter les migrations d'eau dans l'épaisseur du matériau.

3.2 Observation et préparation des échantillons

Les recommandations ci-après concernent principalement les échantillons de catégorie A, pour lesquels un soin plus particulier doit être apporté afin de préserver les propriétés du sol.

L'ouverture des conteneurs de carottes en laboratoire doit être particulièrement soigné. En effet, certaines couches argileuses du Beaumont, en fonction de leur teneur en eau, présentent un pouvoir

² On rappellera que du fait de la succion de l'argile, l'eau ne s'écoule pas (ou très peu) naturellement en-dehors du matériau. En revanche elle peut migrer au sein d'une couche ou entre deux couches de succions différentes.

collant élevé sur les parois de la gaine. On veillera alors à ne pas déstructurer la carotte au moment de l'ouverture. Dans le cadre du projet MLA3, malgré tout le soin apporté, cela s'est parfois produit sur certains échantillons (voir Figure 2).



Figure 2 : (en haut) Prélèvement fortement altéré à l'ouverture de la carotte par adhérence sur la gaine (sondage S8-SC2 de 9.00 à 10.50 m, Les Touches) – (en bas) Prélèvement bien conservé à l'ouverture des carottes (sondage S9-SC2 de 21.00 à 22.50 m, Corps).

Il sera utile également à l'ouverture de la carotte d'examiner l'état de paraffinage des extrémités et d'observer d'éventuelles dessiccations. Les parties desséchées seront alors à écarter.

Les photographies et la description des carottes d'argiles glacio-lacustres pourront nécessiter de **racler légèrement leur surface** (voir Figure 3) notamment si un « cake » est présent. Celui-ci masque en effet généralement les litages et peut comprendre des mélanges de matériaux provenant de couches différentes. Les **photographies** seront systématiquement réalisées avec un **repère colorimétrique** afin d'identifier les différences de teintes liées à l'exposition, la sensibilité de l'appareil photo, etc.

Les échantillons pour essais peuvent être prélevés immédiatement et si besoin mis en attente quelques jours dans un container étanche, après emballage (film PVC, aluminium, etc.). Les gaines seront ensuite refermées, avec bouchons d'extrémité et scotch étanche, au plus vite. La conservation après la première ouverture reste néanmoins en général moins durable.



Figure 3 : Argiles litées de la couche F2ch, sur le sondage carotté SC1 de 2012, site de Charlaix. La surface a été raclée pour une meilleure observation du litage.

Enfin, la préparation (taillage) des éprouvettes pour les essais mécaniques visera à **sélectionner uniquement le cœur de la carotte**, celui-ci étant le moins exposé aux perturbations liées au forage ou aux agents extérieurs.

Ces recommandations montrent qu'il pourra être **difficile de tailler des éprouvettes d'essais dans plusieurs directions** afin d'étudier l'anisotropie du matériau. Dans le cadre du projet MLA3, un sondage incliné avait pu être réalisé, mais c'est rarement le cas lors d'opérations de reconnaissance courantes. À défaut, des carottes de diamètre important (voir section 2) pourront faciliter ces essais multi-directionnels.

3.3 Essais d'identification géotechnique

Les principales recommandations concernant les essais d'identification géotechnique sont évidemment **le respect des normes en vigueur**. Le choix d'un laboratoire d'essais sous **accréditation Cofrac ISO 17-025** bien que non obligatoire peut permettre en outre de garantir un parfait respect des protocoles, et un étalonnage régulier des matériels d'essais.

Les essais d'identification géotechnique seront à **associer à la description géologique et géotechnique (visuelle) des couches**, de sorte à en retirer une image la plus représentative possible de la variabilité des sols dans la zone investiguée. Comme cela a pu être constaté dans le cadre du projet MLA3, malgré une homogénéité d'ensemble, une certaine variabilité peut être observée au sein de la formation des argiles litées glacio-lacustres (litages plus ou moins marqués, passages ponctuels sableux ou graveleux, teneurs en argile variables, etc.).

Concernant les essais en eux-mêmes, compte-tenu des classifications des sols obtenues pour les matériaux du projet :

- pour la **granularité de la fraction fine, on privilégiera la méthode par sédimentométrie** plutôt que celle au granulomètre laser. Cette dernière sous-estime en effet la fraction argileuse, comme cela avait été indiqué antérieurement dans la littérature et a pu être confirmé dans les essais du projet MLA3 (voir livrables L-A3 et L-A4 en particulier). En outre, la sédimentométrie est généralement la méthode de référence pour les classifications, ou pour le calcul de l'activité de la fraction argileuse par exemple.
- pour l'**argilosité du matériau, on privilégiera les limites d'Atterberg (plus discriminantes) à l'usage de la valeur au bleu dans les couches argileuses**. La valeur au bleu sera en revanche la plus pertinente pour les couches sablo-limoneuses, la limite de plasticité au rouleau étant en effet très difficile à déterminer dans ces cas et peu représentative.

Les **essais d'identification principalement recommandés** sont au final : teneur en eau, granulométrie avec sédimentométrie, limites d'Atterberg (ou à défaut valeur au bleu), teneur en carbonates. Des mesures de masses volumiques (du sol, des grains) peuvent être ajoutées lorsque les échantillons s'y prêtent (prélèvements de catégories A ou B).

3.4 Essais œdométriques

Les essais œdométriques sont en général peu utilisés dans les problématiques de glissements de terrains car ils sont principalement destinés à fournir des paramètres de déformabilité pour le calcul des amplitudes et vitesses de tassements en situation de compression unidimensionnelle. Cependant, ils peuvent également **fournir des éléments intéressants sur les niveaux de préconsolidation du sol**, susceptibles d'éclairer l'interprétation des autres essais mécaniques.

La plupart du temps, l'essai œdométrique ne sera donc pas un essai de première intention pour l'étude d'un glissement de terrain et/ou le dimensionnement d'un confortement dans les argiles glacio-lacustres du Beaumont, du moins lorsque l'on dispose d'un programme de reconnaissances limité. Il sera toutefois intéressant d'en réaliser dans un programme d'essais plus étendu.

Dans ce cas, les essais menés dans le cadre du projet MLA3 ont permis de constater que les échantillons étaient très **généralement gonflants à la mise en eau**. Les tentatives de réaliser l'essai sans procédure initiale de compensation de ce gonflement se sont soldées par un disquage des éprouvettes aux contacts entre lits, et au final des résultats peu interprétables. De même, l'application de procédures automatisées visant à réduire les temps de consolidation entre chaque palier de chargement, proposées par les logiciels récents de pilotage des œdomètres et basées sur la mesure de taux de déformation, sont apparues mal adaptées aux argiles du Beaumont. Les courbes de consolidation et de compressibilité en ont été manifestement perturbées.

Les **recommandations pour les essais œdométriques** seront donc :

- le respect de **paliers de chargement d'au moins 24h** ;
- la mise en place systématique de **la procédure de compensation du gonflement initial** dès lors que celui-ci se manifeste à la mise en eau.

Pour ce dernier point, l'essai ainsi modifié peut rendre plus difficile la détermination du coefficient C_s et la détermination de la pression de préconsolidation σ'_p . Si besoin, C_s pourra alors être évalué en partie sur la courbe de décharge finale, et σ'_p pourra être abordé avec la méthode de Casagrande (voir NF EN ISO 17892-5 annexe B) plutôt qu'avec celle du croisement des deux droites C_s et C_c .

Enfin, concernant la détermination des **coefficients de consolidation c_v** , la **méthode de Casagrande** (basée sur la représentation en logarithme du temps) est apparue **beaucoup plus répétable et fiable** que la méthode de Taylor (basée sur la représentation en racine carrée du temps), cette dernière pâtissant en effet de difficultés récurrentes de linéarisation de la première partie de la courbe. **La méthode de Casagrande sera donc recommandée en priorité.**

3.5 Essais de cisaillement (boîte de Casagrande et triaxial)

Les essais de cisaillement sont généralement **considérés comme essentiels** aux études de mouvements de terrains dans la mesure où ils fournissent les paramètres principaux de résistance du sol, c'est-à-dire les caractéristiques du critère de rupture. Les essais triaxiaux peuvent également fournir des paramètres de déformabilité élastique (module, coefficient de Poisson par exemple) ou de plasticité (dilatance par exemple), utiles aux modélisations par éléments finis ou assimilées. En l'absence de tels essais, les paramètres du sol doivent être obtenus par corrélations avec des essais en place, par exemple avec les essais pressiométriques, ou par recalage sur les observations *in situ*.

MLA 3 : Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager

Recommandations : prélèvement, caractérisation, modélisation des argiles du Beaumont à des fins d'ingénierie

Date : Mars 2023

La première recommandation sera donc de **prévoir autant que possible des essais de cisaillement dans un programme de reconnaissances concernant les argiles litées du Beaumont**. Le travail par corrélation est généralement peu fiable et limité : par exemple, dans ces sols, l'essai pressiométrique sera généralement partiellement drainé et partiellement consolidé ce qui ne permet que des corrélations très approximatives entre les paramètres c' et ϕ' (drainés) et les pressions limites malgré les multiples formules disponibles dans la littérature. **En l'absence d'essais**, compte-tenu des caractéristiques de la formation des argiles glacio-lacustres, il vaudra mieux **travailler avec des paramètres tirés de la littérature (MLA3 e.g.) et recalés sur les observations de terrain** : les paramètres de résistance disponibles ont notamment été entièrement synthétisés dans les livrables L-A3 et L-A4 du projet.

Lorsque des essais sont réalisés, il peut être recommandé à la lumière des travaux du projet MLA3 de **favoriser les mesures à l'appareil triaxial par rapport à celles à la boîte de Casagrande**. La boîte de Casagrande, si elle s'est avérée globalement fiable sur la détermination des angles de frottement, a montré une **surévaluation et un accroissement de la dispersion sur les cohésions**. Plus particulièrement, les effets suivants se superposent au sein de la boîte, nuisant à la représentativité de l'essai (voir livrable L-A4) :

- rotation des contraintes principales au cours de l'essai ;
- mise en butée du matériau contre les parois de la boîte, hétérogénéité interne des contraintes, déplacements horizontaux non uniformes au sein de la boîte. À noter toutefois que dans la littérature les avis divergent sur l'impact réel de ces biais sur la rupture finale ;
- effets de la bande de cisaillement imposée et de l'espacement entre les deux demi-boîtes lorsque des particules de quelques millimètres sont présentes : imbrication des grains et dilataction empêchée pouvant générer une surévaluation de la cohésion et/ou de l'angle de frottement ;
- contrôle approximatif de la saturation de l'échantillon (saturation sous faible pression d'eau, pas de procédure de Skempton contrairement à l'essai triaxial, etc.) et des conditions de drainage durant l'essai.

Par ailleurs, la **boîte de Casagrande sélectionne une surface de rupture d'épaisseur très limitée** et généralement parallèle à l'orientation des lits (subhorizontaux pour des forages verticaux). Cela tend à augmenter la variabilité observée sur les résultats d'essais, en fonction du cisaillement sur un lit ou un autre, ou d'une surface de rupture se positionnant en « plein-lit » ou à l'interface entre deux lits. **L'essai triaxial permet une sollicitation plus globale de l'éprouvette, avec des conditions d'essais mieux maîtrisées**. Compte-tenu de l'épaisseur des surfaces de cisaillement relevées in-situ (pluri-décimétriques), cette approche est vraisemblablement plus représentative. Enfin, **l'essai à la boîte de cisaillement ne permet pas de déterminer les paramètres de déformabilité du sol** avant la rupture, même si ceux-ci ne sont pas essentiels à la réalisation de calculs conventionnels à l'équilibre limite (ils seront en revanche importants pour des calculs de type éléments finis par exemple).

Pour la réalisation des essais triaxiaux, le **respect des normes en vigueur** (NF EN ISO 17892-9 en particulier) est particulièrement recommandé. En termes de typologie d'essai, compte-tenu des particularités identifiées dans le comportement non-drainé des argiles du Beaumont, qui rendent plus difficile l'interprétation des courbes p - q et l'identification claire des états normalement consolidés et surconsolidés, la **réalisation de quelques essais drainés (type CID) sera utile**. Ceux-ci sont généralement plus faciles à interpréter en termes de paramètres de sol du fait de l'absence de couplages. Ces essais seront **complétés par des essais non-drainés (type CIU)**, plus rapides et permettant néanmoins d'identifier clairement les points à la rupture en dépit des difficultés rencontrées pour des interprétations plus avancées.

Au niveau de **l'exploitation des essais de cisaillement**, une approche conventionnelle basée sur l'identification de points à la rupture pour rechercher un **critère de rupture de Mohr-Coulomb a montré des résultats satisfaisants**, au regard de la dispersion naturelle des propriétés de la formation. La **surconsolidation** peut être dans ce cas utilement représentée par une simple **droite de Hvorslev** (c'_{oc} ,

MLA 3 : Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager

Recommandations : prélèvement, caractérisation, modélisation des argiles du Beaumont à des fins d'ingénierie

Date : Mars 2023

φ'_{oc}) se raccordant à la ligne d'état critique (c'_{nc} , φ'_{nc}), pour peu que suffisamment de points d'essai soient disponibles (au moins 4 lorsqu'il faut distinguer les zones surconsolidées et normalement consolidées). **L'identification de la rupture** dans les essais triaxiaux s'est avérée la plus convaincante soit à partir du maximum du déviateur q , soit à partir du maximum du rapport σ'_1/σ'_3 , méthodes toutes deux proposées par la norme d'essai.

La recherche de **paramètres de modèles plus avancés** s'est avérée en revanche délicate. En partant de l'approche de référence de Cambridge pour les argiles, la dispersion des résultats d'essais mécaniques propre à la formation du Beaumont compromet la détermination d'un modèle approfondi : le raffinement ainsi obtenu n'aurait qu'une portée limitée à quelques essais. De plus la complexité des comportements en contrainte – déformation – pression interstitielle observée sur les essais CIU nécessiterait de se diriger vers les modèles les plus évolués, du type modèle à bulle avec ou sans prise en compte des compressibilités des constituants, qui présentent un nombre relativement élevé de paramètres. Cette approche peut être intéressante pour comprendre scientifiquement le comportement du sol, mais présente ici un intérêt limité pour les mission d'ingénierie conventionnelle. Nous recommandons donc à l'issue du projet MLA3, dans le contexte des terrains glacio-lacustres du Beaumont, **de travailler plutôt avec des modèles simples de l'ingénierie géotechnique** (Mohr-Coulomb, etc.) pour l'analyse des essais mécaniques, **mais d'y intégrer la dispersion des paramètres** (ne pas se limiter uniquement à une moyenne, voir section suivante).

4 RECOMMANDATIONS POUR LA MODELISATION

La **modélisation des argiles revêt de multiples aspects** qu'il est important de bien identifier. En effet, l'étape de modélisation / de calcul n'est que l'aboutissement d'un ensemble d'étapes préalables permettant de caractériser le matériau et sa configuration *in situ* (modèle de terrain) : elle est donc tributaire de toutes les incertitudes ou erreurs d'appréciation accumulées antérieurement durant l'étude.

On rappellera tout d'abord que les études géotechniques revêtent un caractère progressif, avec des phases successives visant à réduire les incertitudes résiduelles. Cela est par exemple particulièrement explicite dans l'enchaînement des missions géotechniques décrit par la norme NF P 94-500. Le **degré de modélisation du terrain atteignable à une phase donnée sera alors fortement lié au niveau d'étude auquel le géotechnicien a pu parvenir**, en particulier au regard des reconnaissances et instrumentations disponibles.

Une autre manière de représenter la progressivité de la démarche peut être de décrire le cheminement intellectuel qui permet à l'ingénieur de mettre en œuvre les connaissances acquises sur le site et sa propre expérience pour formaliser un modèle géotechnique du site aboutissant à la modélisation (calcul). Cette démarche est synthétisée par le diagramme de la Figure 4, chaque item pouvant faire l'objet d'un approfondissement plus ou moins important en fonction du niveau d'étude considéré (G1, G2AVP, G2PRO, etc). Le résultat final permet d'obtenir une modélisation du terrain qui servira en fonction des cas à se prononcer sur les évolutions envisageables du glissement, à quantifier un facteur de sécurité, à déterminer (si elles existent) des solutions de réparation ou de stabilisation sûres et financièrement acceptables restant compatibles avec les contraintes du site, etc.

On voit à travers ces quelques explications que la « modélisation » ne peut pas être un objectif en soi, mais qu'il s'agit d'un outil permettant de répondre à un besoin technique du territoire affecté par le glissement de terrain. La première recommandation sera donc **d'adapter le niveau de modélisation aux objectifs recherchés**. Le dimensionnement d'un système de drainage pour stabiliser un glissement par exemple nécessitera une connaissance approfondie du modèle hydrogéologique et de l'agencement des couches de terrain. En revanche, en termes de calcul mécanique, modéliser le gain de sécurité associé à un abaissement de nappe pourra souvent s'effectuer à partir de modèles de calcul

MLA 3 : Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager

Recommandations : prélèvement, caractérisation, modélisation des argiles du Beaumont à des fins d'ingénierie

Date : Mars 2023

simples (à l'équilibre limite type Talren® ou Geostab® ou autre) qui apportent les réponses usuellement nécessaires à l'ingénierie. A contrario, reproduire voire prédire l'évolution des déformations au voisinage d'un ouvrage sensible pourra nécessiter un modèle de comportement du sol beaucoup plus avancé, avec peut-être une densité importante de reconnaissances de terrain au voisinage de l'ouvrage considéré.

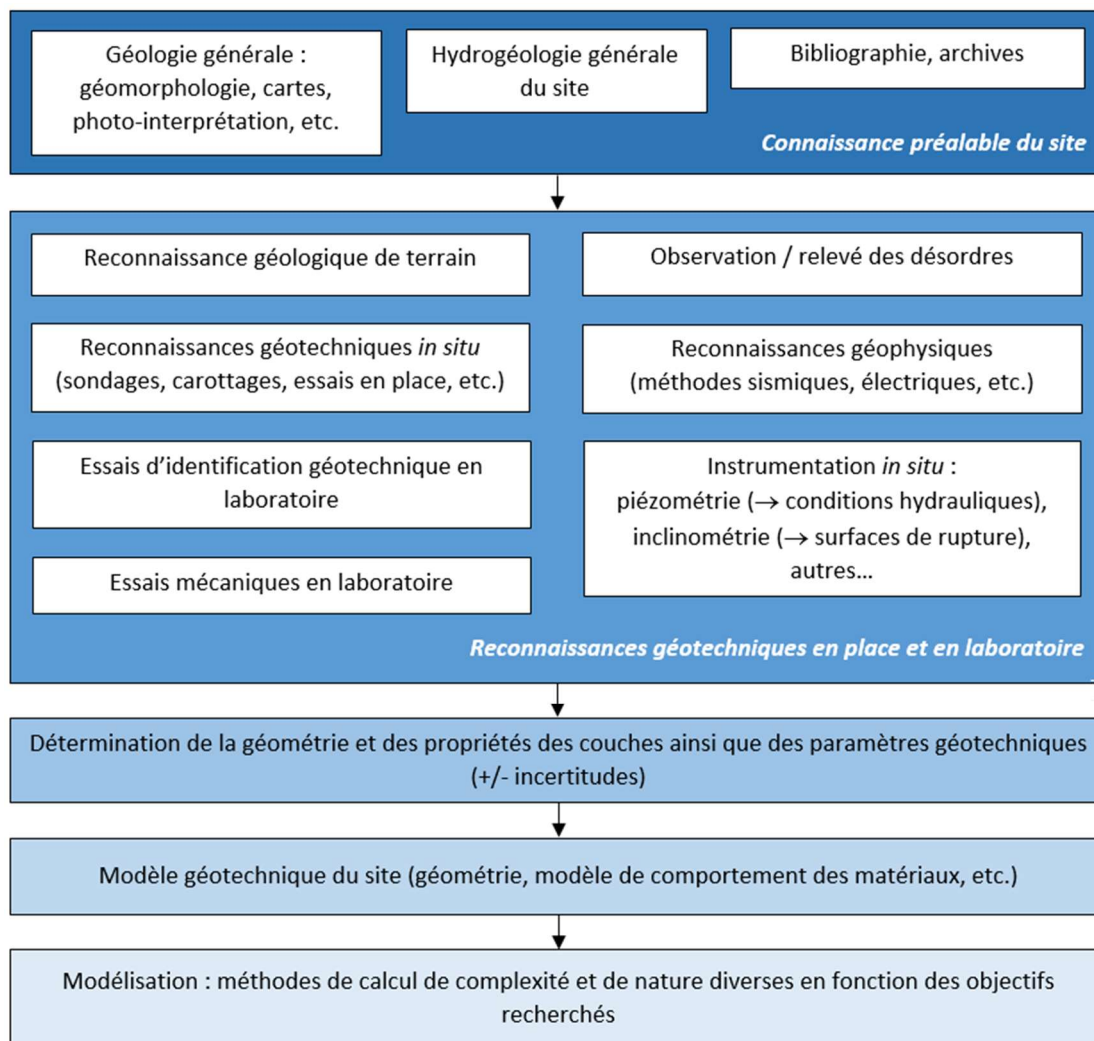


Figure 4 : Démarche générale d'établissement d'une modélisation géotechnique

La seconde recommandation sera **d'adapter le niveau de modélisation aux données disponibles et au poids des incertitudes résiduelles**. S'il est généralement admis que le volume des reconnaissances (de terrain, en laboratoire) nécessaires à l'analyse s'accroît avec la complexité du problème étudié, il n'en reste pas moins que le géotechnicien n'a jamais qu'une connaissance partielle et imparfaite du terrain, à partir de laquelle il élabore un modèle aussi cohérent que possible. À titre d'exemple, une importante campagne de reconnaissances composée d'une trentaine de sondages (diamètre 100 mm) de 20 à 30 m de profondeur ne représentera jamais que quelques m³ de matériau réellement prélevés, sur des glissements pouvant représenter plusieurs centaines de milliers de m³. Entre les sondages, le géotechnicien interpole son modèle sur la base de la connaissance des formations géologiques, de méthodes géophysiques, de son expérience propre, etc. Le modèle souffrira donc des incertitudes liées aux données disponibles, qui peuvent s'avérer plus ou moins importantes en fonction des cas et de la régularité des formations rencontrées. Il sera alors par exemple peu utile de développer des modèles de comportement du matériau très avancés si des incertitudes majeures sur la géométrie des couches ou leur hétérogénéité sont présentes, ces dernières devenant prépondérantes sur la finesse du modèle mécanique.

MLA 3 : Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager

Recommandations : prélèvement, caractérisation, modélisation des argiles du Beaumont à des fins d'ingénierie

Date : Mars 2023

Le livrable L-A5 a permis de présenter par exemple deux approches de modélisation différentes des sites en fonction des objectifs recherchés et du volume de données disponibles. D'une part un **modèle avancé** (géométriquement, hydrauliquement, etc.) sur le site de Charlaix issu de long historique et de multiples travaux et collaborations de recherche, et d'autre part un **modèle simplifié** répondant à des besoins immédiats d'ingénierie et de compréhension du phénomène sur le site des Touches.

Au-delà de ces recommandations générales sur la modélisation géotechnique des sites de glissements, dans le cadre du projet de « recherche-action » MLA3, le sous-sujet de la **modélisation du matériau « argiles »** (glacio-lacustres du Beaumont) a été plus particulièrement développé. Malgré une certaine **homogénéité régionale**, issue du mode de dépôt géologique commun de cette formation dans les différents sites d'études, les analyses menées ont mis en évidence une **variabilité significative** des propriétés des matériaux. Cette variabilité est apparue propre à la formation (litée) et généralement indépendante des sites examinés ; elle se manifeste tant sur les essais d'identification des sols que sur leurs caractéristiques mécaniques. Elle a permis de déterminer des **propriétés moyennes** et des **fourchettes de variation** des paramètres géotechniques.

On pourra de fait recommander la **prise en compte de l'incertitude sur les propriétés des sols dans les modélisations**. Le travail avec des valeurs moyennes peut certes donner des éléments sur les comportements généraux attendus, mais les évolutions locales des glissements peuvent aussi être liées à des variations plus ponctuelles des propriétés du terrain devenant prépondérantes sur le comportement d'ensemble du massif. Outre des accroissements locaux de la densité des reconnaissances géotechniques, ce type de variation peut être appréhendé à travers **des études de sensibilité** prenant en compte les gammes de propriétés mécaniques déterminées par des analyses larges comme celle synthétisée dans le livrable L-A4 du projet.

Enfin, concernant le choix du modèle de comportement de l'argile, en particulier sur le sujet mécanique (critère de rupture, déformabilité, couplages hydro-mécaniques, etc.) pour des besoins d'ingénierie courante, il apparaît que les calculs à l'équilibre limite avec des **modèles relativement simples** (Mohr-Coulomb avec droite de Hvorslev pour la partie surconsolidée) restent tout-à-fait pertinents. S'ils sont certes insuffisants pour représenter la complexité des comportements réellement observés en laboratoire, ils s'avèrent en revanche utiles pour répondre à des questions essentielles sur les méthodes de confortement admissibles, l'influence d'actions comme le drainage du sol ou un rabattement de nappe, etc. sous réserve **d'y intégrer la variabilité des paramètres géotechniques** comme indiqué antérieurement. Au **stade d'analyse de « l'avant-projet de stabilisation »**, qui consiste à établir des principes de construction avec une ébauche dimensionnelle et une approche des coûts (voir NF P 94-500), et qui est à peu près celui pouvant être atteint avec les seules reconnaissances générales de site du projet MLA3, ces modèles apparaissent tout-à-fait appropriés. Par la suite, dans des phases d'étude plus poussées, des **modèles plus approfondis peuvent être recherchés** pour affiner les dimensionnements, généralement assortis de compléments de reconnaissance localisés.

5 CONCLUSION

Le présent livrable L-R1 a permis de **rassembler les principales recommandations** qui ressortent des expérimentations menées dans le cadre du projet MLA3 pour **la caractérisation des argiles glacio-lacustres du Beaumont**. Ces recommandations couvrent :

- les méthodes de prélèvement ;
- le conditionnement et la conservation des échantillons ;
- l'observation et la préparation des échantillons ;
- les essais d'identification géotechnique ;
- les essais œdométriques ;

MLA 3 : Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager

Recommandations : prélèvement, caractérisation, modélisation des argiles du Beaumont à des fins d'ingénierie

Date : Mars 2023

- les essais de cisaillement (boîte de Casagrande et appareil triaxial) ;
- les principes de modélisation.

Elles pourront utilement être employées par les maîtres d'ouvrages et gestionnaires dans leurs cahiers des charges d'études de mouvements de terrain sur la zone du Beaumont, ou mises en œuvre par les bureaux d'études intervenant dans ce contexte géologique.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

UGA
Université
Grenoble Alpes



ENTPE

L'école de l'aménagement durable des territoires



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



**RÉGION
SUD**
PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR



**l'Europe
s'engage
sur
le Massif Alpin**

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES