Géoendoscopie : application à la reconnaissance et au diagnostic en site urbain

P. BREUL
R. GOURVES
Lermes-C/U/S/T Univ. Blaise-Pascal-Clermont II
Campus universitaire des Cézeaux
24, av. des Landais, BP 206
63174 Aubière Cedex
Breul@lermes.univ-bpclermont.fr

Y. HADDANI
Sol Solution
ZAC des Portes-de-Riom
63200 Riom

Résumé

La géoendoscopie, technique mise au point il y a quelques années, est basée sur l'utilisation de l'endoscopie et de l'analyse d'images. Utilisée dans des domaines d'application très variés, elle continue à être développée tant sur le plan technologique que sur le plan de l'analyse pour répondre à des problématiques particulières. Cet article présente justement l'application de la géoendoscopie au diagnostic et à la reconnaissance en site urbain où ses atouts (essai *in situ*, faible encombrement, rapidité de réalisation et automatisation) permettent de bien s'adapter à ce contexte (site d'accès difficile et limité, variabilité importante des milieux sondés, présence de réseaux...). La première partie de l'article présente globalement le principe technique et l'exploitation usuelle des images. Dans la seconde partie, nous présentons les possibilités offertes par la géoendoscopie pour le diagnostic de maçonnerie et le diagnostic et le contrôle d'ouvrages enterrés.

Mots-clés : **endoscopie, analyse d'images, diagnostic, site urbain.**

Geoendoscopy : application to soil investigation and diagnostic in urban area

Abstract

Geoendoscopy is based on the use of endoscopy and image analysis. Used in a wide range of application fields, this technique keeps developping (technology and image analysis) to solve some particular issues. This paper precisely deals with using geoendoscopy in urban area. The advantages of this technique (in field and light test, automatic analysis and quick execution) are well adapted to this environment (limited access, wide variability of tested area, network presence...). The first part describes the global investigation method and the usual image exploitation. We present in the second part the possibilities offered by geoendoscopy for stru cture diagnosis and burried structures control.

Key words : endoscopy, image analysis, diagnostic, urban area.

1

Contexte

Les sites urbains sont par nature des sites fortement remaniés, hétérogènes, composés de remblais récents ou anciens aux caractéristiques complexes (matériaux naturels, déchets, matériaux de démolition...). Un grand nombre d'ouvrages d'infrastructure ont été réalisés il y a plus de trente ans. Ces ouvrages nécessitent un diagnostic régulier afin de quantifier leur état et dans certains cas un entretien ou une réhabilitation afin de les régénérer et d'augmenter ainsi leur durée de vie. Du fait du contexte (réseaux, endroit d'accès difficile...) l'établissement d'un diagnostic et la reconnaissance par des méthodes classiques est souvent difficile. De plus, du fait de la variabilité extrême de ces milieux, il est nécessaire d'avoir à sa disposition des outils permettant de réaliser des sondages rapides et peu onéreux pour pouvoir les multiplier. C'est pourquoi l'utilisation de la géoendoscopie, technique portable utilisant l'endoscopie (appareil optique de faible encombrement) et l'analyse d'images peuvent être un outil intéressant pour ce domaine d'application.

Cet article présente la technique de la géoendoscopie associée à des forages mécaniques préalables (forages et/ou essais pénétrométriques notamment) de faible diamètre et à faible profondeur (de l'ordre de quelques mètres). A partir du couplage des informations mécaniques et morphologiques, différentes caractéristiques peuvent être analysées. La rapidité d'exécution des sondages et leur analyse automatique permettent en outre l'application des méthodes géostatistiques.

L'article propose dans un premier temps de présenter la technique géoendoscopique et le traitement effectué puis tente de démontrer son intérêt en site urbain, notamment, sur quelques exemples d'application réels.

2

Géoendoscopie : principe technique et exploitation

2.1

Principe technique

Si l'utilisation de l'endoscopie dans le milieu médical est devenue relativement familière, dans l'industrie, bien qu'elle soit répandue et couvre de nombreux champs d'application (notamment en mécanique, aéronautique et nucléaire), elle reste méconnue dans le domaine du génie civil. De plus, lorsqu'elle est utilisée c'est le plus souvent de manière qualitative (observation d'un milieu d'accès difficile). Quelques développements sont réalisés à l'heure actuelle dans d'autres pays (Lieberman et Anderson, 1999) (Rashke, 1996) pour tenter d'obtenir des informations quantitatives sur les caractéristiques du milieu observé. Depuis quelques années, nous avons développé cette technique dans le domaine des milieux granulaires en particulier et des géomatériaux, en général.

Parmi les différentes familles d'endoscopes existantes (endoscope rigide, vidéoendoscope, fibroscope), notre choix s'est orienté vers les vidéoendoscopes. Ces appareils sont des endoscopes souples, de longueur libre (d'un à plusieurs dizaines de mètres), comportant à leur extrémité un capteur CCD et un système d'éclairage propre (fibres optiques, LED, ampoule). Leur miniaturisation et leur souplesse d'utilisation (grande longueur, emploi en cavités non obligatoirement rectiligne, éclairage adaptable et puissant, grande résolution d'images) ont été des arguments forts pour définir notre choix.

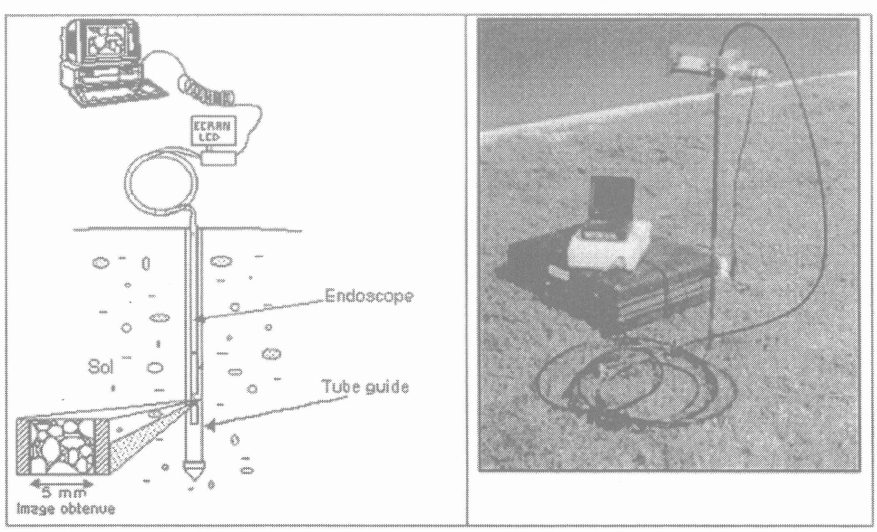


FIG. 1 **Schéma de principe et vue *in situ* du matériel de géoendoscopie.**
Apparatus principle and *in situ* presentation.

Pour répondre aux contraintes particulières de nos domaines d'application (milieux granulaires, secs ou humides, matériaux effondrables, abrasifs...), plusieurs adaptations et des prototypes ont été réalisés, notamment pour veiller à obtenir une bonne qualité d'éclairage et de prise d'images (netteté, profondeur de champ, grossissement).

La technique mise en place actuellement s'appuie sur l'utilisation d'un vidéoendoscope de diamètre 8,6 mm, éclairé par des diodes électroluminescentes (LED) apportant une lumière homogène sur l'ensemble de la surface observée. Un potentiomètre permet de régler l'éclairage en puissance. Les images sont acquises par l'intermédiaire d'un capteur CCD *(Charged Coupled Device)* de 1/6 de pouce haute résolution (470 000 pixels). La profondeur de champ varie de 5 mm à 25 mm.

L'essai endoscopique permet l'enregistrement en continu (par magnétoscope DV ou sur ordinateur) d'images de taille 5 x 5 mm avec une résolution de 10 µm/pixel.

La technique de réalisation d'essai (cf. Fig. 1) consiste à introduire l'endoscope dans un tubage placé dans la cavité préalablement réalisée par un essai mécanique. Le tube guide qui doit être en contact avec le terrain, est percé de fenêtres dont la dimension de l'ouverture est connue très précisément (5 mm). Le rôle de ce tube guide est triple : tout d'abord protéger l'endoscope lors de l'auscultation, maintenir celui-ci le plus stable possible lors de la prise d'images et enfin fournir à l'opérateur le grossissement des images. En effet, l'une des difficultés d'emploi de l'endoscopie est de connaître le grossissement auquel on travaille puisque ce grossissement évolue notablement en fonction de la distance objet observé/endoscope.

Suite à la mise en place du tube guide, l'endoscope est placé à son tour à l'intérieur des tubes et descendu jusqu'au fond de la cavité. Un film continu est enregistré pendant le déplacement de l'endoscope d'une extrémité à l'autre de la cavité, puis des images sont extraites de ce film à intervalles réguliers.

D'un point de vue pratique cette technique permet aujourd'hui l'auscultation de forage de diamètre minimal : 12 mm, de longueur 6 à 7 m et nécessite environ une demi-heure pour réaliser un essai complet (installation, réalisation, repli du matériel).

Des exemples d'images obtenues dans différents domaines d'application (milieux granulaires, maçonneries, archéologie) sont présentés figure 2.

2.2 Exploitation

Une fois les images acquises, le travail consiste à extraire des informations pertinentes d'un point de vue géotechnique et à mettre au point des analyses automatiques permettant de donner des valeurs fiables des caractéristiques étudiées.

Avant toute analyse préalable, il est nécessaire de traiter les images, afin d'éliminer tout ou partie des reflets parasites éventuels ainsi que les problèmes d'hétérogénéité d'éclairage. Cette étape est réalisée par l'utilisation d'outils de traitement d'images basés sur la théorie du traitement du signal et de la morphologie mathématique (filtrage, chapeau haut de forme, table de conversion...) (Cocquerez et Philipp, 1995), (Coster et Chermant, 1989).

A partir des images traitées, nous nous sommes intéressés dans un premier temps à l'analyse de texture qui, comme l'ont montré Rashke (1996) et Breul *et al.* (1999), permet une caractérisation partielle des matériaux. Cette analyse a pour but de dissocier et de carac-

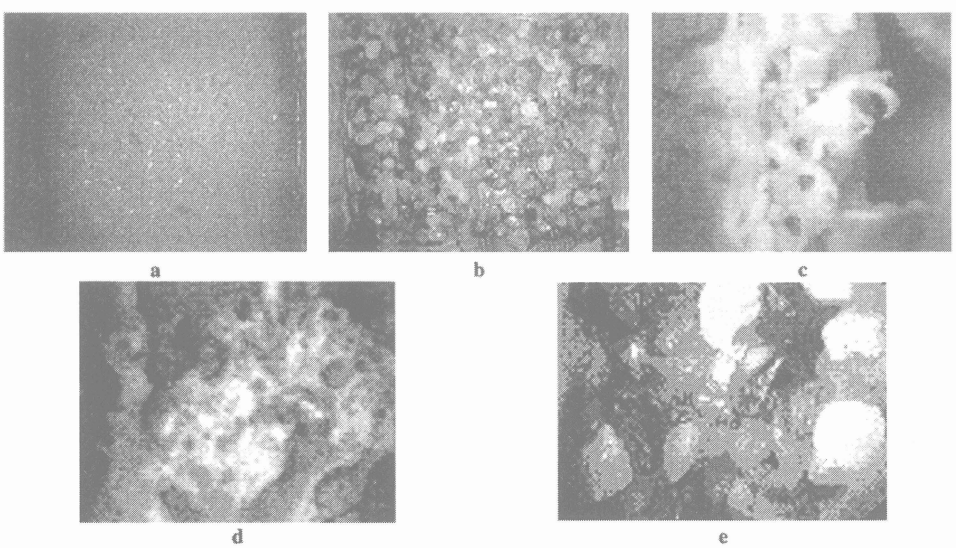


FIG. 2 **Exemple d'images obtenues (a : limon ; b : sable fin ; c : ossements ; d : maçonnerie de meulière altérée ; e : sable grossier).**
Images obtained with geoendoscopy (a : silt ; b : fine sand ; c : bones ; d : damaged structure ; e : coarse sand).

tériser les matériaux fins ou très fins (matériaux de type A1 à 4 et B5 et B6 au sens de la classification GTR du Setra (1994)) sur lesquels aucune analyse granulométrique n'est envisageable du fait de l'impossibilité d'individualiser les grains sur les images. En effet, du fait du pourcentage de particules fines (de manière générale, les particules de diamètre inférieur à 80 µm) et avec le grossissement utilisé lors de l'observation, les images ont un aspect plus ou moins « lisse ». L'étude de la texture est basée sur l'analyse spectrale de l'image et l'étude du module de la transformée de Fourier de l'image (plus particulièrement sur l'étude du moment normalisé d'ordre 3 (M3) du logarithme normalisé du spectre de puissance) ainsi que sur une analyse statistique de l'histogramme en niveau de gris (coefficient de variation et écart type).

Sur les images de matériaux possédant moins de 12 % de particules inférieures à 80 µm, nous avons mis en place des procédures automatiques d'analyse granulométrique. Ces procédures sont basées sur l'emploi de méthodes par ouverture morphologique et de méthodes d'analyse des traversées (segment interceptant les particules dans l'image) (Breul, 1999). Cette analyse est réalisable à l'heure actuelle sur des matériaux sableux ne possédant pas de particules de diamètre supérieur à 5 mm.

La couleur et la forme des particules sont les deux autres caractéristiques qui ont été étudiées. La couleur permet d'obtenir une reconnaissance stratigraphique automatique du milieu sondé. Cette caractéristique s'appuie sur les critères de teinte de saturation et d'intensité globale de l'image. La forme des particules s'appuie sur l'étude de morceaux de contours extraits à partir des images et de leur analyse automatique pour dissocier les matériaux roulés des matériaux concassés.

A partir de l'analyse des images, des graphiques donnant l'évolution des différentes caractéristiques précitées en fonction de la profondeur du sondage sont réalisés afin d'effectuer une analyse couplée des résultats mécaniques et morphologiques (cf. Fig. 3).

3

Application au diagnostic d'ouvrages enterrés

Les ouvrages enterrés (tunnels, galeries techniques, réseaux d'assainissement...) subissent des agressions très fortes dues aux régimes hydrogéologiques des terrains environnant l'ouvrage ainsi que des surcharges dynamiques liées au développement du trafic urbain. Ces dernières augmentent considérablement le vieillissement et la dégradation de ces ouvrages. Ce patrimoine en majorité construit depuis plus de trente ans accuse un certain nombre de désordres pouvant modifier ou empêcher les fonctions pour lesquels l'ouvrage est destiné. Les causes de ces désordres sont multiples (facteurs intrinsèques, présence d'eau, effluents véhiculés par l'ouvrage, terrain encaissant). La gestion de ce type d'ouvrage implique donc la nécessité de les entretenir et de les réhabiliter pour conserver ou rétablir leurs fonctions d'origine voire pour les améliorer afin de tenir compte des nouvelles normes techniques, de sécurité ou d'hygiène sanitaire.

L'objectif du diagnostic de tels ouvrages est de déterminer l'état de la structure, d'observer l'interface sol/structure (le contact) et de caractériser le milieu encaissant (état de serrage, injectabilité, cavités...). De nombreuses méthodes de diagnostic existent (inspec-

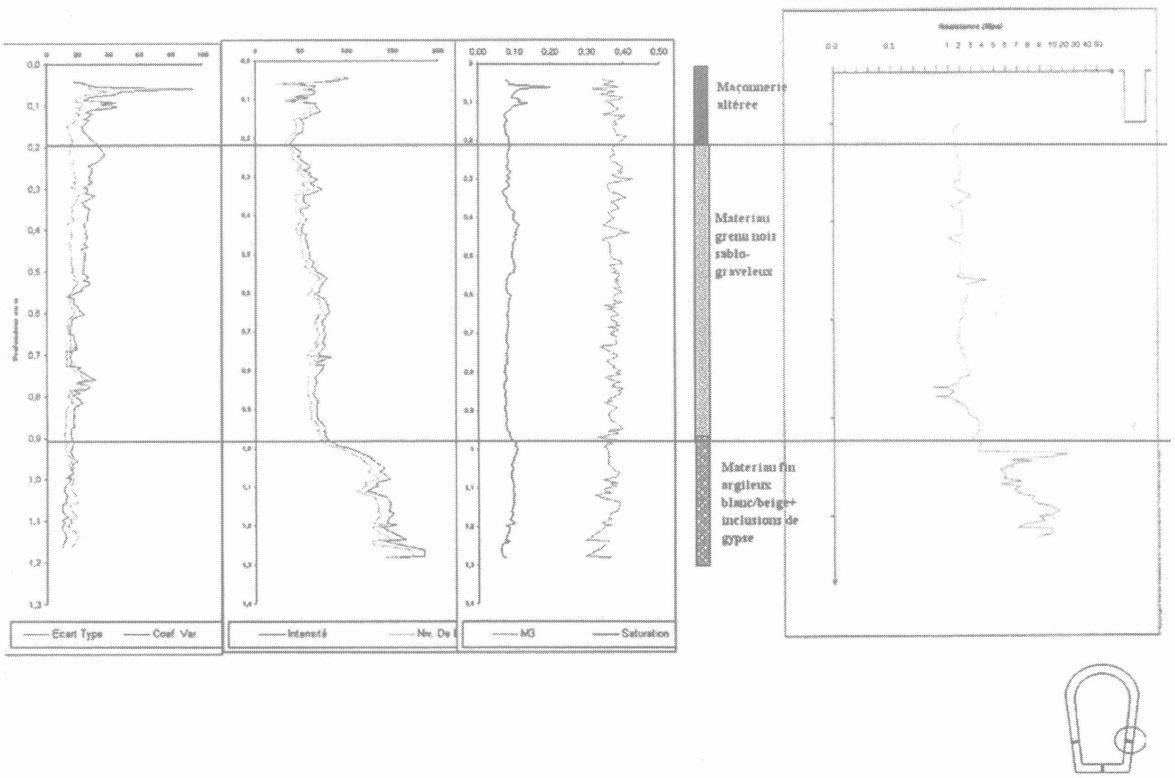


FIG. 3 **Exemple de résultats d'analyse endoscopique et pénétrométrique effectué dans le même sondage.**
Results of geoendoscopy and light dynamic penetrometric test realised in the same boring.

tion visuelle ; méthodes géophysiques : radar, électrique... ; système MAC – mécanique d'auscultation des conduits – essai basé sur la sollicitation des parois d'un ouvrage par vérinage ; sondages destructifs ; essais d'eau) mais la géo-endoscopie couplée à des essais de forages mécaniques peut permettre de caractériser l'état général de l'ouvrage et de chacune de ses parties (structure, contact, encaissant) individuellement ou d'améliorer notablement les analyses effectuées à partir d'essais réalisés avec des méthodes globales.

Nous allons présenter son intérêt sur un exemple de diagnostic de maçonnerie, ainsi que sur la caractérisation complète d'une canalisation visitable (structure, contact et encaissant).

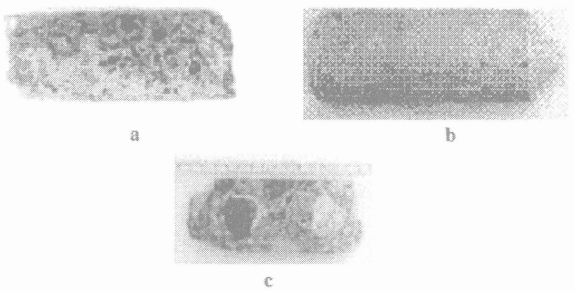


FIG. 4 **Exemple de carottes étudiées (a : meulière dégradée ; b : calcaire ; c : maçonnerie saine).**
Core examples studied (a : damaged structure ; b : limestone ; c : sound structure).

3.1 Diagnostic de maçonnerie

3.1.1 Position du problème

Les méthodes de diagnostic de maçonnerie classiquement utilisées consistent essentiellement en des carottages et des essais Lugeon. L'analyse de la carotte permet de déterminer la nature des matériaux utilisés ainsi que l'épaisseur de la paroi, l'essai Lugeon permet de quantifier le débit de fuite donc l'état de fissuration de la structure.

L'utilisation de la géoendoscopie dans ce cas de figure permet d'obtenir les mêmes renseignements que le carottage et l'essai Lugeon (épaisseur, nature des matériaux, et état général de la maçonnerie) mais dans un forage plus étroit (de l'ordre de 1,5 cm) donc moins traumatisant et de manière automatique et rapide (technique portable et analyses automatiques).

L'étude présentée ci-après a été réalisée dans une galerie technique sur Paris. L'objectif était d'évaluer la possibilité de quantifier l'état des maçonneries au moyen de la géo-endoscopie (calcul du RQD, *Rock Quality Designation*, quantification du degré de fracturation des roches. Le RQD désigne le pourcentage de morceaux de carottes sains de longueur supérieure à 10 cm) ainsi que la nature et la position des pathologies (présence de fissures, oxydation de la meulière, matériaux désagrégés...).

3.1.2 Le protocole expérimental

Pour mettre en place le diagnostic de maçonnerie par géoendoscopie, nous avons dans un premier temps, étudié les caractéristiques endoscopiques d'un échantillon de carottes issues de campagnes de diagnostic antérieures afin de réaliser un paramètrage des différents matériaux (Fig. 4) et déterminer les seuils discriminants vis-à-vis des défauts (Haddani, 2001).

Les carottes concernaient trois types de matériaux :

– maçonneries béton à différents états de dégradation (saine, dégradée, fine, grossière) ;

– maçonneries de meulière (saine ou oxydée) ;

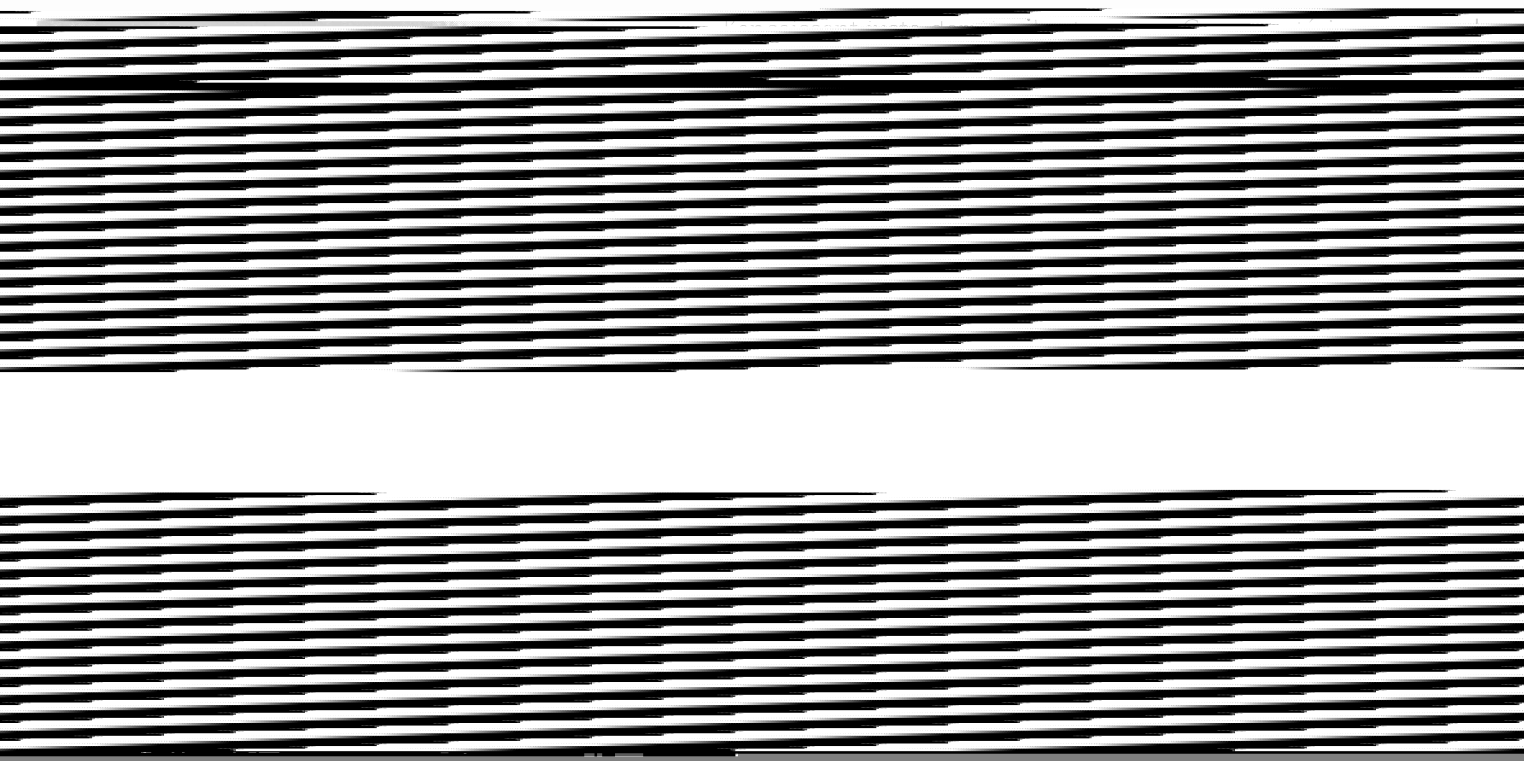
– matériaux naturels (calcaire, argile).

L'étude de paramétrage consiste à établir des critères permettant de reconnaître automatiquement les différents matériaux susceptibles d'être rencontrés dans une paroi d'ouvrage enterré ainsi que les défauts de structure existants (fissure, vide...) par analyse d'images.

Les images ont été prises sur quatre génératrices de chaque carotte à 90° les unes des autres. A partir de ces images, les paramètres statistiques, de texture ainsi que de couleur ont été extraits.

Les résultats obtenus nous ont permis de déterminer pour chaque caractéristique de couleur et de texture et chaque matériau des plages de valeurs où la probabilité de présence est maximale (Tableau I). L'analyse de ces valeurs met en évidence la possibilité de distinguer certains matériaux à partir de ces paramètres. En revanche, la recherche de nouveaux paramètres (de texture notamment) sera nécessaire pour permettre de mieux dissocier des matériaux dont les caractéristiques actuelles sont très proches.

A partir de ces données nous avons établi les seuils des paramètres permettant de caractériser les différents matériaux et plus particulièrement les fissures ou trous (Tableau II) dans la maçonnerie, les meulières dégradées (oxydées) ou les maçonneries dégradées (manque de liant ou liant détérioré) (Fig. 5).

TABLEAU I Extrait de tableau récapitulatif des paramètres relatifs aux différents matériaux étudiés (intervalle de confiance à 95 %).
Sample of image parameters values obtained on different materials (confidence interval at 95 %).

Matériaux	H (teinte en rd)	S (saturation en rd)	I (intensité en niv. de gris)	M3 (moment de Fourier	Ec (écart-type en niv. de gris)	CV (Coef. var. en %)
Calcaire	0,2/0,8	0,03/0,08	175/235	0,33/0,345	14/23	5/14
Maçonnerie saine	0,9/2,1	0,07/0,09	54/65	0,36/0,385	16/23	21/28
Meulière dégradée	0,7/1,3	0,14/0,22	140/190	0,32/0,36	28/40	20/35