

Etude de la Vulnérabilité d'un Aquifère Fracturé dans un Contexte d'Implantation d'un Centre d'Enfouissement Technique (CET) : Application de la Télédétection et de la Géotechnique sur le Site de Kossihouen en Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest)

[Study of the Vulnerability of Fractured Aquifers in the Context of an Implementation of a Modern Landfill: Application of Remote Sensing and the Geotechnical Method on the Site of Kossihouen (Côte d'Ivoire, West Africa)]

Yao Blaise KOFFI¹, Kouassi Ernest AHOUSSE¹, Konan Emmanuel KOUADIO¹, Amani Michel KOUASSI², Ouattara KOUASSI¹, Loukou Christophe KPANGUI¹, and Jean BIEMI¹

¹Université de Cocody,
Unité de Formation et de Recherche (UFR) des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM),
22 BP 582 Abidjan 22, Abidjan, Côte d'Ivoire

²Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB),
Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi),
BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

Copyright © 2013 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The workshop of the interdepartmental committee responsible for managing household waste in Abidjan (Ivory Coast) in 2007 showed that the landfill site should be chosen out of the coastal sedimentary basin to protect the groundwater of the Continental Terminal aquifer against pollution. Indeed, this aquifer provides the potable water to Abidjan populations and also assures uniformity of the price of water by the water company of the Ivory Coast. But, given the groundwater flow and the possibility of transfer of fluid between the discontinuous and continuous aquifers, is it possible that an activity taking place outside the coastal sedimentary basin of Côte d'Ivoire (such as a landfill site) contributes to the pollution of the groundwater in Abidjan. To resolve this problem, the geotechnical surveys, the laboratory tests and in-situ tests were conducted to determine the types of the soil across the study site. The Landsat TM scenes 196-56 of 12/30/1990 were processed to study the fracturation of the site. The geotechnical tests carried out in situ on the study area and the laboratory test allowed knowing the nature of the formations and their different permeabilities. Indeed, the formations are generally complex and formed of sandy clay of low to very low permeability ranging from $9.8 \cdot 10^{-7}$ to $1.1 \cdot 10^{-5}$ m/s in situ and $1.68 \cdot 10^{-6}$ to $1.76 \cdot 10^{-5}$ m / s in the laboratory. Regarding remote sensing, the Landsat image processing revealed megafaults (NE-SW) on the site of the modern landfill of Kossihouen.

KEYWORDS: Leachate, contamination, groundwater, satellite images, geotechnical surveys.

RESUME: Les travaux du comité interministériel chargé de la gestion des déchets ménagers et assimilés à Abidjan en Côte d'Ivoire ont montré en 2007 que le site des décharges devrait être choisi hors du bassin sédimentaire côtier pour préserver les eaux de la nappe du Continental Terminal contre toute pollution. Cette nappe permet d'alimenter en eau potable la ville d'Abidjan et permet également d'assurer la péréquation en ce qui concerne le prix de l'eau par la Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire sur l'ensemble du territoire ivoirien. Mais, compte tenu des écoulements souterrains et de la possibilité de transfert de fluide entre les milieux discontinus (socle cristallophyllien) et continu (bassin sédimentaire côtier), on peut craindre qu'une activité se déroulant hors du bassin sédimentaire côtier de Côte d'Ivoire (Centre d'Enfouissement Technique) contribue à la pollution des eaux de la nappe d'Abidjan. Pour répondre à cette problématique, des sondages

géotechniques, des essais de laboratoire et des essais in-situ ont été effectués pour la détermination des types de sols sur l'ensemble du site d'étude. Les images Landsat TM de la scène 196-56 du 30/12/1990 ont été traitées pour étudier la fracturation. Les essais géotechniques réalisés in-situ et au laboratoire ont permis de connaître la nature des formations et leurs différentes perméabilités. Il s'agit de complexes argilo-sableux de perméabilité faible à très faible variant de $9,8 \cdot 10^{-7}$ à $1,1 \cdot 10^{-5}$ m/s in situ et de $1,68 \cdot 10^{-6}$ à $1,76 \cdot 10^{-5}$ m/s au laboratoire. En ce qui concerne le traitement des images Landsat, il a révélé la présence de méga-fractures de direction NE-SW sur l'ensemble du site du CET de Kossihouen.

MOTS-CLEFS: Lixiviats, contamination, eaux souterraines, images satellitaires, sondages géotechniques.

1 INTRODUCTION

En Côte d'Ivoire, les eaux du Continental Terminal (CT) ou nappe d'Abidjan sont très importantes car elles permettent d'alimenter en eau potable la ville d'Abidjan et d'assurer la péréquation en ce qui concerne les prix de l'eau par la Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire (SODECI) sur l'ensemble du territoire ivoirien. Mais cette ressource vitale est menacée par les activités agricoles, industrielles et par le manque d'assainissement. En 2007, le Ministère en charge de la gestion des déchets ménagers a présidé un comité interministériel dont les conclusions ont indiquées clairement que le site des Centres d'Enfouissement Techniques (CET) devrait être choisi hors du bassin sédimentaire côtier, quelles que soient les performances et la pertinence de la technologie utilisée. Cette disposition avait pour objectif de garantir la protection de la nappe phréatique et des réserves qui alimentent et alimenteront la ville d'Abidjan en eau potable. Mais, compte tenu des écoulements souterrains et la possibilité de transfert de fluide entre les milieux discontinu (socle cristallophyllien) et continu (bassin sédimentaire côtier), on peut donc craindre qu'un Centre d'Enfouissement technique situé même en dehors du bassin sédimentaire côtier contribue à la pollution des eaux de la nappe d'Abidjan.

C'est pour tenter de répondre à cette problématique que ces travaux ont été initiés. L'objectif est de caractériser le contexte géologique et hydrogéologique dans lequel le CET de Kossihouen sera mis en place dans le but de résoudre définitivement l'épineux problème de la contamination possible des eaux du Continental Terminal par les eaux usées en provenance de cette décharge. Plusieurs études ont déjà été réalisées sur la quantité et/ou sur la qualité des eaux de la nappe d'Abidjan. Ces études concernent très souvent les problèmes de la réalimentation et de l'impact des activités socio-économiques situées sur le bassin sédimentaire côtier sur la qualité des eaux de la nappe.

Plusieurs auteurs ont travaillé sur ces problématiques et parmi les études les plus récentes on peut citer celles de [1] sur la variabilité du régime pluviométrique du Sud de la Côte d'Ivoire et son impact sur l'alimentation de la nappe d'Abidjan et de [2] sur la Gestion des déchets solides dans le District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) en utilisant un SIG et des méthodes d'analyse multicritères. Cependant, aucun de ces travaux ne concernent l'impact possible des activités socio-économiques se déroulant sur le socle cristallophyllien et qui pourraient avoir des effets fâcheux sur la qualité des eaux de la nappe d'Abidjan utilisées pour l'alimentation en eau de boisson des populations abidjanaises. Cette contamination pourrait se faire par le canal des réseaux de fractures situés sur le socle cristallophyllien en amont du bassin sédimentaire côtier. C'est pourquoi cette étude est tournée vers l'étude de la fracturation de cette zone à l'aide de la télédétection, couplée avec la géotechnique afin d'examiner les possibilités de transfert de polluants du socle vers le bassin sédimentaire côtier.

Pour atteindre cet objectif, la première partie de cette étude présentera le contexte en localisant la zone d'étude et en décrivant son milieu physique. En ce qui concerne la seconde partie, elle s'attardera sur les données, le matériel utilisé ainsi que les méthodologies appliquées. La troisième partie quant à elle, présentera les résultats et les discutera. Une conclusion ainsi que des références bibliographiques termineront cette étude.

2 CONTEXTE DE L'ETUDE

Le site du Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Kossihouen est situé à l'intersection de l'autoroute du Nord et de la voie non bitumée reliant ce village à la Sous-Préfecture de Songon (Figure 1) entre les latitudes $5^{\circ}40'$ et $5^{\circ}30'$ N et les longitudes $4^{\circ}20'$ et $4^{\circ}10'$ W.

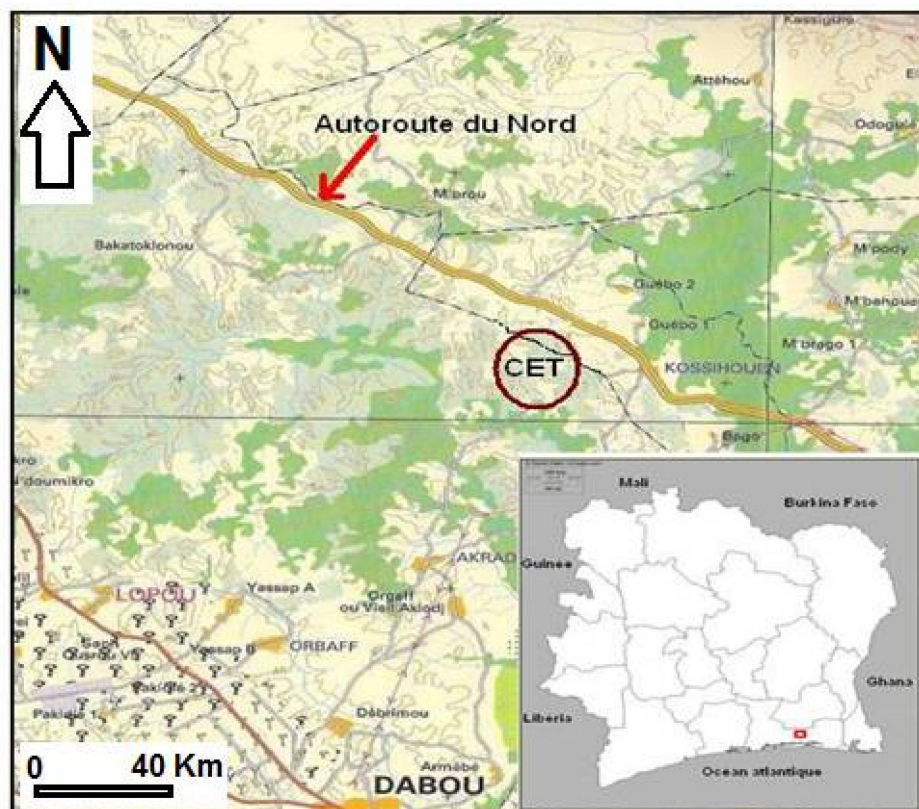


Fig 1. Localisation du Centre d'Enfouissement technique (CET) de Kossihouen

Ce Centre d'Enfouissement Technique de Kossihouen couvre une superficie de plus de 100 ha. Il est distant du village de Kossihouen de 4 Km et de l'affluent du fleuve Agnéby le plus proche d'environ 10 km. On rencontre dans les environs 4 ruisseaux dont 3 sont saisonniers et s'écoulent d'Est en Ouest (Figure 2).

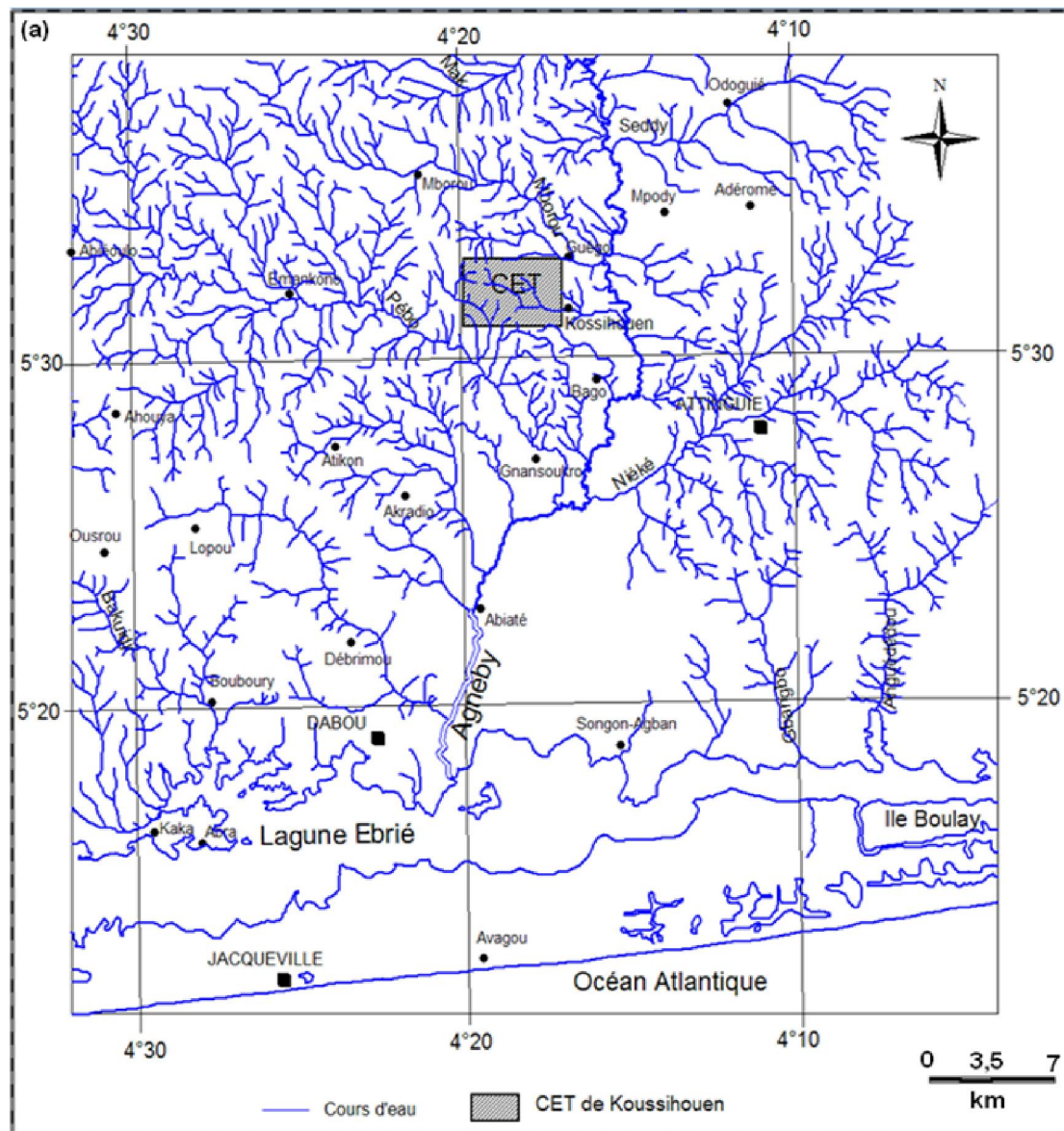


Fig 2. Réseau hydrographique de la zone d'étude

Le réseau hydrographique de la zone d'étude est de type dendritique et correspond soit à des sédiments uniformément résistants, horizontaux ou biseautés par une surface horizontale, soit à des roches cristallophyliennes, ce qui est le cas ici. Dans ce réseau dendritique, les eaux y circulent du Nord au Sud et les débits sont généralement croissants dans cette direction.

La zone d'étude est soumise à un régime équatorial de transition, climat attéen, contrôlé par la confluence de deux (2) masses d'air : l'harmattan (air chaud et sec) qui souffle du Nord-Est vers le Sud et la mousson (air froid et humide) provenant de l'atlantique. Dans cette zone, les précipitations sont généralement fortes, comprises entre 1040 et 2100 mm sur la période 1990 à 2010. Ces pluies ont une distribution spatio-temporelle inégalement répartie. Les températures quant à elles sont toujours supérieures à 20°C et oscillent entre 22 et 28°C. Mais, les dernières décennies ont été caractérisées par une élévation progressive des températures qui sont passées en moyenne de 25 à 28°C.

Le contexte géologique de la zone d'influence du CET de Koussihouen est marqué par la présence de deux unités distinctes : le socle éburnéen au Nord et le bassin sédimentaire côtier au Sud (Figure 3). Le socle éburnéen est formé de roches cristallines et cristallophyliennes qui occupent le Centre et le Nord de la région. Il s'agit principalement de schistes birimiens qui, très altérés dans les niveaux supérieurs, donnent des argiles caractéristiques : versicolores, tigrées ou bariolées. Dans cette zone, tous les bancs schisteux sont en général redressés à la verticale, si bien que les plans de

schistosité sont quasiment tournés vers le haut, et directement accessibles aux précipitations. Les schistes ont connu plusieurs phases de remontées hydrothermales issues de magma liquide comme en témoigne la présence de nombreux filons de quartz à travers les plans de schistosité. Le socle éburnéen de Dabou, de nature cristalline et cristallophyllienne, est fréquemment intrudé ici et là par des pointements de granitoïdes éburnéens (granites à un ou deux micas, granodiorites, microdiorites de teinte claire à sombre à grains fins, moyens ou grossiers) et par d'autres roches de nature plus basique. Du point de vue minéralogique, les granites de la région sont à deux micas associés essentiellement aux minéraux suivants: quartz, plagioclases, orthose, microcline, [3]. La séricite et le chlorite y sont associés respectivement aux plagioclases et à la biotite. La présence de quelques minéraux accessoires comme le sphène, l'apatite et l'épidote est à signaler ainsi que celle de quelques bourgeons de myrmékite.

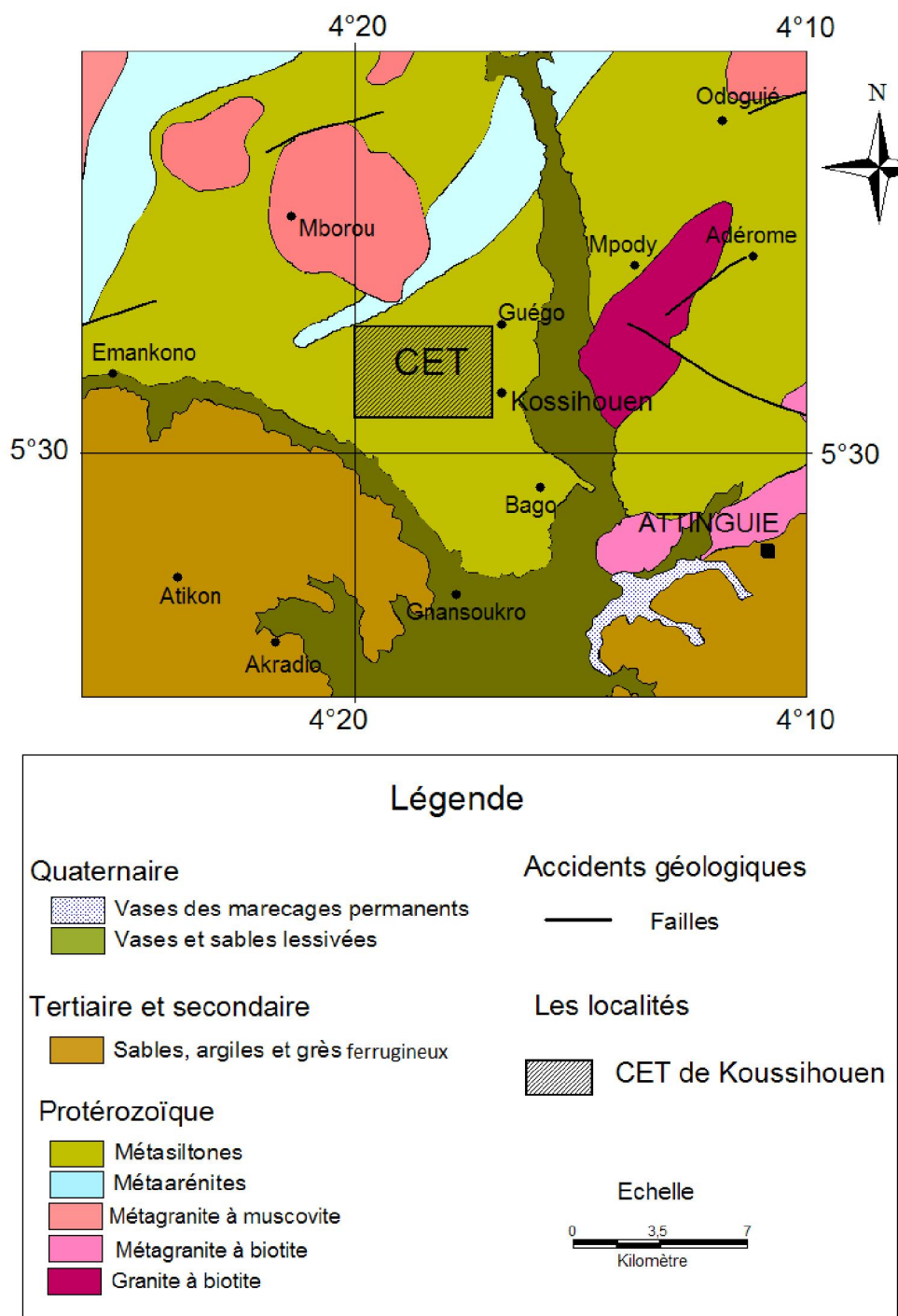


Fig 3. Carte géologique du site du CET de Kossihouen [4]

Le contexte hydrogéologique se caractérise par deux types d'aquifères : les aquifères discontinus du socle sur lequel sera installé le CET et l'aquifère continu du bassin sédimentaire côtier qui contient la nappe du continental terminal (nappe d'Abidjan) vers laquelle le lixiviat issu de la décharge pourraient se diriger. Dans les formations de socle, on considère que la perméabilité est faible dans le réservoir altérite, et forte au niveau du fracturé et inversement. Le schéma conceptuel de ce type de réservoir stipule que les altérites jouent un rôle de stockage (fonction capacitive) et le réservoir fracturé un rôle de drain (fonction conductrice). En système non influencé (hors pompage) les deux (2) aquifères sont à l'équilibre. La porosité y serait forte et les perméabilités généralement faibles [5]. Les travaux de ces auteurs ont également montré que ces eaux sont généralement de bonne qualité chimique et qu'elles sont surmontées par les réservoirs d'altérites généralement exploités par les puits villageois dont les profondeurs n'atteignent guère plus de 5 m. Les transmissivités rencontrées sur l'ensemble de la zone d'étude sont généralement comprises entre $1,9 \cdot 10^{-6}$ et $8,9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ dans les niveaux schisteux et entre $2,3 \cdot 10^{-5}$ à $4,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ dans les niveaux granitiques [5]. Les caractéristiques des aquifères aux droits des deux (2) forages réalisés sur le site d'étude sont résumées dans le tableau I.

Tableau 1. Récapitulatif des caractéristiques des aquifères aux droits des deux (2) forages réalisés sur le site d'étude

n° forage	Profondeur (m)	Epaisseur d'altérite	Arrivée d'eau (m)	Niveau statique (m)	Débit (m ³ /h)	Niveau dynamique (m)
1	50	23,2	34	2,3	2,91	3,87
2	50	34	36	3,36	2	11,4

L'analyse du tableau I montre que les arrivées d'eau ont eu lieu uniquement au niveau des schistes et non dans les altérations. Ceci confirme que les fortes perméabilités se situent dans le socle. Les perméabilités dans les altérites sont trop faibles pour permettre à l'eau de traverser le cake au cours des forages rotary. En ce qui concerne le milieu du bassin sédimentaire côtier de la Côte d'Ivoire, il est constitué de trois (3) différents aquifères (Quaternaire, Tertiaire et Crétacé Supérieur) qui sont généralement superposés et discontinus (Figure 4). D'après l'analyse du log hydrogéologique, il est possible d'affirmer qu'il existe de rares possibilité d'interconnexions verticales entre ces aquifères.

EPOQUES	NATURE HYDROLITHOLOGIQUE		HYDRO-LITHOLOGIE	LOG HYDRO- GEOLOGIQUE	DESCRIPTION	EPAISSEUR MAXIMUM EN METRE
QUATERNAIRE	Sables marins grossiers	H4		aquifère	Nappe du Nouakchottien	50
	Sables fins à grossiers	H3		aquifère	Nappe de l'Oogolien	30
	Argiles tourbeuses	H2		Imperméable	(souvent discontinu)	16
	Marnes silteuses	H1				40
TERTIAIRE	Cuirasse			aquifère	Lentille imperméable	70
	Sables argileux	n4				
	Sables grossiers fluviatiles	n3		aquifère	Nappe du Continental Terminal	90
	Argiles noires	n2		Imperméable	10	
PALEO-CENE	Sables graveleux	n1		aquifère	Nappe de la base du Tertiaire	20
	Argile grès ferrugineux			Imperméable	20	
MAES-TRICHTIEN	Calcaires gréseux			aquifère	Nappe du Crétacé Supérieur	50
Sables						

Fig 4. Log hydrogéologique des aquifères du bassin sédimentaire côtier de la Côte d'Ivoire [6]

Les aquifères du bassin sédimentaire de Côte d'Ivoire présentent des caractéristiques remarquables en termes de lithostratigraphie, tectonique, monoclinallité des terrains et de variation spatiale des épaisseurs (Tableau II).

Tableau 2. Typologie et hydrodynamique des aquifères côtiers de la Côte d'Ivoire

AQUIFERE	NAPPE	NATURE DES RESERVOIRS	PARAMETRES HYDRAULIQUES
Quaternaire	Oogolien et Nouakchottien	Sables marins et fluviatiles de cordons littoraux et sables fins	K=4. 10 ⁻⁵ à 10 ⁻³ m/s T=indéterminé S=indéterminé Q=2 à 22 m ³ /s
Tertiaire	Continental Terminal	Terrains d'âge miopliocène : sables grossiers et fluviatiles à passé d'argile versicolores ; sables argileux fins à grossiers, ni stratifiés, ni fossilifères ; lambeaux de grès ferrugineux	K=4.10 ⁻⁵ à 10 ⁻³ m/s T=0,13 10 ⁻² à 9 10 ⁻² m ² /s S=0,025 à 0,2 Q=7,2 à 338 m ³ /s
Crétacé supérieur	Maestrichien	Bancs calcaires fissurés, gréseux à gros grains de quartz le tout reposant sur des lambeaux de calcaires coquilliers	K=1,7 10 ⁻² m/s T=4.10 ⁻⁴ m/s S=indéterminé

3 MATERIEL ET METHODES

3.1 MATERIEL ET DONNEES

Les données géotechniques utilisées dans cette étude sont les résultats de l'analyse granulométrique au laboratoire et *in-situ* et de la détermination de la perméabilité des formations en laboratoire et *in-situ*.

En ce qui concerne les données cartographiques, elles intéressent les cartes topographique et géologique à l'échelle 1/200 000 du degré carré d'Abidjan, obtenues auprès du Centre de Cartographie et de Télédétection (CCT) et de la Direction de la Géologie de la Côte d'Ivoire. Pour les images satellitaires utilisées, il s'agit d'image du satellite Landsat TM de la scène 196-56 du 30/12/1990 téléchargée via le site « *Earth Science Data Interface* ». Cette scène a été choisie car elle est la moins bruitée des images de la zone d'étude téléchargées sur ce site. Les données géotechniques ont été traitées sous Excel, les différentes cartes sous Arcview et l'image avec le logiciel Envi.

3.2 METHODOLOGIE

3.2.1 DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES ALTERITES

La caractérisation des altérites du site de l'étude a concerné l'analyse granulométrique au laboratoire et la détermination de la perméabilité des formations en laboratoire et *in-situ*. A cet effet, neuf (9) sondages de 4,5 m à 5 m de profondeur ont été réalisés sur le site du CET de Kossihouen.

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Parmi les opérations de laboratoire, l'analyse granulométrique est de loin la plus fréquemment effectuée. Elle peut être réalisée selon plusieurs approches basées sur des principes physiques bien établis en sédimentologie [7]. Pour cette raison la méthode granulométrique par tamisage à sec après lavage a été retenue. Elle a porté sur onze (11) échantillons de sol au laboratoire et a consisté à séparer et à classer, à l'aide de tamis, les grains selon leurs différents diamètres. En effet, 11 essais ont été réalisés ; car, le nombre d'essai est égal au nombre de formations recoupées par les forages : i) les forages 1 et 3 traversent deux types de formations donc 2 essais ont été réalisées sur chacun des échantillons issus de ces forages ; et ii) les autres forages 2, 4, 5, 6, 7, 8 et 9 recourent seulement une seule formation, par conséquent chaque échantillon issu de ces forages a fait objet d'un seul essai.

DETERMINATION DE LA PERMEABILITE DES ALTERITES DU SITE DU CET DE KOSSIHOUEN

Les essais au laboratoire ont été effectués sur des éprouvettes de sol homogène taillées dans des carottes prélevées sur le terrain. La mesure directe de la perméabilité des sols en laboratoire s'est effectuée selon le modèle «à charge variable». En effet, de façon empirique, il est démontré que les essais à charge constante sont mieux adaptés aux sols de forte perméabilité et que les essais à charge variable sont indiqués pour les faibles perméabilités [8]. Or, dans la présente étude, après avoir déterminé les perméabilités des formations *in-situ*, il est apparu que les perméabilités des formations variaient de faible à très faible. La méthode d'essai à « charge variable » a donc été appliquée sur trois (3) échantillons. En ce qui concerne l'essai de perméabilité *in-situ*, il a été inspiré des tests de percolation sur cinq (5) puits creusés sur le site du CET de Kossihouen.

3.2.2 DETERMINATION DE LA FRACTURATION DE LA ZONE D'ETUDE PAR TELEDETECTION

L'étude de la fracturation par les techniques de télédétection basées sur l'utilisation des images satellitaires Landsat TM est pratiquée en Côte d'Ivoire depuis bien longtemps et les résultats obtenus sont fort satisfaisants. Plusieurs auteurs ont utilisé cette technique pour obtenir de bons résultats. Il s'agit de [9] sur le bassin de la Haute Marahoué, [10] sur la région de Man, [11] sur la région de Man, [12] sur la région de Korhogo, [13] sur la région de Bondoukou, et [14] sur la région de Man. L'utilisation de la télédétection dans ce travail a servi à la mise en évidence des structures géologiques qui peuvent contribuer à l'identification des zones d'infiltration des eaux en milieu de socle. Le traitement des images satellitaires s'est fait sous le logiciel ENVI 4.5 et les étapes suivantes ont été réalisées. L'extraction de la zone d'étude a consisté à isoler cette zone dans l'image brute de la scène 196-56. L'image a donc subi un découpage à partir de ses coordonnées géographiques. Les techniques de rehaussement d'image ont permis de contraster l'information spectrale désirée et de donner une nouvelle image améliorée par rapport à l'image brute. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a permis de réduire le nombre des variables à trois canaux faciles à visionner tout en minimisant les pertes d'informations. Elle a été réalisée sur les 7 canaux : TM1, TM2, TM3, TM4, TM5, TM6 et TM7 pour lesquelles les trois premières composantes : ACP1 ; ACP2 ; et ACP3 sont les seules retenues pour les opérations de filtrage spatial. Les filtres de Sobel ont été retenus parce qu'ils ont donné de meilleurs résultats sous nos climats. Ils ont permis d'obtenir quatre (4) directions principales : N-S, E-W, NE-SW et NW-SE. La Combinaison d'image colorée réalisée à l'aide des canaux TM4 (R), TM5 (B) et TM7 (V) a permis de rehausser l'image et de mettre en évidence la zone de contact entre le domaine sédimentaire et le socle cristallin. L'Extraction des linéaments dans les images filtrées laisse apparaître sous forme linéaire ou curvilinéaire une forme de variation de réflectance ou de rétrodiffusion par rapport à leur proche voisin. Les détails linéaires observés sur les images correspondent à des phénomènes géologiques variés : failles, contact géologiques, structures plissées, paléo reliefs [15].

4 RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 NATURE ET PERMEABILITE DES FORMATIONS RENCONTREES

Les résultats obtenus avec la géotechnique montrent que la perméabilité des sols varie de $9,8 \cdot 10^{-7}$ à $1,1 \cdot 10^{-5}$ m/s *in-situ* et de $1,7 \cdot 10^{-6}$ à $1,8 \cdot 10^{-5}$ m/s au laboratoire. Ces résultats sont semblables et les légères différences constatées entre ces valeurs de perméabilité peuvent être dues aux erreurs provoquées par la désorganisation des carottes pendant leur prélèvement. En ce qui concerne la succession des formations, les courbes des essais granulométriques présentées aux figures 5 à 8 donnent les informations suivantes :

- Le forage 1 traverse des argiles d'altération violacées bariolées de jaunâtre ;
- Le forage 2 rencontre des argiles d'altération sableuse grisâtre ;
- Le forage 3 recoupe des argiles sableuses marronnes et des argiles sableuses rougeâtres ;
- Le forage 4 rencontre des argiles sableuses jaunâtres ;
- Le forage 5 traverse des argiles jaunâtres et rougeâtres avec présence de gravier de quartz ;
- Le forage 6 recoupe des argiles d'altération beige ;
- Le forage 7 rencontre des argiles d'altération grisâtre ;
- Le forage 8 traverse des argiles d'altération violacées bariolées de jaunâtre et le forage 9 rencontre des argiles d'altération blanchâtre.

On note donc la présence d'argiles à presque tous les niveaux dans la stratification des formations géologiques présentes sur l'ensemble de la zone du projet. Ces formations argileuses pourraient donc contribuer à minimiser l'infiltration du lixiviat à travers les éventuelles fractures mises en évidence par la télédétection. L'analyse des deux (2) forages réalisés sur le site du

CET de Kossihouen de profondeurs 50 m chacun, couplée aux résultats de la géotechnique, présentés ci-dessus, montrent la présence de quatre (4) niveaux de formations superposées sur l'ensemble du site d'étude:

- **Niveau 1** : terre végétale riche en humus et en matières organiques dont l'épaisseur varie de 0 à 0,6 m ;
- **Niveau 2** : sables latéritiques d'une épaisseur de 0,6 à 1,65 m ;
- **Niveau 3** : argiles bariolées de perméabilité faible d'épaisseur variant de 1,65 m à 14,50 m ;
- **Niveau 4** : sables argileux de perméabilité faible qu'on trouve entre 14,50 et 22,7 m.

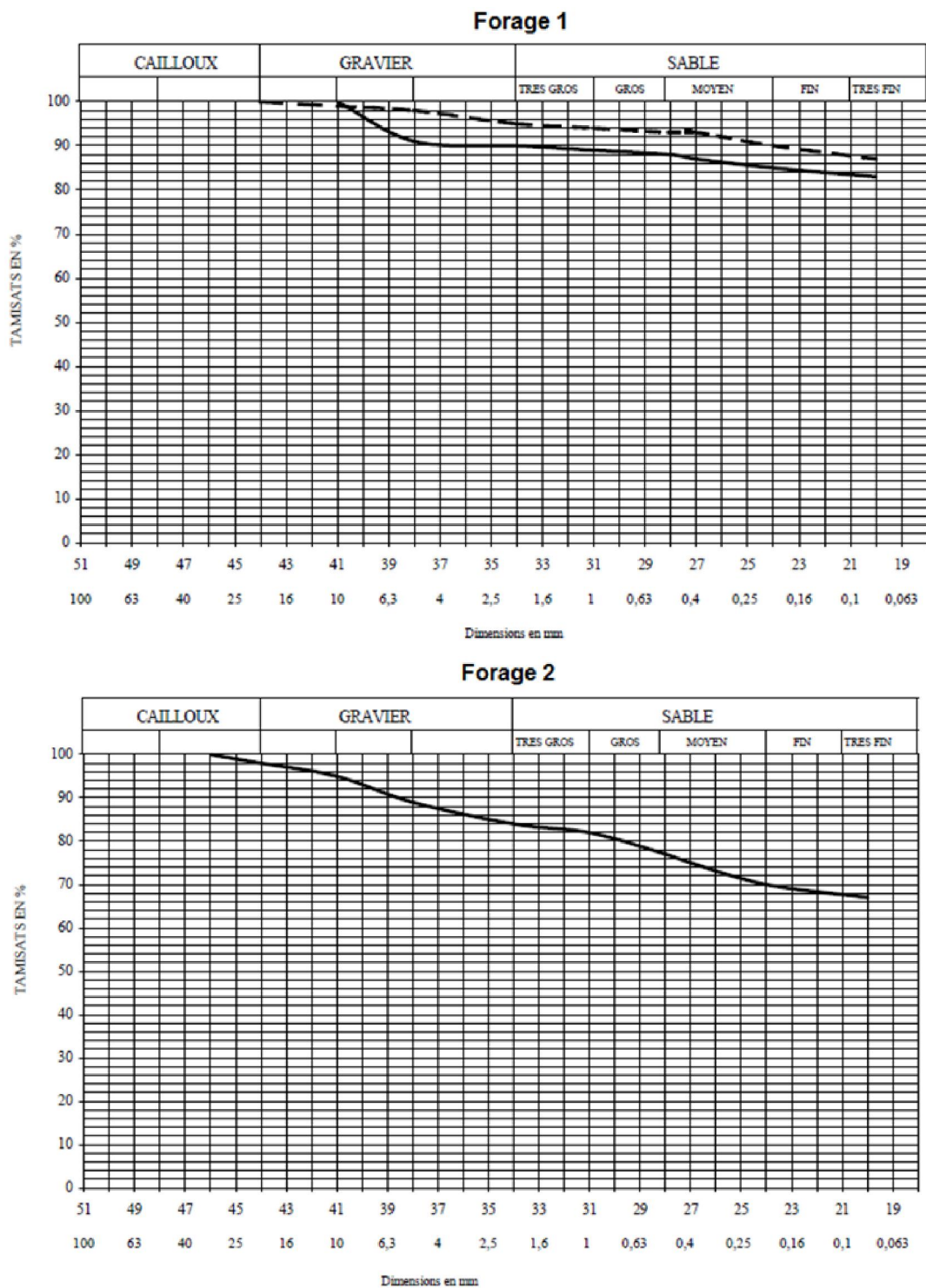


Fig 5. Courbe granulométrique des sondages 1 et 2 sur le site du CET de Kossihouen

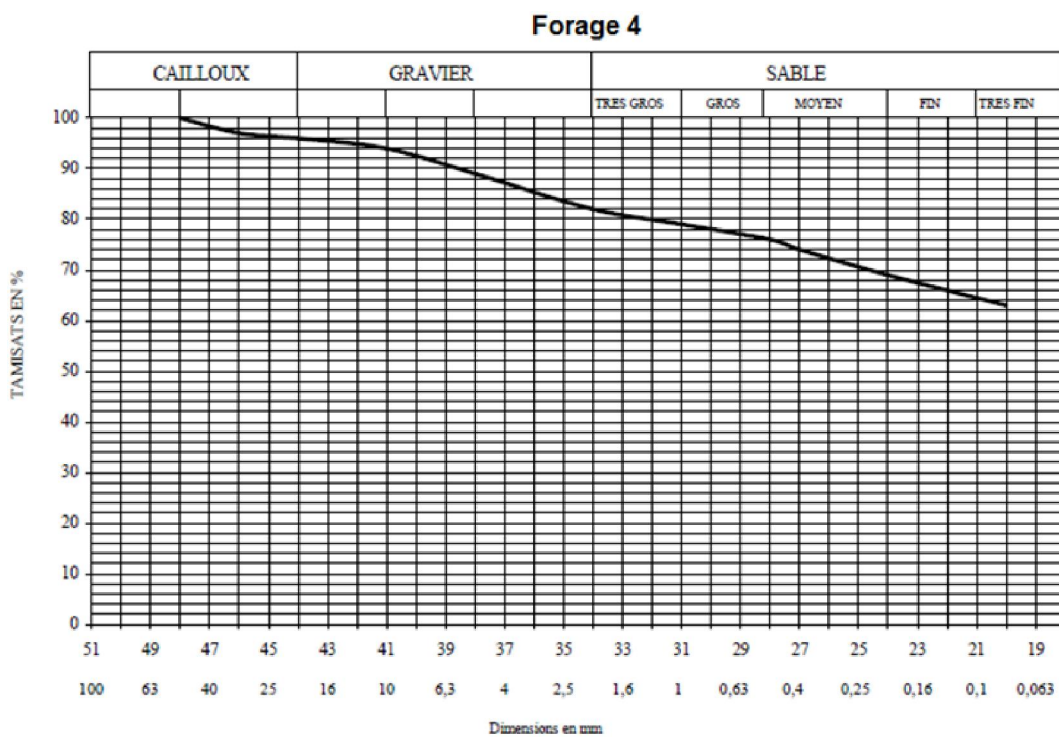
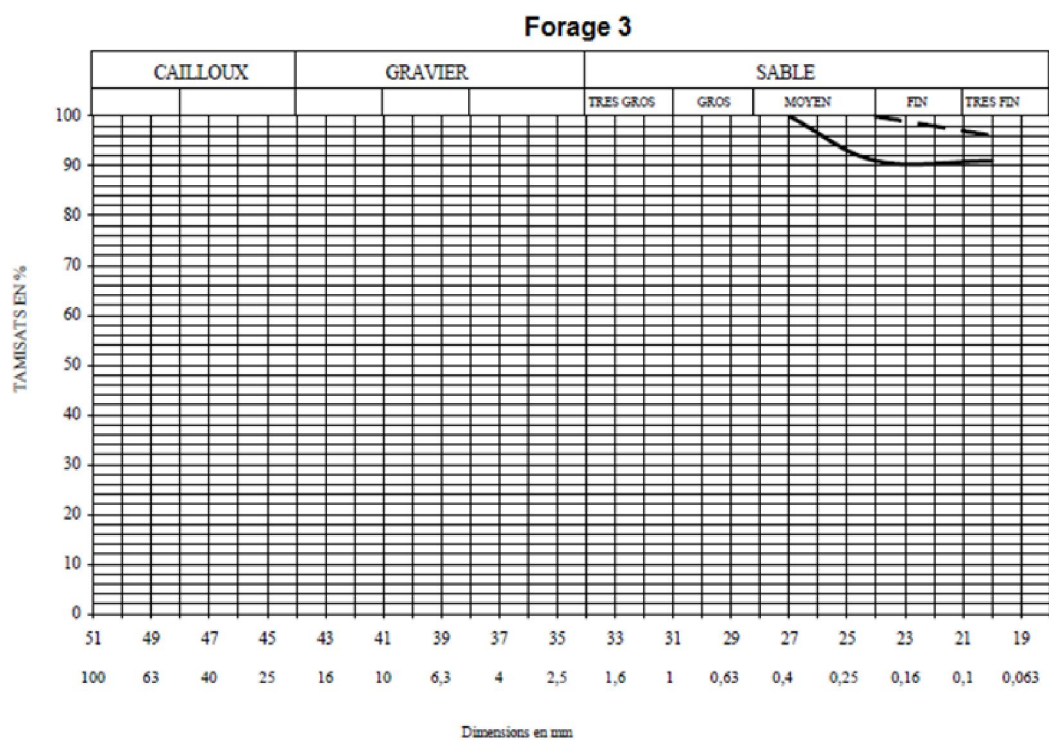


Fig 6. Courbe granulométrique des sondages 3 et 4 sur le site du CET de Kossihouen

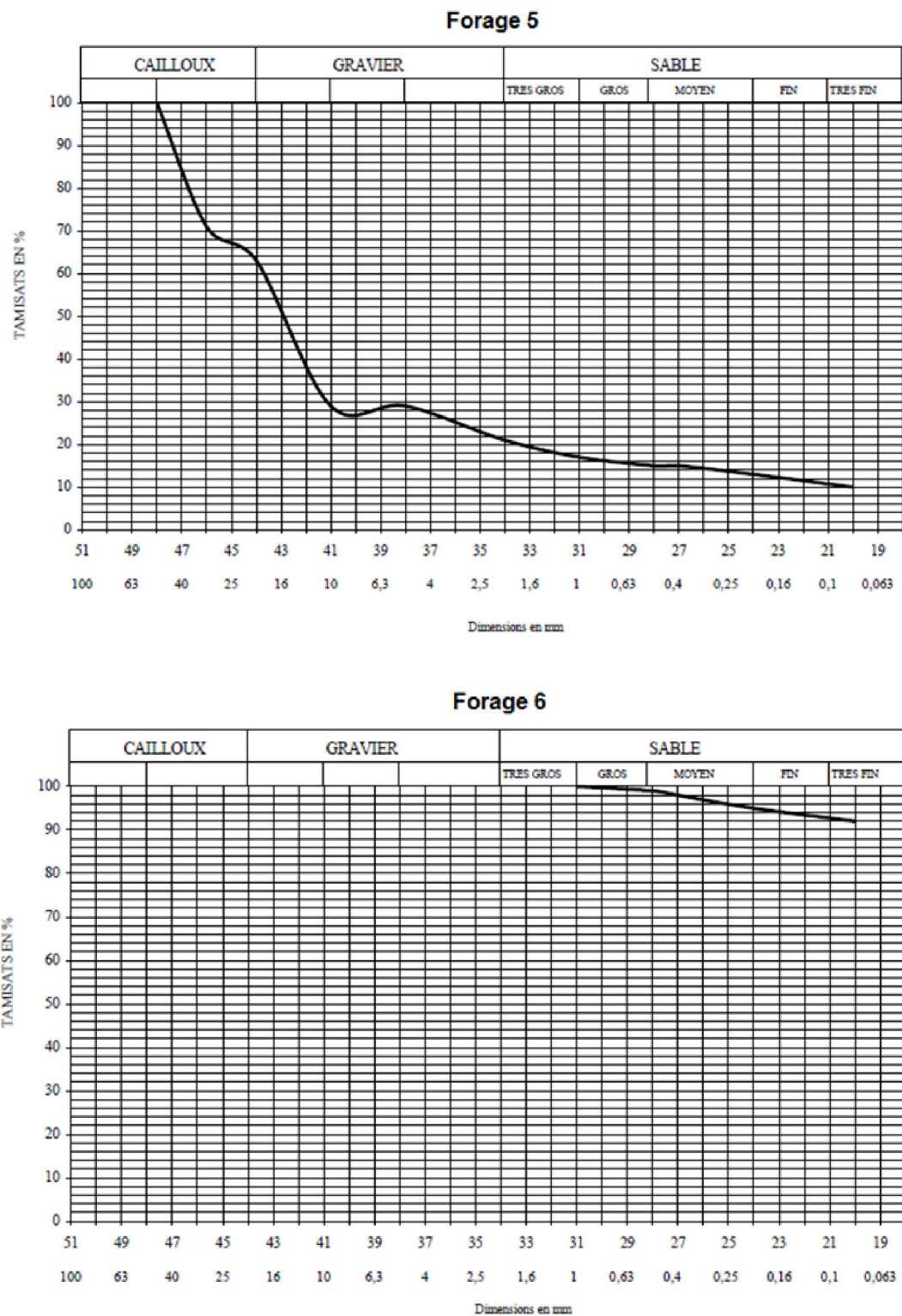


Fig 7. Courbe granulométrique des sondages 5 et 6 sur le site du CET de Kossihouen

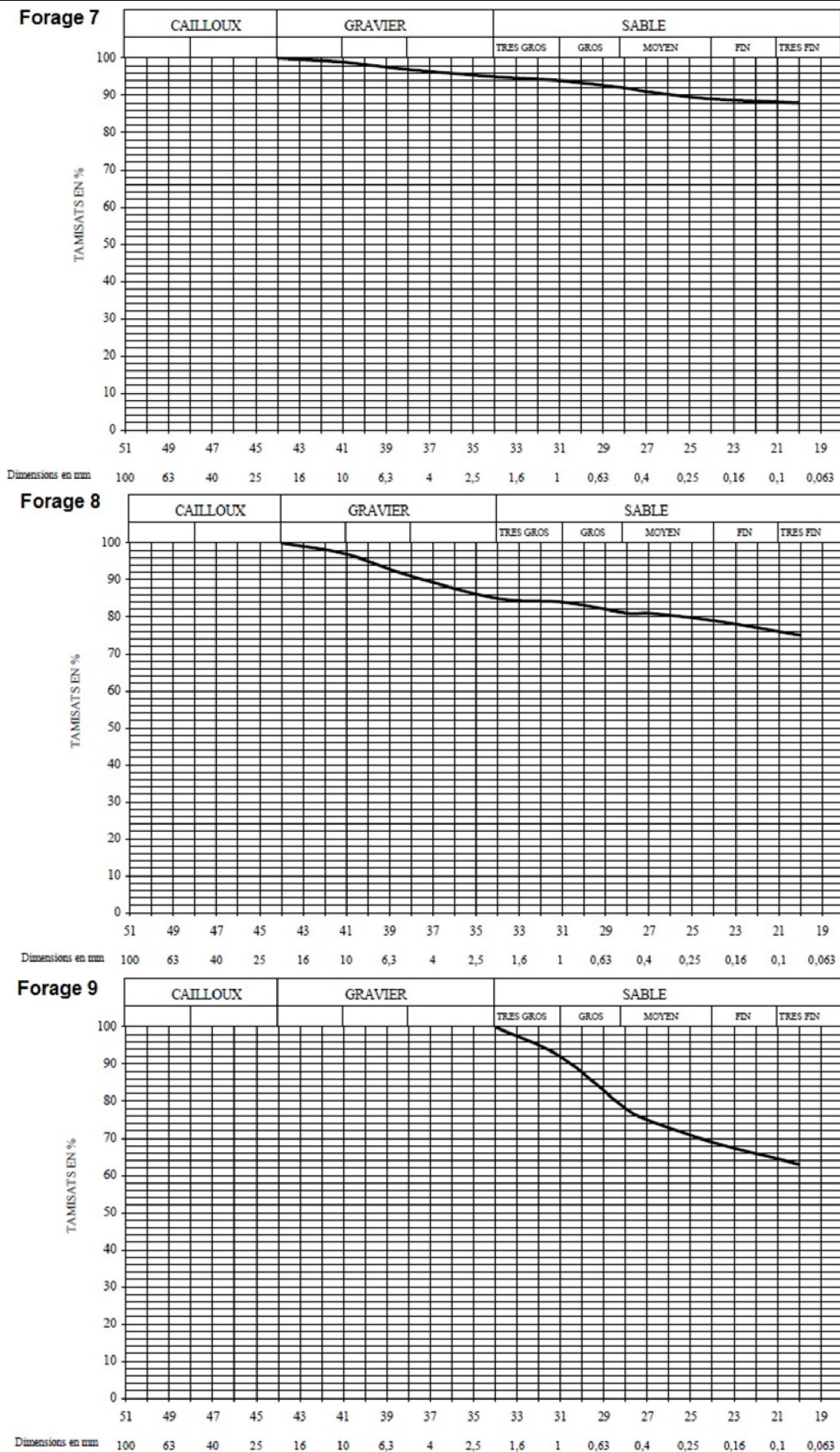


Fig 8. Courbe granulométrique des sondages 7, 8 et 9 sur le site du CET de Kossihouen

4.2 NIVEAU DE FRACTURATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le contact entre le bassin sédimentaire côtier et le socle cristallin a été mis en évidence grâce à une combinaison colorée des bandes TM4, TM5 et TM7 (Figure 9). Mais, dans l'ensemble, en imagerie satellitaire, la distinction entre ces deux domaines n'est pas facile à réaliser. En effet, du point de vue de la réflectance, le comportement des altérites est identique à celui des sédiments marins.

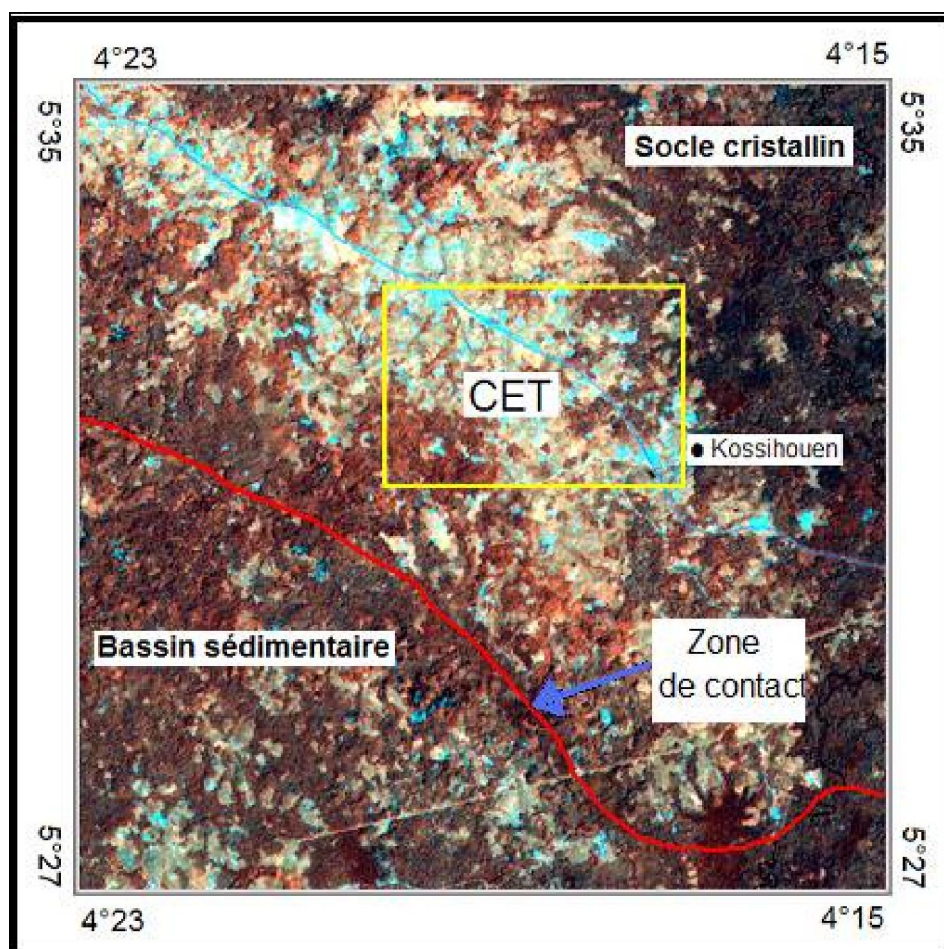


Fig 9. Localisation du site du CET de Kossihouen sur une image satellitaire Landsat TM

La carte de fracturation du site du CET de Kossihouen comporte 230 éléments assimilables à des accidents ayant affecté le socle cristallin et cristallophyllien (Tableau III).

Tableau 3. Directions principales des fractures du site du CET de Kossihouen

Orientation	Observations	Pourcentage (%)
N20-N50	Direction de forte fracturation	45,2%
N10 et N180	Direction de moyenne fracturation moyenne	17,4%
N70-N170	Direction de faible fracturation	28,7%

La direction N20-N50, direction privilégiée des fractures de la région avec 45,22% des accidents, est perpendiculaire à la limite du domaine sédimentaire (Figure 10). Cela signifie qu'il existe des possibilités de transfert d'eau à travers ces fractures vers le bassin sédimentaire, au cas où le fond des casiers du CET ne seraient pas imperméabilisés et où le lixiviat arrivait à s'infiltrer dans le sol. La figure 11 montre la présence des principales fractures susceptibles d'influencer l'écoulement des eaux souterraines en direction des nappes du bassin sédimentaire côtier. Toutes ces fractures sont de direction éburnéenne (NE-SW).

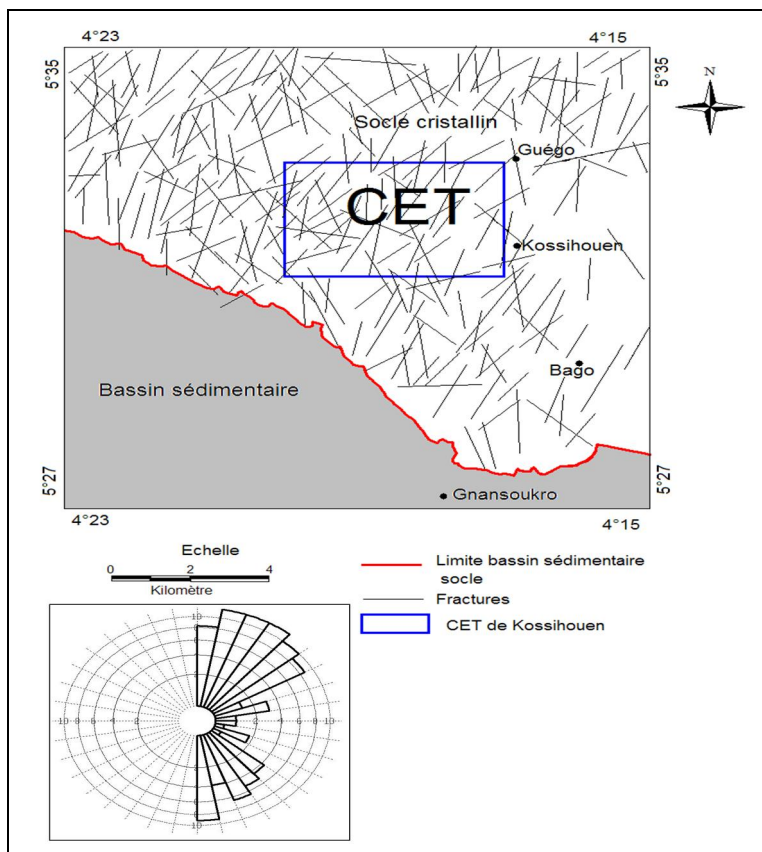


Fig 10. Carte du réseau de fracturation sur l'ensemble du site du CET de Kossihouen

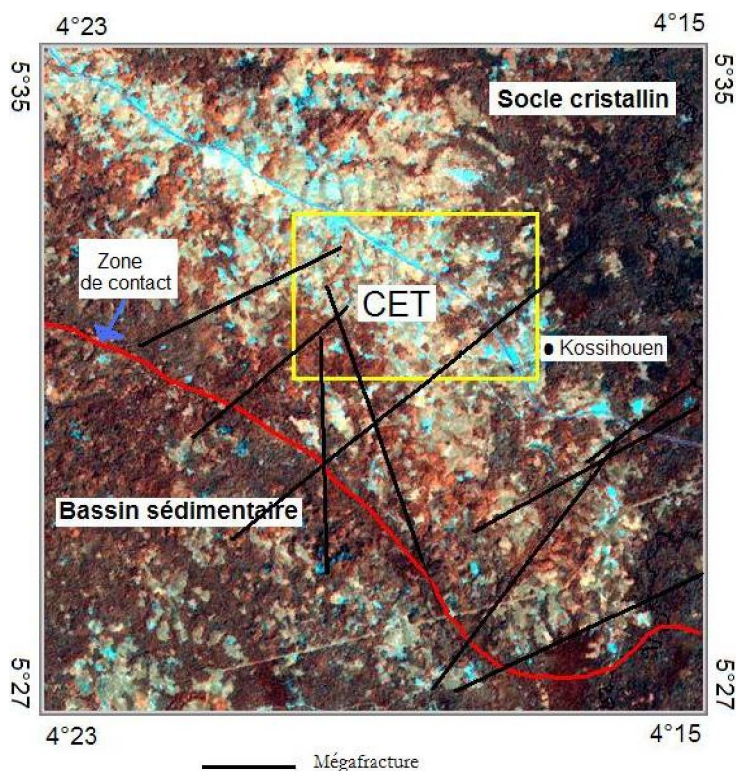


Fig 11. Mégafractures de l'ensemble du site du CET de Kossihouen capables de drainer les eaux d'infiltration vers le bassin sédimentaire côtier

4.3 DISCUSSION

Les formations altéritiques rencontrées sur l'ensemble du site du CET de Kossihouen ont des coefficients de perméabilité faibles à très faibles et ces résultats sont confirmés par les résultats obtenus avec la géotechnique. En effet, les coefficients de perméabilité des sols mesurés par la géotechnique varient de $9,8 \cdot 10^{-7}$ à $1,1 \cdot 10^{-5}$ m/s *in-situ* et de $1,68 \cdot 10^{-6}$ à $1,76 \cdot 10^{-5}$ m/s au laboratoire. En se basant sur l'échelle des perméabilités établie dans [16], on peut affirmer que la vitesse des eaux avec ou sans polluants sur ces formations est très faible ($< 0,13$ cm/h). Dans l'ensemble, que ce soit au laboratoire ou sur le terrain, on remarque que les sols de la zone d'étude ont une perméabilité faible. Ces faibles coefficients de perméabilité des sols sont le fait qu'en général, dans les formations altéritiques de la zone d'étude, la proportion d'argiles et de sables fins est nettement plus élevée dans les horizons altéritiques se développant au-dessus des schistes (Figure 12). Aussi d'une manière générale, les sols du site du CET de Kossihouen sont des argiles d'altération de couleur variée : marron, rouge, gris, etc. On y rencontre également des argiles sableuses mais en proportion beaucoup plus faibles sur les cinq (5) premiers mètres d'investigation.



Fig 12. Affleurement d'altérites latéritiques rouges vifs avec des filons entrecroisés sur le site du cet de Kossihouen

En ce qui concerne l'épaisseur moyenne des altérites, elle est estimée à environ 22,2 m sur l'ensemble de la zone d'étude. Dans les excavations ouvertes par le promoteur pour créer les premiers casiers du CET de Kossihouen devant recevoir les déchets à traiter, les caractéristiques géologiques des formations mises à nu sont très remarquables. En effet, le fond des excavations est occupé par des schistes birimiens en feuilletés redressés à la verticale et traversés par des filons de quartz de position et d'orientation diverses. Les filons de quartz verticaux sont parallèles aux plans de schistosité dans ces schistes birimiens redressés. Dans cette position, ces filons de quartz pourraient contribuer de façon non négligeable à l'infiltration des eaux pluviales (Figure 13) malgré les faibles coefficients de perméabilité des altérites, signalés dans les paragraphes précédents. C'est ce qui explique le fait que les arrivées d'eau ne sont observées qu'au niveau des schistes sur l'ensemble de la zone d'étude.

Il existe également des filons de quartz et de feldspath en position horizontale et parfois même enchevêtrés ou entrecroisés de façon complexe. Les schistes birimien du site du CET de Kossihouen sont en général des altérites polychromes dont les niveaux supérieurs s'altèrent intensément en donnant des formations argileuses de faibles perméabilités :

- argiles lie-de-vin, jaunes ou rouges;
- argiles vertes à nombreuses paillettes de micas encore bien conservées;
- front d'altération active moins argileux et marqué par la présence de la structure schisteuse.

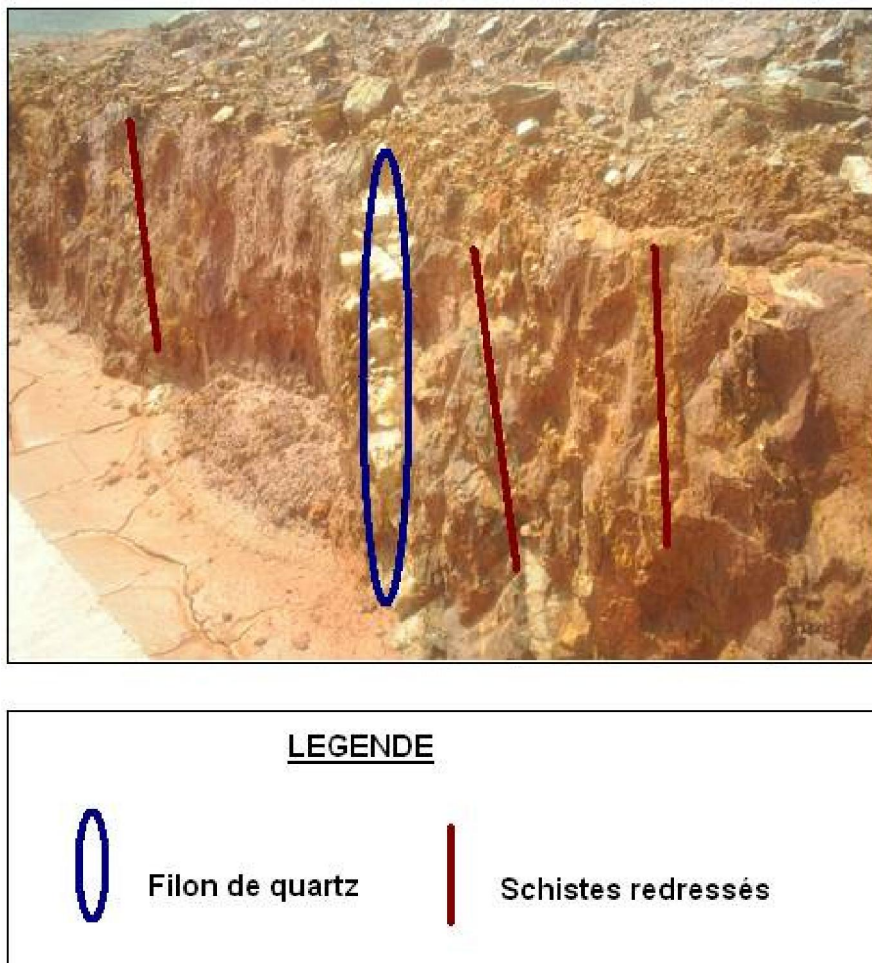


Fig 13. Schistes redresses à la verticale avec un filon de quartz

L'épaisseur moyenne des altérites estimée à environ 22,2 m sur l'ensemble de la zone d'étude corrobore les résultats obtenus sur le socle dans la région des lacs au centre de la Côte d'Ivoire par Soro et *al*, en 2010. En effet, les travaux de ces auteurs situent l'épaisseur des altérites sur leur zone d'étude entre 1,90 et 63,10 m avec une moyenne de 16,52 m. La direction privilégiée des formations identifiées comme des fractures sur l'ensemble de la zone d'étude est généralement N20-N50 et 45,22% de ces structures occupent cette direction qui représenterait le sens d'écoulement des eaux souterraines du socle vers le bassin sédimentaire côtier au Sud. En outre, l'étude de l'évolution du rapport Mg/Ca réalisé par [17] a montré que les nappes du socle de la Côte d'Ivoire participeraient à l'alimentation de la nappe du bassin sédimentaire côtier au Sud. Du point de vue tectonique, [3] il est signalé aussi dans le socle éburnéen cristallin et cristallophyllien de Dabou et ses environs, la présence de plusieurs familles de fractures orientées: N30-40°; N60-70°; N110-120°; N120-130° dont le rôle dans la mise en place des réservoirs et dans la circulation des eaux souterraines vers le Sud n'est pas encore clairement défini.

5 CONCLUSION

Le site du CET de Kossihouen est situé sur le socle cristallin et cristallophyllien à environ à 50 Km du bassin sédimentaire côtier de Côte d'Ivoire. Les essais géotechniques réalisés *in-situ* sur la zone d'étude et au laboratoire ont permis de connaître la nature des formations et leurs différentes perméabilités. En effet, il s'agit généralement des complexes argilo-sableux de perméabilité faible à très faible variant de $9,8 \cdot 10^{-7}$ à $1,1 \cdot 10^{-5}$ m/s *in situ* et de $1,68 \cdot 10^{-6}$ à $1,76 \cdot 10^{-5}$ m/s au laboratoire. En ce qui concerne la télédétection, le traitement des images Landsat a révélé la présence de méga-fractures de direction NE-SW sur l'ensemble du site du CET de Kossihouen. Les résultats obtenus par le couplage de la télédétection et de la géophysique sur le site du Centre d'Enfouissement technique (CET) de Kossihouen sont forts satisfaisants. Cette étude a montré qu'il y a des fractures sur le site du CET orientées vers le bassin sédimentaires. Mais, rien n'indique que ces fractures soient drainantes et surtout capables de transmettre une pollution sur 50 km. Par ailleurs les perméabilités mesurées vont plutôt

dans le sens d'une couche protectrice en surface, si l'épaisseur des altérites est suffisante, ce qui semble être le cas sur une large superficie. La vulnérabilité de la nappe du Continental terminal (CT) à la pollution du lixiviat qui proviendrait des activités situées en dehors du bassin sédimentaire côtier comme le CET de Kossihouen n'est donc pas avérée.

REMERCIEMENTS

Les différents auteurs de cet article remercient très sincèrement le cabinet LABOGEM, pour avoir réalisé l'étude géotechnique et la société CLEAN BOR CI qui a accepté de mettre à leur disposition ces données de très bonne qualité. Ils remercient également les différents instructeurs qui ont participé à l'amélioration du présent article.

REFERENCES

- [1] N. Soro, T. Lasm, B. H. Kouadio, G. Soro, K. E. Ahoussi (2006). Variabilité du régime pluviométrique du Sud de la Côte d'Ivoire et son impact sur l'alimentation de la nappe d'Abidjan, *Sud Sciences et Technologie*, n°14, pp 30-40.
- [2] K. J. Kouamé; J. P. Jourda, Y. Leblanc, S. K. Deh, A. A. Tawa, J. Biemi (2009) Implication of Hydrogeologic Modeling in the Estimate of Pollutants Transfer Time Towards Groundwater of Abidjan District: Case of Toxic Waste, *European Journal of Scientific Research*, Vol.32, No.1, pp.6-24
- [3] S. A. Tapsoba (1995). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région de Dabou (Sud de la Côte d'Ivoire): Hydrochimie, isotopie et indice cationique de vieillissement des eaux souterraines. Thèse de doctorat de 3ème cycle, Université nationale de Côte d'Ivoire, 200 p
- [4] J. Biemi, Y. B. Koffi, E. K. Ahoussi (2009). Rapport d'étape de l'étude d'impact environnemental et social du CET de Kossihouen, 102 p.
- [5] I. Savane (1997) : Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Apports de la télédétection et d'un Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale. *Thèse Doct. D'Etat Sci. Nat., Univ. Abidjan*, 386 p.
- [6] N. Aghui et J. Biemi (1984). « Géologie et hydrogéologie des nappes de la région d'Abidjan et risques de contamination » *Annales de l'Université Nationale de Côte d'Ivoire*, série c, tome 20,, p.331-347.
- [7] W.D. Kemper, et R.C. Rosenau, (1986) *Aggregate Stability and Size Distribution*. In: *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods* (2nd Edition). Agronomy Monograph, No. 9. pp. 425-442.
- [8] D. Levacher, M. Sanchez, Z. Duan, Y. Liang (2011). Valorisation en unité pilote de sédiments méditerranéens : Etude des caractéristiques géotechniques et de la perméabilité. *Revue Paralia, Volume 4 pp 4.1-4.20*.
- [9] J. J. Biemi (1992) Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, 493 p.
- [10] K. F. Kouame (1999): Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire) : Apport des données des images satellitales et des méthodes statistiques et fractales à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse Doct. 3ème cycle. Univ. Cocody Abidjan. 196 p.
- [11] M. B. Saley (2003): Système d'informations à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody, 209 p.
- [12] J.P. Jourda (2005) Méthodologies d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale. Cas de la zone test de Korhogo (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat ès Sciences naturelles, Université de Cocody, Abidjan 402 p.
- [13] M. Youan ta (2008) Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: Cas de la région de Bondoukou Nord Est de la Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat unique, Université de Cocody-Abidjan (Côte d'Ivoire), 236 p.
- [14] T. Lasm (2000). Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle: Analyse statistique de la fracturation et des propriétés hydrodynamiques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen). PhD Thesis, Université de Poitiers, France, 274 pp.
- [15] J. Y. Scanvic (1983). Utilisation de la télédétection dans les sciences de la terre. Ed. BRGM Manuels et Méthodes. Vol. 7, 160 p.
- [16] Soil survey division staff. (1993). Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18.

- [17] K.E. Ahoussi (2008). Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le Sud de la Côte d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 270p.