

L'apport du logiciel ANGELINE aux études géotechniques de tracés

Hervé HAVARD

Directeur adjoint

Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers

Gilles SINOIR

Technicien supérieur

Division Informatique - organisation - gestion

Centre d'études techniques de l'Équipement de Nantes

RÉSUMÉ

L'informatisation des opérations relatives aux reconnaissances géotechniques de tracés routiers ou ferroviaires permet de gagner à la fois en rapidité et en fiabilité lors des phases finales de l'élaboration des projets.

L'article décrit le logiciel développé au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers pour répondre aux besoins des ingénieurs géotechniciens : procédures de saisie des données géométriques, insertion des données géotechniques (coupes de sondages, essais de sols), interprétation, dessin automatique, calcul des volumes de matériaux extraits des déblais et nécessaires à l'édification des remblais afin d'optimiser le mouvement des terres, etc.

Le logiciel a été développé sur la base d'AUTOCAD. Il est compatible avec différents logiciels d'étude de projets routiers.

MOTS CLÉS : 21-41/Tracé des routes - Logiciel - Saisie des données - Sondage - Mécanique des sols - Essai - Interprétation - Dessin assisté par ordinateur - Volume - Déblai - Remblai/ANGELINE.

Introduction

ANGELINE est un logiciel mis au point pour aider à l'élaboration des études géotechniques de tracés (travail sur profils) à une échelle au moins égale au 1/5 000.

Ce logiciel fonctionne actuellement au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers (LRPC) où il est utilisé en routine.

On peut considérer qu'il se décompose en deux parties :

- création et gestion d'un fichier de sondages et d'essais. Cette partie s'appuie sur le logiciel NANTUCKET. Elle permet de créer, mettre à jour, gérer et éditer les résultats des sondages mécaniques et des essais de sols exécutés pour une étude donnée ;
- création et gestion d'informations graphiques (en particulier le profil en long géotechnique) en format A₀ au maximum. Ce module d'ANGELINE est une application d'AUTOCAD (version 11) logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) recommandé par le ministère de l'Équipement.

ANGELINE, mis au point par le LRPC d'Angers et la division Informatique du CETE de l'Ouest, est actuellement en cours de diffusion dans le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées. Il a été soumis à l'avis de ceux-ci à plusieurs reprises, ainsi qu'à des maîtres d'œuvre et sa version actuelle est considérée comme opérationnelle.

Principes de fonctionnement d'ANGELINE

Le fonctionnement d'ANGELINE repose sur les principes suivants :

- Le regroupement des coupes et informations obtenues par sondages mécaniques sur le terrain et des résultats des essais de sols effectués sur les prélèvements dans un fichier « sondages », que l'on peut alimenter en plusieurs fois, mettre à jour, éditer et appeler pour travailler sur la partie graphique.

- L'établissement d'un fichier graphique permettant la production d'un profil en long brut (c'est-à-dire non interprété). Ce profil en long brut comprend le profil en long du terrain naturel et de la ligne projet avec création d'un cartouche classique donnant les caractéristiques géométriques du profil. Ces données sont créées par digitalisation ou par transfert d'un fichier existant s'il est compatible.

Le profil en long brut est complété par le dessin automatique des logs de sondages avec affichage des cotes des changements de couches, des teneurs en eau (fig. 1).

Ce profil en long brut et le fichier « sondages » sont les supports principaux de l'interprétation. On constate que l'établissement de ces fichiers n'a pratiquement pas requis d'interprétation et qu'ils peuvent donc être créés par du personnel d'exécution.

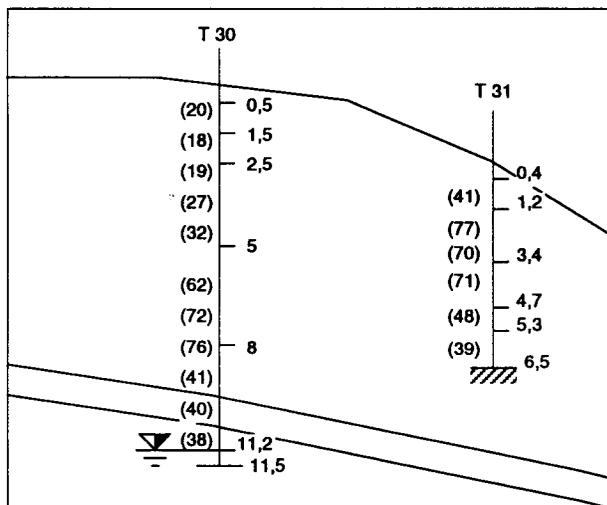
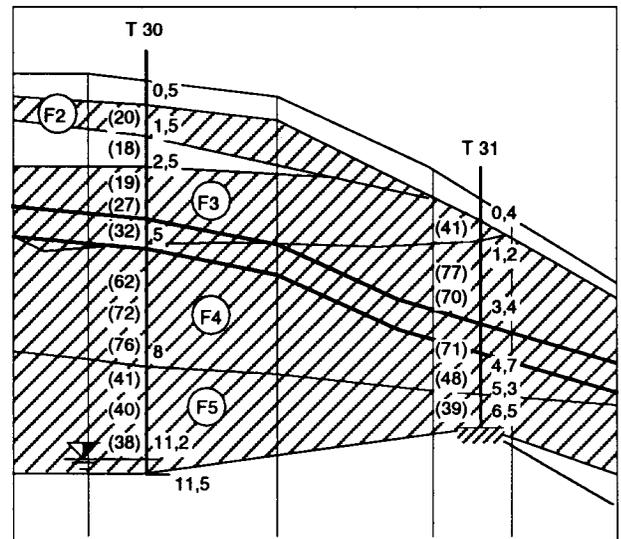


Fig. 1 - Profil en long brut créé sur ANGELINE.

- Le parti pris d'ANGELINE est de laisser l'interprétation aux soins du seul géotechnicien (il n'y a pas de tracé interprétatif automatique) qui, sur la base des fichiers créés ci-dessus, d'éventuelles autres informations actuellement non intégrées dans ANGELINE (par exemple la géophysique) et de ses compétences, va tracer au digitaliseur son interprétation des limites de formations, en utilisant le réticule du digitaliseur.

- Le tracé interprétatif des limites de formations est exécuté par le géotechnicien qui affiche, au préalable, quelle formation il délimite

(le toit de la formation est généralement, mais pas obligatoirement, constitué par le terrain naturel ou par le mur d'une formation déjà entrée dans ANGELINE) et dont il va tracer le mur (fig. 2). On délimite les formations en commençant par les plus superficielles. ANGELINE laisse entièrement libres les critères définis par le géotechnicien pour décider du rattachement d'un volume de sol à une formation. En cas d'erreur, le géotechnicien peut revenir sur son interprétation.



T 30 : sondage tarière
 0,5 : cote de profondeur
 (18) : teneur en eau naturel
 ▼ : cote d'un niveau d'eau
 // : arrêt de sondage sur refus
 (F4) : formation 4
 □ : état moyen ou sec (cf RTR)
 ▨ : état humide (cf RTR)

Fig. 2 - Profil en long géotechnique créé par ANGELINE.

- Lorsque le tracé du mur de la formation *i* traverse un sondage, les résultats des essais, exécutés sur les sols compris dans la tranche du sondage intégrée dans la formation, sont récapitulés graphiquement dans la feuille de synthèse de la formation *i* (fig. 3).

- Une formation ainsi délimitée peut correspondre à plusieurs classes de nature de la classification de la Recommandation pour les Terrassements Routiers (exemple : A2-A3 RTR 1976). Il est possible de la faire correspondre à un seul état de cette même classification.

- Lorsque les formations sont délimitées sur profil en long, il est possible de leur appliquer une trame.

- ANGELINE permet un calcul de volume sommaire des différentes formations rencontrées par déblai et des volumes de remblai (fig. 4).

- En cas de modification du profil en long du projet, celui-ci peut être corrigé sur la table à digitaliser et ANGELINE met à jour les feuilles de synthèse par formation et les calculs de cubature.

Productions et utilisation d'ANGELINE

Productions du logiciel ANGELINE

Les dossiers d'études géotechniques de tracés comprennent classiquement :

a. Un rapport dactylographié, le plus souvent dépourvu de dessin. Ce rapport n'est pas concerné par le logiciel ANGELINE.

b. Un plan de situation à petite échelle qui nécessite un temps de dessin relativement court. Ce plan n'est pas non plus concerné par le logiciel ANGELINE.

c. Un plan d'implantation des sondages, investigations géophysiques, etc.. Ce plan, rapide à exécuter par un dessinateur, ne relève pas de l'application d'ANGELINE. Il peut être produit aisément par AUTOCAD, moyennant un cadrage soigné par rapport au fond de plan.

d. Les éventuels carnets de résultats de géophysique (résistivité, sismique) produits sur supports informatisés par des micro-ordinateurs de saisie et de dépouillement (non rattachés pour l'instant au logiciel ANGELINE).

e. Un profil en long, dit géotechnique, formé pour une part du profil en long du terrain naturel, de la ligne projet (généralement appelée ligne rouge), ainsi que d'informations géographiques (localisations de rétablissements, de cours d'eau, abscisses, numéros de profils) et, enfin, d'informations géotechniques non ou peu interprétées telles que les implantations des sondages avec leurs cotes et valeurs de teneurs en eau, niveaux d'eau, etc.

En outre, le profil en long est le support de l'interpolation entre sondages, des limites de formations ainsi que de la caractérisation de ces formations (caractérisation par la nature géologico-géotechnique et par la classification de nature et d'état suivant la Recommandation pour les Terrassements Routiers). Cette dernière partie constitue l'essentiel de l'interprétation du géotechnicien.

Enfin, les profils en long géotechniques portent généralement un cartouche contenant d'une part des informations localisées concernant des zones précises du dessin (qualité de plateforme, dimensionnement des chaussées) et donc comprises entre des lignes reliant le texte au dessin du profil en long, d'autre part des informations plus générales décrivant les formations rencontrées sur une grande partie ou l'ensemble du profil en long et qui n'ont donc pas besoin d'une localisation précise sur le cartouche.

Ces profils en long géotechniques constituent un gros travail de recopie pour le dessinateur, et l'abondance des informations contenues génère souvent des erreurs difficiles à détecter et pourtant très gênantes puisqu'il s'agit du document de base de l'étude géotechnique. Ces profils en long sont les plus concernés par les fonctions d'ANGELINE.

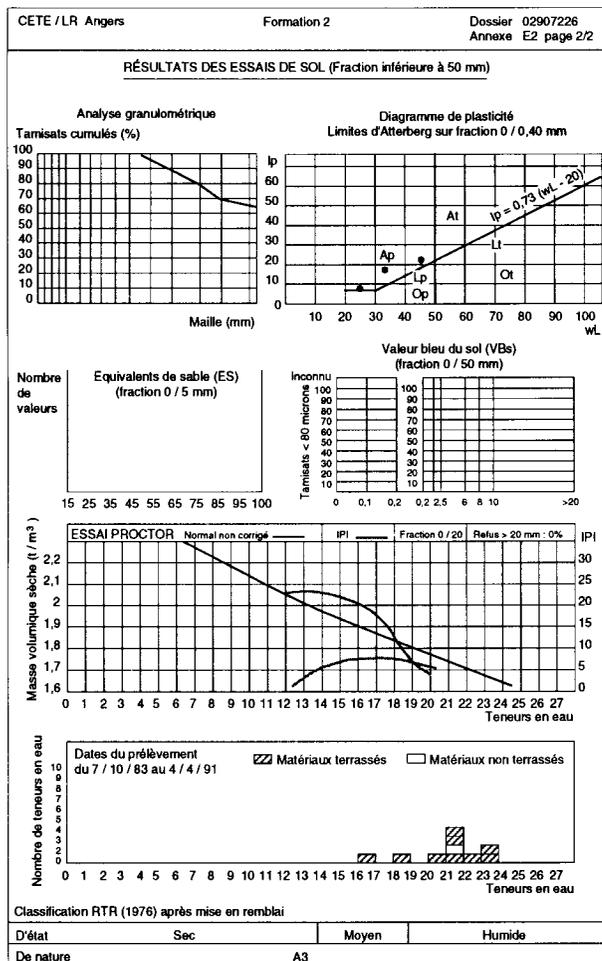


Fig. 3 - Feuille de synthèse par formation (sol meuble) créée par ANGELINE.

N° Dossier : 02907226

Page : 2/4

Rocade Est du Mans entre CD 301 et RN 23 Est
Étude Géotechnique

Unité terrassement	PR	Prof. arase sous ligne rouge 0,8 m		% volume unité terrassement	Formation géotechnique	Volumes estimés en m ³ × 1000		Fourchette estimée de % de réutilisation déblais	
		Largeur platef. (m)	Pente talus D / G			Remb.	Débl.		
D1	0,00-680,00	27,0	2/1	2/1	100	1,3	55,9	4,4	
					8		1		4,4
					13		2		7,3
					12		2H		6,8
					5		3		2,6
					56		3H		31,2
6	5H	3,6							
D2	680,00-1410,00	27,0	2/1	2/1	100	1,3	142,0	10,0	
					7		1		18,7
					13		2H		15,8
					11		3		25,2
					18		3H		53,0
37	4H								
D2 (suite)	680,00-1410,00	27,0	2/1	2/1	2	1,3	2,9	16,3	
					11		5H		
R1	1410,00-2027,00	27,0	2/1	2/1	100	51,2	1,8	0,1	
					26		1		0,5
					6		5		0,1
					67		5H		1,2
R2	2027,00-2700,00	27,0	2/1	2/1	100	57,9	0,1	0,0	
					97		1		0,1
					3		6H		0,0
		27,0	2/1	2/1	100				

Fig. 4 - Estimations sommaires de volumes effectués par ANGELINE sur la base des hypothèses géométriques rappelées ci-contre.

f. Un carnet de sondages où chaque feuille comprend (fig. 5), sous une forme standard, des renseignements généraux (n° du sondage, date) et, en ordonnée, les cotes correspondant aux prélèvements. Ceux-ci sont décrits par le sondeur dans une colonne en texte libre. Dans une autre colonne sont portés les numéros des formations géologico-géotechniques concernées, dans une autre encore, la valeur des teneurs en eau naturelles prélevées, rapportées à la bonne cote, enfin, dans les suivantes, entre deux ordonnées indiquées par le sondeur, les résultats d'essais d'identification (limites d'Atterberg, granulométries). Il doit être possible de ramener tous les types de sondage exécutés (y compris forages avec cuttings et pénétromètres) à ce mode de représentation. Le logiciel ANGELINE prévoit la saisie de ces sondages et des essais correspondants, le plus en amont possible. Cette saisie sert à l'édition des sondages et à compléter le profil en long géotechnique et les feuilles de synthèse. Comprenant une part d'interprétation, ils sont édités définitivement en fin d'élaboration de l'étude et peuvent donc subir des mises à jour durant l'étude.

g. Des feuilles de synthèse évoquées plus haut dont l'objectif est de récapituler, par formation géologico-géotechnique individualisée, les résultats des essais effectués sous forme graphique (fig. 3) ainsi que les conclusions tant au niveau description que dimensionnement pour le projet routier. Les essais saisis pour les feuilles de sondages sont également réutilisés pour ces feuilles de synthèse, de façon automatique.

En résumé, l'application d'ANGELINE porte essentiellement sur les profils en long géotechniques, le carnet de sondages et les feuilles de synthèse.

Utilisation du logiciel ANGELINE

On peut décomposer l'utilisation d'ANGELINE en 4 phases (tableau I).

Phase 1 : Collecte et saisie des informations géotechniques

Cette première phase comprend la constitution préalable d'un fichier de sondages où l'on saisit les méthodes, dates et numéros de forages, les cotes des limites de couches et les descriptions des sols de la coupe établie par le sondeur, les éventuels niveaux d'eau rencontrés, les difficultés de forage, puis les résultats des mesures de teneurs en eau et des essais d'identification de sols.

Durant cette phase est aussi établi le profil en long brut. Ce profil en long est obtenu par recopie de la disquette du projeteur si elle est compatible (par exemple sous micropiste version 3.0 ou 3.1) ou par digitalisation des lignes « terrain naturel » et « projet » (ligne rouge) du profil en long projet. L'appel du numéro de sondage correspondant dans le fichier, avec positionnement du digitaliseur au bon endroit sur le profil en long, permet le dessin automatique du log de sondage (avec cotes et teneurs en eau) sur le profil en long brut.

CENTRE D'ETUDES TECHNIQUES DE L'EQUIPEMENT
LABORATOIRE REGIONAL D'ANGERS

Projet ou chantier : Rocade Est du NANS entre RD 301 et RN 23 Est.
Etude Géotechnique.

Référence : 02907226

SONDAGE N°: T30

Feuille n° 1

Date : 20/02/91

Sondeuse : Sédidrill 550

Outil : Tarière

Diamètre : 200 mm

Coordonnées X:

Y:

Z: 46.59

Description géologique	Prof. en m.	Formation	Nn	N1	Ip	Ic	Es	VBS	PASSANTS				R T R	
									80µ	2mm	20mm	D		
Niveau d'eau observé : -11.20 m/T.N. après 312.00 heures	-0.00													
Terre végétale marron foncé jusqu'à 0,20 m. Limon beige argileux jusqu'à 0,50 m.	-0.50													
Argile marron orangé consistante avec quelques éléments roulés de 2 à 20 mm.	-1.00		20											
Argile rougeâtre consistante.	-1.50													
	-2.00		18											
	-2.50													
Argile marron orangée consistante avec de nombreux graviers gréseux de 5 à 20 mm.	-3.00					1.2								
	-4.00			86	54			3.60		87.0				A4
	-4.80					1.1								
	-5.00			32		1.0								
Limon beige finement sableux plastique humide. Ralentissement important à 8,00 m.														

Fig. 5 - Coupe d'un sondage mécanique édité par ANGELINE.

TABLEAU I
Schéma d'utilisation du logiciel ANGELINE par phases

	<p>Choix des sondages au cas</p> <p>Essais de sondages</p> <p>Essais de compactage</p> <p>Essais de détermination de sols</p>			
Phase 2	<p>Choix et exécution des essais de compactage</p>	<p>Interprétation des formations (natures et limites)</p>	<p>Fichier des sondages</p> <p>Profil en long</p> <p>Feuilles de synthèse</p>	<p>Profil en long géotechnique</p> <p>Feuilles de synthèse</p>
Phase 3		<p>Tramage des formations du PL (éventuel)</p> <p>Estimation des cubatures</p>	<p>Profil en long</p> <p>Tableau des cubatures</p>	<p>Profil en long géotechnique tramé</p> <p>Tableau des cubatures</p>
Phase 4	<p>Modification de la ligne rouge</p>	<p>Saisie de la nouvelle ligne rouge</p>	<p>Profil en long</p> <p>Feuilles de synthèse</p> <p>Tableau des cubatures</p>	<p>Profil en long géotechnique modifié</p> <p>Feuilles de synthèse modifiées</p> <p>Tableau des cubatures modifiées</p>
PL : profil en long				

Cette première phase s'achève avec la fin des essais de sols pour identification. Elle ne requiert pas d'intervention particulière d'un géotechnicien sur ANGELINE. À l'issue de cette phase, on peut éditer le fichier de sondages et un profil en long brut de travail pour présentation et éventuellement pour commencer l'interprétation en minute.

Il se trouve que la fin de cette phase est fréquemment mise à profit pour un premier échange entre le géotechnicien et le projeteur et cet entretien peut donc se faire sur la base de documents de qualité.

Phase 2 : Interprétation géotechnique

Elle ne peut débuter que lorsque tous les essais de sols sont achevés (y compris les essais de compactage PROCTOR) et que l'étude géophysique éventuelle est entièrement dépouillée (travail indépendant des tâches envisagées ici).

Cette deuxième phase est réalisée par un géotechnicien qui va assurer l'interprétation de l'étude. Il s'agit d'un travail très interactif qui s'apparente plus à de la conception qu'à du dessin. Cette phase consiste à établir sur le

profil en long l'interprétation de type géologique entre les sondages (définition sur les sondages des bonnes limites de formation et tracé entre les sondages de l'extension la plus probable de ces limites), en faisant simultanément une synthèse des résultats d'essais et des coupes de sondages pour s'assurer de ce que la population regroupée dans une même formation a une homogénéité acceptable (remplissage simultané des feuilles de synthèse).

La deuxième phase est exécutée par le géotechnicien avec possibilité de retours en arrière et mises à jour directement sur la table à digitaliser, tout en vérifiant à l'écran les interprétations graphiques, ainsi que le remplissage correct des feuilles de synthèse.

Lorsque le géotechnicien trace une limite de formation, celle-là recoupe les sondages à une cote qu'il choisit.

ANGELINE entre alors les résultats des essais effectués sur la tranche de sondage intégrée dans la formation, dans la feuille de synthèse correspondant à cette formation. Ces nouveaux essais sont reportés graphiquement en points brillants par rapport aux autres, afin de pouvoir juger de l'opportunité du regroupement effectué et éventuellement conduire à modifier cette interprétation.

Les formations sont désignées par un numéro qui indique leur nature (par exemple n° 2 pour l'argile de décalcification peu plastique classée en A2-A3 dans la classification RTR). Ce numéro peut être complété par deux lettres, au maximum, pour indiquer l'état de la formation, comme *th* pour très humide. Le nombre d'états possibles pour une formation n'exède pas 6. Ainsi pour la formation n° 2, on obtient :

2, *th* (état très humide)

2, *h* (état humide)

2, *m* (état moyen)

2, *s* (état sec)

2, *ts* (état très sec).

Les numéros et noms de formation introduits dans le fichier de sondages ne comportent que la nature (pas l'état). Par contre, les formations distinguées sur le profil en long géotechnique peuvent tenir compte de l'état. On peut donc tracer les limites de la formation n° 2, en faisant apparaître les différents états dans lesquels elle peut se trouver (cf. ci-dessus). Ainsi la formation est-elle identifiée à deux niveaux : son numéro pour la nature et une ou deux lettres rajoutées pour préciser l'état.

Cette deuxième phase peut aussi être exécutée en minute sur le profil en long brut par le géotechnicien. Dans ce cas, celui-ci ne dispose plus de l'aide apportée par l'usage des feuilles de synthèse en cours d'élaboration ; d'autre part, ce profil en long minute sera ensuite digitalisé sous ANGELINE sans doute par une autre personne, avec des risques d'erreur de transcription importants et bien connus.

Phase 3 : Finitions du profil en long - Calcul de cubature

Cette phase ne comprend plus de conception. Si l'on veut afficher une trame par formation sur le dessin du profil en long, il suffira de la choisir pour la faire dessiner.

Par ailleurs, ANGELINE peut calculer une cubature approximative des formations par déblai (au-dessous d'une ligne de terrassement à définir par rapport à la ligne rouge), ainsi qu'une cubature des besoins en matériaux par remblai (fig. 4). Ceci permet au projeteur de disposer rapidement d'éléments permettant d'établir des esquisses de mouvements de terre pour prévoir la meilleure valorisation possible des matériaux de déblai et d'optimiser la position de la ligne rouge. Ces calculs se font sur la base d'hypothèses simples (pentes de talus, largeur de plate-forme) non compatibles avec des dénivelées transversales importantes du terrain naturel ou des limites de formations.

Phase 4 : Mise à jour de la ligne rouge

Elle permet une reprise automatique du profil en long géotechnique et des feuilles de synthèse lorsque l'on modifie la ligne rouge, en particulier à la suite d'évaluations de volumes telles qu'elles sont prévues en phase 3.

Ressources informatiques

Le logiciel ANGELINE fonctionne sur micro-ordinateur en MS.DOS (PC 386 ou mieux 486). Il utilise le logiciel AUTOCAD. À l'écran du micro-ordinateur, il faut ajouter un autre écran haute définition, ainsi qu'une table à digitaliser et un traceur en format A₀, et une imprimante laser.

Conclusion

Le logiciel ANGELINE amène des améliorations importantes conduisant à :

— supprimer au maximum le travail de dessin de simple recopie en le remplaçant par un travail de digitalisation et permettre le travail direct du projeteur sur ordinateur en évitant l'établissement de minutes manuscrites. Ceci permet de réduire au minimum le temps de dessinateur nécessaire, ainsi que les habituelles erreurs de transcription ;

— ne saisir qu'une fois les informations, en particulier pour les sondages et les résultats d'essais (fichier sondages) qui sont ensuite réutilisées automatiquement pour les diverses pièces produites ;

— améliorer la qualité des études par une meilleure présentation et surtout en permettant une évaluation sommaire dans l'étude géotechnique de volumes de remblai nécessaires ainsi que des volumes de déblai disponibles par type de matériaux (nature et état) et par déblai. Ces estimations même sommaires (elles ne tiennent pas compte des rétablissements en

particulier) permettent dès ce stade, d'établir une première esquisse de mouvement de terre et ainsi conseiller le projeteur sur d'éventuelles modifications de ligne rouge pour améliorer l'équilibre des terres et optimiser le projet ;
— modifier facilement les pièces graphiques de l'étude géotechnique lorsque des changements interviennent au projet ou lorsque de nouvelles informations peuvent être intégrées (par exemple nouvelle campagne de sondages) ;
— disposer d'une étude sur support informatique et donc facilement transférable sur le support du projeteur, et intégrable à un logiciel de suivi de chantier.

L'utilisation de ce logiciel par le LRPC d'Angers depuis plus d'un an a permis d'apprécier, en particulier, des gains de productivité, la souplesse évoquée ci-dessus pour faire évoluer l'étude (modifications d'échelle, du projet) et une meilleure qualité des documents graphiques.

ANGELINE doit encore évoluer pour intégrer d'autres types de sondages et essais que ceux prévus pour l'instant, ce qui facilitera son emploi dans les différents contextes géologiques rencontrés en France.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LCPC-SETRA (1976), *Recommandation pour les terrassements routiers*,
1 *Établissement des projets et conduite des travaux de terrassements*, 36 p.
2 *Utilisation des sols en remblai et en couche de forme*, 42 p.
3 *Compactage des remblais et des couches de forme*, 20 p., janv.
AUTODESK (1990), *Manuel d'utilisation du logiciel AUTOCAD*, version 11, déc.

HAVARD H., SINOIR G. (1992), *ANGELINE, logiciel d'aide à l'élaboration des études géotechniques de tracés*, Colloque International « Géotechnique et informatique », Paris, sept.

Ministère de l'Équipement (1992), *Manuel de formation au logiciel AUTOCAD*, Modules 1 et 2.

LCPC-SETRA (1992), *Réalisation des remblais et des couches de forme*, Guide technique, 2 fascicules, sept.
