

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 114 (1988)
Heft: 12

Artikel: Déformations autour des excavations en terrain compressible
Autor: Dysli, Michel / Fontana, Adalbert
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-76813>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Déformations autour des excavations en terrain compressible

Cet article est le fruit de dix ans de collaboration entre un bureau de géotechnique privé et les Laboratoires de mécanique des sols et des roches de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, dans le domaine de l'évaluation des déformations autour des excavations en terrain compressible. Ces études ont déjà fait l'objet de plusieurs communications lors de congrès internationaux ou de publications dans des revues scientifiques [1] [2] [3] [4] [5]¹. Les auteurs se sont cependant rendu compte que leurs résultats n'avaient jamais encore fait l'objet d'une publication en français dans une revue suisse. Le texte qui suit va réparer cette omission et tenter de faire la synthèse des publications déjà parues ; en outre, il présentera les résultats de l'évaluation des dernières mesures réalisées.

Cet article est aussi une suite à celui présenté il y a quelque temps dans cette même revue par un des auteurs, article qui traitait de l'évolution des poussées sur le soutènement de deux grandes fouilles à Genève [6].

1. Introduction

Le coût des terrains toujours plus élevé et les moyens techniques aujourd'hui à disposition font que les bâtiments se construisent toujours plus profondément dans les sols. En présence de sols compressibles, le problème de l'évaluation des déformations autour des excavations - généralement confinées par des parois moulées étayées - que

PAR MICHEL DYSLI, LAUSANNE,
ET ADALBERT FONTANA,
CAROUGE-GENÈVE

sont les tassements, la déformation des parois de l'enceinte ou le gonflement du fond de fouille, devient ainsi toujours plus aigu. En effet, ces déformations sont souvent la cause de désordres dans les constructions avoisinantes, surtout si ces dernières sont de construction ancienne. Récemment encore, dans notre région lémanique, de tels désordres ont fait la une de la presse locale.

La figure 1 est un exemple typique de la cuvette des tassements autour d'une grande excavation dans des sols com-

Résumé

Dans les régions urbaines, les bâtiments se construisant de plus en plus en profondeur, les déformations liées aux excavations profondes dans les sols compressibles conduisent à des désordres dans les constructions avoisinantes. Comme les causes de ces déformations ne peuvent être démontrées par la mécanique des sols classique, les auteurs ont réalisé, sur deux grandes excavations, une étude de longue haleine portant sur l'analyse des phénomènes provoquant les déformations et sur la définition de nouvelles méthodes de calcul permettant de les évaluer correctement.

pressibles, tassements dus uniquement à l'excavation, c'est-à-dire *sans abaissement de la nappe* par pompage. L'évaluation de ces tassements par les méthodes classiques de la mécanique des sols - modèle élastique et modules de déformation tirés d'essais œdémétriques, donc variant en général avec la profondeur - aboutit, dans les sols compressibles, à une prévision des tassements totalement erronée (fig. 5 : déformations par loi élastique). L'un des premiers auteurs qui ait analysé, de

Synopsis

In downtown areas, buildings go deeper and deeper into the ground and the deformations linked to deep excavations in soft soils damage neighbouring buildings. As the determination of these deformations by means of the classical soil mechanics is not possible, the authors conducted a longterm study, on two large excavations, to analyze the phenomena which caused the deformations and to define new computing methods for the correct evaluation of these deformations.

façon empirique, ce comportement plastique des sols autour des excavations en terrain compressible est R. B. Peck en 1969 [7].

La méthode des éléments finis, avec usage de lois constitutives (lois des matériaux, relations contraintes/déformations) non linéaires permet déjà une évaluation beaucoup plus précise de ces déformations et on peut aujourd'hui aller encore plus loin en couplant le modèle d'équilibre des déplacements (usage classique de la méthode des éléments finis en contraintes/déformations) avec un modèle résolvant l'équation des écoulements souterrains ; le sol est en effet un matériau à deux, voire trois phases : une phase solide, une phase liquide et, souvent, une phase gazeuse lorsque le sol est non saturé ; les interactions entre ces phases peuvent, comme nous le montrerons plus loin, être déterminantes pour l'évaluation correcte des déformations autour des excavations en sol compressible.

La première étude a été entreprise à posteriori sur l'excavation réalisée en 1975 pour la construction du Grand Casino à Genève. La seconde a, elle, été menée à priori lors du projet des sous-sols de l'immeuble de Confédération Centre, toujours à Genève.

2. Description des deux excavations

Les deux excavations du Grand Casino et de Confédération Centre ont été réalisées dans une formation géologique identique, caractérisée par des sols argileux saturés de grande compressibilité que le glacier würmien a déposés lors de ses phases de retrait.

La fouille du *Grand Casino*, située à faible distance du lac, traverse des remblais historiques, puis des dépôts lacustres récents : craies et limon sablo-argileux qui surmontent la puissante formation limono-argileuse du retrait würmien. Jusqu'à 40 m de profondeur, ces terrains mous à tendres, très compressibles et très peu perméables sont

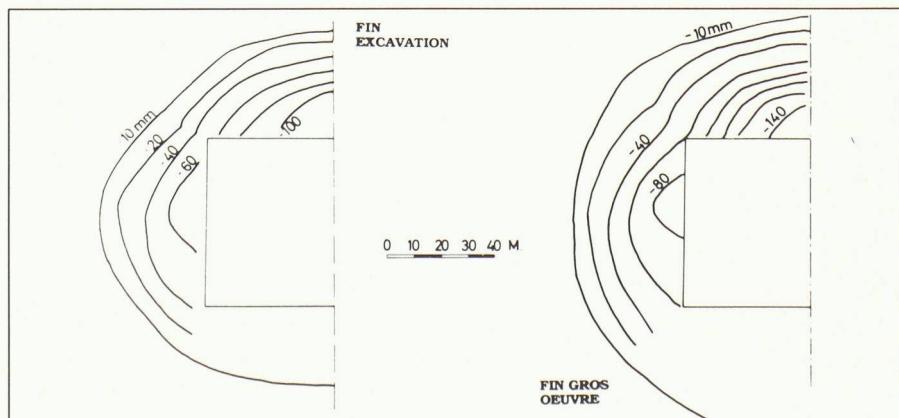


Fig. 1. – Grand Casino : cuvette des tassements autour d'une grande excavation dans des terrains compressibles.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

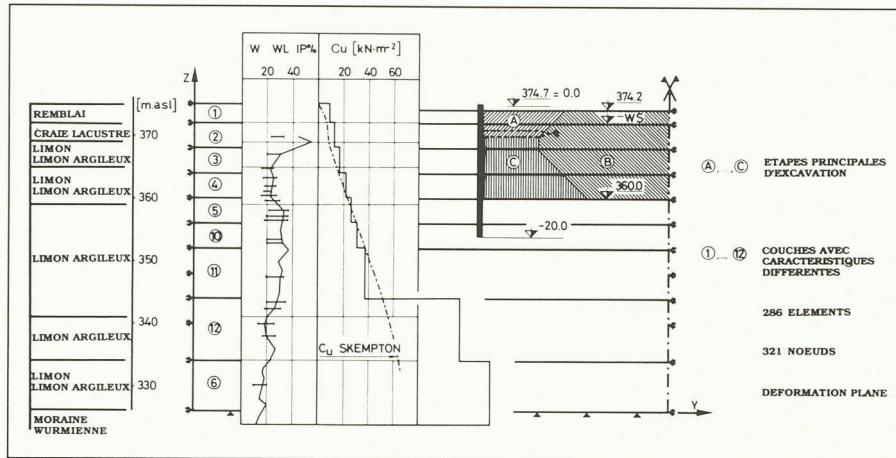


Fig. 2. – Grand Casino: caractéristiques des sols et modèle de l'excavation.

parmi les plus mauvais de la cuvette genevoise. La nappe phréatique, régie à la fois par le niveau du lac et par le radier des collecteurs en bordure de ce dernier, accuse de faibles variations (± 10 cm). Son niveau moyen se situe vers 2,5 m de profondeur. La figure 2 donne un aperçu de ces caractéristiques des sols.

L'excavation a atteint la profondeur de 13,8 m sur une surface rectangulaire d'environ 90 m par 60 m et le volume excavé a été de 77 000 m³. Après exécution d'une enceinte en paroi moulée de quelque 20 m de profondeur, un pré-terrassement a permis le bétonnage sur terre d'une couronne rectangulaire solidaire des parois moulées et étayée en son centre par un seul bouton horizontal. Les travaux de terrassement, puis le bétonnage au centre de la fouille du sous-radier et du radier ont ensuite eu lieu; les principales phases d'excavation sont sommairement décrites sur la figure 2. On trouvera plus de détails sur la méthode d'exécution de cette fouille dans [1] et [8].

Le complexe de *Confédération Centre* est implanté entre la colline de la Vieille Ville et une des grandes artères marchandes de Genève (fig. 3). Les

terrains traversés par l'excavation ont, sous une couche de sables compacts, la même origine géologique et des caractéristiques géotechniques du même type que celles du Grand Casino tout en étant meilleures. La nappe est située vers 2 m de profondeur à l'aval du projet. La figure 4 donne une image de la stratigraphie et des principales caractéristiques de ces sols.

La présence de nombreux immeubles mitoyens et l'asymétrie des poussées, provoquée par la pente de la colline, ainsi que le désir du maître de l'ouvrage d'éviter tout conflit avec les propriétaires des fonds entourant l'excavation ont imposé des séquences d'exécution particulières, et notamment le découpage de l'excavation en neuf fouilles indépendantes, chacune entourée d'une paroi moulée détruite en partie par la suite. Les excavations inférieures ont été exécutées en premier, suivies par les trois fouilles supérieures. Cette méthode, par son effet tridimensionnel, augmente considérablement la stabilité d'ensemble; en outre, elle limite les volumes excavés en même temps, facteur qui, combiné avec la rigidité induite par chaque coin des parois, diminue notablement les

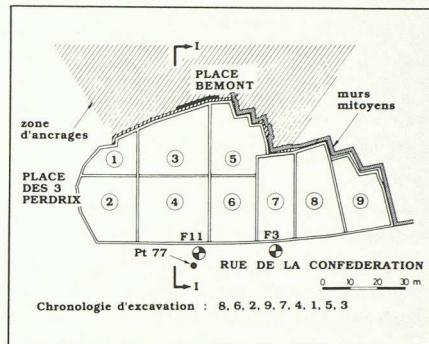


Fig. 3. – Confédération Centre: situation. I-I = profil de calcul.

déformations autour de l'excavation. Toutes ces fouilles indépendantes ont été excavées par tranches de quelque 3 m d'épaisseur et étayées, de manière classique au niveau de chacune de ces tranches, par des profilés métalliques. Cet étayage a été renforcé par un ancrage de la paroi moulée amont. Le volume total de l'excavation est de 90 000 m³ et la figure 3 donne une image des différentes phases en plan de cette excavation. On trouvera plus de détails sur la méthode d'exécution de cette fouille dans [6] [8] et [9].

3. Mesures pendant et après les excavations

Les déformations autour et dans les deux excavations ont fait l'objet de très nombreuses mesures qui se sont poursuivies, pour certaines d'entre elles, bien au-delà de la mise en service des ouvrages. C'est, en grande partie, ce qui fait l'intérêt des études menées sur les méthodes d'évaluation des déformations autour des excavations, car le résultat des calculs a toujours pu être comparé de façon précise avec la réalité. En outre, ces mesures ont contribué à mettre en évidence un phénomène, peu connu jusqu'alors, qui participe pour une grande part au développement des tassements autour de l'excavation.

Ces mesures ont été de cinq types différents :

- des nivelllements sur une grande zone autour des fouilles;
- la mesure des déformations horizontales des parois moulées par des clinomètres mobiles;
- la mesure des déformations horizontales et verticales en tête des parois moulées par triangulation et nivellation, de façon à pouvoir déterminer leurs déformations absolues;
- la mesure de la variation des pressions interstitielles derrière les parois, dans les fouilles et sous les parois moulées;
- la mesure des efforts dans certains éléments de l'étayage.

Toutes ces mesures étaient réalisées très fréquemment, ce qui a permis

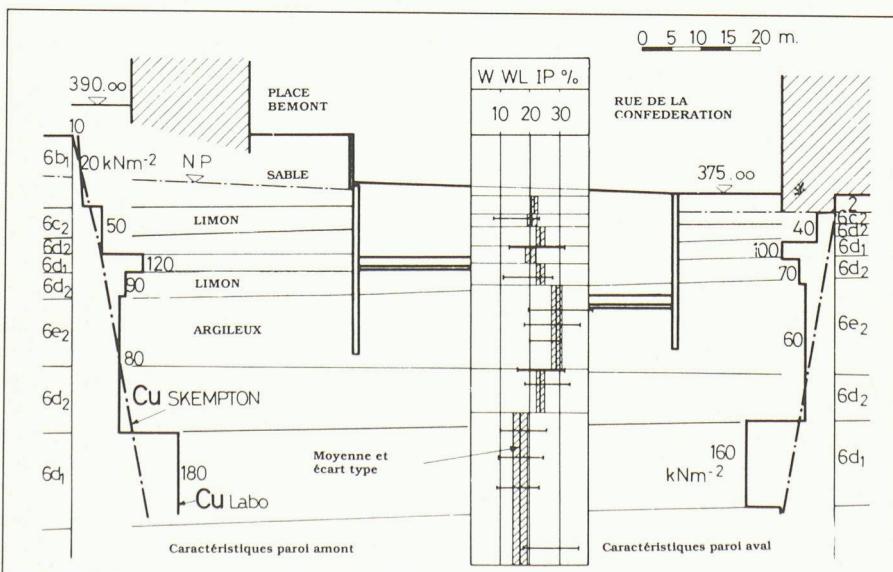


Fig. 4. – Confédération Centre: coupe et caractéristiques des sols.

d'avoir une histoire très fidèle de tous les phénomènes qui se sont produits pendant les excavations. Elles ont été aussi une aide très précieuse pour la conduite de l'excavation et du bétonnage du radier.

4. Analyse 2D non couplée par éléments finis

4.1 Modèle mathématique

Le programme de calcul utilisé [10] est un programme général fondé sur la méthode des éléments finis s'appliquant à une géométrie à deux ou trois dimensions, au calcul statique et dynamique, permettant d'utiliser des lois constitutives non linéaires et de tenir compte de non-linéarités géométriques. Il n'est pas prévu spécifiquement pour la mécanique des sols, mais a été choisi surtout pour ses très bonnes performances et sa grande rigueur lors de la résolution de problèmes non linéaires.

Ce programme permet de tenir compte fidèlement de toutes les étapes de construction c'est-à-dire, dans le cas d'excavations, de toutes les phases du terrassement, de l'étayage et de l'ancreage des parois contre le sol. La figure 2 donne quelques indications générales sur la discréétisation en éléments finis de la fouille du Grand Casino et la figure 7 sur celle des fouilles de Confédération Centre.

Le problème étant non linéaire (principe de la superposition non valable), l'état de contrainte initial dans les sols est produit par une application progressive de la gravité par environ 10 pas de calcul. 32 pas de calcul ont été nécessaires pour la simulation de l'exécution de la fouille du Grand Casino et 48 dans les cas des fouilles 4 et 3 de Confédération Centre. Dans ce dernier cas, entrepris à priori, une modification du projet en cours d'exécution ne nous a pas permis d'exploiter complètement les pas de calcul correspondant à l'excavation de la fouille amont (N° 3). Après chaque pas de calcul, une nouvelle matrice de rigidité est redéfinie, mais aucun pas de rééquilibrage n'est réalisé. Cette procédure nous a été dictée par l'expérience plutôt que par des considérations théoriques : pour les cas traités, le rééquilibrage est très coûteux en temps de calcul sur l'ordinateur et il n'apporte pas un gain de précision appréciable. Il ne faudrait cependant pas généraliser cette simplification à tous les problèmes de la géotechnique. Enfin, tous les calculs ont été entrepris en déformation plane.

4.2 Lois constitutives utilisées

Dans l'étude à posteriori du Grand Casino, trois lois constitutives très simples ont été utilisées avec, comme paramètres, les caractéristiques des

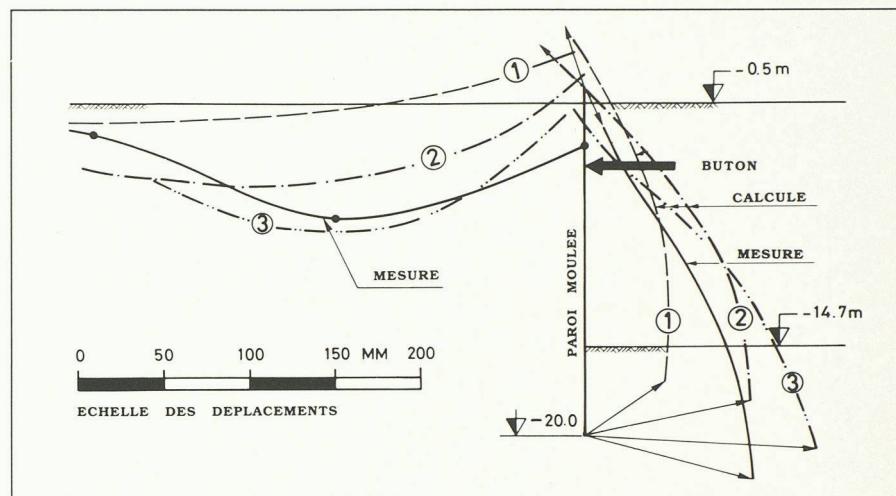


Fig. 5. – Grand Casino : déformations calculées et mesurées.

- ① Analyse élastique linéaire non couplée.
- ② Analyse non linéaire et non couplée avec critère de von Misès et écrouissage.
- ③ Analyse couplée non linéaire avec critère de von Misès et écrouissage.

sols tirées directement des essais en laboratoire ; aucun de ces paramètres n'a été ajusté en fonction des premiers résultats des calculs.

On a tout d'abord utilisé une loi *élastique linéaire* pour démontrer l'absurdité des tassements résultant autour de l'excavation. Dans cette analyse élastique, les modules de Young de chaque couche du sol ont été déterminés par l'indice de gonflement C_S et le module de Poisson a été fixé à 0,35 pour toutes les couches (conditions drainées).

Ensuite, plusieurs analyses ont été entreprises avec une loi *élastique parfaitement plastique* et la loi d'écoulement (critère de rupture) de Drucker-Prager (critère très proche de celui de Mohr-Coulomb mais plus maniable dans un modèle mathématique général), cela surtout pour comparer l'approche par éléments finis avec celle, beaucoup plus simple, de la méthode des tranches.

Enfin, nous avons utilisé une loi *élastoplastique* avec la loi d'écoulement de von Misès et *écrouissage isotropique* en suivant la procédure SHANSEP [12] et en utilisant les résistances au cisaillement c_u données sur la figure 2 pour le

Grand Casino et la figure 4 pour Confédération Centre ; malgré leur dénomination, ces résistances au cisaillement correspondent plutôt à des résistances drainées. Cependant, elles restent constantes pendant tous les pas de calcul et ne tiennent ainsi pas compte des variations des contraintes effectives dues à l'excavation et de celles de la pression interstitielle.

Les modules de Young correspondant à l'état élastique ont été déterminés par les indices de gonflement C_S et ceux correspondant à l'écrouissage au moyen de l'indice de compression C_C , tirés tous les deux d'essais oedométriques standards.

L'analyse à priori de l'excavation de Confédération Centre n'a été réalisée qu'avec cette dernière loi constitutive.

4.3 Résultats

La figure 5 est une synthèse très résumée des résultats obtenus, au Grand Casino, lors des analyses avec la loi élasto-plastique, la loi élasto-plastique associée au critère de von Misès et de l'analyse couplée dont nous parlerons plus loin. Plus de détails sur les résultats des calculs non couplés peuvent être trouvés dans [1], notamment une discussion sur les pressions des terres agissant sur la paroi moulée. Cette figure montre que l'analyse élastique est à proscrire absolument pour l'estimation des déformations autour et dans la fouille ; quant à l'analyse non linéaire avec le critère de von Misès et écrouissage, elle procure des résultats beaucoup plus proches de la réalité mais encore perfectibles.

Toujours pour le Grand Casino, la figure 6 est une synthèse des résultats obtenus avec l'analyse élastique parfaitement plastique et le critère de rupture de Drucker-Prager. Elle tend à montrer qu'une analyse de stabilité d'une pente peut très bien être entreprise par la méthode des éléments finis

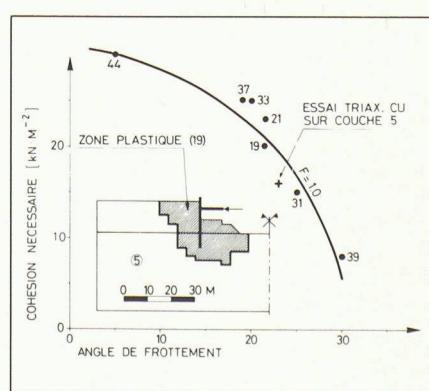


Fig. 6. – Grand Casino : cohésion et angle de frottement donnant une sécurité nulle avec la loi de Drucker-Prager.

44, 37, 33... = numéros des calculs.

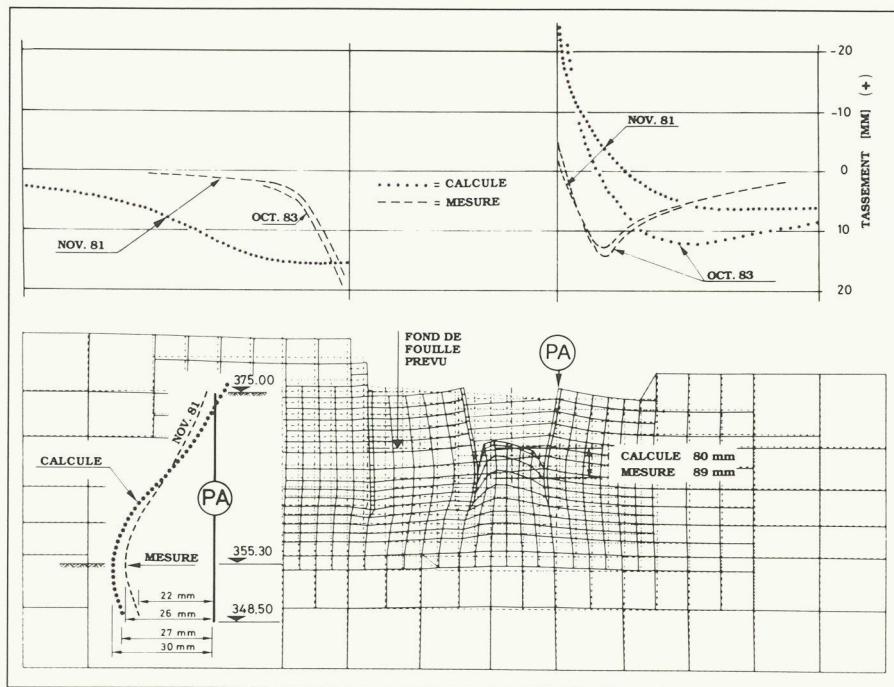


Fig. 7. – Confédération Centre: déformations calculées et mesurées.

avec une loi d'écoulement parfaitement plastique, à condition que les procédures non linéaires du programme utilisé soient assez élaborées; la zone plastifiée correspond bien à celle délimitée par le cercle classique de glissement et le résultat d'un essai triaxial se trouve presque sur la courbe de sécurité nulle. L'usage de la méthode des éléments finis pour ce cas est cependant académique, car il exige un effort en calcul considérable si on le compare à la méthode classique des tranches. Dans les cas où les déformations durant le processus de rupture sont importantes à connaître, cette méthode est cependant judicieuse. Enfin la figure 7 est un résumé des résultats obtenus lors de l'analyse à priori d'une des fouilles aval de Confédération Centre; le résultat de l'excavation de la fouille amont n'est présenté que par les déformations aval car le projet de cette fouille a été modifié en cours de travaux et son exécution ne correspondait absolument plus à celle analysée. Les déformations à l'intérieur de la fouille correspondent très bien à celles évaluées. Par contre, à l'extérieur, il y a une forte divergence entre les déformations calculées et celles mesurées. Cette divergence peut s'expliquer par le comportement tridimensionnel de cette excavation qui n'a pas été pris en compte dans l'analyse à deux dimensions (fouille infiniment longue dans le plan perpendiculaire à la figure 7).

On peut caractériser l'importance de l'effet tridimensionnel d'une excavation par la profondeur relative: $2h/(b+l)$, h étant la profondeur de la fouille, b sa largeur et l sa longueur; plus ce rapport est élevé et plus la

fouille se comporte de manière tridimensionnelle. Ce rapport était de 0,2 au Grand Casino et de 0,8 en moyenne à Confédération Centre. En outre, la division de cette dernière excavation en neuf fouilles, chacune entourée par des parois moulées, a encore renforcé cet effet.

L'analyse de l'excavation de Confédération Centre a démontré un phénomène de déformation qui concerne la plupart des excavations étayées par parois et butonnage (ou ancrage). A chaque étape de l'excavation, sous un rang d'ancrages ou un niveau de butonnage, la paroi se déplace vers l'intérieur de la fouille et la pose des étayages sur le fond de fouille de l'étape ne diminue en rien ce déplacement, même si l'ancrage, ou le buton, est précontraint. Ces déplacements liés à chaque étape se cumulent donc et produisent en fin d'excavation un iné-

luctable déplacement horizontal total des parois, qui a atteint 26 mm dans la fouille analysée de Confédération Centre où les moyens mis en œuvre pour diminuer ces déplacements ont été exceptionnels.

4.4 Coût des analyses

Le coût moyen d'une analyse non linéaire (loi des matériaux) à deux dimensions par la méthode des éléments finis est équivalent au prix de revient de 0,5 mois d'un ingénieur confirmé; ce coût moyen comprend la préparation des données, l'ordinateur et l'exploitation, essentiellement graphique, des résultats. Ce coût moyen suppose cependant qu'une dizaine d'analyses soient réalisées pour une même excavation.

5. Effet de la pression interstitielle

Toutes les analyses présentées ci-dessus ne tiennent pas compte des variations de la pression interstitielle en cours d'excavation, à l'exception de celle de la fouille de Confédération Centre qui en tient compte d'une façon très approximative. Comme le montre la figure 8 surtout, ces variations peuvent être très importantes derrière les parois de l'enceinte et ce phénomène a été, en quelque sorte, une découverte. Derrière ces parois, le mouvement plastique du sol vers le fond de fouille est associé à une forte augmentation des contraintes de cisaillement, qui provoque une diminution des pressions interstitielles. Un puits s'y crée (fig. 10); il est transitoire, mais l'imperméabilité des sols fait qu'il agit encore aujourd'hui au Grand Casino, douze ans après l'exécution de la fouille (fig. 8). Les poussées d'écoulement engendrées par ce puits (ou, pour raisonner autrement, la diminution de la poussée d'Archimède derrière les parois) sont l'une des causes principales des tassements mesurés autour des excavations en terrain compressible.

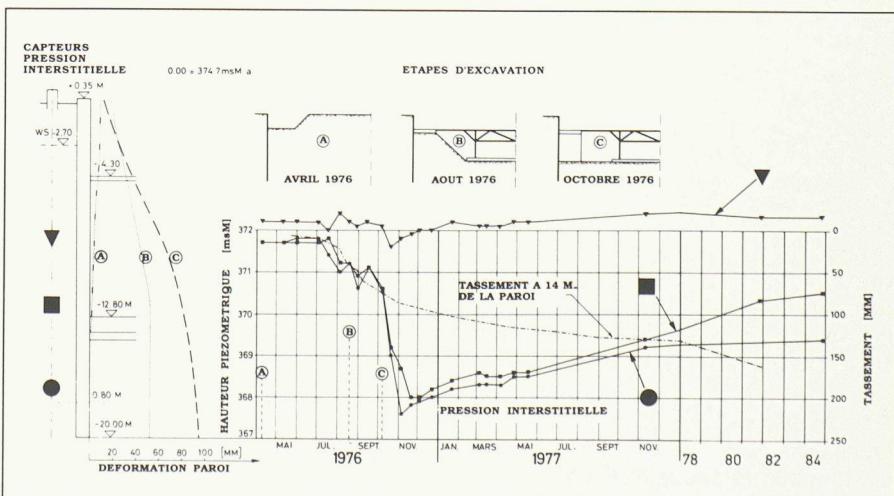


Fig. 8. – Grand Casino: variation des pressions interstitielles derrière la paroi.

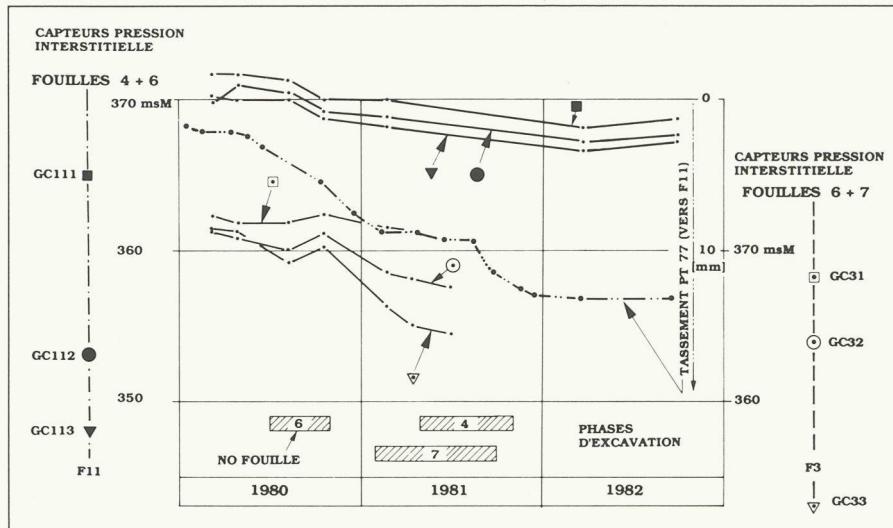


Fig. 9. – Confédération Centre : variation des pressions interstitielles derrière les parois aval des fouilles 4, 6 et 7.

Les variations de la pression interstitielle derrière les parois de Confédération Centre (fig. 9) ont été beaucoup plus faibles que celles du Grand Casino ; leur répartition et leur mode de variation sont cependant approximativement les mêmes. Cette faiblesse relative s'explique par des déplacements horizontaux des parois moulées beaucoup plus faibles. Sur la figure 9 on remarquera aussi que, avant le début de l'excavation, les niveaux piézométriques diminuent avec la profondeur ; c'est la manifestation caractéristique d'une nappe en écoulement du sommet de la colline de la Vieille Ville vers le Rhône.

L'interaction sol/eau a aussi une grande importance sur les déformations du fond de la fouille. Contre les parois, il s'y crée une source transitoire très locale (fig. 10) et plus à l'intérieur de la fouille un puits, provoqué par l'effet des masses excavées et des efforts de cisaillement importants caractérisant cet endroit. Lors de l'excavation de deux des fouilles de Confédération Centre, on a mesuré les variations de la pression interstitielle en fond de fouille et la synthèse de ces mesures fait l'objet de la figure 11. La chute de la pression interstitielle supposée sur la figure 10 (supposition faite sur la base du calcul non couplé par éléments finis et de l'équation de la pression interstitielle de Skempton [14]) est parfaitement démontrée par ces mesures. Ce puits transitoire agit favorablement sur la stabilité du fond de fouille, mais sa durée d'existence est limitée (environ trois mois dans les sols où ont été exécutées les deux excavations qui font l'objet de cet article).

La négligence des variations de la pression interstitielle dans l'analyse des déformations et des efforts lors d'une excavation a un autre effet non moins important. L'excavation est réalisée par étapes ou progressivement. Si les

modules de déformation sont tirés d'essais oedométriques, ils correspondent à la fin de la consolidation primaire, soit à la fin de la dissipation des pressions interstitielles en excès ou en défaut. Cependant, comme l'entrepreneur n'est pas censé attendre la fin de la consolidation primaire après chaque étape d'excavation, l'usage de modules oedométriques peut être la cause d'une erreur importante dans un calcul des déformations qui ne tient pas compte des variations des pressions interstitielles.

Enfin, ces variations expliquent, pour une fouille étayée en plusieurs niveaux, le décalage dans le temps des efforts mesurés sur l'étayage [6].

6. Analyse 2D couplée

6.1 Modèle mathématique

Comme l'ont clairement démontré les mesures réalisées lors des excavations

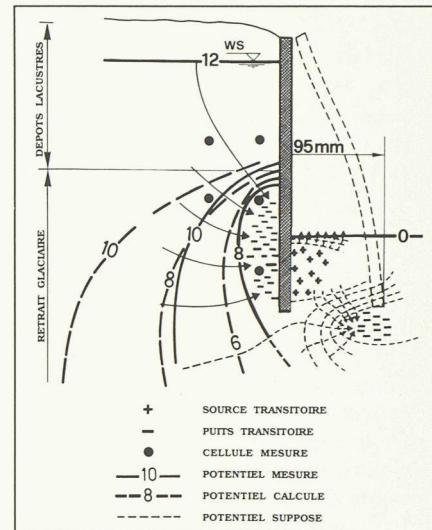


Fig. 10. – Grand Casino : réseau d'écoulement derrière la paroi, mesures et calcul couplé.

du Grand Casino et de Confédération Centre, les interactions entre les deux phases solide et liquide d'un sol induisent des efforts importants. En outre la phase liquide peut s'écouler au travers de la phase solide et la pression en un point donné varie ainsi en fonction du temps. Ces interactions, fonction des charges, décharges et du temps, ne peuvent que très difficilement être simulées par un modèle mathématique classique fondé sur la mécanique du continu du type de celui utilisé pour les analyses présentées plus haut. Avec un tel modèle, le praticien se heurte rapidement aux problèmes liés à la présence d'eau, voire d'air, dans le sol, problèmes parfaitement décrits, pour l'eau, par l'équation de Terzaghi :

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot u(t)$$

où : σ'_{ij} = tenseur des contraintes effectives

σ_{ij} = tenseur des contraintes totales

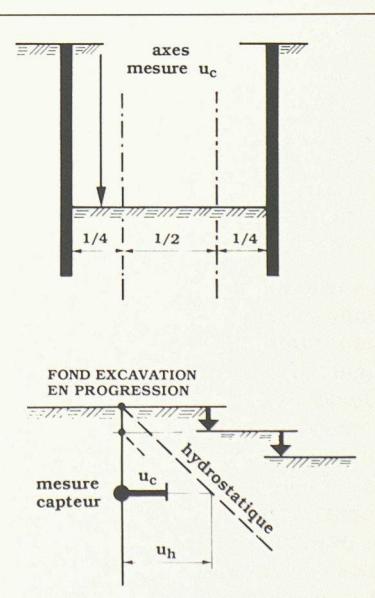
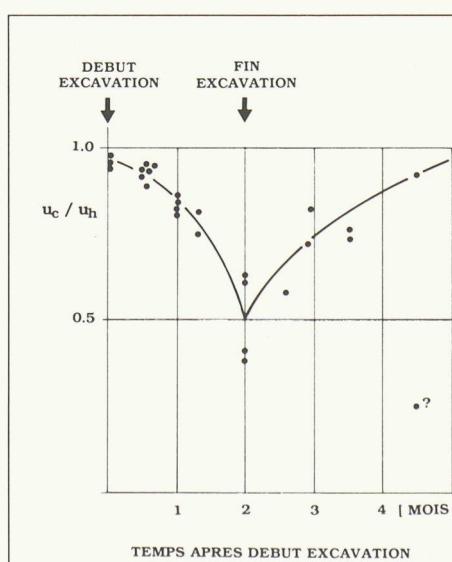


Fig. 11. – Confédération Centre : variation des pressions interstitielles à l'intérieur des fouilles pendant le terrassement (F3, F11, Pt 77 : voir fig. 3).

$u(t)$ = pression interstitielle variant avec le temps

δ_{ij} = delta de Kronecker

mais cependant mal solubles par la méthode des éléments finis appliquée à la seule résolution des équations d'équilibre des déplacements.

Cette méthode s'applique aussi, avec grand succès, aux analyses, en régime permanent ou transitoire, des problèmes de champs : diffusion thermique, écoulement souterrain, potentiel électrique, etc. Dans le domaine des écoulements souterrains, avec des lois constitutives non linéaires (relations entre la conductivité hydraulique et la pression interstitielle), il est même possible de traiter les sols non saturés, et par conséquent aussi les problèmes de variation de la nappe phréatique [13].

Le géotechnicien praticien possède donc aujourd'hui, par la méthode des éléments finis, deux puissants outils pour la détermination des contraintes et des déformations dans un sol considéré comme un continu monophasique, et pour le calcul des pressions et des poussées d'écoulement en régime permanent que transitoire, et en milieu saturé ou non.

Le *couplage* de ces deux outils représente probablement un des grands développements de la mécanique des sols. Il exige cependant un effort très important en calcul numérique et n'a de ce fait pas pu, jusqu'à ces dernières années, être utilisé dans la pratique.

Un modèle couplé fonction du temps utilise les quatre relations principales de la mécanique des sols, soit :

- une équation d'équilibre des déplacements ;
- une loi constitutive liant les déformations aux contraintes (équation d'état, relation contraintes/déformations) ;
- une équation liant les variations de contraintes ou de déformations aux pressions interstitielles comme l'équation de Skempton [14] ;
- une équation permettant de calculer la variation de la pression interstitielle en fonction du temps ; c'est l'équation des écoulements souterrains qui est aussi l'équation de la consolidation.

La résolution numérique d'un tel système exige plusieurs boucles d'itération imbriquées, que schématisse la figure 12.

Quelques programmes sur ordinateur, fondés sur ce couplage, existent déjà mais il leur manque, presque toujours, les facilités des programmes d'éléments finis « industriels » utilisés dans la pratique et traitant soit des problèmes de contraintes/déformations, soit des écoulements souterrains : importantes bibliothèques d'éléments à deux et trois dimensions, pré- et post-

processeurs graphiques, analyse dynamique, lois constitutives non linéaires, etc. Le couplage de ces deux types de programmes industriels est cependant possible grâce à un *interprocesseur* qui couple un programme d'éléments finis résolvant les équations d'équilibre des déplacements et un programme résolvant les équations de l'écoulement souterrain. Entre chaque pas de calcul, pas représentant un incrément de temps, l'interprocesseur exécute la fonction de couplage, soit une relation du type $\Delta u = f(\sigma_{ij})$, et active les deux programmes, l'un après l'autre, avec de nouvelles conditions initiales. Ces deux programmes peuvent être linéaires comme non linéaires et, dans ce dernier cas, avoir leurs propres boucles d'itération internes.

L'interprocesseur qui a été développé et utilisé couplait les programmes ADINA [10] et ADINAT [11].

6.2 Résultats

Ce modèle couplé a été appliqué à l'excavation du Grand Casino avec la même loi constitutive élasto-plastique (von Misès) que l'analyse non couplée et la déformée N° 3 de la figure 5 montre clairement que seul un modèle couplé permet une estimation correcte des tassements autour de la fouille, cela parce que ce modèle tient compte de tous les phénomènes discutés au paragraphe 5 qui ne peuvent être pris en compte dans un modèle monophasique.

La simulation des différentes étapes d'excavation et de construction a

nécessité 32 pas principaux de calcul avec un Δt de 7,5 jours entre chaque pas. Le calcul a utilisé 3 heures 45 de temps de processeur sur un ordinateur à 1 Mips (Méga instructions par seconde).

7. Analyse à trois dimensions

La comparaison des résultats des analyses à deux dimensions avec les mesures réalisées sur le chantier de Confédération Centre a démontré que, pour des fouilles profondes, et/ou de géométrie complexe, la non-prise en compte de la troisième dimension diminuait notablement la précision des résultats du calcul. Pour nous rendre compte des possibilités et des contraintes d'une analyse non linéaire à trois dimensions par la méthode des éléments finis, nous l'avons tentée sur la fouille du Grand Casino, l'excavation de Confédération Centre étant géométriquement beaucoup trop compliquée.

Le réseau utilisé est décrit schématiquement sur la figure 13. Il comprenait 252 éléments à 20 noeuds et 91 poutres représentant les parois moulées, soit 1407 noeuds et 3153 degrés de liberté. Huit pas de calcul imposés décrivaient les étapes d'excavation et d'étayage. Le calcul sur un ordinateur à 1 Mips a utilisé 32 heures de temps CPU.

Les résultats obtenus ont été très décevants. En effet, si l'on réalise une coupe dans le réseau, on se rend compte que la discrétisation en éléments finis est beaucoup plus grossière que celle du réseau 2D utilisé précédemment. Pour obtenir un résultat correct sur cette excavation de géométrie très simple, il faudrait, au minimum, cinq fois plus d'éléments, et simuler les étapes d'excavation et d'étayage par quelque 20 pas de calcul imposés. Seul un ordinateur à plus de 100 Mips est capable de réaliser un tel calcul et nous ne pouvions en disposer à l'époque de cette étude. Quant à simuler en trois dimensions l'excavation de Confédération Centre avec toutes ces phases en plan et en élévation, il faudra attendre les ordinateurs à 1 Gips !

8. Conclusions

Les études pratiques entreprises par les auteurs ont tout d'abord permis de décrire et d'expliquer le comportement des sols compressibles autour et dans les excavations et notamment de démontrer l'importance des variations de la pression interstitielle dans le développement des tassements. Ensuite, elles ont montré qu'aujourd'hui l'usage de modèles mathématiques à deux dimensions élaborés et de gros ordinateurs permettait d'évaluer de façon correcte les défor-

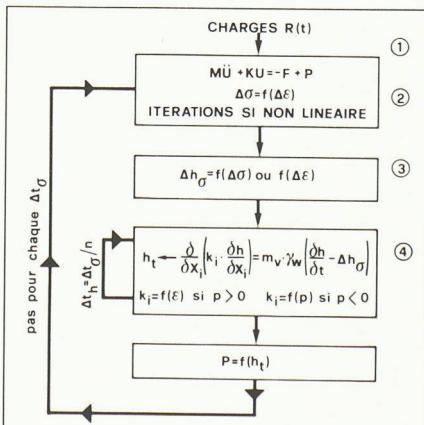


Fig. 12. – Ordinogramme d'un modèle couplé.

- 1 ÉQUILIBRE DES DÉPLACEMENTS
- 2 LOI CONSTITUTIVE
- 3 FONCTION DE COUPLAGE
- 4 ÉQUATION ÉCOULEMENT SOUTERRAIN

M = tenseur des masses
 U = vecteur des déplacements
 K = matrice de rigidité
 R = vecteur des charges extérieures
 P = vecteur des forces dues à la pression interstitielle
 x_i = axes du référentiel $i = 1, 2, 3$
 Autres symboles selon SIMSTF

Bibliographie

- [1] DYSLI, M.; FONTANA, A.; RYBISAR, J.: «Enceinte en paroi moulée dans limons argileux, calculs et observations», *Proc. 7th ESMFE, Brighton*, vol. 3, pp. 197-205, 1979.
- [2] DYSLI, M.; FONTANA, A.: «Deformation around the excavation in clayey soil», *Proc. Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics*, pp. 634-642, Zürich, 1982.
- [3] DYSLI, M.: «Use of ADINA in soil mechanics with case studies for excavations», *Computers and Structure*, vol. 17, N° 5, pp. 635-642, 1983.
- [4] DYSLI, M.: «The practical use of coupled models in soil mechanics», *Computers and Structure*, vol. 21, N° 1/2, pp. 63-67, 1985.
- [5] DYSLI, M.: «Usage pratique de modèles couplés», *Proc. 11^e congrès int. de méc. des sols et des travaux de fondations*, pp. 747-750, San Francisco, 1985.
- [6] FONTANA, A.: «Evolution des poussées sur le soutènement de deux grandes fouilles à Genève», *Ing. et arch. suisses*, N° 25, 1984.
- [7] PECK, R. B.: «Deep excavation and tunnelling in soft ground», *Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Mexico, State of the Art*, pp. 225-290, 1969.
- [8] FONTANA, A.: «Concepts de dimensionnement de deux fouilles genevoises», *Publ. N° 104 de la Société suisse de méc. des sols et des roches*, 1981.
- [9] TAPPOLET, L.: «Confédération Centre: quelques réflexions sur le dimensionnement géotechnique», *Publ. N° 104 de la Société suisse de méc. des sols et des roches*, 1981.
- [10] ADINA ENGINEERING, INC.: ADINA - A finite element program for automatic dynamic incremental nonlinear analysis, Watertown, Ma, USA, 1984.
- [11] ADINA ENGINEERING, INC.: ADINAT - A finite element program for automatic dynamic incremental nonlinear analysis of temperature, Watertown, Ma, USA, 1984.
- [12] LADD, C. C.; FOOT, R.: «New design procedure for stability of soft clay», *JGED ASCE*, vol. 100, N° GT7, pp. 763-786, 1974.
- [13] DYSLI, M.; RYBISAR, J.: «Surface de la nappe et éléments finis», *Proc. 9th ESMFE, Dublin*, 1987.
- [14] SKEMPTON, A. W.: «The pore pressure coefficients A et B», *Geotechnique*, vol. IV, pp. 143-147, 1954.

mations de ces excavations à condition que leur comportement tridimensionnel ne soit pas trop marqué, et que cet usage entraîne, pour des ouvrages importants, dans les limites des honoraires perçus par l'ingénieur.

Enfin, ces études ont encore démontré les avantages d'une collaboration entre un bureau d'ingénieurs privé et une école polytechnique dans un domaine où les moyens de celle-ci peuvent

apporter beaucoup à la pratique, collaboration qui ne peut en aucun cas être considérée comme une concurrence déloyale envers l'ensemble de la profession.

9. Remerciements

Ces études n'auraient pu être menées à bien sans la collaboration de tous les participants à la réalisation de ces deux

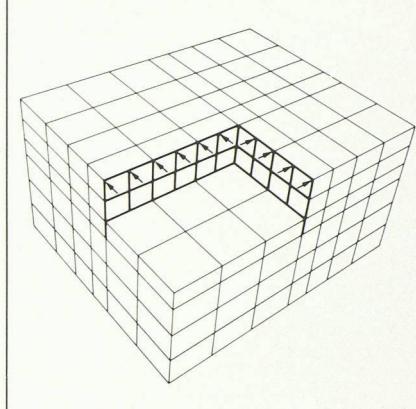


Fig. 13. – Grand Casino: le modèle à trois dimensions.

grands chantiers et sans le financement, par les maîtres d'ouvrage, du coût des mesures qui ont permis non seulement de vérifier la bonne marche des travaux et de prendre à temps les mesures de construction éventuelles nécessaires, mais également, dans une phase de synthèse ultérieure, de mieux comprendre le comportement effectif de ces ouvrages dans leur environnement.

Adresses des auteurs:

Adalbert Fontana
Ingénieur civil EPFL/SIA
Ingénieur associé
Géotechnique appliquée
P. et C. Dériaz et Cie SA
10, rue Blavignac
1227 Carouge-Genève

Michel Dysli
Ingénieur civil EPFL/SIA
Chef de section au
Laboratoire de mécanique
des sols - EPFL
1015 Lausanne

Actualité**Vesta à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne**

N'en déplaise aux mânes de l'empereur romain Julien l'Apostat¹, le nombreux public accouru récemment à l'EPFL n'était pas venu célébrer le culte païen du Foyer sous l'égide de Vesta, mais pour découvrir les secrets de la voiture la moins gourmande du monde: la Renault Vesta².

Des chiffres: le 23 juin 1987, la Vesta 2 parcourait les 501,4 km séparant Bordeaux de Paris, avec deux personnes à bord, à la vitesse moyenne de 100,9 km/h, consommant 9,447 litres d'essence super, soit 1,94 l/100 km. Surtout ne vous précipitez pas à l'agence Renault la plus proche, car la Vesta 2 n'est pas à vendre: ni aujourd'hui, ni demain ou après-demain. Il s'agit d'un véhicule expérimental

incorporant les résultats des recherches les plus récentes de Renault dans les domaines des matériaux, de l'aérodynamique, de la structure et de la mécanique. De même, les pères de famille auront intérêt à consulter le tableau comparant la Vesta 2 à la Renault 5 SL de série: si la seconde est une petite voiture, la Vesta 2 est encore plus petite, extérieurement du moins. Si ce prototype préfigure la voiture de demain, ce n'est pas celle dont semble rêver une grande partie des automobilistes, à en croire les chiffres des ventes des moyennes et grosses voitures. Il est toutefois permis de penser que cette tendance au grossissement ne saurait se poursuivre *ad libitum*, même si les constructeurs de moyennes et

grosses voitures ont fait de spectaculaires progrès dans le domaine de l'économie d'essence³.

La Vesta 2 est une petite voiture; toutefois, l'amélioration qu'elle concrétise par rapport aux modèles de série actuels de dimensions semblables, grâce à l'application des techniques les plus avancées, peut évidemment être

¹Julien l'Apostat, 331-363; au cours de son règne (361-363), il essaya de rétablir le paganismus dans l'Empire.

²Véhicule économique de systèmes et technologies (sic) avancées.

³A titre d'illustration, nous avons constaté qu'une voiture récente, pesant 1370 kg et équipée d'un moteur de 3430 cm³ de cylindrée, consomme en usage courant sensiblement la même chose qu'un plus petit modèle de la même marque, de 1000 kg avec un moteur de 1990 cm³, conçu quelque quinze ans auparavant.