

Hydrodynamique souterraine et vulnérabilité à la pollution des ressources en eau en zone urbaine tropicale : cas du bassin versant de Mingoa (Yaoundé-Cameroun)

KOUAM KENMOGNE Guy Romain^{a*}, NTEP François^b, ROSILLON Francis^a, MPAKAM Hernanie Grelle^b, NONO Alexandre^c et DJEUDA TCHAPNGA Henri Bosko^b.

^a Laboratoire Eau et Environnement ; Département des Sciences et Gestion de l'Environnement ; Université de Liège ; BP Avenue de Longw, 149 6700 Arlon (Belgique) ;

^b Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et d'Altéologie ; Département des Sciences de la Terre ; Université de Yaoundé I ; BP 812 Yaoundé (Cameroun) ;

^c Laboratoire de Géologie de l'Environnement ; Département des Sciences de la Terre ; Université de Dschang ; BP 67 Dschang (Cameroun).

Résumé

Une étude conjointe visant la compréhension des phénomènes d'hydrodynamique souterraine et de vulnérabilité des eaux à la pollution a été menée dans le bassin versant de Mingoa situé dans le périmètre urbain de Yaoundé. Il ressort de cette étude que le comportement hydrodynamique dans ce bassin est étroitement lié aux fluctuations pluviométriques. La carte hydrodynamique de l'aquifère supérieur du bassin versant de Mingoa révèle deux types d'écoulements convergents et divergents avec les grands axes de drainage d'orientation globale NE - SW ; SE - NW et N - S permettant de délimiter des sites favorables à l'implantation d'ouvrages de captage des eaux souterraines. Les sources potentielles de pollution répertoriées sont nombreuses et variées (latrines, tas d'ordures sauvages,...). Les résultats des analyses physico-chimiques ont permis de constater que hormis la température, le potentiel d'hydrogène (pH), CO₂ libre et l'azote ammoniacal, les valeurs des autres paramètres sont bien centrées sur les normes de qualité des eaux destinées à la consommation humaine prescrite par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Cependant, les valeurs des teneurs en Streptocoques Fécaux (de 48 UFC/100 ml à 5,80 x 10⁵ UFC/100 ml) et en Coliformes Fécaux (de 300 UFC/100 ml à 1,07 x 10⁶ UFC/100 ml) sont largement supérieures aux valeurs seuils requises par l'OMS et permettent de conclure que ces eaux sont polluées et vivement déconseillées à la consommation humaine.

Sur la base des données ponctuelles issues des simulations et des différentes analyses des eaux et des sols, la dynamique de contamination des nappes d'eau superficielles et souterraines dans les zones cristallines fracturées et densément peuplées a été posée. Deux zones de protection ayant respectivement des rayons de 10 mètres et de 20 mètres peuvent être envisagées afin de permettre au sol de jouer pleinement son rôle épurateur. Des mesures adéquates (campagnes d'information, établissement des zones de protection, ...) doivent être engagées dans ce bassin versant et au-delà dans toute la ville de Yaoundé afin de faire face à la dégradation assez avancée des ressources en eau et ceci malgré des contraintes socio-économiques et foncières qui constituent des freins à cette dynamique.

Mots clés : hydrodynamique souterraine, pollution, ressources en eau, vulnérabilité, Yaoundé

Introduction

L'eau souterraine constitue pour de nombreux ménages des zones urbaines des pays de l'Afrique subsaharienne l'une des principales sources d'alimentation en eau. L'exploitation de cette ressource se fait généralement à travers des ouvrages alternatifs d'approvisionnement en eau que sont les puits, sources et forages. Malheureusement, dans le cadre spécifique de la ville de Yaoundé (Cameroun),

* Correspondance : grkouam@yahoo.fr

l'implantation de ces ouvrages se fait dans un environnement marqué par la prédominance de l'assainissement individuel. A ce propos, de nombreuses latrines à canon et des latrines à fond perdu côtoient les puits, sources et forages dans un espace assez réduit. Par ailleurs, les déchets ménagers généralement déversés dans des espaces libres ou dans les lits des cours d'eau, se décomposent et finissent par atteindre la nappe par infiltration. Ces différentes pressions qui découlent de l'inefficacité et de l'inefficacité du service d'assainissement et de collecte des ordures posent le problème récurrent de la qualité de cette ressource. A cela s'ajoute, la minéralisation de l'eau au contact de la roche qui, bien que moins nocif, constitue un préalable à la définition de l'usage qui sera destiné à cette eau.

A l'aspect qualité est associé le volet quantité qui fait appel aux modes de recharge de la nappe. En effet, le potentiel de réserve en eau souterraine est amené à être de plus en plus sollicité dans les prochaines années compte tenu de l'accroissement de la demande en eau suite à la croissance démographique exponentielle et à l'extension limitée du réseau de distribution d'eau potable par le concessionnaire (CAMWATER).

La présente étude réalisée dans le bassin versant de Mingoa à Yaoundé a pour but de contribuer à la connaissance des modes de recharge de la nappe d'une part et de déterminer la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux d'autre part. A terme, il est question de proposer des solutions pour un accès durable à une eau souterraine de bonne qualité par les populations du bassin versant de Mingoa en particulier et de Yaoundé en général, grâce à une protection accrue de la ressource. La problématique centrale de ce travail est fondée sur la trilogie de la disponibilité, l'accessibilité et la qualité de la ressource en eau souterraine.

Cadre naturel du bassin versant de Mingoa

Situé au Centre-Ouest de la ville de Yaoundé, plus précisément dans la commune urbaine d'arrondissement de Yaoundé VI, le bassin versant de Mingoa est localisé entre 3°51' et 3°53' de latitude Nord et entre 11°28' et 11°31' de longitude Est. Le bassin versant de Mingoa qui couvre une superficie d'environ 214 ha présente à l'image de la ville de Yaoundé une topographie en trois paliers constitués : d'un fond marécageux où coule le cours d'eau Mingoa ; des versants contrastés présentant des pentes à l'allure diversifiée et des sommets typiquement arrondis. Les sols ferrallitiques rouges, les sols ferrallitiques jaunes et les sols hydromorphes constituent les principaux types de sols présents dans ce bassin. (Segalen, 1994). Le bassin versant de Mingoa est drainé par le cours principal de la Mingoa qui prend sa source au quartier Melen IV à 750 m d'altitude. Le climat est équatorial de type guinéen à 4 saisons bien marquées. Les précipitations pour la période allant de 1984 à 2004 est de 1512 mm (Ntep, 2005). La valeur moyenne mensuelle interannuelle de températures pour cette période est de 24,3°C. Sur le plan géologique, le bassin versant de Mingoa appartient au domaine Sud de la chaîne Panafricaine Nord-équatoriale au Cameroun marqué par une évolution polyphasée et monocyclique avec deux phases de déformation. Le couvert végétal dégradé par l'action anthropique est constitué des formations herbacées à cypéracées (graminées), des plants d'eucalyptus et des arbres fruitiers. Le bassin versant de Mingoa est caractérisé par une croissance démographique forte marquée par une baisse du taux de mortalité, une natalité importante et un nombre élevé de nouveaux arrivants dû à l'exode rural.

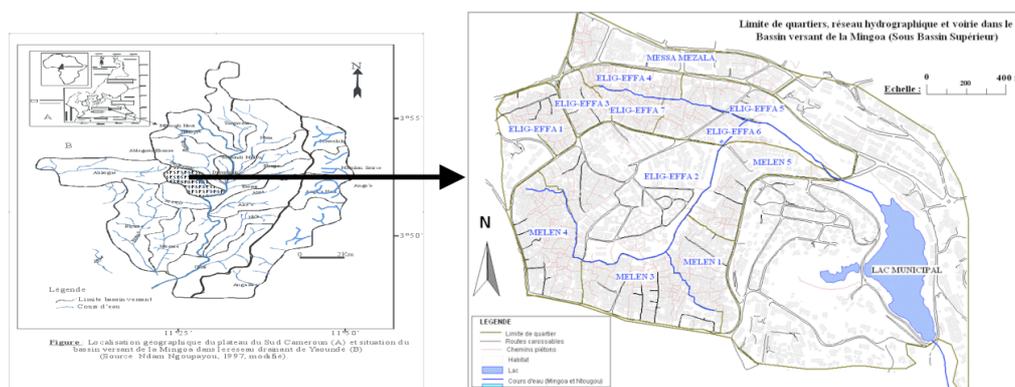


Figure 1 : Localisation géographique du bassin versant de Mingoa à Yaoundé au Cameroun

Matériels et méthodes

Approche méthodologique sur l'étude hydrodynamique

De novembre 2003 à octobre 2004, l'évaluation du comportement hydrodynamique dans le bassin versant de Mingoa a été effectuée à travers le suivi de 30 puits et 07 sources. Des mesures bimensuelles portant sur des débits ont été effectuées aux sorties des 07 sources sélectionnées grâce au jaugeage volumétrique. La mesure est réalisée au point de sortie des eaux du siphon grâce à la méthode de la capacité jaugée. La mesure du niveau piézométrique dans les ouvrages (30 puits) s'est effectuée à l'aide d'un double décimètre lesté d'un suspenseur dont le rôle est de maintenir le ruban tendu lorsqu'on le plonge dans le puits. Dans le cadre de ce travail, les mesures ont été prises tous les 15 et 30 du mois entre 7 et 12 heures de la journée. La localisation géographique des ouvrages suivis a été réalisée à l'aide d'un GPS (Global Positioning System) de marque SP12XMLR permettant la détermination des coordonnées latitudinales (X), longitudinales (Y) et altitudinales (Z).

L'analyse des fluctuations de la surface piézométrique est basée sur l'interprétation des graphiques des profondeurs de l'eau dans le sol. La période définie est l'année hydrologique, tandis que l'amplitude détermine la hauteur de fluctuation annuelle correspondante. La configuration de la carte hydrodynamique du bassin versant de Mingoa a été réalisée grâce aux courbes hydrohypes tracées à l'aide de la méthode de l'interpolation par des programmes informatiques notamment les logiciels SURFER et MAP-INFO.

Approche méthodologique sur la vulnérabilité des nappes d'eau

Des fiches ont été confectionnées pour la réalisation des enquêtes auprès des ménages dans le but de caractériser les puits et les latrines. Les fiches d'enquête destinées à la caractérisation des latrines étaient réalisées dans le but d'obtenir des informations sur le type de latrines et le mode d'utilisation. Le double décimètre a été utilisé pour positionner les latrines par rapport au point d'eau environnant.

L'enquête portant sur les points d'eau (sources et puits) avait pour objectif de décrire (aménagement, localisation, ...) les différents ouvrages alternatifs situés dans le bassin versant de Mingoa et d'identifier les sources de pollution situées dans les environs immédiats.

Des descentes sur le terrain ont permis par ailleurs d'identifier, de décrire et de localiser sur une carte topographique les activités génératrices de pollution. Par la suite, des prélèvements des échantillons d'eau ont été effectués sur 03 sources, 06 puits et au niveau du cours d'eau Mingoa. Les mesures *in situ* ont porté sur quelques paramètres physico-chimiques notamment le potentiel d'hydrogène (pH), la température (T°) et la conductivité (CND). Les mesures de ces paramètres (pH, T° , CND) ont été réalisées à l'aide du conductimètre TDS/conductimeter de marque HACH. Le dosage des alcalins (Na^+ et K^+) a été réalisé par la spectrométrie d'émission atomique et la teneur en azote ammoniacal (NH_4^+) par la méthode de Nessler au Laboratoire d'analyses du Ministère de l'Energie et de l'Eau (MINEE) à Yaoundé (Cameroun). Le dosage des ions chlorures (Cl^-), sulfates (SO_4^{2-}), nitrates (NO_3^-), bicarbonates (HCO_3^-) et les alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) a été effectué au Laboratoire de Phytoépuration de l'Université de Yaoundé I suivant les protocoles expérimentaux décrits par HACH (1992). Le comptage des streptocoques fécaux (SF) et coliformes fécaux (CF) a été réalisé dans le même laboratoire suivant la méthode de filtration sur membrane.

Détermination des périmètres de protection

La détermination des périmètres de protection s'est appuyée sur la méthode empirique de Rehse complétée par celle de Bölsenkötter, décrites par Lallemand-Barrès et Roux (1999).

Résultats

Résultats des enquêtes effectuées auprès des ménages portant sur les puits

A l'issue de l'enquête réalisée auprès des ménages et portant sur les points d'eau, 128 puits et 20 sources ont été recensés dans le bassin versant de Mingoa. La profondeur des puits est très variable mais dans l'ensemble du bassin versant de Mingoa, elle ne dépasse jamais 12 mètres. Suivant la situation topographique, l'on constate que 45 % des sources sont localisées en bas des pentes, 35 % sur les flancs des collines et 20 % dans la zone marécageuse. Le rapport altitude/profondeur des puits permet d'établir que la profondeur des puits augmente avec l'altitude.

Les quantités d'eau débitées par les sources varient de 0,06 l/s à 0,85 l/s.

Résultats des analyses physico-chimiques et bactériologiques

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux sont consignés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Résultats des analyses physico-chimiques des eaux prélevées dans les puits et sources du bassin versant de Mingoa

Code échantillon	Type d'ouvrages	ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES												
		T(°C)	CND (µS/cm)	pH	NH ₄ ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	CO ₂ (mg/l)
KP ₁	Puits	27,5	211	5,92	1,20	3	7	0,79	0,07	39,05	Tr	1	47,75	0,11
KM ₂	Cours d'eau	27,6	403	6,56	4,65	5	9	0,52	0,04	51,83	0,2	8	19,63	0,30
KS ₃	Source	27,4	248	5,9	3,40	6	9	0,48	0,03	111,47	Tr	1	64,5	0,11
KS ₄	Source	27,8	413	5,68	2,60	3	7	0,45	0,01	58,93	0,5	1	34,72	0,13
KP ₅	Puits	27,8	1048	6,51	1,25	4	7	0,46	0,02	132,06	0,2	8	73,1	0,31
KS ₆	Source	27,9	235	5,3	0,67	5	10	0,42	0,01	34,08	0,2	0	46,23	0,38
KP ₇	Puits	27,9	399	5,7	0,93	2	2	0,67	0,05	120,7	0,2	1	60,52	0,24
KP ₈	Puits	27,9	730	5,99	1,10	7	2	0,53	0,04	137,21	0,1	16	29,72	0,15
KP ₉	Puits	28	80,7	5,72	0,86	2	5	0,44	0,02	17,04	0,1	0	51,81	0,73
KP ₁₀	Puits	28	88,2	5,67	0,80	3	4	0,74	0,06	22,72	0,1	0	50,2	0,11
Normes OMS		25 max	20 – 1250	6,5 – 8,5	0,5	12	150 max	50 max	100 max	200 max	50	400 max	–	-

Les résultats des analyses bactériologiques des eaux sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Résultats des analyses bactériologiques des eaux prélevées dans les puits et sources du bassin versant de Mingoa

Code échantillon	Type d'ouvrage	Analyses Bactériologiques	
		SF (UFC/100ml)	CF (UFC/100ml)
KP ₁	Puits	81	900
KM ₂	Cours d'eau	5,80x10 ⁵	1,07x10 ⁵
KS ₃	Source	200	1400
KS ₄	Source	180	2000
KP ₅	Puits	48	700
KS ₆	Source	54	300
KP ₇	Puits	54	600
KP ₈	Puits	180	1600
KP ₉	Puits	92	1200
KP ₁₀	Puits	160	1900
Normes OMS		0	0

Sources de pollution identifiées

Les sources de pollution identifiées dans le bassin versant de Mingoa sont : station d'épuration des eaux usées non fonctionnelle du Camp Sic Messa, latrines à canon et les latrines à fond perdu, déchets des hôpitaux et laboratoires d'analyses médicales, tas d'ordures sauvages, porcheries et poulaillers, pesticides, déchets ménagers et industriels.

Interprétations des résultats

Sur la base des données piézométriques, la carte piézométrique du bassin de la Mingoa a été réalisée (fig 2).

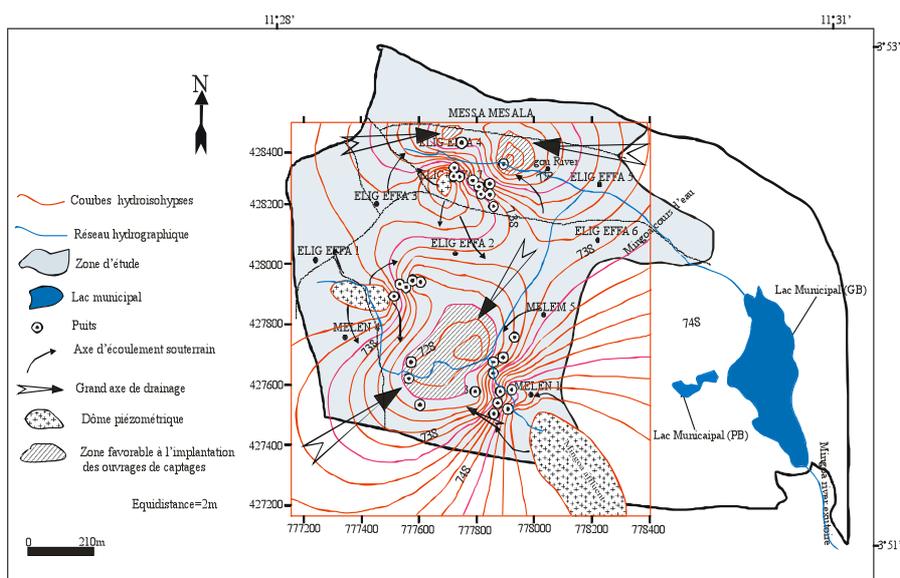


Figure 2 : carte piézométrique du bassin versant de Mingoa (Ntep, 2005)

Deux zones bien distinctes ont été délimitées à la lumière de la configuration des courbes hydroisoïhypes de la carte piézométrique :

- les zones où les courbes forment des lignes fermées en cercles concentriques marquées par des axes d'écoulement centripètes. Tout autour de ces cercles, les valeurs des niveaux piézométriques sont décroissantes du centre vers l'extérieur. (cas des quartiers Melen 4 et Elig-Effa 7) ;
- les zones où les courbes forment des cercles concentriques caractérisés par des axes d'écoulement centrifuges. Tout autour de ces points, les niveaux piézométriques ont des valeurs croissantes du centre vers l'extérieur (la limite des quartiers Melen 3 et Elig - Effa 2, la limite des quartiers Elig -Effa 4 et Messa- Mezala);

Les écoulements souterrains dans le bassin versant de Mingoa sont de deux types (convergentes et divergentes) et se font préférentiellement dans les directions NE-SW ; SE-NW et N-S. Les sites des quartiers Melen 4 et Elig-Effa 7 constituent les aires d'alimentation de la nappe tandis que ceux des quartiers Melen 3 et Messa-Mezala pourraient se prêter facilement aux implantations des ouvrages de captage sous réserve des propriétés de la nappe.

Les débits de toutes les sources ainsi que les écoulements superficiels du bassin versant de Mingoa varient en fonction de la pluviométrie. Ce résultat laisse entrevoir qu'il n'existe pas dans le bassin versant de Mingoa, une nappe souterraine étendue dans laquelle les eaux précipitées sont stockées pendant un temps relativement long pour l'alimentation des sources. Ce sont les eaux de pluies qui alimentent directement les vides du sol qui se retrouvent dans le réseau hydrographique après un temps de transit relativement court. Ces résultats rejoignent ceux obtenus par Medza Ekodo (2002) dans le bassin de l'Anga'a Sud-Est à Yaoundé. La faible intensité des débits d'écoulement au niveau des sources est liée à l'anthropisation de ce bassin qui diminue les phénomènes d'infiltration corollaire des écoulements hypodermiques dont dépendent les sources.

Les eaux analysées sont bicarbonatées sodiques (20% des échantillons prélevés) et chlorurées sodiques potassiques (80% des échantillons prélevés). Les cations de calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+) et potassium (K^+) contenus dans les eaux du bassin versant de Mingoa sont issus des gneiss présents dans la zone d'étude. Ces résultats sont conformes à ceux de Castany (1982) qui affirme que l'eau souterraine au cours de son séjour et de son écoulement dans les formations hydrogéologiques perméables subit des échanges géochimiques avec son réservoir permettant de modifier les caractéristiques de l'eau. Les phénomènes d'adsorption et de fixation ont pour support les permutolites, constituées d'argiles et d'hydroxyde ferrique issus de l'altération des gneiss. Les ions Cl^- proviendraient essentiellement de trois sources sans que l'on puisse dire avec précision, la part de chacune d'elle : une origine atmosphérique liée aux précipitations ; une origine

présence d'écran argileux qu'il traverse à la vitesse de déplacement maximal de 0,10 m/h. Ainsi, au-delà de la mise en place des périmètres de protection, il est nécessaire de déterminer les voies et méthodes visant à réduire la propagation des polluants dans le bassin versant de Mingoa. Les actions portent essentiellement sur : collecte efficace des ordures ménagères, destruction des latrines à canon établies sur le cours d'eau, réhabilitation de la station d'épuration des eaux usées, sensibilisation des populations sur les dangers liés à la pollution des eaux, ...

Conclusion

Dans le bassin versant de Mingoa, il n'existe pas à proprement parlé une nappe souterraine étendue dans laquelle les eaux précipitées sont stockées pendant un temps relativement long pour l'alimentation des sources. Ce sont les eaux de pluie qui alimentent directement les vides du sol liant ainsi les apports pluviométriques aux fluctuations de la nappe. Des écoulements convergents et divergents sont observés au sein de la nappe permettant de délimiter des zones favorables ou défavorables pour l'implantation des ouvrages d'approvisionnement en eau. Au demeurant, il est important de respecter des périmètres de protection qui permettront au sol de jouer pleinement son rôle épurateur. Par ailleurs, d'autres mesures doivent être prises afin de permettre aux populations du bassin versant de Mingoa d'avoir accès à une eau souterraine de bonne qualité. Toute une synergie faisant appel aux décideurs politiques, Organisations Non Gouvernementales, chercheurs et populations doit être mise en œuvre à cet effet.

Références bibliographiques

- BANTON O. et BANGROY L.M. (1997). Hydrogéologie : multiscience environnementale des eaux souterraines. *Presse de l'Univ. du Quebec (Canada)/Aupelf*, 460 p.
- CASTANY G. (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie : *Dunod Paris*. 236 p.
- DJEUDA TCHAPNGA H.B. ; TANAWA E. ; SIAKEU J. et NGNIKAM E. (1998). Contraintes sociales liées à la mise en place des périmètres de protection des ressources en eau dans les zones périurbaines et les petits centres des pays en développement. *Communication présentée au 11ème Symposium International en gestion et technologies appropriées pour l'eau aux petits ensembles habités. Barcelone (Espagne). Du 13 au 15 octobre 1998*. 11 p.
- HACH (1992). Handbook of water analysis. *2nd edition, Colorado*. 231p.
- KOUAM KENMOGNE G.R. (2004). Contribution à l'étude de la vulnérabilité des nappes superficielles en zone urbaine tropicale : cas du bassin versant de la Mingoa-Yaoundé. *Mém. DEA. Univ Ydé 1, 115 p + annexes*.
- LALLEMAND-BARRÈS A. et ROUX J. C. (1999). Périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. *Manuel et méthodes n° 33, Ed. BRGM, 334p*.
- MEDZA EKODO J.M. (2002). Piézométrie, hydrodynamique et battements des nappes souterraines en zone de socle cristallin : cas du bassin versant de l'Anga'a sud-est Yaoundé. *Mém. DEA. Univ. Ydé 1, 86 p*.
- NTEP F. (2005). Hydrodynamique et qualité des eaux des nappes en zone de socle cristallin fissuré et altéré : cas du bassin versant de la Mingoa (Yaoundé-Cameroun). *Mém. DEA. Univ Ydé 1, 84 p + annexes*.
- RECORDON E. (1986). Ecoulements souterrains. Dpt. de Génie Civil. Labo. de Méca. des sols. *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, 142 p.
- SAVADOGO A. N. (1984). Géologie et hydrologie du socle cristallin de Haute-Volta : Etude régionale du bassin versant de la Sissili. *Thèse Doct. d'Etat, Univ. Grenoble*, 351 p.
- SEGALEN, P. (1994). Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique. *ORSTOM, Paris (éds.)*, 3 tomes.
- WARREN VIESSMANN J.R., MARRK J. et HAMMER (1983). Water supply and pollution control ; 5^{ème} édition, *Harper Collins College Publishers*, pp. 80 – 121.