

ÉTUDE DES INONDATIONS PAR DÉBOREMENT DE RÉSEAU DANS LES MILIEUX DÉFAVORISÉS D'ABIDJAN; CÔTE D'IVOIRE

Dongo Kouassi^{*1,2}, Cissé Guéladio¹, Biémi Jean²

¹ Centre Suisse de Recherches Scientifiques en Côte d'Ivoire (CSRS), 01 B.P. 1303 Abidjan 01 (RCI) ; tél. : (225) 23-472-790 ; fax : (225) 23-451-211 ; kouassi.dongo@csrs.ci ; gueladio.cisse@csrs.ci

² Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), Université de Cocody, 22 B.P. 801 Abidjan 22 (RCI) ; k_dongo@yahoo.fr ; jbiemi@yahoo.fr

RESUME

A Abidjan, le risque d'inondation est accru dans les quartiers précaires du fait d'une urbanisation anarchique et incontrôlée. Ce travail vise à mettre au point un modèle hydraulique permettant d'apprécier la vulnérabilité de à l'inondation par débordement de réseau 6 quartiers précaires (Doukouré, Gbinta, Mami Fatai, Niangon Continu, Yamoussoukro, Yaoséhi) situés le long d'un canal d'évacuation des eaux.

L'approche a combiné: (i) l'analyse de la transmissivité des quartiers précaires par un sondage statistique utilisant une image Quickbird et la relation de l'inégalité de Bienaymé Tchebychev; (ii) la mesure de l'infiltration spécifique des quartiers précaires par la méthode de Darcy, Cette combinaison a permis une classification supervisée de la vulnérabilité à l'inondation par débordement de réseau des 6 quartiers précaires.

Le sondage statistique a mis en évidence l'espace horizontal utilisable par les écoulements et a permis de classer les quartiers précaires selon leur degré de sensibilité à l'inondation par débordement de réseau. La perméabilité hydraulique spécifique des quartiers a permis de classer les quartiers selon un gradient de perméabilité permettant de juger de leur capacité à stocker l'eau et d'être susceptible ainsi de favoriser l'inondation. La classification supervisée après l'analyse combinatoire indique, en cas de situation de crise d'inondation, deux cas de figure: d'un côté, une faible vulnérabilité à l'inondation par débordement de réseau est observée dans les quartiers Doukouré, Yaoséhi et Yamoussoukro et de l'autre, les quartiers de Niangon Continu, Gbinta et Mami Fatai présentent une forte vulnérabilité.

Les résultats de cette étude contribueront à la mise en place d'un observatoire et à la création d'un système d'alerte pour ces quartiers en situation de crises d'inondation.

Mots Clés : *Abidjan, inondation par débordement de réseau, quartiers précaires, vulnérabilité,*

ABSTRACT

In Abidjan, flood risk is increased in precarious settlements because of an anarchic and uncontrolled urbanization. This work aims at designing a hydraulic model allowing appreciating the vulnerability of 6 precarious settlements located along a drainage channel (Doukouré, Gbinta, Mami Fatai, Niangon Continu, Yamoussoukro, Yaoséhi), to flood by overflowing of network

The approach involved: (i) an analysis of transmissivity of precarious settlements using statistical poll with a Quickbird image (0,6 m on the ground) and the relation of Bienaymé Tchebychev (ii) an analysis of vertical permeability of precarious settlements thought Darcy's law. The combining of both allowed a supervised classification of the vulnerability to flood by

overflowing of network. Statistical poll showed horizontal space used by flows and precarious settlements were classified according to its sensibility to flood by overflowing of network.

The specific hydraulic permeability allowed classifying the precarious settlements according to a gradient of permeability witch permitted to judge their capacity to store water and to may so facilitate the flood.

The supervised classification after combinatorial analysis indicates, in case of crisis situation of flood, two scenarios: on one side weak vulnerability is met in Doukouré, Yaoséhi and Yamoussoukro a and on the other one, Niangon Continu, Gbinta and Mami Faitai shows a strong vulnerability to flood by overflowing of network.

These results will contribute to the implementation of an observatory and to the creation of an alarm system for these settlement in crisis situation of flood.

Keywords: *Abidjan, flood by overflowing of network, precarious settlements, vulnerability,*

1. INTRODUCTION

Les effets d'un envahissement par l'eau sont particulièrement ressentis en milieu urbain à cause des modifications des processus hydrologiques et des conditions d'écoulement induites par l'urbanisation (Paquier et *al.*, 2003). L'existence d'hétérogénéité à de nombreuses échelles caractérisant les sols urbains, influe sur le risque d'inondation car gouverne la capacité des couches à favoriser les écoulements et la stagnation de l'eau. Lors des décennies précédentes, l'opinion publique a été, largement sensibilisée aux risques encourus par certaines agglomérations, face à des événements hydrologiques susceptibles d'engendrer des inondations par débordement de réseaux (De Marsily, 1997 ; Renouf *et al.* 2005). Le phénomène est surtout alarmant dans les milieux défavorisés des villes du sud, à cause d'une urbanisation anarchique et incontrôlée.

La région d'Abidjan est située sous les tropiques caractérisées par des inondations de grande importance (Bouvier, 1995 ; Morel, 1997). Dans les milieux précaires de la ville d'Abidjan, le risque d'inondation est particulièrement accru du fait des pluies violentes (Dongo *et al.*, 2007). Des phénomènes d'érosion suivis d'éboulement de terrain et surtout d'inondation s'observent dans les quartiers précaires, qui se développent généralement sur les espaces à hauts risques et "interdits de construction" dans le plan directeur d'urbanisme et d'aménagement de la ville.

Ainsi, la gestion des inondations dans ces milieux précaires est devenue, une préoccupation majeure et interpelle tout chercheur qui s'intéresse à la question des centres urbains défavorisés.

L'approche modélisation est adaptée aux investigations qui cherchent à apprécier le comportement des facteurs induisant le phénomène des inondations dans un milieu. Le présent travail vise à mettre au point un modèle hydraulique de prévention, permettant une meilleure gestion de l'inondation par débordement de réseau dans les quartiers défavorisés de la ville d'Abidjan.

Les investigations ont été menées dans 6 quartiers précaires répertoriés dans les abords d'un canal d'évacuation des eaux dans la commune de Yopougon à Abidjan. Il s'agit des quartiers précaires Doukouré, Yaoséhi, Mami faitai, Yamoussoukro Gbinta, et Niangon Continu (Figure 1).

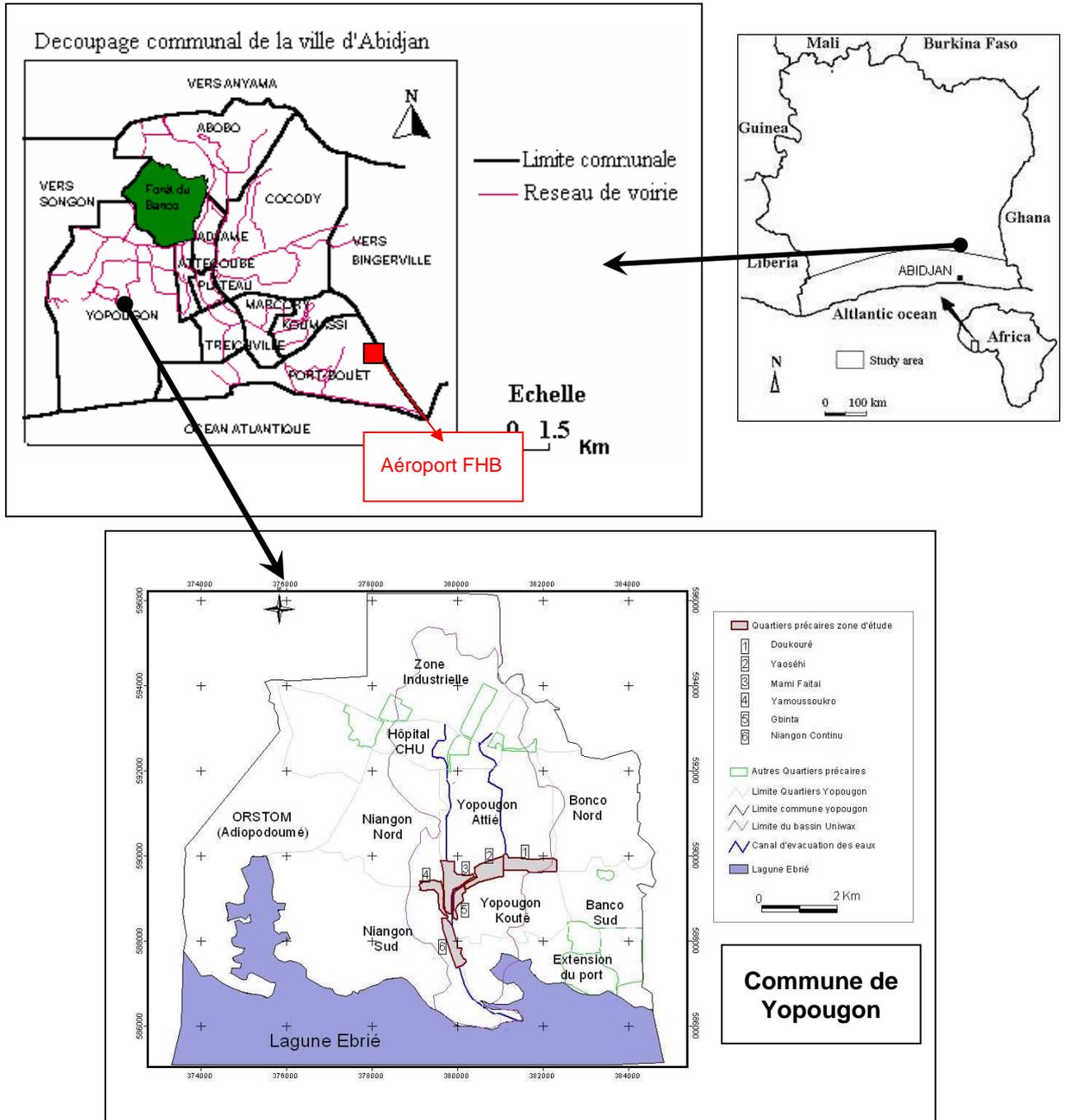


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude

La démarche utilisée combine deux paramètres essentielles : (i) la transmissivité des quartiers (perméabilité horizontale) appréciée par un sondage statistique utilisant des images satellitaires QUICKBIRD; (ii) la stockabilité (perméabilité verticale) déterminée à partir de la mesure de l'infiltration spécifique par de la loi de Darcy. Une analyse intégrée des deux paramètres permet d'apprécier le niveau de vulnérabilité des différents quartiers à l'inondation par débordement de réseau et d'orienter des prises de mesures adaptées.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Matériel utilisé

Le matériel utilisé est composé de deux éléments essentiels : (i) des images satellitaires QUICKBIRD à haute résolution spatiale (0,6m). Ces images (scène du 24 janvier 2004) ont été acquises en pleine saison sèche dépourvue de toute couverture nuageuse. Elles sont de ce fait nettes, et présentent une très bonne lisibilité des unités d'habitations ainsi qu'une description fine de la morphologie du tissu urbain. Grâce à la finesse spatiale, ces images constituent une base de données permettant la reconnaissance et l'extraction du bâti et autres éléments d'occupation du sol. Elles ont été donc utilisées pour réaliser un sondage statistique en vue de déterminer les coefficients d'occupation du sol par les éléments urbains des quartiers étudiés; (ii) un infiltromètre à double anneau de type MUNTZ constitué d'un cylindre central d'environ 25 cm et d'une vase de Mariotte. Ce dispositif a été utilisé pour la mesure de l'infiltration spécifique de chaque quartier selon le principe de la loi de Darcy.

2.2-Sondage statistique et détermination de la transmissivité des quartiers précaires

Le travail commence par la détermination des coefficients d'occupation du sol qui sont les indicateurs de la perméabilité horizontale. Le choix des paramètres de catégorisation dépend principalement de la possibilité de leur identification et de l'application que l'on veut faire des résultats (Bouvier et Thébé, 1988). Pour ce faire les paramètres de catégorisation suivants ont été identifiés: voiries de toutes sortes (rues, ruelles); terrains nus; toitures; habitations; végétation.

Le sondage statistique est basé sur la relation de l'inégalité de Bienaymé Tchebychev de la forme :

$$P(|X| \geq t) \leq \frac{E(X^2)}{t^2} \quad (1)$$

En se référant ainsi à cette inégalité, on peut, avec un échantillon de 1000 points, avoir une estimation à 5% près des coefficients des différentes catégories avec une probabilité de se tromper inférieure à 0,1.

En désignant par p la valeur du coefficient d'occupation du sol pour la catégorie i , alors la probabilité pour que le nombre de points x_i , correspondant à la caractéristique i et identifié entre les n points de l'échantillon, soit égal à k , est donnée par la relation binomiale suivante et ses variantes (Ruegg, 1989) :

$$prob(X_i = k) = C_n^k p_i (1 - p_i)^{n-k} \quad (2)$$

Désignons maintenant par, l'évaluation expérimentale du coefficient d'occupation du sol pour la caractéristique i , obtenu par l'identification des n points. On a de nouveau une variable aléatoire et nous pouvons écrire :

$$E(X_i) = \eta \times p_i \quad \text{et} \quad \text{var}(X_i) = \eta \times p_i (1 - p_i) \quad (3)$$

En procédant par plusieurs changements de variables, on obtient finalement

$$prob(|\hat{p}_i - p_i| < \varepsilon) \geq 1 - p_i \left(\frac{1 - p_i}{\eta \varepsilon^2} \right) \quad (4)$$

Cette relation permet de déterminer le nombre de points nécessaires à identifier pour obtenir une évaluation du coefficient d'occupation du sol d'une caractéristique i donnée, avec une précision fixée ε et un risque d'erreur inférieur à :

$$p_i \frac{(1 - p_i)}{\eta \varepsilon^2} \quad (5)$$

Ainsi, le nombre de points à identifier dépend de trois facteurs : (i)- la précision avec laquelle on veut déterminer la proportion d'une catégorie i ; (ii)- le risque d'erreur admis et (iii)- surtout la proportion de la catégorie choisie.

Lorsque l'on choisie d'identifier par exemple 1000 points, la précision obtenue lors de la détermination du coefficient d'occupation du sol d'une catégorie i donnée, le risque d'erreur étant fixé à 10%, est fonction de son pourcentage de représentation p_i .

Dans la pratique, en se référant aux remarques énoncées plus haut, il a été décidé de travailler en élaborant des grilles de points qui ont été superposées sur chaque document cartographique du quartier issu des images satellitaires QUICKBIRD. Sur les grilles, les points sont évidemment répartis de façon aléatoire. Les grilles, établies à l'aide d'une fonction de tirage aléatoire disponible sur tous les tableurs, ont été photocopiées sur des supports transparents et placées sur le document cartographique de référence.

2.3. Détermination de l'infiltration spécifique des quartiers précaires

L'infiltration au niveau des couches du sol, peut se définir comme une perméabilité verticale. Ce paramètre est souvent mesuré par la loi de Darcy d'expression :

$$\frac{Q}{S} = \frac{k}{\lambda} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta X} \quad (6)$$

Avec : Q le débit ; S la section de l'éprouvette qui pour une éprouvette cylindrique est ΔR^2 (R : rayon de l'éprouvette) ; k la perméabilité ; Δ la viscosité dynamique du fluide ;

$\frac{\Delta P}{\Delta X}$ le gradient de pression.

On peut donc définir la perméabilité k par la relation:

$$\kappa = \frac{Q}{S} \cdot \frac{\Delta X}{\Delta P} \lambda \quad (7)$$

La perméabilité est considérée comme significative de la surface utilisable pour l'écoulement, elle dépend de la géométrie du réseau poreux. La loi de Darcy, et donc la perméabilité verticale, est définie pour des conditions d'écoulement laminaire dans un milieu homogène, isotrope et continu ; le fluide n'interagissant pas avec le milieu. On définit la conductivité hydraulique K , ou coefficient de perméabilité, comme suit :

$$K = \frac{k}{\lambda} \quad (8)$$

avec λ la viscosité dynamique.

La conductivité hydraulique K , en revanche, est caractéristique des conditions d'écoulement dans un matériau donné et pour un fluide donné. Elle prend en compte, dans une certaine mesure, les interactions physiques entre le fluide et la roche. Ainsi, de cette étude la conductivité hydraulique K a été le paramètre considéré.

L'estimation de la conductivité hydraulique a été faite par la méthode d'infiltrabilité à double anneau pour les différentes raisons : (i)- d'abord, la méthode a le mérite d'être conduite in situ dans les conditions physiques naturelles ; (ii)- ensuite, le dispositif humain et matériel est peu coûteux et facile à réaliser ; (iii)- de plus, cette méthode a déjà été réalisée, avec beaucoup de succès, sur des sols non saturés par différents auteurs tels que Touma (1987), Boivin et Touma (1988).

La méthode est basée sur la détermination de la vitesse verticale d'un flux d'eau, à travers un sol, à partir de la loi de Darcy. Après la stabilisation de la vitesse, on mesure le volume d'eau V infiltré en fonction du temps t . Le débit Q étant connu, l'infiltration se faisant suivant la surface S égale à la section du cylindre et le gradient hydraulique étant égale à 1, le débit s'exprime, Hachicha *et al.* (1996), par la relation :

$$Q = \frac{V}{t} \quad (9)$$

En appliquant la loi de Darcy, on a :

$$K = \frac{V}{S \times t} \quad (10)$$

2.4. Intégration des données et analyse combinatoire

Une analyse combinatoire des données a été effectuée. Elle a associé aussi bien les informations du sondage statistique que celles de l'étude de la perméabilité des couches superficielles des quartiers. Les résultats du sondage statistique mettent en évidence la composante horizontale du risque d'inondation, tandis que ceux de l'étude de la perméabilité spécifique renseignent sur la composante verticale de ce risque d'inondation par débordement de réseau. Cette analyse intègre les proportions des coefficients d'occupation du sol (terrains nus et voiries) et la capacité des couches de sol à se laisser traverser verticalement par l'eau d'inondation.

3. RÉSULTATS

3.1. Transmissivité (perméabilité horizontale) des quartiers précaires

La transmissivité des quartiers précaires est appréciée à partir du comportement des éléments urbains drainant dans chaque quartier. Les proportions occupées par les paramètres urbains, évaluées dans chacun des quartiers précaires étudiés d'une part, et dans le quartier formel (COPRIM) témoin de référence d'autre part, sont consignées dans le tableau I.

Tableau I : Coefficients d'occupation du sol des paramètres urbains des quartiers précaires

Quartiers	Toitures (%)	Végétation (%)	Habitations (%)	Voiries (%)	Terrains nus (%)	Total (%)
Doukouré	38,6	1,3	39,4	18,4	2,3	100
Yaoséhi	34,1	2,7	34,9	26,9	1,5	100
Mami Fatai	30,5	4,3	31,7	25,5	7,9	100
Yamoussoukro	38,4	0,5	39,7	19,1	2,3	100
Gbinta	31,9	4,8	33,0	27,3	3,0	100
Niangon Continu	31,9	4,8	33,0	27,3	3,0	100
COPRIM (formel)	33,8	5,3	34,7	21,1	4,5	100

L'analyse la plus intéressante en ce qui concerne les coefficients d'occupation du sol par les éléments urbains est celle relative à la proportion de l'espace urbain occupé par les éléments drainant. La perméabilité horizontale des quartiers est d'autant plus grande que les proportions occupées par ces éléments drainant sont importantes. Ces éléments, qui regroupent toutes les catégories permettant le transit des écoulements à travers le tissu urbain, sont composés des voiries et des terrains nus. Pris ensemble, ces deux éléments constituent une proportion allant de 21 à 35% des surfaces totales des bassins. On remarquera également que la proportion (26,2%) occupée par ces deux éléments pris ensemble dans le quartier formel (témoin de référence) se situe dans cet intervalle (Tableau II)

Tableau II: Proportion de l'espace occupée par les éléments drainant dans les quartiers

Quartier	Coefficient d'occupation (%)	Quartier	Coefficient d'occupation (%)	
Doukouré	21	Yamoussoukro	31,4	COPRIM 26,2 %
Yaoséhi	28,4	Gbinta	30,3	
Mami Faitai	35,4	Niangon C	32,5	

A ce niveau d'investigation, les résultats révèlent une forte sensibilité à l'inondation dans les quartiers Mami Faitai, Niangon Continu, Yamoussoukro et Gbinta. Ces quartiers enregistrent une proportion d'espace occupée par les éléments drainant respectivement de 35,4% ; 32,5% ; 31,4% et 30,3%. La sensibilité à l'inondation par débordement de réseau est faible à Yaoséhi et à Doukouré où l'on rencontre respectivement les proportions d'occupation du sol par les éléments drainant de 28% et 21%.

3.2 Stockabilité (perméabilité verticale) des quartiers précaires

La perméabilité verticale des quartiers précaires est appréciée à travers la mesure de l'infiltration spécifique dans chacun des quartiers. Le tableau II renseigne sur les résultats obtenus.

Tableau III: Perméabilité hydraulique spécifique des différents quartiers étudiés

Quartiers	Doukouré	Yaoséhi	Mami Faitai	Yamoussoukro	Gbinta	Niangon Continu
$V_1 (l)$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3
$V_2 (l)$	3,5	2,4	2,2	1,6	0,7	1,7
$\Delta v (l)$	3,2	2,1	1,9	1,3	0,3	1,4
$S (m^2)$	$1,33.10^{-2}$					
Durée t (s)	1365	1267	1852	1876	2833	1792
$K = \frac{\Delta v}{S \times t} (m.s^{-2})$	$1,76. 10^{-4}$	$1,24.10^{-4}$	$7,71.10^{-5}$	$5,21. 10^{-5}$	$7,96. 10^{-6}$	$6,03. 10^{-5}$

Ce tableau indique que les valeurs de perméabilité évoluent de $7,96. 10^{-6}$ à $1,24. 10^{-4} m.s^{-2}$. La plus forte valeur de perméabilité est observée dans le quartier Yaoséhi ($1,24.10^{-4} m.s^{-2}$), tandis que la plus faible valeur est trouvée dans le quartier Gbinta ($7,96.10^{-6} m. m.s^{-2}$). En corrélant

ces résultats aux conclusions des travaux de Castany (1998), on se rend compte que les formations des couches superficielles des quartiers étudiés se trouvent dans la gamme des terrains sablo-argileux (10^{-5} à 10^{-9} m.s⁻²) et sableux (10^{-2} à 10^{-4} m.s⁻²). Ainsi, on rencontre des formations sableuses à Doukouré et Yaoséhi et des formations sablo-argileuses dans les autres quartiers. Ces dernières sont imperméables à cause de présence de la couche d'argile.

Une autre corrélation réalisée, avec des études anciennes effectuées par Vileaubreuil (1962) permet de décrire la lithologie des formations investiguées et de procéder à une classification (Tableau IV)

Tableau IV: Nature des formations des couches superficielles des quartiers précaires étudiés

Quartier	Perméabilité	Nature de la formation	Degré de perméabilité (infiltration de l'eau)
Doukouré	$1,76. 10^{-4}$	Sables grossiers	Bonne
Yaoséhi	$1,24.10^{-4}$	Sables grossiers	Bonne
Mami Faitai	$7,71.10^{-5}$	Sables argileux latéritiques	Moyen
Yamoussokro	$5,21. 10^{-5}$	Sables argileux latéritiques	Moyen
Gbinta	$7,96. 10^{-6}$	Argiles bariolés	Faible
Niangon Continu	$6,03. 10^{-5}$	Sables argileux latéritiques	Moyen

Selon cet auteur, la lithologie des formations du bassin sédimentaire côtier ivoirien renferme des couches allant des sables latéritiques aux sables grossiers : sables latéritiques (2.10^{-5} m.s⁻²), sables argileux (10^{-5} m.s⁻²), argiles bariolées (5.10^{-6} m.s⁻²), argiles sableuses (9.10^{-9} m.s⁻²), sables grossiers (5.10^{-4} m.s⁻²). Ainsi, de cette corrélation on obtient les différents types formations consignées dans le tableau IV.

L'analyse montre que les couches superficielles des quartiers Doukouré et Yaoséhi sont des sables grossiers. Cette structuration est favorable à une bonne infiltration de l'eau. Celles des quartiers Mami Faitai, Yamoussokro et Niangon Continu sont dominées par des sables plutôt latéritiques. Une telle disposition est favorable une infiltration moyenne de l'eau. Enfin, les argiles bariolées prédominent dans les formations des couches du quartier Gbinta. Ce qui confère à ce quartier une faible infiltration de l'eau. Toutes ces informations recueillies ont été vérifiées par les observations de terrain.

3.3 Vulnérabilité des quartiers précaires à l'inondation par débordement de réseau

La combinaison des informations issues de l'analyse de la transmissivité et de la stockabilité des quartiers précaires a permis d'évaluer la vulnérabilité intrinsèque de chaque quartier à l'inondation par débordement de réseau.

Le quartier Doukouré est moins vulnérable au risque d'inondations par débordement de réseau. En effet, ce quartier a le plus faible taux d'occupation du sol par les éléments drainants (21%). De plus, les couches superficielles rencontrées dans ce quartier sont des formations sableuses ayant une bonne infiltration verticale de l'eau (sables grossiers).

Avec près de 30% de sa surface favorable au transit horizontal de l'eau, le quartier Yaoséhi est caractérisée par une bonne perméabilité verticale de l'eau, à cause de la présence des sables grossiers. Yaoséhi se situe au même niveau de vulnérabilité que le quartier Doukouré, mais à un degré moindre, puisque seulement 16% des maisons de ce quartier sont construites

en terre; ce qui les rend moins vulnérables que les maisons en bois, comme c'est le cas à Doukouré.

Le quartier Mami Fatai a le plus fort taux d'occupation de sol par les éléments drainant (35,4%). Ce quartier repose sur des formations ayant une perméabilité moyenne (sables argileux latéritiques). Il apparaît de ce fait vulnérable en situation d'inondation. Cette réalité est d'autant vérifiée que plusieurs cas d'inondations ont été observés dans ce quartier ces au cours des visite de terrain, particulièrement pendant les mois de juin les plus pluvieux d'Abidjan.

Le deuxième quartier après celui de Doukouré à avoir une faible proportion en matière d'occupation du sol par les éléments susceptibles de laisser transiter les écoulements en situation d'inondation est Yamoussokro (21,4%). Il repose sur des formations ayant un degré d'infiltration moyen. De plus Yamoussokro est le quartier situé beaucoup plus en hauteur et aucune de ses maisons n'est construite à l'aide de matériaux de récupération. Yamoussokro apparaît ainsi comme le quartier le plus protégé par rapport au risque d'inondation.

La proportion occupée par les éléments drainant reste importante dans le quartier Gbinta; 30,3%. Situé en aval, le quartier Gbinta reçoit le cumul des apports des quatre autres quartiers (Doukouré, Yaoséhi, Mami Fatai, Yamoussokro) ainsi que ceux de certains quartiers lotis formels situés sur le même grand bassin. Ce qui augmente ainsi sa vulnérabilité à l'inondation par débordement de réseau. C'est le deuxième quartier où des cas d'inondation on été observés.

Le quartier Niangon Continu vient après celui de Mami Fatai avec une proportion importante de la surface de son bassin réservée aux éléments drainant (32,5%). Reposant sur des formations ayant une faible infiltration (argiles bariolées), Niangon Continu a une situation sans doute plus vulnérable à l'inondation. En effet, en plus de cette situation qui le conforte dans cette position, le quartier est situé, du point de vue topographique, le moins en hauteur. Il se trouve en aval et donc presque à l'exutoire du grand bassin contenant tous les autres quartiers. Dans ces conditions, il reçoit tous les apports d'eau venant de ces quartiers et d'une grande partie des quartiers lotis de la commune appartenant à ce grand bassin. Niangon Continu constitue le troisième quartier où nous avons observés des inondations sévères les mois de juin couvrant la période d'observation.

4. DISCUSSION

Dans ce travail, les cartes des quartiers précaires tirées des images QUICKBIRD pour servir au sondage statistique, ont été confectionnées à l'échelle 1/1200^{ème}. Une telle grande échelle donne des résultats intéressants, surtout pour les zones à urbanisation complexe et incontrôlée comme les quartiers précaires dans les villes des pays du sud. Cependant, ce résultat est en désaccord avec les conclusions de certains auteurs : (Bouvier, 1990; Moyenga *et al.*, 1996 ; Desbordes, 1997 ; Hingray, 1999). En effet, Ces auteurs déconseillent l'utilisation de l'image satellitaire pour l'opération du sondage statistique. Les raisons avancées sont que l'identification des éléments urbains ne sera pas satisfaisante et donc le sondage ne pourra pas donner des résultats pertinents. La forte résolution spatiale (0,6 m au sol) et la finesse spectrale ainsi que la bonne qualité radiométrique des Images QUICKBIRD a permis d'écarter cette inquiétude dans la présente étude. En outre, le couplage de cette approche à une enquête transversale, appuyée de visites de terrain, a conforté la fiabilité de la méthode et des résultats obtenus.

Hormis, les quartiers Doukouré et Yamoussokro, l'occupation du sol, par les voiries dans les autres quartiers précaires, est en moyenne de l'ordre de 23%, très proche de celle du quartier

loti (22%). Ces résultats concordent bien avec ceux des bassins anciens étudiés à Niamey, Bamako, Dakar et Abidjan, pour ce qui concerne l'occupation des voiries dans les quartiers précaires (Bouvier et Thébé, 1988, Bouvier 1990). De même, ces coefficients sont semblables à ceux déterminés récemment par les travaux de Hingray (1999), sur des bassins étudiés au Burkina Faso. En revanche, le coefficient d'occupation de la surface du bassin par la voirie, obtenu dans le quartier formel (22%) est inférieur à ceux déterminés par ces différents travaux évoqués plus haut. La nature et la dynamique de l'évolution du quartier loti *COPRIM* peuvent expliquer en partie cette différence constatée. En effet, ce quartier a été soumis à des fortes opérations de modifications de maisons par de nombreux occupants dans le sens d'agrandissement des espaces occupés.

Au niveau des toitures, et des habitations, il n'y a pas de différences sensibles. Les éléments urbains sont étroitement liés et occupent les proportions les plus importantes des surfaces totales de chacun des bassins étudiés. Cela montre que dans ces quartiers précaires, c'est la construction du bâti qui a été privilégiée au détriment de l'aménagement de l'espace urbain. Les visites de terrain ont par ailleurs, permis de constater que les habitats dans ces quartiers sont faits de matériaux de récupération confirmant ainsi les études faites par l'UNICEF (2001) sur ces milieux.

5. CONCLUSION

L'existence d'hétérogénéité à de nombreuses échelles caractérisant les sols urbains fait que l'infiltration et la circulation des eaux peuvent y être profondément perturbées (Emeriault *et al.*, 2004). Ce phénomène influe sur le risque d'inondation en ce sens qu'il gouverne la capacité des couches superficielles sur lesquelles reposent les différents milieux urbains à favoriser les écoulements et la stagnation de l'eau.

L'étude du sondage statistique a permis de déterminer pour chaque tissu urbain des quartiers précaires, les proportions occupées par les différents éléments urbains mesurables et identifiables sur l'image QUICKBIRD à haute résolution spatiale. Elle a permis de mettre en évidence l'espace horizontal utilisable par les écoulements et de classer les quartiers selon leur degré de sensibilité à l'inondation par débordement de réseau.

L'analyse de la perméabilité hydraulique spécifique des différents quartiers investigués, à l'aide de la loi de Darcy a permis de mettre en évidence des formations essentiellement sableuses ($10^{-2} \leq k \leq 10^{-4} \text{ m.s}^{-2}$) et sablo-argileuses ($10^{-5} \leq k \leq 10^{-9} \text{ m.s}^{-2}$). Elle a permis de classer les quartiers selon un gradient de perméabilité permettant de juger de leur capacité à stocker l'eau et d'être susceptible ainsi de favoriser l'inondation.

Une analyse combinatoire et des informations recueillies a abouti à une classification supervisée de la vulnérabilité à l'inondation par débordement de réseau dans quartiers précaires. D'un côté, une faible vulnérabilité est observée dans les quartiers Doukouré, Yaoséhi et Yamoussoukro et de l'autre, une forte vulnérabilité observée au niveau des quartiers Niangon Continu, Gbinta et Mami Faitai. Le quartier Niangon Continu se présente le plus vulnérable de tous. Ces résultats contribueront à orienter les prises de mesures de prévention adaptées, en situation de crises d'inondation, dans ces 6 quartiers précaires de la commune de Yopougon à Abidjan.

6. REMERCIEMENTS

Les remerciements s'adressent au Fonds National Suisse de la recherche Scientifiques (FNS) et à la Direction pour Développement et la Coopération suisse (DDC) pour avoir financé conjointement cette recherche prioritaire dans les milieux défavorisés, à travers le Programme international de recherche en Partenariat (NCCR - North South).

7. BIBLIOGRAPHIE

- BOUVIER C. (1990) Assainissement pluvial urbain en Afrique de l'Ouest. Modélisation du Ruissellement. Thèse, Université Montpellier II, LHM, ORSTOM, Laboratoire d'hydrologie, 310p
- BOIVIN P., ET TOUMA J. (1988) Mesure de l'infiltrabilité d'un sol par la méthode du double anneau, 2, résultats numériques, Cah. ORSTOM, sér.Pédol., vol XXIV, n°1, pp 27-37.
- BOUVIER C., THEBE, B. (1988) Urbanisation et occupation du sol en Afrique de l'Ouest. CIEH, Ouagadougou, 54 p+ graphes
- CASTANY G., (1998) Hydrogéologie : principes et méthodes. Paris : Dunod. 236 p.
- DE MARSILY, G., (1997) Commentaires inspirés de la lecture de la tribune libre de J. Ganoulis : Sur la modélisation des phénomènes hydrologiques. Rév. Sci. Eau, 1, pp.19-21
- DESBORDES, M. (1997) La Gestion Urbaine du Risque d'Inondation. La Houille Blanche, N°7 pp. 20-24
- Dongo K., Diomandé M., Cissé G., Tanner M. Biémi J. (2007) Improving urban drainage in Abidjan, Côte d'Ivoire *African journal of Science and Technology (AJST)*, vol. 8, No. 1, pp. 8-16
- EMERIAULT F., BREYSSE D., KASTNER R., DENIS A (2004). Geotechnical survey and mechanical parameters in urban soils: modelling soil variability and inferring representative values using the extension of Lyon subway line D as a case study. *Rev. can. geotech.* 41(5): 773-786
- HINGRAY B., (1999) Comportement et modélisation Hydraulique des zones bâties en situation d'inondation: le cas des zones cloisonnées d'habitat individuel de Ouagadougou, Thèse, ORSTOM-Université de Montpellier II, 316p

HACHICHA M., BOUKSILA F., ZAYANI K. ET MHIRI A. (1996) Étude comparative de la perméabilité mesurée par les méthodes de Reynolds, Porchet et Müntz dans le cas de sols argileux affectés par la salinité. Revue Sécheresse n°3, vol 7, pp 209-215.

MOYENGA H., BELEM, A. (1996) Description géographique et topographique d'un quartier fréquemment inondé à Ouagadougou : Rapport de fin d'étude - ETSCHER/ORSTOM vol : 1+2, 2*25p

PICHERAL, I., DEUTSCH, J.C., HUBERT, G., TORTEROTOT, JP., (1997) – Evaluation des dommages dues aux inondations pluviales urbaines, Projet Euroflood 2 CERGRENE, Paris, 67p

PAQUIER, A., TANGUY, J.M., HAIDER, S. & ZHANG B., (2003) Estimation of the flood levels for a flash flood in urban area: comparison of two hydrodynamic models on the 1988's Nîmes flood. Journal of water sciences, 16 (1): pp 79 – 102.

RENOUF E., PAQUIER A., MIGNOT E. (2005) Assessment of the exchanges between sewage network and surface water during flooding of town of Oulis. , Proc. 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen, Denmark 10icud_120_587.

RUEGG. A., (1989) – Probabilités et statistique - Méthodes mathématiques pour l'ingénieur. Troisième édition, Presses romandes, 153p

TOUMA, J., (1987) Test: Modèle pour tester la représentativité des caractéristiques hydrodynamiques d'un sol non saturé déterminées in situ. Document Orstom Dakar 25p.

TOUMA J. (1984) Étude critique de la caractérisation hydrodynamique des sols non saturé : rôle de l'air, influence de l'écoulement multidimensionnel de l'eau. Thèse de Doctorat ès Sciences Physiques, Université de Grenoble, 224 p.

VILLEAUBREUIL G. (1962) Hydrologie en Côte d'Ivoire. Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières; Éditions techniques, série 20, 43p