

## Détermination des zones potentiellement favorables à l'implantation de forages manuels à partir d'analyse multicritère et d'un SIG : cas de la Côte d'Ivoire

## Determination of potentially favorable zones for the setting up of manual boreholes from multicriterion analysis and gis: case of Cote d'Ivoire

Jean Patrice Jourda, Kan Jean Kouame, Mahaman Bachir Saley, Larissa Evrade Eba, Abenan Tawa Anani and Jean Biemi

Volume 28, Number 2, 2015

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1032294ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/1032294ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Jourda, J. P., Kouame, K. J., Saley, M. B., Eba, L. E., Anani, A. T. & Biemi, J. (2015). Détermination des zones potentiellement favorables à l'implantation de forages manuels à partir d'analyse multicritère et d'un SIG : cas de la Côte d'Ivoire. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 28(2), 119–137. <https://doi.org/10.7202/1032294ar>

Article abstract

This study was carried out within the framework of a project introduced by the United Nations Children's Fund (UNICEF). Indeed, in order to respond to the increasing needs for boreholes for drinking water supply, adapted solutions must be envisaged. Among these, the realization of shallow boreholes (less than 40 m) turns out to be one of the possible solutions to satisfy the water requirements of certain localities of the Ivory Coast. This study was thus undertaken with the aim of locating zones where the presence of manual boreholes would be favorable. The study used geological, hydrogeological and geomorphological data and data relative to existing water sources. The integration of all these data in a Geographic Information System (GIS) allowed the elaboration of a map of zones favorable for the supply of groundwater through shallow wells. They correspond to wide zones of crystalline substratum covered by a weathered zone of sandy-clays of significant thickness (20–30 m), a factor that is particularly favorable for manual boreholes. We also identified a partially favorable level, which becomes favorable or very favorable in the river valleys with low slope ( $< 3^\circ$ ). The least favorable sectors are situated in the northeastern and southwestern zones and in the mountainous zone of Man. It is also important to consider that the lower elevation zones potentially present more favorable conditions, but we notice that the population is more concentrated in higher elevation zones because of the risk of flooding and unfavorable conditions in the hollows related to the presence of stagnant water.

# DÉTERMINATION DES ZONES POTENTIELLEMENT FAVORABLES À L'IMPLANTATION DE FORAGES MANUELS À PARTIR D'ANALYSE MULTICRITÈRE ET D'UN SIG : CAS DE LA CÔTE D'IVOIRE

*Determination of potentially favorable zones for the setting up of manual boreholes from multicriterion analysis and gis: case of Cote d'Ivoire*

---

JEAN PATRICE JOURDA<sup>1,2</sup>, KAN JEAN KOUAME<sup>1\*</sup>, MAHAMAN BACHIR SALEY<sup>2</sup>, LARISSA EVRADE EBA<sup>1</sup>, ABENAN TAWA ANANI<sup>1</sup>, JEAN BIEMI<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Télédétection et d'Analyse Spatiale Appliquée à l'Hydrogéologie (LATASAH), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

<sup>2</sup>Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

Reçu le 11 septembre 2013, accepté le 19 août 2014

---

## RÉSUMÉ

Cette étude a été effectuée dans le cadre d'un projet initié par le Fonds des Nations Unies pour l'Enfance (UNICEF). En effet, pour faire face aux besoins toujours croissants en ouvrages d'alimentation en eau potable, des solutions adaptées doivent être envisagées. Parmi celles-ci, la réalisation de forages peu profonds (moins de 40 m) s'avère être l'une des solutions pour satisfaire les besoins en eau de certaines localités de la Côte d'Ivoire. Cette étude a donc été entreprise dans le but de localiser des zones où l'implantation de forages manuels est favorable. Elle a été réalisée à partir de la collecte de données géologiques, hydrogéologiques, géomorphologiques et de données relatives aux points d'eau existants. L'intégration de toutes ces données dans un Système d'Information Géographique (SIG) a permis

l'élaboration d'une carte de zones favorables à l'exploitation des eaux souterraines à travers des puits peu profonds. Elles correspondent à de larges zones de substrat cristallin couvert d'une zone d'altération argilo-sableuse d'épaisseur significative (20–30 m), facteur particulièrement favorable aux perforations manuelles. On relève aussi un niveau partiellement favorable, qui devient favorable ou très favorable dans les vallées fluviales à faible pente ( $< 3^\circ$ ). Les secteurs les moins favorables se situent dans les zones nord-orientales, sud-occidentales et dans la zone montagneuse de Man. Il est aussi important de considérer que les zones de bas-fonds présentent potentiellement des conditions plus favorables, mais nous constatons que la population est plus concentrée dans des zones élevées à cause du risque d'inondation et de conditions défavorables du terrain liées à la présence d'eau stagnante dans les zones les plus basses.

**Mots-clés :** *Cartographie, analyse multicritère, zones favorables, forages manuels, SIG, Côte d'Ivoire.*

## ABSTRACT

This study was carried out within the framework of a project introduced by the United Nations Children's Fund (UNICEF). Indeed, in order to respond to the increasing needs for boreholes for drinking water supply, adapted solutions must be envisaged. Among these, the realization of shallow boreholes (less than 40 m) turns out to be one of the possible solutions to satisfy the water requirements of certain localities of the Ivory Coast. This study was thus undertaken with the aim of locating zones where the presence of manual boreholes would be favorable. The study used geological, hydrogeological and geomorphological data and data relative to existing water sources. The integration of all these data in a Geographic Information System (GIS) allowed the elaboration of a map of zones favorable for the supply of groundwater through shallow wells. They correspond to wide zones of crystalline substratum covered by a weathered zone of sandy-clays of significant thickness (20–30 m), a factor that is particularly favorable for manual boreholes. We also identified a partially favorable level, which becomes favorable or very favorable in the river valleys with low slope ( $< 3^\circ$ ). The least favorable sectors are situated in the northeastern and southwestern zones and in the mountainous zone of Man. It is also important to consider that the lower elevation zones potentially present more favorable conditions, but we notice that the population is more concentrated in higher elevation zones because of the risk of flooding and unfavorable conditions in the hollows related to the presence of stagnant water.

**Key Words :** *Mapping, multicriteria analysis, favorable zones, manual boreholes, GIS, Ivory Coast.*

## 1. INTRODUCTION

La réduction de moitié du pourcentage de la population qui n'a pas accès de façon durable à un approvisionnement en eau de boisson salubre est l'un des objectifs de développement du millénaire (ONU, 2013). Afin d'atteindre un tel objectif, des approches radicalement différentes comprenant une variété de solutions adaptées à chaque région doivent être envisagées. Un accent particulier devra être mis alors sur les solutions qui sont accessibles et qui permettent aux ménages et aux communautés de satisfaire leur besoin en eau potable. Les forages manuels à faible coût peuvent être une approche de solution et ont déjà démontré leur efficacité en Asie, en Afrique et en Amérique

latine, comme moyen d'augmenter le taux de couverture en eau potable (DHH, 2001).

En effet, la réalisation des forages manuels est une solution pratique pour les points d'eau de moins de 40 m de profondeur dans des sols alluviaux ou des formations de roche altérée. Même si le forage manuel n'est pas une solution pratique dans toutes les formations géologiques, il y a néanmoins beaucoup de zones en Afrique où il peut efficacement fournir de l'eau potable aux populations rurales qui en sont dépourvues, à un coût très limité représentant une petite fraction du prix de revient d'un forage conventionnel (DHH, 2001).

Aussi, l'étude portant sur la réalisation de la cartographie géologique des zones aptes aux forages manuels a-t-elle été initiée. Elle vise à identifier, en Côte d'Ivoire, les zones favorables où cette méthode peut être utilisée pour offrir de l'eau dans les zones qui ne sont pas toujours prises en compte par les programmes classiques d'hydraulique villageoise du fait que la priorité est souvent donnée aux grandes agglomérations.

### 1.1 Présentation générale de la Côte d'Ivoire

D'une superficie totale de 322 462 km<sup>2</sup>, la Côte d'Ivoire, pays de l'Afrique de l'Ouest, est située entre les longitudes 2°30' et 8°30' Ouest et les latitudes 4°30' et 10°30' Nord (GOULA *et al.*, 2007). Limitée au sud par l'océan Atlantique sur une côte de 550 km, la Côte d'Ivoire partage les frontières avec : le Ghana à l'Est, le Burkina Faso et le Mali au Nord, la Guinée et le Libéria à l'Ouest (Figure 1).

#### 1.1.1 Relief et géomorphologie

La Côte d'Ivoire est située sur d'anciennes roches de socle du Précambrien et, comme les autres pays de l'Afrique de l'Ouest, son relief topographique est monotone et présente peu de contrastes. L'altitude augmente légèrement du Sud-Est au Nord-Ouest (Figure 2). Les autres caractéristiques topographiques sont la zone littorale, qui représente un plateau continental, les lagunes et les barres de sable situées dans la partie sud du pays le long du golfe de Guinée et des dépôts sédimentaires superficiels du Mésozoïque et du Cénozoïque (HALLE et BRUZON, 2006).

#### 1.1.2 Situation climatique et environnementale

##### 1.1.2.1 Climat

De par sa position géographique, en bordure du golfe de Guinée, et de par son étalement en latitude (4°30'-10°30' Nord), la Côte d'Ivoire présente un régime climatologique non uniforme, qui va, du Sud vers le Nord, du climat équatorial au climat tropical pré-désertique. Le climat, généralement chaud et humide, constitue dès lors une transition entre l'équatorial et le tropical. Le pays connaît en général des variations importantes de température entre le Nord et le Sud, mais également le long



Figure 1. Situation géographique de la Côte d'Ivoire  
*Geographical location of Côte d'Ivoire*

de l'année en fonction des saisons (GOULA *et al.*, 2007). L'examen des normales pluviométriques des périodes (1980-1996) a permis de distinguer trois grandes zones climatiques (Nord, Centre et Sud) (JICA, 2001; GOULA, 2007). La zone Centre intégrant la zone montagneuse de l'Ouest, la Côte d'Ivoire se caractérise finalement par quatre régimes climatiques nettement marqués (Tableau I).

#### 1.1.2.2 Géologie

De nombreux auteurs ont contribué à la connaissance de l'histoire géologique de la Côte d'Ivoire (CAMIL, 1984; DJRO, 1998; FABRE, 1987; KOUAMELAN, 1996; LEMOINE, 1988; PAPON, 1973; POTHIN, 1988; TAGINI, 1971 ; TEMPIER, 1986; VIDAL, 1987 et YACE, 1976). L'essentiel du paysage géologique de la Côte d'Ivoire est constitué de deux domaines (Figure 3) :

- le socle précambrien (97,5 % de la superficie du territoire), composé essentiellement de granite, de roches métamorphiques schisteuses et de roches vertes ;
- le bassin sédimentaire côtier (2,5 %) qui comprend les formations du sable du tertiaire, du quaternaire et des alluvions récentes (AKA, 1991; TASTET, 1979).

## 2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

### 2.1 Données et matériel

Afin d'identifier les zones favorables aux forages manuels en Côte d'Ivoire, une collecte de données a été effectuée. Un

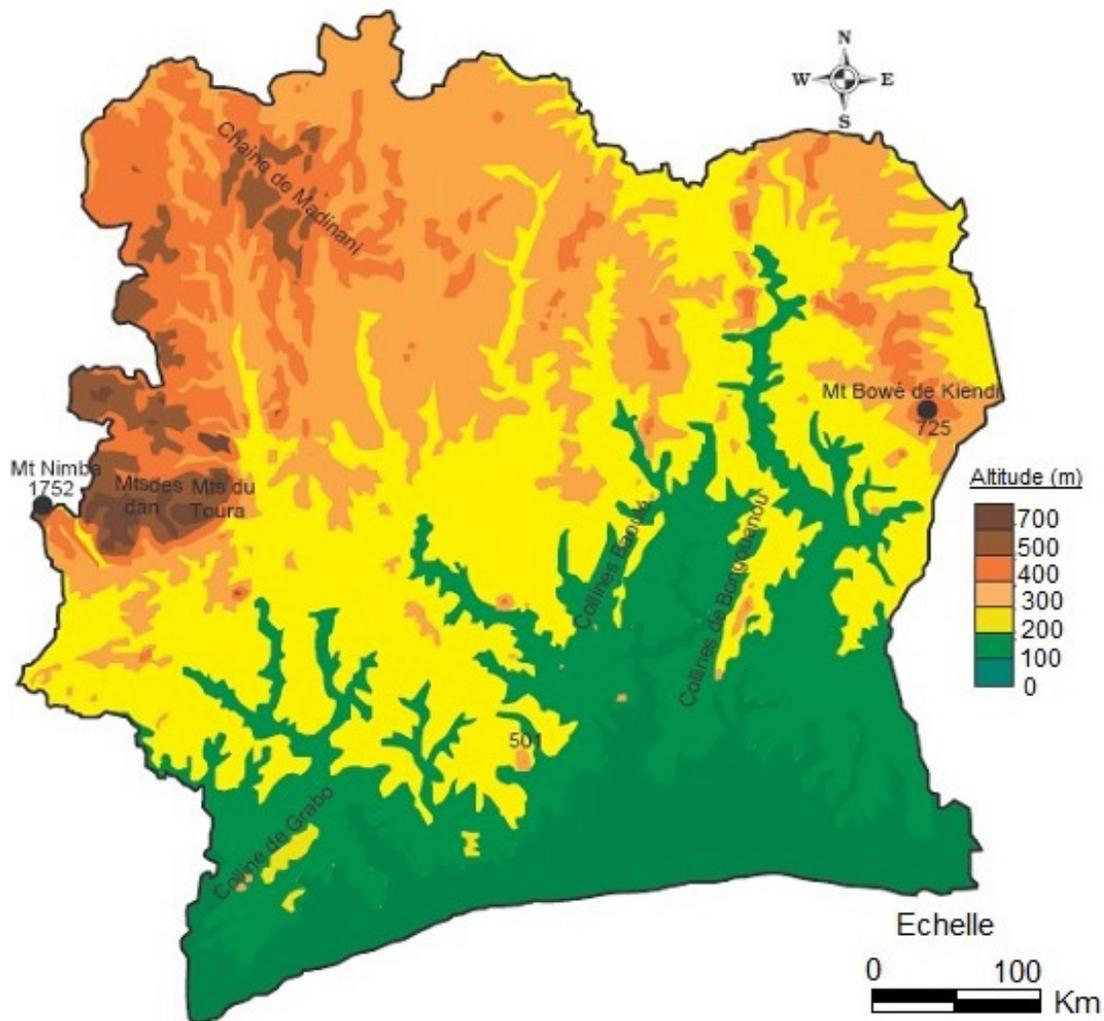
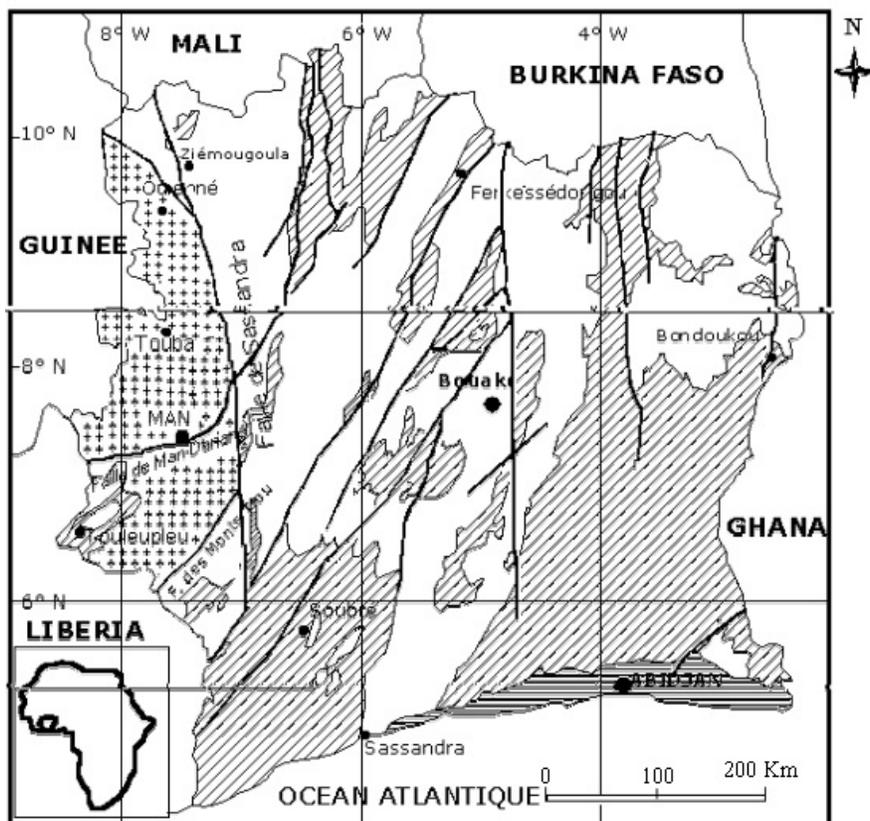


Figure 2. Carte du relief de la Côte d'Ivoire.  
*Relief map of Ivory Coast.*

Tableau 1. Régimes climatiques de la Côte d'Ivoire (GOULA, 2007 ; JICA, 2001)

Table 1. Climatic conditions of Ivory Coast (GOULA, 2007; JICA, 2001)

Type de climat	Précipitations annuelles (1980 – 1996) (mm)				Caractéristiques des saisons
	Moyenne	Minimum	Maximum	Écart-type	
Climat soudanais ou régime tropical de transition (zone III)	1 128	1 000	1 700	372	Deux saisons (sèche, pluvieuse) Chaleur plus élevée
Climat Baouléen ou régime équatorial de transition atténué (zone II)	1 097	1 000	1 600	322	Deux saisons sèches Deux saisons des pluies Taux d'humidité (60%–70%)
Climat Attiéen ou régime équatorial de transition (zone I)	1 521	1 500	2 400	513	Deux saisons sèches Deux saisons des pluies Forte humidité (80%–90%)
Climat des montagnes (zone IV)	1 449	1 500	2 200	419	Deux saisons (sèche, pluvieuse)



#### LEGENDE

	PALEOPROTEROZOÏQUE	
ARCHEEN		Formations éburnéennes volcano-sédimentaire
		Granitoïdes éburnéens
		Bassin sédimentaire secondaire à quaternaire
		Faïlle

Figure 3. Carte géologique de la Côte d'Ivoire (KOUAMELAN, 1996).  
Geological map of Ivory Coast (KOUAMELAN, 1996).

traitement de ces données à partir d'un système d'information géographique permet de déterminer les différentes couches thématiques qui contribuent à déterminer la faisabilité des forages manuels. Ce sont :

- la carte géologique de la Côte d'Ivoire au 1/2 000 000 établie en 1972 par le Service cartographique ORSTOM-Université de Cocody et TAGINI en collaboration avec la SODEMI ;
- les cartes des parcs et réserves de la Côte d'Ivoire au 1/2 000 000 ;
- les cartes du réseau hydrographique, des lacs et bassins artificiels de la Côte d'Ivoire établie au 1/2 000 000 par le Service cartographique ORSTOM-Université de Cocody et MONTELS et RIOU (1972) ;
- une base de données de points d'eau avec plus de 13 000 puits et forages réalisée par la Direction de l'Hydraulique Humaine. Pour chaque point d'eau, des informations telles que le type de points d'eau, la profondeur, le niveau piézométrique et les caractéristiques des venues d'eau, étaient disponibles ;
- une base de données de 200 logs de forages du département de Korhogo (zone centre-nord du pays) établie par JOURDA (2005) ;
- un modèle d'élévation du terrain, élaboré à partir des images SRTM, de résolution 90 m, téléchargé à partir du site <http://glcfa.umiacs.umd.edu.8080/esdi> (Global Land Cover Facility).

Toutes ces données ont été traitées avec le logiciel ArcGis 9.3.

## 2.2 Approche méthodologique

Les différentes phases de l'approche méthodologique développée dans cette étude peuvent être résumées comme suit :

- identification des critères des zones favorables aux forages manuels ;
- détermination de l'aptitude géologique ;
- détermination de l'aptitude sur la base de la profondeur de l'eau ;
- analyse intégrée de ces données et estimation ainsi de l'aptitude hydrogéologique ;
- détermination de l'aptitude morphologique ;
- analyse intégrée des aptitudes morphologique et hydrogéologique ce qui donne l'aptitude finale aux forages manuels.

Pour faciliter l'analyse et l'intégration des données, la méthode d'analyse multicritères a été adoptée. Elle favorise la combinaison des données en vue de l'obtention d'une décision composite sur l'emplacement optimal des zones favorables aux forages manuels.

Toute la méthodologie développée pour la cartographie des zones favorables à l'implantation des forages manuels en Côte d'Ivoire est résumée sous la forme d'un organigramme (Figure 4).

### 2.2.1 Détermination des critères utilisés pour l'identification des zones favorables

Pour identifier les zones favorables, nous avons fait une estimation des conditions existantes dans les couches superficielles (maximum 40 m, c'est-à-dire la profondeur limite considérée pour la réalisation des forages manuels) en termes de dureté, perméabilité et de présence d'eau. Les aspects pris en considération pour déterminer le niveau d'aptitude sont :

- aptitude géologique : il s'agit d'identifier les zones où les couches superficielles ont des caractéristiques de dureté et de perméabilité favorables à la réalisation des forages manuels ;
- aptitude sur la base de la profondeur de l'eau : il s'agit d'identifier les zones où il est possible de trouver des venues d'eau exploitables à une profondeur compatible avec les techniques manuelles de perforation ;
- aptitude morphologique : elle porte sur la présence de zones

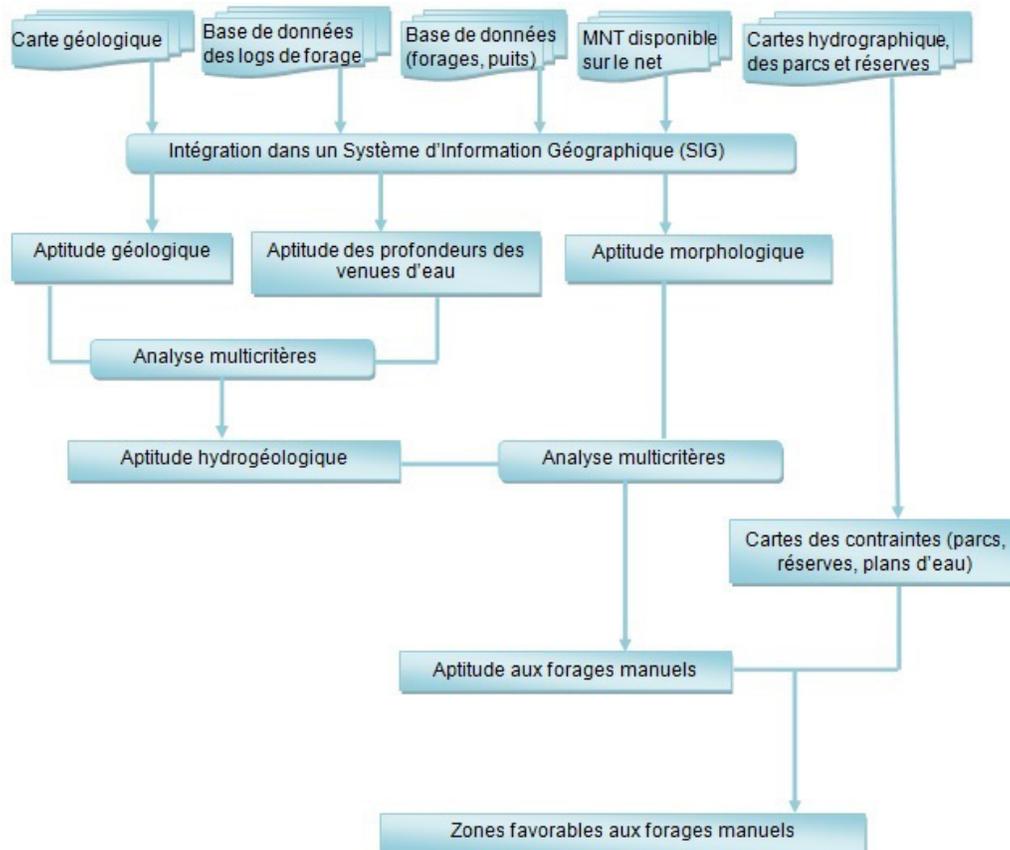


Figure 4. Synthèse de la méthodologie conçue dans cette étude.  
*Synthesis of the methodology conceived in this study.*

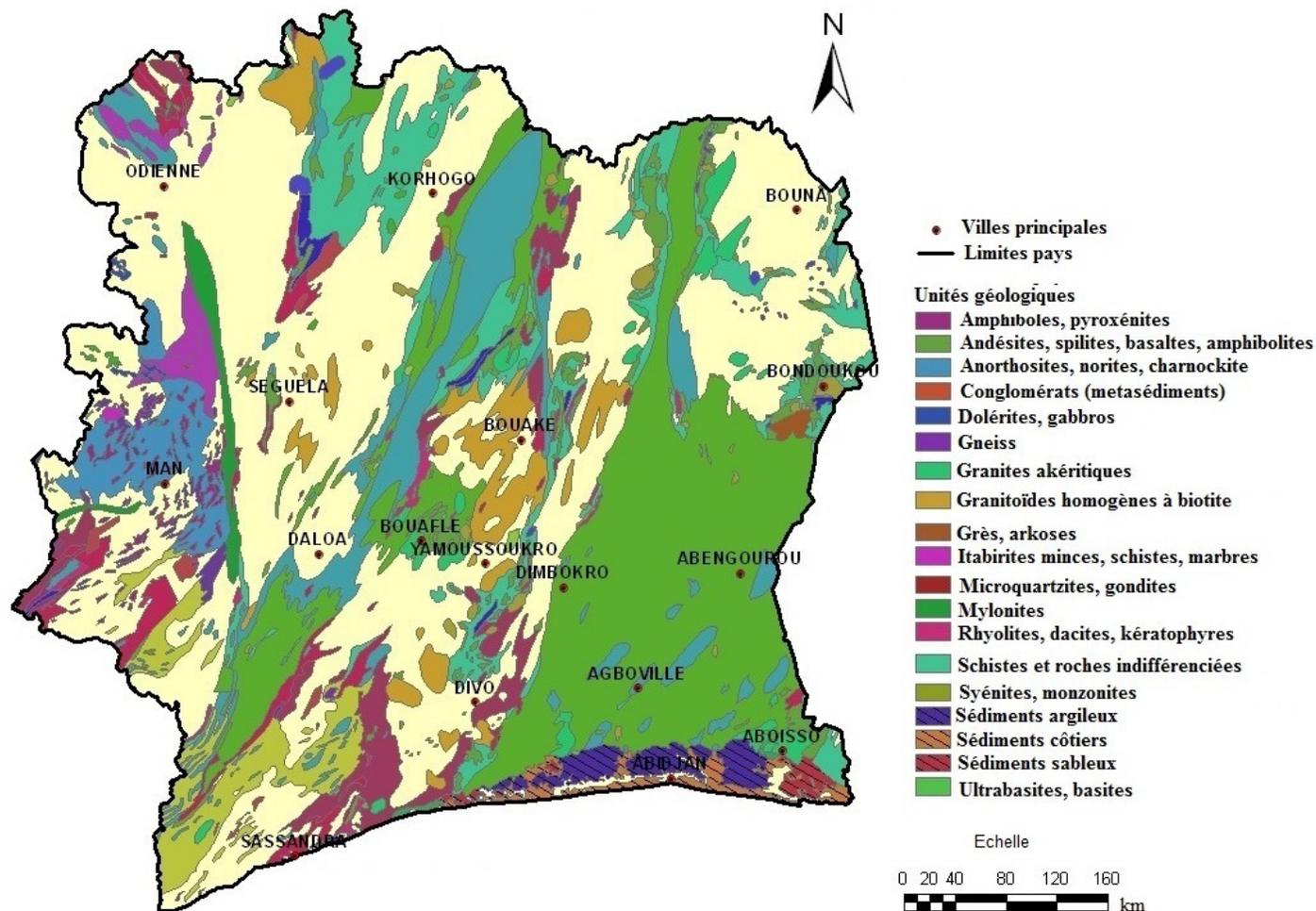


Figure 5. Carte géologique simplifiée de la Côte d'Ivoire à l'échelle 1/4 000 000.  
*Simplified geological map of Ivory Coast at a scale of 1:4 000 000.*

avec des caractéristiques topographiques favorables (zones de bas-fonds ou zones de plaine) et la présence de couches d'altération des roches dures (de socle notamment). Ces couches peuvent avoir des caractéristiques (épaisseur, dureté et perméabilité) aptes pour l'exploitation avec des forages manuels ;

- limitations à l'utilisation du territoire : dans les zones de protection environnementale, il n'est pas possible que la présence humaine soit permanente. Aussi, ces zones ne sont pas considérées comme aptes au développement d'un programme de forages manuels pour augmenter la disponibilité en eau de la population.

#### 2.2.1.1 Détermination de l'aptitude géologique

Il s'agit d'identifier les zones qui présentent des formations géologiques avec caractéristiques de dureté et perméabilité favorables à la réalisation des forages manuels, ou identifier les zones où il y a probabilité d'existence d'une couche d'altération ou de roches sédimentaires superposées à la formation géologique principale. Ces couches d'altération ne sont pas figurées sur la carte géologique (Figure 5) et leur existence

doit être estimée sur la base des autres sources d'information disponibles :

- les logs de forages donnent des détails sur les couches superficielles ; malheureusement, ce type de données est disponible seulement pour la zone de Korhogo (zone centre-nord du pays) ;
- la base de données des points d'eau : l'existence d'un grand nombre des puits creusés à la main dans certaines zones ou formations géologiques caractéristiques peut indiquer la présence des couches d'altération.

À partir de l'inventaire des lithologies de la carte géologique, une table de description des caractéristiques de la roche-mère et de la couche d'altération a été établie pour chaque formation.

Sur la base de ces trois paramètres (caractéristiques de dureté de la roche mère, épaisseur probable de la couche d'altération et perméabilité estimée de la couche superficielle) et en se référant aux études similaires réalisées par l'UNICEF au Togo (2009) et au Libéria (2010a), une classification d'aptitude géologique

à l'exploitation avec techniques de perforation manuelle a été effectuée :

- FO : zone à aptitude géologique forte (correspondante aux conditions de dureté et perméabilité très favorables) sur la roche principale de la formation aquifère ;
- FO-a : zone à aptitude géologique forte sur la couche d'altération de la roche principale de la formation aquifère ;
- MO : zone à aptitude géologique moyenne (correspondant aux conditions de dureté et perméabilité moyennement favorables ou discontinues) sur la roche principale de la formation aquifère ;
- MO-a: zone à aptitude géologique forte sur la couche d'altération de la roche principale de la formation aquifère ;
- FA : zone à aptitude géologique faible, c'est-à-dire en général pas favorable à la réalisation des forages manuels.

#### 2.2.1.2 Détermination de l'aptitude sur la base de la profondeur de l'eau

Pour estimer la profondeur de l'eau la plus probable dans les différentes zones de la Côte d'Ivoire, nous avons utilisé l'information sur les venues d'eau existant dans l'inventaire des points d'eau. En général, la profondeur de la venue d'eau et le niveau piézométrique peuvent donner des indications qui ne sont pas représentatives de la profondeur réelle à laquelle on peut trouver des venues d'eau exploitables parce que le niveau piézométrique peut varier en fonction des saisons climatiques. De plus, l'information sur les puits (qui captent les couches d'altération superficielles) est plus importante que sur les forages (qui captent les aquifères plus profonds que les puits), car il est possible que, dans les couches superficielles à faible productivité (moins de 40 m de profondeur), il y ait des venues d'eau exploitables par les puits et les forages manuels qui ne soient pas signalées dans les données des forages profonds.

La carte de profondeur des venues d'eau établit une zonalité du territoire qui se base sur les profondeurs probables des venues d'eau exploitables par les forages manuels. Pour chaque zone, des classes des profondeurs des venues d'eau ont été définies (Figure 6).

Pour la détermination de l'aptitude sur la base de la profondeur de l'eau, une interprétation directe du niveau piézométrique pour chaque zone a été faite à partir de la carte de profondeur du niveau piézométrique dans les points d'eau. Les algorithmes automatiques d'interpolation entre les données disponibles n'ont pas été utilisés, car ils attribuent des valeurs dans des secteurs où aucune donnée n'est connue (JOURDA *et al.*, 2006).

#### 2.2.2 Analyse multicritères pour la cartographie des zones favorables aux forages manuels

La cartographie des zones favorables aux forages manuels nécessite une analyse multicritères qui intègre plusieurs cartes d'évaluation d'aptitude.

#### 2.2.2.1 Évaluation de l'aptitude hydrogéologique

La superposition de l'aptitude géologique et de l'aptitude en relation avec le niveau de l'eau a permis d'évaluer l'aptitude hydrogéologique globale de la Côte d'Ivoire. L'aptitude hydrogéologique a été calculée à partir de la procédure suivante :

Transformation de l'aptitude géologique en valeur numérique :

- aptitude forte = 1
- aptitude moyenne = 0.5
- aptitude faible = 0

Transformation de l'aptitude sur la base de la profondeur de l'eau en valeur numérique :

- favorable, avec profondeur de l'eau moins de 15 m = 1
- partiellement favorable, avec profondeur de l'eau entre 15 et 25 m = 0.5
- pas favorable, avec profondeur de l'eau plus de 25 m = 0

Superposition de l'aptitude géologique et de la profondeur de l'eau, et subdivision en polygones qui résultent de l'intersection des deux couches géographiques ;

Calcul de la valeur numérique d'aptitude hydrogéologique, avec la formule :

$$\text{Aptitude hydrogéologique} = (\text{aptitude géologique}) \times (\text{aptitude profondeur d'eau}) \times 100$$

La correspondance des valeurs issues de la combinaison des aptitudes géologique et profondeur d'eau est consignée dans les **tableaux 2 et 3**.

#### 2.2.2.2 Évaluation de l'aptitude morphologique

Une grande partie du pays est formée par des unités géologiques qui ne sont pas favorables par la nature de la roche-mère, mais qui peuvent être couvertes par une importante couche d'altération exploitable par les forages manuels. L'épaisseur des couches d'altération principalement est en relation avec les caractéristiques de la roche (lithologie, minéralogie) et des critères morphologiques (plus ou moins grande érosion des profils d'altération) (LACHASSAGNE *et al.*, 2011) et avec l'existence de morphologies qui facilitent le dépôt et l'accumulation à la surface de sédiments non consolidés.

#### 2.2.2.2 Évaluation de l'aptitude morphologique

Une grande partie du pays est formée par des unités géologiques qui ne sont pas favorables par la nature de la roche-mère, mais qui peuvent être couvertes par une importante couche d'altération exploitable par les forages

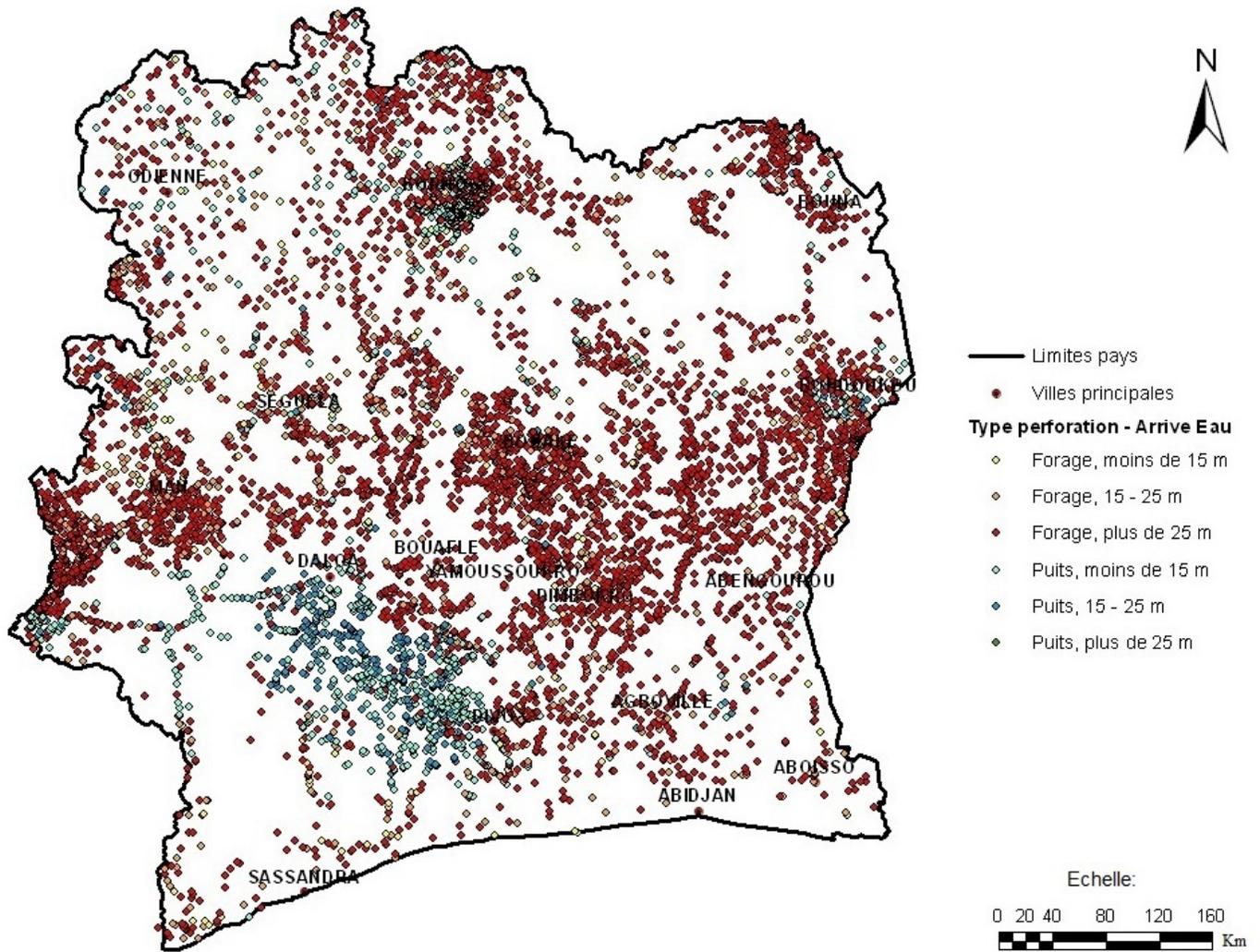


Figure 6. Carte de classification de points d'eau par type et profondeur de la venue d'eau.  
*Classification map of water sites by type and depth to the water table.*

Tableau 2. Correspondance entre aptitude hydrogéologique et valeur numérique.  
*Table 2. Correspondence between hydrogeological aptitude and numerical value.*

Valeur de la multiplication	Classe d'aptitude hydrogéologique
0	Pas favorable
25	Partiellement favorable
50	Favorable
100	Très favorable

**Tableau 3. Classification issue de la combinaison entre « aptitude géologique et aptitude profondeur d'eau ».**

*Table 3. Classification resulted from the combination between "geological aptitude" and "water level aptitude".*

	Aptitude sur la base du niveau de l'eau		
	faible	moyenne	forte
Aptitude Géologique			
faible	pas favorable	pas favorable	pas favorable
moyenne	pas favorable	partiellement favorable	favorable
forte	pas favorable	favorable	très favorable

manuels. L'épaisseur des couches d'altération principalement est en relation avec les caractéristiques de la roche (lithologie, minéralogie) et des critères morphologiques (plus ou moins grande érosion des profils d'altération) (LACHASSAGNE *et al.*, 2011) et avec l'existence de morphologies qui facilitent le dépôt et l'accumulation à la surface de sédiments non consolidés.

L'analyse morphologique a été réalisée sur la base d'un modèle digital d'élévation au pas de 90 m obtenu sur le site <http://glcfa.umiacs.umd.edu.8080/esdi>. Après la transformation du pixel de 90 m à 200 m, une procédure automatique basée sur un algorithme (TPI, Topographic Position Index) a été utilisée. Cette procédure fait une comparaison entre l'altitude de chaque pixel et celle des pixels proches, jusqu'à une distance qui doit être définie par le technicien du SIG. Dans cette étude, une distance de 5 km a été définie.

Une procédure automatique de comparaison entre la carte du TPI et la carte de pente du terrain (produite automatiquement à partir du modèle de terrain), nous a permis d'obtenir la carte des classes de position topographique :

- Zone de bas-fond
- Zone à faible pente
- Zone à forte pente
- Zone de relief

La transformation de cette carte au moyen de l'application majority filter du logiciel ArcGis 9.3 sur une fenêtre de 10 x10 pixel a permis l'élaboration de la carte d'aptitude morphologique (Figure 7).

- zone morphologiquement très favorable (zone de bas-fonds, avec pente < 3 °)
- zone morphologiquement pas favorable (zone de relief, avec pente > 3 °)
- zone partiellement favorable (toutes les autres zones)

#### 2.2.2.3 Évaluation de l'aptitude finale aux forages manuels : analyse intégrée d'aptitude morphologique et hydrogéologique

La dernière partie de la procédure d'analyse a nécessité de modifier la valeur numérique d'aptitude hydrogéologique pour prendre en considération la morphologie, et de calculer la valeur d'aptitude finale, selon la forme suivante :

- valeur d'aptitude finale dans les zones morphologiquement favorables = aptitude hydrogéologique + 25
- valeur d'aptitude finale dans les zones morphologiquement non favorables = aptitude hydrogéologique - 25
- pour les autres zones, la valeur de l'aptitude hydrogéologique n'a pas subi de modification.

En effet, la limite des techniques manuelles de perforation est autour de 30 à 40 m et la profondeur du niveau piézométrique ne doit pas dépasser 25 m. Pour atteindre une telle valeur, il faut la présence d'une épaisse couche d'altération qui facilite la présence de l'eau et le dépôt de sédiments non consolidés (UNICEF, 2010e). Cette formule permet de mettre en évidence les zones couvertes d'une couche d'altération qui ont au moins 25 m d'épaisseur.

Avec cette correction, les zones de bas fonds et faible pente (avec morphologie favorable) ont augmenté leur aptitude finale en relation à leur aptitude hydrogéologique ; au contraire les zones de relief ont vu une réduction de leur aptitude.

Pour l'aptitude finale aux forages manuels, la classification présentée au sein du **tableau 4** a été adoptée et tient compte des travaux similaires réalisés par l'UNICEF au Togo (2009), Libéria (2010a), Sénégal (2010b) et en Centrafrique (2010c).

La carte intrinsèque des zones favorables aux forages manuels est liée à l'environnement physique (géologie, géomorphologie, niveau piézométrique) et ne tient pas compte des limitations existant dans l'occupation de sol. Ainsi, toutes

les zones des parcs et réserves, des forêts classées et des retenues d'eau (Figure 8) ont été éliminées de la carte intrinsèque de zones favorables.

### 2.3. Analyse de sensibilité de paramètres simples

Une analyse de sensibilité a été effectuée pour apprécier l'effet de chaque paramètre retenu pour l'analyse multicritères

et, par conséquent, pour la cartographie des zones favorables aux forages manuels. A cet effet, le test de sensibilité développé par NAPOLITANO et FABBRI (1996) a été utilisé. Ce test permet d'analyser l'influence réelle de la pondération par rapport aux poids affectés à chaque paramètre de l'analyse multicritères. Dans cette analyse, le poids effectif est comparé à celui fourni par la modélisation de l'analyse multicritères. Le poids effectif (W) d'un paramètre est calculé à partir de l'équation (1) suivante :

$$w = \frac{X_r \times X_w}{A} \times 100 \quad (1)$$

Avec  $X_r$  et  $X_w$  représentant respectivement la note et le poids assignés au paramètre X et A, l'indice de l'aptitude finale au forage du modèle.

Dans le cas de cette étude, tous les paramètres ont le même poids dont la valeur en pourcentage est 33,33 % pour chaque paramètre. Il faut noter que les notes assignées à chaque paramètre varient de 0 à 25.

Tableau 4. Classification pour l'aptitude finale aux forages manuels

Table 4. Classification for final aptitude for manual boreholes

Valeur	Classe d'aptitude finale
Moins ou égal à 0	Pas favorable
25	Partiellement favorable
50	Favorable
Plus de 75	Très favorable

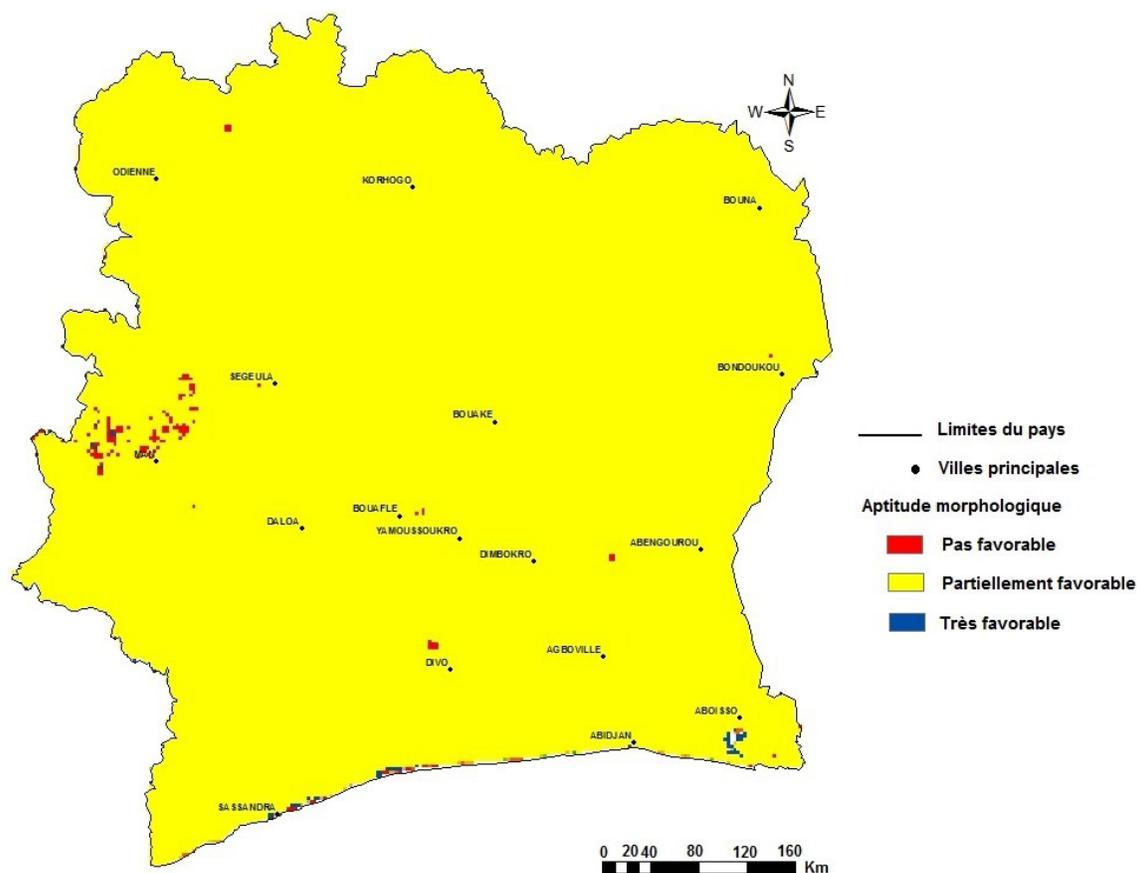


Figure 7. Carte d'aptitude morphologique à la perforation des forages manuels en Côte d'Ivoire.  
Map of morphological features favouring the perforation of manual boreholes in Ivory Coast.

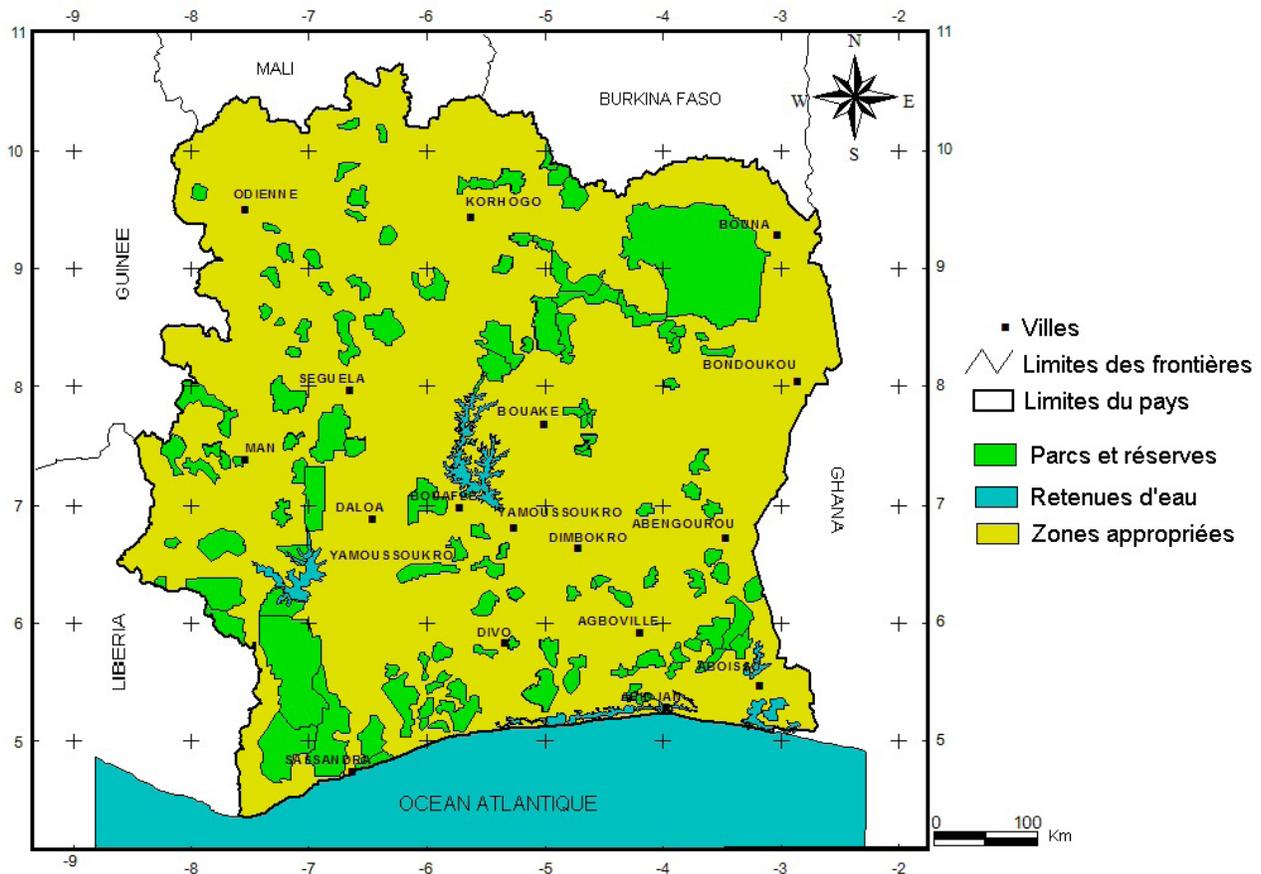


Figure 8. Carte des contraintes issues du croisement des critères « parc et réserves » et « retenue d'eau ». *Constraints map resulting from the comparison of the criteria "park and reserves" and "impounded water".*

### 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1. Carte de l'aptitude géologique

La majeure partie de la Côte d'Ivoire est formée par des roches cristallines granitoïdes ou de schistes. Ces roches sont généralement dures, mais avec des couches d'altération bien développées dans les situations morphologiques favorables (bas-fonds et faibles pentes), avec une perméabilité moyenne, mais en général suffisante pour une exploitation avec des forages manuels (Figure 9). En considération de cette homogénéité du pays du point de vue lithologique, l'aptitude géologique apparaît aussi presque uniforme, avec une dominance de la classe moyenne. Il y a potentiellement des couches perforables superficielles (formées par l'altération des roches du socle cristallin), mais elles sont discontinues et de perméabilité parfois limitée (couches d'altération de texture argileuse). Dans ce cas de faible perméabilité, seuls des puits de gros diamètre permettraient d'extraire un débit significatif. Les zones les plus favorables sont donc formées par des dépôts sédimentaires non consolidés, principalement concentrés dans la zone côtière.

#### 3.2. Carte des profondeurs des venues d'eau

La profondeur des venues d'eau estimée est généralement comprise entre 15 et 25 m (Figure 10). Il y a des zones dans les parties ouest, sud-ouest (entre les Monts de Man et la région de Sassandra) et dans les zones orientale et nord-orientale (zones de Bouaké, Bouna et Korhogo) où la profondeur estimée est de plus de 25 m. Dans ces zones, la plupart des points d'eau sont des forages. Ainsi, les valeurs de venues d'eau enregistrées dans la base de données sont donc en relation à l'exploitation des aquifères profonds plus productifs. Cependant, il n'y a pas d'information sur des puits qui exploitent les nappes plus superficielles.

#### 3.3. Carte d'aptitude hydrogéologique

Il ressort de la carte de la figure 11, une alternance des conditions peu favorables à favorables dans les zones centrale et sud-est du pays. Dans les zones ouest et nord-est, il y a des régions où les conditions ne sont pas favorables, ceci étant essentiellement dû à la profondeur des nappes exploitables.



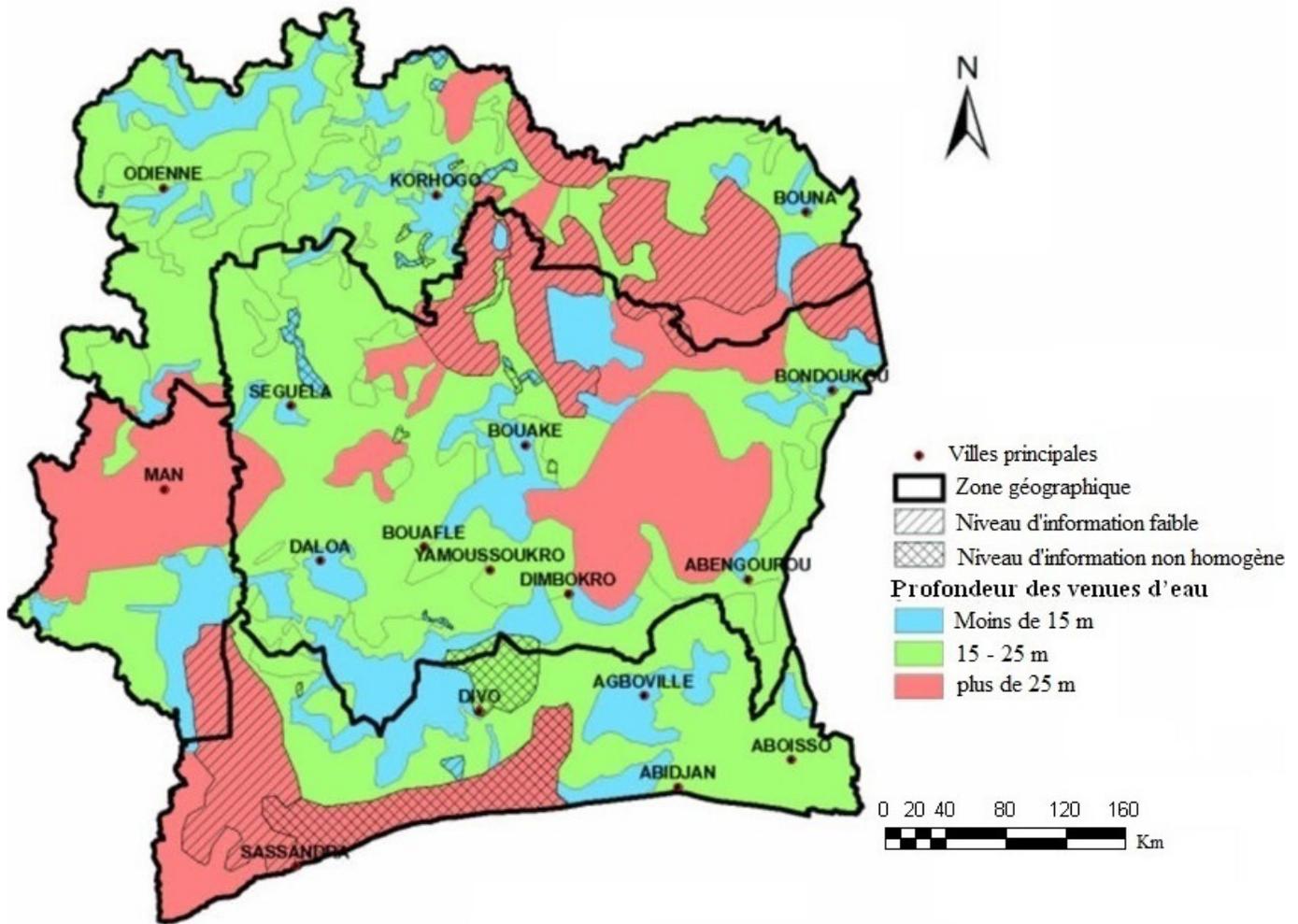


Figure 10. Carte de l'aptitude à la perforation des forages manuels sur la base de la profondeur de l'eau.  
*Map of the aptitude for the perforation of manual boreholes on the basis of water depth.*

de 25 m. La zone ouest est considérée comme peu favorable et est en plus caractérisée par la présence d'une large zone de réserve naturelle.

#### *Zone 2 : Centre (zone montagneuse du Massif de Man exclus)*

L'aptitude globale aux perforations manuelles de la zone centrale résulte des conditions moyennement favorables à plus favorables dans les zones morphologiquement déprimées (sauf pour la zone centre-orientale où l'on observe une prévalence des forages sur les puits et des niveaux piézométriques plus profonds en moyenne) (Figure 12). L'homogénéité de la nature des roches (socle cristallin) n'explique pas cette tendance.

L'observation nette d'une prévalence de puits sur les forages ainsi qu'une certaine densité de présence de ces puits dans la zone entre les villages de Divo et Daloa et en proximité du village de Bondoukou est révélée sur cette carte. Dans le restant de la zone centrale, il y a une nette prévalence des forages sur

les puits. Une limitation de l'interprétation est donnée par la faible densité de données relatives à la présence de puits ou forages dans la zone entre les villages de Bondoukou et Korhogo. Il serait intéressant d'investiguer si la prévalence de forages sur puits de cette zone est le résultat des caractéristiques hydrogéologiques ou plutôt à l'absence de données des puits existants (puits traditionnels) ou la présence d'autres sources d'approvisionnement en eau (rivières, sources, ...).

De manière générale, ce secteur présente une aptitude moyenne à la réalisation de perforations manuelles sur les couches d'altération, tout particulièrement dans les zones de vallées, le long des cours d'eau et dans les zones inondables.

#### *Zone 3 : Nord*

Dans le secteur nord du pays, l'aptitude à la réalisation des forages manuels est moyenne dans les zones de vallée, à l'exception du secteur nord-est où les niveaux piézométriques

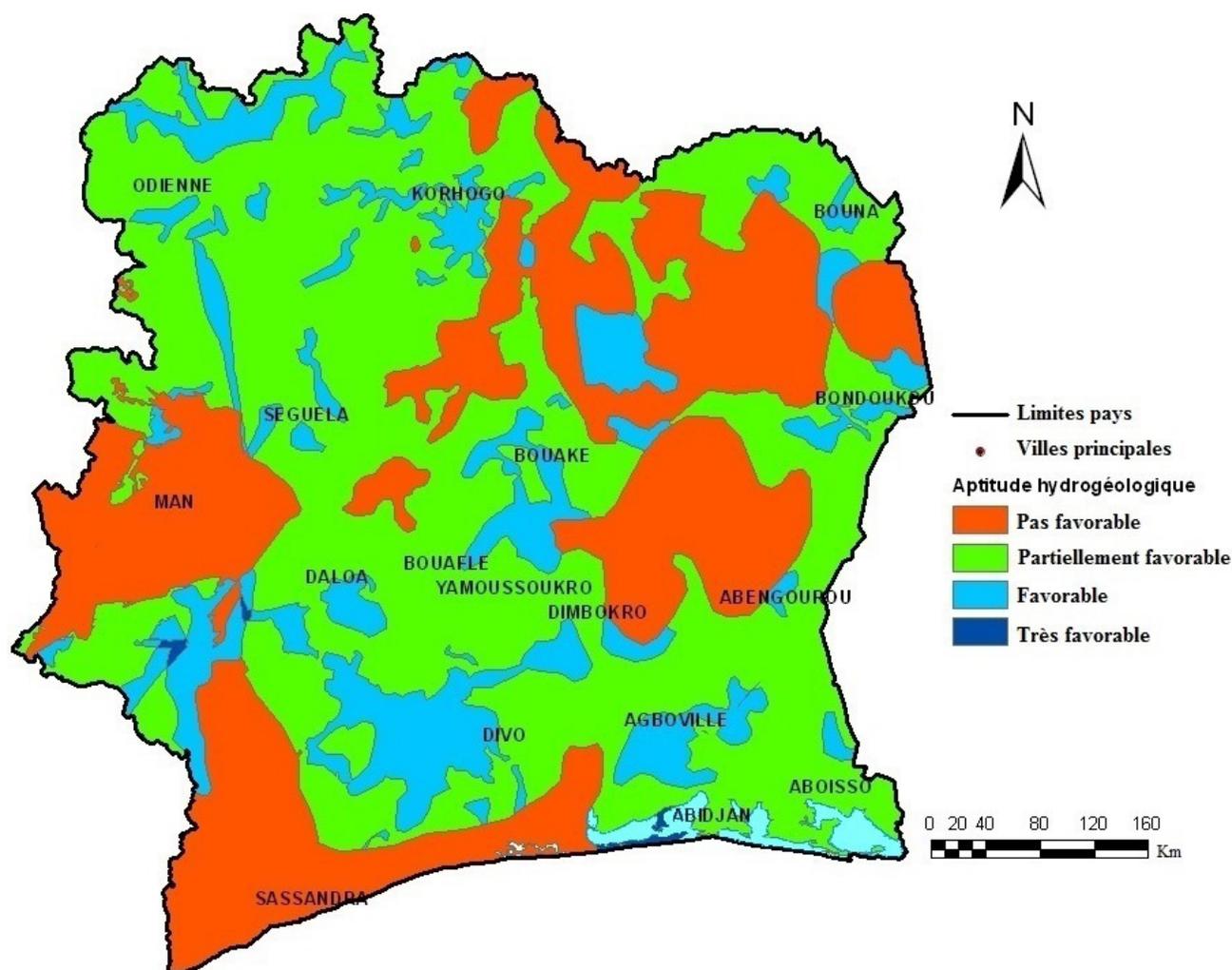


Figure 11. Carte de l'aptitude hydrogéologique à la perforation des forages manuels en Côte d'Ivoire.  
Map of hydrogeological features favouring the perforation of manual boreholes in Ivory Coast.

moyens de la nappe présentent des profondeurs importantes. Ce secteur est également caractérisé par des surfaces protégées et des réserves naturelles et, par conséquent, de faible intérêt pour l'exploitation des ressources en eau souterraines. Les aquifères exploitables par des forages manuels sont ceux se situant dans la couche superficielle d'altération des formations cristallines (formations volcaniques métamorphisées et granitoïdes). Les chances de réalisation de forages manuels augmentent dans les zones de vallées, dans les talwegs et dans les zones inondables, mais le risque de contamination de ces ouvrages dans ces zones est très élevé.

#### Zone 4 : reliefs montagneux de l'Ouest (chaîne de Guinée)

Pentes et dénivellement dans cette zone rendent le paysage plus accidenté, avec des reliefs aux environs de 1000 m. La géologie également se diversifie des autres zones du pays par

l'affleurement de roches archéennes du craton (migmatites, gneiss, granites, quartzites, roches basiques et ultrabasiqes).

Cette zone s'avère être très peu favorable à la réalisation de forages manuels, compte tenu de la nature lithologique du terrain et de la morphologie accidentée. Il est également à noter que cette zone présente une nette prévalence de forages sur les puits. Les zones de vallée et les zones inondables le long des cours d'eau représentent les secteurs à préférer pour d'éventuelles perforations manuelles, en tenant néanmoins compte du risque inondation.

Le **tableau 5** résume la distribution en pourcentage de surface entre les classes d'aptitude des quatre zones géographiques décrites préalablement. Il ressort de ce tableau que la classe d'aptitude partiellement favorable aux forages manuels est la plus représentative avec un pourcentage de 45 % de la superficie de la Côte d'Ivoire soit 145 000 km<sup>2</sup>.

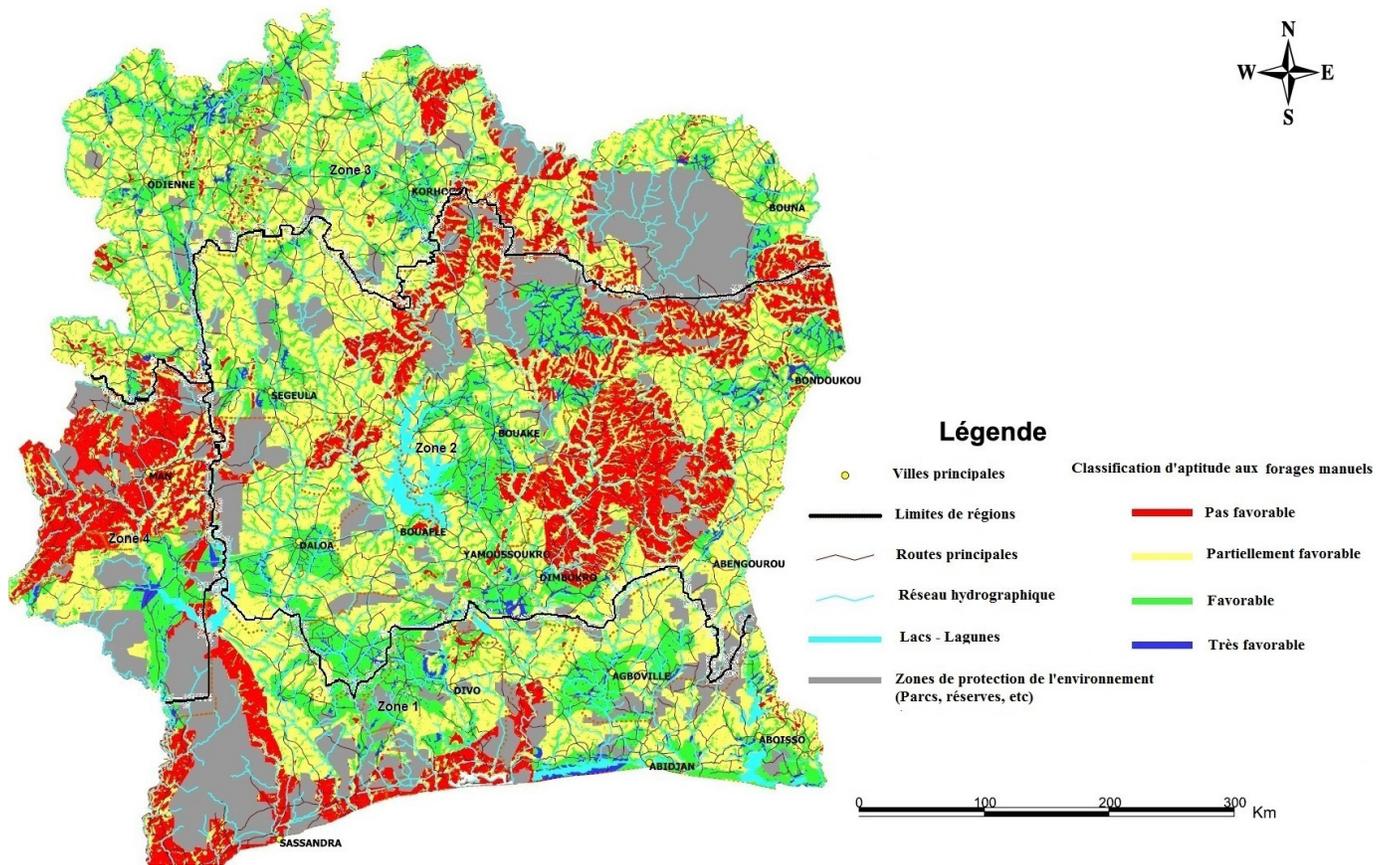


Figure 12. Carte des zones favorables aux forages manuels en Côte d'Ivoire.  
 Figure 12. Map of zones favourable for manual boreholes in Ivory Coast.

### 3.5. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité de paramètres simples pour la cartographie des zones potentiellement favorables aux forages manuels (Tableau 6) révèle qu'il y a une différence entre les poids théoriques et les poids effectifs. Nous constatons que les poids effectifs de l'ensemble des paramètres restent largement supérieurs à leurs poids théoriques. Nous en déduisons donc que l'ensemble de ces paramètres influencent fortement la détermination des zones potentiellement favorables à l'implantation des forages manuels. En effet, selon DOUMOUYA *et al.* (2012), lorsque les poids effectifs sont supérieurs aux poids théoriques, ces paramètres influencent le phénomène considéré et le degré de cette influence varie en fonction de l'ampleur de cette différence.

### 3.6. Discussion

L'étude de la faisabilité de perforations manuelles en Côte d'Ivoire, réalisée grâce à la récolte de données géologiques et de données relatives aux points d'eau existants, intégrées avec des analyses géomorphologiques et des données non systématisées,

a permis l'élaboration d'une première carte de zones favorables à l'approvisionnement des eaux souterraines à travers des puits peu profonds (< 40 m).

Vue la nature des données de base (répartition non homogène, nombre de puits insuffisant et informations incomplètes sur certains points d'eau), les résultats obtenus de cette première analyse nécessitent des approfondissements ultérieurs et une phase de validation directe sur le terrain, en particulier dans les zones dites favorables. Ces zones pourraient être considérées comme prioritaires pour l'implémentation du programme d'appui aux forages manuels.

De manière générale, cette étude a permis la mise en évidence de larges zones de substrat cristallin couvert d'une zone d'altération argilo-sableuse d'épaisseur significative (20-30 m). C'est un facteur particulièrement favorable aux forages manuels (faible dureté de la couche superficielle). Ces mêmes formations hébergent souvent des nappes peu profondes (< 25 m), caractérisées par des niveaux saturés peu développés et par des fluctuations saisonnières importantes (JOURDA *et al.*, 2006). Les niveaux les plus productifs se situent dans les formations plus sableuses, mais les aquifères existants

**Tableau 5. Répartition en pourcentage des classes favorables aux forages manuels.***Table 5. Percentage distribution of favorable classes for manual boreholes.*

Région	Pas favorable (%)	Partiellement favorable (%)	Favorable (%)	Très favorable (%)	Surface (km <sup>2</sup> )
Zone 1 - Sud et littoral	28	42	26	4	65 726
Zone 2 - Centrale	22	48	26	4	133 072
Zone 3 - Nord	18	50	28	4	92 304
Zone 4 – Reliefs montagneux de l'Ouest	49	30	17	4	31 359
Total	25	45	26	4	322 462
Surface (km <sup>2</sup> )	80 615	145 107	83 840	12 898	

**Tableau 6. Analyse statistique des poids effectifs.***Table 6. Statistical analysis of effective weights.*

Paramètres	Poids théorique (%)	Poids effectif (%)			
		Min.	Moyen	Max.	Ecart-type
Géologie	33,33	0	1	1,33	0,69
Profondeur	33,33	0	1	1,33	0,69
Morphologie	33,33	0	1	41,66	23,77

dans les couches d'altération présentent des caractéristiques de faibles productivités, adaptées à l'exploitation par petits groupes d'usagers. Ces aquifères peuvent être exploités dans des contextes de petites communautés rurales isolées, mais non de grandes agglomérations (SAVANE, 1997; YOUAN TA *et al.*, 2008).

Lors de cette étude, les zones morphologiquement déprimées et à faible pente se situant dans des vallées fluviales ont été considérées comme particulièrement favorables. En effet, les épaisseurs de la couche d'altération dans ces zones sont plus importantes compte tenu de la présence d'aquifères alluvionnaires exploitables par des perforations manuelles (faible profondeur de la nappe).

Ces zones ont par conséquent été classifiées et paramétrées dans l'environnement SIG avec des termes de faisabilité plus élevés. Il est aussi important de considérer que les zones de bas fonds présentent potentiellement des conditions plus favorables, mais qu'en plusieurs situations la population est concentrée dans des zones plus élevées (risque d'inondation et de conditions défavorables du terrain par la présence d'eau stagnante dans les zones basses). Pour la réalisation d'une phase successive d'approfondissement de l'étude (concentrée dans les zones prioritaires et d'aptitude généralement favorable), des techniciens locaux évalueront avec plus de détails et à travers des études spécifiques les épaisseurs réelles des couches

d'altération, les valeurs de perméabilité (déterminées à partir des essais de pompage lors des implantations des forages) et la profondeur de l'eau. Cette phase est importante, car tous ces paramètres peuvent présenter une variabilité locale forte, non observable à l'échelle d'analyse de l'étude nationale présente. Dans cette phase il sera important d'accéder à l'information qualitative, mais indisponible en format numérique. Ce type d'information peut être recueilli auprès des personnes expérimentées qui travaillent directement sur le terrain et lors des campagnes d'observation directe.

## CONCLUSION

La carte de l'aptitude à la réalisation de perforations manuelles élaborée dans cette étude montre un niveau généralement partiellement favorable, qui devient favorable ou très favorable dans les vallées fluviales à faible pente (< 3°). Les zones, nord orientale, sud occidentale et la zone montagneuse de Man ont révélé des aptitudes moins favorables à l'implantation des forages manuels en Côte d'Ivoire. Compte tenu de la nature des données de base et des résultats obtenus, une étude d'analyse approfondie et une phase de validation directe des données sur le terrain sont nécessaires, en particulier dans les zones qui apparaissent favorables à l'implantation manuelle des forages.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions tout le personnel de la Direction de l'Hydraulique Humaine (DHH) d'Abidjan pour avoir mis des données à notre disposition et l'UNICEF pour le financement de cette étude.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AKA, K. (1991). *La sédimentation au quaternaire sur la marge de la Côte d'Ivoire : Essais de modélisation*. Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles, Université Nationale de Côte d'Ivoire, 233 p.
- CAMIL, J. (1984). *Pétrographie, chronologie des ensembles granulitiques archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire). Implication pour l'histoire géologique du craton ouest-africain*. Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, 306 p.
- DIRECTION DE L'HYDRAULIQUE HUMAINE (DHH) (2006). L'hydraulique humaine en Côte d'Ivoire. Ministère des Infrastructures Économiques, 22 p.
- DJRO, S.C. (1998). *Évolution tectono-métamorphique des gneiss granulitiques archéens du secteur de Biankouma*. Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, 171 p.
- DOUMOUYA, I., B. DIBI, K.I. KOUAME, B. SALEY, J.P. JOURDA., I. SAVANE et J. BIEMI (2012). Modelling of favorable Zones for the establishment of water points by Geographical Information System (GIS) and Multicriteria Analysis (MCA) in the Aboisso Area (South-East of Côte d'Ivoire). *Environ. Earth Sci.*, 67, 1763-1780.
- FABRE, R. (1987). *Caractérisation géochimique du magmatisme birimien dans le centre de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest) : Ses implications géodynamiques*. CIFEG, Publication occasionnelle, 12, 47 p.
- Global Land Cover Falcity (1997-2014). *Earth science data interface*. <http://glcfa.umiacs.umd.edu.8080/esdi> (Consultation le 10 octobre 2005)
- GOULA, B.T.A. (2007). Évaluation du secteur de l'alimentation en eau potable et de l'assainissement en milieu rural et urbain. Rapport provisoire, Banque Africaine de Développement, Abidjan, 125 p.
- GOULA, B.T.A., B. KONAN, Y.T. BROU, I. SAVANÉ, V. FADIKA et B. SROHOUROU (2007). Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale : Cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois lognormale et de Gumbel. *Hydrol. Sci. J.*, 52, 49-67.
- HALLE, B. et V. BRUZON (2006). Profil Environnemental de la Côte d'Ivoire, Consortium AGRIFOR Consult, Contrat Cadre EuropeAid/119860/C/SV/Multi Rapport final, 133 p.
- JOURDA, J.P. (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 d'État, ès sciences naturelles, Université de Cocody, Abidjan, 402 p.
- JOURDA, J.P., M.B. SALEY, E.M.V. DJAGOUA, K.J. KOUAMÉ, J. BIÉMI et M. RAZACK (2006). Utilisation des images Landsat ETM+ pour l'évaluation des potentialités en eaux souterraines dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire): approche par analyse multicritère et test de validation. *Rev. Télédétection*, 5, 339-357.
- JICA (2001). Plan Directeur de Gestion intégrée des ressources en eau en Côte d'Ivoire, Rapport Final, 49 p.
- KOUAMELAN, A.N. (1996). *Géochronologie et géochimie des formations Archéennes et Protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition Archéen-protérozoïque*. Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes 1, 277 p.
- LACHASSAGNE, P., R. WYNS et B. DEWANDEL (2011). The fracture permeability of hard rock aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, 23, 145-161
- LEMOINE, S. (1988). *Évolution géologique de la région de Dabakala (Nord-Est de la Côte d'Ivoire) au Protérozoïque inférieur. Possibilité d'extension au reste de la Côte d'Ivoire et du Burkina Faso : Similitudes et différences ; les linéaments de Greenville-Ferkessédougou et Grand Cess-Niakaramandougou*. Thèse de Doctorat d'État, Université Blaise Pascal, 334 p.
- MONTELS, J. et G. RIOU (1972). Carte Oro-hydrographique établie au 1/2 000 000 par le Service cartographique ORSTOM-Université de Cocody
- ONU (2013). Éliminer la pauvreté 2015, c'est possible. Objectifs du Millénaire pour le développement. Rapport 2013, 63 p.

- PAPON, A. (1973). Géologie et minéralisation du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Mém. Bur. Géol. Paris*, 80, 284 p.
- POTHIN, K.K. (1988). *Pétrographie et géochimie des formations précambriennes de la région d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Typologie du volcanisme birimien. Tendances évolutives du magmatisme éburnéen. Géochimie de l'Uranium et du Thorium dans les granitoïdes*. Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, 329 p.
- SAVANE, I. (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 (S.I.H.R.S.)*. Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, 386 p.
- TAGINI, B. (1971). *Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale*. SODEMI Abidjan, 302 p.
- TASTET, J.P. (1979). *Environnements sédimentaires et structuraux quaternaires du littoral du Golfe de Guinée (Côte d'Ivoire, Togo, Bénin)*. Thèse de Doctorat d'État ès sciences naturelles, Université de Bordeaux 1, 181 p.
- TEMPIER, P. (1986). Le burkinien : cycle orogénique majeur du Protérozoïque inférieur en Afrique de l'Ouest. CIFEG. Publication occasionnelle 1986/10.
- UNICEF (2009). *Étude de faisabilité des forages manuels : identification des zones potentiellement favorables de la République du Togo*. Étude réalisée en collaboration avec la Direction générale de l'eau et de l'assainissement du Ministère de l'eau. Partica Foundation, Enterprise Works/VITA, 59 p.
- UNICEF (2010a). *Feasibility study for manual drilling mapping of favorable zones in Republic of Liberia*. Partica Foundation, Enterprise Works/VITA, 27 p.
- UNICEF (2010b). *Étude de faisabilité des forages manuels : identification des zones potentiellement favorables de la République du Sénégal*. Partica Foundation, Enterprise Works/VITA, 45 p.
- UNICEF (2010c). *Étude de faisabilité des forages manuels : identification des zones potentiellement favorables de la République Centrafricaine*. Partica Foundation, Enterprise Works/VITA, 30 p.
- UNICEF (2010d). *Étude de faisabilité des forages manuels identification des zones potentiellement favorables de la République du Mali*. Partica Foundation, Enterprise Works/VITA, 26 p.
- UNICEF (2010e). *Professionaliser le Secteur du Forage Manuel en Afrique : un guide pour le renforcement des capacités pour accroître l'accès à l'eau potable en milieu rural*. Partica Foundation, Enterprise Works/VITA, 40 p.
- VIDAL, M. (1987). Les déformations éburnéennes de l'unité birimienne de la Comoé (Côte d'Ivoire), *J. African Earth Sci.*, 6, 141-152.
- YACE, I. (1976). *Le volcanisme éburnéen dans les parties centrales et méridionales de la chaîne précambrienne de Fétékro en Côte d'Ivoire*. Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, 373 p.
- YOUAN, TA M., T. LASM, J.P. JOURDA, K.F. KOUAMÉ et M. RAZACK (2008) Cartographie structurale par imagerie satellitaire ETM+ et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire), *Rev. Télédétection*, 8, 43-71.