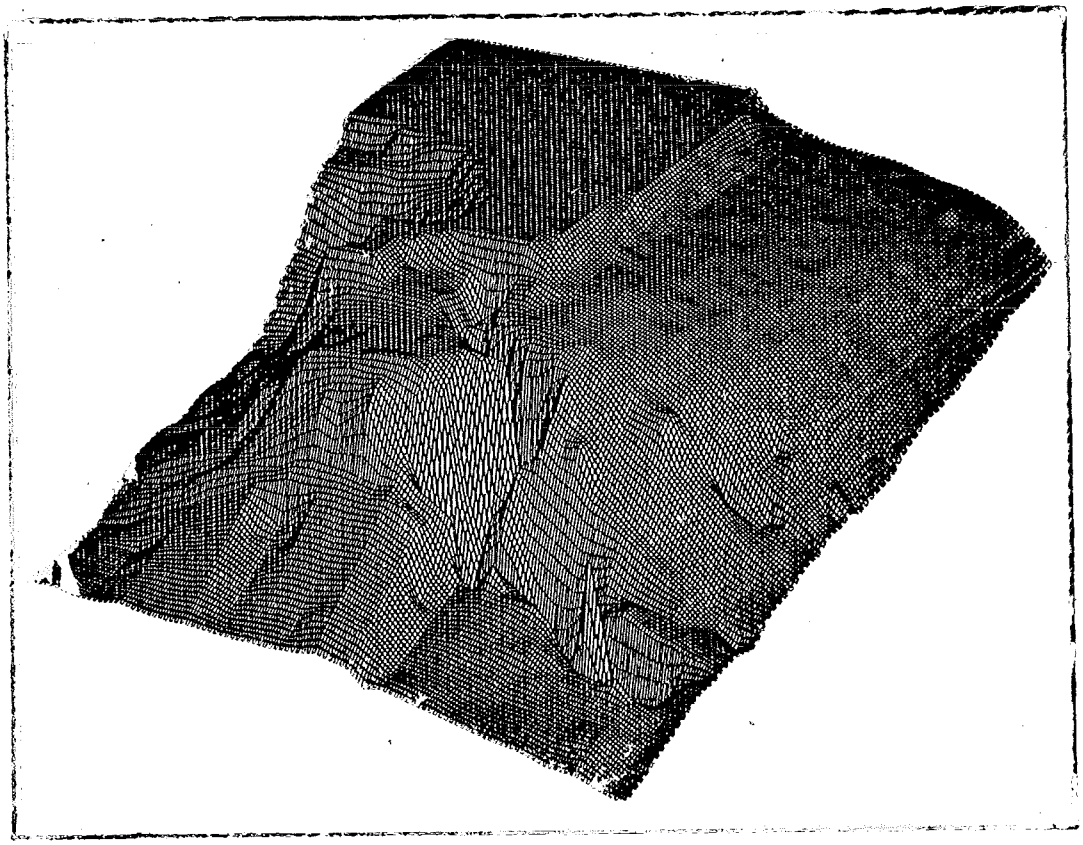
Verhagen

ELF - GABON

Erosion côtière au Cap Lopez, Gabon, due à un canyon sous-marin

Analyse et mesures à prendre

Rapport intérim



Janvier 1983 / P 643

PORT AND WATERWAY ENGINEERS

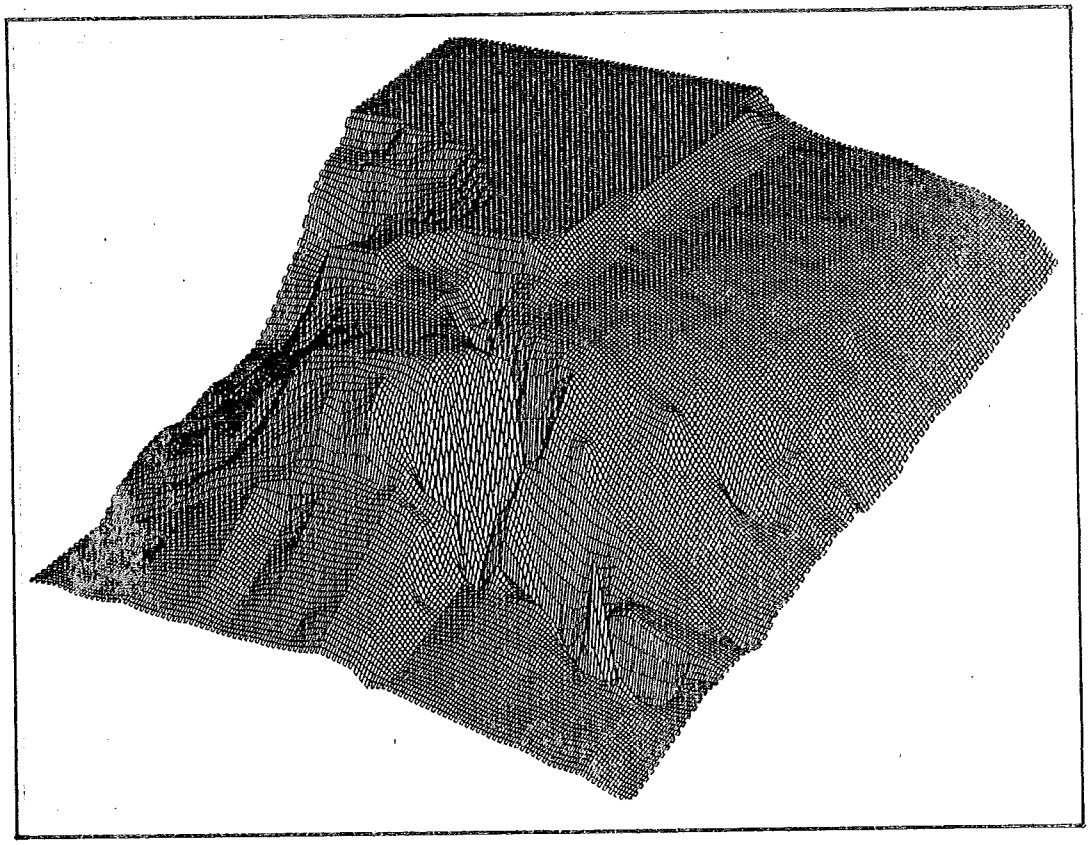
hydronamic bv
sliedrecht holland

ELF - GABON

Erosion côtière au Cap Lopez, Gabon, due à un canyon sous-marin

Analyse et mesures à prendre

Rapport intérim



Janvier 1983 / P693

PORT AND WATERWAY ENGINEERS

hydronamic bv

EROSION CÔTIERE AU CAP LOPEZ, GABON,
DUE À UN CANYON SOUS-MARIN

TABLE DES MATIERES

PAGE

1. INTRODUCTION 1

2. DESCRIPTION ET ANALYSE DE L'ORIGINE DE CETTE ÉROSION 3

2.1. Général 3
2.2. Erosion due au canyon sous-marin 4
2.3. Réfraction des vagues océaniques 7
2.4. Transport littoral 10

3. PROPOSITIONS DE MESURES A PRENDRE 12

3.1. Général 12
3.2. Apport de sable et recouvrement du talus immergé (Solution 1) 13
3.3. Talus de sacs de sable comme renfort (Solution 2) . . 15
3.4. Apport de sable (Solution 3, figures 14, 19-22) . . . 16
3.5. Digue de sable comme protection contre les vagues (Solution 4, figures 23-26) . . 16

4. ETUDE COMPARATIVE DES COUTS ET ESTIMATIONS 18

TABLEAUX

FIGURES

1. INTRODUCTION

Non loin des entrepôts de pétrole appartenant à la compagnie ELF Gabon (figure 1), une forte érosion des côtes peut être constatée laquelle met en péril le bon fonctionnement de l'entrepôt de pétrole et son transport.

Il existe, à cet endroit, un canyon sous-marin qui se rapproche de plus en plus de la côte.
La profondeur de ce canyon atteint déjà 40 m à 400 mètres de la plage et même 100 mètres à 2500 mètres de la plage.
Une érosion notoire se manifeste sur la plage.

Etant donné que la situation tend à devenir dangereuse, ELF a décidé que des mesures à court terme devaient être prises pour détourner le danger immédiat. Par ailleurs, à long terme, ELF désire faire faire une étude qui déterminerait l'évolution de ce canyon et les solutions qu'il faudrait appliquer.

Le 30 Novembre 1982, une réunion a eu lieu entre les représentants d'ELF (M. Cemeli et M. Saout) et Hydronamic (M. Burgers).
A la demande d'ELF, Hydronamic a remis une offre le 6 Décembre 1982 pour la réalisation d'une étude immédiate faisant ressortir les mesures les plus urgentes à entreprendre pour éloigner cette menace directe et pour déterminer les prescriptions pour une étude plus détaillée.
ELF donna l'ordre de procéder à l'étude à court terme le 10 Décembre 1982.

Le présent rapport est un rapport intérim avec les résultats des analyses faites et les mesures à envisager.
Les prescriptions pour l'étude détaillée à long terme seront repris dans le rapport final.

2. DESCRIPTION ET ANALYSE DE L'ORIGINE DE CETTE ÉROSION

2.1. Général

Deux causes sont à l'origine de cette érosion, à savoir:

- Le transport littoral en direction du Nord;
  ce transport littoral est du aux vagues qui provoquent un courant le long de la côte en direction du Nord.
- On constate en l'emplacement du canyon une érosion transversale par rapport à la côte;
  Les matériaux présents sur la plage sont emportés vers l'Océan par l'intermédiaire de ce canyon.

Par voie de ce transport littoral, des matériaux provenant du Sud sont amenés vers le canyon. A l'endroit du canyon, ce transport littoral débouche dans des eaux très profondes qui font perdre au courant tous ses matériaux charriés.
Le courant, toujours existant, reprendra à son tour de nouveaux sédiments ce qui provoquera une érosion du courant près du canyon.

Les matériaux du courant cotier déposés près du canyon sont acheminés par l'intermédiaire du canyon transversal vers l'Ocean.
Le canyon est donc par lui-même, également, une cause d'érosion (c'est à dire en plus du courant cotier).
Nous supposons que cette cause d'érosion est plus grave que celle due éventuellement au transport littoral.

Dans le but de donner une meilleure idée de la situation existante, nous avons reproduit sur l'ordinateur trois images tri-dimensionnelles de la zone. La figure 2 donne un aperçu de l'ensemble du Cap Lopez. Il est à noter que même du côté Est du Cap Lopez, de grandes profondeurs peuvent être contatées et qu'en fait, toute la presqu'ile sur laquelle sont implantés les réservoirs d'ELF est précaire. Les figures 3 et 4 représentent le canyon sous divers angles.
La figure 3 peut être considérée comme la plus distincte en ce qui concerne la région à proximité de la côte.

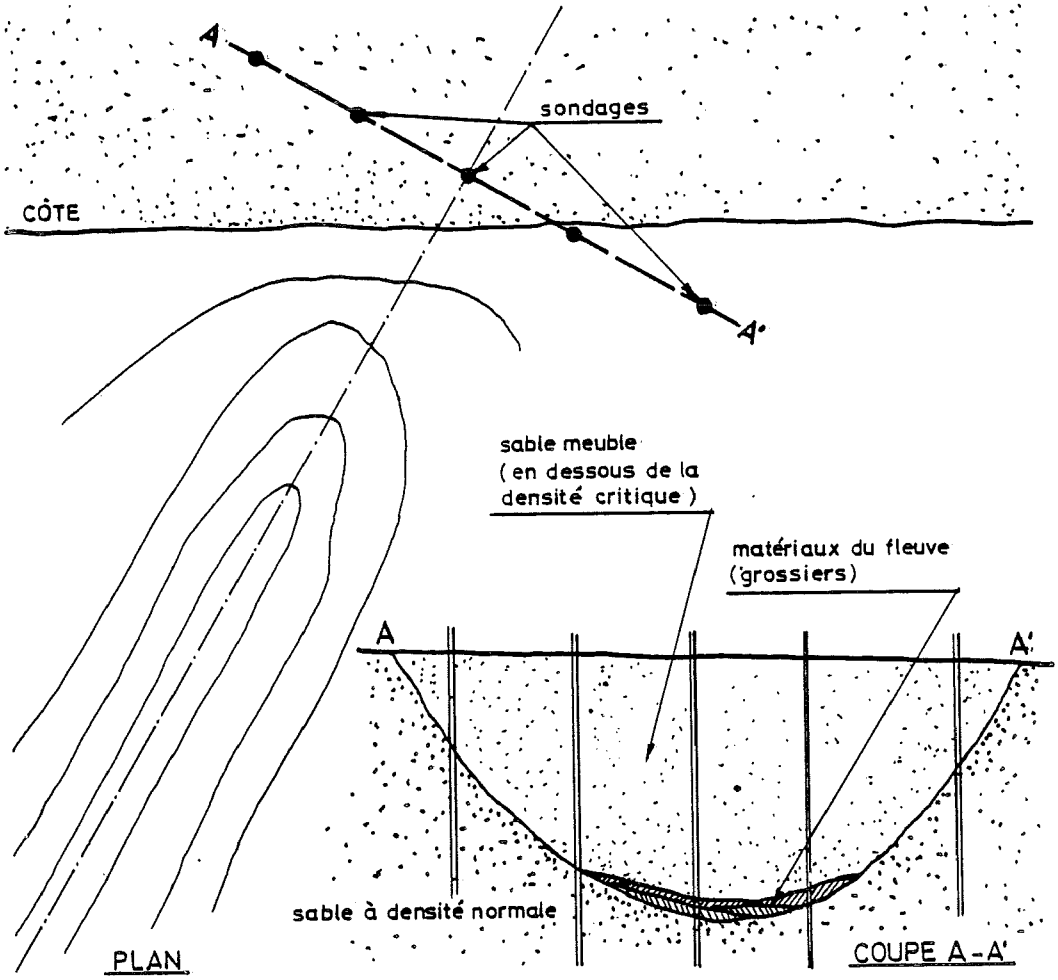
Compte tenu de l'apparition des pentes transversales dans le canyon, il est évident que la composition des matériaux dans le sens longitudinal du canyon est différente de celle des matériaux transversaux. Les matériaux de l'axe longitudinal sont vraisemblablement plus serrés et les matériaux des deux pentes transversales du canyon sont peut-être d'une certaine manière plus cimentés.
La carte bathymétrique est représentée dans la figure 5.
Afin de mieux voir la différence entre les pentes dans les sens longitudinal et transversal, nous avons représenté dans les figures 6 et 7 quelques coupes, l'une longitudinale et les autres transversales. Le profil longitudinal est une ligne courbe qui suit l'axe du canyon.

2.2. Erosion due au canyon sous-marin

Il est moins utile de connaître pour cette étude, la cause de la naissance de ce canyon sous-marin. Il nous semble que la présence de l'embouchure de la rivière Ogooué et que la montée rapide du niveau de la mer la dernière période glaciaire ont joué un rôle dans la naissance de ce canyon.
Il est possible, par exemple, qu'une sédimentation ait eu lieu dans l'embouchure et que par suite de cette sédimentation dans l'eau, les matériaux sont devenus très meubles. Dans le cas, où une grande quantité de matériaux meubles s'est déposée dans le canyon, le moindre tremblement a peut-être suffit pour occasionner un important glissement (une forte tempête, un petit tremblement de terre). En raison d'une telle importante liquéfaction, ces matériaux meubles ont été entrainés et le canyon s'est, à nouveau, formé.

Les matéraux meubles qui se sont déposés dans le canyon provenaient peut-être du courant cotier qui, continuellement, déposait les matériaux transportés près de la profonde embouchure. Le sable transporté par le vent a peut-être joué un rôle aussi au cours de ce procès.

Ces raisonnements sont basés sur nos connaissances et expériences acquises ailleurs dans le monde.
Si notre raisonnement est juste, le canyon - bien qu'il soit encore rempli pour une grande partie de sable meuble - s'avancera, vraisemblablement encore plus vers la côte.
Nous pouvons certainement vérifier l'exactitude de notre conclusion en procédant à des sondages le long de la côte et à la verticale sur l'axe du canyon (voir schéma).



Nous avons procédé, en collaboration avec l'institut de géologie de l'Université de Groningen (Pays-Bas) à une étude de la documentation existante concernant le phénomène des canyons sous-marins.
Il apparaît que pour ce type de canyons, le courant de turbidité, la liquéfaction et le courant de masse sont des facteurs importants.
Le comportement des courants de turbidité a fait l'objet d'études dans le laboratoire de l'Université de Groningen par un pionnier dans ce domaine, le Professeur Kuenen.

En général, tout le monde semble d'accord pour dire qu'un canyon sous-marin s'entretient lui même par l'action érosive de ces courants de turbidité lesquels descendent telles des avalanches dans le canyon.
Ces courants de turbidité sont cause's par des effondrements et par un phénoméne de liquéfaction.

Le phénomène de liquéfaction apparaît très souvent aux Pays-Bas, en particulier dans le delta, et surtout à proximité des digues.
D'importantes fosses d'érosion (jusqu'à 40 m de profondeur) se forment à proximité des rives dues au courant.
Si les sédiments, dans le voisinage de la digue, sont meubles, (en-dessous de seuil critique de densité), une petite perturbation peut être suffisante pour créer, par tremblements, une augmentation de la pression des pores laquelle sera à l'origine d'une telle liquéfaction.
La plus grande liquéfaction constatée aux Pays-Bas avait un ordre de grandeur de 1.000.000 m^3.
Dans le cas présent du canyon sous-marin du Cap Lopez, il est évident que des glissement de telle importance, mettent en péril la sécurité de la plage et des zones à proximité.

Même de petits phénomènes de liquéfaction dans des eaux peu profondes peuvent, dans le cas d'un canyon sous-marin, provoquer déjà un courant de turbidité perturbateur lequel aura une grande incidence érosive sur le canyon et qui, avec l'augmentation de la pression des pores des matériaux déposés en-dessous, seront à l'orgine de nouveaux glissements et/ou liquéfactions.

Une dernière raison de la naissance de ces courants de turbidité est finalement le mouvement ondulatoire de la mer.
Des matériaux sont sans cesse en suspension par le mouvement des vagues, lesquels dévalent, par la suite, comme un courant de turbidité. Le mouvement ondulatoire peut être également à l'orgine de tremblements et provoquer une surpression, ce qui favorisé la liquéfaction.

2.3. Réfraction des vagues océaniques

Le transport littoral est causé par la réfraction des vagues des eaux profondes en direction de la côte.
La onde dominante au Cap Lopez vient du Sud.
Vu les remarques faites par les représentants d'Elf concernant une modification du comportement de la houle, nous avons contacté l'Institut Néerlandais de Météorologie pour qui cette éventuelle modification de mouvement ondulatoire leur semblait improbable.

La direction des vagues en eaux profondes étant à dominance Sud, et compte tenu de la présence de vagues relativement longues, ces vagues sont réfractées sur une très longue distance.
C'est la raison pour laquelle une petite modification en eaux profondes a déjà une grande répercussion sur la direction des vagues près de la côte, et il est possible que dans vos considérations, ceci ait eu une influence.

Pour déterminer le comportement du mouvement ondulatoire en eaux profondes, nous nous sommes servis des données de la Marine des Etats-Unis (Marine Climatic Atlas of the World, Vol. 4, Area 10).

Les informations telles publiées par le "U.S. Navy" ont été rassemblées dans les tableaux 1 et 2.
Le tableau 3 est une analyse de ces données.
Il apparaît, d'après ces tableaux, que la plupart des vagues ont une courte période (près de 70% ont une période inférieure à 8 secondes).

Au cours de la visite au Cap Lopez, des informations concernant des mesures effectuées en Novembre 1981 à la frontière du Congo, ont été reprises. Ces vagues auraient une plus longue période. La plupart d'entre elles se situent entre 8 et 9 secondes. Ces données ont été rassemblées dans le tableau 4.

Nous avons utilisé pour faire notre étude les informations données par la Marine des Etats-Unis parce qu'elles se rapportaient à une plus grande période, bien que nous nous référons parfois aussi aux chiffres de Novembre 1981 et ce pour la raison suivante: il nous semble que les chiffres du "U.S. Navy" donnent une durée de l'onde plus courte que celle qui pourrait être prévue.

A l'aide du programme de réfraction d'Hydronamic, une analyse a été faite concernant la mouvement des vagues vers la côte. A cet effet, un modèle de cette zone a été conçu à trois échelles différentes.
Pour les localisations, voir figure 1.

Modèle 1: 24	x 13	points d'intersection, distance entre ces points	5000 m
Modèle 2: 99 (55)	x 39	points d'intersection, distance entre ces points	150 m
Modèle 3: 50	x 40	points d'intersection, distance entre ces points	30 m

Le mouvement ondulatoire tel qu'il est reproduit dans le tableau 3 est résumé en 14 eléments, voir tableau 5. Ces calculs sont, en principe, réalisés en plaçant les éléments sur les bords du modèle 2. Cette manipulation n'est pas possible pour les vagues venant du Sud, étant donné que celles-ci se réfractent avant qu'elles n'atteignent le bord du modèle 2. Pour résoudre ce problème, le modèle 1 a été établi. Grâce à ce dernier modèle, la direction des vagues sur le bord du modèle 2 a pu être déterminée pour les vagues provenant à l'origine du Sud. Les diagrammes détaillés de réfraction de la région du canyon ont été obtenus en apposant sur le bord du modèle 3 les résultats du modèle 2.

En annexe de ce rapport, les diagrammes de réfraction de tous les calculs sont donnés sous forme de radius des vagues (modèle 1 = série A, modèle 2 = série B, modèle 3 = série C). Ces radius de vagues sont des lignes se trouvant à la perpendiculaire des crêtes des vagues et qui indiquent la direction du mouvement ondulatoire. Dans cette annexe, vous trouverez également une image très schematisée de l'évolution des hauteurs des vagues. Lorsque les rayons des vagues sont très espacés entre eux, les vagues sont peu élevées.

Les vagues provenant de telles directions que les radius des vagues ne forment plus qu'un petit angle avec la côte, constituèrent un problème pour la réalisation de ces calculs de réfraction. Le modèle 2 a été agrandi spécialement pour ces vagues deux fois par rapport à la zone sur laquelle ces radius de vagues sont dessinés. Dans cette zone qui n'a pas été dessiné, les vagues (en particulier les longues vagues) ont un degré de réfraction plus important, ce qui peut être observé dans le diagramme de réfraction du fait que les vagues n'arrivent pas parallèlement sur le bord (dessiné) du modèle 2.

La direction et la hauteur des vagues avant leur déferlage détermine l'ampleur du transport littoral. Nous reviendrons sur ce point dans le prochain paragraphe.

Une attention particulière doit être donnée aux diagrammes de réfraction détaillés (modèle 3, série C) à l'endroit du canyon. On note, sur le plateau sous-marin au Sud de canyon, une importante réfraction des vagues, ce qui entraine une concentration des vagues déferlant sur la côte, juste là où le canyon aborde la côte (voir figure 8). Un peu plus au Nord, le travail des vagues est presque nul. Ceci signifie que les vagues sont toujours élevées aux endroits indiqués; ce phénomène apparait pratiquement pour toutes les directions et périodes des vagues.

Il en résulte qu'à cet endroit une énorme quantité de matériaux est mis en suspension et que de tels endroits sont sensibles à la liquéfaction (à condition que les matériaux meubles soit en-dessous du seuil critique de densité).

2.4. Transport littoral

L'évuluation du transport littoral est basée sur les calculs de réfraction et est reproduit dans divers coupes. (voir figure 8).

Deux méthodes servent aux calculs du transport littoral, à savoir la formule générale CERC qui donne immédiatement le transport littoral et une autre méthode pour laquelle on procède d'abord au calcul du courant côtier provoqué par les vagues, lequel permettra ensuite d'évaluer la quantité des matériaux transportés par ce courant.
Le courant est alors évalué avec la théorie de "radiation-stress" (avec la méthode de Battjes) et le transport des sédiments est calculé à l'aide de la formule de Bijker, servant à la fois pour le courant et les vagues. Nous considérons le second modèle (Tableau 6) plus fiable que le premier (tableau 7). Le transport tel qu'il apparait dans les diverses coupes est reporté, pour les deux méthodes, dans les tableaux 6a et 7a. Les vagues, ainsi que leur pourcentage de fréquence, sont également repris dans ces tableaux.

Lorsque le transport augmente du Sud vers le Nord (de la coupe 2 vers la coupe 3 etc), une érosion apparaît, et il y a sédimentation lorsque le transport diminue,
Nous pouvons lire que pour le mouvement ondulatoire en question, il y aurait sédimentattion entre les coupes 2 et 4 mais qu'il y aurait érosion juste à l'emplacement où se trouve le phare (coupe 5) (même si à cet endroit une sédimentation avait lieu, un phénomène d'erosion apparaitrait par suite du transport transversal dans le canyon).

L'érosion entre les coupes 4 et 5 s'élèverait à 5.600 m3/par an selon la méthode de Bijker-Battjes et à 4.900 m3/par an d'après la méthode CERC.

Grâce aux informations sur la frontière du Congo, obtenues au mois de Novembre 1981, le transport littoral peut également être évalué, à condition de supposer que les données soient valables pour toute l'année. Ces résultats apparaissent dans les tableaux 6b et 7b.

Pour ce type de vagues, on obtiendrait une érosion d'eviron 9.000 m^3 par an en appliquant la méthode de Bijker-Battjes et d'environ 18.000 m^3 par an avec la formule CERC.

3. PROPOSITIONS DE MESURES A PRENDRE

3.1. Général

A nouveau, nous voudrions souligner l'importance de définir distinctement le caractère particulier de ce problème.
L'importante érosion locale est provoquée par les courants de turbidité qui descendent les pentes du canyon sous-marin et emportent les sédiments déposés dans le fond.
Ces courants de turbidité se forment au sommet du canyon par suite de glissements locaux et/ou de liquéfactions. Ces glissements peuvent être dus à la force du mouvement ondulatoire à certains endroits.
D'autre part, cette concentration de l'action érosive des vagues à un endroit provoque également des courants de turbidité, étant donné que les matériaux sont continuellement mis en suspension et que ceux-ci dévalent ensuite le long des pentes du canyon.
Dans une configuration de côte normale, les matériaux des fonds sont également mis en suspension mais il se produit un équilibre entre les déplacements en direction de la côte et en direction de la mer. Dans ce cas précis, en raison des pentes abruptes, les matériaux continuent de s'écouler du canyon vers l'Océan et même, sur les pentes moins inclinées, dans la partie la plus-frofonde du canyon, ce phénomène continue d'exister.

Compte tenu de ce qui précède, il apparaît que même les mesures éventuelles suggérées par Elf, telles que la mise en place de petits épis d'un rideau de palplanches sur la plage ou la réalisation d'une petite digue formée de blocs en latérite, sont inutiles.

Ces mesures n'auront aucune incidence sur le phénomène d'érosion. Que ces mesures soient prises ou non, aucune différences ne pourra être notée, l'érosion n'en sera pas perturbée pour autant. Il suffit de jeter un coup d'oeil sur le dessin tri-dimensionnel de la zone concernée dans la figure 3 ou la figure 10b pour observer que les matériaux déposés en haut de la plage disparaîtront finalement dans les profondeurs par érosion du talus immergé.
Si nous nous rappelons qu'une liquéfaction d'env. 1.000.000 m^3 est plausible, tout le littoral et ses défenses sera éliminé.

Les seules solutions pouvant remédier à ce problème sont un renforcement de la plate-forme littorale ou faire en sorte que le travail destructif du mouvement ondulatoire soit évité aux endroits critiques.
Les mesures suivantes peuvent être proposées:

- recouvrement du talus sous-marin par des matelas à immerger; ces grandes surfaces de matelas en matières synthétiques sont fixées sur les fonds à l'aide de blocs de rochers ou autres matériaux,
- renforcement du talus sous-marin par un apport de sable au pied des pentes plus stable que dans la situation actuelle,
- éviter l'incidence destructive du mouvement ondulatoire aux endroits déjà attaquès par une érosion locale.

En vertu de ces possibilités, quelques solutions ont été trouvées que nous étudierons dans les paragraphes suivants.

3.2. Apport de sable et recouvrement du talus immergé (Solution 1)

Pour le sable en question, la plage immergée actuelle a une pente plus accentuée due à cette érosion incessante, qu'un talus normalement équilibré. Cette plage immergée est, par conséquent, instable.
Dans la cas où cette pente serait recouverte de matelas à immerger, le transport de sable n'apparaîtrait plus à partir de la zone de réfraction dans le canyon. L'action de l'érosion des courants de turbidité serait, de ce fait, rompue et la plage immergée resterait stable.

Cependant, il faudrait que ces matelas soient immergés sur toute la zone de déferlage jusque sur la plage. Ceci est impossible, les matelas n'étant pas stable sur place. Même un recouvrement à l'aide de sacs de sable ou d'enrochements ne suffirait pas. Après une ou deux tempêtes, les matelas immergés auraient disparu.

C'est la raison pour laquelle il est indispensable de stabiliser d'abord la plage et la plate-forme littorale jusqu'a ce qu'une certaine profondeur soit obtenue hors d'atteinte de l'action directe du brisement des lames.
Les calculs démontrent que, compte tenu du sable présent, la pente du littoral sera stable avec un talus de 1:50. La solution qui pourrait être appliqué est indiquée dans les figures 9-13. La pente de la plage, stabilisée à 1:50, est prolongée jusqu'à -5 m, puis le complément de sable est amené avec une pente presque équivalente à l'actuelle et est immédiatement recouverte de matelas à immerger. Ces matelas sont lestés avec des sacs de sable.

Etant donné que cette solution exigerait beaucoup de sable, une dique de sacs de sable de 12 m de hauteur sera construite à une profondeur d'environ 37 m. Cette profondeur de 37 m est choisie parce qu'a cet endroit, le canyon est très étroit tandis que dans le même temps le pente des fonds est devenue si faible qu'une telle digue restera stable. Le sommet de la digue est situé à -25 m ce qui ne donne pas de problème en ce qui concerne la stabilité par rapport aux vagues.

Les matelas sont en matières synthétiques (polypropylène) et sont en partie lestés avec du sable insufflé dans des boudins. Les matelas sont renforcés de cette manière jusqu'à un poids de 15 kg/m^2. Après leur immersion, la pose de sacs de sable renforcent l'emsemble jusqu'à un poids de 900 kg/m^2. Les sacs de sable (aussi bien pour les digues que pour le renforcement des matelas) sont constitués de sacs en nylon remplis de 1,2 m^3 de sable. Les sacs ont donc un poids d'env. 1,8 tonnes.

La marche à suivre pour cette solution est comme suit:
Une digue est construite à l'aide de sacs de sable. Puis le complément de sable est mis en place. Il est réalisé au moyen de conduits et d'un ponton d'ancrage lequel amène le sable par l'intermédiaire d'un tuyau déversoir immergé juste au-dessus du fond afin de pouvoir obtenir la pente désirée.
Les matelas sont alors immergés et renforcés de sacs de sable.
On pourra récupérer le sable à cet effet, à l'intérieur de la presqu'île et l'amener sur place à l'aide succesivement d'une conduite flottante, d'une conduite terrestre et, à nouveau, d'une conduite flottante.

Comme alternative aux sacs de sable, nous pourrions prendre des blocs de rochers. Mais nous avons noté que ceux-ci sont rares. Comme alternative aux matelas, des enrochements pourraient faire l'affaire. Il faudrait alors déposer sur le sable une couche de ces enrochements d'une épaisseur de 0,5 m.

3.3. Talus de sacs de sable comme renfort (Solution 2, figures 14-18)

Une digue de sacs de sable doit également être construite pour cette solution dans le fond du canyon contre laquelle du sable sera arrosé par l'intermédiaire du ponton et du tuyau déversoir-immergé. Dès que le sable atteint le niveau de la digue de sacs de sable, une nouvelle digue est construite et complétée de sable. Ces opèrations se succèdent jus'qu ce qu'une profondeur de -10 m soit atteinte. La moyenne des pentes de ces digues de sacs de sable est de 1:7. A partir de -10 m, le sable, sous une pente de 1:15 non protégée, s'enfuit vers la mer.

La pente de 1:15 ne sera vraisemblablement pas assez stable. Cette pente s'affaiblira après un certain temps. Les prévisions sont, cependant, que ce phénomène ne se réalisera que très graduellement. Il sera possible, dans un lointain futur, d'apporter, à ce moment un nouveau supplément de sable entre la courbe -10 m et la plage. Il est difficile de prévoir quel sera la degré d'érosion par an. Les calculs donnent un chiffre de quelques milliers de métres cube par an, ce qui signifie un recul d'environ 5 m par an.

3.4. Apport de sable (Solution 3, figures 14, 19-22)

Seul un apport de sable sous une pente de 1:15 est exécuté dans ce cas. La manière d'opérer est encore de bas en haut, par le moyen du tuyau déversoir. Au cas où ce tuyau-déservoir ne serait pas utilisé, et que le sable serait amené directement à partir du littoral, un courant de turbidité serait engendré et les matériaux continueraient de s'écouler dans le canyon. Ceci exigerait qu'une petite digue de sacs de sable soitconstruite dans le fonds du canyon pour arrêter le courant de turbidité et placer le talus contre cette petite digue. Une telle petite digue peut être également appliquée dans le cas de l'utilisation du tuyau-déversoir afin d'assurer une plus grande sécurité encore.

Le talus de 1:15 s'affaiblira à long term dans ce cas. Un complèment de sable pourrait alors être apporté après une certaine période. D'après les calculs, il faudrais tenir compte d'une perte de sable de quelques milliers de m^3 par an, soit un recul de moins de 5 m par an. Le recouvrement du talus de petits enrochements (une couche de 0.5 m) améliorerait certainement la stabilité de ce complément de sable.

3.5. Digue de sable comme protection contre les vagues (Solution 4, figures 23-26)

La raison de la mise en place d'une digue à cet endroit est qu'elle empêche l'attaque des vagues qui se produit sur une petite partie de la côte. Il serait préférable que cette digue soit formée de blocs de rochers, mais ceci est plus couteux naturellement.

L'alignement de la digue est réalisé de telle façon que le transport littoral diminue graduellement dans la direction de la pointe. De cette manière, du sable se dépose continuellement le long de la digue (dans la partie Sud). La digue s'entretient elle-même.
Dans l'annexe (série D) vous trouverez les calculs de réfraction des vagues établis dans le cas de cette digue de sable.
Il est évident que les vagues n'atteignant plus la partie actuellement menacée, l'érosion croissante à cet endroit est arrêtée.

La digue de sable a une largeur au sommet de 50 m à un niveau de 2.5 m^+ avec une pente de 1:15 vers les fonds d'origine.
Il serait sensé de craindre que la crête de cette digue de sable pourrait disparaître par érosion. Hormis une défense formée de rochers (lesquels sont difficile à obtenir), un rideau de palplanches battu sur le sommet pourrait constituer également une solution. Une autre solution est d'immerger, à cet endroit, un grand ponton hors d'usage.
La suggestion d'une digue de sable peut paraître étrange, mais aux Pays-Bas, de telles digues sont fréquentes. Ci-joint, quelques photos pour illustrer de tels projets (figures 27-31).

4. ETUDE COMPARATIVE DES COUTS ET ESTIMATIONS

Bien qu'elle ne soit pas compris dans votre appel d'offre actuel, nous avons pensé devoir procéder à une étude globale et comparative des coûts.

Tout d'abord, nous vous donnons un récapitulatif des quantités nécessaires pour les diverses solutions:

Solution 1

- sable	800.000 m3
- Sacs de sable (contenu 1,25 m3)	25.000 pièces
- matelas à immerger et lestés	32.500 m2
de sacs de sable	16.250 sacs de sable

Solution 2

- sable	650.000 m3
- sacs de sable (contenu 1,25 m3)	47,500 pièces

Solution 3

- sable	1.000.000 m3

Solution 4

- sable	550.000 m3
- rideau de palplanches event.	200 m

Si des blocs de rochers sont utilisés comme alternative pour la digue formée de sacs de sable et si les enrochements servent d'alternative pour les sacs de sable de lestage, nous obtenous les quantités suivantes:

Alternative solution 1

- sable	800.000 m3
- rochers (en remplacement de la digue en sacs de sable)	50.000 tonnes
- enrochements (en remplacement des matelas à immerger)	25.000 tonnes

Alternative solution 2

- sable	650.000 m3
- talus de rochers (pour remplacer les sacs de sable)	90.000 tonnes

Alternative solution 3

Dans cette solution, une couche supplémentaire d'enrochements est déposée sur le complément de sable, ce qui nous permet de considérer cette solution comme définitive.
(Cette opération peut être réalisée, naturellement, dans un stade ultérieur après avoir observé l'évolution du complément de sable non protégé).

- sable	1.000.000 m3
- enrochements	60.000 tonnes

La durée d'exécution et l'estimation des coûts de ces diverses solutions s'élèvant à*:

	durée d'exécution	estimation totale des coûts
- solution 1 (alternative)	22 semaines	31 Millions FF (27 Millions FF)
- solution 2 (alternative)	15 semaines	28 Millions FF (25 Millions FF)
- solution 3 (y compris le recouvrement avec des enrochements)	9 semaines	10 Millions FF (25 Millions FF)
- solution 4 (non compris le rideau de palplanches)	5 semaines	7 Millions FF

La mobilisation n'est pas inclus dans le temps d'exécution du travail. L'évaluation des coûts est exclusif les droits d'importation, les taxes et impôts.

Nous pensons qu'en ce qui concerne la sécurité et la sûreté de nos solutions proposées, celles-ci vont de pair avec les coûts.
La solution 1 offre la meilleure garantie de sécurité et de sûreté. Cette solution peut être aussi considérée comme définitive. Il en va de même pour la variante proposée.

Les solutions 2 et 3 sont moins sûres étant donné qu'à long terme le talus de 1:15 ne restera vraisemblablement pas stable.
L'erosion se fera cependant très lentement et il restera suffisamment de temps pour observer l'évolution.

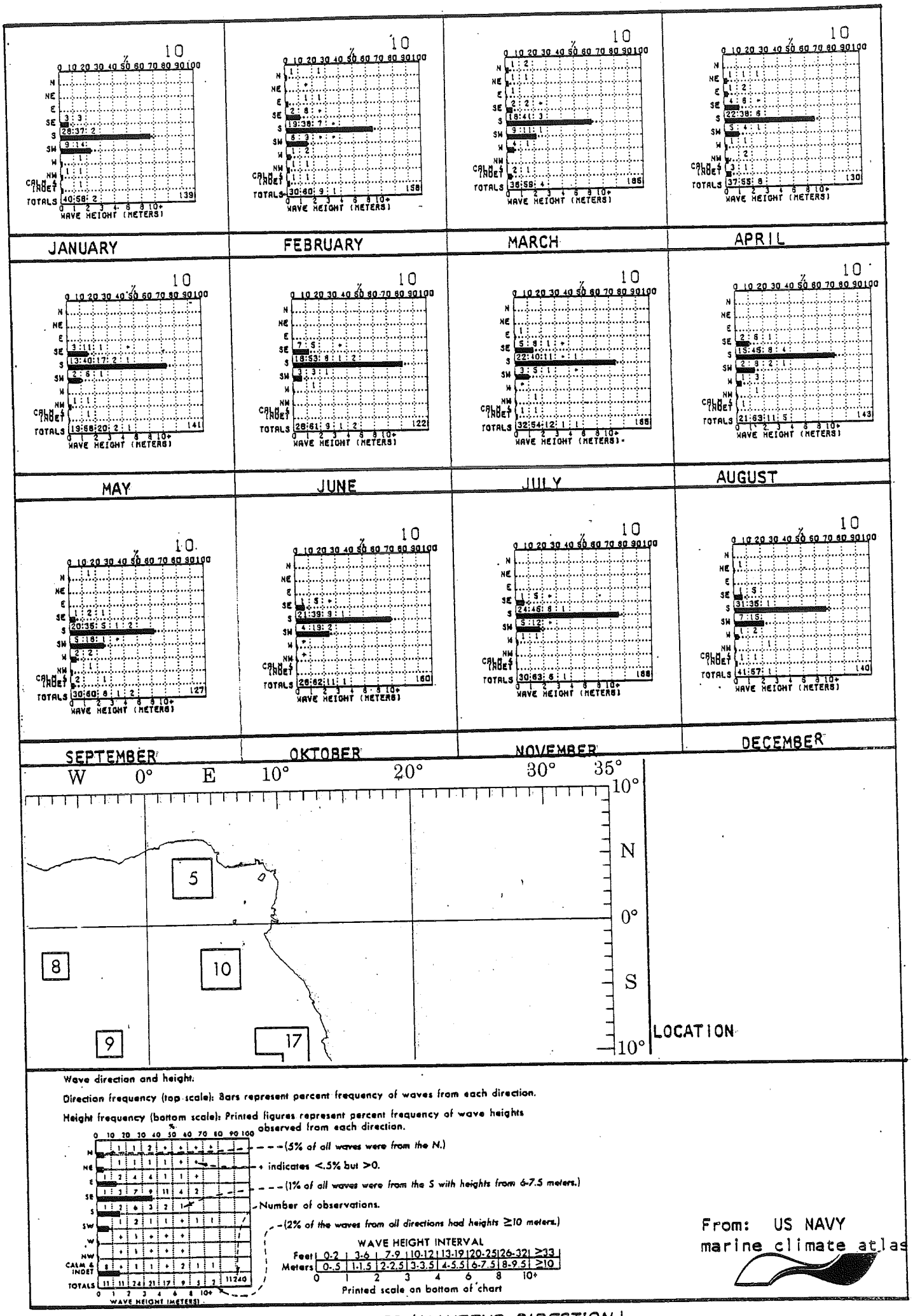
* Nous avons estimé les coûts des enrochements et des rochers à FF 250/tonne

Ces solutions assurent cependant suffisamment de protection. Nous vous recommandons, dans ce cas, en raison des coûts, la solution 3. Dans un stade ultérieur, une couche d'enrochements pourra être déposée si nécessaire, tandisqu'il sera aussi possible de passer à la solution 1. Ceci est moins valable pour la solution 2; en outre pour cette solution beaucoup d'argent a déjà été dépense.

La solution 4 est d'un tout autre caractère. S'il est possible de protéger la crête de la digue de sable par un rideau de palplanches à à un prix raisonnable, il existe la aussi une solution adèquate. Peut être il est mieux de déplacer la digue encore un peut vers le sud afin d'éviter que trop de sable disparaitra dans le canyon.

Pour toutes nos solutions proposées, il est recommandé de procéder au préalable à des analyses de sols afin de pouvoir faire, avant exécution des travaux, des calculs de stabilité et concevoir un projet définitif.

ABU/cwy/10.1.1983/P693



Wave direction and height.

Direction frequency (top scale): Bars represent percent frequency of waves from each direction.

Height frequency (bottom scale): Printed figures represent percent frequency of wave heights observed from each direction.

(5% of all waves were from the N.)

+ indicates <.5% but >0.

(1% of all waves were from the S with heights from 6-7.5 meters.)

Number of observations.

(2% of the waves from all directions had heights ≥10 meters.)

WAVE HEIGHT INTERVAL

Feet	0-2	3-6	7-9	10-12	13-19	20-25	26-32	≥33
Meters	0-.5	1-1.5	2-2.5	3-3.5	4-5.5	6-7.5	8-9.5	≥10

0 1 2 3 4 6 8 10+

Printed scale on bottom of chart

From: US NAVY marine climate atlas

TABLEAU 1: *FREQUENCES DES VAGUES (HAUTEUR, DIRECTION)*

JANUARY

10

PERIOD (SECONDS)

HEIGHT (MTRS)	<6	6-7	8-9	10-11	12-13	>13	INO
0-.5	29	5	0	3	0	0	5
1-1.5	17	16	6	1	3	1	11
2-2.5	0	0	0	2	0	0	0
3-3.5	0	0	0	0	0	0	0
4-6.5	0	0	0	0	0	0	0
6-7.5	0	0	0	0	0	0	0
8-9.5	0	0	0	0	0	0	0
≥10	0	0	0	0	0	0	0

146

FEBRUARY

10

PERIOD (SECONDS)

HEIGHT (MTRS)	<6	6-7	8-9	10-11	12-13	>13	INO
0-.5	21	4	1	1	0	0	7
1-1.5	19	14	6	4	7	0	7
2-2.5	2	4	2	1	0	0	1
3-3.5	0	1	0	0	0	0	0
4-6.5	0	0	0	0	0	0	0
6-7.5	0	0	0	0	0	0	0
8-9.5	0	0	0	0	0	0	0
≥10	0	0	0	0	0	0	0

168

MARCH

10

PERIOD (SECONDS)

HEIGHT (MTRS)	<6	6-7	8-9	10-11	12-13	>13	INO
0-.5	22	2	1	1	0	0	14
1-1.5	20	9	10	1	3	0	15
2-2.5	1	2	2	0	0	0	0
3-3.5	0	0	0	0	0	0	0
4-6.5	0	0	0	0	0	0	0
6-7.5	0	0	0	0	0	0	0
8-9.5	0	0	0	0	0	0	0
≥10	0	0	0	0	0	0	0

194

APRIL

10

PERIOD (SECONDS)

HEIGHT (MTRS)	<6	6-7	8-9	10-11	12-13	>13	INO
0-.5	26	2	1	1	0	0	10
1-1.5	17	11	8	1	6	0	8
2-2.5	1	3	2	1	0	0	0
3-3.5	0	0	0	0	0	0	0
4-6.5	0	0	0	0	0	0	0
6-7.5	0	0	0	0	0	0	0
8-9.5	0	0	0	0	0	0	0
≥10	0	0	0	0	0	0	0

139

MAY

10

PERIOD (SECONDS)

HEIGHT (MTRS)	<6	6-7	8-9	10-11	12-13	>13	INO
0-.5	24	3	3	0	0	0	6
1-1.5	14	22	6	3	6	1	3
2-2.5	1	1	1	1	1	1	0
3-3.5	0	1	0	0	0	0	0
4-6.5	0	1	0	1	0	0	0
6-7.5	0	0	0	0	0	0	0
8-9.5	0	0	0	0	0	0	0
≥10	0	0	0	0	0	0	0

139

JUNE

10

PERIOD (SECONDS)

HEIGHT (MTRS)	<6	6-7	8-9	10-11	12-13	>13	INO
0-.5	17	6	1	0	0	0	3
1-1.5	24	17	10	2	6	0	2
2-2.5	1	2	6	0	1	1	0
3-3.5	0	1	0	0	0	0	0
4-6.5	0	0	0	0	0	0	0
6-7.5	0	0	0	0	0	0	0
8-9.5	0	0	0	0	0	0	0
≥10	0	0	0	0	0	0	0

161

JULY

10

PERIOD (SECONDS)

HEIGHT (MTRS)	<6	6-7	8-9	10-11	12-13	>13	INO
0-.5	20	5	1	0	0	0	5
1-1.5	24	20	6	4	3	3	3
2-2.5	1	2	2	2	0	0	1
3-3.5	0	0	1	0	0	0	0
4-6.5	0	0	0	0	0	0	0
6-7.5	0	0	0	0	0	0	0
8-9.5	0	0	0	0	0	0	0
≥10	0	0	0	0	0	0	0

191

AUGUST

10

PERIOD (SECONDS)

HEIGHT (MTRS)	<6	6-7	8-9	10-11	12-13	>13	INO
0-.5	24	6	8	0	0	0	6
1-1.5	22	20	4	0	3	1	5
2-2.5	1	1	0	0	0	0	0
3-3.5	0	0	0	0	0	0	0
4-6.5	0	0	0	0	0	0	0
6-7.5	0	0	0	0	0	0	0
8-9.5	0	0	0	0	0	0	0
≥10	0	0	0	0	0	0	0

145

SEPTEMBER

10

PERIOD (SECONDS)

HEIGHT (MTRS)	<6	6-7	8-9	10-11	12-13	>13	INO
0-.5	21	3	1	+	+	+	0
1-1.5	22	16	6	2	1	+	+
2-2.5	3	6	4	3	1	+	+
3-3.5	+	1	1	1	1	+	+
4-6.5	+	+	+	+	+	+	0
6-7.5	0	+	+	0	0	+	0
8-9.5	0	0	0	+	0	0	0
≥10	0	0	0	0	0	+	0

146

OKTOBER

10

PERIOD (SECONDS)

HEIGHT (MTRS)	<6	6-7	8-9	10-11	12-13	>13	INO
0-.5	21	4	1	1	0	0	7
1-1.5	19	14	6	4	7	0	7
2-2.5	2	4	2	1	0	0	1
3-3.5	0	1	0	0	0	0	0
4-6.5	0	0	0	0	0	0	0
6-7.5	0	0	0	0	0	0	0
8-9.5	0	0	0	0	0	0	0
≥10	0	0	0	0	0	0	0

168

NOVEMBER

10

PERIOD (SECONDS)

HEIGHT (MTRS)	<6	6-7	8-9	10-11	12-13	>13	INO
0-.5	22	2	1	1	0	0	14
1-1.5	20	9	10	1	3	0	15
2-2.5	1	2	2	0	0	0	0
3-3.5	0	0	0	0	0	0	0
4-6.5	0	0	0	0	0	0	0
6-7.5	0	0	0	0	0	0	0
8-9.5	0	0	0	0	0	0	0
≥10	0	0	0	0	0	0	0

194

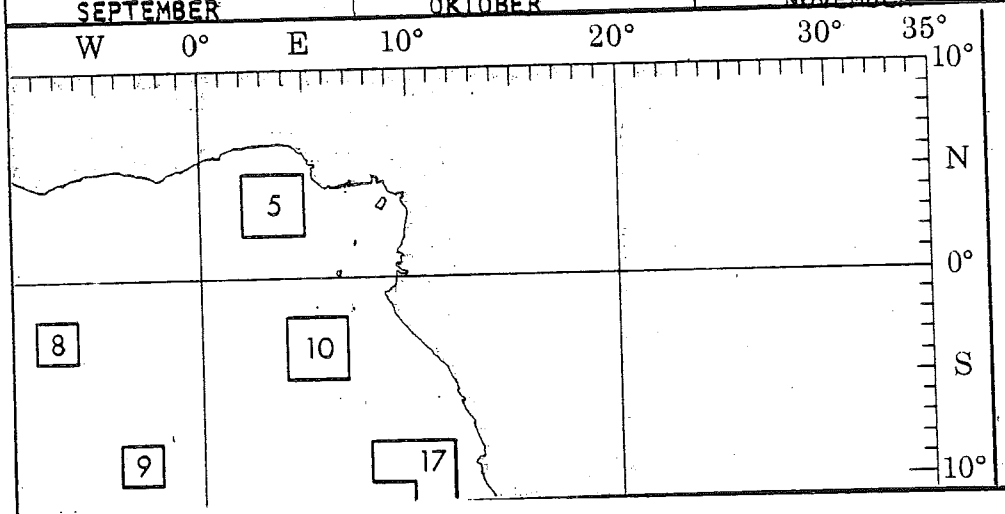
DECEMBER

10

PERIOD (SECONDS)

HEIGHT (MTRS)	<6	6-7	8-9	10-11	12-13	>13	INO
0-.5	26	2	1	1	0	0	10
1-1.5	17	11	8	1	6	0	8
2-2.5	1	3	2	1	0	0	0
3-3.5	0	0	0	0	0	0	0
4-6.5	0	0	0	0	0	0	0
6-7.5	0	0	0	0	0	0	0
8-9.5	0	0	0	0	0	0	0
≥10	0	0	0	0	0	0	0

139



LOCATION

PERIOD (Seconds)

HEIGHT (METRES)	<6	6-7	8-9	10-11	12-13	>13	INO
0-.5	21	3	1	+	+	+	0
1-1.5	22	16	6	2	1	+	+
2-2.5	3	6	4	3	1	+	+
3-3.5	+	1	1	1	1	+	+
4-6.5	+	+	+	+	+	+	0
6-7.5	0	+	+	0	0	+	0
8-9.5	0	0	0	+	0	0	0
≥10	0	0	0	0	0	+	0

4010

Percent frequency of occurrence of wave period and height.

(2% of observed waves had a height of 1-1.5 meters and a period of 10-11 seconds.)

+ indicates <.5% but >0.

Number of observations.

Waves are selected on the basis of the higher of sea and swell when both are reported. If both heights are equal, the wave with the longer period is selected.

From: US NAVY marine climate atlas

TABLEAU 2: *FREQUENCES DES VAGUES (HAUTEUR, PERIODE).*

TABLEAU 3: *FREQUENCES DES VAGUES (HAUTEUR, PERIODE ET DIRECTION.)*

PERIOD FROM MONTH 1 UNTIL 12 INCLUDED

PERIOD CLASS	HEIGHT CLASS	=====FREQUENCY OF OCCURRANCE (%)===== N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	IND	TOTAL
1	1	.12	.18	.18	1.87	14.63	3.51	.64	.18	.70	22.00
1	2	.06	.06	.09	1.89	13.90	3.43	.40	.23	.20	20.25
1	3	.01	.01	.01	.04	.75	.09	.00	.01	.00	.92
2	1	.02	.03	.03	.28	2.16	.52	.10	.03	.10	3.25
2	2	.04	.04	.07	1.47	10.81	2.67	.31	.18	.16	15.75
2	3	.03	.03	.03	.11	2.10	.27	.00	.03	.00	2.58
2	4	.00	.00	.00	.00	.45	.05	.00	.00	.00	.50
2	5	.00	.00	.00	.00	.17	.00	.00	.00	.00	.17
3	1	.01	.01	.01	.12	.94	.23	.04	.01	.05	1.42
3	2	.02	.02	.03	.61	4.46	1.10	.13	.07	.06	6.50
3	3	.03	.03	.03	.10	2.04	.26	.00	.03	.00	2.50
3	4	.00	.00	.00	.00	.30	.03	.00	.00	.00	.33
3	5	.00	.00	.00	.00	.08	.00	.00	.00	.00	.08
4	1	.01	.01	.01	.11	.83	.20	.04	.01	.04	1.25
4	2	.01	.01	.01	.26	1.89	.47	.05	.03	.03	2.75
4	3	.01	.01	.01	.04	.75	.09	.00	.01	.00	.92
4	4	.00	.00	.00	.00	.08	.01	.00	.00	.00	.08
4	5	.00	.00	.00	.00	.08	.00	.00	.00	.00	.08
5	2	.01	.01	.02	.38	2.80	.69	.08	.05	.04	4.08
5	3	.01	.01	.01	.02	.48	.06	.00	.01	.00	.58
5	4	.00	.00	.00	.00	.08	.01	.00	.00	.00	.08
6	2	.00	.00	.00	.06	.46	.11	.01	.01	.01	.67
6	3	.00	.00	.00	.01	.20	.03	.00	.00	.00	.25
6	5	.00	.00	.00	.00	.08	.00	.00	.00	.00	.08
7	1	.03	.05	.05	.54	4.21	1.01	.19	.05	.20	6.33
7	2	.02	.02	.03	.61	4.46	1.10	.13	.07	.06	6.50
7	3	.01	.01	.01	.03	.68	.09	.00	.01	.00	.83
7	5	.00	.00	.00	.00	.17	.00	.00	.00	.00	.17
	TOTAL	.43	.52	.60	8.54	70.04	16.02	2.12	1.00	1.65	100.00

END OF PROGRAM

period class:

1 < 6 sec
2 6- 7 sec
3 8- 9 sec
4 10-11 sec
5 12-13 sec
6 >13 sec
7 indifferent

height class:

1 0.40 m
2 1.25 m
3 2.25 m
4 3.25 m
5 4.75 m

No.	H (m)	T (sec)	Dir	%
1	1.25	4	SW	7
2	1.25	6.5	SW	3.5
3	1.25	8.5	SW	1.6
4	1.25	10.5	SW	0.8
5	1.25	12.5	SW	0.8
6	1.25	15	SW	0.15
7	0.40	4	W	1.0
8	1.25	6.5	W	0.4
9	1.25	4	S	29.3
10	1.25	6.5	S	15.7
11	1.25	8.5	S	7.8
12	1.25	10.5	S	3.6
13	1.25	12.5	S	3.4
14	1.25	15	S	0.7

TABLEAU 4: *CLIMAT DE VAGUES UTILISE DANS LE MODELE DE REFRACTION.*

4° south
11° east

Wave data Gabon near boundary with Congo

depth: 25 m

period (sec)	H_s 0	0.5	1.0	1.5	(m) tot	
5		105			105	
6		175	7		182	
7		147	28		175	
8		294	28		322	
9		49	49		98	
10		21	49		70	
11			35		35	
12			14		14	
13						
	0	791	210		1001	data ‰

measurements: November 1981

source: Elf Aquitaine

TABLEAU 5: *OBSERVATIONS DE VAGUES A LA FRONTIERE GABON-CONGO (NOVEMBRE 1981).*

coupe	Transport littoral en m^3/an								sédimentation (+) érosion (-) (m^3/an)
	SUD						autres directions	total	
	T = 4 s 29,3%	T = 6,5 s 15,7%	T = 8,5 s 7,8%	T = 10,5 s 3,6%	T = 12,5 s 3,4%	T = 15 s 0,7%	39,5%	100%	
1	25.671	38.773	36.382	27.577	40.539	11.007	35.233	215.182	+ 1.000
2	18.705	38.461	36.444	27.365	40.134	10.515	42.256	213.880	+ 31.000
3	9.550	27.675	30.720	24.068	36.713	11.521	41.471	181.718	+ 19.000
4	3.055	23.890	27.493	23.078	33.897	11.674	40.093	163.180	- 5.000
5	2.209	22.808	28.122	24.854	38.273	13.050	39.459	168.775	

T. 6A: Données de base: Marine Climate Atlas of the World (U.S. Navy)

coupe	Transport littoral en m^3/an								sédimentation (+) érosion (-) (m^3/an)
	SUD						autres directions	total	
	T = 4 s 6,3%	T = 6,5 s 10,9%	T = 8,5 s 29,8%	T = 10,5 s 10,1%	T = 12,5 s 2,9%	T = 15 s 0%	40%	100%	
1	5.520	26.919	139.000	77.313	34.577	-	35.233	318.562	- 5.000
2	4.022	26.702	139.235	76.774	34.232	-	42.256	323.221	+ 4.400
3	2.053	19.214	117.366	67.524	31.314	-	41.471	278.942	+ 23.000
4	657	16.586	105.037	64.747	28.912	-	40.093	256.032	- 9.000
5	475	15.835	107.440	69.729	32.644	-	39.459	265.582	

T. 6B: Données de base: Observations Novembre 1981 à la frontière Gabon-Congo

Tableau 6: Tranport littoral calculé avec le méthode Bijker-Battjes

coupe	Transport littoral en m^3/an								sédimentation (+) érosion (-) (m^3/an)
	SUD						autres directions 39,5%	total 100%	
	T = 4 s 29,3%	T = 6,5 s 15,7%	T = 8,5 s 7,8%	T = 10,5 s 3,6%	T = 12,5 s 3,4%	T = 15 s 0,7%			
1	247.431	225.754	163.640	105.925	139.757	33.510	195.634	1.111.651	+ 44.000
2	179.965	224.595	164.270	105.047	138.357	32.106	223.205	1.067.545	+ 153.000
3	96.888	167.706	147.709	99.629	136.497	38.813	227.060	914.302	+ 80.000
4	54.877	152.549	137.314	96.993	128.726	39.301	224.180	833.940	- 3.300
5	50.855	148.279	139.283	102.467	140.930	42.571	212.820	837.204	

T. 7A: Données de base: Marine Climatic Atlas of the World (U.S. Navy)

coupe	Transport littoral en m^3/an								sédimentation (+) érosion (-) (m^3/an)
	SUD						autres directions 40%	total 100%	
	T = 4 s 6,3%	T = 6,5 s 10,9%	T = 8,5 s 29,8%	T = 10,5 s 10,1%	T = 12,5 s 2,9%	T = 15 s 0%			
1	53.200	156.730	625.190	297.180	119.200	-	195.634	1.447.134	- 11.000
2	38.700	155.930	627.600	294.715	118.010	-	223.205	1.458.205	+ 134.000
3	20.830	116.430	564.320	279.510	116.420	-	227.060	1.324.560	+ 76.000
4	11.800	105.910	524.610	272.120	109.800	-	224.180	1.248.420	- 18.000
5	10.935	102.880	532.130	287.480	120.205	-	212.820	1.266.450	

T. 7B: Données de base: Observations Novembre 1981 à la frontière Gabon-Congo.

Tableau 7: Transport littoral calculé avec CERC-formule

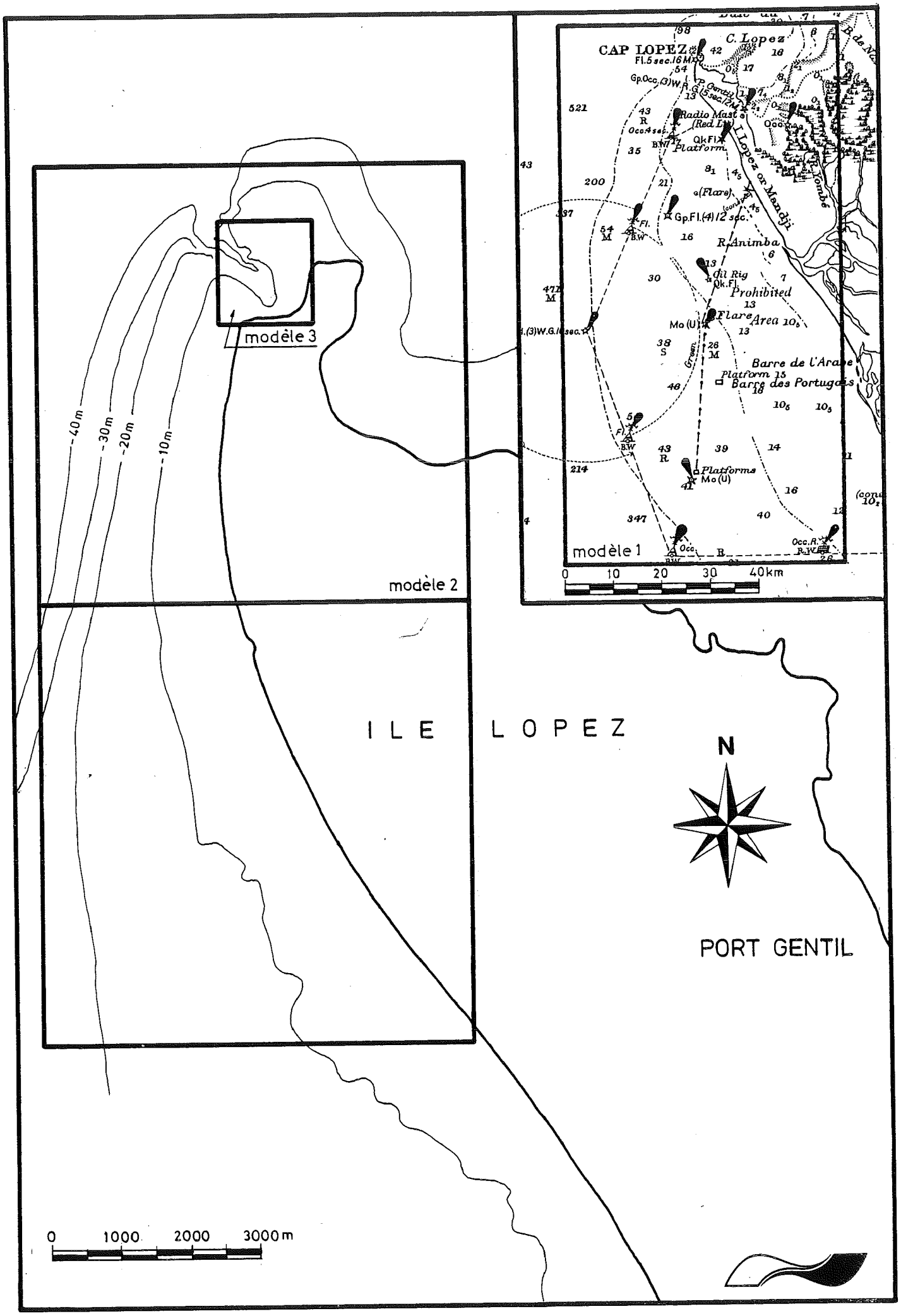


FIGURE 1 : *SITUATION DU CAP LOPEZ ET DE DIVERS MODELES*

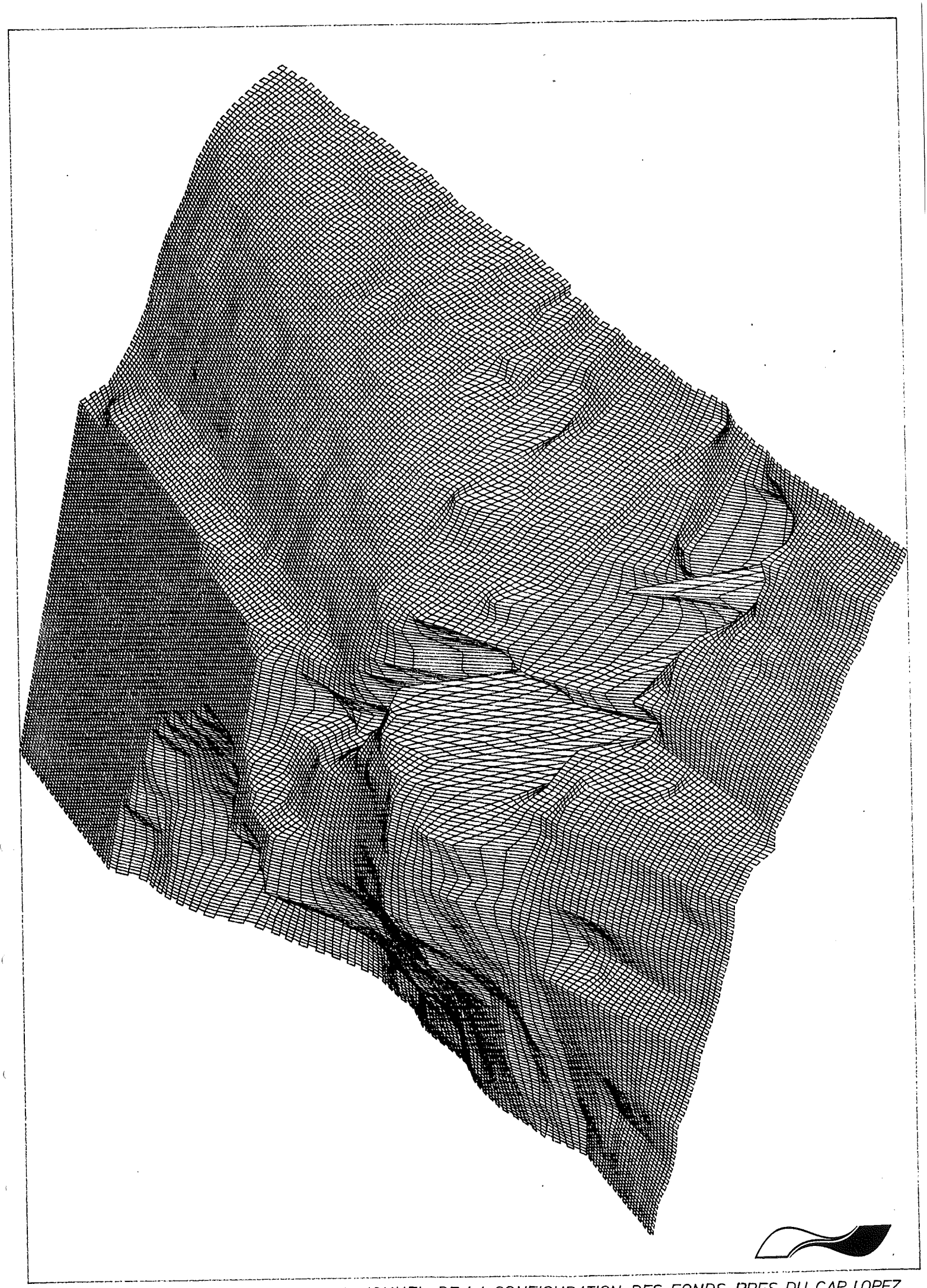


FIGURE 2: *SCHEMA TRIDIMENSIONNEL DE LA CONFIGURATION DES FONDS PRES DU CAP LOPEZ*

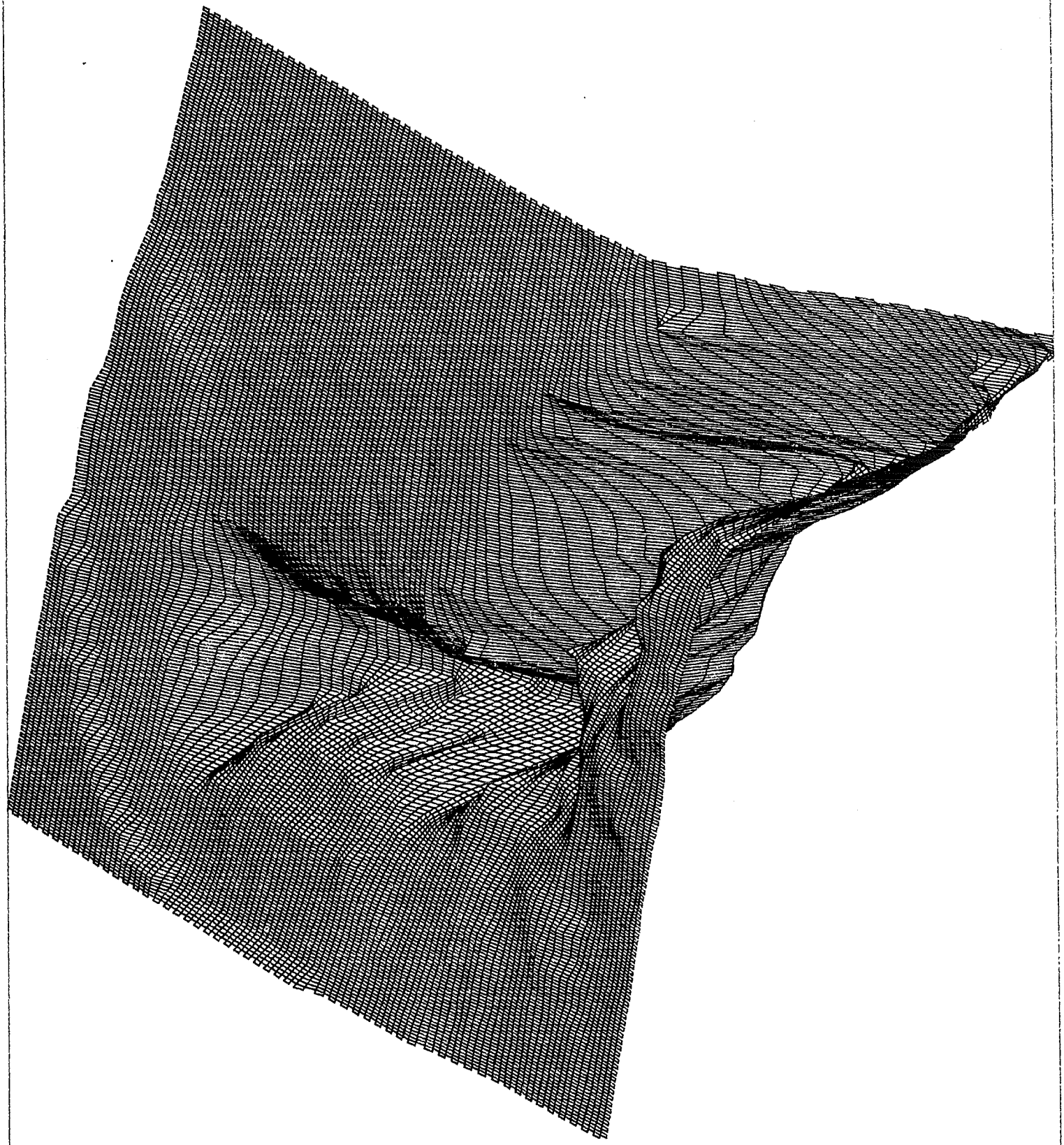


FIGURE 3: *SCHEMA TRIDIMENSIONNEL DU CANYON SOUS-MARIN.*

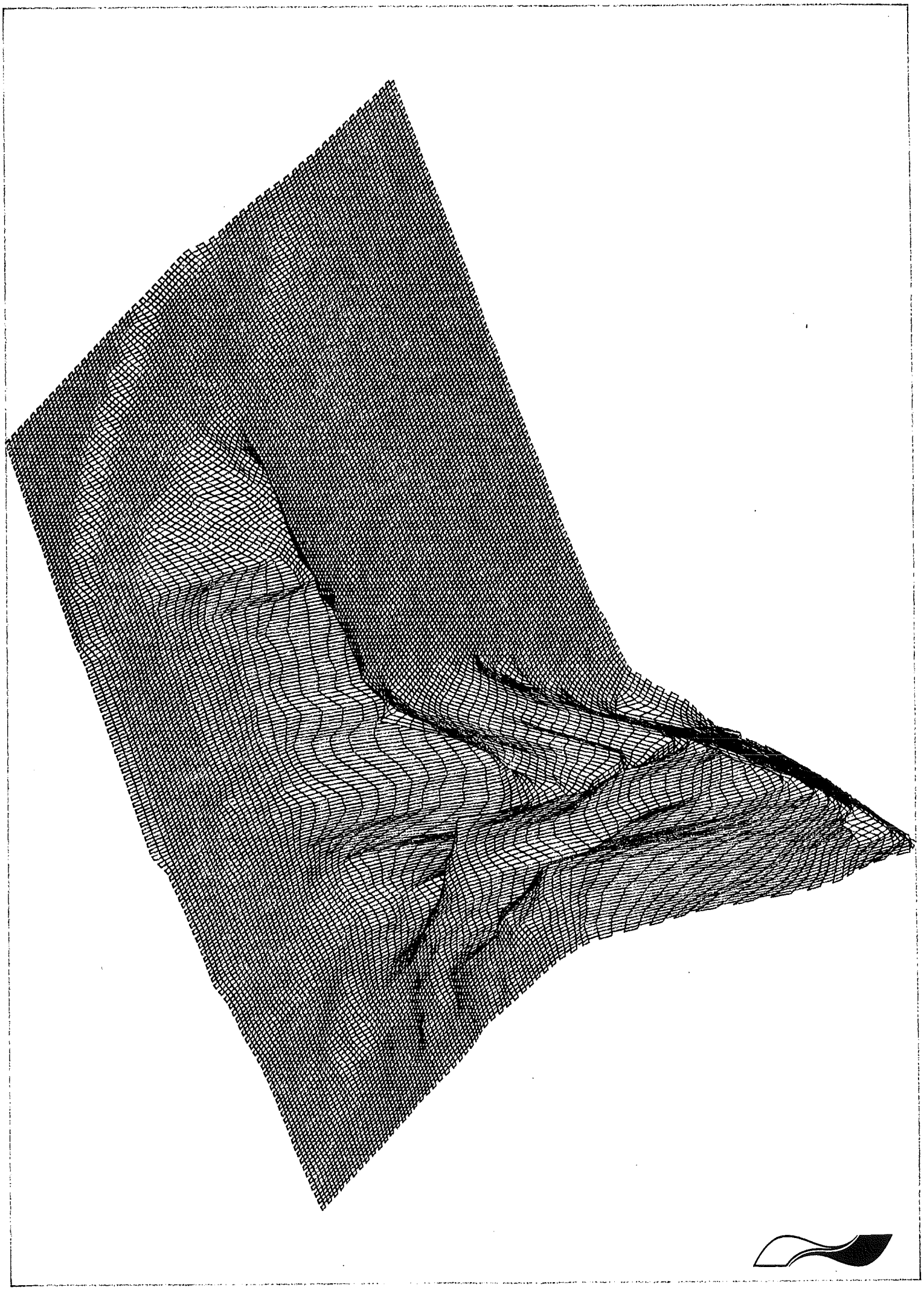


FIGURE 4 : *SCHEMA TRIDIMENSIONNEL DU CANYON SOUS-MARIN.*

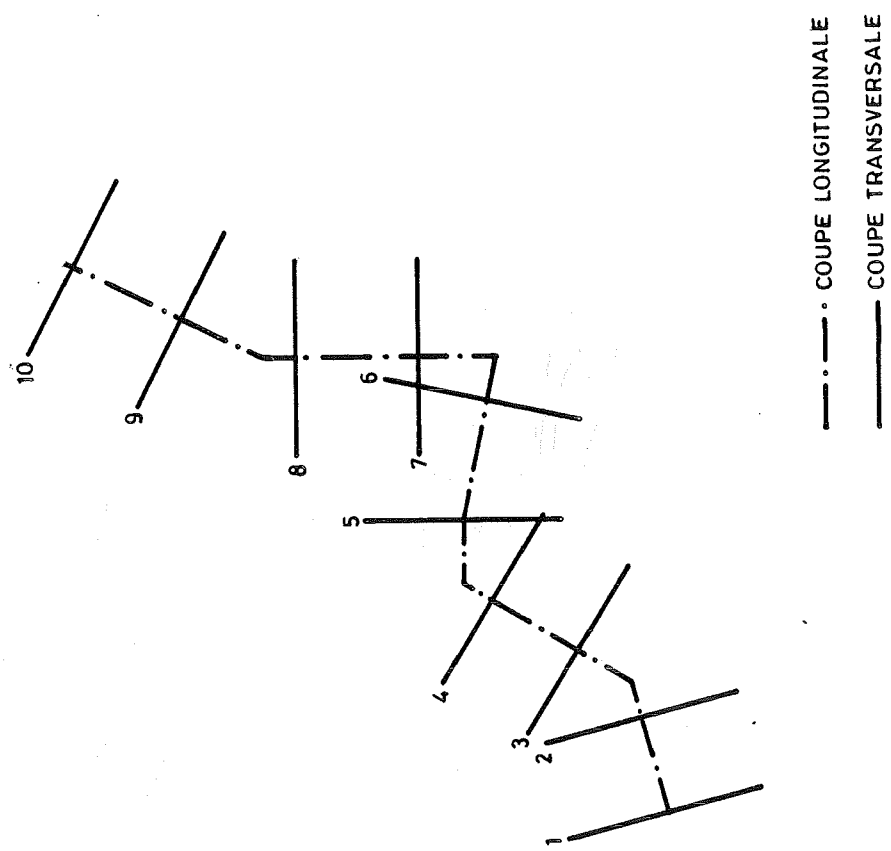


FIGURE 5A: *CONTOURS DES FONDS DU CANYON SOUS-MARIN*

FIGURE 5B: *CONTOURS DES FONDS DU CANYON SOUS-MARIN (DETAIL)*

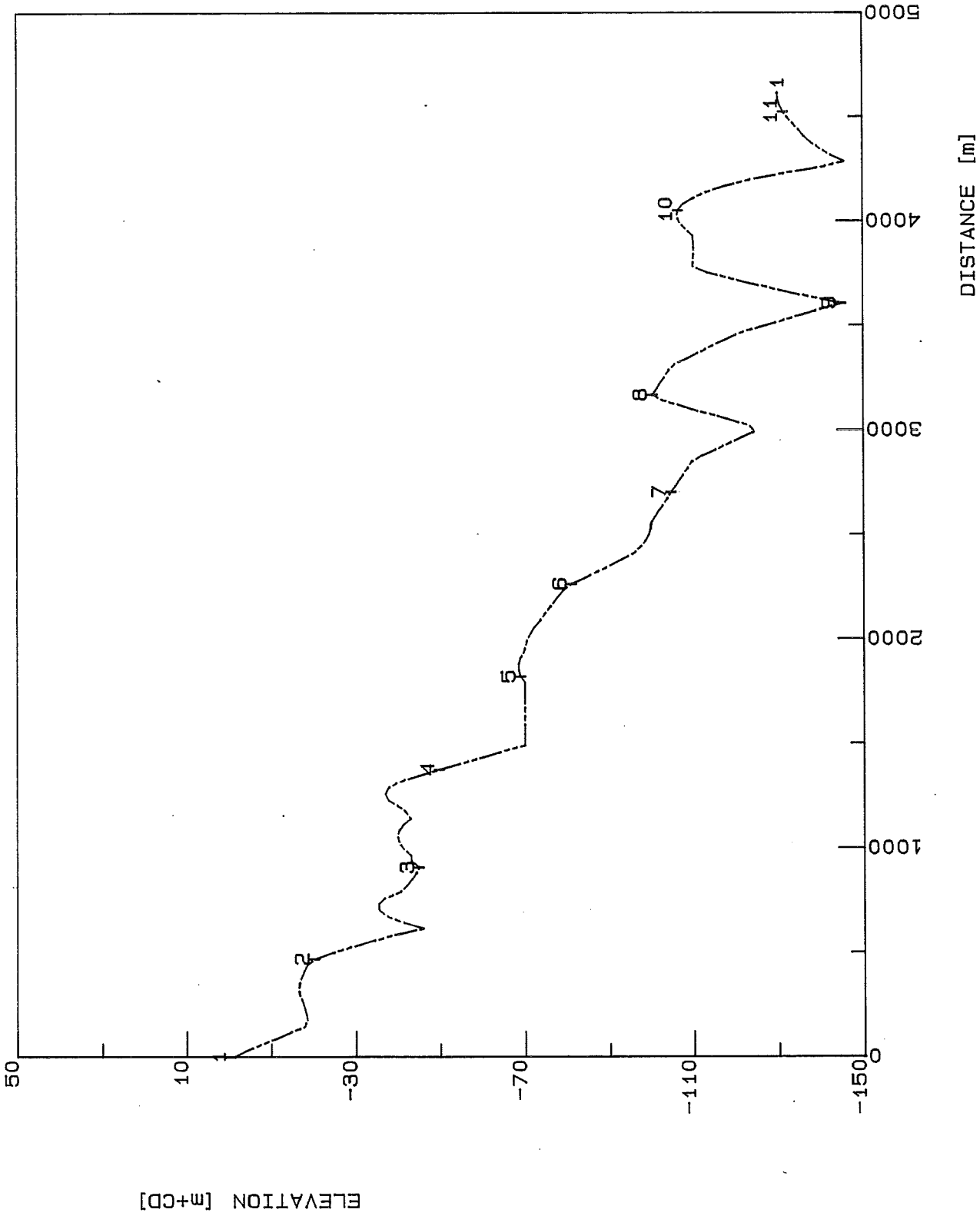


FIGURE 6: *COUPE LONGITUDINALE DU CANYON.*

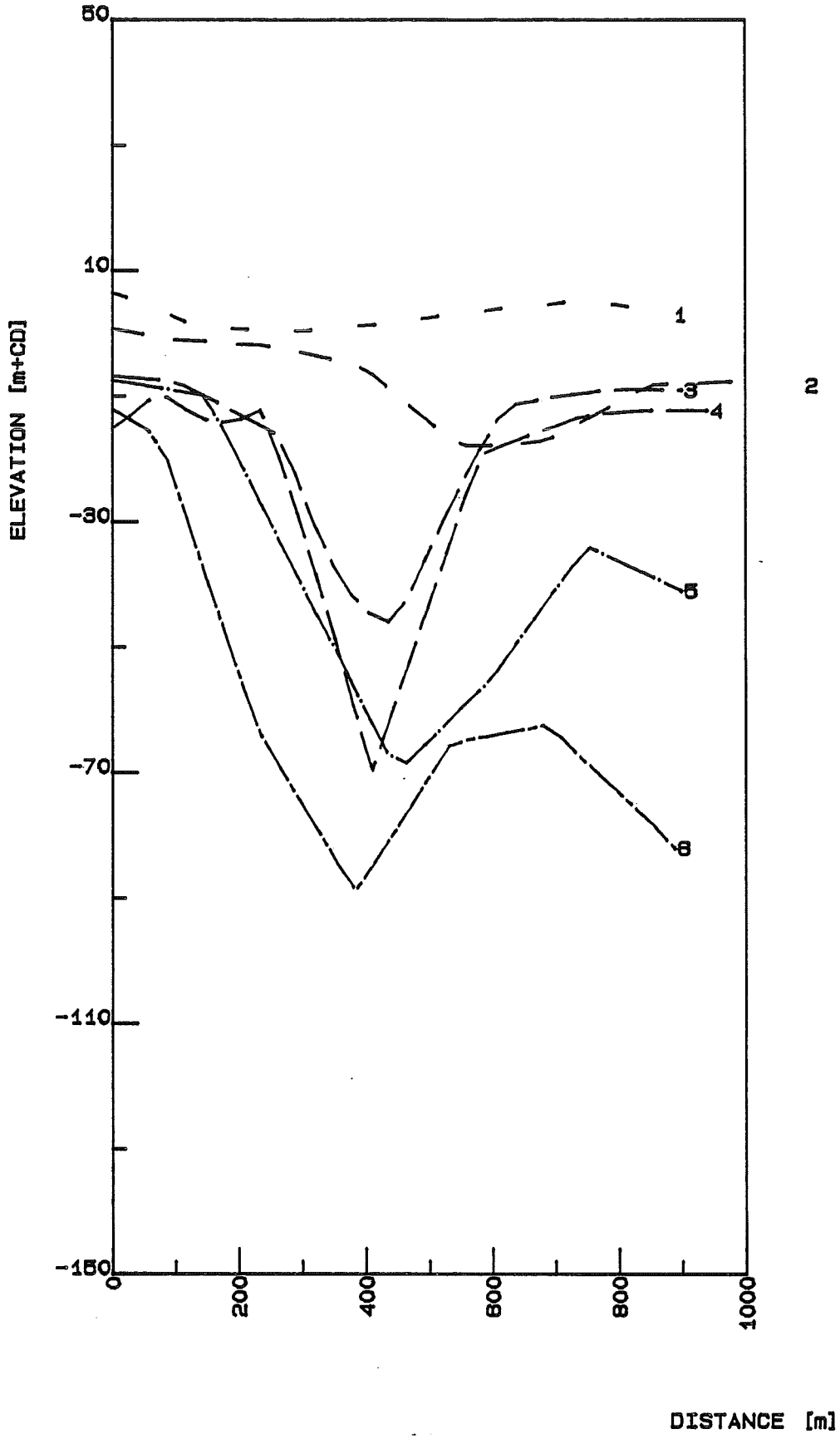


FIGURE 7A: *COUPES TRANSVERSALES DU CANYON.*

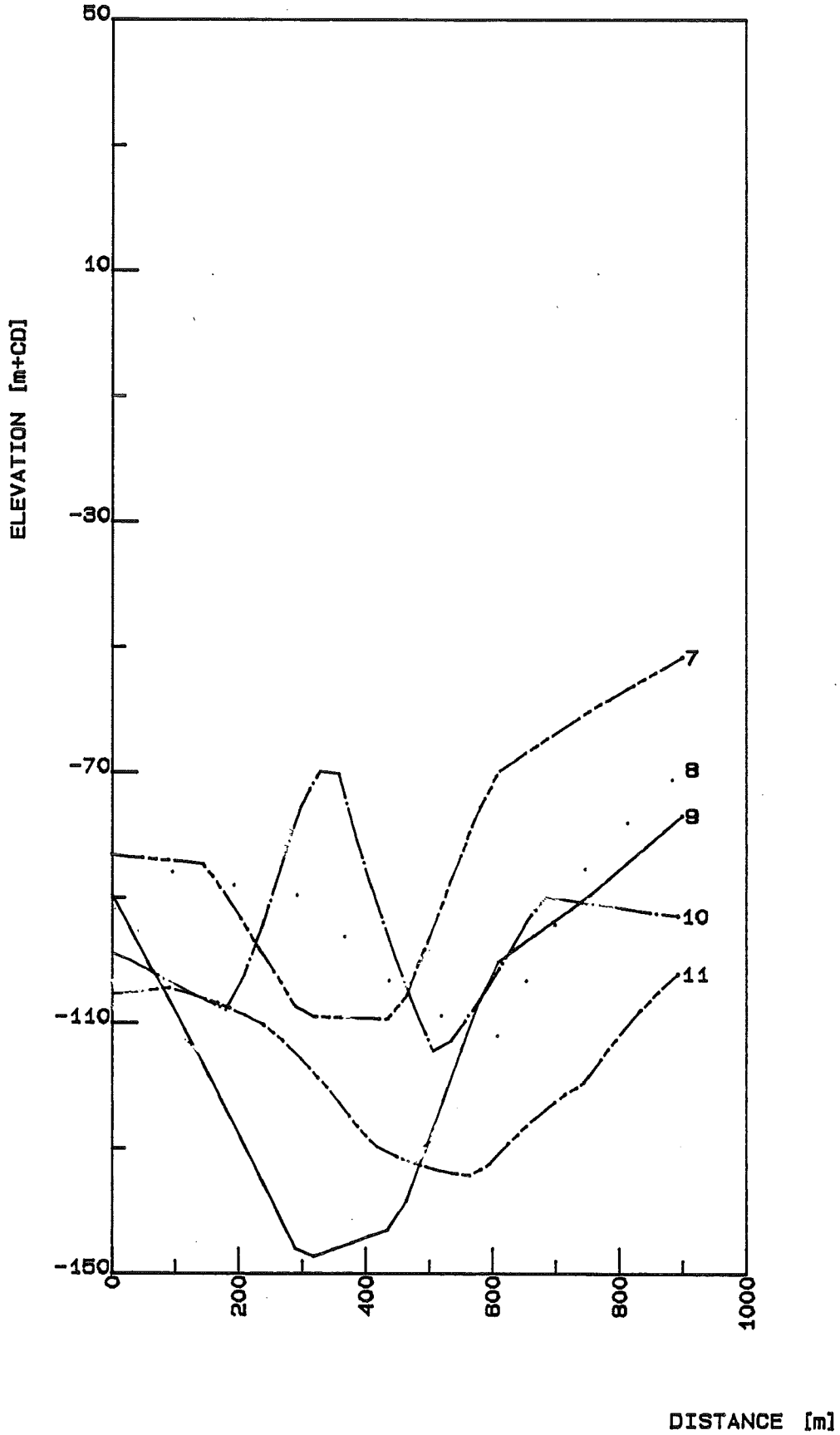


FIGURE 7B: *COUPES TRANSVERSALES DU CANYON.*

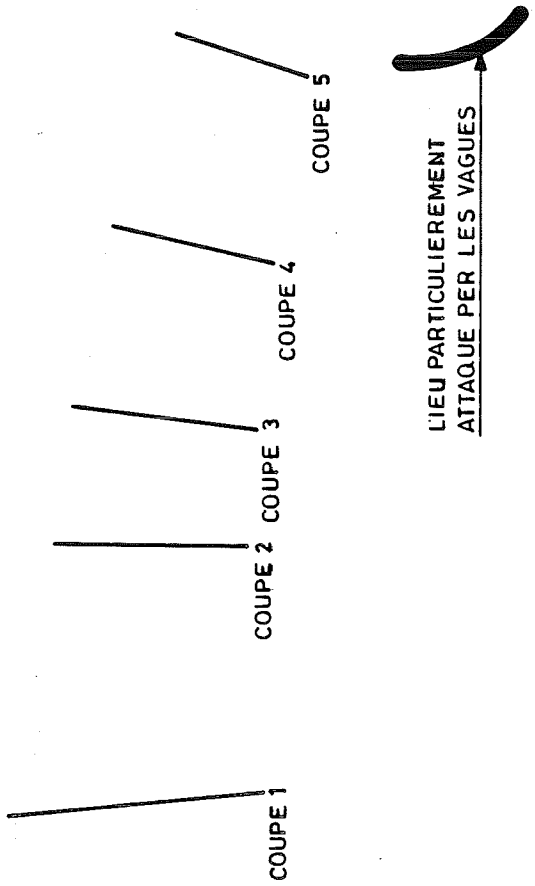


FIGURE 8: *LIEU PARTICULIEREMENT ATTAQUE PAR LES VAGUES ET COUPES POUR LESQUELS LE TRANSPORT LITTORAL A ETE CALCULE.*

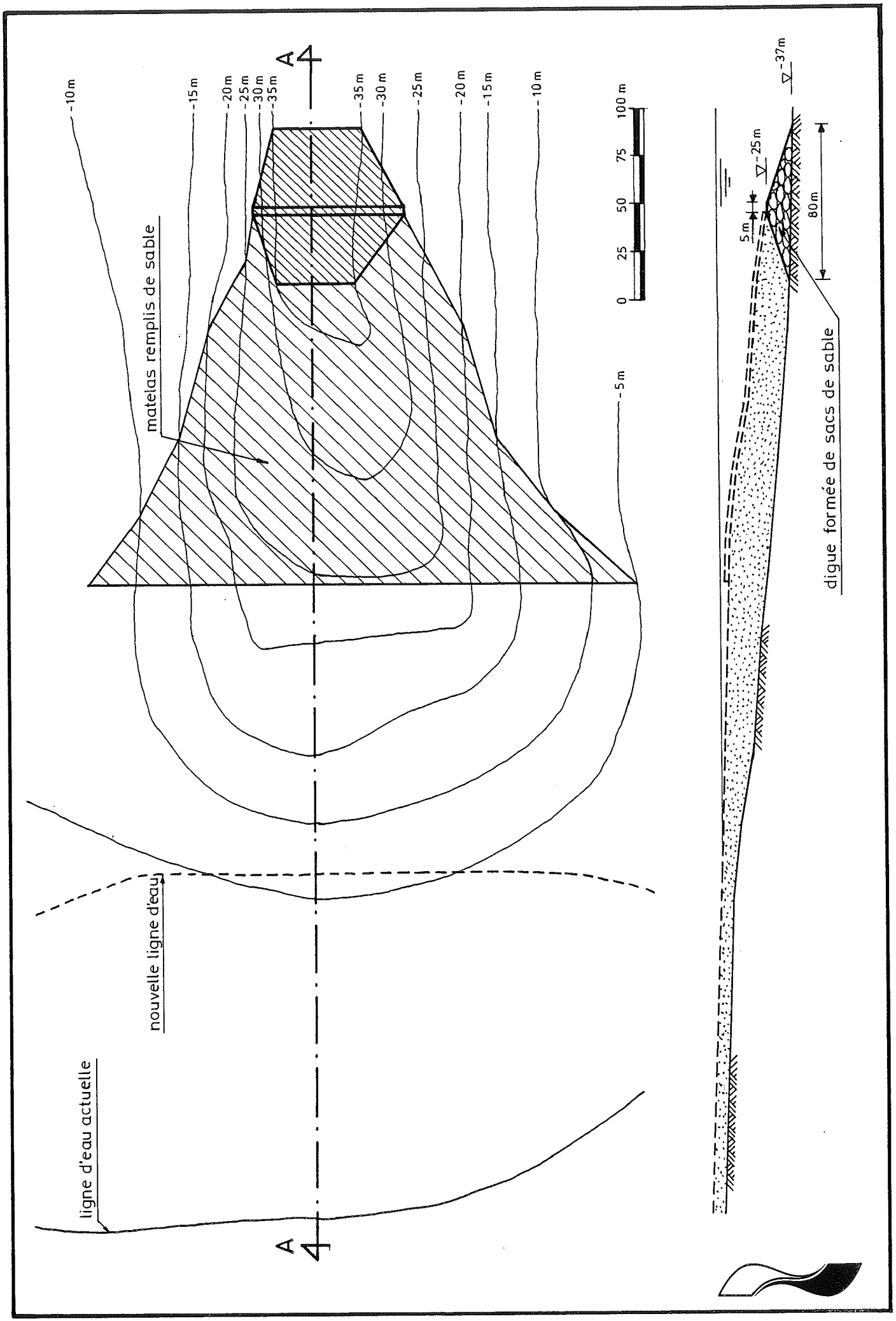
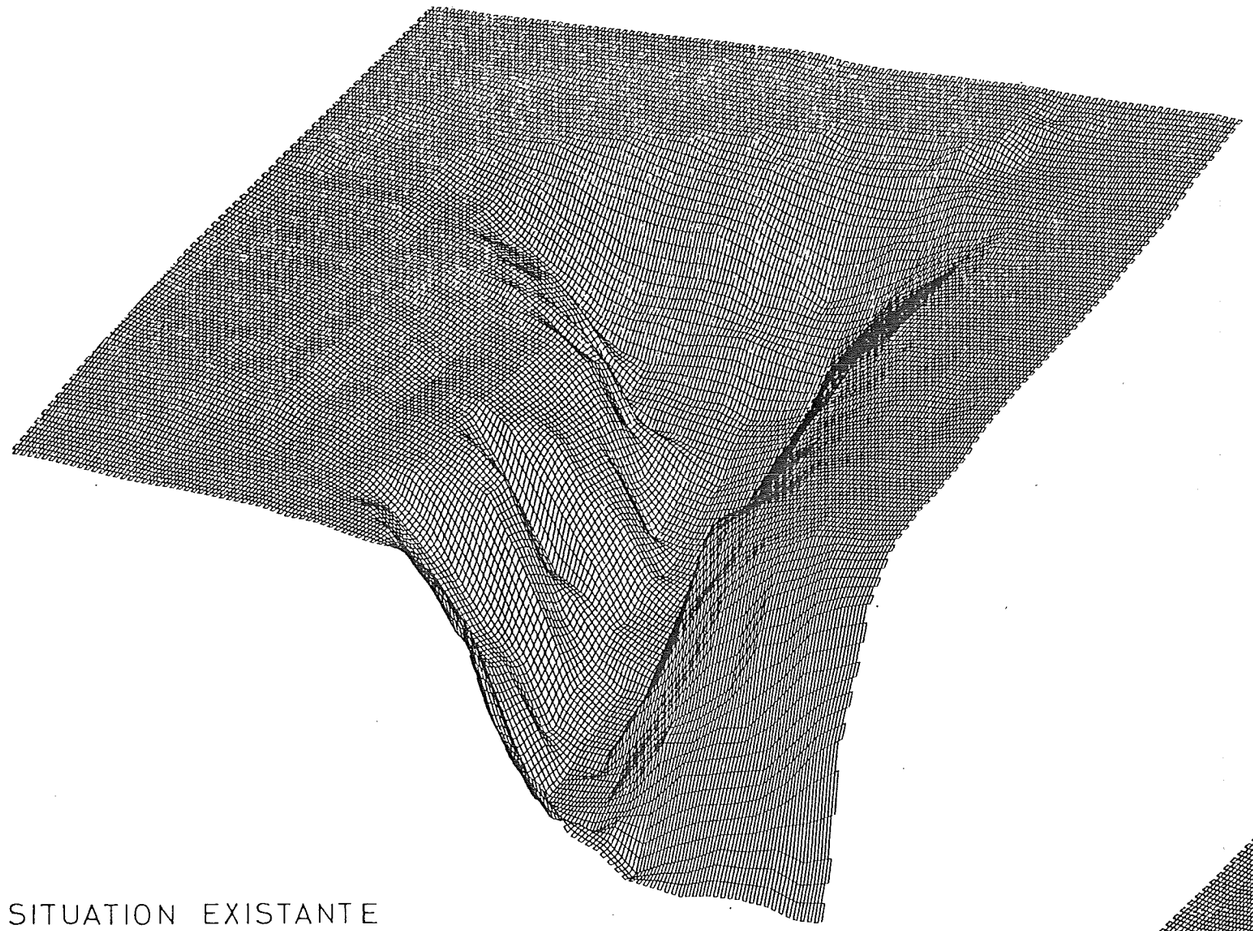
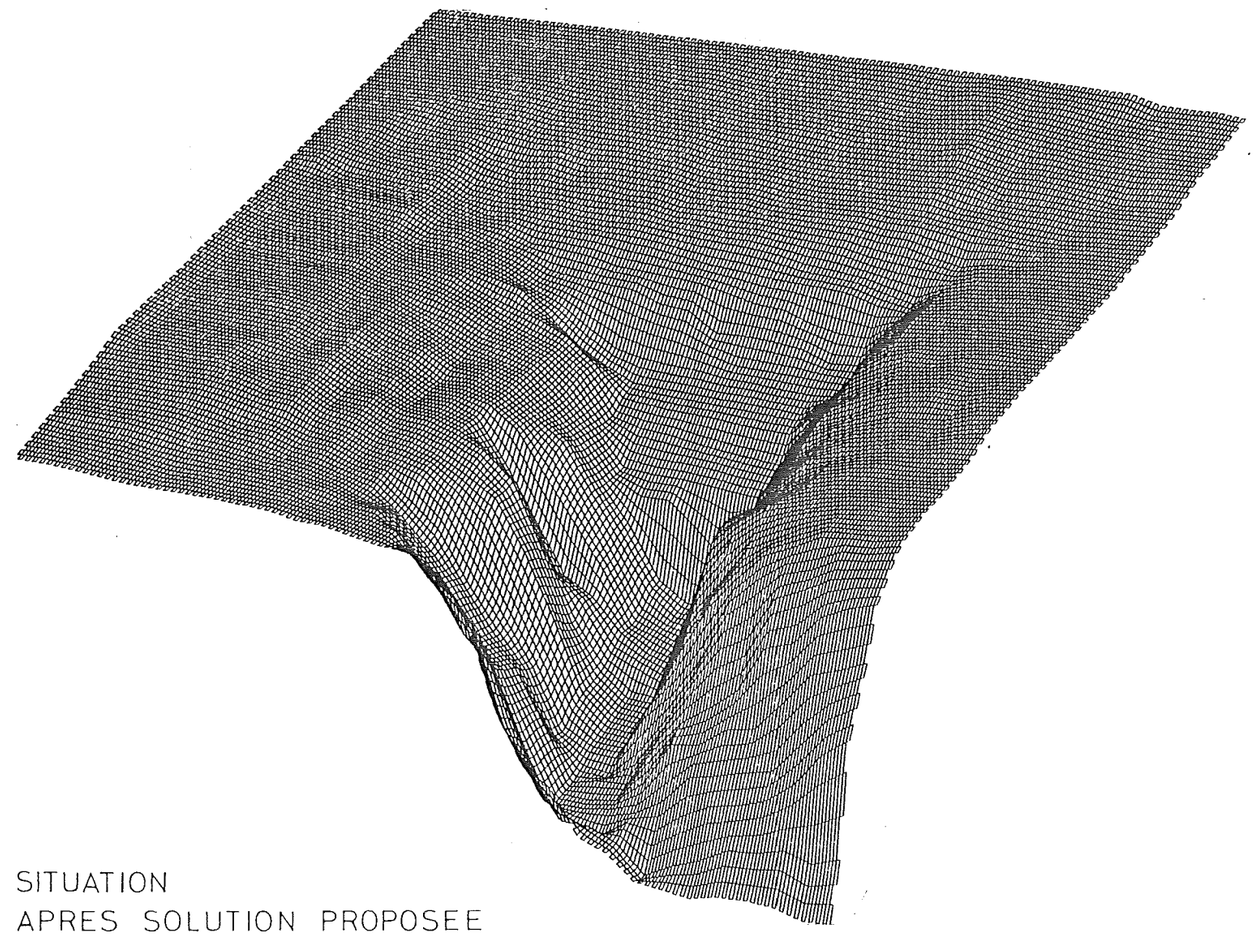


FIGURE 9: *SOLUTION 1*

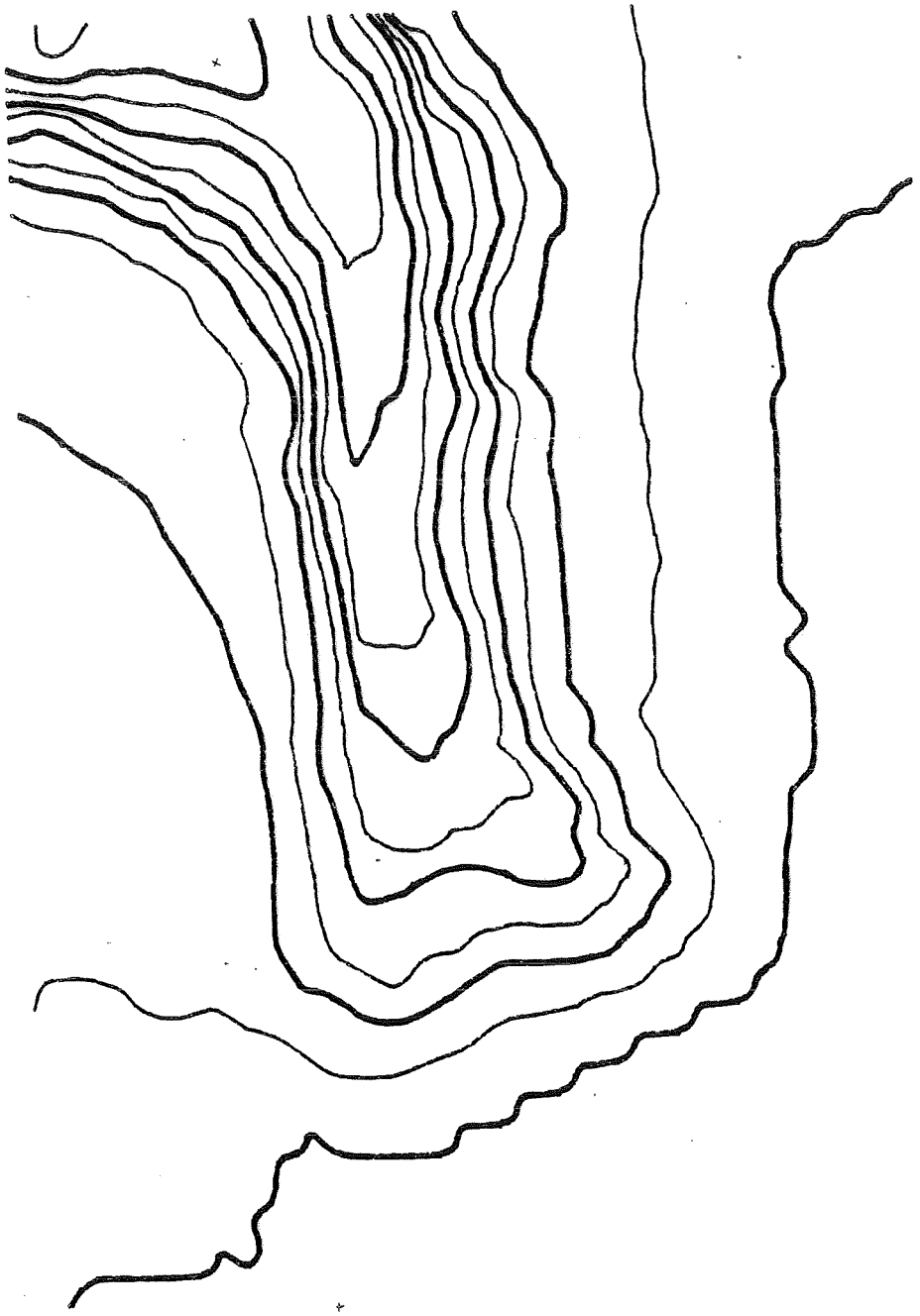


SITUATION EXISTANTE



SITUATION
APRES SOLUTION PROPOSEE

FIGURE 10: *SOLUTION 1: SCHEMA TRI-DIMENSIONNEL*



SITUATION EXISTANTE

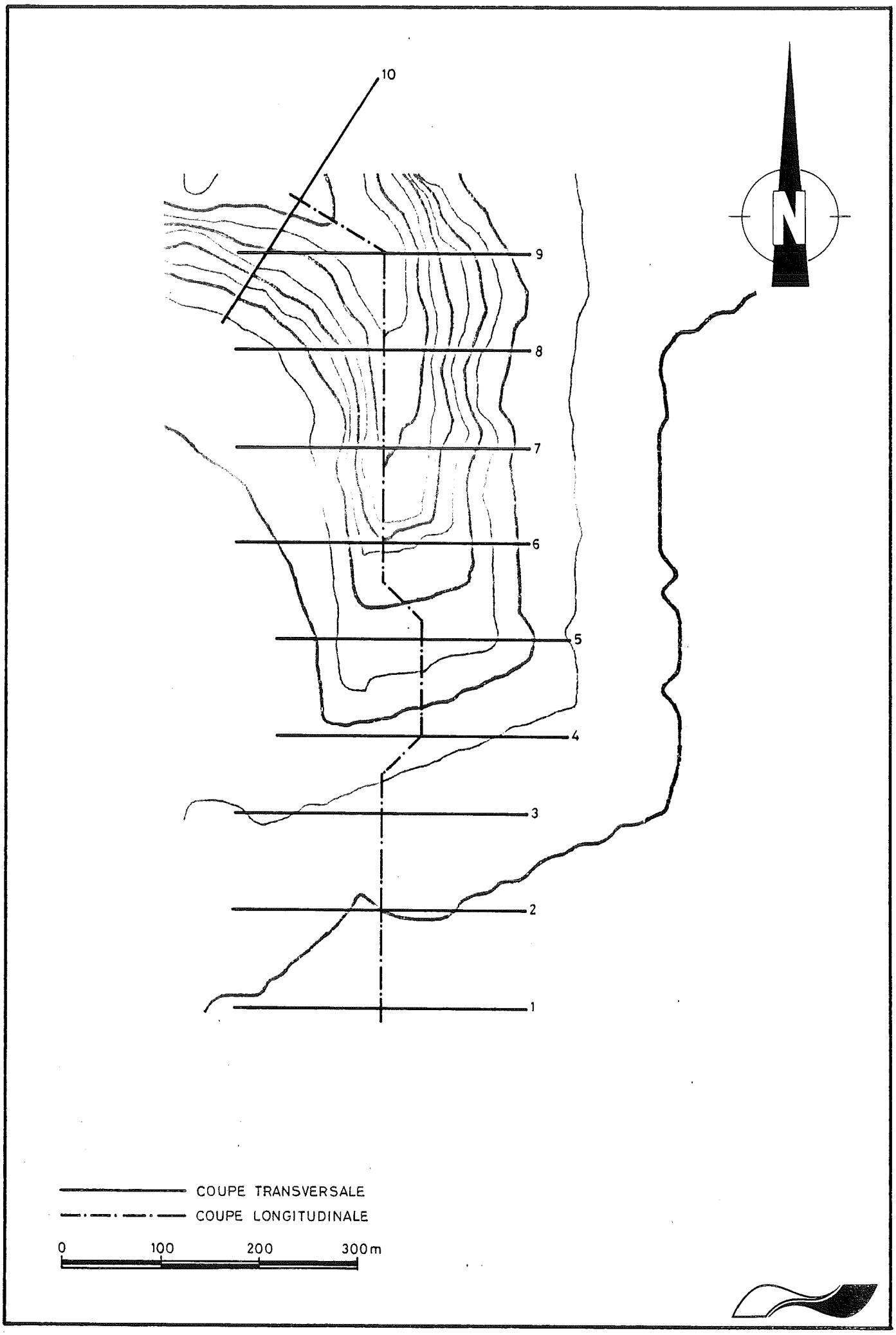


FIGURE 11: *SOLUTION 1 - SCHEMA BATHYMETRIQUE*

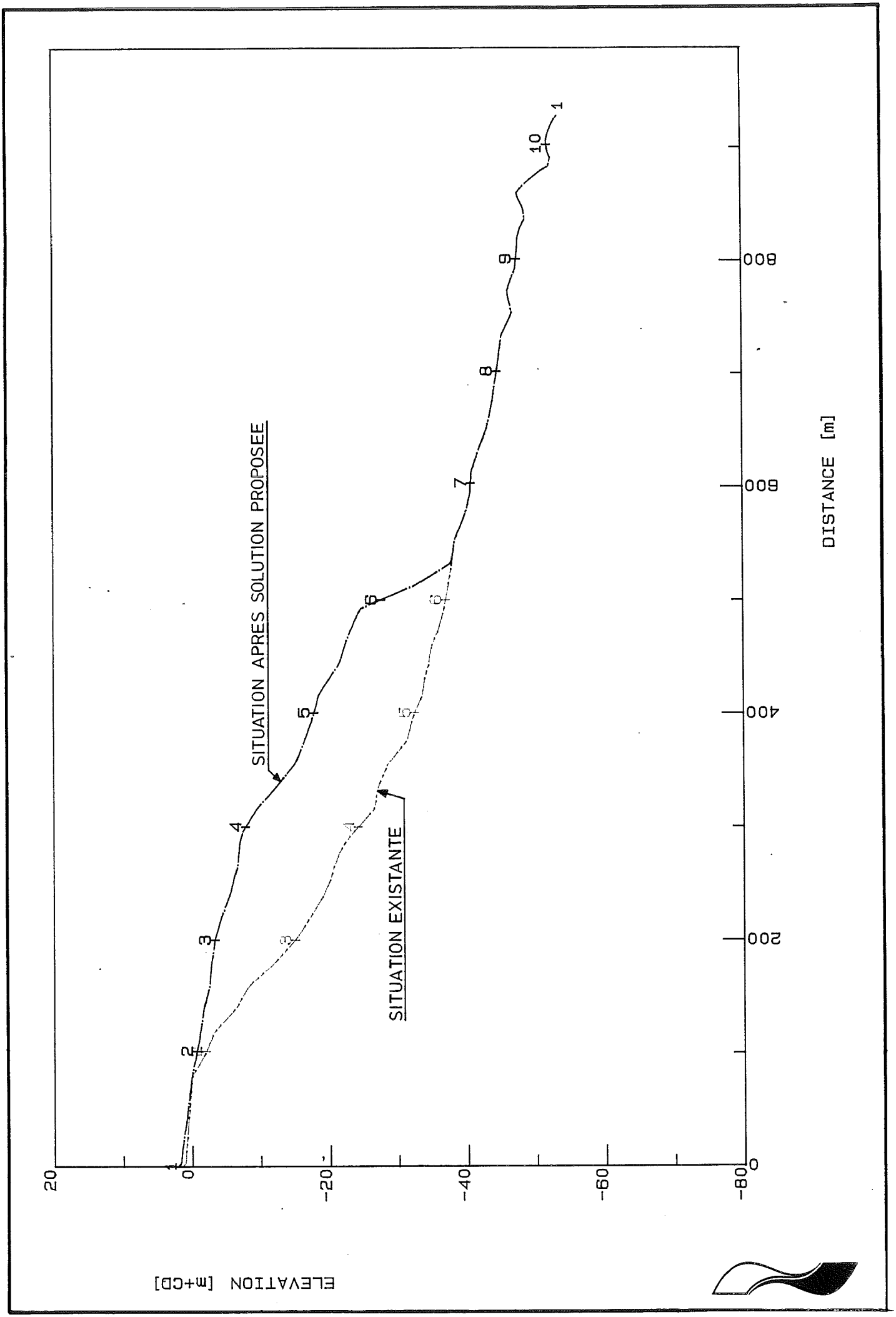


FIGURE 12: *SOLUTION 1: COUPE LONGITUDINALE.*

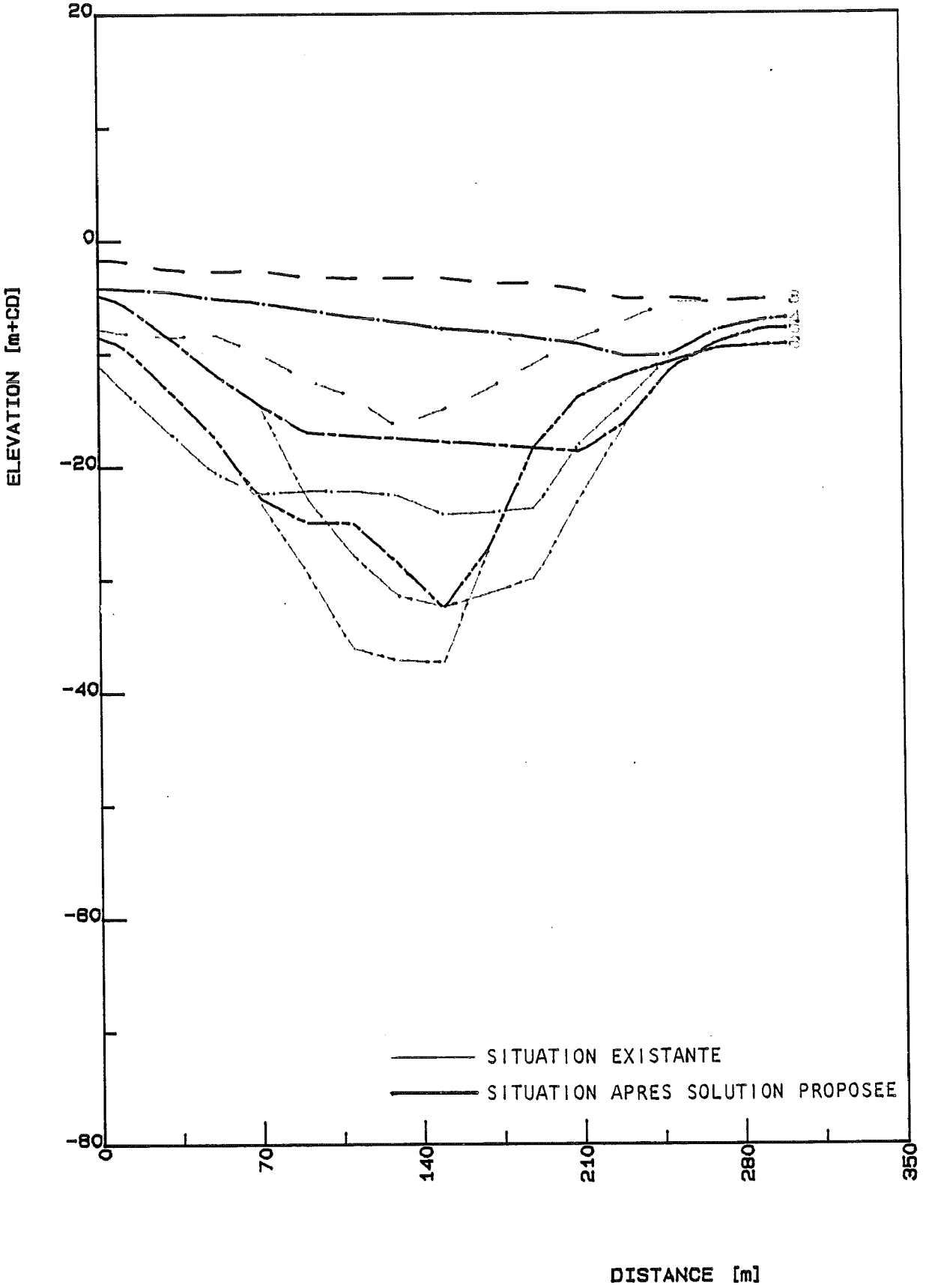


FIGURE 13A: *SOLUTION 1: COUPES TRANSVERSALES*

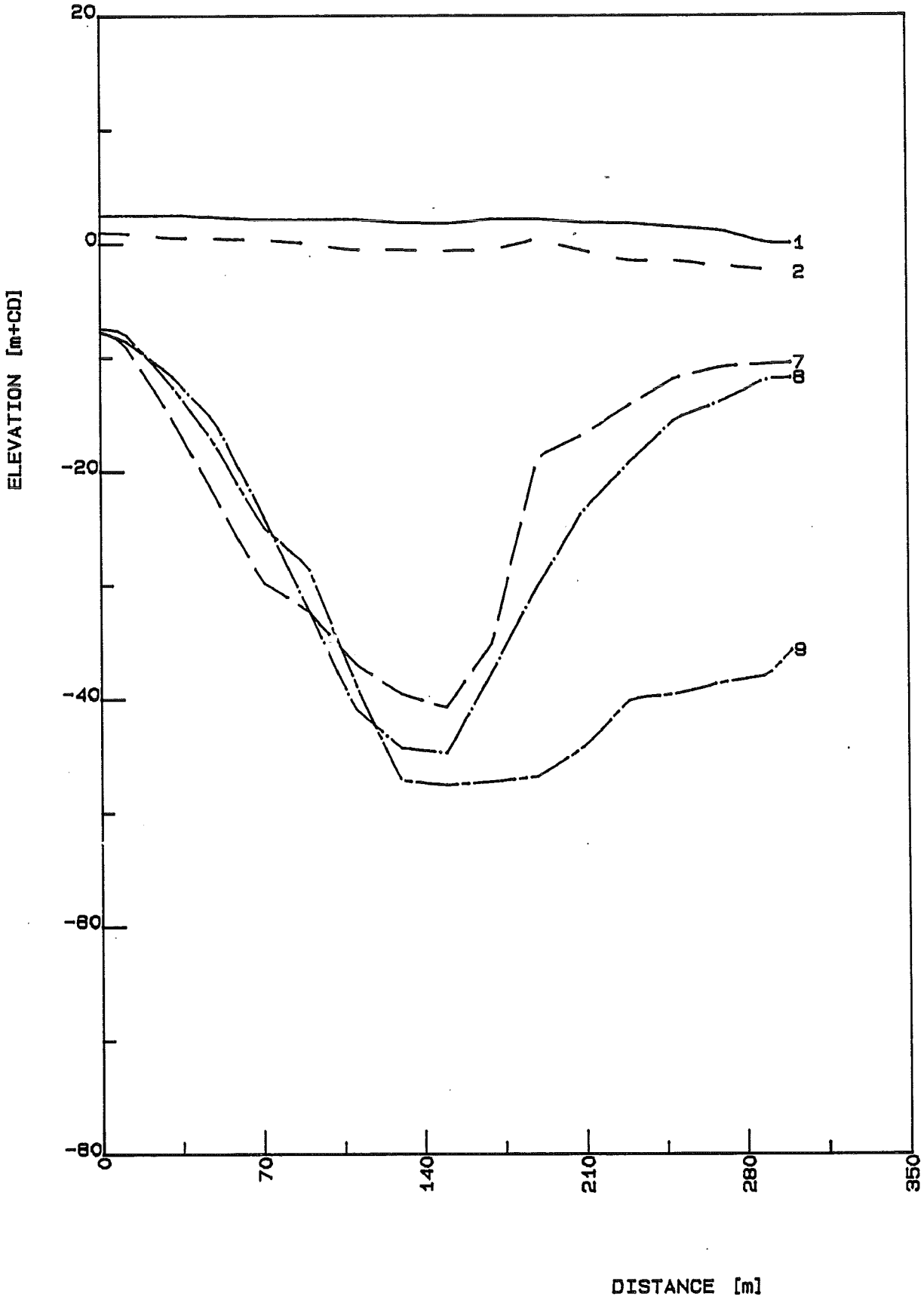


FIGURE 13 B: *SOLUTION 1: COUPES TRANSVERSALES.*

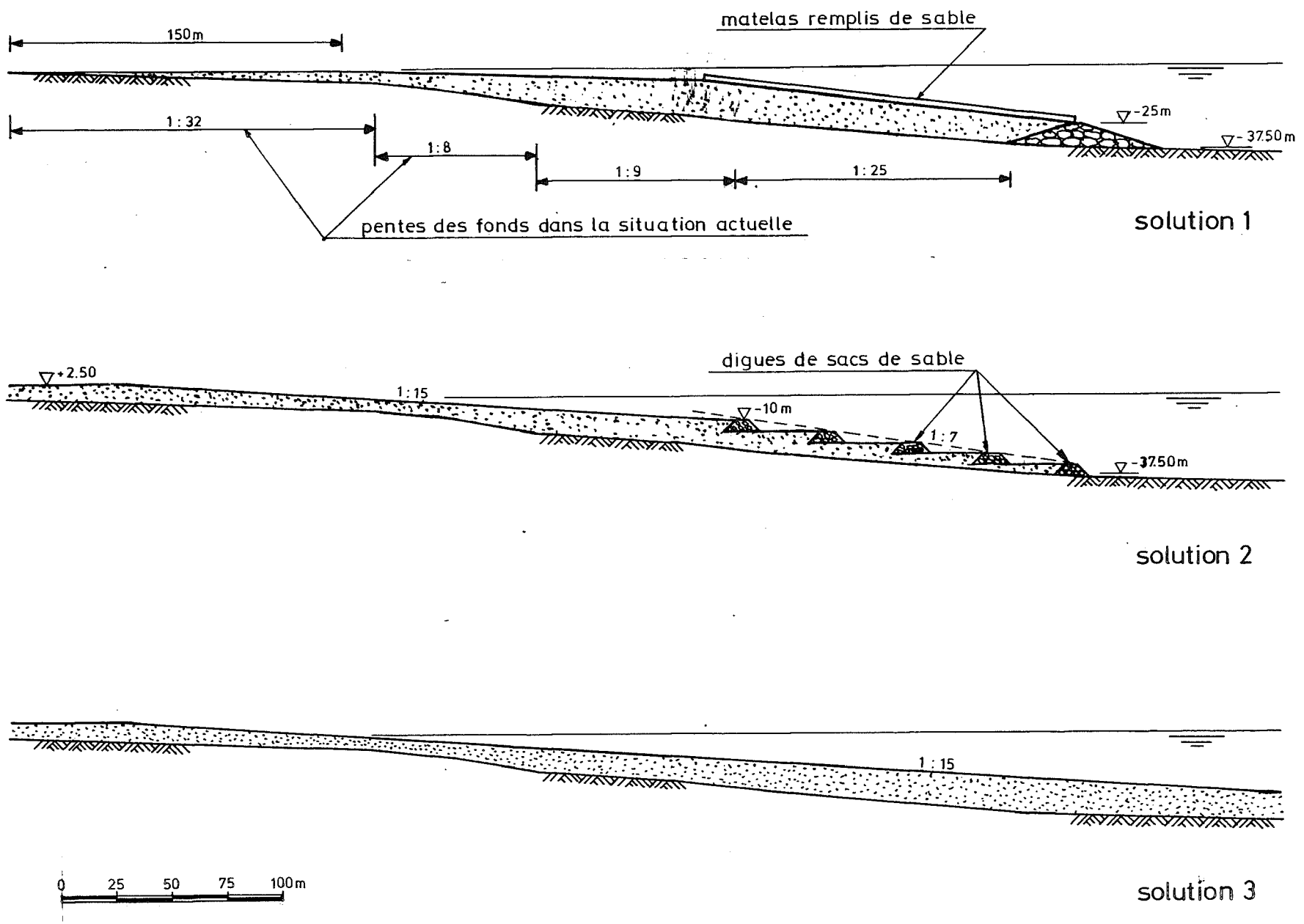
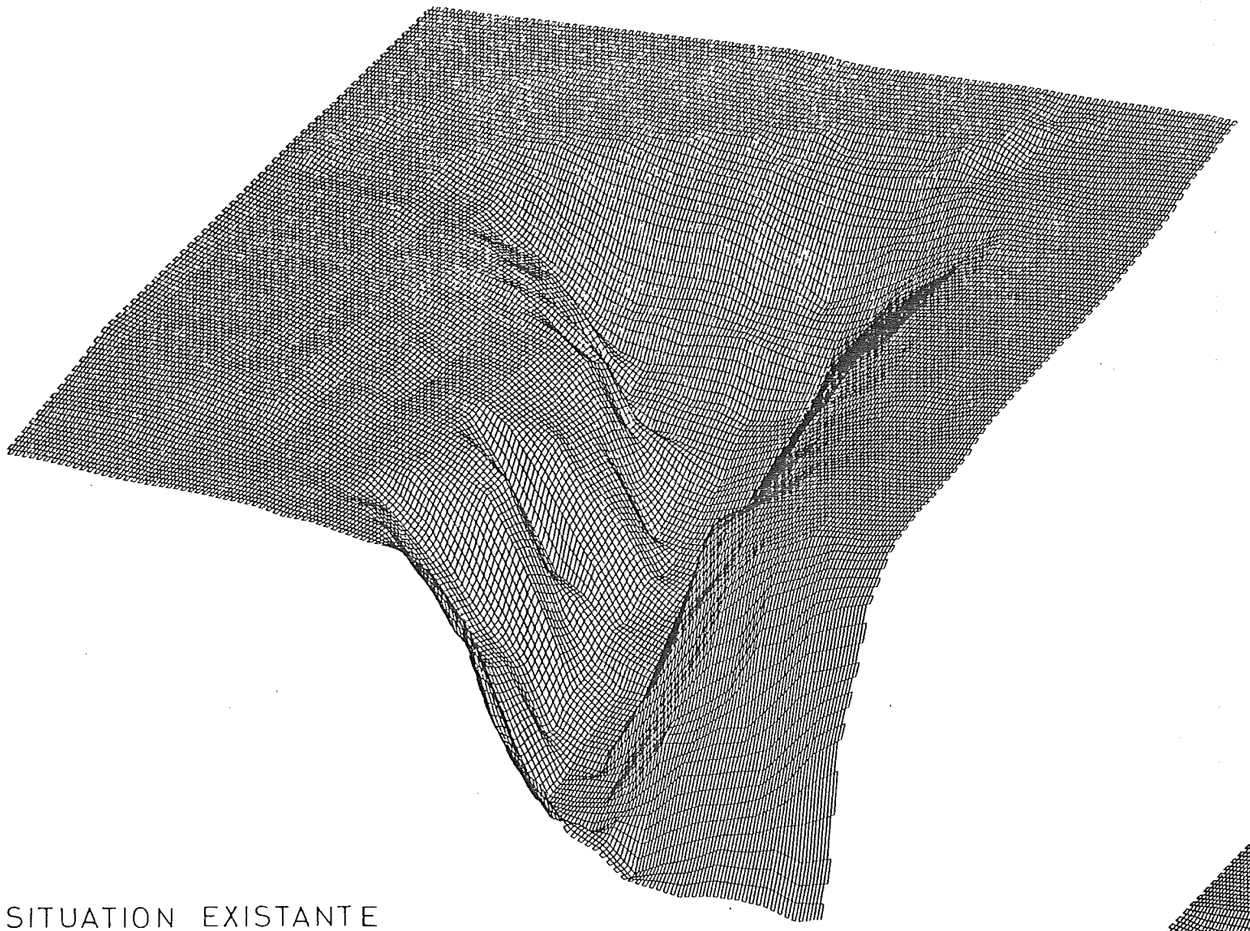
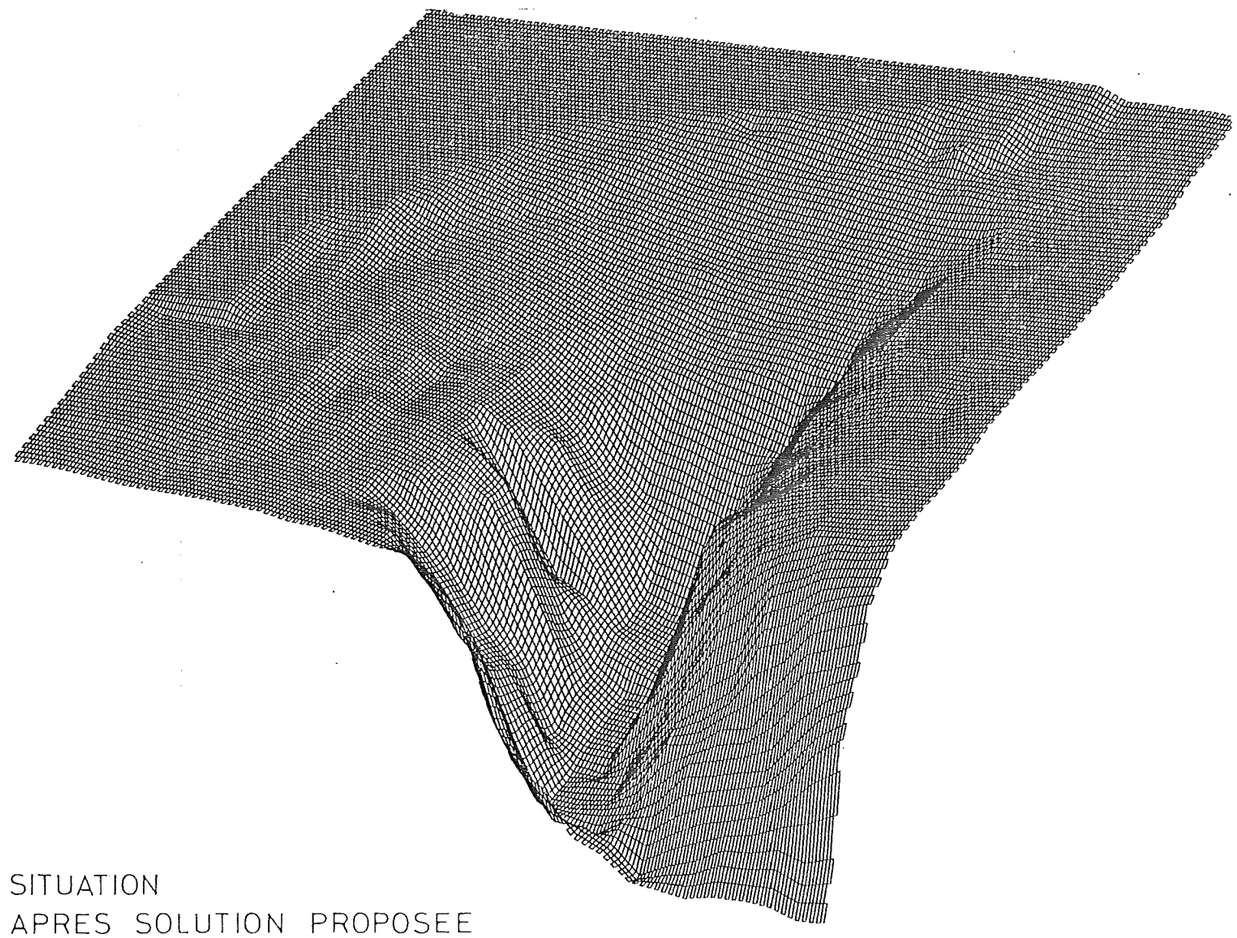


FIGURE 14: COUPES LONGITUDINALES DES SOLUTIONS 1, 2 ET 3

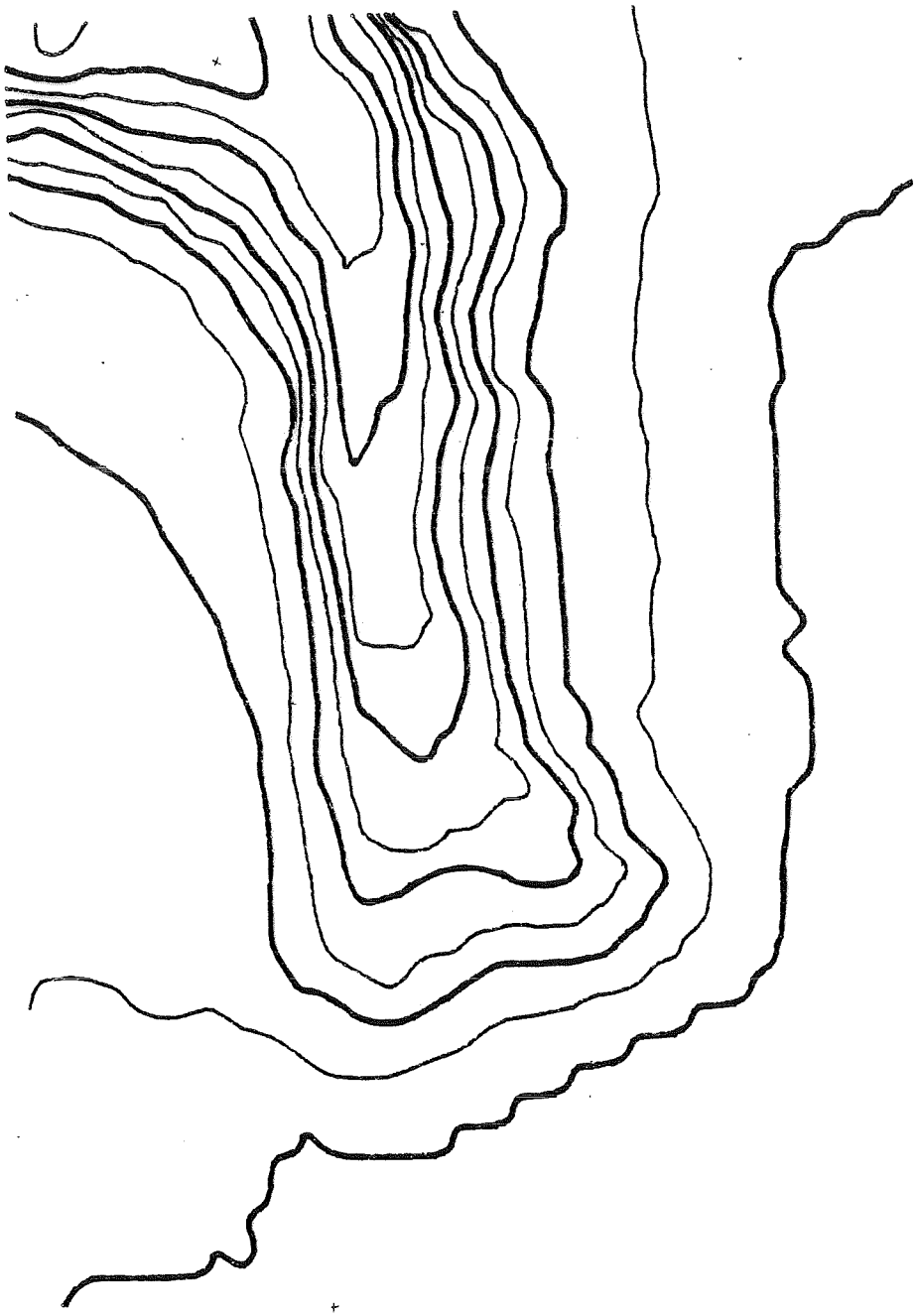


SITUATION EXISTANTE



SITUATION
APRES SOLUTION PROPOSEE

FIGURE 15 : *SOLUTION 2 : SCHEMA TRI-DIMENSIONNEL*



SITUATION EXISTANTE

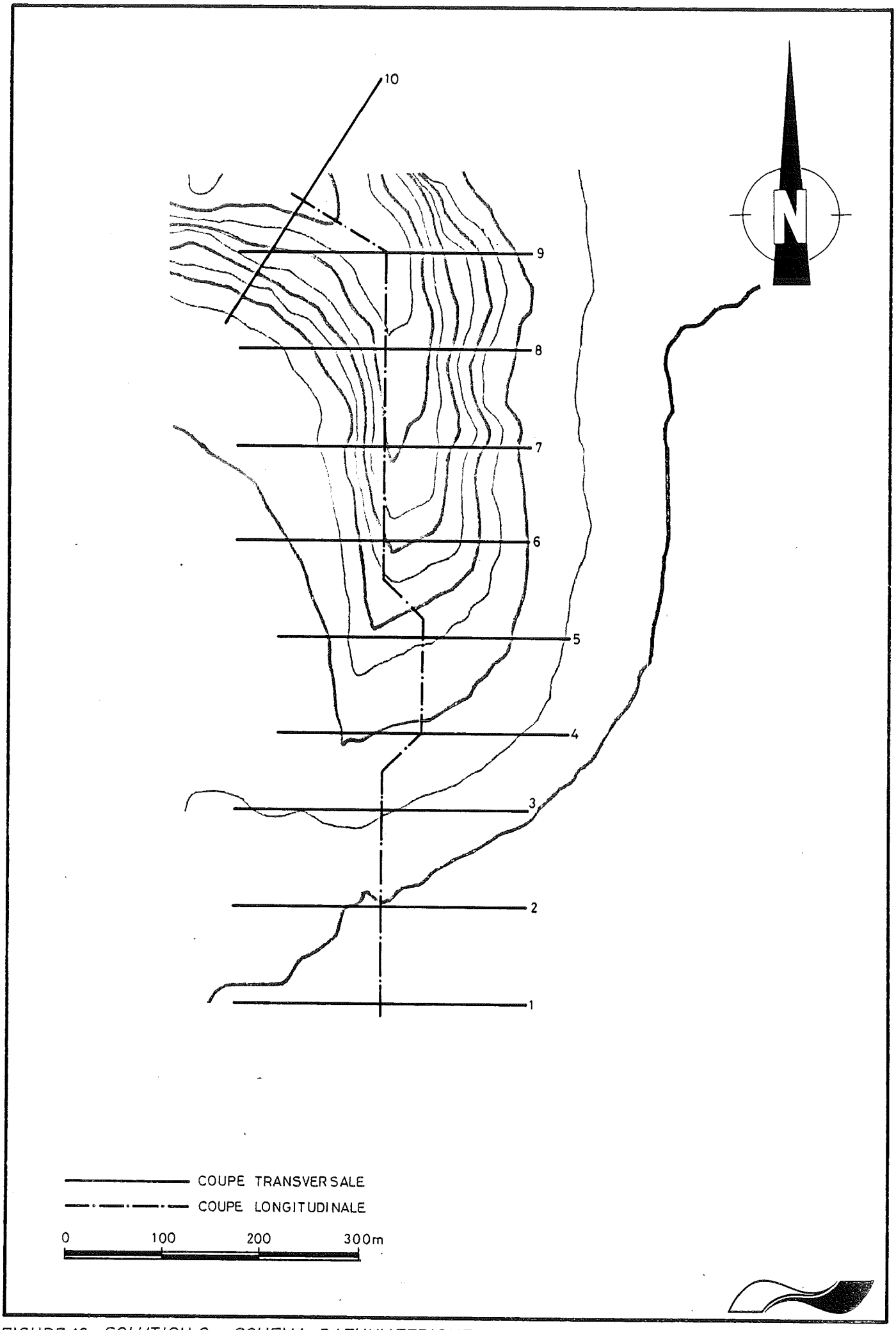


FIGURE 16: *SOLUTION 2 - SCHEMA BATHYMETRIQUE*

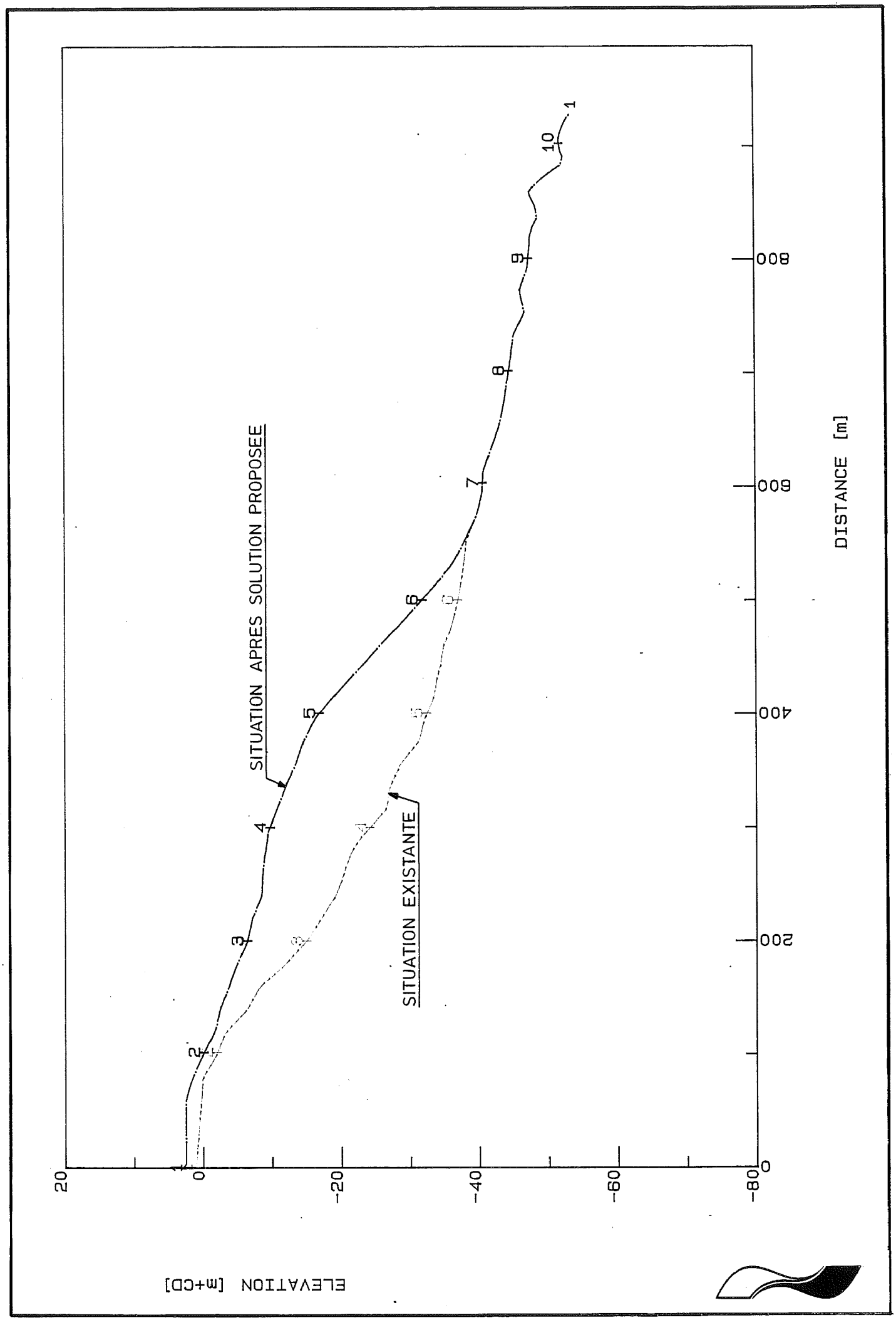


FIGURE 17: *SOLUTION 3: COUPE LONGITUDINALE.*

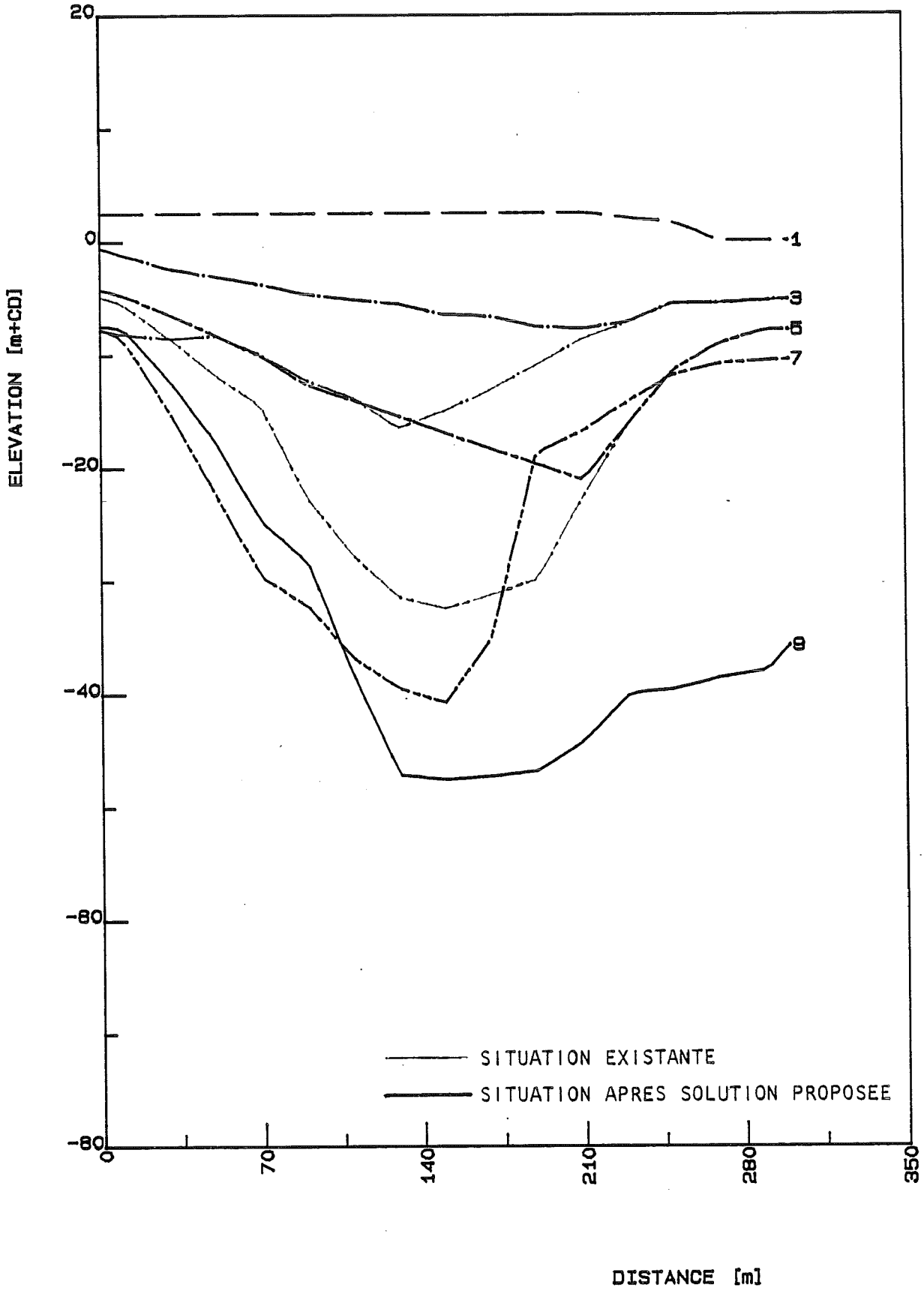


FIGURE 18A: *SOLUTION 2: COUPES TRANSVERSALES.*

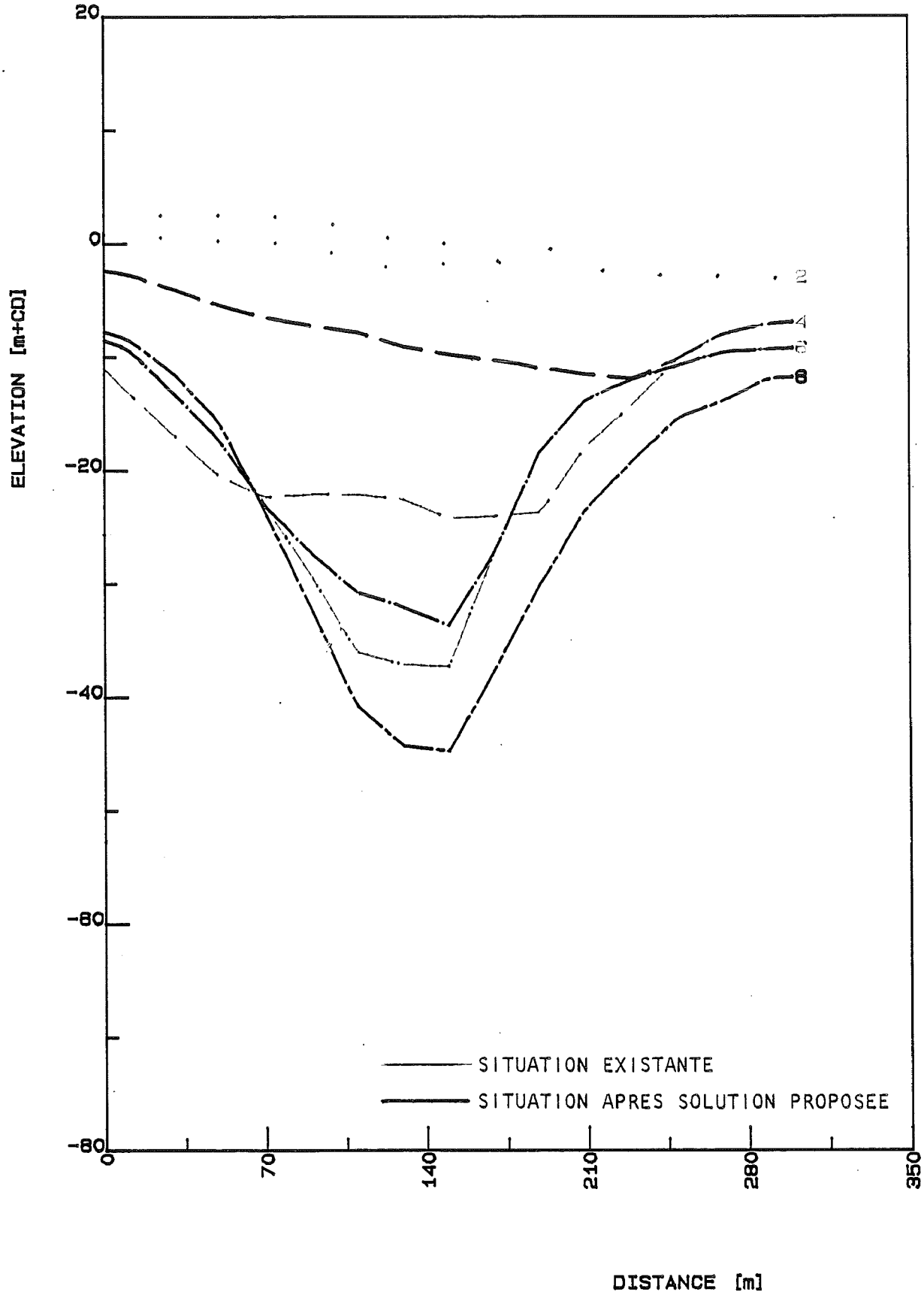
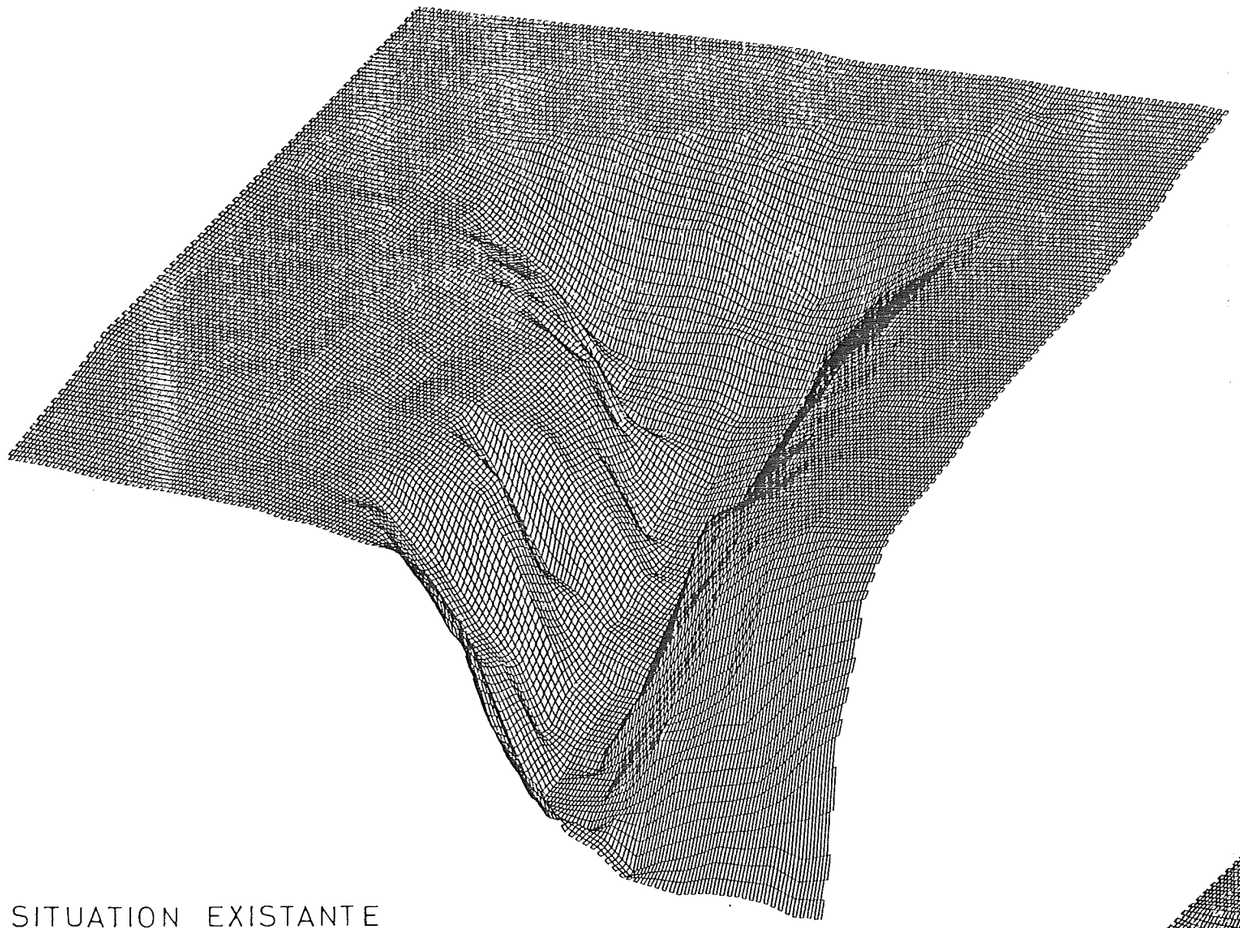
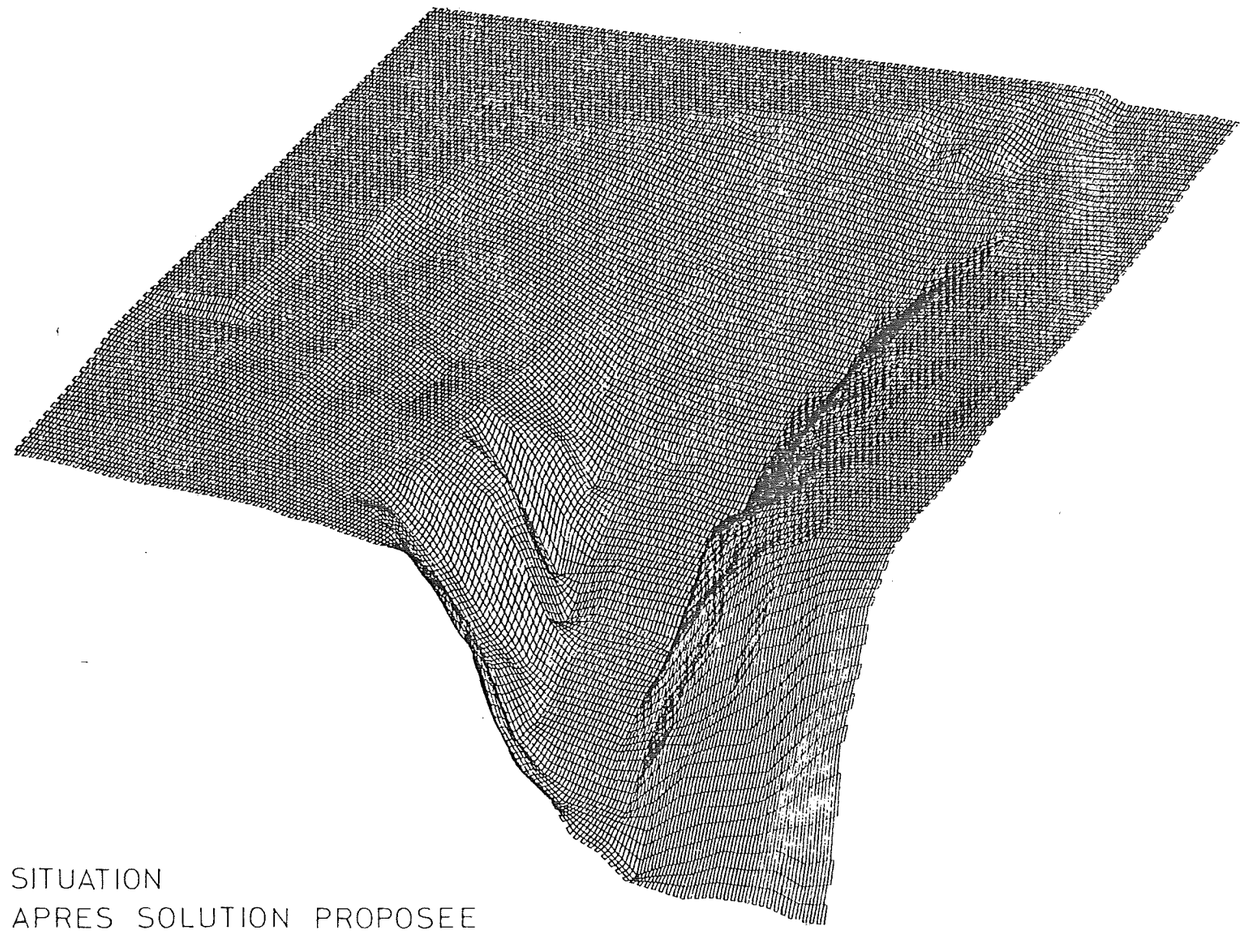


FIGURE 18B: *SOLUTION 2: COUPES TRANSVERSALES.*

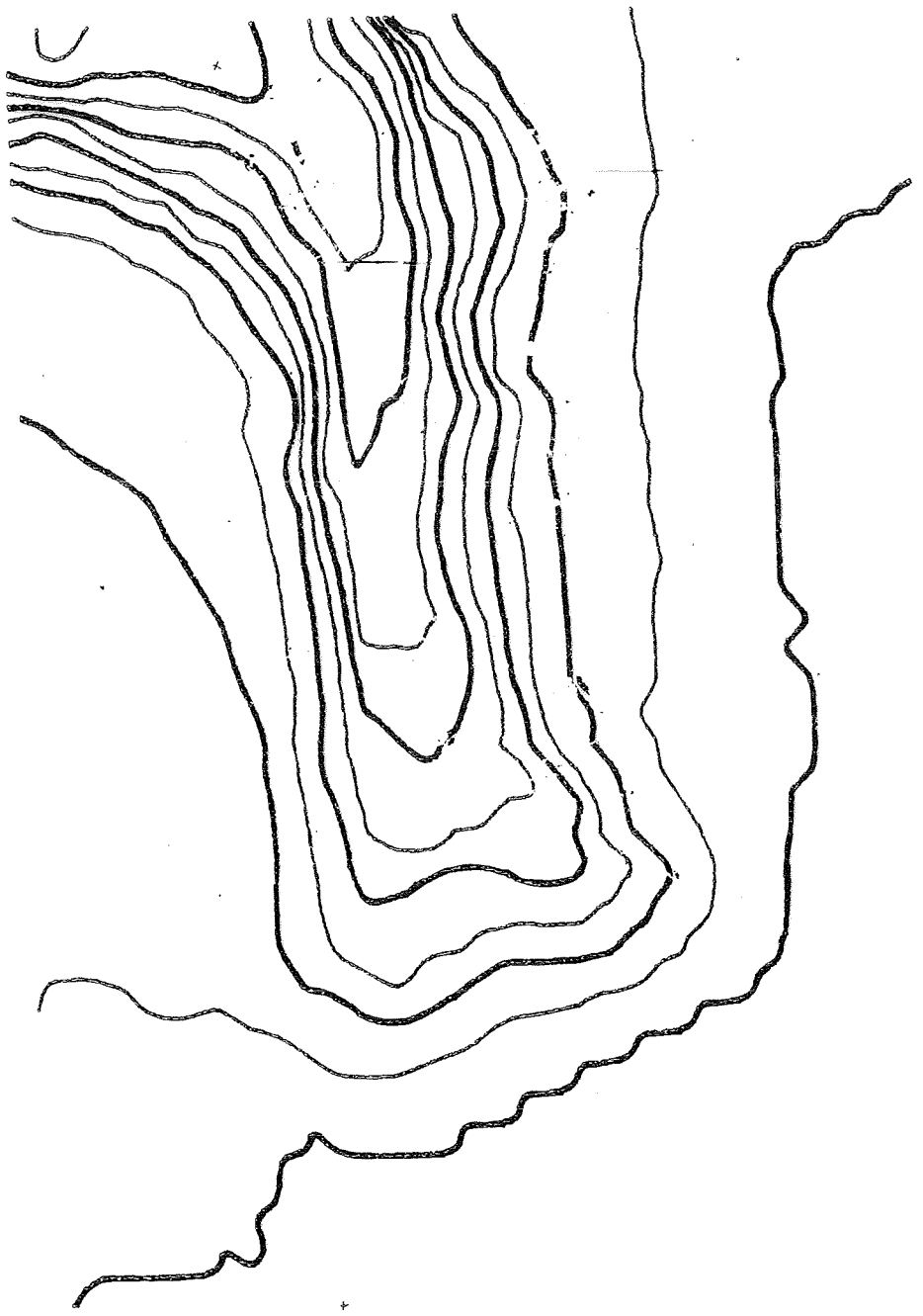


SITUATION EXISTANTE



SITUATION
APRES SOLUTION PROPOSEE

FIGURE 19 : *SOLUTION 3: SCHEMA TRI-DIMENSIONNEL*



SITUATION EXISTANTE

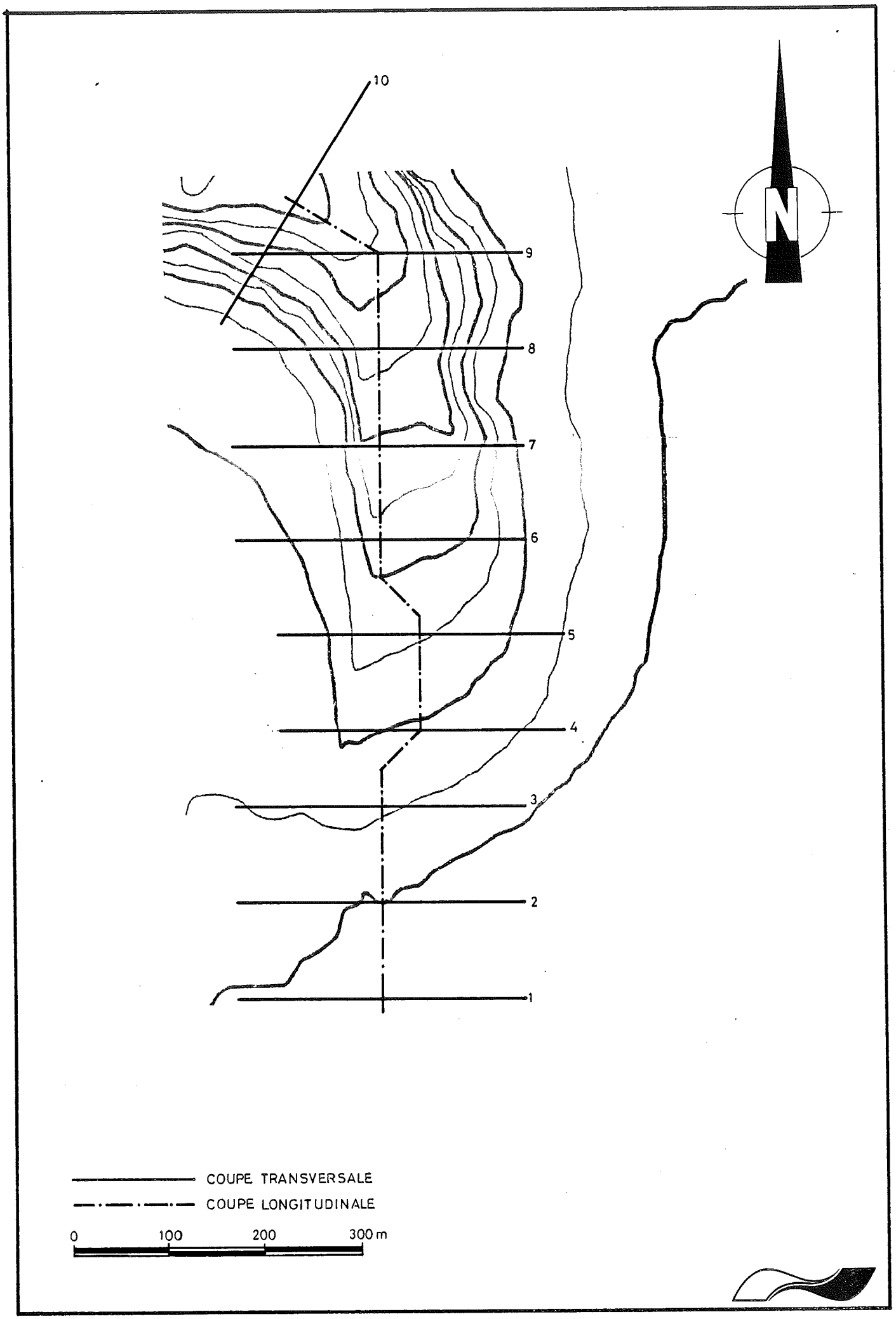


FIGURE 20 : *SOLUTION 3 - SCHEMA BATHYMETRIQUE*

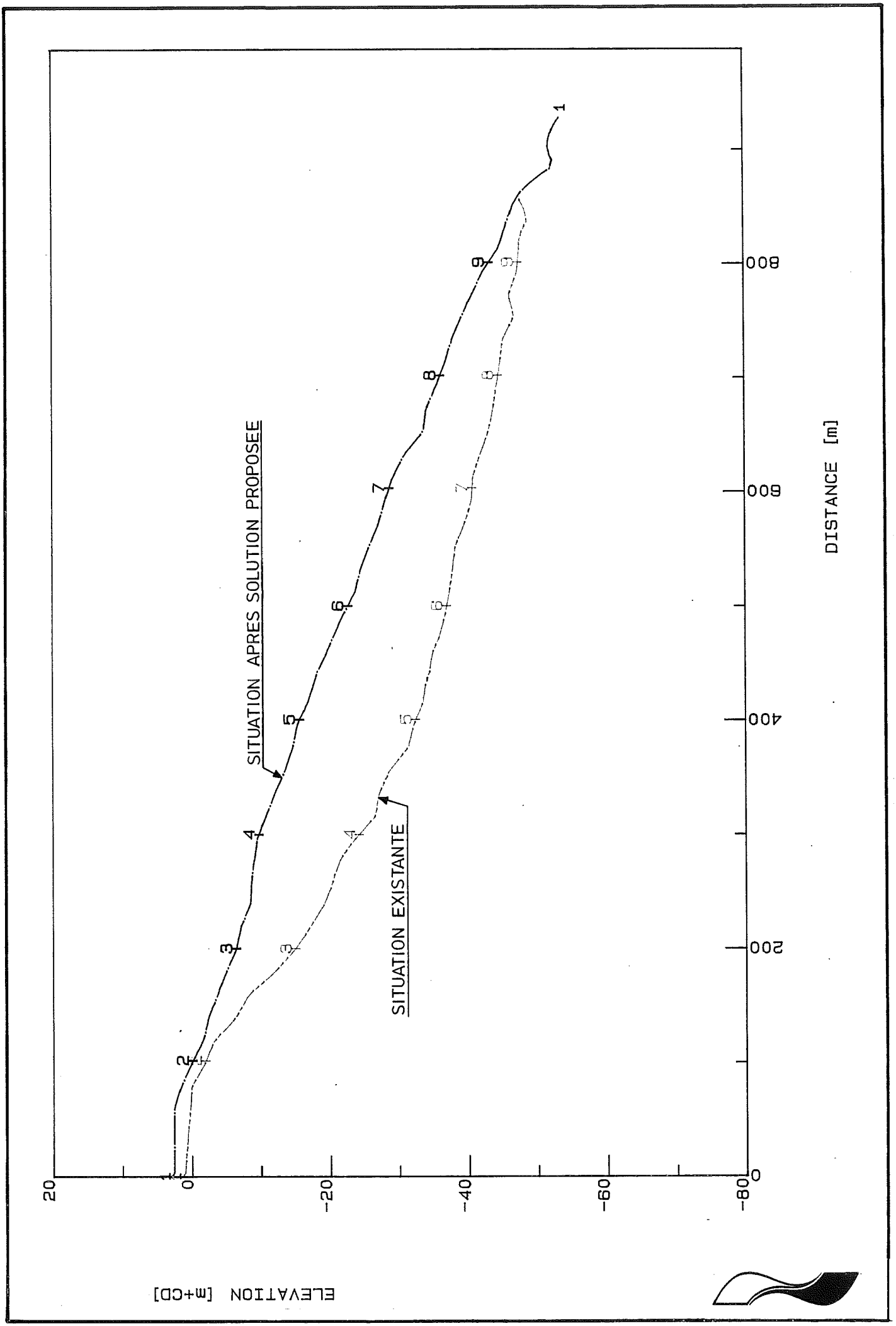


FIGURE 21: *SOLUTION 3: COUPE LONGITUDINALE.*

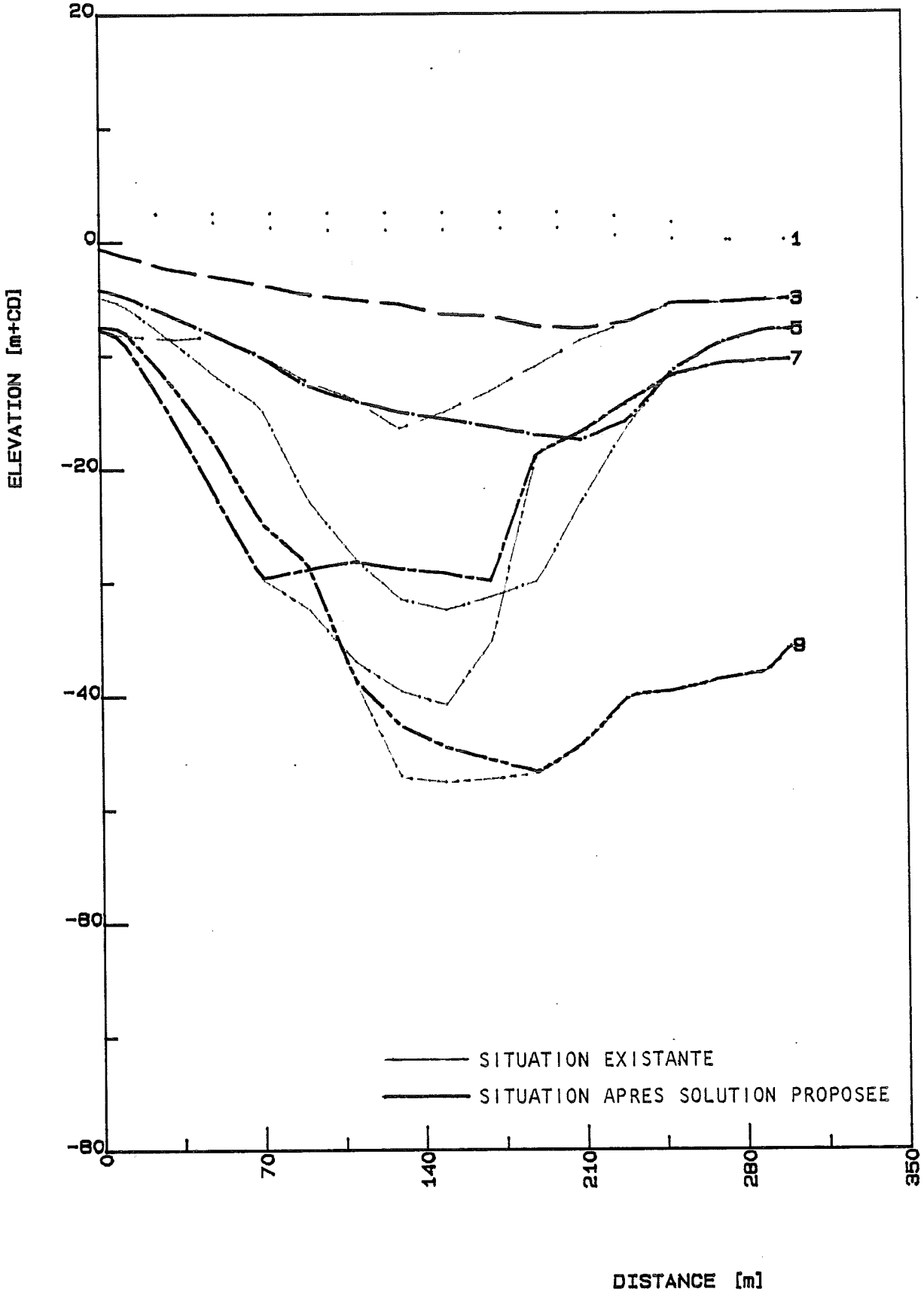


FIGURE 22A: *SOLUTION 3: COUPES TRANSVERSALES.*

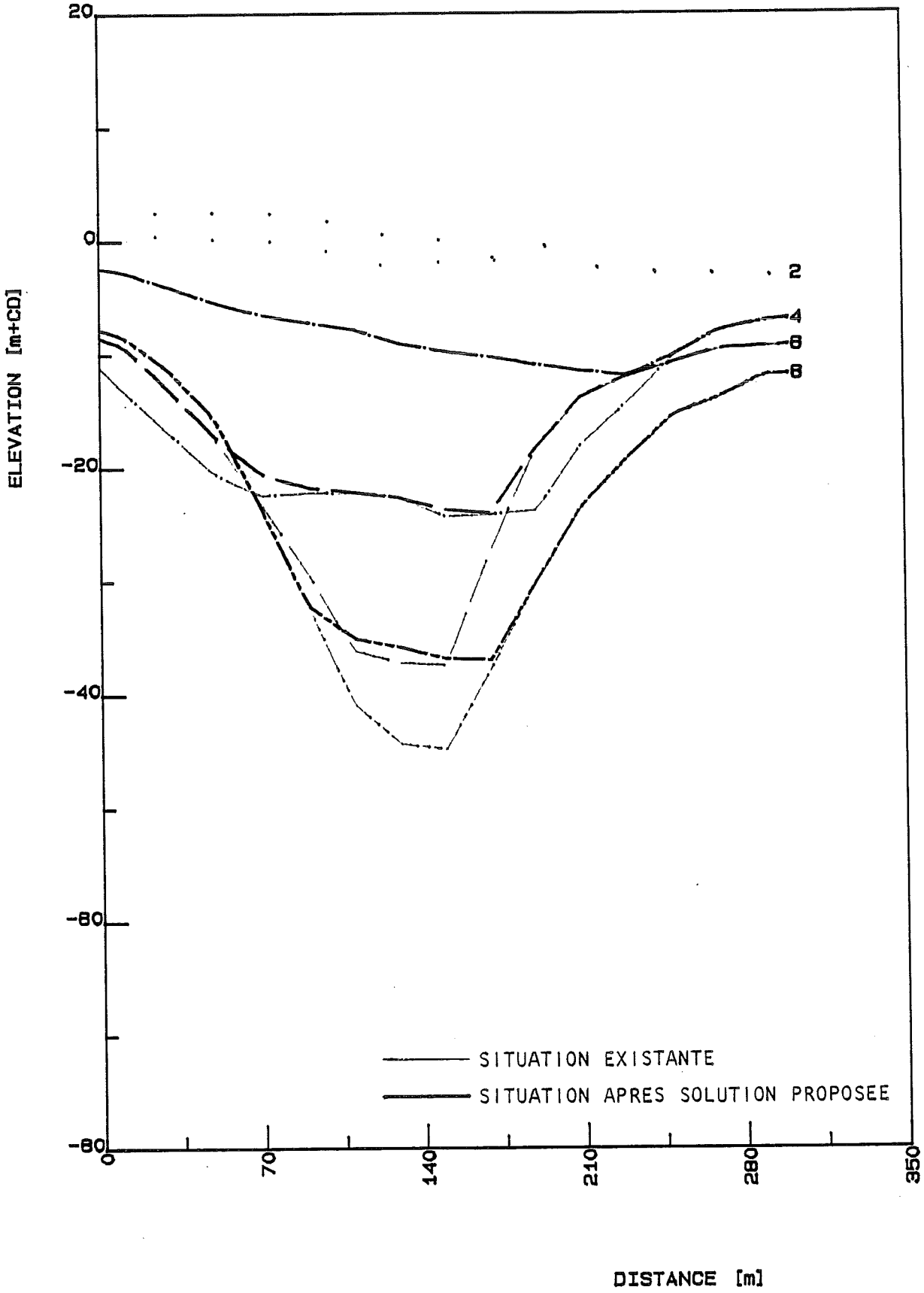


FIGURE 22B: *SOLUTION 3: COUPES TRANSVERSALES.*

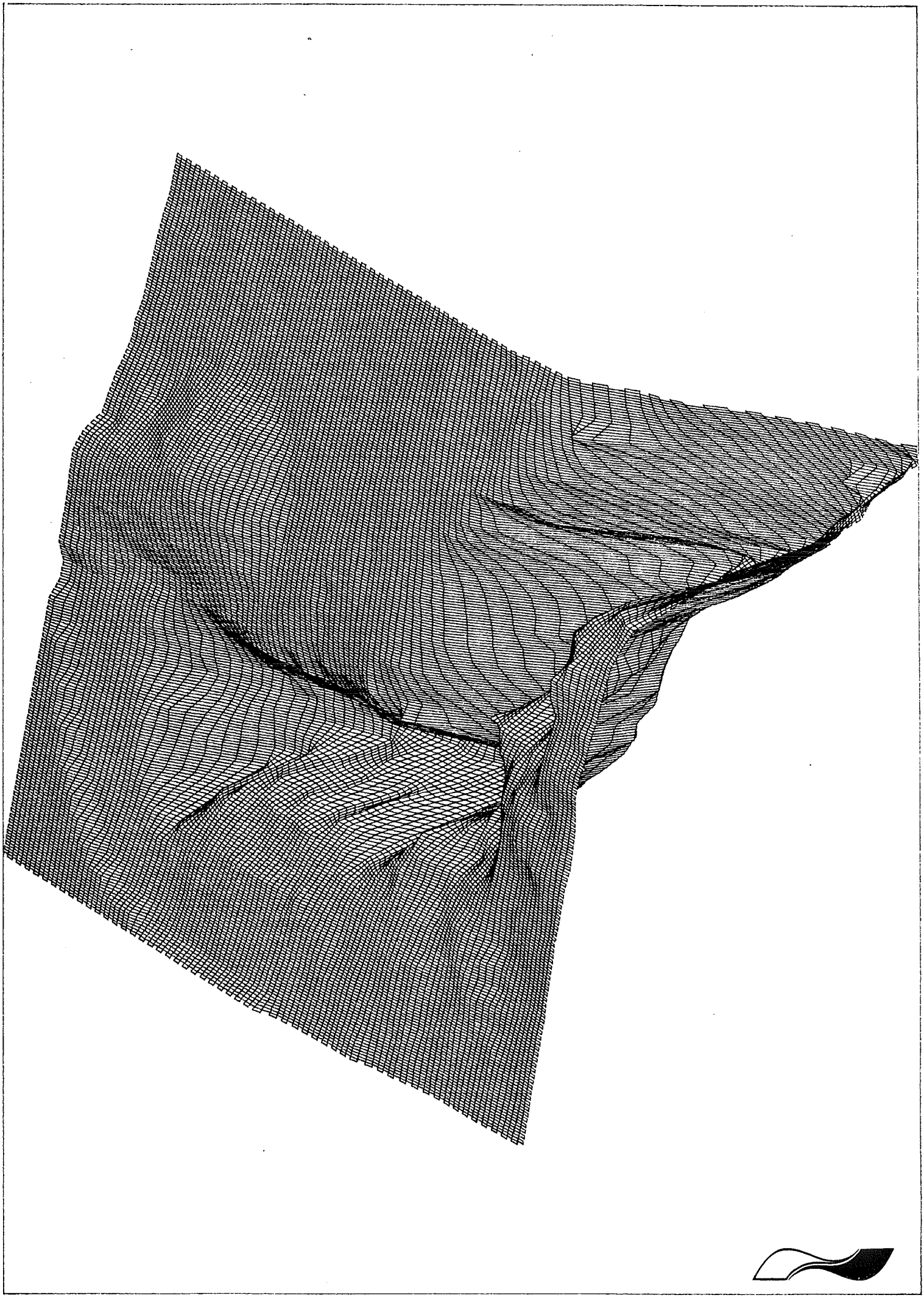


FIGURE 23: *SOLUTION 4: SCHEMA TRIDIMENSIONNEL*

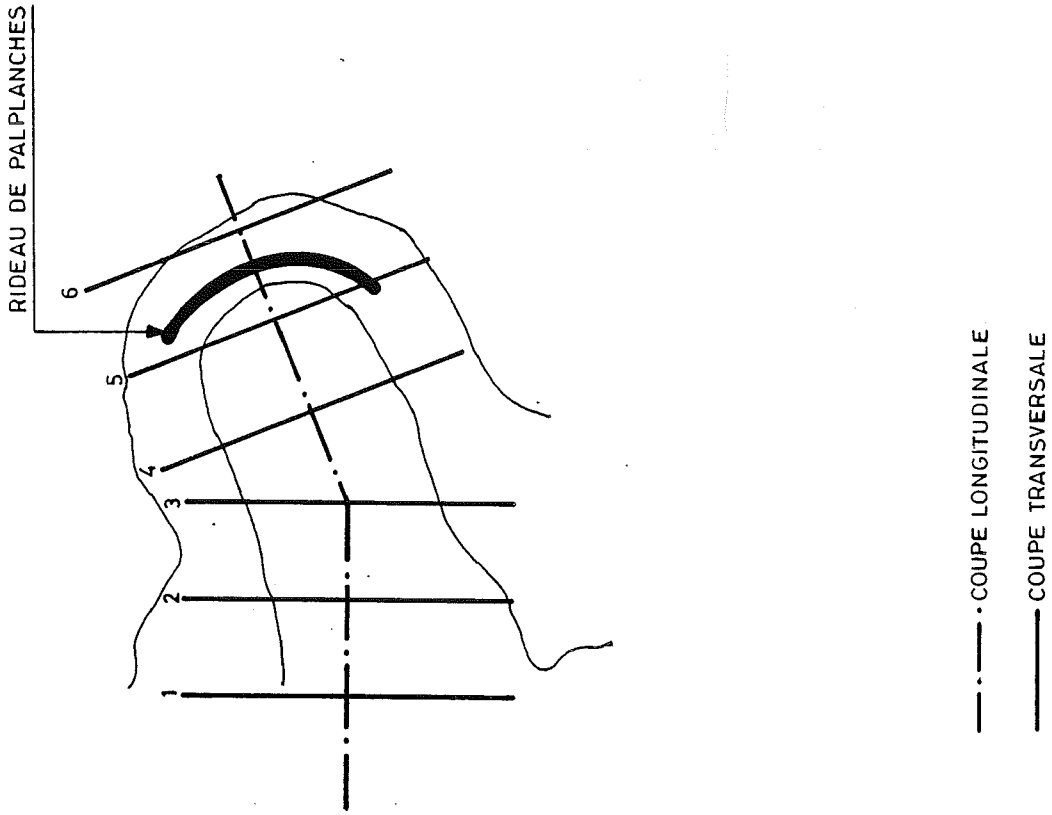


FIGURE 24: *SOLUTION 4: SCHEMA BATHYMETRIQUE.*

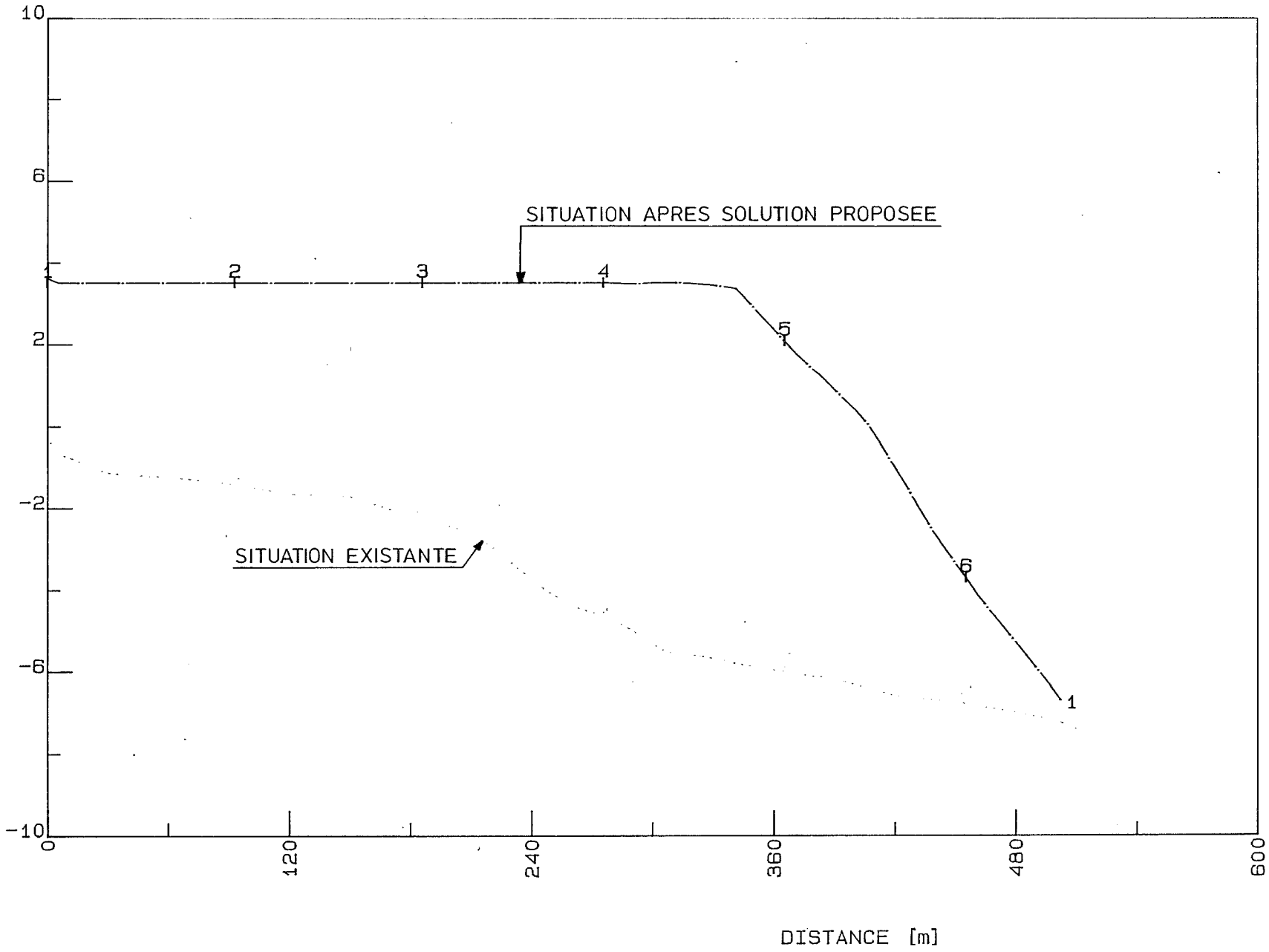


FIGURE 25: *SOLUTION 4: COUPE LONGITUDINALE.*

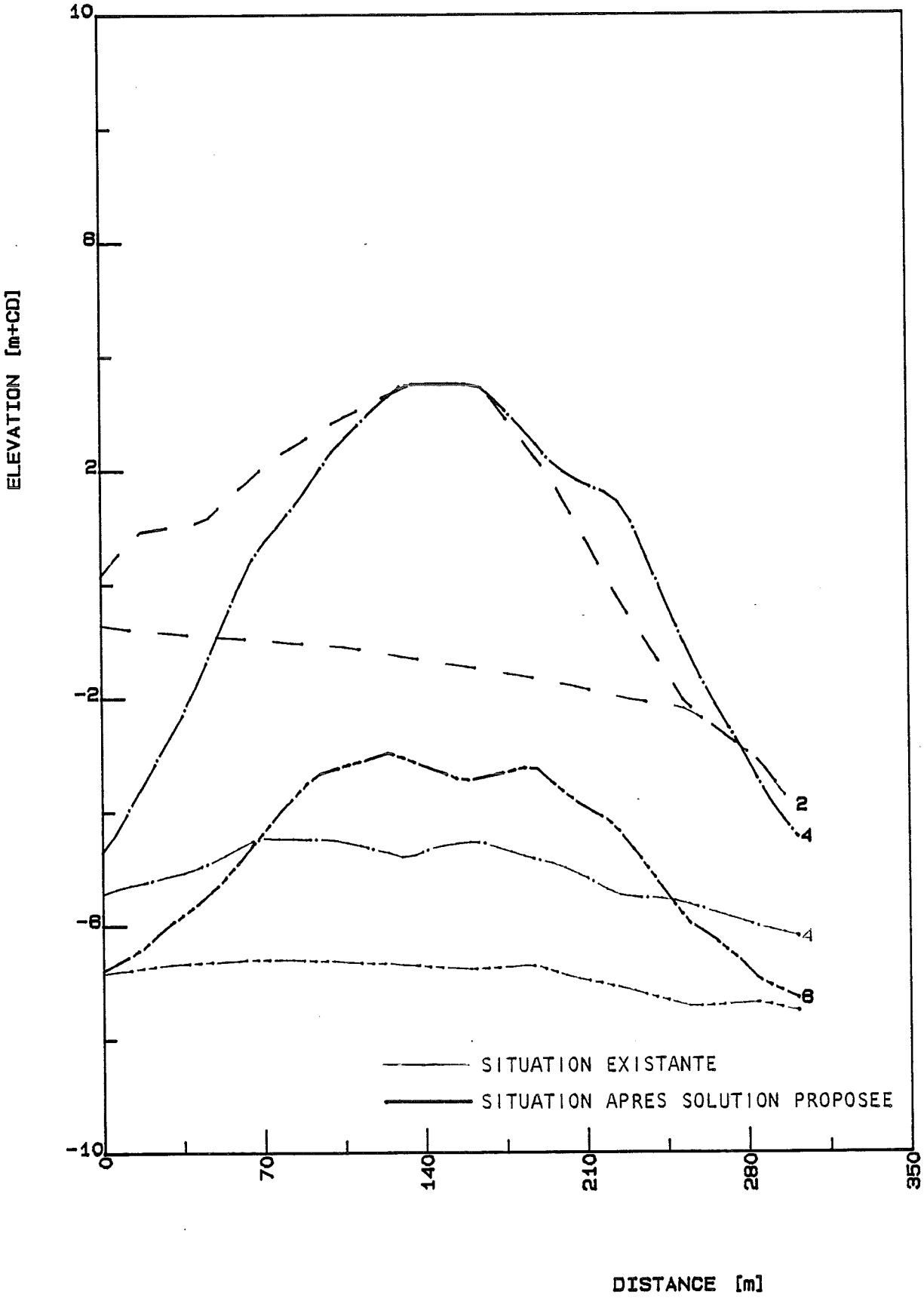


FIGURE 26A: *SOLUTION 4: COUPES TRANSVERSALES.*

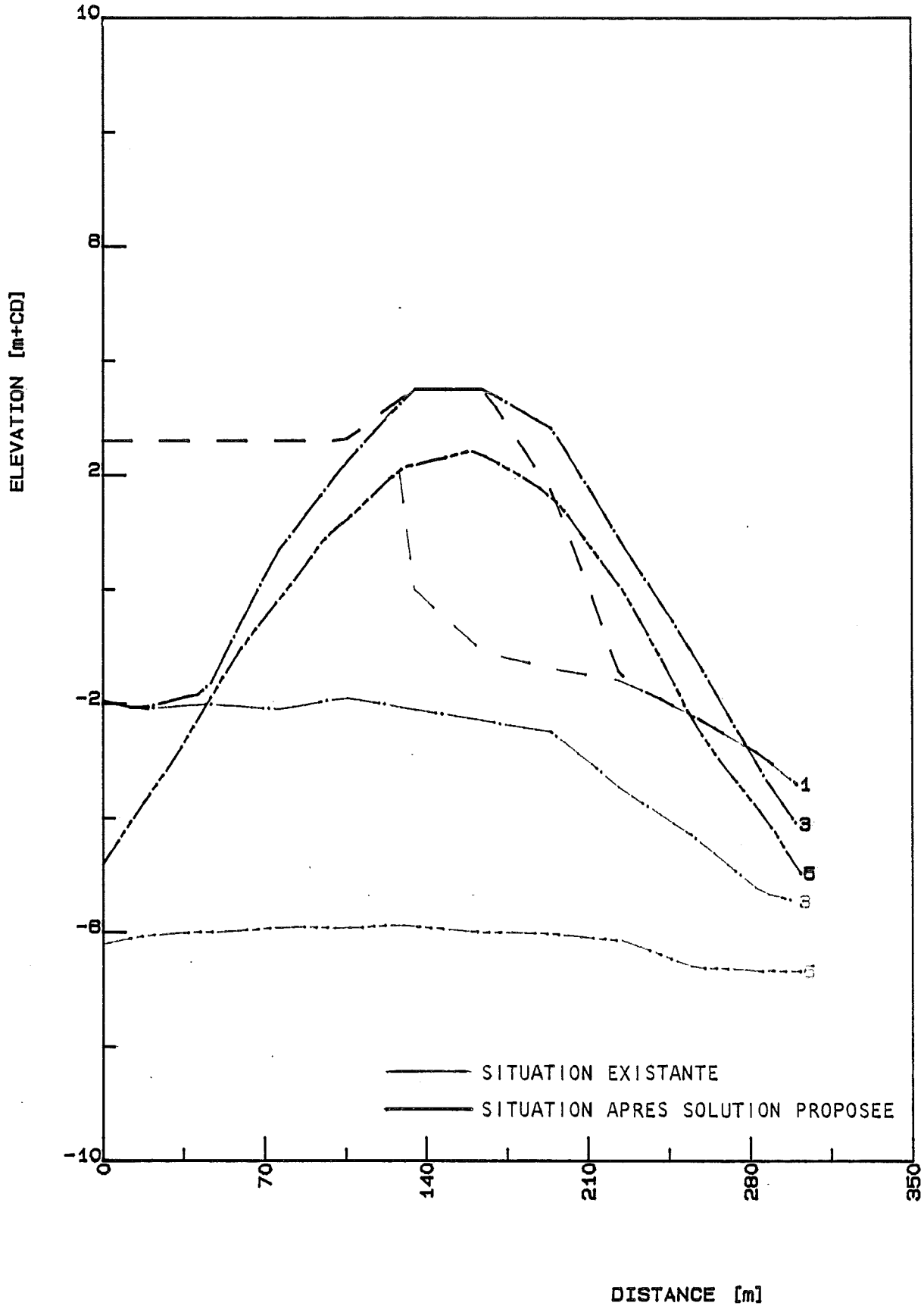


FIGURE 26B : *SOLUTION 4 : COUPES TRANSVERSALES.*

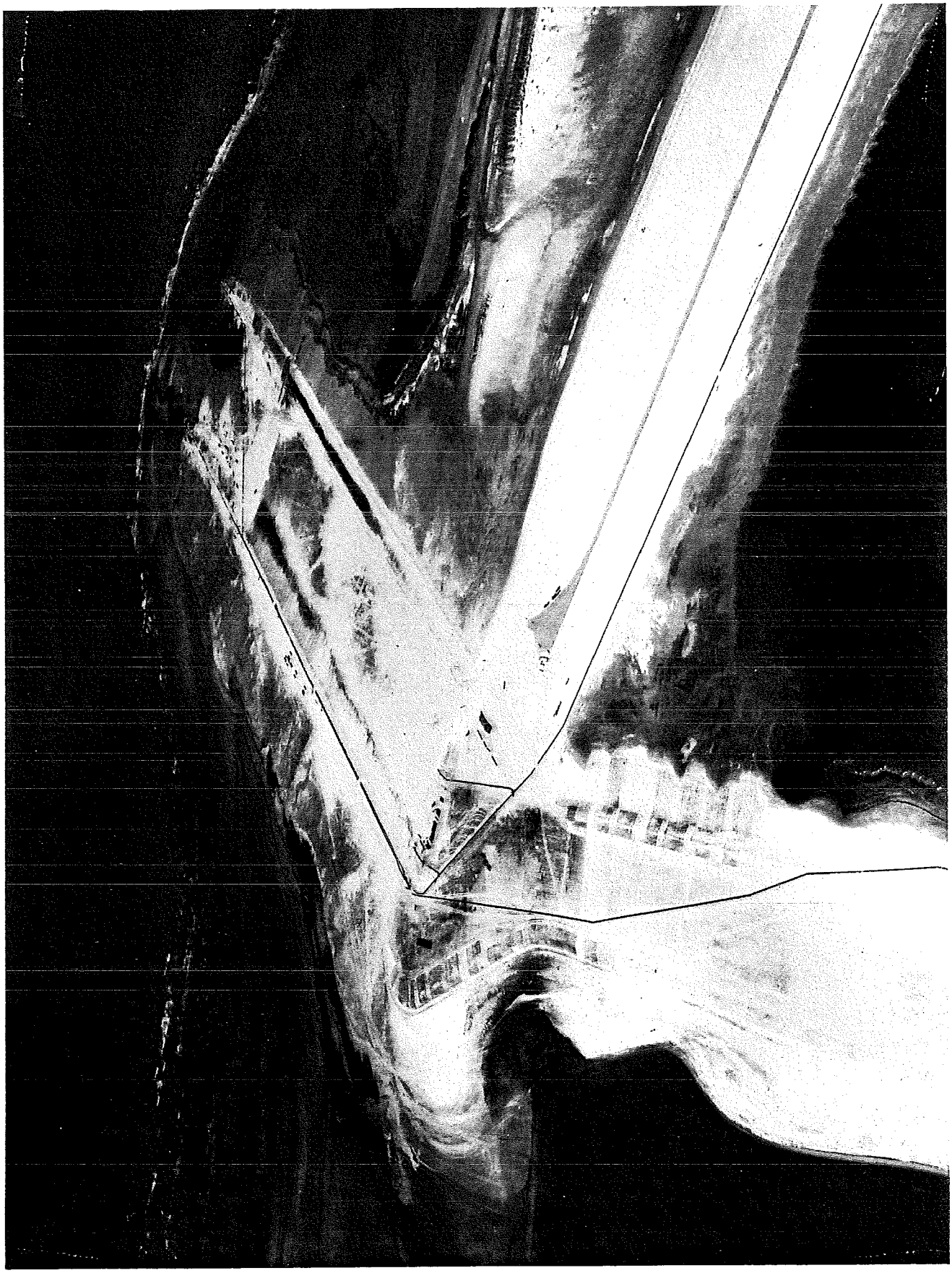


FIGURE 27

FIGURE 28

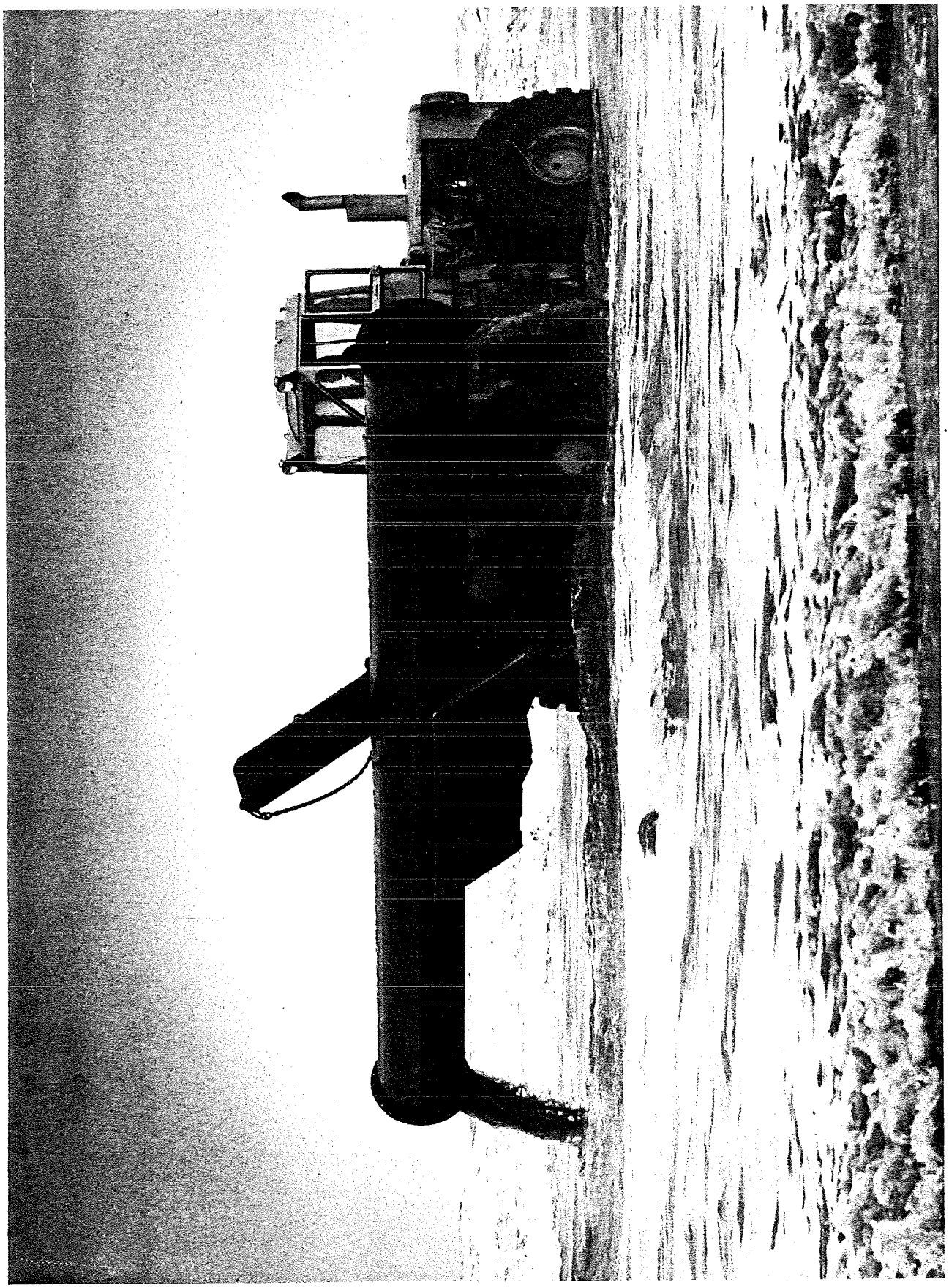


FIGURE 29

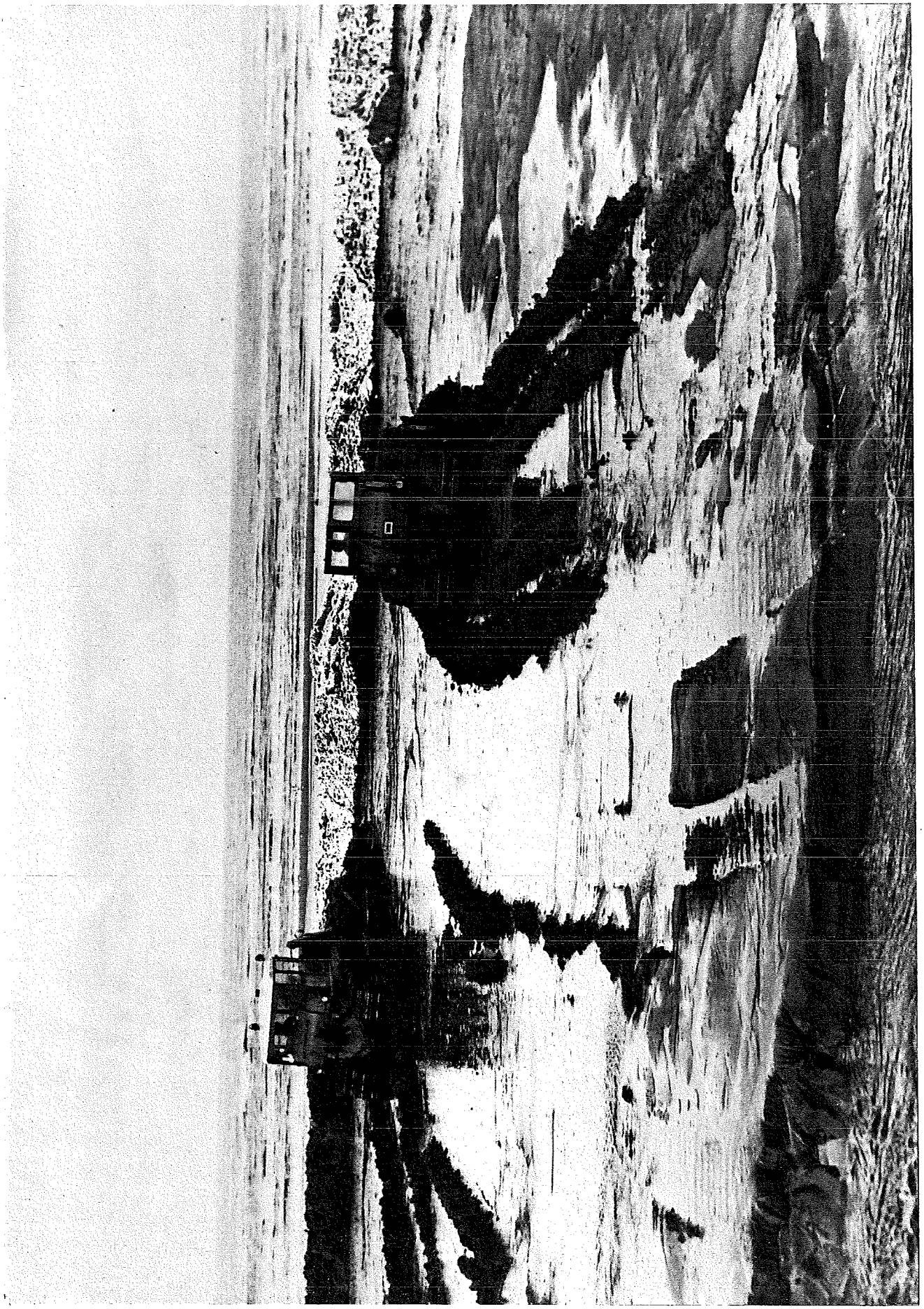


FIGURE 30

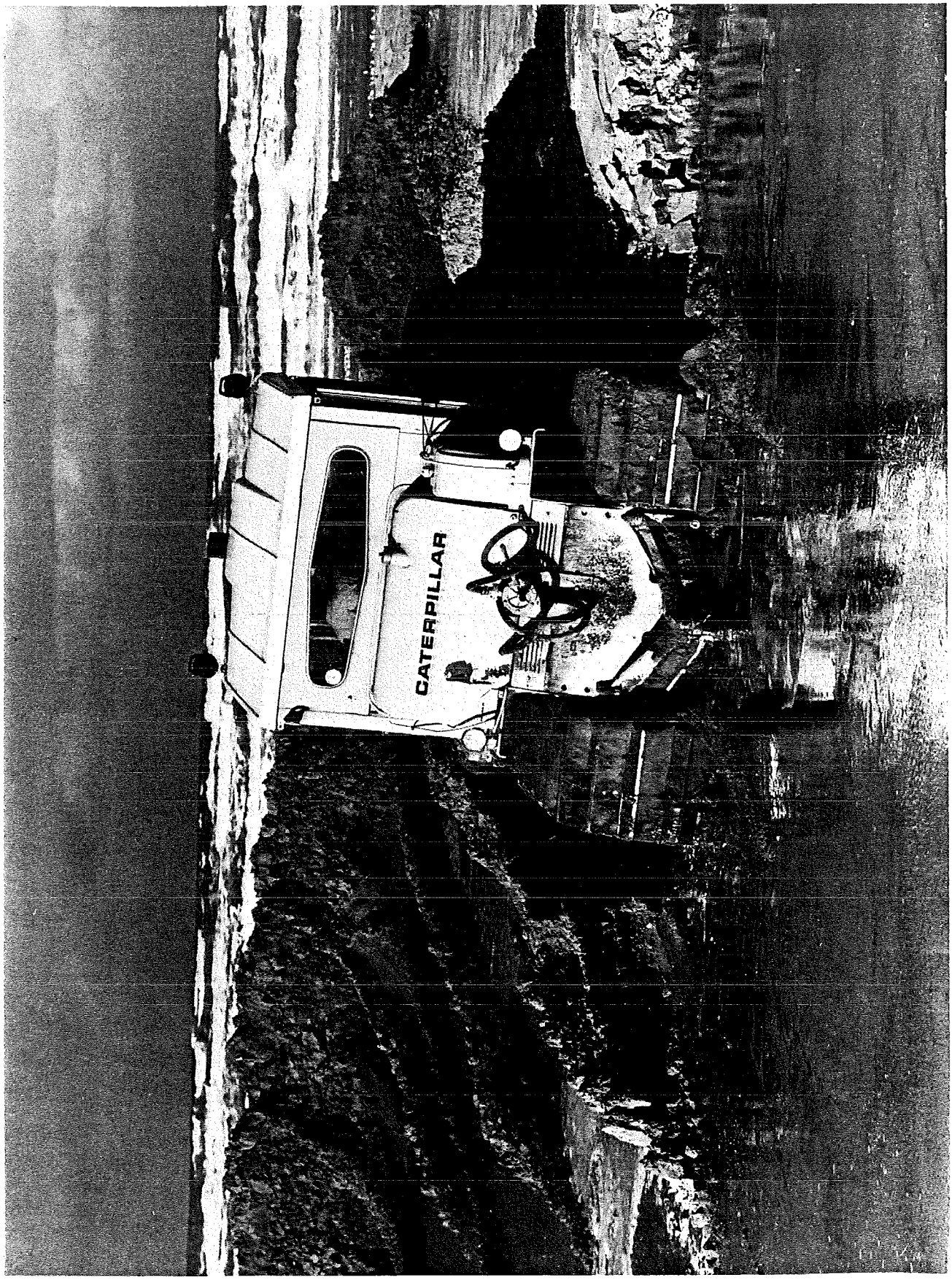


FIGURE 31