

# De l'étude des sites des centrales nucléaires à... la prospection archéologique

par Marc ALBOUY - Yves LEMOINE - Pierre DELETIE

Le développement du programme électronucléaire français a conduit, à la fin des années 1970, à une recherche systématique de nouveaux sites de centrales nucléaires, sur le littoral ou en

bordure des différents fleuves.

Des études bibliographiques et des reconnaissances de sites potentiels de centrales ont alors été entreprises ; toutefois, les travaux sur le terrain s'étant heurtés à des difficultés d'accès ou même à des détériorations de matériels, l'électricité de France a envisagé de rechercher les méthodes permettant une présélection rapide des sites, sans intervention sur le terrain lui-même.

Un groupe de travail comprenant des ingénieurs d'EDF de la

Direction de l'Équipement et Jacques Lakschmann, Directeur Général de la Compagnie de Prospection Géophysique Française (CPGF) a entrepris alors une étude de préféabilité pour sélectionner — si elle existait — la méthode aéroportée la mieux adaptée pour obtenir une première sélection entre des secteurs présentant par ailleurs des caractéristiques de sites favorables.

## Conditions géologiques des sites de centrales nucléaires en France :

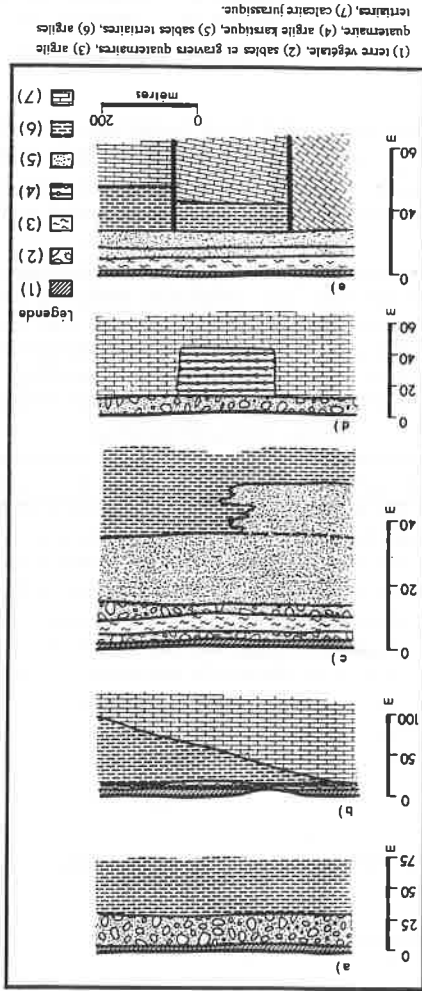
Dans une première phase, il a été établi un inventaire des structures géologiques susceptibles d'être rencontrées dans les fondations de centrales, en utilisant les connaissances de la géologie régionale et des exemples rencontrés lors des études et des caractéristiques physiques pouvant engendrer des difficultés dans le comportement des constructions envisagées, ont été modélisées non seulement par leur géométrie mais également par leur caractéristiques physiques (résistivité, caractéristiques magnétiques, sismiques, densité, etc.).

Un inventaire des méthodes géophysiques aéroportées, pouvant donner des réponses pour les principales structures géologiques retenues a été effectué en 1980. Les résultats de cette enquête internationale auprès des donneurs d'ordres, des utilisateurs, des constructeurs, d'instituts scientifiques, et l'analyse des simulations des réponses physiques aux structures géologiques envisagées ont conduit à retenir la méthode électromagnétique (EM) à fréquence entretenue. Les résultats de simulations de méthodes EM pour des résistivités habituelles en France est de l'ordre de 100 à 150 mètres, et les différents modèles géologiques proposés donnent en général des variations électromagnétiques significatives.

- \* Contrôleur Général à l'électricité de France - Responsable du Mécénat Technologique et Scientifique.
- \*\* Ingénieur ENSG-CPGF - Conseiller Scientifique.
- \*\*\* Ingénieur ENSG - EDF Direction de l'Équipement - Attaché au Chef du Département TEG.
- \*\*\*\* Jacques Lakschmann (1932-1992) a consacré son activité professionnelle au développement de la géophysique appliquée au Génie civil. Outre ses travaux sur l'électromagnétisme, ses études sur la méthode gravimétrique se sont traduites par une thèse soutenue à l'IN.P.L. à Nancy en 1988.

Cet inventaire réalisé essentiellement aux États-Unis et au Canada, lors d'un congrès à Houston et de visites chez les fabricants, a bien montré que le génie civil faisait figure de parent pauvre dans les prospections géophysiques : le pétrole se taillait la part du lion avec quatre cinquièmes des réalisations, le secteur minier représentait 15 % environ et le génie civil, l'eau et l'environnement se partageaient les 5 % restants. Notre projet, cherchant à identifier les structures géologiques sur les 150 mètres superficiels, s'appliquait aux limites des préoccupations des uns et des autres : trop superficiel pour les pétroliers et relativement profond pour la prospection minière...

Fig. 1. — Quelques exemples de « modèles géologiques » français.





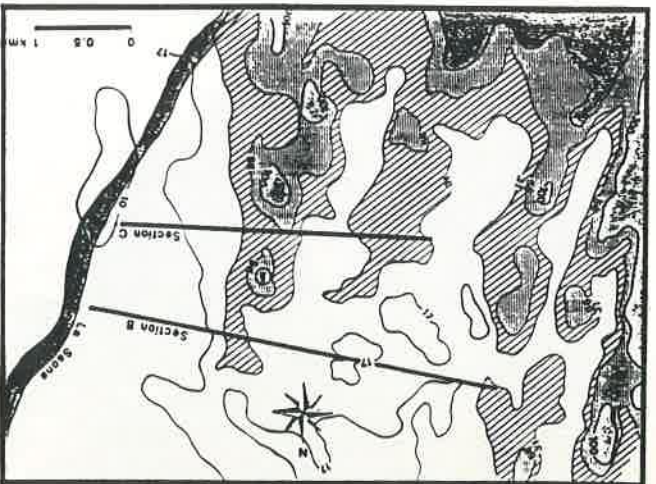


Fig. 4. — Sennecey : résistivités apparentes par méthode EM.

être détecté sous un recouvrement conducteur épais d'une centaine de mètres.

A la même époque un important développement de ces techniques EM a conduit à réaliser des appareils de moins en moins encombrants permettant d'obtenir des mesures de résistivité apparente sans contact avec le sol, appareils permettant de prospecter rapidement des zones étendues.

Bien entendu, la profondeur d'investigation de ces appareils est moins importante qu'en hélicoptère mais les résultats sont plus précis. Ainsi, l'utilisation de ces différents dispositifs permet d'obtenir des mesures de résistivité apparente pour des profondeurs variables et de réaliser ainsi, en jouant des différents dispositifs, l'équivalent de sondages électriques.

La méthode EM permettait donc de mesurer des caractéristiques électriques apparentes à des profondeurs variant de un ou deux mètres à plusieurs dizaines de mètres. Pour l'étude des horizons superficiels, dans le cadre de recherches de gravières ou des sites de carrières, les différents appareils de la société Geonics, ont permis d'obtenir des résultats parfaitement adaptés aux problèmes posés.

Trois d'entre eux ont été utilisés :

— L'EM 34-3 (photo 1). Dans cet appareil les deux bobines émettrices et réceptrices sont dans des anneaux rigides indépendants, reliés par un câble souple. Il est ainsi possible d'espacer les dipôles d'une longueur fixe (10, 20 ou 40 mètres) en fonction de la profondeur des discontinuités recherchées. La fréquence utilisée est de 9800 Hertz et la profondeur d'investigation peut atteindre 50 mètres.

— L'EM 31 (photo 2) est un appareil de 3,7 mètres de longueur utilisant également une fréquence de 9800 Hertz, il est rigide et peut être mis en œuvre par une seule personne. Sa profondeur d'investigation peut atteindre dans certains cas favorables 8 à 10 mètres.

— Enfin, l'EM 38 (photo 3) — le plus petit (1 mètre de longueur) utilisant une fréquence d'émission de 14 600 Hertz permet de mesurer la conductivité apparente des deux premiers mètres environ.

Cette panoplie d'appareils dont la destination première était la recherche minière, a donc été utilisée pour des sites de centrales nucléaires, pour des ouvrages hydrauliques et des recherches de matériaux.

## Des sites de centrales à la recherche archéologique...

L'emploi de ces techniques dans le domaine archéologique s'est effectué dès 1986 dans le cadre du Mécénat Technologique et Scientifique d'Electricité de France (cf. encadré ci-après) en



Photo 1. — Appareil EM34 lors de mesures sur le terrain.

Photo EDF-MTS.



Photo 2. — Appareil EM31 en opération.

Photo EDF-MTS.



Photo 3. — Appareil EM38 en opération.

Photo M. H. Durand.

## Le site de Saqara

collaboration avec différentes équipes et tout particulièrement avec celles de la CPGF.

Les premières applications de ces technologies dans le cadre du Mécénat Technologique d'Electricité de France ont eu pour but de rechercher les pyramides enfouies de Saqara en Egypte. Le site de la pyramide de Pépi-1<sup>er</sup> (2200 av. J.-C.) fait l'objet de fouilles et de restaurations depuis plus de vingt ans.

Enfin, ces pyramides enfouies étaient essentiellement construites en pierre calcaire taillée, leurs propriétés électriques devaient être différentes de celles des déblais plus ou moins limoneux qui les entourent; dans ce cas ces structures construites devaient apparaître comme des zones résistantes dans un environnement sensiblement plus conducteur.

Leur densité, et leurs caractéristiques sismiques doivent être plus fortes que celles des remblais; le pavage des temples dans des ouvrages voisins est parfois constitué de dalles de basalte; or, ces roches ont des propriétés magnétiques très marquées par rapport aux calcaires, briques crues ou grantes constituant des

physiques différentes des déblais qui les entourent. où ces constructions présentent plusieurs caractéristiques observer sur le site de Pèpi-er, ou dans d'autres fouilles voisines, dans un environnement comparable à celui que l'on peut

Les pyramides enfouies recherchées devaient se présenter résultats des fouilles sur l'ensemble funéraire de Pèpi-er, les structures enfouies devaient avoir des dimensions relativement importantes (20 m x 20 m), être orientées comme la pyramide principale et se trouver à moins de 10 m de profondeur; toutefois, leur position par rapport à la pyramide du Roi pouvait être très variable.

Par analogie avec des ensembles voisins, et compte tenu des résultats des fouilles sur l'ensemble funéraire de Pèpi-er, les structures enfouies devaient avoir des dimensions relativement importantes de toutes les époques?

Le problème suivant: est-il possible de repérer des structures construites en pierre sous des couches importantes de déblais? Les archéologues ont alors posé aux géophysiciens le problème suivant: est-il possible de repérer des structures construites en pierre sous des couches importantes de déblais? L'existence n'avait pas pu être localisées.

Sur ce chantier archéologique qui s'étend sur une dizaine d'hectares, les vestiges sont recouverts de déblais anciens et de sables. La pyramide principale et le temple haut ont été dégagés mais les pyramides des reines de Pèpi-er dont on supposait

l'existence n'avait pas pu être localisées.

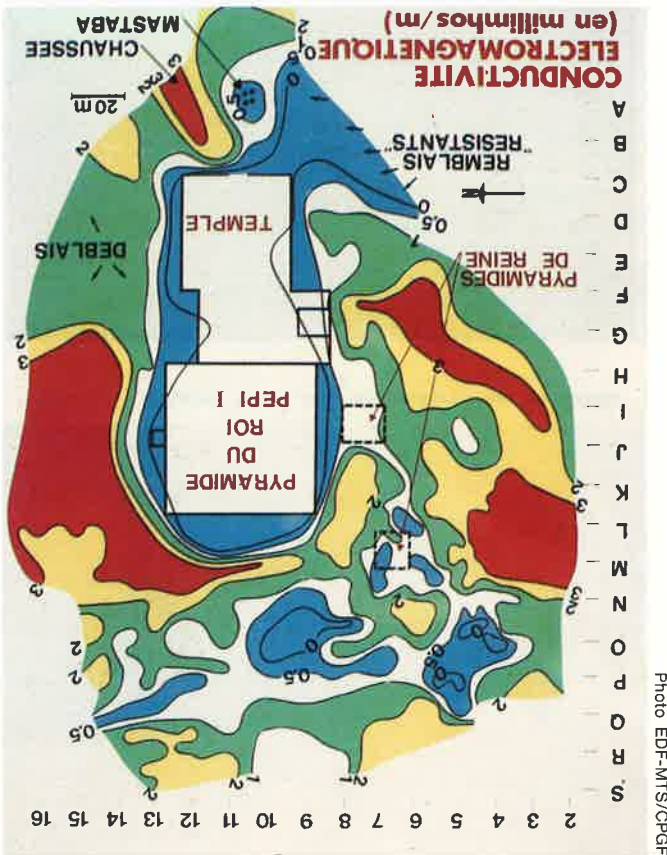


Photo 4. - Saqqara. Carte d'iso-résistivité autour de la pyramide de Pèpi 1<sup>er</sup>.

Photo EDF-MTS/CPGF.

D'autres emplacements de structures enfouies (en calcaire, en briques) ont été repérés aux abords de la pyramide principale ou au bas de la colline en bordure de la palmeraie (temple bas, bas-sins du port?).

Grâce à ces sondages un mastaba de pierre et une partie des structures de deux pyramides de reines ont pu être rapidement mis au jour (photo 5).

Par l'examen de toutes ces données, des zones d'anomalies principales ont pu être localisées sur place dès la fin des mesures. L'analyse plus détaillée des mesures a, par la suite, servi à établir différentes cartes d'anomalies de magnétisme et de résistivité (photo 4).

Les mesures ont été corrigées sur le site en tenant compte des influences dues à la topographie, à la lithographie superficielle et aux variations magnétiques; la confrontation des différentes prospections a permis d'isoler des zones contrastées sur lesquelles des mesures complémentaires plus détaillées ont pu être

immédiatement réalisées.

Les mesures ont été corrigées sur le site en tenant compte des influences dues à la topographie, à la lithographie superficielle et aux variations magnétiques; la confrontation des différentes prospections a permis d'isoler des zones contrastées sur lesquelles des mesures complémentaires plus détaillées ont pu être

rapidement à des mesures à la maille de 5 m sur les lignes principales. L'échelle des ouvrages recherchés, a permis de procéder très

rapidement à des mesures à la maille de 5 m sur les lignes principales. L'échelle des ouvrages recherchés, a permis de procéder très

rapidement à des mesures à la maille de 5 m sur les lignes principales. L'échelle des ouvrages recherchés, a permis de procéder très

rapidement à des mesures à la maille de 5 m sur les lignes principales. L'échelle des ouvrages recherchés, a permis de procéder très

rapidement à des mesures à la maille de 5 m sur les lignes principales. L'échelle des ouvrages recherchés, a permis de procéder très

rapidement à des mesures à la maille de 5 m sur les lignes principales. L'échelle des ouvrages recherchés, a permis de procéder très

rapidement à des mesures à la maille de 5 m sur les lignes principales. L'échelle des ouvrages recherchés, a permis de procéder très

rapidement à des mesures à la maille de 5 m sur les lignes principales. L'échelle des ouvrages recherchés, a permis de procéder très

rapidement à des mesures à la maille de 5 m sur les lignes principales. L'échelle des ouvrages recherchés, a permis de procéder très

rapidement à des mesures à la maille de 5 m sur les lignes principales. L'échelle des ouvrages recherchés, a permis de procéder très

rapidement à des mesures à la maille de 5 m sur les lignes principales. L'échelle des ouvrages recherchés, a permis de procéder très

rapidement à des mesures à la maille de 5 m sur les lignes principales. L'échelle des ouvrages recherchés, a permis de procéder très

rapidement à des mesures à la maille de 5 m sur les lignes principales. L'échelle des ouvrages recherchés, a permis de procéder très

rapidement à des mesures à la maille de 5 m sur les lignes principales. L'échelle des ouvrages recherchés, a permis de procéder très

rapidement à des mesures à la maille de 5 m sur les lignes principales. L'échelle des ouvrages recherchés, a permis de procéder très

rapidement à des mesures à la maille de 5 m sur les lignes principales. L'échelle des ouvrages recherchés, a permis de procéder très

rapidement à des mesures à la maille de 5 m sur les lignes principales. L'échelle des ouvrages recherchés, a permis de procéder très

rapidement à des mesures à la maille de 5 m sur les lignes principales. L'échelle des ouvrages recherchés, a permis de procéder très

rapidement à des mesures à la maille de 5 m sur les lignes principales. L'échelle des ouvrages recherchés, a permis de procéder très

Photo 5. - Saqqara. Découverte de la base d'une pyramide de reine.



Photo EDF-MTS.

A Tanis, les problèmes qui se posaient au professeur Jean Yoyotte et à la Mission Française des Fouilles de Tanis dirigée par Philippe Brissaud, étaient divers.

Comme à Saqqara, les archéologues avaient à rechercher d'éventuelles structures construites (murs de briques crues ou de calcaire) entourées sous des sables fins et limoneux. Ils devaient aussi retrouver la topographie des collines sablonneuses originelles qui avait conditionné la position des premières installations humaines.

Les difficultés de l'étude du site de Tanis tiennent d'une part aux très grandes dimensions du site et, d'autre part, aux faibles contrastes physiques, mécaniques et électriques entre les formations les plus représentées (sables fins, limons, briques crues).

Il était donc nécessaire de choisir en premier lieu une méthode de prospection rapide qui permettrait d'étudier de vastes surfaces pouvant renfermer de grands ensembles construits. Comme à Saqqara deux méthodes ont été retenues : la mesure des variations du champ magnétique naturel et la mesure de résistivité apparente des terrains (EM31, VLF et méthode électrique classique).

Lors d'un premier test, certains résultats ont déjà été obtenus. Une comparaison de profils réalisés dans la partie sud du site, zone où Philippe Brissaud avait relevé plusieurs indices archéologiques, a montré une anomalie résistante en électromagnétisme. Cette anomalie a ensuite été sommairement délimitée avec l'EM31 (photo 6).

Les fouilles entreprises en 1988 à l'emplacement de cette anomalie ont révélé l'existence de constructions monumentales : une ancienne fondation de temple et un rempart de plus de 25 m de largeur (photos 7 et 8).

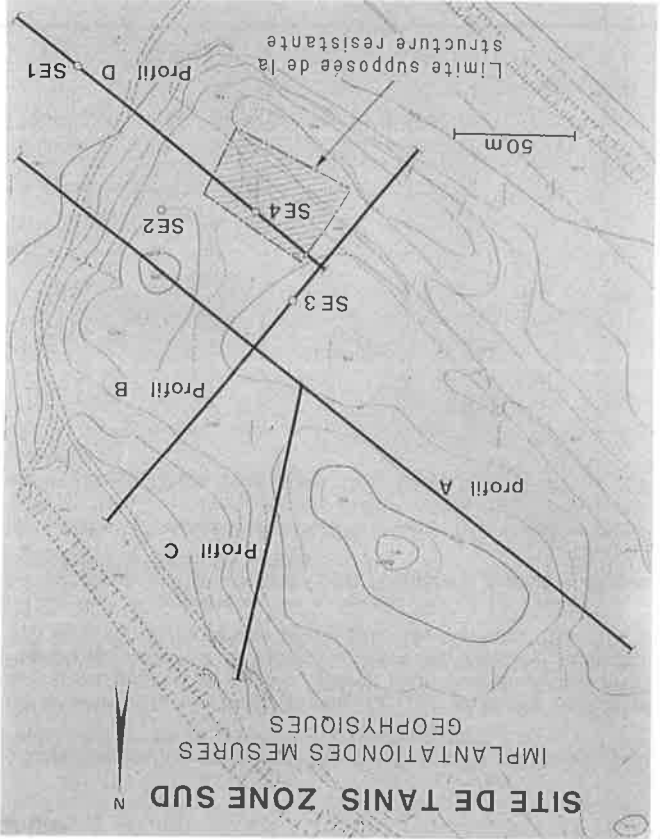


Photo 6. – Tanis zone sud. Zone d'anomalie de résistivité. (trapeze : anomalie).

Photo EDF-MTS/CPGF

## Le mécénat technologique d'Électricité de France

L'objectif du Mécénat Technologique et Scientifique (MTS) d'Électricité de France est d'apporter les connaissances, les techniques, méthodes et savoir-faire industriels dans des domaines qui sont très souvent éloignés des évolutions technologiques et industrielles, et se distingue à ce titre du sponsoring et/ou du mécénat « classique ».

Pour réaliser des projets de MTS, le mécène doit disposer de capacités technologiques fortes. C'est le cas d'EDF. Quant aux champs d'application, ils s'étendent notamment aux domaines du patrimoine, de la création artistique, de la santé, de la formation, à l'environnement, aux pays en voie de développement, etc.

## Un temps pour faire, un temps pour dire

Le Mécénat Technologique et Scientifique ne se décreète pas : il faut que le chercheur industriel ou le technicien adhère au projet, qu'il s'inscrive dans sa propre démarche intellectuelle et qu'il puisse y trouver un développement pour sa propre recherche. Ce faisant, il ne décale pas pour autant son propre programme de travail. C'est par la valorisation des hommes et de leur métier, que l'entreprise-mécène décline son identité.

L'analyse des projets, la mise en œuvre, puis la mise en valeur des résultats et des transferts de technologie constituent les différentes étapes du MTS.

A l'extérieur de l'entreprise, plusieurs publics sont intéressés :  
 — Les communautés scientifiques proches du projet : par des publications et des conférences, il s'agit de faire connaître les nouvelles applications et permettre aux chercheurs d'autres disciplines d'utiliser les nouvelles techniques.  
 — Les décideurs, les leaders d'opinion et les journalistes : la présentation des résultats facilite la compréhension et la diffusion de processus souvent complexes.  
 — Enfin les jeunes et les familles : force est de constater que le fait de donner des informations scientifiques au travers de réalisations concrètes permet de parler de technologie à un public varié. Cette information scientifique sur des actions concrètes a la vertu de dramatiser les technologies et d'atténuer les résistances à l'innovation, en situant dans l'univers familier des performances réputées inaccessibles.

Le Mécénat Technologique et Scientifique est un mécénat de chercheurs, un mécénat citoyen.

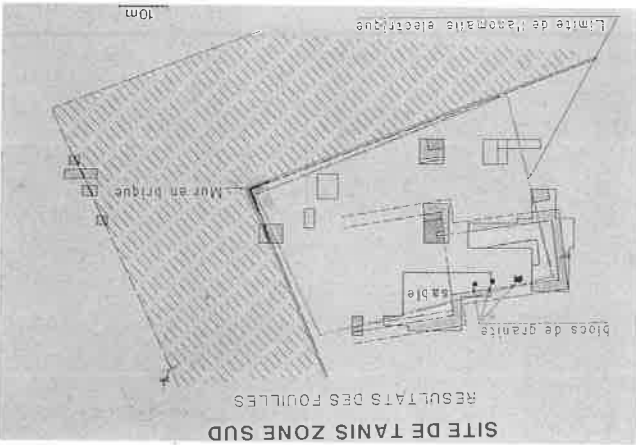


Photo 7. – Tanis zone sud. Résultat de fouilles. (trapeze : anomalie).

Photo EDF-MTS/CPGF

— Enfin en 1992, aux abords de ce grand temple, découverte des ruines de l'ancienne capitale pharaonique de la troisième période intermédiaire...

L'étude du tell n'est pas complète, mais les résultats obtenus par géophysique ont permis aux archéologues d'orienter leurs fouilles pour les années à venir...

L'utilisation de la méthode EM couplée avec d'autres méthodes de géophysique ont permis de résoudre plusieurs autres problèmes en France ou à l'étranger : localisation de grottes préhistoriques dans les Causses dans le sud-ouest de la France, vérification de la continuité d'un rempart à Grand des Vosges, localisation d'un grand monument (hélas d'époque byzantine) à Claros en Turquie, etc.

Si les méthodes décrites ci-dessus et développées par EDF et CPGF lors des études des sites de centrales nucléaires ont pu être utilisées avec succès en archéologie, des techniques induites par le développement du nucléaire sont également utilisées maintenant de manière courante dans l'étude ou la sauvegarde du patrimoine : restauration des bois gorgés d'eau, détermination d'âge absolu, etc.

Par ailleurs, le transfert ne se fait pas uniquement du domaine technique vers le domaine culturel, en effet par leurs travaux, les archéologues peuvent nous fournir des matériaux ou artificiels, dont on connaît l'époque de mise en œuvre.

L'étude de l'évolution de ces matériaux a montré que pour la grande majorité des roches, des altérations irréversibles peuvent se produire à échelle historique et ceci dans des conditions de milieu peu sévères. L'apport de ce « modèle archéologique » étendu depuis plus de dix ans maintenant peut donc être d'un grand intérêt pour préciser la pérennité des ouvrages : la collaboration entre l'archéologie et le génie civil devrait donc encore se développer à l'avenir.

## Bibliographie

- [1] Sin Ha, Ak et Collett-LS (1973). — Electro magnetic fields of oscillating magnetic fields placed over a multilayer conducting earth (geological survey of Canada paper 73.25).
- [2] Fraser (D.C.). — Resistivity mapping with an airborne multicoil electromagnetic system in *Geophysics*, vol. 43, pp. 142-172 (1978).
- [3] Rapports EDF (DE/DGG). — CPGF (non publiés) (1980-1981).
- [4] Bichara (M.) et Lakshmanan (J.). — Depth of penetration of airborne electromagnetics over stratified earth. 51<sup>e</sup> Congrès de la Society of Exploration Geophysicists. Los Angeles (1981).
- [5] Deletie (P.) et Lemoine (Y.). — Recherche d'un bed rock calcaire : méthodes classiques comparées à la prospection électromagnétique aéroportée in : *Bull Assoc. Int. de Géologie de l'Ingénieur* n° 26-27, Paris, pp. 227-233 (1983).
- [6] Deletie (P.) et Lakshmanan (J.). — Airborne resistivity surveying applied to nuclear power plant site investigation in France, pp. 142-152. In "Airborne resistivity Mapping" édité par G.J. Palacky. Commission Géologique du Canada (1986).
- [7] Bertaux (C.), Bertaux (J.P.), Deletie (P.) et Lemoine (Y.). — Géophysique et Archéologie — De Saqgara à Grand — in *Les Dossiers d'Archéologie* (1990).
- [8] Deletie (P.), Lakshmanan (J.), Lemoine (Y.), Palacky (G.J.), Steiner (M.). — Prospection Electromagnétique Hélicoptère appliquée au Génie Civil. *Mém. Soc. Géol. France*. NS n° 157 (1990).

\*  
\*  
\*

Photo 8. — Tanis zone sud. Statue découverte dans la fouille de la zone sud.



Photo P. Brissaud