

Synthèse bibliographique : Qualité des eaux souterraines à Cotonou sous l'impact de l'urbanisation

Cette section fait la synthèse des types de polluants anthropiques identifiés dans les villes urbaines de l'Afrique de l'Ouest et à Cotonou (Bénin). Sur la base de la bibliographie, l'évolution de la qualité des eaux, les différentes sources de pollutions des eaux souterraines et de surface, et les maladies hydriques, dans les villes de l'Afrique de l'Ouest et plus précisément à Cotonou ont été présentées.

I.1.1. Aperçu de l'urbanisation en Afrique de l'Ouest

Les grandes villes africaines connaissent une rapide croissance de leur démographie, entraînant un développement anarchique de l'espace urbain (Fayiga et al. 2018). La majeure partie de la population urbaine est concentrée dans la plus grande ville (« primauté urbaine ») dans les pays d'Afrique (WWAP 2017). 40 % de la population africaine est urbaine contre 8%, il y a un siècle (ONU Habitat 2014).

L'Afrique de l'Ouest n'échappe guère à cette « révolution urbaine » qui est en cours sur le continent. En 1960, il n'y avait encore aucune agglomération urbaine de plus d'un million d'habitants en Afrique de l'Ouest. L'urbanisation n'a progressé que lentement jusqu'en 1990. C'est à cette époque que le taux d'urbanisation de l'Afrique de l'Ouest a dépassé la moyenne du continent et s'est mis à augmenter.

La population urbaine est passée à 92 millions en l'an 2000 et a été estimée à 137 millions en 2010 (près de 50% d'augmentation ; ONU Habitat 2010). Selon les projections pour l'Afrique de l'Ouest, la population urbaine pourrait atteindre 196 millions en 2020 (ONU Habitat 2014). Entre 2020 et 2030, on pourrait atteindre une augmentation annuelle moyenne de plus de 6 %. Les pays de la sous-région Ouest-Africaine sont donc confrontés à l'accélération des taux d'expansion des villes urbaines.

La Figure 1, présente l'évolution estimée des agglomérations urbaines entre 1990 et 2030 en Afrique. Les populations africaines résidant dans les villes de petites et moyennes tailles ont enregistré une nette augmentation de 1990 à 2030 (WWAP 2017 ; Fig. 1a). De même, d'après les projections des Nations Unis (<https://population.un.org/wup>) en Afrique, entre 2018 et 2030, la croissance de la population sera forte pour les villes de petites et moyennes taille (pop.< 5 millions, Fig.1b).

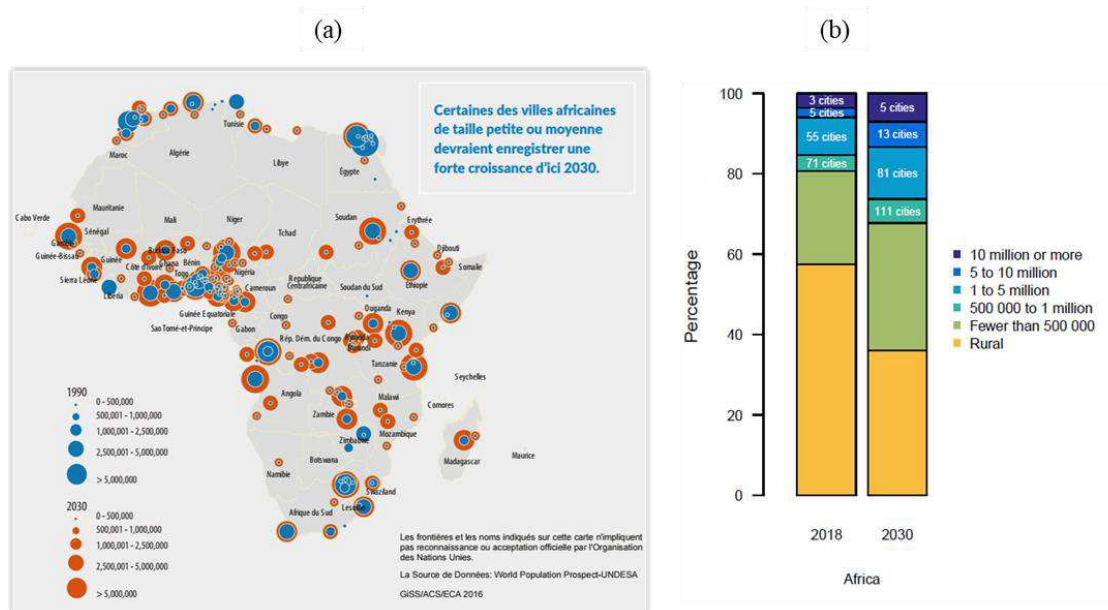


Figure 1: (a) Agglomérations urbaines en Afrique 1990 et 2030, (WWAP 2017) ; (b) Répartition de la population par taille en Afrique de 2018 à 2030 (<https://population.un.org/wup>)

1.1.2. Typologie de la pollution des eaux en Afrique de l'Ouest

Les eaux souterraines demeurent la plus grande et la plus importante source d'approvisionnement en eau potable en Afrique (MacDonald et al. 2012 ; Ketchemen-Tandia et al. 2017). Les sources possibles de pollution des eaux en milieu urbain en Afrique et dans le monde sont présentées dans le Tableau 1 et résumées dans la Figure 2a.

Tableau 1: Sources possibles de polluants chimiques, des bactéries et virus en milieu urbain (modifié de Barrett et al. (1999) et Barrett 2004))

Polluants	Sources possibles					
	Atmosphère	Origine géogène	Activité agricole	Adduction d'eau potable	Activité domestiques (ordures ménagères)	Activité industrielle et commerciale
Cations, anions majeurs (Ca, Mg, K, Na et Cl, SO ₄ ²⁻ , HCO ₃ ⁻)	*	*	*	*	*	*
Espèces chimiques de l'azote (NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , N organique)	*		*	*	*	*
Bore et phosphates		*			*	*
Autres cations/anions mineurs (Br, F, CN)	*	*		*	*	*
Métaux lourds		*			*	*
CFCs	*			*	*	*
THMs ¹				*	*	*
Détergents					*	*
Industries					*	*
Bactéries et virus fécaux					*	
Colloïdes					*	*

¹ Trihalométhanes (Produits secondaires de la chloration de l'eau) ; *Sources possibles

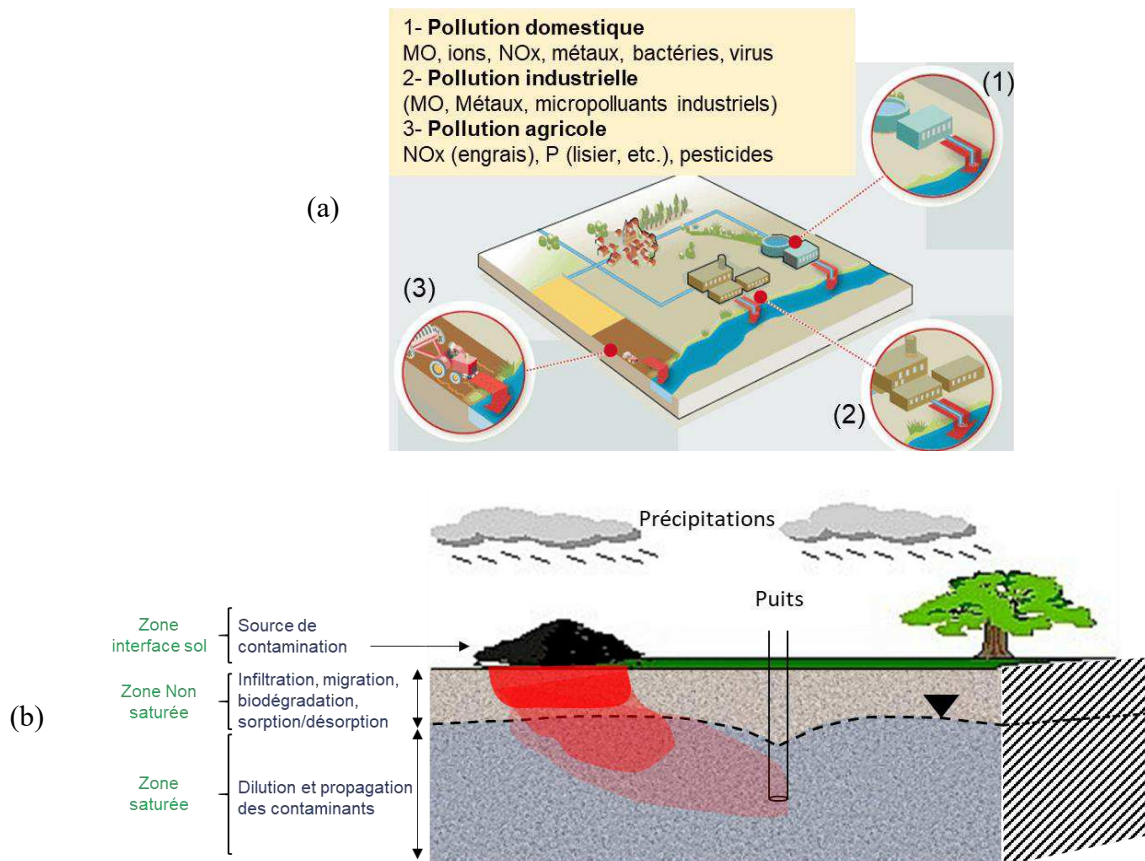


Figure 2: (a) Schéma récapitulatif des principales sources de pollution en milieu urbain (<http://stationdepurandufutur.e-monsite.com/pages/la-pollution-de-l-eau/la-pollution-de-l-eau-et-ses-consequences.html>); (b) Mécanisme de transfert d'un polluant

La contamination des eaux souterraines repose sur des processus physiques, chimiques et biologiques qui se produisent de la surface du sol (zone interface du sol) au travers de la zone non saturée (ZNS). La migration d'un polluant parcourt les zones suivantes (Figure 2b) :

- la Zone de l'Interface du Sol, qui constitue le domaine des activités polluantes ;
- la Zone Non Saturée (ZNS), qui est le domaine du transfert vertical ;
- la Zone Saturée (ZS), qui est le lieu de la propagation et de la dilution de la pollution.

La dégradation de la qualité des eaux souterraines peu profondes par des substances chimiques et bactériologiques dans les pays de l'Afrique de l'Ouest est principalement due aux pollutions d'origine anthropique et agricole. A Cotonou (Bénin), les principales sources de pollutions sont liées aux activités anthropiques (ordures ménagères, fosses septiques et latrines). Le Tableau 2, présente les sources de pollution des eaux souterraines dans quelques métropoles de l'Afrique de l'Ouest.

Tableau 2: Sources de pollution des eaux souterraines dans quelques métropoles de l'Afrique de l'Ouest (Xu et Usher 2006)

Villes/régions	Pays	Polluants identifiés	Sources de pollution
-	Nigéria	Nitrates, pesticides	Activités anthropiques, déchets et fertilisants agricoles
Ouagadougou	Burkina-Faso	Nitrates, chlorures, coliformes fécaux	Activités maraîchères et domestiques, les latrines
Abidjan	Côte d'Ivoire	Nitrates, nitrites, ammonium et phosphates	Activités anthropiques, déchets, eaux usées
Bamako	Mali	Nitrates, nitrites, phosphates et chlorures	Activités agricoles, latrines, eaux usées
Cotonou	Bénin	Nitrites, nitrates, ammonium et chlorures, coliformes fécaux et totaux, <i>E. coli</i>	Activités anthropiques et fosses septiques, latrines, eaux usées

I.1.2.1. Pollution due aux activités domestiques

Les déchets liquides et solides issus des activités domestiques constituent une des plus importantes sources de pollution des eaux souterraines et de surface en Afrique de l'Ouest. C'est le cas dans les grandes métropoles telles que Lagos au Nigeria, Abidjan en Côte d'Ivoire et Dakar au Sénégal (Lapworth et al. 2017 ; Adjagodo et al. 2016). Les eaux souterraines sont contaminées par les eaux usées au cours de l'infiltration des pluies pendant la recharge (Soro et al. 2010 ; Dieng et al. 2017 ; Kadjangaba et al. 2018).

A Niamey au Niger (Hassane et al. 2016), à Ouagadougou au Burkina-Faso (Ouandaogo-Yameogo 2008), à N'Djaména au Tchad (Kadjangaba et al. 2018) et à Dakar au Sénégal (Ndiaye et al. 2010), la contamination des eaux souterraines est liée au fait que les eaux ménagères produites à la surface du sol s'infiltrent au travers de la zone non saturée et parviennent à la nappe peu profonde sans avoir pu bénéficier d'une filtration efficace.

La présence des contaminants chimiques est liée également à la dégradation de la matière organique issue des latrines et des fosses septiques (De Waele et al. 2004 ; Hounkpe et al. 2014). Le lixiviat résultant des décharges contribue à l'augmentation des teneurs en matières organiques et en éléments traces métalliques dans les eaux souterraines et de surface (Ouedraogo et al. 2016 ; Kayembe et al. 2018).

Les travaux de Chabour et al. (2009) ont montré que les eaux urbaines sont plus chargée en phosphates et en nitrates que les eaux de zones agricoles. Les principales sources sont liées à l'inexistence de systèmes d'assainissement adéquats (dépotoirs d'ordures, des latrines et fosses septiques non étanches) et à l'inadaptation du système d'évacuation des eaux pluviales et usées.

Le taux de collecte des déchets ménagers reste encore faible (<50 %) dans la plupart des villes de l'Afrique de l'Ouest. Le taux de collecte est environ 20 % à N'Djaména au Tchad, 42 % à Lomé au

Togo, et à 24 % à Dakar au Sénégal (Ngambi 2015). La caractérisation des eaux usées en milieu urbain à Cotonou (Bénin) par Saizonou et al. (2014 ; 2010) et à Abidjan par Soro et al. (2010) a montré que ces effluents bruts véhiculent d'importantes charges de matières azotées, de métaux lourds et de bactéries.

Ces eaux usées sont constituées d'eaux-vannes (excréments, urine, boues fécales) et d'eaux usées ménagères (eau de douche, de cuisine, de vaisselle, de lessive, de lavage de cours, de lavage de motos)(Yadouléon 2015).

I.1.2.2. Pollution due aux activités agricoles

La croissance démographique et les changements dans le régime alimentaire ont contribué à l'augmentation de la demande alimentaire (WWAP, 2017). L'agriculture a connu une forte expansion et intensification afin de pouvoir satisfaire à cette demande. Dans la plupart des pays de l'Afrique de l'Ouest (ex. Mali, Niger, Bénin, Côte d'Ivoire, Nigéria, etc.) les produits chimiques sont utilisés sous forme d'engrais et de pesticides afin d'accroître la productivité (Dicho et al. 2013). Des études indiquent que les pratiques agricoles ont conduit à la contamination des eaux souterraines peu profondes et des eaux de surface par les nitrates, les phosphates, les hydrocarbures, les métaux lourds et les fluorines (Soro et al. 2010 ; Paré et Bonzi-Coulibaly 2013 ; Atidegla et Agbossou 2010). Par la dissolution et le transport de quantités excessives d'engrais, de pesticides, d'herbicides et des antibiotiques (Ahouangninou, 2013). Savadogo et al. (2006) et Paré et al (2013) ont montré que les sols sont contaminés par endosulfan (1–22 µg/kg) et imethoate (1.7–5 µg/kg) utilisés comme pesticides dans la production du coton au Burkina-Faso.

Plus de 60 % des maraîchers du site de Houéyiho à Cotonou appliquent la fumure au moins quatre fois au cours du cycle végétatif des cultures avec des doses (1000-3000 kg/ha de NPK et 2500-5000 kg/ha d'urée) supérieures à celles recommandées par les services techniques (Atidégla et al. 2010). Ces doses d'engrais non utilisées se retrouvent dans les eaux souterraines et de surface après lessivage des sols par les pluies (Paré et al. 2013 ; Adjagodo et al. 2016).

Ba et al. (2016) ont montré que les pratiques d'utilisation des fertilisants organiques et inorganiques par les agriculteurs en milieu urbain à Dakar (Sénégal) ont des impacts sur les ressources en eau et sur la santé des populations. En dehors de l'utilisation des engrais chimiques en agriculture, certains agriculteurs utilisent des engrais organiques (déjections animales et humaines, engrais vert, lisières et résidus de récolte) comme fertilisant. Le Tableau 3 présente les principaux polluants de l'eau issus de l'agriculture.

Tableau 3: Principaux polluants issus de l'agriculture (WWAP 2017)

Catégorie de polluant	Indicateurs/exemples	Contribution relative de		
		Production agricole	Elevage	Aquaculture
Nutriments	Principalement l'azote et le phosphore qui sont présents dans les engrais chimiques et organiques, les excréments d'animaux et également dans l'eau sous forme de nitrate, d'ammoniac ou de phosphore.	***	***	*
Pesticides	Herbicides, insecticides, fongicides et bactéricides, y compris les organophosphates, les carbamates, les pyréthrinofides, les pesticides organochlorés et autres (nombreux d'entre eux, par exemple le DDT, sont interdits dans la plupart des pays, mais continuent d'être utilisés illégalement).	***		
Sels	Notamment les ions du sodium, le chlorure, le potassium, le magnésium, les sulfates, le calcium et les bicarbonates, entre autres.	***	*	*
Sédiments	Mesurés dans l'eau en tant que matières en suspension totales ou unités de turbidité néphélogométrique, provenant notamment du drainage des étangs pendant la récolte.	***	***	*
Matières organiques	Substances chimiques ou biochimiques qui requièrent de l'oxygène dissous dans l'eau pour la dégradation (des matières organiques, telles que les matières végétales et les excréments du bétail).	*	***	**
Agents pathogènes	Bactéries et indicateurs pathogènes, y compris <i>E. Coli</i> , les coliformes totaux, les coliformes fécaux, et les entérocoques.	*	***	*
Métaux	Notamment le sélénium, le plomb, le cuivre, le mercure, l'arsenic, le manganèse, entre autres.	*	*	*
Polluants émergents	Résidus de médicaments, hormones, additifs alimentaires, etc.		***	**

*contribution faible, **contribution modérée, ***contribution élevée

I.1.2.3. Pollution due aux activités industrielles

Les eaux usées issues d'activités industrielles et minières peuvent contenir des composés organiques toxiques tels que les hydrocarbures, les biphényles polychlorés (BPC), les polluants organiques persistants (POP), les composés organiques volatils (COV) et les solvants chlorés (WWAP 2017). Par exemple, au Cameroun, les effluents issus des brasseries de la zone industrielle de Douala-Bassa, polluent les eaux de cette région avec des rejets de plomb, de nickel et de cuivre (Kengni et al., 2012). A Cotonou, les industries déversent leurs effluents dans le chenal et dans le lac Nokoué (Soclo, 1999 ; Adjagodo et al. 2016). Dovonou et al. (2015) ont identifié la présence de métaux lourds (cadmium, plomb, fer et mercures) dans les eaux des puits individuels situés sur le voisinage du champ de captage de Godomey dans la ville d'Abomey-Calavi au Bénin.

Aujourd'hui l'activité minière subit une expansion dans beaucoup de pays comme le Burkina-Faso, la Guinée, le Niger et le Ghana. L'extraction de l'or, principalement artisanale et à petite échelle, contribue à la pollution des eaux et des sols par les produits toxiques tels que le mercure et le cyanure

(Sracek et al. 2012 ; Paré et al. 2013). Le Tableau 4 présente les résultats des analyses effectuées sur les eaux usées rejetées par l'abattoir de Cotonou en 2010.

Tableau 4: Caractéristiques des eaux usées de l'abattoir de Cotonou (Saizonou et al., 2010)

Paramètres	Moyennes	Intervalle	Ecart-types
Température (°C)	30,6	23,5-31,9	2,78
pH	6,53	5,63-8,68	0,51
O ₂ dissous (mg/L)	0,89	0,19-7,2	0,22
Conductivité (µS/cm)	2360	1621-3470	145
DBO ₅ (mg/L)	512	265-780	175
MES (mg/L)	720	512-958	91
Phosphore total (mg/L)	14,29	4,60-66	8,95
Ortho phosphate (mg/L)	4,90	2,23-8,69	1,65
NH ₄ ⁺ (mg/L)	39,8	21,07-90,59	13,31
NO ₂ ⁻ (mg/L)	5,01	3,8-7,1	1,7
NTK (mg/L)	220,4	48,6-425,6	80,69
Huiles et graisses (mg/L)	890	760-950	145
Coliformes fécaux (106 UFC/100 mL)	1,41	1,02-2,60	0,2
Spores de clostridium sulfitoréducteur UFC/20 mL	Incomptables	-	-
Staphylocoques pathogènes UFC/mL	4040	3580-4860	186

1.1.3. De l'évolution démographique à l'occupation des sols à Cotonou

Le Bénin, situé en Afrique de l'Ouest dans la zone tropicale entre l'équateur et le tropique du Cancer est en plein essor démographique. Il compte une population de 6 769 914 habitants en 2002 et plus de 11 millions d'habitants en 2019 (<https://www.insae-bj.org>). La croissance démographique est plus marquée dans les villes au Sud du Bénin notamment à Cotonou.

En 1905, Porto-Novo, la capitale du Bénin était la plus grande ville avec 17 000 habitants tandis que Cotonou n'était alors qu'une agglomération de 1 175 habitants. Elle était constituée essentiellement de pêcheurs Toffin et Popo abritant des habitations en matériaux précaires (N'Bessa 1997). A partir de 1960, Cotonou occupe la première place avec une population de 100 000 habitants contre 64 000 pour Porto-Novo. En 2013, Cotonou demeure toujours la première ville du Bénin avec 679 012 habitants en 2013 (INSAE 2015) et 1 152 690 habitants en 2019 (<https://www.insae-bj.org>). La croissance démographique de la ville de Cotonou a engendré un besoin accru d'urbanisation. Le développement de la ville s'est faite du sommet du cordon de sable littoral vers les zones marécageuses et les bas-fonds (Fig. 2). La zone urbanisée de la ville de Cotonou constituée d'agglomérations (en rouge), représente environ 74% du territoire communal comparativement à la zone non urbanisée qui occupe 26 % (Danvidé 2015). Cette dernière est composée de marais habités non lotis, de marais non habités, de zones d'extension non loties et de zones d'habitations précaires. Les zones marécageuses sont fortement habitées par des populations pauvres. Selon Danvidé (2015), on note un recul de près de 40 % de leur superficie.

Selon Adeniyi et al. (2016) ; Ogrinc et al. (2019), l'urbanisation avec de fortes concentrations de population dans des zones urbaines augmente considérablement la charge de la pollution, due aux rejets d'eaux usées et des déchets solides avec des risques de pollution des eaux souterraines. La figure 3 montre l'espace occupé par les agglomérations dans la ville de Cotonou.

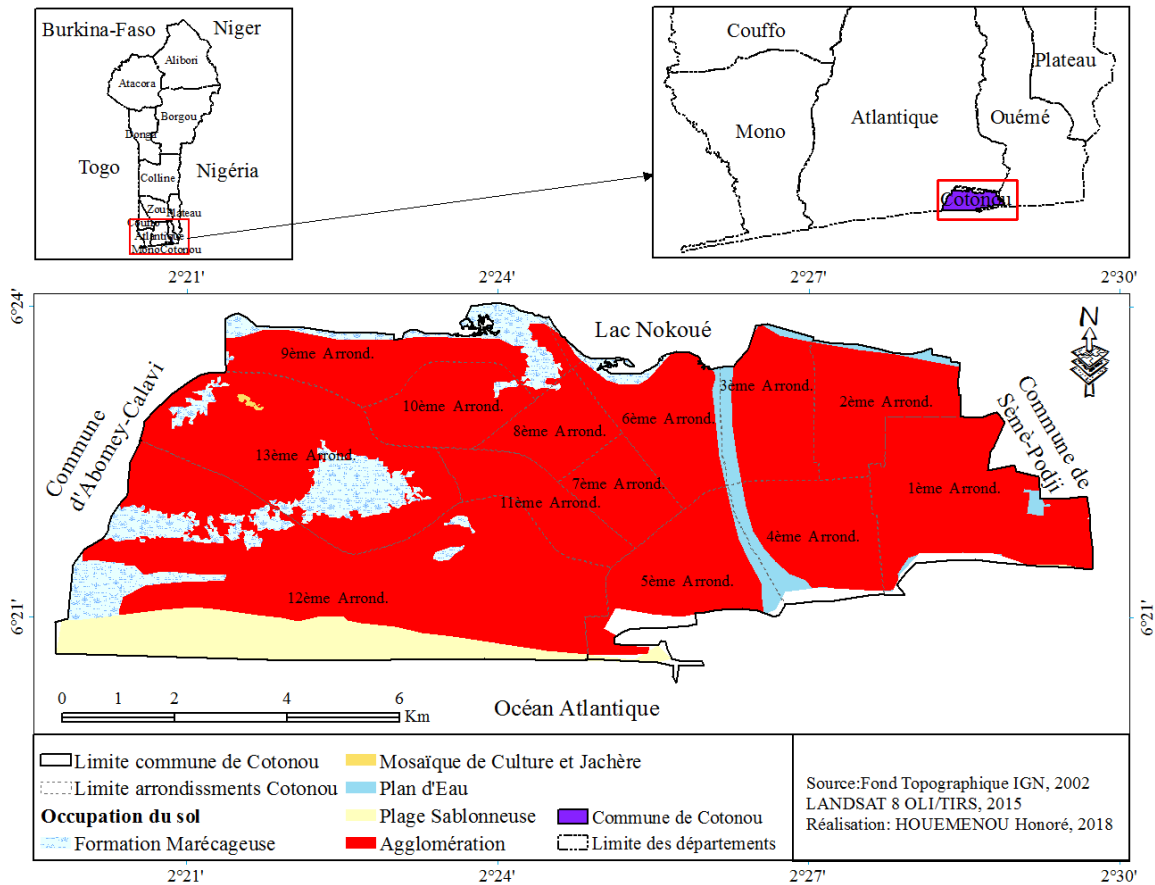


Figure 3 : Carte d'occupation du sol de Cotonou

I.1.4. Qualité des eaux souterraines et risques sanitaires à Cotonou

I.1.4.1 Alimentation en eau potable de la ville de Cotonou

L'alimentation en eau potable de la ville de Cotonou repose exclusivement sur les eaux souterraines tirées essentiellement de l'aquifère du Continental Terminal du plateau d'Allada qui appartient au Bassin Sédimentaire Côtier du Bénin (Boukari et al., 1996). La qualité des eaux souterraines est contrôlée par la Société Nationale des Eaux du Bénin (SONEB) et le Ministère de la Santé, par le biais de la Direction de l'Hygiène et de l'Assainissement de Base et de la Direction Générale de l'Eau. L'estimation des besoins moyens en eau potable de la population de la ville de Cotonou sur 20 ans pourrait montrer une augmentation de la demande : de 10 368 555 m³/an en 2005 à 28 638 265 m³/an en 2025 (Odoulami, Vissin, et Boko 2011).

Les quartiers des zones périurbaines non viabilisés ne sont pas raccordés au réseau public de distribution. Selon (INSAE 2016), à Cotonou, 49 % des ménages ne disposent pas d'eau potable desservie par la SONEB à domicile. Cette frange de la population s'approvisionne en eaux via les puits privés ou publics, rivières, mares ou marigots. Les eaux souterraines captées par les puits peu profonds et à grand diamètre, sont tirées de l'aquifère du Quaternaire (Maliki 1993; Boukari 1998).

La figure 4 présente les sources d'eau pour les divers usages domestiques à Cotonou en 2005 et en 2015. Il montre qu'en dehors de l'eau de la SONEB, l'eau captée par les puits à grand diamètre est surtout utilisée pour la vaisselle (49.4-54.5%), la douche (38-53.07%), la lessive (56-50.8%) et parfois pour la boisson (0,26-2,3 %) et la cuisine (4,52-16,1 %). L'eau de pluie est faiblement sollicitée à cause du caractère temporaire et saisonnier de sa disponibilité. L'utilisation des eaux de puits pour la boisson et la cuisine a augmenté en 2015 (2,3 et 16,1 % respectivement) par rapport à 2005 (0,66 et 4,52 %).

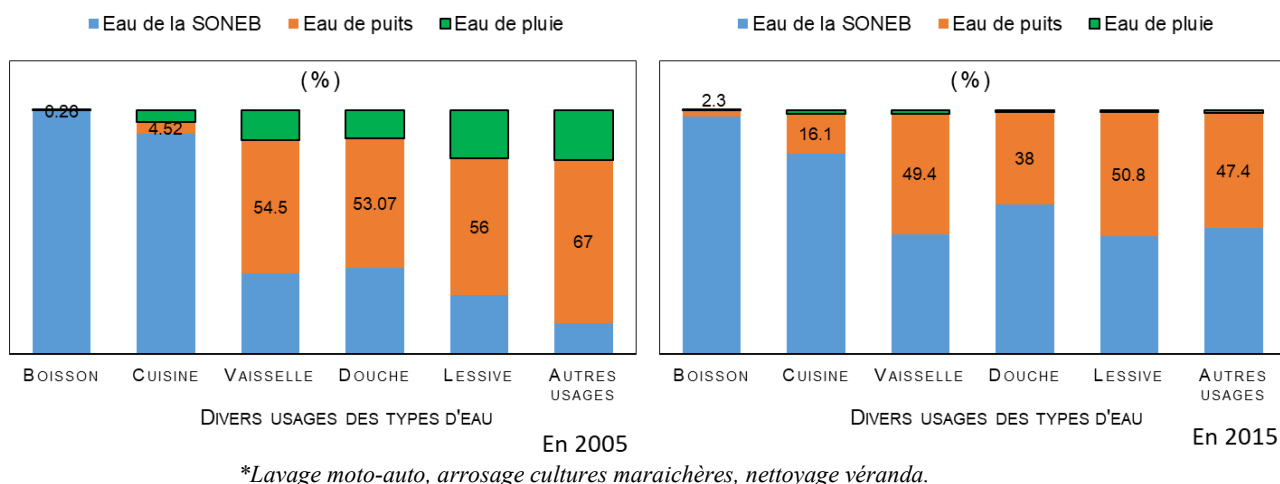


Figure 4 : Source d'eau pour divers usages domestiques à Cotonou en 2005 (Odoulami et al. 2011) et en 2015 (Yadouléton 2015)

I.1.4.2 Qualité chimique et bactériologique

I.1.4.2.1 Ions majeurs

Entre 1991 et 1992, les eaux souterraines à Cotonou étaient en général de bonne qualité à l'exception des zones à forte concentration humaine (ex. Akpakpa) où des teneurs élevées en nitrates (>50 mg/L) ont été enregistrées (Maliki 1993). Cette même étude a notifié que la contamination des eaux souterraines par les nitrates est liée à un apport en matières azotées surtout d'origine anthropique. Boukari et al., (1996) ont également mis en évidence une pollution d'origine anthropique par nitrate, phosphate et potassium dans les secteurs de Togbin-Dèkounbé, le pourtour Sud du lac, tout Cotonou-centre à l'Ouest du Chenal dans les eaux souterraines. Effet, la toxicité des nitrates résulte de leur réduction en nitrites, de la formation de méthémoglobine d'une part et de leur contribution possible à la synthèse

endogène de composés N-nitrosés d'autre part, qui ont un effet cancérigène (Kahoul et Touhami 2013). La qualité de l'eau potable de la SONEB stockée dans des réservoirs (bassines, seaux, jarres, etc) au niveau des ménages à Cotonou se dégrade et peut constituer des sources potentielles de maladies hydriques (Odoulami 2009; Yadouléton 2015; Rapport EAA 2018a). Les teneurs en bicarbonates (<200 mg/L), ont montré des variations saisonnières. Les plus fortes valeurs (>120 mg/L) se rencontrent dans les secteurs habituels (Maliki 1993 ; Boukari et al. 1996).

De 2002 à 2004, les puits situés sur la plaine côtière ont révélé des valeurs élevées en Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ et PO_4^{3-} (Boukari et al. 2006 ; Xu et Usher 2006). Saizonou et al. (2010) ont mesuré des teneurs en nitrites trois (3) fois supérieures à 3,2 mg/L (limite admise par le décret N°2001-094 du 20 février fixant les normes de la qualité de l'eau potable en République du Bénin) dans les puits à proximité de l'abattoir de Cotonou. Boukari et al. (1996), Stephen et al. (2010) et McInnis et al. (2013) ont souligné des intrusions d'eaux salées du lac Nokoué et de l'Océan Atlantique contribuant à l'augmentation des teneurs en Chlorures dans l'aquifère côtier au Sud du Bénin.

Ainsi, sur la base des rares études menées de 1993 à 2013, l'aquifère côtier de Cotonou a connu une dégradation progressive due principalement à la contamination anthropique de leur qualité. L'utilisation des eaux souterraines captées par les puits à grand diamètre comme source d'approvisionnement en eau potable constituent donc une menace pour la santé de la population de Cotonou.

I.1.4.2.2 Eléments traces métalliques

Dans l'aquifère du Quaternaire de Cotonou, très peu d'études ont véritablement porté sur les éléments traces métalliques. Ceci s'explique par le manque de données qui existe sur les eaux souterraines de la zone côtière au Sud du Bénin. Boukari et al. (1996) ont montré que les teneurs en Fe total (entre 0,1 et 0,2 mg/L) et en Zn (0,5 et 1 mg/L) n'étaient pas compromettantes pour la qualité des eaux souterraines et la santé des populations. Néanmoins, des secteurs de fortes teneurs en zinc (2 à 3,5 mg/l) correspondant à la zone de Cotonou centre ont été obtenues pendant la même période. L'étude effectuée sur les eaux de puits et de forages utilisées sur le site maraîcher de Houéyiho à Cotonou a montré que ces eaux d'arrosage sont contaminées par le cadmium (Cd), le plomb (Pb) et le manganèse (Mn) qui sont issus des ordures ménagères utilisées pour la fertilisation (Yehouenou Azehoun Pazou et al. 2009). L'évaluation qualitative dans les principales spéculations maraîchères consommées (laitue, carotte, chou et grande morelle) produits sur ledit site, a montré une contamination des légumes analysés due à une toxicité résiduelle en métaux lourds (Cd, Pb, Cu, Zn et Cr). Dans l'aquifère peu profond du champ de captage intensif de Godomey au Sud du Benin, des teneurs élevées en fer total (0,5 mg/L dans les puits de Togba) et en plomb (0,18 mg/L dans un puits à Hèvié) comparé à la norme béninoise (0,3 pour le Fe et 0,05 mg/L pour Pb ont été enregistrées (Dovonou et al. 2015). Ces valeurs sont proches

de celles mesurées par (Azokpota 2005) dans les eaux des puits des quartiers de Cotonou où se pratiquent les activités de teinturerie.

La mauvaise gestion des eaux usées contribue à la pollution des eaux souterraines par les éléments traces métalliques en zone urbaine avec des risques d'intoxication pour la santé humaine (Rai et al. 2019 ; Dong et al. 2019). La toxicité des métaux en occurrence le plomb sur la santé humaine a été soulignée par (OMS 2016). En effet, ils peuvent affecter le développement du cerveau et du système nerveux et augmenter le risque d'hypertension artérielle et de lésions rénales.

I.1.4.2.3 Bactéries

Dans la plupart des pays en développement, les eaux souterraines captées par les puits traditionnels sont polluées. L'étude effectuée par Maliki (1993) a montré que les eaux de la nappe superficielle de Cotonou et de ses environs sont contaminées par les bactéries d'origine fécale. Boukari et al. (1996) ont montré que les eaux de la nappe peu profonde sont bactériologiquement impropres à la consommation humaine car comportant des coliformes fécaux, en particulier *Escherichia coli*. Une analyse microbiologique en 2007 et en 2008 (Yehouenou Azehoun Pazou et al. 2009) a révélé la présence dans les eaux d'arrosage de germes tels qu'*Escherichia coli*, des *streptocoques fécaux*, des *salmonelles* et des *shigelles* qui sont des indicateurs de pollution organique fécale d'origine humaine ou animale et des pathogènes humains majeurs. A proximité de la berge du lac Nokoué à Cotonou, Dovonou et al. (2012) ont identifié la présence des bactéries *streptocoques fécaux* et de *Clostridium* dans les eaux de puits de certaines localités. La présence de bactéries pathogènes comme les *staphylocoques*, *Salmonella* et *Shigella* confirme le risque élevé de maladies diarrhéiques et de dermatoses signalée par les agents de santé des localités lacustres (Odoulami 2009). En consommant ou en étant au contact des eaux contaminées, la population est confrontée aux maladies hydriques telles que le choléra, la fièvre typhoïde, la dysenterie, la leptospirose, la bilharziose, etc. qui font peser un lourd fardeau sanitaire et qui, pour certaines, constituent les principales causes de mortalité infantile (Warburton et al. 1986 ; Zeenat et al. 2009 ; Goita 2013). Les maladies hydriques fréquemment rencontrées au sein de la population de Cotonou sont le choléra, la dysenterie, la diarrhée, la fièvre typhoïde et la bilharziose (Roufai 2012). D'après les enquêtes menées auprès des ménages et des cellules statistiques des zones sanitaires, les maladies diarrhéiques font partie des trois principales maladies identifiées dans la ville de Cotonou (Roufai 2012). Dans la ville d'Abomey-Calavi (sud du Bénin), les eaux souterraines des puits et des forages sont menacées par une pollution bactériologique provenant de l'infiltration des eaux usées des fosses septiques et des latrines (Hounsinou et al. 2015).

La pollution des eaux de surface et des eaux souterraines constitue des conditions favorables pour la prolifération des bactéries, des virus et autres parasites. Les zones marécageuses sont des zones pour la plupart sans latrines, sans assainissement (Totin et al. 2013; Yadouléton 2015). La majorité des cas de maladies hydriques à Cotonou survient au cours de la période couvrant les mois d'avril à septembre

(saison des pluies) : leur prévalence est plus élevée pendant la saison des pluies comparé à la saison sèche (Hounsinou et al. 2015). En effet, la saison des pluies est marquée par l'omniprésence des eaux stagnantes, notamment dans les quartiers plus défavorisés (Rapport EAA 2018a).

Les résultats de l'estimation faite à partir des statistiques sanitaires de la Direction Départementale de la Santé (DDS) Atlantique Littoral et du quatrième Recensement Général de la Populations et de l'Habitation (RGPH4) sont consignés dans le tableau 5. Ils montrent que le paludisme, le choléra et les diarrhées sont les maladies hydriques les plus fréquemment rencontrées dans la ville de Cotonou. Le paludisme est enregistré dans tous les quartiers et aussi dans tous les arrondissements avec des taux de prévalence relativement élevés.

Tableau 5 : Taux de prévalence des maladies hydriques fréquemment recensées à Cotonou entre 2015 et 2017 (Rapport EAA Juin 2018b)

Arrondissements de Cotonou	Taux de prévalence estimés (%)											
	Cholera			Diarrhée			Paludisme			Autres maladies infectieuses		
	2015	2016	2017	2015	2016	2017	2015	2016	2017	2015	2016	2017
1		0,025	0,00	9,93	15,95	8,41	144,53	162,66	142,66			
2		0,01	0,00	4,68	3,26	2,35	17,77	23,40	19,86			
3	0,12	0,63	0,00	4,06	2,02	3,65	28,27	32,63	28,75			
4		0	0,00	11,36	2,02	1,19	0,01	22,40	17,56			
5		1,15	0,00	20,87	11,30	4,64	110,26	78,43	86,26	0,75		
6	0,01	0,07	0,01	4,92	3,00	3,15	66,53	73,05	29,86			
7		0,07	0,00	4,55	5,31	1,86	56,16	64,35	59,78			
8		0,31	0,00	3,44	1,23	0,11	84,20	60,57	1,82			
9		0,06	0,12	28,26	18,14	18,37	224,81	181,75	214,20			
10		0	0,00	10,82	0,46	8,35	34,40	2,78	20,54			
11		0,20	0,00	40,14	25,61	19,53	164,60	162,24	197,94		0,45	2,69
12		0	0,00	1,14	1,71	0,64	11,32	9,99	7,28			
13	0,01	0,02	0,01	5,46	7,21	3,14	55,22	54,00	36,38			

Une autre affection dont les symptômes (fièvre élevée avec frissons, maux de tête, douleurs musculaires et douleurs articulaires) sont proches de ceux du paludisme est la leptospirose. Cette maladie hydrique est méconnue au Bénin. Elle se manifeste comme une maladie fébrile pseudo-grippale, ce qui rend son diagnostic clinique difficile (Bierque et al. 2020).

I.1.5. Leptospirose, une maladie hydrique méconnue en Afrique

La leptospirose est une zoonose émergente dans le monde notamment en Amérique Latine, en Asie du Sud-Est et en Afrique (Juif 2011). Dans les milieux insalubres, chauds et humides à urbanisation grandissante, elle représente un problème de santé publique majeur (Ko et al. 1999 ; Bertherat et al. 2014 ; Allan et al. 2015). Costa et al. (2015), la leptospirose est responsable de 60000 décès pour 1 million de cas par an dans le monde. Ces estimations, probablement basses compte tenu du déficit criant de données notamment en Afrique (Allan et al., 2015) font de la leptospirose l'une des principales causes de morbidité et de mortalité liées aux zoonoses.

Le réservoir des leptospires est constitué de petits mammifères à affinité anthropophile (principalement les rongeurs dont les rats), de mammifères domestiques (chiens, porcs, bovins, ovins, etc.) et d'animaux sauvages (chauve souris, ect.). Ces hôtes réservoirs abritent l'agent pathogène dans leurs tissus rénaux et les leptospires sont excrétées par voie urinaire dans l'environnement. L'homme se contamine soit par contact direct avec des animaux infectés ou leurs urines (Fig. 5a), soit indirectement par contact avec des eaux ou des sols humides contaminés par les urines d'animaux infectés (Fig. 5b. et e).

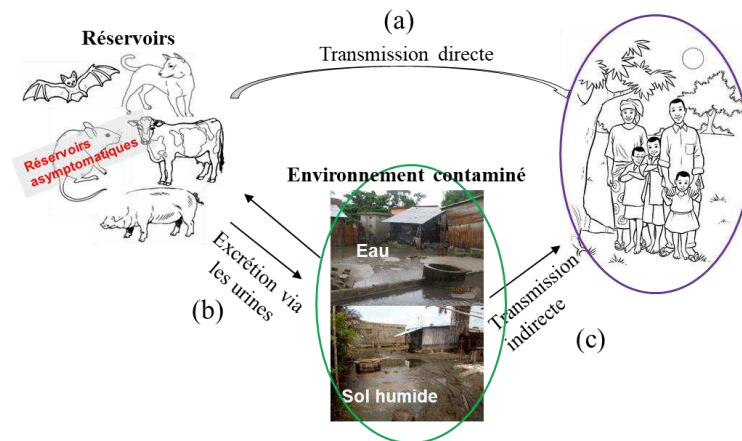


Figure 5: Voie de transmission de la leptospirose

Les données statistiques dans les hôpitaux et les enquêtes sur la séroprévalence aux États-Unis indiquent que plus de 70% des infections à la leptospirose sont attribuées au contact physique avec les eaux contaminées (Wynwood et al. 2014). En 1984 en Italie, trente-trois (33) cas confirmés de leptospirose ont été attribués à l'eau contaminée (Wynwood et al. 2014). Au Japon, (Aoki, Koizumi, et Watanabe 2001) ont confirmé qu'un homme de 48 ans a été contaminé (serovar *Leptospira autumnalis*) après avoir été en contact avec une eau de puits de qualité douteuse. Des épidémies de leptospirose sont également survenues au contact des eaux de baignade, pendant la pratique d'activités de loisirs ou sportives, comme l'Éco Challenge en Malaisie (Sejvar et al. 2003), le triathlon en Illinois (Ristow 2007). Les milieux précaires et insalubres urbains sont également à l'origine de contamination endémique et parfois très nombreuses (ex. dans les bidonvilles de la ville de Salvador au Brésil ; Kô et al., 1999 ; Maciel et al. 2008). En Nouvelle Calédonie, des leptospires pathogènes ont été identifiés dans les échantillons de sols et de rivières contaminés (Thibeaux et al. 2017 ; Bierque et al. 2020) et dans les eaux de surface en milieu urbain au Sud du Chili (Mason et al. 2016 ; Muñoz-Zanzi et al. 2014).

La leptospirose est particulièrement fréquente dans les zones tropicales où les hommes et les animaux vivent en contact étroit avec les animaux; les conditions climatiques chaudes et humides favorisent la survie du pathogène dans l'environnement et la coexistence d'espèces animales potentiellement réservoirs et des habitants favorise la transmission humaine (Mwachui et al. 2015). Au

Thaïland, en Asie du Sud-Est, la leptospirose est reconnue comme une cause importante d'insuffisance rénale et de maladie fébrile (Wuthiekanun et al. 2007).

Dans les eaux de surface et dans les sols humides de régions tempérées et tropicales, la survie des leptospires pathogènes est dépendante de plusieurs facteurs dont la température et le pH (revue dans Bierque et al. 2020). Les leptospires supportent une alcalinisation jusqu'à 7,8 et leur croissance est inhibée pour un pH inférieur à 6,8. Elles sont également détruites par les détergents ou les désinfectants (Juif 2011). Les conditions climatiques saisonnières impliquant des inondations ont longtemps été reconnues comme une source potentielle d'émergence de la leptospirose (Ko, Goarant, et Picardeau 2009 ; Lau et al. 2010 ; Mwachui et al. 2015). La majorité des cas surviennent entre juillet et novembre en France métropolitaine, et durant la saison des pluies sous les tropiques (Goita 2013). En plus de l'inondation, la croissance démographique, l'urbanisation associée à des conditions de vie précaires, le manque d'hygiène et d'assainissement, l'intensification agricole et les changements climatiques sont des facteurs aggravants de la transmission de la leptospirose (Lau et al. 2010 ; 2016). Par exemple, la leptospirose est fortement répandue dans les bidonvilles où les personnes vivent dans des habitations entourées d'égouts à ciel ouvert, proches du principal réservoir de la maladie, le rat (*Rattus Norvegicus*) (Ristow 2007 ; Maciel et al. 2008 ; Felzemburgh et al. 2014). Au Pérou, dans la région d'Iquito, la prévalence des leptospires dans les caniveaux à ciel ouvert, les eaux souterraines et de surface est plus élevée dans les environnements urbains que ruraux (Ganoza et al. 2006).

En Afrique subsaharienne, beaucoup de pays ont des caractéristiques bioclimatiques propices à la transmission des leptospires, mais l'incidence et la prévalence restent rarement évaluées (revues dans Allan et al 2015 ; De Vries et al 2014). Cependant, au Gabon, des cas de contamination aux leptospires ont été rapportés régulièrement depuis 1994 (Aubry et Gauzère 2019). Ntakirutimana (2013), après avoir montré que la leptospirose canine existe à Dakar au Sénégal, a mis en exergue les facteurs de risque de contamination que sont la présence des rongeurs et des chiens à la maison ou dans les environs, les eaux usées des canaux d'évacuation et la présence des ordures. Au Nigéria, une séroprévalence élevée (20,4 %) a été observée chez les mineurs de charbon, les travailleurs au niveau des abattoirs et les agriculteurs. Au Ghana, parmi les personnes notées séropositives, 33% étaient des agriculteurs et des travailleurs de plantation de cacao. Sur 190 patients souffrants de l'ictère et/ou des fièvres dans la région d'Ashanti (Ghana), 3,2 % ont été confirmés malades de la leptospirose (de Vries et al. 2014). Dans le sud du Bénin, environ 12% des rats sont porteurs des pathogènes *Leptospira* et la séroprévalence à la leptospirose dans les populations humaines a été estimée à 15,8 % (Houéménou et al. 2014; 2019). Cette étude a montré que la séroprévalence de l'infection à la leptospirose au sein des populations installées dans les bas-fonds, le long de la lagune et du lac Nokoué est d'environ 40 %. Les risques de contamination à la leptospirose sont donc élevés dans les villes de l'Afrique de l'Ouest, notamment celles qui s'étalent le long du Golfe de Guinée pour former le « corridor urbain Abidjan-Lagos » (Dobigny et al. 2018), mais les conditions environnementales, les caractéristiques physico-chimiques et les périodes favorables à la survie des leptospires dans les eaux souterraines et de surface restent encore mal documentées.

I.3. Questions scientifiques

Les études effectuées à Cotonou ont montré que l'urbanisation et la mauvaise gestion des déchets issus des activités anthropiques constituent les principales sources de contamination des eaux souterraines de l'aquifère côtier au Sud du Bénin (Maliki 1993 ; Boukari et al. 1996 ; 2006 ; Totin et al. 2013). Les quartiers précaires des grandes métropoles de l'Afrique de l'Ouest vivent dans des environnements humides et pollués favorables au développement des maladies hydriques (Ikem et al. 2002 ; Ouandaogo-Yameogo 2008 ; De Waele et al. 2004 ; Hassane et al. 2016 ; Lapworth et al. 2017).

A Cotonou, la qualité des eaux souterraines de l'aquifère du Quaternaire n'est pas contrôlée ni suivie par la SONEB (Société Nationale des Eaux du Bénin) car elles ne représentent pas une ressource recommandée pour l'approvisionnement en eau potable de la population. Mais la proximité de cette ressource (faible profondeur) et le taux relativement faible (49 %) d'accès à l'eau de la SONEB, amènent les populations des quartiers précaires à s'approvisionner en eau via les puits à grand diamètre. Ces eaux souterraines non suivies sont utilisées pour la lessive, la vaisselle, la douche, la cuisine et parfois la boisson, et ce, avec les risques de contamination des maladies hydriques (Yadouléon 2015; Hounsinou et al. 2015; Roufai 2012).

La plupart des études sur les eaux souterraines à Cotonou se sont limitées à sa qualité microbiologiques et ont porté sur l'analyse des bactéries hydriques indicatrices de pollutions fécales telles que *E. Coli*, *Streptocoques fécaux*, des *Salmonelles*, *Klebsiella pneumoniae*, *Enterobacter cloacae*, etc. et d'autres bactéries provenant de sources environnementales telles que *Enterobacter intermedium* et *amnigenus*, *Klebsiella terrigena*, *Buttiauxella agresti* (Odoulami 2009 ; Saizonou et al. 2010 ; Dovonou et al. 2012 ; Saizonou et al. 2014). D'autres études ont mis l'accent sur les pollutions par les composés azotés notamment les nitrates et les métaux lourds tels que Fe, Pb, et Zn, etc. (Boukari 1998; Yehouenou Azehoun Pazou et al. 2009; Azokpota 2005). Les travaux de Yalo et al. (2012) et McInnis et al. (2013) ont abordé la problématique d'intrusion d'eaux salées du lac Nokoué et de l'Océan Atlantique dans l'aquifère côtier au Sud du Bénin en utilisant les approches géophysiques.

Ces études n'ont donc pas abordé la variation temporelle et spatiale des mécanismes de salinisation (minéralisation, processus d'évaporation, intrusion d'eau salée) et de pollution anthropique à partir des approches hydrochimiques et isotopiques dans des systèmes hydrogéologiques différents dans la zone côtière au Sud du Bénin. De même, les données spatio-temporelles sur la distribution des teneurs en éléments traces métalliques sont vraiment rares ou n'existe pas sur les eaux souterraines et de surface à Cotonou. Par ailleurs, les possibilités de transfert de contaminants dans les eaux souterraines au travers de la Zone Non Saturée (ZNS) n'ont jamais été mis en évidence sur ce site.

En dehors de son hôte mammifère, aucune étude n'a été menée sur la présence ou non des bactéries leptospires pathogènes dans les eaux souterraines et de surface dans la zone côtière au Sud du Bénin. Très peu de connaissance existent sur les conditions environnementales et hydrochimiques qui

sont compatibles avec le *Leptospira* pathogène surtout dans les habitats urbains où la pollution peut être très importante.

Cette étude pluridisciplinaire qui utilise une approche combinant les traceurs environnementaux (chimiques et isotopiques) et les analyses bactériologiques (les leptospires) permet la mise en place d'une base de données spatio-temporelles importantes. Elle apporte des informations sur les facteurs qui contrôlent le fonctionnement de l'aquifère côtier au Sud du Bénin et sur les conditions environnementales, chimiques et hydroclimatique propices à l'émergence des leptospires pathogène dans les bidonvilles de Cotonou.

Ainsi, des pistes de recherches pertinentes ont porté sur les questions scientifiques ci-après :

- 1- Quels sont les processus dominants de contamination par les chlorures et nitrates dans les eaux souterraines ?
- 2- Quels sont les facteurs contribuant à l'accumulation du fer et du manganèse ?
- 3- Quels sont les types d'eaux contaminés et les périodes à risque de contamination à la leptospirose? Quelles sont les conditions qui favorisent la présence des leptospires pathogènes ?

Pour répondre à chacune des questions de recherches, trois (3) articles scientifiques ont été rédigés.

1- Houéménou, Honoré, Sarah Tweed, Gauthier Dobigny, Daouda Mama, Abdoukarim Alassane, Roland Silmer, Milanka Babic, et al. 2019. « Degradation of Groundwater Quality in Expanding Cities in West Africa. A Case Study of the Unregulated Shallow Aquifer in Cotonou ». Journal of Hydrology, décembre, 124438. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124438>. *Publié dans un journal scientifique*

2- Houéménou, Honoré, Seidel Jean Luc, Sarah Tweed, Abdoukarim Alassane, Daouda Mama, Fabienne Trolard, Gauthier Dobigny, Salifou Orou-Pete, Akilou Socohou, et Marc Leblanc. (in preparation) « Seasonal variations in processes driving manganese and iron concentrations above drinking water guidelines in the unregulated shallow aquifer of Cotonou (Southern Benin) ». *Non soumis dans un journal scientifique*

3- Houéménou, Honoré, Philippe Gauthier, Sarah Tweed, Henri-Joel Dossou, Marc Leblanc, Jean-Luc Seidel, Akilou Socohou, et Gauthier Dobigny. (in preparation) « Pathogenic *Leptospira* and water quality in African cities: a case study of Cotonou, Benin». *Soumis dans le journal Water and Health*

Ces résultats ont permis de proposer ***un schéma conceptuel de contamination des eaux souterraines pour chacun des sites étudiés***

I.5. Structuration du manuscrit

Ce manuscrit est organisé en quatre chapitres dont trois sont rédigés sous le format d'articles scientifiques.

Le **chapitre I** (ci-dessus) présente une synthèse bibliographique de l'état actuel des connaissances au niveau régional et national de l'urbanisation et son influence sur la qualité des eaux souterraines peu profondes de grandes métropoles africaines. A l'issue de cet état de l'art, trois questions scientifiques ont été énoncées afin d'apporter une plus large information sur le fonctionnement de l'aquifère côtier de Cotonou (Sud du Bénin).

Le **chapitre II** illustre le contexte hydrogéologique de la zone d'étude et décrit également les traits majeurs de la zone d'étude qui n'ont pas été précisés dans les articles scientifiques. Il présente également les caractéristiques environnementales qui justifient le choix des sites d'étude.

Le **chapitre III** présente les résultats du premier article publié sur la dégradation de la qualité des eaux souterraines peu profondes à Cotonou. Après avoir caractérisé les eaux souterraines peu profondes de Cotonou dans trois contextes hydrogéologiques, l'utilisation des traceurs environnementaux a permis de proposer un schéma conceptuel des facteurs et périodes à risques de contamination.

Le **chapitre IV** présente les résultats des investigations menées sur les éléments traces métalliques dans les eaux souterraines. Ce chapitre illustre les résultats du deuxième article scientifique sur les éléments traces métalliques dans les eaux souterraines peu profondes à Cotonou.

Le **Chapitre V** présente les résultats obtenus sur l'identification des leptospires pathogènes dans les eaux souterraines et de surface dans les bidonvilles de Cotonou. Ce chapitre rédigé sous forme d'article scientifique a permis de décrire les conditions environnementales, les caractéristiques géochimiques et isotopiques des échantillons d'eau positifs aux leptospires pathogènes. De même, les périodes à risques de propagation de la leptospirose ont été soulignées.

Cette étude est clôturée par une **conclusion générale** qui souligne les principaux résultats obtenus afin de proposer des pistes de recherche. Chaque chapitre est suivi de la liste de références bibliographiques. Les informations complémentaires pouvant faciliter la lecture de ce document sont mentionnées dans les **Annexes**.