

Les modèles numériques de terrain

G. GROS

*Chargé des Questions Topographiques et Cartographiques
au S.E.T.R.A.*

LES MODÈLES NUMÉRIQUES DE TERRAIN, SUPPORTS POUR LE TRAITEMENT DES INFORMATIONS DU SUR-SOL ET DU SOUS-SOL DANS LES ÉTUDES DE PROJET D'AMÉNAGEMENT.

Dans l'avant propos de l'ouvrage consacré à la géomorphologie applicable du professeur TRICART, il est indiqué au sujet de la géomorphologie "que ce soit comme "indice" parce qu'elle est modelée visible de structures cachées, parce qu'elle permet de reconstituer la succession des étapes d'évolution d'un espace et ainsi d'en utiliser non pas seulement le potentiel actuel mais aussi celui du passé ; par son intégration dans la dynamique des écosystèmes, elle permet d'en apprécier la stabilité et d'en prévoir les contraintes et, par conséquent, les raisons d'échec et les possibilités de solution. Il est impossible de réaliser quelques grands aménagements que ce soient sans en tenir compte".

Cette assertion du professeur TRICART se vérifie aussi dans l'automatisation toujours plus poussée des études de projets d'aménagement qui conduit à la modélisation simultanée du sol, du sous-sol et du sur-sol. Autrement dit, le recours à l'informatique lors de la conception des projets, implique la représentation numérique du terrain naturel, de son occupation physique et des caractéristiques géotechniques des couches sous-jacentes. Ce sont là autant d'informations dont la "morphologie" du terrain explique les relations mutuelles et éclaire la compréhension du site dans lequel doit s'insérer un ouvrage.

C'est encore plus précisément ce que traduit l'approche morphométrique nécessaire aux études d'érosion, de glissements de terrain, de délimitation de bassins versants, voire à la recherche d'énergies nouvelles. C'est aussi le cas de la sélection d'itinéraires de dégagement des faisceaux radioélectriques et de l'implantation des lignes à haute tension qui imposent la détection des obstacles physiques. C'est bien évidemment ce que confirment les études de tracés routiers qui s'appuient sur la définition du terrain naturel, la géographie de l'occupation du sol et la connaissance approfondie du sous-sol.

Pour illustrer ces propos dans le cadre des projets d'aménagement examinons à l'aide de deux exemples l'apport de la morphologie (1) :

- à l'élaboration de modèles numériques en géologie de l'ingénieur

- à l'établissement automatique de documents graphiques exprimant la "sensibilité visuelle des paysages" (2).

I — ÉLABORATION DE MODÈLES NUMÉRIQUES EN GÉOLOGIE DE L'INGÉNIEUR

En règle générale, l'étude d'un projet repose sur la connaissance des propriétés géotechniques en tout point de l'espace concerné par l'ouvrage. Celles-ci n'étant déterminées qu'au travers d'un nombre limité d'observations, bien souvent ponctuelles, leur extension spatiale à la totalité de la zone d'étude s'appuie alors sur la géométrie des formations géologiques. Il convient donc d'établir cette dernière. Or c'est là que réside une différence fondamentale entre la modélisation du terrain naturel et la modélisation des couches géologiques. En effet, la modélisation du terrain naturel n'intéresse qu'une seule surface, d'ailleurs observable en tout point, alors que la modélisation des couches géologiques concerne un ensemble indissociable d'interfaces devant être fixées à partir d'un nombre restreint de sondages implantés de façon très hétérogène (fig. 1). En conséquence, l'élaboration de modèles numériques en géologie de l'ingénieur induit une méthodologie spécifique. Cette méthodologie peut avantageusement tirer profit de la morphologie du terrain par exploitation de modèles numériques orographiques.

Il commence maintenant à être reconnu [1] que la prise en compte des seuls sondages ne saurait suffire

(1) Il a été constitué dans le cadre du Comité de la Recherche et du Développement de l'Institut Géographique National un groupe de travail chargé d'examiner les divers aspects de l'élaboration et de l'application des modèles numériques de terrain. Cet article s'appuie sur les premières conclusions des travaux du groupe auquel ont été associés des organismes très divers appartenant aux différents ministères concernés à un titre ou à un autre par les modèles numériques du terrain.

(2) Cette question a été sommairement abordée dans un précédent article publié dans la revue de l'A.F.T. n° 4 septembre 1980 et intitulé : quelques réponses aux besoins des ingénieurs routiers.

dans les opérations de mise en place des interfaces géologiques. Ceux-ci par leur nombre obligatoirement limité et leur répartition conditionnée par la nature technique des projets pour lesquels ils sont exécutés, ne donnent qu'une physionomie fragmentaire des surfaces que l'on se propose de définir. Pour combler ces lacunes il est indispensable d'adjoindre à ces données d'autres types d'observations. A ce titre, la carte géologique, lorsqu'elle existe, ou le levé de terrain apporte une appréciable connaissance synthétique (fig. 2). Cette carte ou ce levé associé à un modèle numérique de terrain décrit de façon continue la géométrie des formations affleurantes ou sub-affleurantes (fig. 3). En outre, géologie de surface et orographie rehaussées d'hypothèses d'épaisseur et de superposition des couches autorisent à partir d'observations ponctuelles la représentation géométrique des formations par progression vers le bas depuis la surface topographique

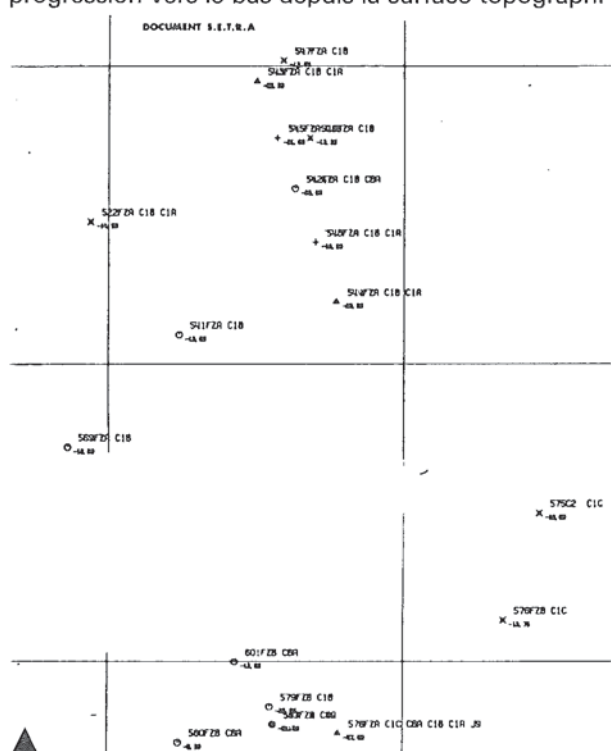


Fig. 1 : Plan de situation des sondages — document S.E.T.R.A.

- dessin automatique après interrogation d'une base de données
- les sondages sont indiqués par un symbole fonction de leur type (tarière, carottier...) et sont identifiés par un numéro
- les formations traversées par le sondage sont mentionnées selon un sigle proche du sigle couramment utilisé sur les cartes géologiques
- la répartition géographique et la profondeur d'investigation des sondages ne présentent aucune homogénéité et laissent subsister des blancs importants

Fig. 3 : Modèle numérique de terrain — document S.E.T.R.A.

- l'orographie est exprimée sous la forme d'un modèle numérique en courbes de niveau
- dessin automatique des courbes de niveau après numérisation et archivage dans une base de données
- les altitudes sont mentionnées le long des courbes maîtresses

DOCUMENT S.E.T.R.A.

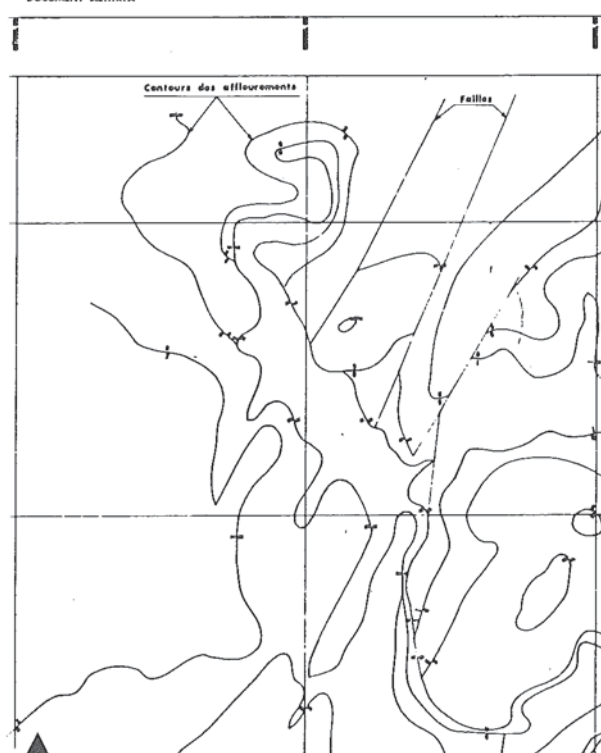
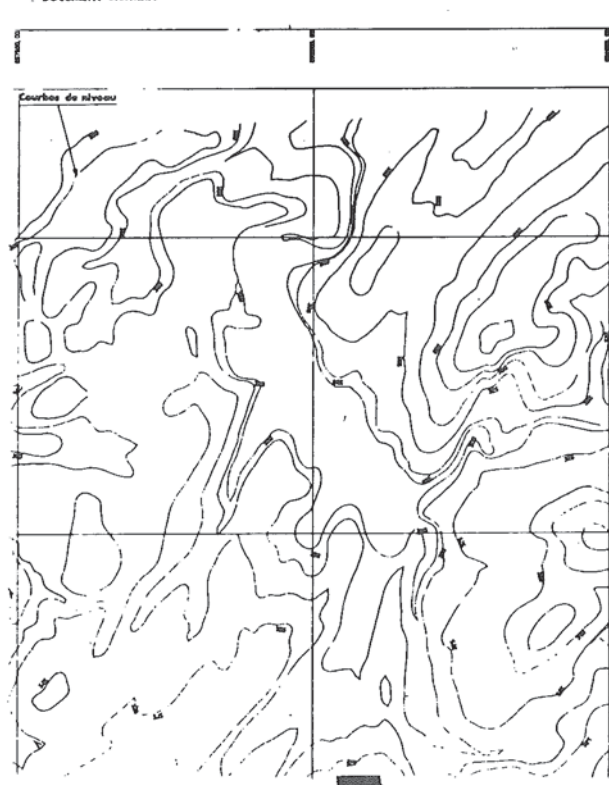


Fig. 2 : Levé géologique de terrain numérisé — document S.E.T.R.A.

- dessin automatique du contour des affleurements et des failles après numérisation et archivage dans une base de données
 - les formations géologiques sont identifiées par un sigle placé de part et d'autre du contour des affleurements
- Echelle du levé 1/10 000

DOCUMENT S.E.T.R.A.



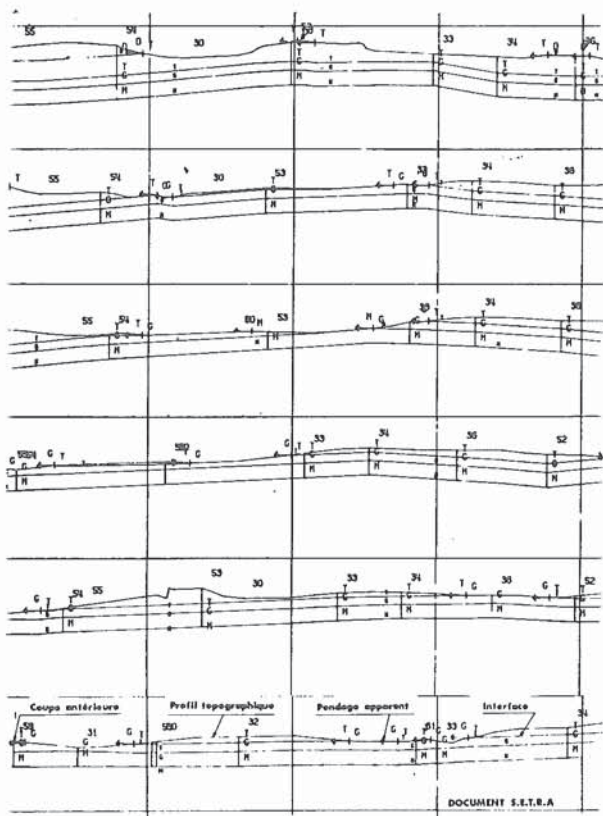


Fig. 5 : Coupes construites automatiquement - document S.E.T.R.A.

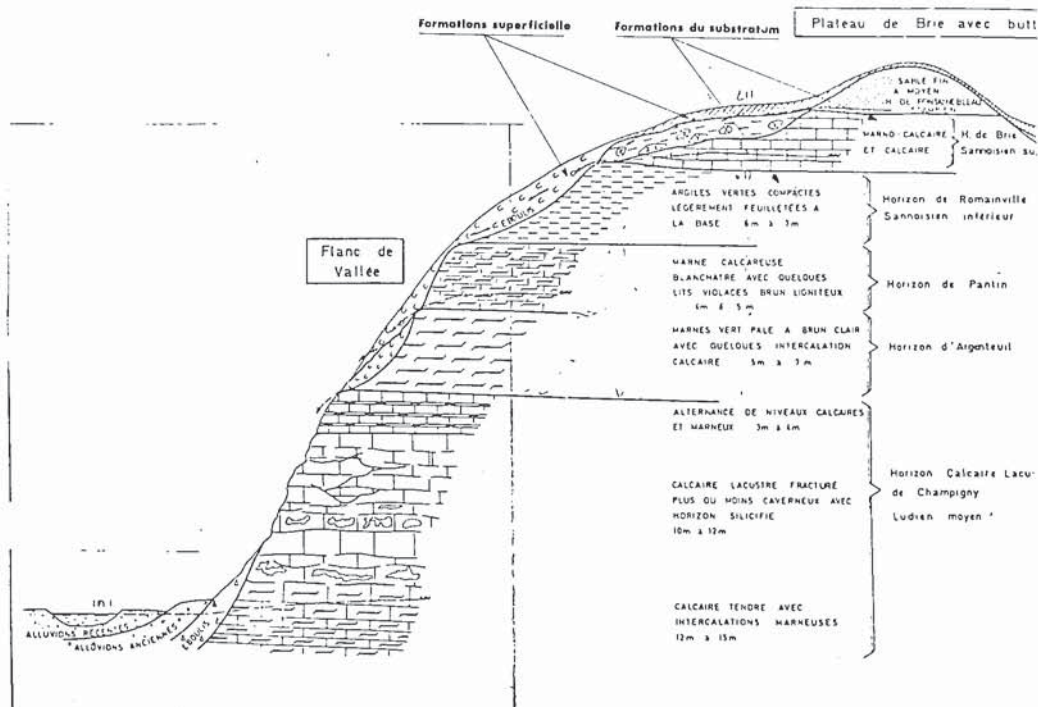
- le profil topographique a été obtenu à partir du modèle numérique du terrain par intersection de la coupe avec les lignes de niveau
- le pendage apparent des couches géologiques représenté par des flèches a été estimé par le programme au droit des coupes et des affleurements par exploitation automatique du levé géologique
- les traits verticaux figurent l'intersection des coupes entre elles (réseau). Ils correspondent à des coupes antérieurement réalisées et jouent le rôle de sondages fictifs
- à noter l'évolution de la structure géologique représentée sur cet ensemble de coupes parallèles

que (fig. 5). Toutefois cette logique de construction automatique résultant d'une exploitation géomorphologie des informations n'a de sens que dans un contexte de dépôts sédimentaires marins ou lagunaires. Aussi est-il nécessaire dans les autres cas d'introduire des hypothèses supplémentaires quant au mode de mise en place des structures géologiques [1]. Là encore ces hypothèses peuvent être établies, par exemple pour les formations superficielles, à partir d'éléments d'informations contenus dans la morphologie du terrain dont le modèle numérique orographique donne une expression, du moins à l'extérieur des zones urbaines (fig. 7).

Comme on vient de le voir, l'élaboration de modèles numériques en géologie de l'ingénieur ne peut être raisonnablement envisagée sans la préexistence d'un modèle numérique du terrain indispensable support géomorphologique.

C'est dans cet esprit que le S.E.T.R.A. a mis au point, pour les seuls terrains sédimentaires, un programme de traitement de données géologiques nommé VERCORS [2]. Ce programme qui suit la démarche classique du géologue travaillant sur une collection de surfaces, réalise automatiquement des coupes géologiques dont le réseau constitue la "maquette" numérique représentative du site ou modèle numérique de la géologie (fig. 4). Un tel modèle, synthèse de l'ensemble des informations disponibles et complémentaires — terrain, contour des affleurements, sondages, ne laisse plus subsister de blancs relatifs à la définition spatiale des interfaces des couches géologiques (fig. 6). Il peut donc à son tour devenir l'objet de traitements faisant appel aux méthodes classiques de la cartographie automatique de courbes d'isovaleur [1].

Fig. 7 : Exemple de coupe géologique montrant le recouvrement des couches sédimentaires par les formations superficielles et illustrant ainsi deux modes de mise en place bien différents



II — ÉTABLISSEMENT AUTOMATIQUE DE DOCUMENTS GRAPHIQUES EXPRIMANT LA SENSIBILITÉ VISUELLE DES PAYSAGES

La volonté d'insérer au mieux les ouvrages dans leur paysage environnant se heurte, lors de la concertation avec les différents partenaires de l'étude, à la sensibilité et aux références esthétiques individuelles. Certains, en effet, souhaitent la fusion ouvrage-paysage alors que d'autres, au contraire, prônent la transformation délibérée, radicale, voire monumentale du site ! Il est clair, qu'il ne saurait y avoir unanimité. Les opinions, en la matière relèvent de l'équation personnelle de chacun. Cependant, il importe au projecteur de livrer toutes les données objectives. Celles que personne ne peut contester [3].

Or, l'intégration visuelle d'un ouvrage ne concerne, par définition, que les seules portions qui seront visibles. Pour évident que soit cet énoncé la connaissance des parties vues n'est pas pour autant immédiate, puisqu'elle dépend assurément de la position de l'observateur.

Chacun sait qu'émergent du paysage des "dominantes", des zones qui par leur position géographique relative, leur morphologie propre, s'offrent à la vue de tous. Favorisées par leur "accessibilité visuelle", il s'agit, si l'on peut risquer cette formule de "zones à haute fréquentation oculaire", de points

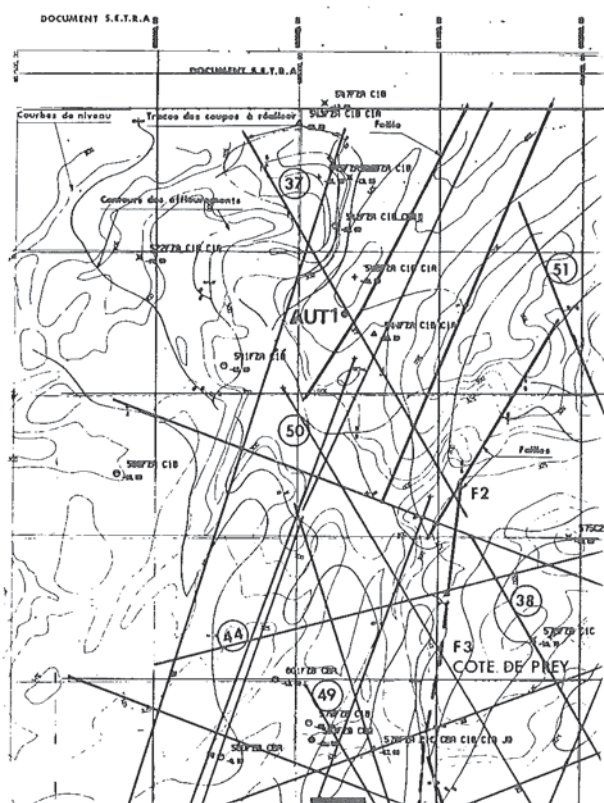


Fig. 4 : Exploitation simultanée des sondages, du levé géologique de terrain, de l'orographie et de la morphologie (Cf. Fig. 1 + Fig. 2 + Fig. 3). Schéma de principe.

Les traits épais correspondent aux tracés des coupes à réaliser dont le réseau sert d'ossature au modèle numérique de la géologie qui est constitué des coupes, des sondages, du levé géologique et de l'orographie - Document S.E.T.R.A.

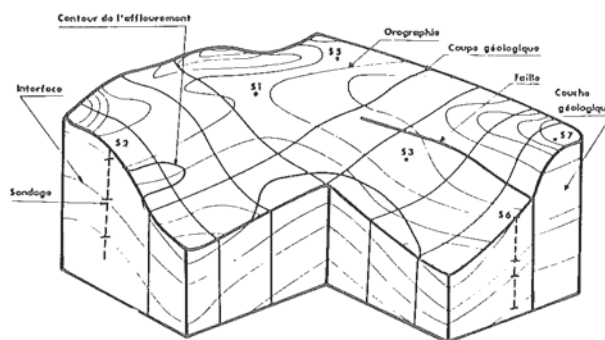


Fig. 6 : Schéma du modèle numérique de la géologie

Celui-ci comprend :

- la définition orographique précise au moyen d'un modèle numérique de terrain présenté sous forme de courbes de niveau numérisées
- l'expression de la géologie de surface grâce au levé géologique du terrain dont le contour des affleurements et les failles ont été numérisés
- des informations ponctuelles provenant de sondages
- une synthèse de l'ensemble des informations précédentes au moyen d'un réseau de coupes construites automatiquement dont les traces ont été fixées par le géologue en fonction de la répartition des informations et des structures géologiques observées ou relevées au cours du traitement

de passage obligé dans la contemplation des panoramas. De telles zones sont alors jugées plus "sensibles" que d'autres à l'implantation d'un ouvrage.

Encore faut-il pouvoir les déceler à temps. Dans le cas d'une route ou d'une autoroute, avant que le tracé ne soit figé et quand celui-ci n'est qu'une hypothèse parmi d'autres.

Des recherches sont menées dans ce domaine (3). Le S.E.T.R.A. pour sa part y apporte une contribution. D'autres organismes tels l'I.A.U.R.I.F. (4), l'I.G.N. (5) abordent ces questions en tentant d'établir automatiquement des cartes et diagrammes quantifiant, dans une certaine mesure, ce qu'il est convenu d'appeler la "sensibilité visuelle" du paysage ou de l'ouvrage.

Au stade actuel des expérimentations, ce problème est toujours appréhendé au travers d'une seule image numérique du terrain dégagé de toute occupation naturelle ou artificielle. C'est là une approximation imposée, pour le moment, par les limites technologiques des appareils de saisie. Mais, aussi justifiée par le fait que cette occupation du sol s'apparente, du moins à quelque distance et en rase campagne, à des écaillés épousant plus ou moins grossièrement le modelé du relief sans véritablement en modifier les grands traits.

L'idée de base généralement suivie consiste :

- à assimiler le site et l'ouvrage à un maillage régulier tridimensionnel :

(3) Plusieurs essais ont été entrepris dans le cadre du Groupe de travail "Modèles numériques de Terrain" du Comité de la Recherche et du Développement de l'I.G.N. dont les résultats ici présentés proviennent de l'étude de la liaison routière Flavigny-Charmes — section de 30 km 2 fois 2 voies — Conduite avec la collaboration de la Division Tracés du C.E.T.E. de l'EST.

(4) I.A.U.R.I.F. : Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Ile-de-France.

(5) I.G.N. : Institut Géographique National.

- à détecter automatiquement les nœuds de ce maillage qui sont vus ou qui sont cachés en fonction d'une ou de multiples positions d'un observateur ;
- à exprimer graphiquement les résultats.

Ce concept donne naissance à des méthodes variées selon, la façon dont on considère, par exemple, les paramètres de la vision tels que angle de vision et éloignement. Cela se traduit par des algorithmes plus ou moins complexes pour une approche globale ou ponctuelle de l'analyse visuelle des sites et des ouvrages.

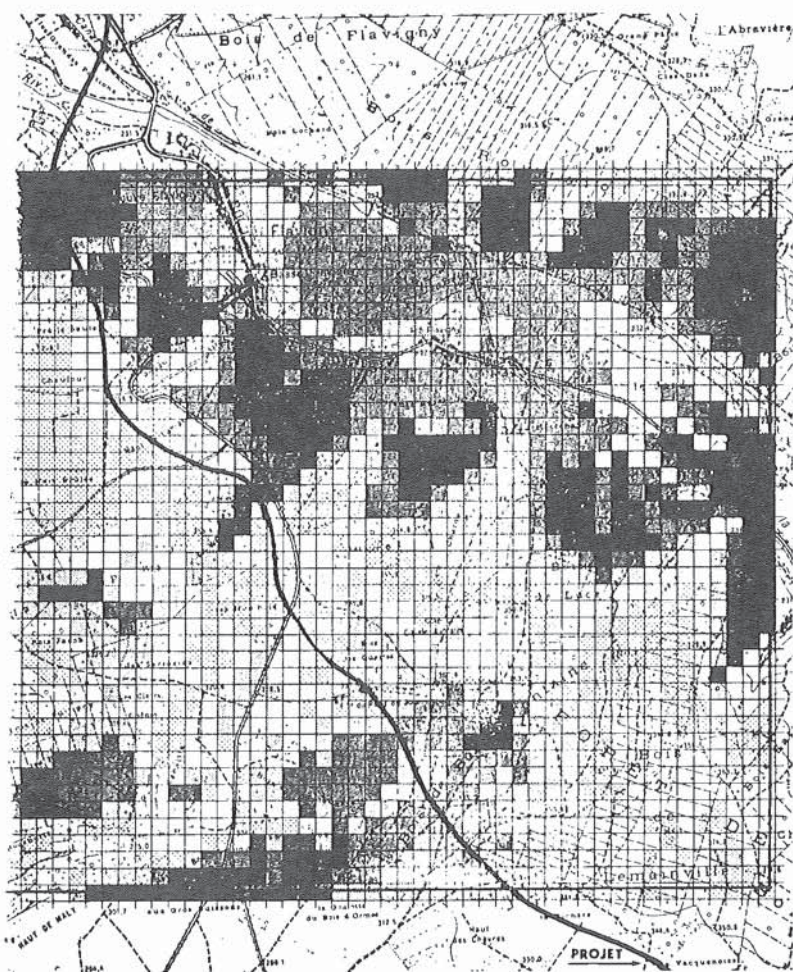
II — 1 Approche visuelle globale des sites

— Cartes d'accessibilité visuelle

Dans ce cas l'observateur, placé au centre d'un cercle définissant un champ de vision dont les dimensions sont fixées une fois pour toutes, occupe successivement tous les nœuds du maillage. En chacune de ces stations et pour le champ de vision asso-

cié, il est déterminé par rapport à l'observateur l'occurrence de chaque nœud (vu ou caché). Celle-ci est au fur et à mesure de l'investigation du site, cumulée à celle des examens antérieurs (fig. 8). Les valeurs résultantes ainsi attribuées aux nœuds du maillage sont cartographiées après regroupement en classes hiérarchisées (fig. 9), une telle approche, traduit grâce à une carte finale la répartition géographique de ce qui est couramment dénommé "sensibilité visuelle" [4]. Il serait peut-être préférable d'intituler ces documents graphiques "cartes d'accessibilité visuelle". Le point le plus fréquemment vu n'implique-t-il pas un meilleur "accès visuel" que celui qui est plus souvent caché ? La présence d'obstacles réduit bien entendu "l'accès visuel" à quelques positions d'observation seulement.

Si le recensement des zones a priori les plus sensibles à l'implantation du projet donne le moyen de "dégrossir" les études d'insertion, estimer la perception de l'ouvrage pour une hypothèse de tracé présente aussi un indéniable intérêt.



INDICES DE VISION - maille de 100 mètres
Secteur de Flavigny-sur-Moselle



classement selon les valeurs décroissantes

DOCUMENT I.A.U.R.I.F. ESSAI BAYON

Fig. 9 : Carte des indices de vision —
document I.A.U.R.I.F.

Liaison routière Flavigny-Charmes 33 km
(2)



Fig. 8 : Principe de détermination des indices de vision

Pour une position d'observation donnée I, on peut associer, par exemple, à chaque nœud vu la valeur + 1 et à chaque nœud caché la valeur - 1

Pour une autre position I + 1 ces valeurs sont cumulées à celles correspondant à la position I. On obtient, après examen total du site, en chaque nœud un indice de vision de la forme + 1 + 1 - 1 + 1 - 1 - 1 + 1 + ... qui traduit le nombre de fois que le nœud est vu.

Naturellement en respectant le même principe au fur et à mesure de l'analyse, on peut attribuer à chaque nœud une valeur pondérée par des paramètres variés de vision tels que l'éloignement, l'inclinaison, surface, etc...

II — 2 Estimation de la perception des ouvrages — Cartes de Perception

Comme pour l'approche visuelle globale des sites, l'œil fictif évolue de nœud en nœud, mais uniquement à l'intérieur d'une zone excluant l'emprise du projet. Ce dernier quant à lui est défini par un ensemble de points indépendants les uns des autres. Pour chaque emplacement d'observation il est cartographié le nombre de points vus de l'ouvrage. Une telle carte pourrait être dénommée "carte de perception de l'ouvrage" (fig. 11).

Cette démarche complète en quelque sorte la précédente. En chaque nœud, l'approche visuelle globale des sites note le nombre de fois que celui-ci est vu sans pour autant préciser de quel lieu, alors que l'estimation de la perception des ouvrages signale le nombre de points de l'ouvrage vus sans mentionner lesquels sont vus. Pour ces raisons, il convient d'affiner localement les études d'ensemble au moyen de diagrammes de vision.

II — 3 Études ponctuelles — Diagrammes de vision

Cette fois l'analyse est effectuée à partir d'un observatoire unique pour un champ de vision donné.



Fig. 11 : Sensibilité visuelle de l'ouvrage.

Document établi à partir d'une carte fournie par l'I.G.N. pour l'étude de la liaison routière Flavigny-Charmes (2)

Selon les besoins de l'étude, le point d'observation pourra être le nœud du maillage le plus proche du point particulier de l'ouvrage ou du site pour lequel le diagramme de vision est réalisé.

On pourra par exemple simplement rechercher automatiquement tous les nœuds vus du maillage. Il sera alors aisé de déduire les sites ou parties d'ouvrages susceptibles d'être masqués (fig. 13).

Partant de cette idée l'I.G.N. s'est attaché à quantifier la perception en affectant un indice à chaque facette du paysage (6). Les facettes sont issues d'un maillage circulaire auquel est assimilé le site, le maillage étant centré sur le point d'observation. Il a été retenu un indice de perception dont la valeur varie en fonction de l'angle solide sous lequel est vue chaque facette élémentaire. De cette façon il est tenu compte de l'inclinaison de la facette et de sa distance à l'observateur. Il est évident que pour une même distance le versant d'une colline est plus visible qu'une étendue plate. Par contre, un objet donné s'estompera d'autant plus qu'il sera éloigné. En outre, indiquons que ce logiciel fournit également le contour apparent des crêtes du panorama, information de nature à faciliter la compréhension du diagramme de perception (fig. 15).

(6) Étude réalisée par M. MUNIER, Ingénieur Géographe dans le cadre d'un stage de fin d'études effectué au S.E.T.R.A.

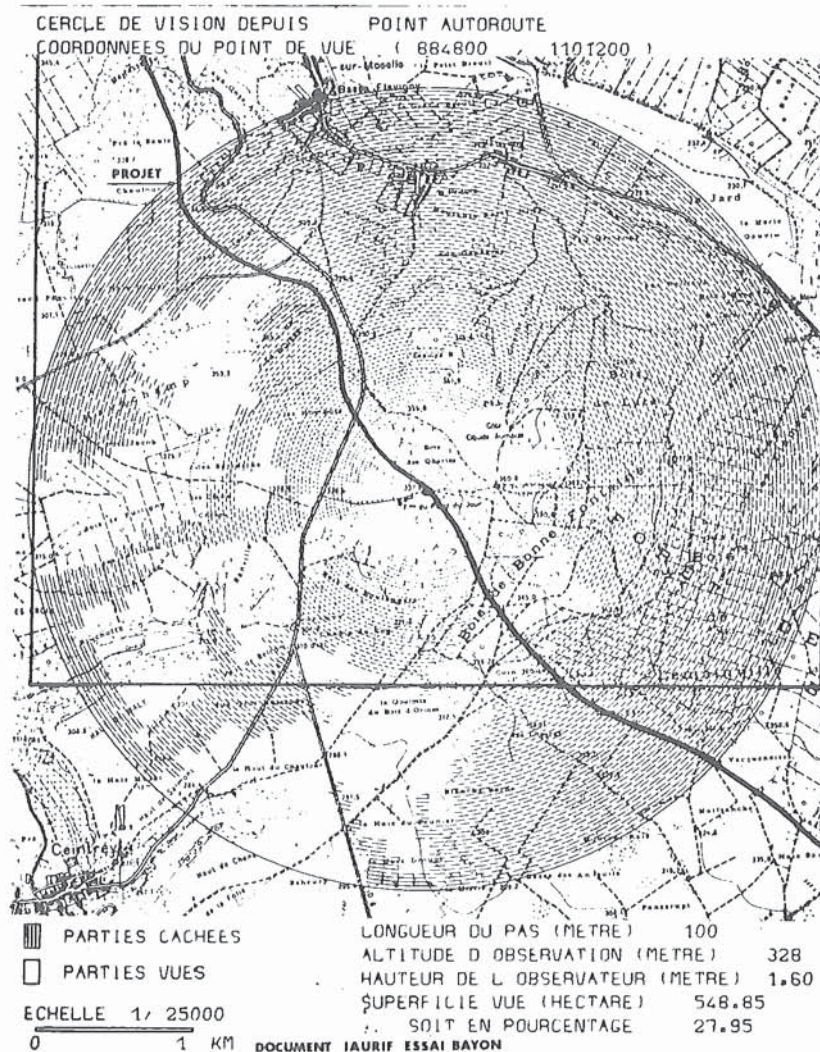


Fig. 13 : Diagramme de vision — document I.A.U.R.I.F.

Diagramme constitué pour un observateur placé à la Ferme du point du jour — Étude de la liaison routière Flavigny-Charmes (2)

II — 4 La morphologie, clé d'interprétation des résultats

Cependant, pour efficace que soient de telles méthodes leur niveau d'abstraction en réserve l'usage aux seuls spécialistes. Par ailleurs, elles s'avèrent insuffisantes pour jauger l'impact visuel des ouvrages. En effet, celui-ci impose de discriminer ponctuellement parmi tous les éléments "faisant" le paysage ceux qui charpentent à eux seuls le site et en résument l'ordonnance et le caractère. En fait ces éléments constituent la morphologie du site, laquelle, compte tenu des hypothèses faites relativement à l'occupation du sol, trouve une bonne expression au moyen des courbes de niveau du terrain naturel.

Aussi une façon d'éclairer les résultats de l'exploitation automatique des modèles numériques maillés dans le cadre des études d'environnement pourrait être de reporter sur les courbes de niveau elles-mêmes le "degré d'accessibilité visuelle" (fig. 10), le "vu et le caché" (fig. 14) ou la perception de l'ouvrage et des sites" (fig. 12). De cette façon se détacheraient du relief les formes essentielles dont dépendent les relations visuelles ouvrage-paysage.

Éléments qui sembleraient devoir aider le paysagiste lors de l'évaluation d'ensemble de l'intégration de l'ouvrage dans son site environnant. Bien sûr, pour des aspects particuliers une représentation tridimensionnelle est toujours possible au moyen de perspectives (figs. 16-17) ou de photomontages [5].

II — 5 La cartographie numérique, source d'information à explorer

Si le terrain naturel exprime par sa morphologie les grands traits du paysage il est entendu que pour des études détaillées et fines il importera à l'avenir d'élaborer des modèles numériques prenant en compte tout obstacle susceptible d'avoir une incidence majeure sur l'intégration de l'ouvrage. Tel est le cas notamment des masses boisées et des zones bâties.

Dans cette perspective, il est permis de penser que la cartographie numérique fournira à terme à la fois des fichiers altimétriques et planimétriques dont la fusion devrait conduire à la confection de modèles numériques véritables surfaces enveloppes géométriques du sur-sol.

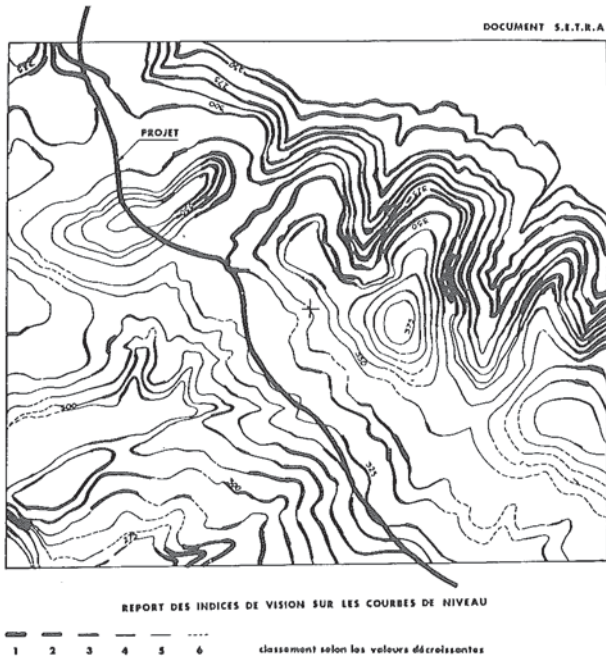


Fig. 10 : Carte d'accessibilité visuelle — document S.E.T.R.A.

Essai de report des indices de vision (cf. Fig. 9) sur les courbes de niveau altimétriques du terrain à partir de la carte des indices de vision établie par l'I.A.U.R.I.F.

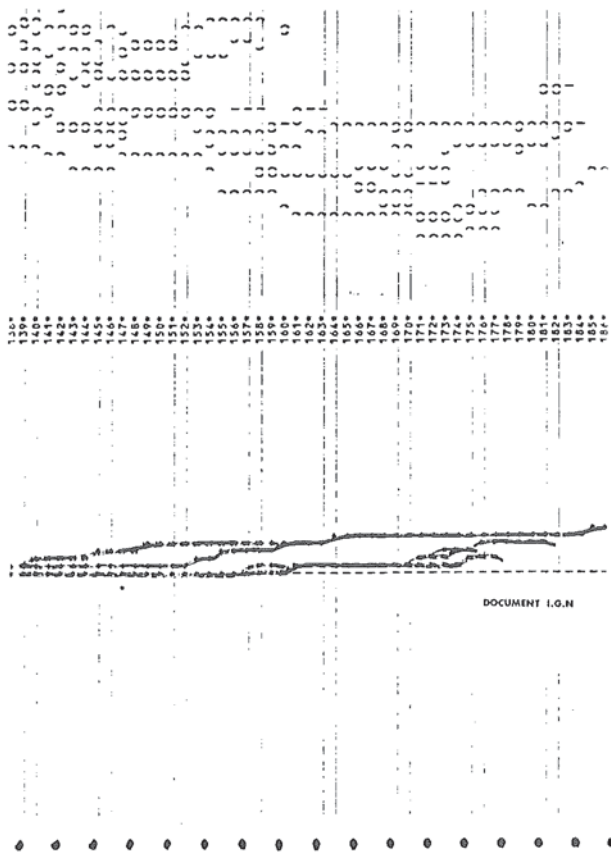
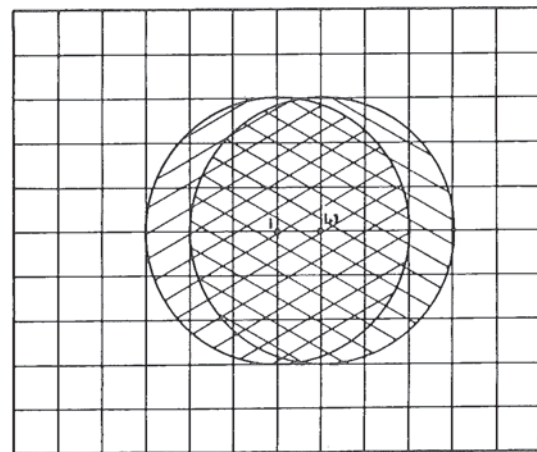


Fig. 15 : Crêtes apparentes du panorama — document I.G.N.

- expression graphique des résultats à l'imprimante d'ordinateur
- la partie supérieure superposable à la carte topographique donne la position géographique des crêtes apparentes.
- la partie inférieure correspond au dessin des crêtes apparentes pour un panorama circulaire de 360 °.
- étude de la liaison routière Flavigny-Charmes (2)



- Position de l'observateur
- Champ d'observation
- Position commune des champs d'observation pour les positions 1+1

Fig. 14 : Diagramme de vision — document S.E.T.R.A.

Essai de report sur courbes de niveau altimétriques du terrain de l'analyse de vision ponctuelle réalisée par l'I.A.U.R.I.F. (cf. Fig. 13) pour l'étude de la liaison routière Flavigny-Charmes (2)



Fig. 12 : Carte de perception de l'ouvrage — document S.E.T.R.A.

Essai de report sur courbes de niveau altimétriques de terrain de la perception de l'ouvrage à partir de la carte établie par l'I.G.N. (cf. Fig. 11) pour l'étude de la liaison routière Flavigny-Charmes (2)

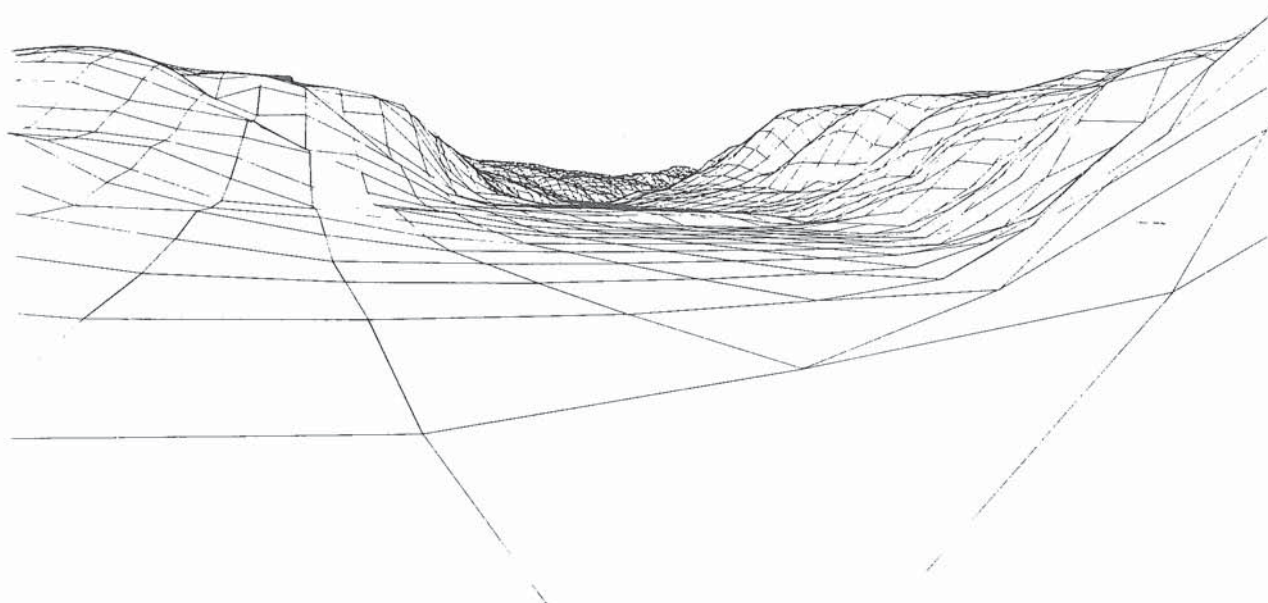
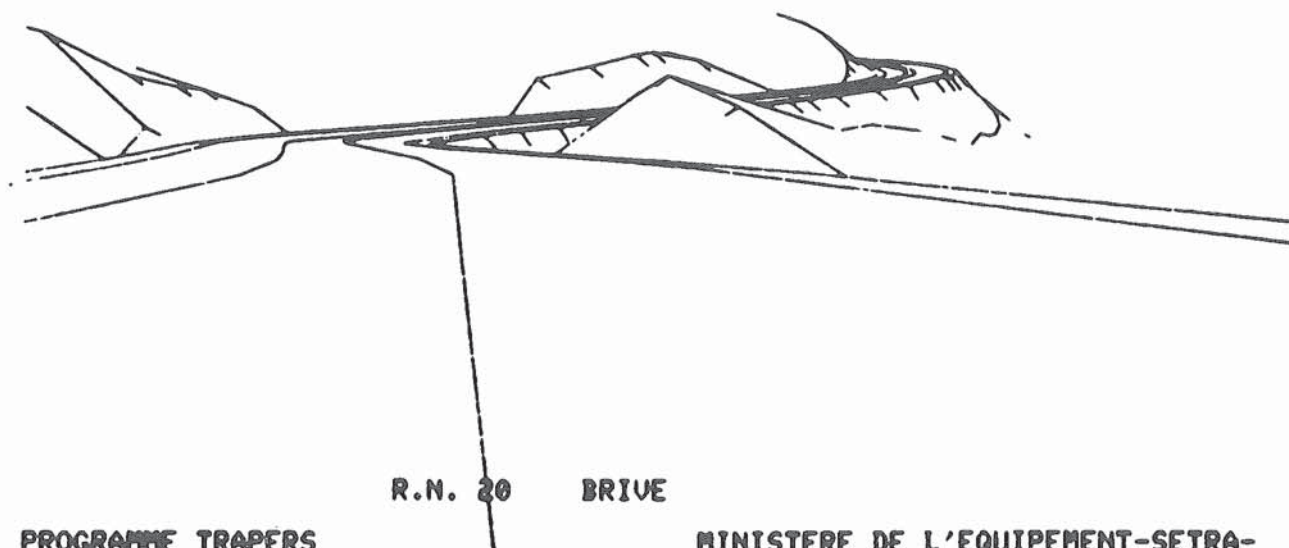


Fig. 16 : Perspective cylindrique — document I.G.N.

Perspective obtenue à partir d'un modèle numérique de terrain maillé avec élimination des parties cachées. Étude de la liaison routière Flavigny-Charmes (2)

SENS ALLER ABSCISSE DU POINT DE VUE = 4500.00
 POSITION DE L'USAGER D = 1.75 H = 1.20
 HAUTEUR DE L'OBSTACLE = 0.0
 ANGLE DE VISION = 34.
 DISTANCE DE VISIBILITE = 450. PERTE DE TRACE = 101.2



PROGRAMME TRAPERS

MINISTERE DE L'EQUIPEMENT-SETRA-

Fig. 17 : Perspective conique — document S.E.T.R.A.

Vue de l'utilisateur : perspective réalisée à partir de profils en travers définissant le projet et le terrain. Perspective avec élimination des parties cachées visualisée sur console Tecktronix et reproduction au moyen d'un système de hard copy.

BIBLIOGRAPHIE

[1] MM. BUISSON (L.C.P.C.), DEVEUGHELE (E.N.S.M.P.), GROS (S.E.T.R.A.) LEPRETRE (B.R.G.M.), Modèles numériques en géologie de l'ingénieur. Communication au 26^e congrès géologique international - PARIS 1980 - à paraître dans la revue Sciences de la terre.

[2] M. GROS (S.E.T.R.A.) — Brochures de présentation et d'exploitation du système VERCORS - S.E.T.R.A. - 1976 - 46, avenue Aristide Briand 92223 BAGNEUX.

[3] Arrondissement Paysage et Environnement S.E.T.R.A. Prise en compte du Paysage dans les tracés routiers - 1980 - 46, avenue Aristide Briand - 92223 BAGNEUX.

[4] I.A.U.R.I.F. - Techniques de visualisation des projets d'aménagement - juin 1977 - 22-23, rue Miollis 75732 PARIS CEDEX 15

[5] M. EGELS (I.G.N.), M. GROS (S.E.T.R.A.) le redressement différentiel appliqué aux techniques de photomontage panoramique - revue générale des routes et aérodromes - novembre 1980 n° 569 - 9, rue Magellan - 75008 PARIS.