

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ANALYSE HYDRO-ECONOMIQUE DES IMPACTS ANTHROPIQUES ET DES CHANGEMENTS
CLIMATIQUES SUR LES EAUX SOUTERRAINES DU BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER TOGOLAIS,
AFRIQUE DE L'OUEST

THESE

PRÉSENTÉE

COMME EXIGENCE PARTIELLE

AU DOCTORAT EN SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'ATMOSPHÈRE

PAR

AHMED RACHID BARRY

SEPTEMBRE 2025

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.12-2023). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Cette thèse marque l'aboutissement d'un long cheminement, nourri de rencontres inspirantes, de collaborations fructueuses et de soutiens précieux, sans lesquels ce travail n'aurait jamais pu voir le jour. Je tiens ici à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes et institutions qui m'ont accompagné, de près ou de loin, tout au long de cette aventure.

Je remercie tout d'abord le Professeur Florent Barbecot, premier à avoir cru en moi. Son engagement, sa confiance et la rigueur de son encadrement ont été des piliers déterminants dans la conduite de cette recherche. Ma reconnaissance s'étend également aux Professeurs Manuel Rodriguez et Jie He, qui ont rejoint la direction de cette thèse en apportant un regard complémentaire et des conseils précieux qui ont enrichi la réflexion.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux Professeurs Julien Walter, Marie-Solange OGA et Charles Séguin pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour l'attention qu'ils lui ont consacrée.

Au Togo, ma gratitude va à la Direction des Ressources en Eau, en particulier à M. Akakpo, M. Konlani, Mme Tozo et M. Agouda, pour leur disponibilité constante et leur soutien indéfectible. Je remercie aussi chaleureusement le Directeur Amadou, ainsi que mes collègues et amis Tiam, Etoh, Bah, N'Dje et bien d'autres, pour leur précieuse collaboration tout au long du projet.

Une mention spéciale à Aimé, collègue dont une partie des travaux a directement nourri cette recherche.

À Keith et Augustin, amis de vingt ans à la fidélité sans faille...

Je souhaite également saluer le soutien de la haute hiérarchie du ministère de l'Eau, notamment M. Tchaboré, Secrétaire Général, pour son appui sans faille, M. Adjama, Directeur de Cabinet, ainsi que les ministres successifs, en particulier M. Tiem et Mme Mila Aziablé, pour leur écoute attentive et leur appui institutionnel.

Au Canada, je remercie chaleureusement l'équipe du GEOTOP à l'UQAM, pour son accueil bienveillant, la qualité de son encadrement et l'environnement scientifique stimulant qu'elle offre. J'adresse une pensée particulière aux professeurs — notamment Viorel — pour leur disponibilité et leurs conseils éclairés. À

mes collègues étudiants-chercheurs — Guillaume, Alexandra, Karine, Janie, Williams, Parfait, Marc-André, et tant d'autres — je vous suis reconnaissant pour nos échanges, votre amitié et votre soutien.

Je n'oublie pas ma « petite famille montréalaise » — Moussa et Delphine, Grégoire et Carole, Aziz, Serge, Eugénie, et tant d'autres — pour leur présence réconfortante, leur écoute et leur soutien moral, qui ont été d'un grand secours loin de mon pays.

Et je garde pour la fin ceux dont l'amour est la source même de ma force :

- À mon grand-oncle BMB, pour son appui discret mais constant, je dis toute ma reconnaissance ;
- À mon oncle Ibrahim, exemple d'endurance et de persévérance ;
- À ma mère, dont les prières silencieuses et inlassables veillent sur moi depuis toujours ;
- À Aïcha, ma petite sœur et « petite maman » ;
- À Ismaël, mon petit frère, pour sa présence fidèle ;
- Et surtout à Mimi, ma compagne de vie, ainsi qu'à nos enfants, dont l'amour quotidien donne un sens profond à mon engagement : cette réussite est aussi la vôtre.

DÉDICACE

À la mémoire de mon père, dont les valeurs et le courage continuent de m'inspirer chaque jour. Cette thèse est aussi le fruit de son héritage, et je lui dédie humblement ce travail.

AVANT-PROPOS

La présente thèse s'inscrit dans une démarche à la fois scientifique et personnelle, et constitue l'aboutissement de plusieurs années de recherche consacrées à la gestion durable des ressources en eau, plus particulièrement des eaux souterraines du Bassin Sédimentaire Côtier du Togo.

Ce travail puise son origine dans une expérience professionnelle significative au sein de la Direction des Ressources en Eau à Lomé. J'y ai observé une concentration des efforts techniques et financiers sur l'alimentation en eau potable et l'assainissement, reléguant les eaux souterraines à un rôle secondaire, malgré leur importance stratégique pour le pays. Leur nature invisible complique leur perception et renforce une méconnaissance générale, limitant la prise de conscience des risques liés à leur surexploitation.

Cette réalité m'a conduit à adopter une approche pluridisciplinaire, intégrant notamment des outils issus de l'économie de l'environnement, dans le but de rendre cette ressource plus intelligible et de favoriser une gestion plus éclairée. Le travail mené, à la croisée du terrain, du laboratoire et de la réflexion interdisciplinaire, a été jalonné d'obstacles qui ont contribué à affiner tant la méthode que la perspective.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à la Banque Islamique de Développement (IsDB), dont la bourse doctorale a rendu ce projet possible, ainsi qu'à mon directeur de thèse, le Professeur Barbecot, pour son encadrement rigoureux et bienveillant.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des personnes et institutions ayant contribué, de manière directe ou indirecte, à la réalisation de cette recherche, que je leur dédie avec l'espoir qu'elle contribue à une meilleure compréhension et à une gestion plus durable et équitable des eaux souterraines.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
DÉDICACE	iv
AVANT-PROPOS.....	v
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xii
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS	xiii
RÉSUMÉ	xiv
ABSTRACT	xvi
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 DESCRIPTION DU CADRE THEORIQUE ET DE LA ZONE D'ETUDE	8
1.1 Cadre théorique	8
1.1.1 Fonctions et services des eaux souterraines	8
1.1.2 Menaces sur les eaux souterraines.....	9
1.1.3 Pression climatique sur les eaux souterraines en Afrique.....	12
1.1.4 Valeur des eaux souterraines	14
1.2 Description de la zone d'étude	19
CHAPITRE 2 DEMARCHE METHODOLOGIQUE MIXTE	28
2.1 Cadre d'analyse.....	28
2.2 Caractérisation des impacts des changements climatiques sur la recharge des eaux souterraines ...	29
2.2.1 Estimation de la recharge	31
2.2.2 Données	32
2.2.2.1 Paramètres du modèle de recharge : C et WS_{max}	33
2.2.2.2 Données climatiques.....	33
2.3 Méthode d'évaluation contingente	38
2.3.1 Approche.....	38
2.3.2 Questionnaire d'enquête.....	39
2.3.3 Considérations éthiques	43
2.3.4 Processus d'échantillonnage	43
2.3.5 Estimation du CAP.....	44
2.3.6 Valeur d'économique totale et valeur d'usage.....	44

2.4	Fonction de demande	45
CHAPITRE 3 RESULTATS DE RECHERCHE		47
3.1	Impacts anthropiques sur les eaux souterraines du BSCT	47
3.2	Impacts des changements climatiques sur la recharge des eaux souterraines du BSCT	48
3.2.1	Cartes de perméabilité, d'occupation de sol et des pentes	48
3.2.2	Carte de coefficients de ruissellement	51
3.2.3	Carte de recharge actuelle des eaux souterraines	53
3.2.4	Recharge future des eaux souterraines	56
3.2.5	Discussion	61
3.2.6	Conclusions	67
3.3	Valeur économique des eaux souterraine du BSCT	68
3.3.1	Traitement de la base de données	68
3.3.2	Profil des répondants et perception des enjeux.....	69
3.3.3	CAP des ménages.....	74
3.3.4	Déterminants du Vote pour le programme	75
3.3.5	Déterminants du CAP.....	76
3.3.6	Résultats des estimations des modèles	77
3.3.6.1	Résultats du modèle Logit – Déterminants du vote	78
3.3.6.1.1	Variables sociodémographiques.....	79
3.3.6.1.2	Variables économiques.....	80
3.3.6.1.3	Variables liées au lieu de résidence et à l’infrastructure	80
3.3.6.1.4	Variables d’attitudes et de perception	80
3.3.6.2	Résultats du modèle Tobit – Déterminants du CAP	81
3.3.6.2.1	Variables sociodémographiques.....	81
3.3.6.2.2	Variables économiques.....	82
3.3.6.2.3	Lieu de résidence	82
3.3.6.2.4	Facteurs liés aux perceptions et attitudes.....	82
3.3.6.2.5	Facteurs liés aux conditions d’accès à l’eau	83
3.3.6.2.6	Conclusion.....	83
3.3.7	Valeur économique totale et ses composantes	85
3.3.8	Conclusion.....	87
3.4	Outil d’estimation hydroéconomique : application à l’analyse des impacts anthropiques et du changement climatique.....	88
3.4.1	Estimation hydro-économique des impacts anthropiques.....	92
3.4.2	Estimation hydro-économique des impacts des changements climatiques	92
3.4.3	Analyse comparative.....	93
3.4.4	Conclusion.....	94
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		96
Rappel des objectifs		96
Synthèse des résultats.....		96
Implications pratiques et perspectives		100
Conclusion finale		101

ANNEXE A Tableau de calcul de la recharge	102
ANNEXE B QUESTIONNAIRE D'ENQUETE	104
ANNEXE C Impacts anthropiques sur les eaux souterraines du BSCT, d'après Djongon (2022)	130
ANNEXE D CERTIFICAT D'APPROBATION ETHIQUE	133
ANNEXE E Résultat de la régression logistique Stepwise dans Stata	134
ANNEXE F Résultat de la régression MCO Stepwise dans Stata.....	135
ANNEXE G Résultats des estimations des valeurs individuelles d'usage et de non-usage des répondants dans l'interface du logiciel Stata	136
ANNEXE H Résultats de la régression entre les variables CAP et Niveau_eff dans Stata	137
ANNEXE I Résultat du test de linéarité.....	138
RÉFÉRENCES	139
BIBLIOGRAPHIE.....	140

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Vue d'ensemble des services importants fournis par les systèmes d'eau souterraine, regroupés selon la classification des services écosystémiques de l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire. Modifiée d'après van der Gun (2019)	9
Figure 2: Diagramme conceptuel des impacts naturels du changement climatique sur les eaux souterraines (adaptée d'après Swain <i>et al.</i> (2022)).....	13
Figure 3: Composantes de la valeur de l'eau (adaptée d'après CCME (2010))	16
Figure 4: Localisation de la zone d'étude	20
Figure 5: Carte de situation du bassin transfrontalier de Kéta en Afrique de l'Ouest (adaptée d'après BRG <i>et al.</i> (2022))	21
Figure 6: Unités géomorphologiques du bassin sédimentaire côtier du Togo (adaptée de DHE (1982))...	22
Figure 7: Coupes géologiques transversales N-S, comme indiqué dans la figure 6	23
Figure 8: Etapes de la croissance de Lomé de 1914 à 2010 (Barry <i>et al.</i> , 2022)	24
Figure 9: Évolution des niveaux des eaux souterraines dans les stations situées dans la ville de Lomé, Campus Nord pour l'aquifère continental terminal, Campus Sud pour l'aquifère du Paléocène et Apepsito pour l'aquifère du Maastrichtien (Barry <i>et al.</i> , 2022)	25
Figure 10: Cadre d'analyse de l'étude	29
Figure 11: Schéma du modèle de bilan de Thorntwaite (adaptée d'après Dassargues (2020)) avec Pmm_i (Précipitation moyenne du mois i), PET_i (Evapotranspiration moyenne du mois i), ET_i (évapotranspiration réelle moyenne du mois i), S_i (Stock d'eau à la fin du mois i), S_{max} (capacité maximale de stock d'eau dans le sol)	32
Figure 12: Température moyenne projetée dans la région des Maritimes, Togo; (Ref. Period: 1986-2005), Multi-Model Ensemble (CCKP, 2021)	34
Figure 13: (a) Températures moyennes projetées pour la région maritime du Togo 2020-2039; (Reference Period:1986-2005), RCP 4.5 & RCP 8.5, Multi-Model Ensemble; (b) Précipitations projetées pour la région maritime du Togo 2020-2039; (Reference Period:1986-2005), RCP 4.5 & RCP 8.5, Multi-Model Ensemble(CCKP, 2021).....	37
Figure 14: (a) Températures moyennes projetées pour la région maritime du Togo 2040-2059; (Reference Period:1986-2005), RCP 4.5 & RCP 8.5, Multi-Model Ensemble; (b) Précipitations projetées pour la région maritime du Togo 2040-2059; (Reference Period:1986-2005), RCP 4.5 & RCP 8.5, Multi-Model Ensemble(CCKP, 2021).....	37
Figure 15: Détails de la question 43 du questionnaire.....	40

Figure 16: Première partie de la question 46 du questionnaire	41
Figure 17: Suite de la question 46 et présentation de la carte de paiement illustrée utilisée dans le questionnaire.....	41
Figure 18: Détails du contenu de la question 48 du questionnaire d'enquête.....	42
Figure 19: Détails du contenu de la question 50 du questionnaire d'enquête.....	43
Figure 20: Fonction de demande des eaux souterraines fictive	45
Figure 21: Carte de répartition spatiale des zones à risque de dégradation de la nappe du Continental Terminal du BSCT. La zone hachurée a un degré de confiance moyenne (Djongon, 2022).....	48
Figure 22: Carte de perméabilité du sol	49
Figure 23: Carte d'occupation des sols.....	50
Figure 24: Carte des pentes.....	51
Figure 25: Carte des coefficients de ruissellement	53
Figure 26: Distribution intra-annuelle de la recharge des eaux souterraines sous le climat actuel (1986-2005).....	55
Figure 27: Carte de répartition de la recharge actuelle	56
Figure 28: Évolution de la recharge des eaux souterraines dans le bassin sédimentaire côtier togolais... 62	
Figure 29: Évolution de la recharge selon le coefficient de ruissellement dans le bassin sédimentaire côtier togolais	63
Figure 30: Évolution de la recharge en fonction des volumes infiltrés dans le bassin sédimentaire côtier togolais	65
Figure 31: Répartition des répondants par tranche d'âge	72
Figure 32: Répartition des répondants en fonction du niveau d'études	73
Figure 33: Détails de la question 50	90
Figure 34: Représentation graphique de la fonction de demande inverse des eaux souterraines du BSCT	91
Figure 35: Comparaison entre l'évolution de la valeur moyenne de l'eau dans le BSCT en prévision des impacts anthropiques et climatiques	94

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Valeurs du coefficient de ruissellement (C) de la zone d'étude à partir de la table ASCE (1969).	33
Tableau 2: Précipitations projetées pour 2020-2039 et 2040-2059, dans la Région Maritime du Togo (Période de référence 1986-2005), RCP-4.5 & RCP-8.5, Multi-model ensemble (CCKP, 2021).	36
Tableau 3: présentation des actions prévues dans le programme de gestion durable des ressources en eau	39
Tableau 4: Valeurs adoptées pour le coefficient de ruissellement (C)	52
Tableau 5: Recharge sous le climat actuel	54
Tableau 6: Recharge selon le scénario RCP 4.5 au cours de la période 2020-2039	58
Tableau 7: Recharge selon le scénario RCP 4.5 au cours de la période 2040-2059	59
Tableau 8: Recharge selon le scénario RCP 8,4 au cours de la période 2020-2039	60
Tableau 9: Recharge selon le scénario RCP 8.4 au cours de la période 2040-2059	61
Tableau 10: Évolution de la recharge selon le coefficient de ruissellement dans le bassin sédimentaire côtier togolais	64
Tableau 11: Statistiques descriptives des caractéristiques des répondants	70
Tableau 12: Statistiques descriptives des caractéristiques individuelles retenues (suite et fin)	71
Tableau 13: CAP moyen et médian	74
Tableau 14: Résultats des estimations Logit et Tobit	77
Tableau 15: Résultats de la régression entre les variables CAP et Niveau_eff dans Stata	91
Tableau 16: Variations moyennes de la recharge future sous l'effet des changements climatiques	93

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

ABM	Autorité du bassin du Mono
ABV	Autorité du bassin de la Volta
AE	Actual evapotranspiration (Evapotranspiration réelle)
BSCT	Bassin sédimentaire côtier togolais
CAP	Consentement à payer
CAR	Consentement à recevoir
CCM	Conseil canadien des ministres de l'environnement
CERPE	Comité d'éthique de la recherche pour les projets étudiants
FCFA	Franc de la Communauté Financière Africaine
GIRE	Gestion intégrée des ressources en eau
MCG	Modèles climatiques globaux
MCO	Moindres carrés ordinaires
PANGIRE	Plan d'actions national de gestion intégrée des ressources en eau
PANSEA	Plan d'action national pour le secteur de l'eau et de l'assainissement
PET	Potential evapotranspiration (Evaporation potentielle)
RCP	Representative concentration pathway
SRTM	Shuttle radar topography mission
TdE	Société togolaise des eaux
RCP 4.5	Scénario climatique optimiste avec concentration modérée de gaz à effet de serre
RCP 8.5	Scénario climatique pessimiste avec forte concentration de gaz à effet de serre
UQAM	Université du Québec à Montréal
VET	Valeur économique totale
VU	Valeur d'usage
WSmax	Water storage max (Capacité au champ maximale)

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

Liste des symboles et unités

Symbole	Description	Unité / Remarque
CAP	Consentement À Payer (Willingness to Pay)	Francs CFA (FCFA)
VET	Valeur Économique Totale des eaux souterraines	Francs CFA (FCFA)
VU	Valeur d'Usage (part liée à l'utilisation directe)	Francs CFA (FCFA) ou % de la VET
VNU	Valeur de Non-Usage (valeur environnementale, sociale, culturelle)	Francs CFA (FCFA) ou % de la VET
RCP 4.5	Scénario climatique optimiste avec concentration modérée de gaz à effet de serre	Sans unité
RCP 8.5	Scénario climatique pessimiste avec forte concentration de gaz à effet de serre	Sans unité

Unités monétaires et conversion

- **Franc de la Communauté Financière Africaine (FCFA)** : monnaie locale utilisée dans l'étude.
- **Dollar américain (USD)** : conversion approximative fournie pour comparaison (ex. : 515,6 FCFA ≈ 0,86 USD).

RÉSUMÉ

Les aquifères du bassin sédimentaire côtier togolais (BSCT), le poumon économique du pays sont de plus en plus sollicités pour différents usages. Cette pression causée par une forte croissance démographique est accentuée par les impacts du changement climatique. Il en découle une baisse du niveau des eaux souterraines, accompagnée de pollution et de modifications environnementales majeures (perturbation du cycle de l'eau, perte de biodiversité, eutrophisation, etc.). Ce constat appelle à une prise de conscience et à l'adoption de mesures efficaces de gestion durable de la ressource.

L'hypothèse de recherche qui a guidé ce travail est qu'il est possible d'associer une valeur économique aux eaux souterraines, en fonction de leur disponibilité, afin de rendre plus compréhensibles les enjeux liés à cette ressource et de fournir aux décideurs un outil d'aide à la gestion durable.

Dans le but d'améliorer la compréhension des décideurs et du grand public vis-à-vis de la gestion de la ressource la plus importante pour l'alimentation en eau de la population du bassin sédimentaire côtier togolais, nous avons cherché à évaluer le renouvellement des eaux souterraines et leur valeur. Pour cela, une caractérisation des impacts des changements climatiques sur la recharge des eaux souterraines du bassin a été effectuée par l'approche de bilan de Thornthwaite et Mather (1957), suivie d'une enquête d'évaluation contingente. Cette dernière a permis d'une part d'estimer le consentement à payer (CAP) des ménages et la valeur de l'eau, et d'autre part de construire la fonction de demande. La fonction de demande établit un lien précis entre une quantité d'eau souterraine de qualité et sa valeur en termes monétaires, ce qui permet d'effectuer des analyses hydroéconomiques.

Les résultats révèlent que sous l'effet du changement climatique, le bassin verra la recharge moyenne des eaux souterraines augmenter. Selon le scénario « optimiste », la recharge annuelle se situerait entre 3mm et plus de 455 mm de 2020 à 2039, et entre 40 mm et 420 mm sur la période 2040-2059 ; et selon le scénario « pessimiste », elle sera comprise entre 16 mm et 515 mm par an de 2020 à 2039, et entre 1 mm et 467 mm par an sur la période 2040-2059.

A l'issue de l'enquête d'évaluation contingente, il ressort que les ménages sont sensibles aux enjeux environnementaux, mais ils sont peu informés sur les eaux souterraines. La valeur économique totale estimée des eaux souterraines du BSCT est de plus de 3 milliards de francs CFA (soit 5 232 830,90 \$ US).

Le CAP_{moyen mensuel} des ménages est de 515,6 CFA (soit 0,86 \$ US), dont seulement 101 CFA pour la valeur d'usage.

Enfin, au terme d'une analyse hydroéconomique, il apparaît que le changement climatique entraînerait une surabondance d'eau et donc une diminution de la valeur des eaux souterraines. En revanche, la pollution des eaux souterraines entraînerait une diminution de la ressource disponible, ce qui se traduirait par une augmentation de sa valeur économique. Pour les gestionnaires, il serait donc plus avantageux de donner la priorité à la lutte contre les pollutions, plus préjudiciables en termes de disponibilité des eaux souterraines que les impacts du changement climatique.

Mots clés : Ressource en eau - Eaux souterraines – Renouvellement/Recharge – Bassin sédimentaire côtier togolais (BSCT) – Hydroéconomie – Valeur économique – Changements climatiques

ABSTRACT

The aquifers of the Togolese Coastal Sedimentary Basin (TCSB), the economic lung of the country, are increasingly exploited for various uses. This pressure, driven by rapid population growth, is exacerbated by the impacts of climate change. It results in a decline in groundwater levels, accompanied by pollution and major environmental changes (disturbance of the water cycle, loss of biodiversity, eutrophication, etc.). This situation calls for awareness and the adoption of effective measures for the sustainable management of the resource.

The research hypothesis guiding this work is that it is possible to associate an economic value with groundwater, depending on its availability, in order to make the issues related to this resource more understandable and to provide decision-makers with a tool to support sustainable management.

With the aim of improving the understanding of decision-makers and the general public regarding the management of the most important water supply resource in the TCSB, this study sought to assess groundwater recharge and its economic value. To this end, the impacts of climate change on groundwater recharge in the basin were characterized using the Thornthwaite and Mather (1957) water balance method, followed by a contingent valuation survey. The latter made it possible, on the one hand, to estimate households' willingness to pay (WTP) and the economic value of water, and on the other hand, to build the demand function. The demand function establishes a precise link between a given quantity of quality groundwater and its monetary value, thus allowing hydro-economic analyses to be conducted.

The results show that under climate change, the basin's average groundwater recharge will increase. According to the "optimistic" scenario, annual recharge would range between 3 mm and more than 455 mm from 2020 to 2039, and between 40 mm and 420 mm from 2040 to 2059. Under the "pessimistic" scenario, recharge would range between 16 mm and 515 mm per year from 2020 to 2039, and between 1 mm and 467 mm per year from 2040 to 2059.

The contingent valuation survey revealed that households are sensitive to environmental issues but poorly informed about groundwater. The estimated total economic value (TEV) of TCSB groundwater exceeds 3 billion CFA francs (about 5,232,830.90 USD). The average monthly WTP per household is 515.6 CFA (about 0.86 USD), of which only 101 CFA relates to use value.

Finally, the hydro-economic analysis shows that climate change would lead to water overabundance, thereby decreasing groundwater value. Conversely, groundwater pollution would reduce the available resource, resulting in an increase in its economic value. For resource managers, it would therefore be more beneficial to prioritize the fight against pollution, which is more detrimental to groundwater availability than the impacts of climate change.

Keywords: Water resource - Groundwater – Renewal/Recharge – Togolese coastal sedimentary basin (TCSB) – Hydroeconomy – Economic value – Climate change

INTRODUCTION

Les eaux souterraines comptent pour la plus grande partie de l'eau douce liquide sur Terre, environ 98-99% de cette ressource (Margat et Van der Gun, 2013). En Afrique, elles ont une importance capitale car plus de la moitié de la population dépend des eaux souterraines pour l'alimentation humaine et ses activités économiques (Carter et Bevan, 2008). En ce qui concerne l'approvisionnement en eau potable, 75 % de l'alimentation de la population africaine vient des eaux souterraines (AfDB, 2000). Sur un continent où les ressources humaines, financières et matérielles sont souvent limitées, les eaux souterraines ont l'avantage d'être généralement abondantes, accessibles toute l'année et de bonne qualité (MacDonald *et al.*, 2012). Cette disponibilité découle de deux autres grandes caractéristiques des eaux souterraines. Tout d'abord, elles sont protégées contre la pollution provenant de la surface par le pouvoir épurateur du sol. Elles ont donc moins besoin de traitement, ce qui les rend plus économiques. Cette isolation de la surface permet aussi une diminution de l'évapotranspiration qui pourrait affecter les eaux souterraines, ce qui crée un effet tampon qui réduit les variations saisonnières de la disponibilité de l'eau (Masiyandima et Giordano, 2007). Ces attributs constituent un avantage pour la réalisation de l'ODD6 (Garantir l'accès de tous à des services d'alimentation en eau et d'assainissement gérés de façon durable) (UN, 2018) et pour l'adaptation aux impacts du changement climatique.

Cette importance des eaux souterraines est illustrée dans le Bassin Sédimentaire Côtier Togolais (BSCT) en Afrique de l'Ouest, où elles ont facilité l'installation des populations et des industries, favorisant ainsi le développement socioéconomique local (Barry *et al.*, 2022). Les eaux souterraines ont contribué à faire de la zone occupée par le bassin, le poumon économique et le principal centre administratif du pays. Face au rôle vital des ressources en eau en général et des eaux souterraines en particulier, le pays a adopté en 2002 la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) comme mode de gouvernance. L'état togolais a ainsi mis en place un cadre législatif et institutionnel étoffé avec notamment : la loi portant code de l'eau (2010) , le Plan d'Action National de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PANGIRE) (MEAHV, 2010), la Politique Nationale de l'Eau (PNE, 2010), le Plan d'Action National pour le Secteur de l'Eau et de l'Assainissement (PANSEA) (MEAHV, 2015), etc.

Cependant en raison des faibles ressources allouées, plus de vingt ans après l'adoption de la GIRE, peu de progrès ont été réalisés sur la voie d'une gouvernance durable des ressources en eau dans le pays (GRET et DRE-MEHV, 2021). A ce jour, seulement 30 % des actions planifiées par le PANGIRE ont été mises en œuvre, de plus ces actions concernent principalement les eaux de surface (GRET et DRE-MEHV, 2021).

Généralement, ces initiatives sont entreprises avec le soutien de structures transnationales, spécialisées et dotées de ressources conséquentes, dont le Togo est membre, Il s'agit notamment de l'Autorité du Bassin du Mono (ABM) et de l'Autorité du Bassin de la Volta (ABV). Pendant ce temps, les conséquences du retard dans la mise en place de la GIRE s'observent très clairement dans le BSCT et plus largement partout dans le pays. Cela s'exprime par des problèmes de pollution et de surexploitation des eaux souterraines, ainsi que par l'apparition de conflits d'usage entre différents utilisateurs (Barry *et al.*, 2022). Ces menaces sont exacerbées avec l'intensification de l'activité humaine et les manifestations du changement climatique (Djongon, 2022; MERF, 2022).

Cette dualité entre le besoin d'avoir recours à des eaux souterraines vitales pour les populations, et les faibles efforts mis en œuvre pour assurer leur gestion durable, peut s'expliquer par la « nature cachée » des ressources en eau. En effet, contrairement aux eaux de surface, l'incapacité d'avoir une représentation des eaux souterraines rend le public et les décideurs peu sensibles aux variations de quantité et/ou de qualité de cette ressource (López-Vera, 2012; Schotting, 2009). Contrairement aux eaux de surface, les eaux souterraines ne sont pas perçues comme éventuellement menacées ou sous l'effet d'un danger imminent. En outre, comme toute ressource libre d'accès, les eaux souterraines sont menacées par : l'intérêt personnel qui prime sur l'intérêt collectif comme le suggère « la tragédie des biens communs » (Hardin, 1968), ou encore par des opinions rassurantes comme « l'effet Gisser-Sanchez » (Allen et Gisser, 1984). Cet « effet Gisser-Sanchez » théorise en effet que les usagers disposent d'une capacité naturelle à s'auto-réguler, et à gérer les ressources de manière durable. Cette idée est actuellement remise en question. (Esteban et Albiac, 2011; Koundouri, 2004)

Dans le BSCT, le réseau de surveillance des eaux souterraines est peu développé, et les eaux souterraines ont peu été étudiées. En effet, les seules études de référence disponibles sur l'hydrogéologie du BSCT se résument aux travaux de Slansky (1959), Akouvi *et al.* (2008), Gnazou *et al.* (2017), et plus récemment à ceux de Djongon (2022). Parmi ces travaux, à l'exception de ceux de Slansky (1959), tous les autres se focalisent sur des aspects de géochimie avec une forte composante isotopique dont la compréhension et l'appropriation n'est pas à la portée de tous. En outre, les travaux des hydrogéologues sont généralement rédigés dans un langage scientifique et technique qui peut être difficile à saisir par les décideurs et le grand public. Ainsi les concepts liés à l'hydrogéologie, tels que la recharge, la vulnérabilité, l'intrusion marine, etc., peuvent être difficiles à appréhender. Étant donné que la résolution d'un problème mal connu ou

compris peut-être complexe, il est essentiel que les résultats produits soient présentés de façon compréhensible et accessibles, afin de mieux informer sur l'état des eaux souterraines dans le BSCT.

Ce côté intangible et abstrait des eaux souterraines est un frein à la mise en œuvre de mesures de gestion durable des eaux souterraines (Schotting, 2009). Cette perception biaisée s'aggrave encore davantage dans un contexte comme celui du Togo, où les ressources de l'État sont limitées. A titre d'illustration, en moyenne moins de 5 % du budget du Ministère de l'Eau du Togo est destiné chaque année à la « composante ressources en eau ». La priorité est habituellement accordée à des problèmes tout aussi urgents, mais beaucoup plus concrets, tels que la santé, la sécurité, etc.

Pour améliorer la compréhension des enjeux liés aux eaux souterraines, nous avons choisi de tester une approche innovante en tentant de compléter le travail des hydrogéologues avec des évaluations économiques. L'objectif est de déterminer les coûts et des bénéfices liés à chaque état des eaux souterraines obtenus à partir des études hydrogéologiques. La présentation des coûts et les bénéfices en valeur monétaire comprise et accessible à tous. Au quotidien, la monnaie est un élément clé des échanges en tant qu'unité de mesure, un dénominateur commun pour les comparaisons et l'attribution de valeur (Brunner et Meltzer, 1971; Maurer, 2006).

En ce qui concerne les ressources naturelles, la monétisation permet une meilleure compréhension des différentes composantes du bien-être offert par les biens et services environnementaux, mais aussi à mettre les bénéfices environnementaux en regard des coûts des politiques (Pappalardo, 2010). En ce qui concerne les eaux souterraines, la monétisation a pour objectif de donner une valeur à l'eau. Elle se révèle très utile en matière de gouvernance des ressources en eau, car le pouvoir et l'équité reposent essentiellement sur les valeurs que l'on attribue à l'eau. En effet, ne pas attribuer assez de valeur à l'eau dans tous ses usages constitue une cause majeure, voire un symptôme, de la négligence politique vis-à-vis de l'eau et de la mauvaise gestion de celle-ci (UNWater, 2021).

De manière concrète, attribuer une valeur à un bien environnemental en général est un exercice complexe, car il est rare de trouver un consensus entre les différentes approches (Bateman *et al.*, 2006; Freeman, 2003; Hoyos, 2010; Schkade et Payne, 1994; Wilson et Hoehn, 2006). La complexité est encore plus grande en ce qui concerne les ressources en eau, car la manière d'évaluer la valeur de l'eau varie non seulement d'un groupe de parties prenantes à l'autre, mais aussi au sein de chacun d'entre eux (UNWater, 2021).

C'est la raison pour laquelle il y a moins de travaux consacrés à la valeur de l'eau en général et à celle des eaux souterraines en particulier.

Cette thématique de la valeur des eaux souterraines n'a été réellement discutée qu'à partir de 2021 avec le Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau, intitulé « La Valeur de l'eau » (UNWater, 2021). Ensuite, le rapport de la Banque Mondiale, intitulé *La richesse cachée des nations : l'économie des eaux souterraines à l'heure du changement climatique* (Rodella et al., 2023) a fourni des données et des éléments nouveaux qui permettent une meilleure compréhension de la valeur de cette ressource, des coûts de sa mauvaise gestion et de la manière dont on pourrait l'exploiter plus efficacement. Toutefois, ce rapport ne fournit aucune nouvelle information sur les méthodes d'estimation de la valeur des eaux souterraines.

Compte tenu de la problématique précédemment exposée, ce travail de doctorat visait à ***associer une valeur économique aux eaux souterraines disponibles dans les aquifères peu étudiés et suivis tels que ceux du BSCT.***

L'hypothèse formulée est que, dans le contexte du BSCT, une meilleure connaissance de leur valeur économique des eaux souterraines faciliterait la mise en œuvre des mesures pour une gestion durable des ressources en eau, en rendant plus accessibles les enjeux liés à ces ressources.

Pour valider cette hypothèse, une méthodologie a été développée pour traduire les enjeux liés aux eaux souterraines en termes de valeur économique, afin d'en améliorer la compréhension.

Ce travail s'est articulé autour de trois objectifs spécifiques : (i) caractériser les impacts du changement climatique sur les eaux souterraines du BSCT, (ii) estimer la valeur économique de ces ressources, et (iii) développer une approche hydroéconomique pour simuler les impacts anthropiques et climatiques sur ces ressources, afin d'appuyer une gestion intégrée et durable.

Objectif spécifique 1 : Caractériser les impacts des changements climatiques et des actions anthropiques sur les eaux souterraines du BSCT.

Les eaux souterraines jouent un rôle essentiel pour les populations, les collectivités et les gouvernements, ce qui rend les effets des activités humaines et des changements climatiques sur cette ressource

particulièrement préoccupants. Comprendre et anticiper ces impacts est une condition majeure pour soutenir un développement socio-économique et environnemental durable, grâce à des choix et des décisions mieux éclairés.

Le principal enjeu consiste à connaître et prévoir, dans le temps et dans l'espace, les quantités disponibles ainsi que l'état de qualité de la ressource, afin de disposer d'éléments de comparaison et de suivi pertinents.

Dans cette perspective, une évaluation des impacts du changement climatique sur la recharge des eaux souterraines a été réalisée. En effet, l'évolution de la recharge des eaux souterraines constitue l'un des indicateurs significatifs de l'influence exercée par la variabilité du climat, au même titre que la dégradation de la qualité causée par l'augmentation de l'évaporation ou la baisse des niveaux d'eau causée par une surexploitation. Les données relatives aux impacts anthropiques utilisées ici proviennent d'une thèse en cotutelle sur la vulnérabilité des aquifères côtiers et servent de base de référence pour ce travail.

Objectif spécifique 2 : Estimer la valeur économique de l'eau souterraine en fonction de sa disponibilité.

Le deuxième objectif vise à attribuer une valeur économique aux ressources en eaux souterraines disponibles dans le bassin étudié. Ressource collective par excellence, l'eau souterraine se caractérise par une faible possibilité d'exclusion et un contrôle limité, ce qui n'incite pas toujours les usagers à adopter des comportements responsables pour la préserver. Des mécanismes institutionnels s'avèrent donc nécessaires, notamment en s'appuyant sur les principes du « préleveur-payeur » et du « pollueur-payeur ». Cependant, l'adhésion à ces principes demeure souvent difficile à obtenir.

En partant de l'hypothèse selon laquelle plus une ressource est disponible (au sens de facilement mobilisable et exploitable), plus son coût d'accès pour les usages est relativement abordable, il est à prévoir que ces derniers préfèrent les options de gestion des eaux souterraines les plus durables, à condition qu'ils aient une meilleure connaissance des bénéfices individuels et collectifs qu'ils en tirent (Martin, 1999).

Cette estimation de la valeur économique permettrait, par ailleurs, d'évaluer dans quelle mesure la prise en compte explicite de cette valeur contribue à renforcer l'acceptabilité sociale des mesures de gestion durable, en clarifiant les avantages partagés et en légitimant les actions mises en œuvre.

Objectif spécifique 3 : Développer une approche hydroéconomique de simulation des impacts anthropiques et climatiques sur les eaux souterraines.

Pour assurer une gestion durable des eaux souterraines, il est indispensable de disposer des outils de planification et d'anticipation (plans stratégiques, lois et règlements, modèles, etc.) adéquats. Cependant, les travaux d'hydrogéologie intégrés à ces outils demeurent souvent peu compréhensibles pour les décideurs et le grand public, ce qui souligne la nécessité de recourir à des outils de vulgarisation supplémentaires, comme les modèles hydroéconomiques. Ces derniers offrent un cadre cohérent pour représenter à l'échelle régionale les composantes hydrologiques, techniques, environnementales et économiques des systèmes de ressources en eau (Harou *et al.*, 2009).

Adopter une telle approche suppose de développer une vision prospective, fondée sur l'élaboration de scénarios issus de l'analyse des données disponibles et de la compréhension des dynamiques en jeu. Cette démarche, qui combine des modèles sur les ressources en eau orientés vers la simulation et les modèles économiques orientés vers l'optimisation, contribuerait à une gestion plus rationnelle et intégrée de la ressource.

La complexité des systèmes hydrogéologiques rend cependant leur modélisation délicate, notamment lorsqu'il s'agit d'intégrer les interactions liées aux activités humaines. Les modèles économiques, en revanche, restituent plus aisément les comportements des usagers et éclairent leur adhésion aux différentes options de gestion, en articulant l'offre et la demande.

L'objectif est ainsi de coupler et d'articuler les modèles hydrogéologiques et économiques afin de combiner leurs atouts respectifs et promouvoir une gestion plus efficace et intégrée des eaux souterraines.

Compte tenu de ces objectifs le travail de thèse présenté ici est structuré en quatre chapitres :

Le chapitre 1 définit les fonctions essentielles des eaux souterraines, analyse les pressions qu'elles subissent, et expose le cadre dans lequel s'inscrit cette thèse, à savoir l'estimation de leur valeur économique dans un contexte de gestion durable. Dans une seconde étape, l'attention se porte sur le bassin sédimentaire côtier togolais (BSCT), avec un focus particulier sur les enjeux et défis spécifiques liés aux eaux souterraines, qui constituent l'axe central de ce travail de recherche.

Le chapitre 2 traite de la mise en œuvre et du couplage des méthodologies hydrogéologiques et économiques utilisées dans le cadre de ces travaux. Il débute par la présentation de l'approche de caractérisation des impacts anthropiques et du changement climatique sur les eaux souterraines du BSCT.

Il se poursuit avec l'exposé de l'approche d'estimation de la valeur économique des eaux souterraines, et se termine par la démarche pour l'élaboration de la fonction de demande.

Le chapitre 3 rapporte et discute les résultats obtenus après l'évaluation des impacts anthropiques et climatiques, et l'estimation des différentes valeurs économiques des eaux souterraines. Le chapitre se termine par une proposition d'outil d'évaluation hydroéconomique et une illustration de son utilisation dans le cadre d'une étude de cas.

Le chapitre 4 est consacré à la conclusion et aux recommandations. Les principaux résultats des travaux sont rappelés, les perspectives qu'ils offrent sont présentées, et les contributions de ce travail en faveur de la valorisation économique et de la préservation durable des eaux souterraines sont soulignées.

CHAPITRE 1

DESCRIPTION DU CADRE THEORIQUE ET DE LA ZONE D'ETUDE

Dans ce chapitre sont tout d'abord exposés des concepts et théories liés à l'importance des eaux souterraines et aux menaces qui pèsent sur elles. Le développement des idées part de la situation à l'échelle mondiale, avant de porter une attention particulière aux réalités du continent africain, et plus spécifiquement à celles de l'Afrique subsaharienne. Dans un second temps, l'analyse se recentre sur la zone d'étude, à travers une description détaillée des aquifères du BSCT, en mettant en lumière les principaux enjeux et défis de gestion qui y sont associés.

1.1 Cadre théorique

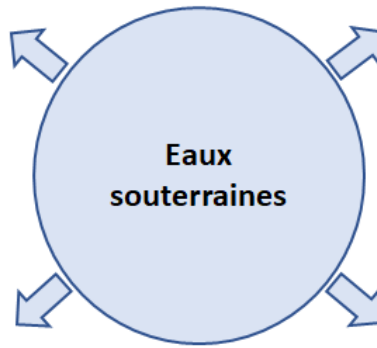
1.1.1 Fonctions et services des eaux souterraines

Si les **fonctions** sont liées aux différents rôles que peuvent jouer les eaux souterraines, les **services** sont les avantages ou les bénéfices qui en découlent. Les eaux souterraines assurent deux fonctions principales : une *fonction de stockage* de la réserve d'eau (stock) et une *fonction d'écoulement* dans les cours d'eau, les lacs et les zones humides (décharge) (Boyle *et al.*, 1994). L'eau souterraine « stockée » et celle qui va « s'écouler » vont générer un certain nombre de flux de services potentiels.

Les écosystèmes des eaux souterraines fournissent des services d'une immense valeur sociétale et économique (Kebede, 2013), tels que ; 1) la purification de l'eau et son stockage en bonne qualité pendant des décennies et des siècles, 2) la biodégradation active des contaminants anthropogéniques et l'inactivation et l'élimination des agents pathogènes, 3) le recyclage des nutriments, et 4) l'atténuation des inondations et des sécheresses (Griebler et Avramov, 2015). La figure 1 présente un aperçu des services les plus courants fournis par les systèmes d'eau souterraine aux personnes. Les différents rôles de ces services sont mis en évidence en les subdivisant en quatre groupes, tels que définis par la classification des services écosystémiques du Millennium ecosystem assessment (2005), *i.e.* services d'approvisionnement, de soutien, de régulation et culturels. Les services fournis par les eaux souterraines peuvent également être classés en deux catégories (National Research Council, 1997): les *services In Situ* (qui regroupent les services offerts sur le site de de l'aquifère) et les usages extractifs (pour tous les bénéfices tirés de l'extraction des eaux souterraines).

Services d'approvisionnement

- Eau domestique
- Eau d'irrigation
- Eau industrielle
- Énergie géothermique



Services de soutien

- Sources
- Débit de base des cours d'eau
- Maintien des phreatophytes et des milieux humides tributaires des eaux souterraines
- Soutien des communautés microbiennes souterraines

Services de régulation

- Tampon entre les périodes humides et sèches
- Atténuation des effets des changements climatiques
- Réduction de l'érosion et des inondations
- Tampon de la chimie et de la température de l'eau
- Purification de l'eau (pathogènes; contaminants)

Services culturels

- Eau minérale
- Source thermique
- Valeur spirituelle
- Valeur esthétique
- Bioindication

Figure 1: Vue d'ensemble des services importants fournis par les systèmes d'eau souterraine, regroupés selon la classification des services écosystémiques de l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire. Modifiée d'après van der Gun (2019)

1.1.2 Menaces sur les eaux souterraines

De nombreuses menaces pèsent sur les eaux souterraines. Il s'agit de leur surexploitation, pouvant entraîner une baisse du niveau des nappes, et de la perte de la qualité de ces eaux.

- **Surexploitation et baisse du niveau des nappes**

La surexploitation d'une nappe souterraine est communément comprise comme une exploitation excessive par rapport à une exploitation considérée comme normale (Margat, 1977). Elle entraîne un tarissement des points d'eau importants (puits, sources) et dépasse celui du renouvellement des réserves (Collignon, 1994). À l'échelle planétaire, les satellites GRACE ont révélé que 21 des 37 principaux aquifères mondiaux s'épuisent (Richey *et al.*, 2015). À l'échelle local il ne fait aucun doute que l'utilisation des eaux souterraines est supérieure à la recharge dans de nombreuses régions du monde (Giordano, 2009), notamment en ce qui concerne les aquifères profonds (Konikow, L. F., 2015). Cette surexploitation des eaux souterraines est causée en majorité par l'agriculture. Plus de 70% des prélèvements mondiaux sont destinés à l'irrigation (Lall *et al.*, 2020). L'impact de cette surexploitation s'observe dans de nombreuses grandes villes des Amériques, d'Asie, d'Europe et du Moyen-Orient avec un épuisement des eaux

souterraines accompagné de problèmes structurels (affaissement des sols), d'inondation et de salinisation, entre autres (Chatterjee *et al.*, 2006; Foster, Stephen *et al.*, 2000; Holzer et Johnson, 1985; Kakar *et al.*, 2020; Kaneko et Toyota, 2011; Sowter *et al.*, 2016; Taniguchi, 2011). Les impacts se font également sentir sur le plan social (Brett-Crowther, 2009; Easter et Hearne, 1995), économique (augmentation du coût de forage et réduction des rendements des puits (Giordano, 2009)) et vis-à-vis des écosystèmes (Bergkamp et Cross, 2006; Sophocleous, 2003).

La surexploitation des eaux souterraines est un problème mondial mais l'Afrique Sub-Saharienne semble être épargnée (Konikow, Leonard F. et Kendy, 2005; Mazzoni *et al.*, 2018), en raison du faible recours à l'irrigation. Généralement, quand des baisses très importantes du niveau piézométrique apparaissent localement, elles ne sont pas seulement liées à une surexploitation globale des aquifères, mais aussi à des anomalies géologiques locales qui empêchent d'exploiter convenablement la ressource en eau (aquifères superposés ou aquifère avec une transmissivité très faible, comme les amphibolites que l'on rencontre dans la sous-préfecture de Karimama au nord Bénin) (Collignon, 1994). La surexploitation s'observe plutôt dans les zones urbaines (Barry *et al.*, 2022; Oiro *et al.*, 2020), notamment en Afrique du Sud (van Rooyen *et al.*, 2020)

- **Perte de la qualité des eaux souterraines**

La pollution de l'eau souterraine est le processus par lequel des contaminants pénètrent dans le système aquifère et rendent l'eau inutilisable ou dangereuse pour la santé humaine et pour les écosystèmes associés. La contamination des eaux souterraines est un problème mondial qui a un impact considérable sur la santé humaine et les services écologiques (Li *et al.*, 2021). Par exemple, environ 20 % des zones irriguées dans le monde sont, à des degrés divers, touchées par la salinisation secondaire des eaux souterraines. Les causes des problèmes de qualité des eaux souterraines peuvent être regroupés en deux catégories: les phénomènes naturels tels que la présence d'arsenic ou de fluorure, et la dégradation des ressources en eaux souterraines par l'action de l'homme (Giordano, 2009). La contamination au fluorure et à l'arsenic découle de la mobilisation par l'eau souterraine de ces éléments géogéniques déjà présents dans le sous-sol, tandis que les autres pollutions sont causées par une introduction de composés chimiques et biologiques étrangers dans le système aquifère. Ces composés sont principalement d'origine agricole (engrais, pesticides, etc., d'origine industrielle (hydrocarbures, produits de refroidissement, etc.), d'origine municipale (déchets municipaux, sels pour le dégivrage des routes, etc.) d'origine domestiques (latrines, fosses septiques, etc.). La dégradation de la qualité des eaux souterraines découle donc principalement de l'interaction complexe entre le cycle hydrologique naturel et les altérations physiques de la surface de la

terre, l'exploitation des ressources en eau et les émissions de déchets provenant des activités anthropiques telles que l'agriculture, l'industrie et l'urbanisation (Burri *et al.*, 2019).

C'est ainsi que de nombreuses substances à la toxicité reconnue ou non encore reconnue pour l'environnement et la santé humaine se retrouvent dans les eaux souterraines (Kim *et al.*, 2010; Musolff *et al.*, 2010; Wakida et Lerner, 2005). De plus, la dynamique des eaux souterraines fait que lorsqu'un aquifère est contaminé, il peut devenir inutilisable pendant des décennies. (Burri *et al.*, 2019).

Aujourd'hui, la dégradation de la qualité des eaux souterraines a principalement une origine anthropique. Elle est liée à la croissance rapide de la population mondiale, qui se caractérise par poussée de l'urbanisation, de l'industrialisation, et de la production agricole. Les pays les plus touchés par ces changements globaux sont ceux qui connaissent un développement économique rapide, dont beaucoup sont situés en Asie (Li *et al.*, 2021).

En Afrique, les eaux souterraines sont de plus en plus menacées par la pollution due à l'urbanisation, au développement industriel, aux activités agricoles et minières, aux mauvaises pratiques d'assainissement et à la surexploitation due à la demande croissante pour satisfaire les besoins humains et agricoles (Gaye et Tindimugaya, 2018). Mais les inquiétudes les plus importantes sont liées aux activités minières (Collignon, 1994), souvent illégales, et à la pollution urbaine (Lapworth *et al.*, 2017) liée aux déchets municipaux, aux sels de dégivrage, aux décharges, aux égouts, etc. Ceci fait que dans l'ensemble, les eaux souterraines devraient être traitées avant d'être consommées, ce qui n'était pas forcément le cas dans un passé récent (Masindi et Foteinis, 2021), où l'eau souterraine pouvait être consommée directement ou sans traitement majeur.

Pour protéger les eaux souterraines contre la pollution, les hydrogéologues utilisent fréquemment l'estimation de leur vulnérabilité. Les auteurs distinguent la vulnérabilité intrinsèque de la vulnérabilité spécifique (Bachmat et Collin, 1987; Foster, SSD, 1987; Vrba et Zaporozec, 1994). Pour définir le premier terme, on se base uniquement sur les paramètres hydrogéologiques (recharge, nature du sol, topographie, etc.), tandis que pour le second terme, on se base sur les impacts potentiels de l'occupation du sol et des contaminants (Margat et Van der Gun, 2013; Owen *et al.*, 2010; Stigter *et al.*, 2005). En croisant les potentielles sources de pollutions (c'est-à-dire les aléas) avec la vulnérabilité, il est possible de caractériser le risque de pollution des eaux souterraines. Il s'agit de la probabilité qu'une pollution anthropique compromette la qualité des eaux souterraines au-delà des seuils acceptables (Morris et Foster, 2006).

1.1.3 Pression climatique sur les eaux souterraines en Afrique

Les conséquences du changement climatique vont affecter le cycle de l'eau et toutes ses composantes (Figure 2). Le diagramme de la figure 2 présente les impacts naturels du changement climatique sur les eaux souterraines. Il établit un lien entre les principaux facteurs climatiques — hausse des températures, modification du régime des précipitations, intensification des événements extrêmes et élévation du niveau de la mer — et leurs effets directs sur les systèmes aquifères : diminution ou altération de la recharge, baisse des niveaux piézométriques, intrusion saline en zones côtières et dégradation de la qualité de l'eau. Ces perturbations influencent à leur tour la disponibilité de la ressource et compromettent le fonctionnement des écosystèmes dépendants des eaux souterraines, tels que les zones humides et la végétation phreatophyte. Le diagramme met en évidence les dynamiques en cascade ainsi que les rétroactions susceptibles d'affaiblir la résilience des systèmes hydriques face aux évolutions climatiques futures.

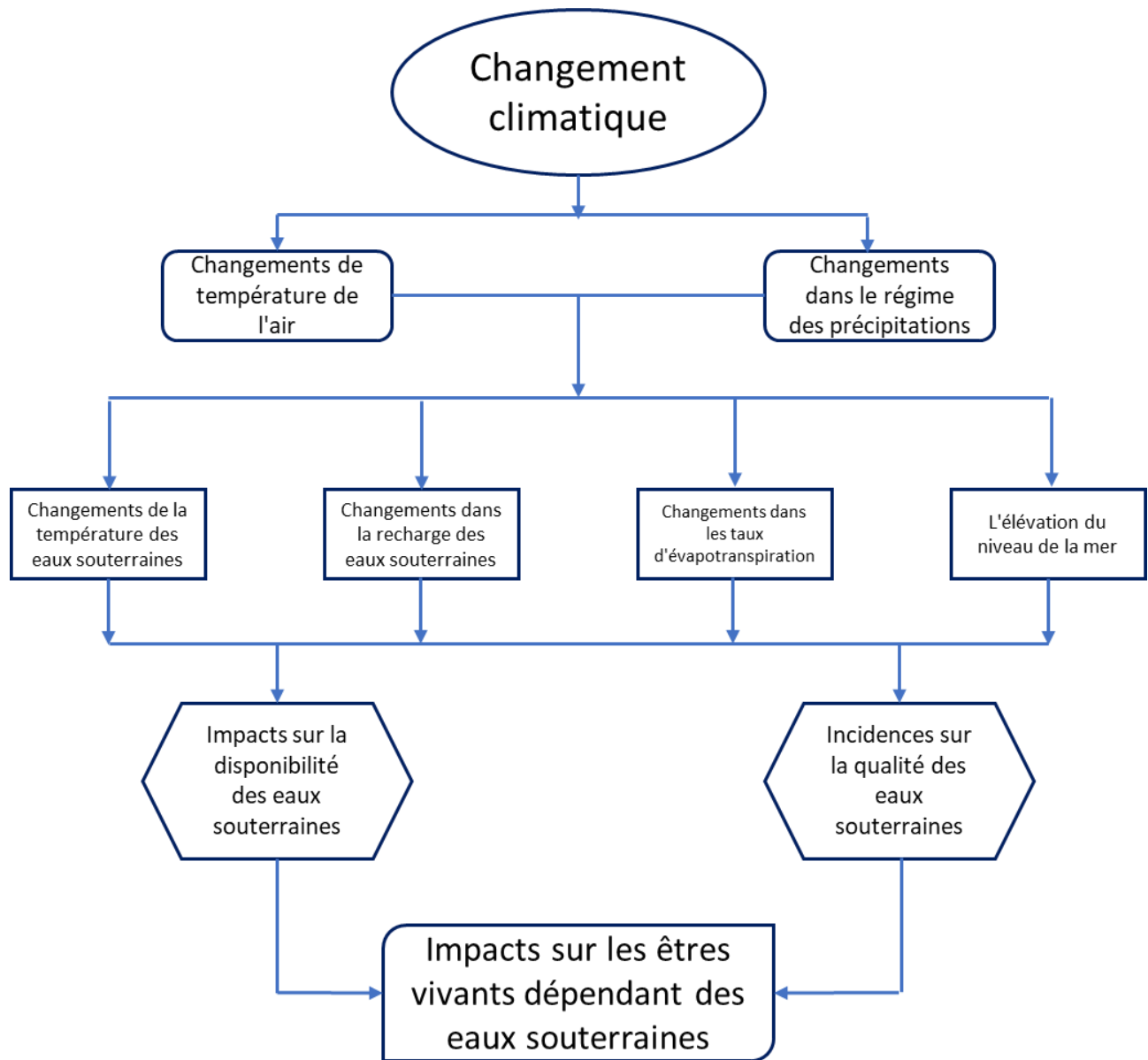


Figure 2: Diagramme conceptuel des impacts naturels du changement climatique sur les eaux souterraines (adaptée d'après Swain *et al.* (2022))

De nombreux travaux et recherches sont donc faits dans ce sens à travers le monde afin de prévoir ces impacts, les atténuer ou s'adapter. Mais les évaluations actuelles de impacts de la variabilité et des changements climatiques historiques et projetés sur les ressources en eau généralement intègrent peu les eaux souterraines (Taylor *et al.*, 2009). Ce retard dans la caractérisation des impacts du changement climatique sur les eaux souterraines tend à se résorber rapidement, grâce à de nombreux travaux menés à travers le monde au cours de la dernière décennie (Ali *et al.*, 2012; Armandine Les Landes *et al.*, 2014; Corona *et al.*, 2018; Green *et al.*, 2011; Gurdak, 2017; Havril *et al.*, 2018; Kløve *et al.*, 2014; Lauffenburger *et al.*, 2018; Lemieux *et al.*, 2015; Liu, 2011; Meixner *et al.*, 2016; Quintana Ashwell *et al.*, 2018; Rathay *et*

al., 2018; Rosenberg *et al.*, 1999; Russo et Lall, 2017; Smerdon, 2017; Steward et Allen, 2016; Vrzel *et al.*, 2019). A ce jour, les projections des impacts directs du changement climatique sur les systèmes d'eaux souterraines demeurent incertaines (Taylor, R. G. *et al.*, 2012). Cette incertitude s'explique par les données d'entrées et la précision fournies par les modèles climatiques globaux (MCG). Ils génèrent des scénarios climatiques différents, notamment de précipitations, pour les mêmes scénarios d'émissions (Bates *et al.*, 2008).

En Afrique, les recherches sur les impacts du changement climatique sur les eaux souterraines suscitent également de plus en plus d'intérêt (Boughariou *et al.*, 2018; Kahsay *et al.*, 2018; Mileham *et al.*, 2009; Nkhonjera et Dinka, 2017), en raison de la dépendance croissante du continent vis-à-vis de cette précieuse ressource (Braune et Xu, 2010). Cet intérêt s'explique aussi par une variabilité hydro-climatologique forte à l'échelle intra-annuelle, même si elle est beaucoup moins développée à l'échelle interannuelle (Taylor *et al.*, 2009). Cette caractéristique pourrait permettre à la ressource de servir de tampon contre les effets des changements climatiques. Toutefois, de telles recherches sont difficiles à mener sur le continent africain, en raison : (i) du manque de données (en raison des faibles ressources institutionnelles et techniques) qui accentue les incertitudes, (ii) des difficultés de mise à l'échelle (en raison des modèles climatiques inadaptés, et du caractère transfrontalier des aquifères), et (iii) des difficultés à harmoniser les points de vue et les finalités des modèles (durabilité qui affecte la ressource, et/ou stress hydrique qui affecte les populations).

1.1.4 Valeur des eaux souterraines

Dans le contexte des ressources naturelles, le mot « valeur » est principalement utilisé de trois façons (UNWater, 2021) :

- **La valeur de change** : le prix d'un bien ou d'un service sur le marché (c'est-à-dire, le prix du marché) ;
- **L'utilité** : la valeur d'usage d'un bien ou d'un service, qui peut être très différente du prix du marché (par exemple, l'eau est très peu chère sur le marché, mais sa valeur d'usage est très élevée — pour les diamants et autres produits de luxe, c'est plutôt l'inverse qui se produit) ;
- **L'importance** : l'appréciation ou la valeur émotionnelle que nous attachons à un bien ou à un service donné (par exemple, les émotions ou l'expérience spirituelle que certaines personnes ont en contemplant des paysages aquatiques ou l'importance accordée à l'eau par la culture ou la religion).

Le terme de **valeur** doit être pris dans un sens générique, de sorte que les valeurs associées aux réductions de la quantité ou de la qualité des eaux souterraines peuvent être considérées comme des pertes, et inversement, les augmentations sont considérées comme des avantages (Boyle *et al.*, 1994). Par conséquent, la valeur des eaux souterraines peut tendre vers une augmentation ou une diminution.

Le principe N°4 de la Déclaration de Dublin de janvier 1992 lors de la Conférence internationale sur l'eau et l'environnement (ICWE), selon lequel : « *L'eau, utilisée à de multiples fins, a une valeur économique et devrait donc être reconnue comme bien économique* », a établi un consensus quant à l'utilisation des outils économiques pour une gestion équitable et durable des ressources en eau. En effet, face à la multiplicité des usages et des acteurs ainsi qu'à la complexité des interactions, la monétisation est une approche intéressante. La commodité de la monnaie découle de sa familiarité, de l'habitude des gens d'utiliser l'argent dans les échanges et de faire des compromis psychologiques avec l'aide de ce dénominateur commun (Griffin, 2016). L'analyse économique vise à mesurer le bien-être des individus et de la société, et de fait, les compromis réalisés entre les différents biens et services traduisent leur contribution à ce bien-être. Ce sacrifice ou ce compromis se traduit par le *consentement à payer* (CAP) pour avoir de l'eau ou ne pas la perdre, ou par le *consentement à recevoir* (CAR) une compensation pour renoncer à l'eau ou accepter une perte. Les changements dans ce sacrifice ou compromis s'expriment par la *valeur marginale de l'eau*, c'est-à-dire la valeur d'une unité de plus (ou de moins) d'eau (Griffin, 2016).

La valeur économique de l'eau est donc le « sacrifice » que l'on est prêt à consentir pour avoir accès à l'eau. Le schéma des composantes de la valeur de l'eau (figure 3) met en lumière les différentes dimensions — économiques, écologiques et culturelles — qui interviennent dans son évaluation. Il distingue la valeur d'usage direct, liée aux usages productifs (agriculture, eau potable, industrie), la valeur d'usage indirect, associée aux services écosystémiques (recharge des nappes, régulation des crues), ainsi que la valeur non d'usage, correspondant à l'importance patrimoniale, culturelle ou écologique de l'eau, indépendamment de son exploitation. S'y ajoute la valeur d'option, qui reflète l'intérêt de préserver la ressource pour des usages futurs incertains. Ensemble, ces composantes forment la *valeur économique totale* (VET) de l'eau.

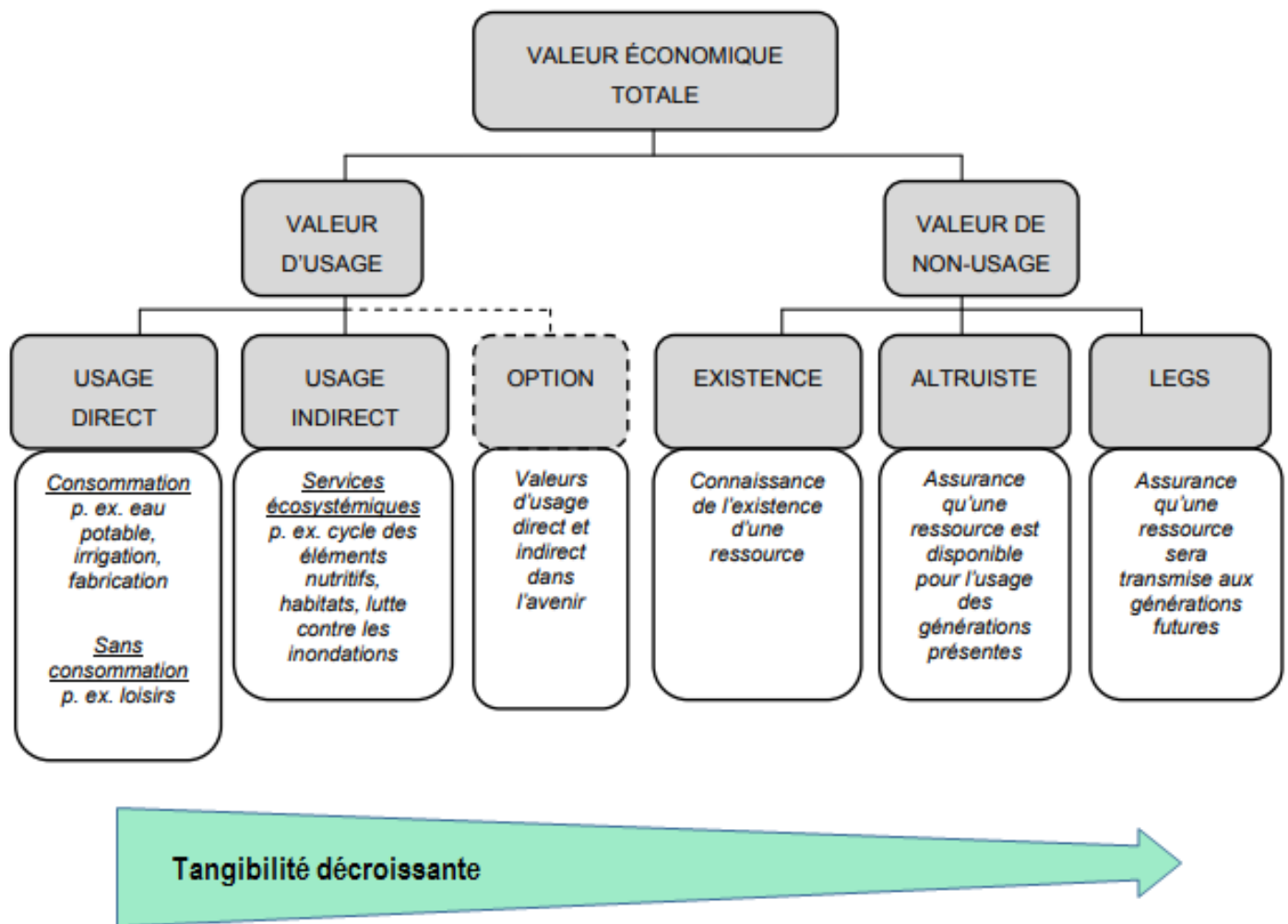


Figure 3: Composantes de la valeur de l'eau (adaptée d'après CCME (2010))

Celle-ci comprend la valeur d'usage et la valeur de non-usage (Figure 3), avec une tangibilité qui tend à diminuer de la valeur d'usage vers la valeur de non-usage, et inversement avec une quantification monétaire qui devient plus complexe (Sawyer *et al.*, 2001).

Bien que l'eau soit essentielle à toute forme de vie, l'approche économique ne lui attribue pas une valeur infinie. En pratique, seule la valeur d'usage est généralement évaluée, car elle est plus facilement observable et quantifiable. Elle peut donc être intégrée dans les approches d'analyses de politiques et de projets telles que : *l'analyse cout-efficacité* (Girard *et al.*, 2015), *l'analyse cout-avantage* (Becker et Friedler, 2012; Messner *et al.*, 2006), *l'analyse multicritère* (Arriaza *et al.*, 2002; Darouich *et al.*, 2014; Hermans *et al.*, 2007; Latinopoulos, 2007; Messner *et al.*, 2006; Rodrigues *et al.*, 2013), *les modèles bioéconomiques* (CCME, 2010).

Le CAP et le CAR ne reflétant pas toujours la valeur réelle de l'eau, apparaissent alors les concepts de *surplus du consommateur* (le bénéfice obtenu gratuitement par l'acheteur), et de *surplus du producteur* (le profit additionnel obtenu par le vendeur). D'autre part, lorsque l'eau devient rare et que l'on doit faire des choix entre plusieurs usages, on s'appuie sur le *cout d'opportunité* qui traduit la valeur de la meilleure utilisation de l'eau et sur la notion d'efficacité économique lorsque les allocations produisent le bénéfice optimal.

Même en se limitant à la valeur d'usage, la quantification n'en est pas plus aisée, car l'eau est un bien économique particulier qui : *i)* peut être public, privé ou commun, *ii)* peut être à usage consommatif ou non, *iii)* est caractérisé par un coût d'exclusion élevé, et *iv)* a des particularités selon que l'on se situe à la source, sur le site, en amont ou en aval. Il existe de nombreuses méthodes d'évaluation économique de l'eau, chacune avec ses forces et leurs faiblesses et aucune classification ne fait l'unanimité (Young et Loomis, 2014). Selon Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement (CCME, 2010) les principales méthodes d'évaluation économique applicables aux enjeux de la gestion de l'eau sont ***les méthodes d'études primaires*** et ***les méthodes d'études secondaires***.

Les méthodes d'études primaires génèrent des données d'évaluation économique de première main spécifiquement destinées à guider un contexte décisionnel particulier. Elles comprennent les méthodes du prix du marché et de la fonction de production, les méthodes des préférences révélées et les méthodes des préférences exprimées. Les méthodes d'études secondaires (méthode de transfert de bénéfices) dont le processus de base consiste à identifier des données d'évaluation économique pertinentes à partir des résultats d'études existantes, puis à « transférer » ces données vers le contexte décisionnel d'intérêt.

Les méthodes d'études primaires

- *Les méthodes du prix du marché* : méthodes qui prennent en considération les valeurs d'usage qui découlent de l'offre de biens ou de services directement observables sur les marchés réels (CCME, 2010).
- *Les méthodes des facteurs de production* : méthodes axées sur le lien indirect susceptible d'exister entre une ressource particulière (p. ex., l'eau) et la production d'un bien marchand (p. ex., produits agricoles). La valeur d'usage de l'eau est établie d'après une évaluation des variations de production attribuables à des variations (quantitatives ou qualitatives, p. ex.) de l'eau comme facteur de production (CCME, 2010).
- *Les méthodes des préférences révélées* : consistent à déduire la valeur de l'eau en observant les comportements des individus vis-à-vis des biens et services marchands liés à l'usage de l'eau. Il s'agit de la méthode des prix hédoniques (Lansford et Jones, 1995; Loomis et Feldman, 2003), la

méthode des coûts de transport (Smith et Desvousges, 1985), les modèles de demande pour sites de loisirs multiples. Elles s'appuient sur des données économétriques qualitatives et quantitatives.

- *Les méthodes des préférences exprimées* : la valeur de l'eau est estimée en la demandant directement aux usagers par des questionnaires d'enquêtes. On distingue, l'évaluation contingente (Loomis *et al.*, 2005), et la modélisation des choix (Hoyos, 2010).

Les méthodes d'études primaires ou Le transfert de bénéfices (Johnston et Rosenberger, 2009) consiste à utiliser des données d'évaluations fournies par les précédentes méthodes (au cas où elles existent) pour estimer les composantes de la VET.

Pendant longtemps, ces approches sont restées cantonnées aux eaux de surface dans le contexte des pays développés. En raison de l'absence ou l'insuffisance de données économétriques liées à l'eau, des difficultés sociologiques à conceptualiser l'eau comme un bien économique, et de la complexité découlant de la cohabitation de plusieurs modes d'accès à l'eau, il était en effet jugé « impossible » d'estimer la valeur de l'eau dans les pays en développement comme l'ont constaté Whittington *et al.* (1990). Les conditions d'accès à l'eau varient souvent d'un ménage à l'autre et cette variabilité rend presque impossible une analyse complète de la demande des ménages sur des données secondaires du service des eaux (Nauges et Whittington, 2009).

Ce défi a entretemps été relevé, notamment par les travaux de Whittington (Whittington, 1992; Whittington, 1998, 2002; Whittington *et al.*, 1990; Whittington *et al.*, 1997; Whittington et Cook, 2018; Whittington *et al.*, 1992) et Nauges (Nauges et Strand, 2007; Nauges et Van den Berg, 2009; Nauges et Whittington, 2009) ouvrant ainsi un champ de recherche prometteur. Ces travaux ont montré qu'il était tout à fait possible d'estimer une fonction de demande fiable, même dans des contextes marqués par une forte hétérogénéité d'accès à l'eau. En s'appuyant sur des enquêtes ménage et des méthodes économétriques, les auteurs ont intégré des variables telles que la fiabilité du service, la distance à la source ou encore le temps consacré à la collecte. Leurs résultats ont révélé que la valeur économique de l'eau pour les ménages est souvent bien supérieure au prix payé, en particulier en zones rurales, justifiant ainsi les investissements dans les infrastructures d'eau potable. En plus de quantifier cette valeur, ces travaux ont contribué à développer des outils utiles pour les politiques tarifaires et à structurer un champ de recherche appliquée en économie de l'eau dans les pays en développement.

Toutefois, si l'estimation de la valeur de l'eau se mondialise, elle reste majoritairement cantonnée aux eaux de surface. À quelques exceptions près (Martin, 1999), les eaux souterraines font rarement l'objet d'études sur leur valeur économique comme outil d'aide à la gestion durable. En effet, selon Charalambous (2019), seulement quelques 50 études d'évaluation des eaux souterraines ont été publiées dans le monde

au cours des 30 dernières années, études qui étaient principalement axées sur la qualité et la contamination des eaux souterraines, et rares en Afrique et en Asie. Or il est possible de déduire qu'en raison de l'invisibilité des eaux souterraines, du fait qu'elles présentent les caractéristiques d'une ressource commune (cout d'exclusion élevé), de leur vulnérabilité aux pollutions (accentuée par les longs temps de résidence des eaux souterraines), les outils d'analyse hydroéconomique contribueraient positivement à une gestion durable de cette ressource qui représente 98% de l'eau douce liquide mondiale. Ces démarches seraient d'autant plus utiles dans les pays en développement, où les enjeux liés à l'eau sont vitaux pour les populations, même si les difficultés sont plus grandes en raison des capacités limitées dédiées à la connaissance et la gouvernance de la ressource. Il est donc essentiel de s'appropriier ces nouvelles approches et de les appliquer de manière plus étendue dans ces contextes.

1.2 Description de la zone d'étude

Le BSCT se situe dans le sud du Togo en Afrique de l'Ouest, sur les côtes du Golfe de Guinée (Figure 4).

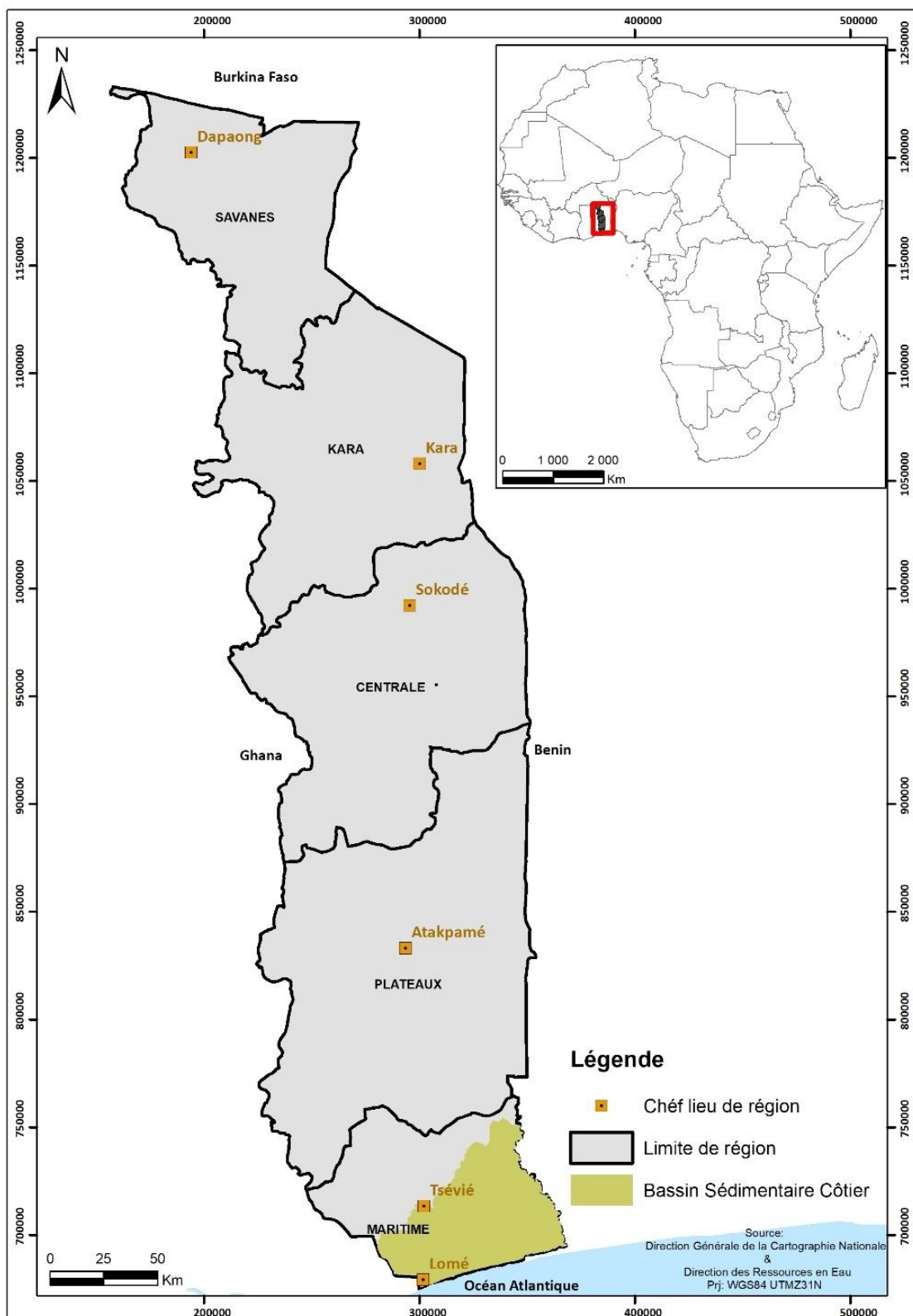


Figure 4: Localisation de la zone d'étude

Il s'agit de la partie togolaise du bassin transfrontalier de Kéta (Figure 5), qui s'étend du Ghana à l'ouest au Nigeria à l'est (Akouvi *et al.*, 2008; BRG *et al.*, 2022; Gnazou *et al.*, 2017). Ce sont des dépôts sédimentaires qui reposent en discordance sur le socle précambrien. Les populations de ce bassin ont sous leurs pieds un système aquifère composé de la nappe libre du Continental Terminal, de la nappe captive du Paléocène et de la nappe semi captive du Maastrichtien (Akouvi *et al.*, 2008; Gnazou *et al.*, 2017; Slansky, 1959) (Figures 6 & 7).

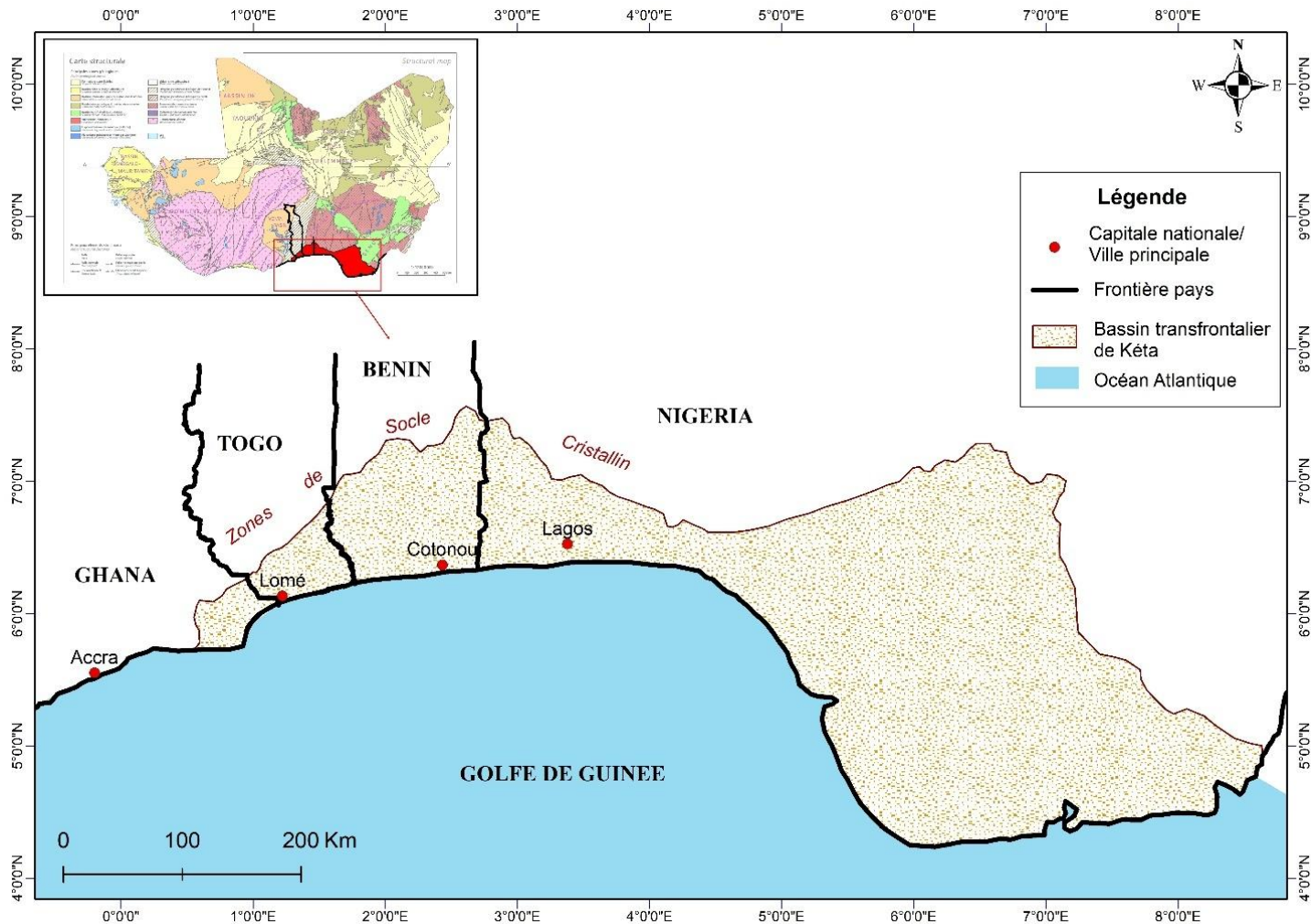


Figure 5: Carte de situation du bassin transfrontalier de Kéta en Afrique de l'Ouest (adaptée d'après BRG *et al.* (2022))

Les eaux des trois aquifères s'écoulent généralement du nord-est vers le sud-ouest et se jettent dans l'océan Atlantique. Les ressources en eau souterraine du bassin sont estimées à environ 600 millions de mètres cubes (MEAHV, 2010). Enfin, avec 800 mm de pluies en moyenne par an, il y a théoriquement assez d'eau pour une demande d'eau spécifique de 80 L/jour et par habitant (MEHV, 2021) selon leurs besoins, et pour également répondre à la demande des secteurs socioéconomiques. Toutefois, la satisfaction

effective de cette demande nécessite des moyens techniques, humains et financiers importants, dont le pays ne dispose pas encore pleinement. En attendant une valorisation optimale de ce potentiel, la gestion durable de cette précieuse ressource reste confrontée à de nombreuses menaces.

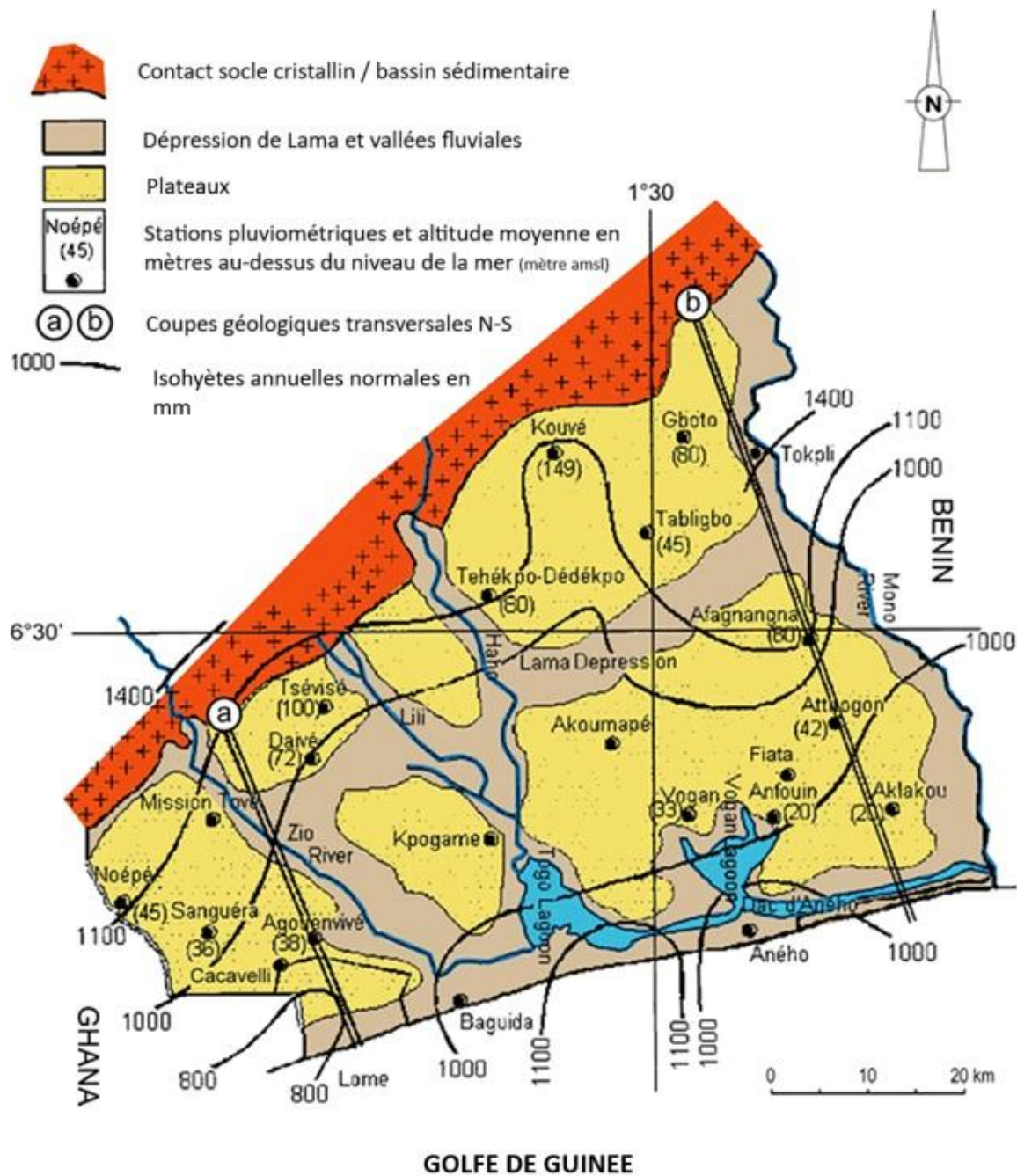


Figure 6: Unités géomorphologiques du bassin sédimentaire côtier du Togo (adaptée de DHE (1982))

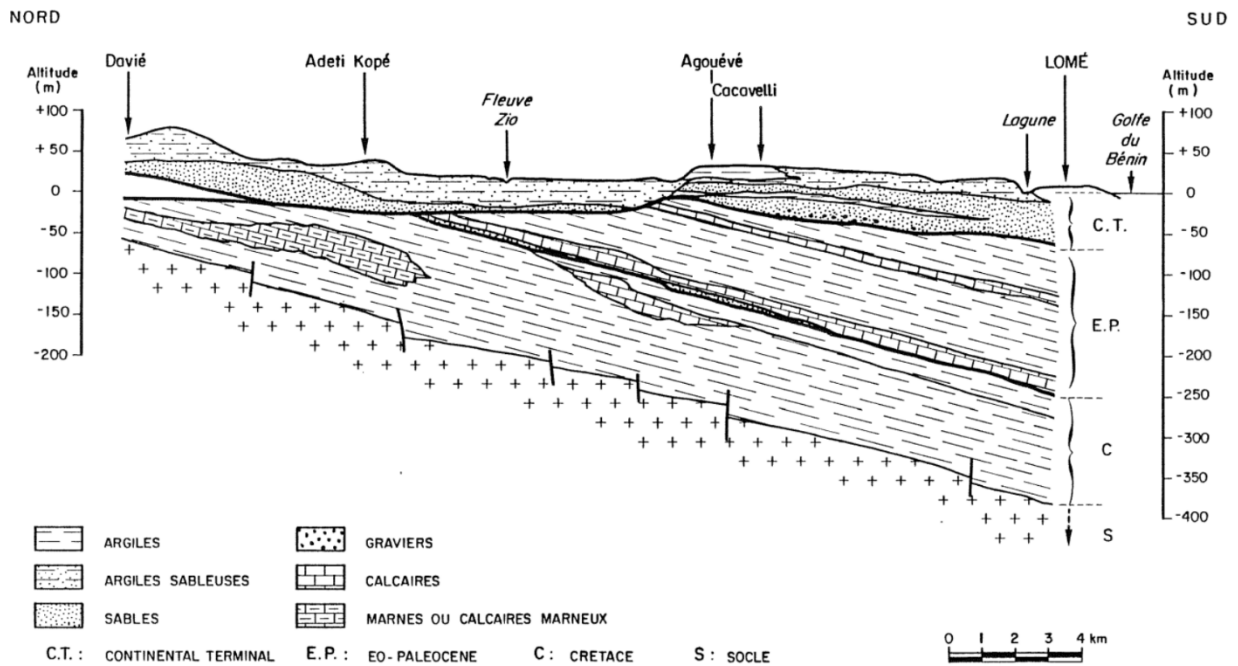


Figure 7: Coupes géologiques transversales N-S, comme indiqué dans la figure 6

En effet, le BSCT, qui couvre environ 6% de la superficie du pays, concentre près du tiers de la population nationale (DGSCN, 2023). Il en découle une pression croissante sur les ressources naturelles en général, notamment les ressources en eau, et principalement les eaux souterraines. Si, à ce jour, la société togolaise des eaux (TdE) mobilise exclusivement des eaux souterraines pour l’approvisionnement de la zone, cette dépendance, combinée à la croissance rapide de la population (DGSCN, 2023) et des usages, risque d’accroître la pression sur les nappes dans un avenir proche.

Dans la région, il n’existe que peu d’informations sur les variations spatio-temporelles de la quantité et de la qualité des eaux souterraines. En effet, le suivi des eaux souterraines interrompu dans les années 90 en raison des troubles sociopolitiques que le pays a connus, n’a été rétabli qu’en 2013. Avec 37 piézomètres (en 2024) pour les trois aquifères du bassin, une collecte irrégulière, un manque d’analyse et de traitement des données, il est évident que les eaux souterraines du bassin sont encore peu suivies.

En plus de la faible connaissance sur les eaux souterraines, dans le même temps, l’urbanisation a presque doublé ces 10 dernières années (OECD, 2019) dans la zone, sans que les infrastructures sanitaires nécessaires ne soient construites. Par exemple la ville de Lomé a connu une urbanisation planifiée rapide pendant la période coloniale et les premières décennies d’indépendance : 4,9% par an de 1924 à 1958 et 7,3% par an entre 1960 et 1970 (Nyassogbo, 1984). La ville s’est développée à partir du centre historique, d’abord rapidement, puis à un rythme plus lent (Barry *et al.*, 2022) (Figure 8). Cette deuxième phase n’a

pas été planifiée, en raison de la détérioration de la situation sociopolitique que le pays a vécu dans les années 90.

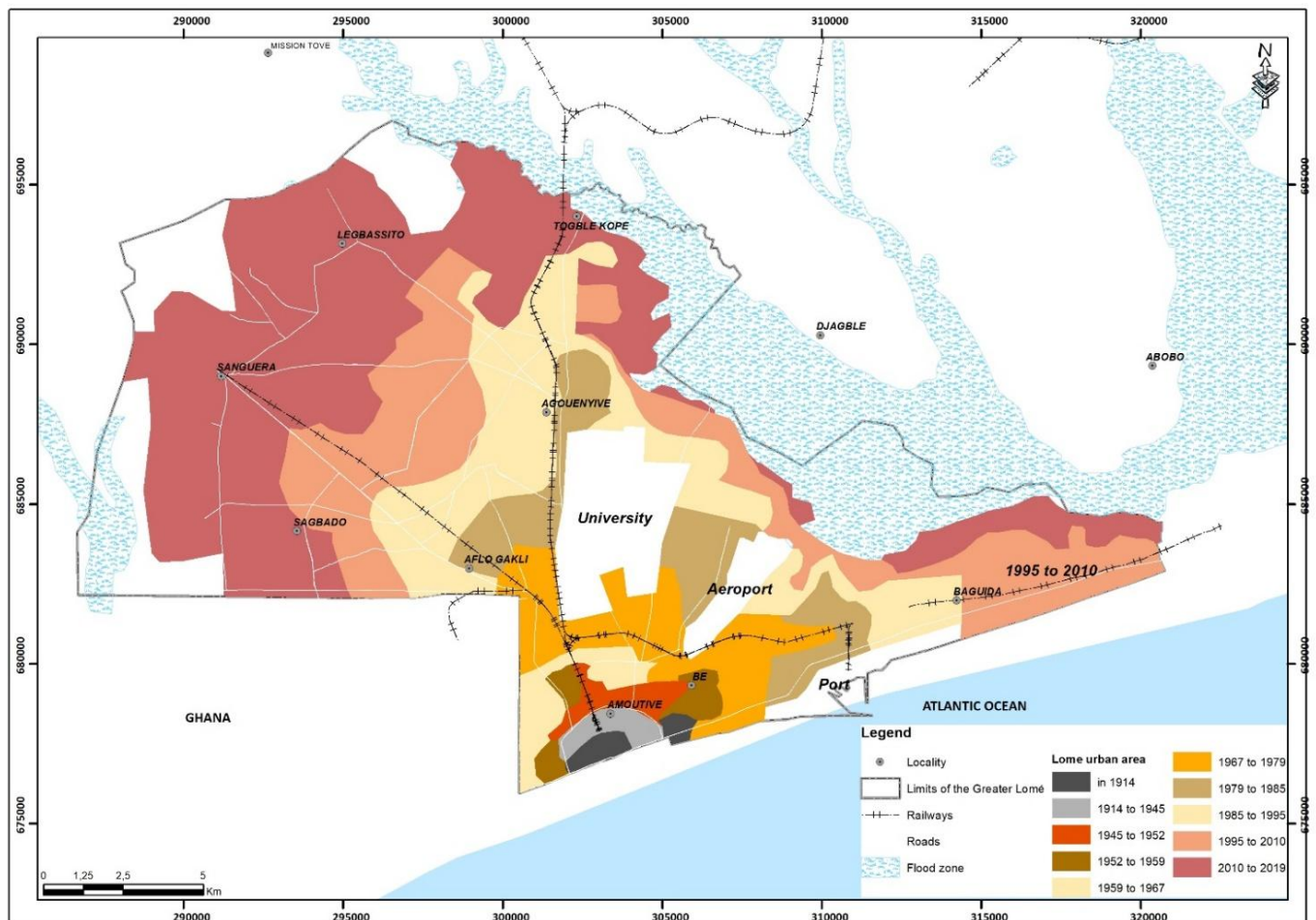


Figure 8: Etapes de la croissance de Lomé de 1914 à 2010 (Barry *et al.*, 2022)

Ce développement urbain anarchique a causé des problèmes d'assainissement et de pollution des eaux souterraines. En effet, l'urbanisation est un phénomène qui modifie les systèmes d'eaux souterraines sous-jacents, ce qui entraîne des effets hydrologiques, géotechniques, socioéconomiques ou sur la qualité de l'eau qui peuvent compromettre la durabilité de la ressource (Tellam *et al.*, 2006).

A titre illustratif, selon l'enquête PRRESAF (Gnazou, 2016), près de la moitié des forages en fonction dans la ville de Lomé et ses environs présentent une forte pollution chimique (teneurs en nitrates supérieures à 50 mg/l, teneurs en chlorures au-delà de 250 mg/l, etc.) et biologique (49% des ouvrages affectés par une contamination microbiologique). La pollution ainsi observée dans la nappe libre du continental terminal est associée à l'absence du système d'assainissement collectif et aux rejets provenant des activités économiques,

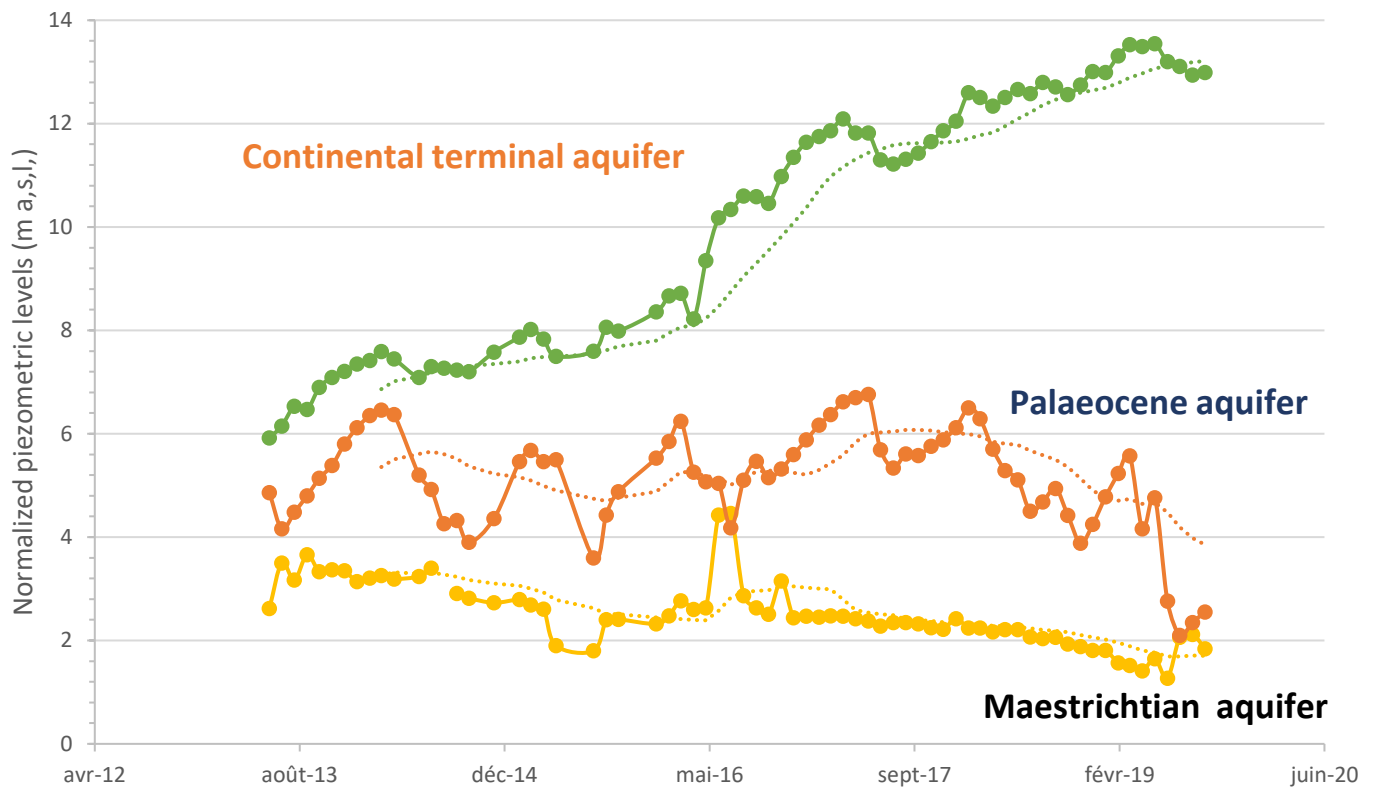


Figure 9: Évolution des niveaux des eaux souterraines dans les stations situées dans la ville de Lomé, Campus Nord pour l'aquifère continental terminal, Campus Sud pour l'aquifère du Paléocène et Apeposito pour l'aquifère du Maestrichtien (Barry *et al.*, 2022)

S'agissant de la nappe captive du Paléocène, une tendance à la baisse est observée, principalement en raison des prélèvements pour l'alimentation en eau potable et les usages industriels. Si la baisse est moindre pour le Maestrichtien (en raison de sa profondeur significative) que pour le Paléocène, il est observé une diminution moyenne de plus d'un mètre par an de la nappe du Paléocène au cours des cinq dernières années (Figure 9). Cette baisse était inférieure à 0,5 m par an durant les années 1970 et 1980 (DHE, 1984). Actuellement, ces aquifères sont principalement exploités par la Société Togolaise des Eaux (TdE) et par les industries pour répondre à une demande croissante. Enfin, on constate une augmentation de l'intrusion d'eau de mer due à la fois au pompage et à l'élévation du niveau de la mer. Cette dernière se manifeste par un recul du trait de côte de 5 à 10 mètres par an (Blivi, 1993; Ozer *et al.*, 2017).

Le changement climatique se manifeste notamment par la remontée eustatique, qui accentue l'avancée de la mer. Il affecte aussi d'autres paramètres clés, comme la température et les précipitations, avec des impacts potentiels sur la recharge des nappes et la disponibilité en eau douce. Ces variations entraîneront des boucles de rétroaction affectant des dynamiques entre les différentes composantes du cycle de l'eau, telles que les précipitations, l'évaporation, le ruissellement, l'infiltration, etc. Dans la région, on peut aussi s'attendre à des inondations et/ou des sécheresses, en plus de l'élévation du niveau marin sur le littoral

togolais. En se basant sur ce qui précède, on peut anticiper une altération de la disponibilité des ressources en eau (quantité et qualité). En effet, d'après la quatrième communication nationale du Togo sur les changements climatiques (MERF, 2022), l'analyse des données météorologiques sur la période 1961–2018 met en évidence une évolution climatique nette, marquée par une forte variabilité spatio-temporelle à l'échelle du pays. Les températures sont toutes à la hausse (+ 0,8°C à +1,2°C) suivant la latitude, en revanche, les précipitations sont dans l'ensemble à la baisse en tout point du territoire avec une amplitude de diminution allant de 15 mm à 98 mm de pluie. Ces tendances devraient se poursuivre à l'avenir, avec des amplitudes variables selon les scénarios climatiques envisagés. Concernant les ressources en eau, la modification du régime des précipitations, combinée à l'élévation des températures, influence le débit des cours d'eau. À terme, ces changements affecteront la disponibilité en eau aussi bien des réservoirs de surface que des aquifères.

La combinaison de la pollution, des baisses de niveau des nappes et des incertitudes liées au changement climatique met en évidence un véritable problème de gestion des eaux souterraines dans le BSCT.

En réponse, le développement durable des eaux souterraines en général et dans les environnements côtiers urbains en particulier, requiert des choix précis et efficaces (Bocanegra *et al.*, 2009; Nlend *et al.*, 2018). Dans le BSCT, la tâche est complexe parce qu'elle fait appel à de multiples parties prenantes, en raison des multiples usages (alimentation en eau potable, agriculture, industrie, etc.) qui n'interagissent pas nécessairement. Or elles doivent collaborer afin de satisfaire certaines exigences de gestion, notamment la définition des périmètres de protection et le contrôle des prélèvements, comme le recommande le Plan d'Actions National de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PANGIRE) (MEAHV, 2010). Mais surtout, trouver le juste équilibre entre les actions publiques, collectives et individuelles (Petit, 2004). Elle implique également de trouver un équilibre juste et fonctionnel entre les actions publiques

La reconnaissance sociale et institutionnelle de la vulnérabilité des eaux souterraines constitue un préalable essentiel à leur gestion durable. Or en raison de leur nature invisible (López-Vera, 2012), intangible (Schotting, 2009) et patrimoniale (Yüceer *et al.*, 2021), ces ressources sont souvent sous-estimées, tant par les décideurs que par les populations. La sensibilisation ciblée des parties prenantes – décideurs, autorités locales, leaders communautaires, usagers – apparaît ainsi comme une condition clé pour susciter l'adhésion nécessaire à la mise en œuvre de stratégies durables (Mankad et Walton, 2015). Ce travail d'information s'appuie sur une communication claire des enjeux, des menaces, et de la nécessité d'une gestion responsable sensibilisation (Asprilla-Echeverria, 2021; Downing, 1989).

Par ailleurs, la croissance rapide des centres urbains dans le BSCT soulève des défis majeurs en matière d'aménagement du territoire. L'expansion urbaine non maîtrisée précède souvent l'implantation d'infrastructures d'eau et d'assainissement adéquates, ce qui accroît la pression sur les nappes souterraines. Une planification urbaine anticipée, prenant en compte les interactions entre composantes urbaines et cycle hydrologique, est indispensable pour atténuer les impacts environnementaux. Cela inclut l'établissement de normes strictes, leur application effective, ainsi qu'un encadrement du développement conforme aux spécificités locales. En milieu urbain, les processus d'écoulement et de transport des eaux souterraines diffèrent de ceux des zones rurales, tant par leur échelle spatiale que temporelle (Vázquez-Suñé *et al.*, 2005). L'urbanisation engendre des modifications d'occupation du sol susceptibles de perturber fortement le cycle hydrologique naturel (recharge altérée, évapotranspiration modifiée, etc.) ainsi que de potentielles pollutions liées aux pertes d'égouts et de fosses septiques (Lerner, 2002).

En résumé, les eaux souterraines du BSCT sont vitales pour les populations qui y vivent, mais elles font face à des pollutions et à une surexploitation qui pourraient être renforcées par les changements climatiques. La nature invisible des eaux souterraines, combinée à une connaissance encore limitée et à une surveillance insuffisante dans le BSCT, rend difficile la mobilisation des acteurs en faveur de leur gestion durable. Pour les mêmes raisons, les précautions nécessaires ne sont pas prises dans l'aménagement urbain afin de préserver les eaux souterraines sous-jacentes.

CHAPITRE 2

DEMARCHE METHODOLOGIQUE MIXTE

Ce chapitre décrit le cadre d'analyse à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs de recherche fixés dans l'introduction. Cette analyse repose sur une approche qui combine l'hydrogéologie et l'économie. Elle comprend : une étape de caractérisation des impacts anthropiques et climatiques sur les eaux souterraines du BSCT pour le volet hydrogéologique, suivie de la détermination de la valeur de l'eau et de l'élaboration de la fonction de demande pour le volet économique.

Il convient de préciser que les impacts anthropiques sur les eaux souterraines du BSCT documentés ici sont issus d'une thèse de doctorat menée en parallèle de celle-ci. Intitulée « *Modélisation de la vulnérabilité des aquifères phréatiques côtiers du Golfe de Guinée sous les effets conjugués des perturbations anthropiques et du changement climatique : cas de la nappe du Continental Terminal du Bassin Sédimentaire Côtier du Togo* », elle a été réalisée en cotutelle entre l'UQAM (Canada) et l'université Paris-Saclay (France) par Aimé DJONGON. Ce sont donc les résultats de ces travaux qui serviront à caractériser les impacts anthropiques dans le cadre de la présente thèse (Voir le résumé de la thèse en Annexe C).

2.1 Cadre d'analyse

La figure 10 illustre les différentes étapes à suivre pour traduire en valeur monétaire la disponibilité des eaux souterraines du BSCT, pour ensuite s'en servir comme outil d'aide à la décision.

Le cadre d'analyse débute avec l'étape 1, qui vise à estimer les niveaux de disponibilité des eaux souterraines en termes quantitatifs et qualitatifs. Les aspects relatifs à l'évolution des eaux souterraines sur le plan quantitatif sont caractérisés dans le présent travail. Les aspects concernant la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, c'est-à-dire la qualité, ce sont les résultats des travaux menés sur la même zone d'étude dans le cadre de la thèse de Djongon (2022), qui sont adoptés. Il s'agit d'un travail d'hydrogéologue, dans le cadre duquel : l'origine des eaux alimentant les nappes, la vulnérabilité intrinsèque et les risques de dégradation de la qualité des eaux souterraines face aux actions anthropiques et dans un contexte de changement climatique sont caractérisés. Ces résultats sont utilisés à titre d'intrants pour le fonctionnement du modèle final.

L'étape 2 est un travail d'économiste qui vise à déterminer la valeur des eaux souterraines et à établir une fonction de demande. Cette fonction établit un lien entre un volume d'eau souterraine de qualité et une valeur monétaire précise.

A l'étape 3, il devient possible de déterminer la valeur économique des eaux souterraines comme étant la variation de services qu'elles fournissent, en relation avec l'évolution subséquente de la quantité des niveaux de disponibilité de l'eau souterraine (Boyle *et al.*, 1994; Martin, 1999).

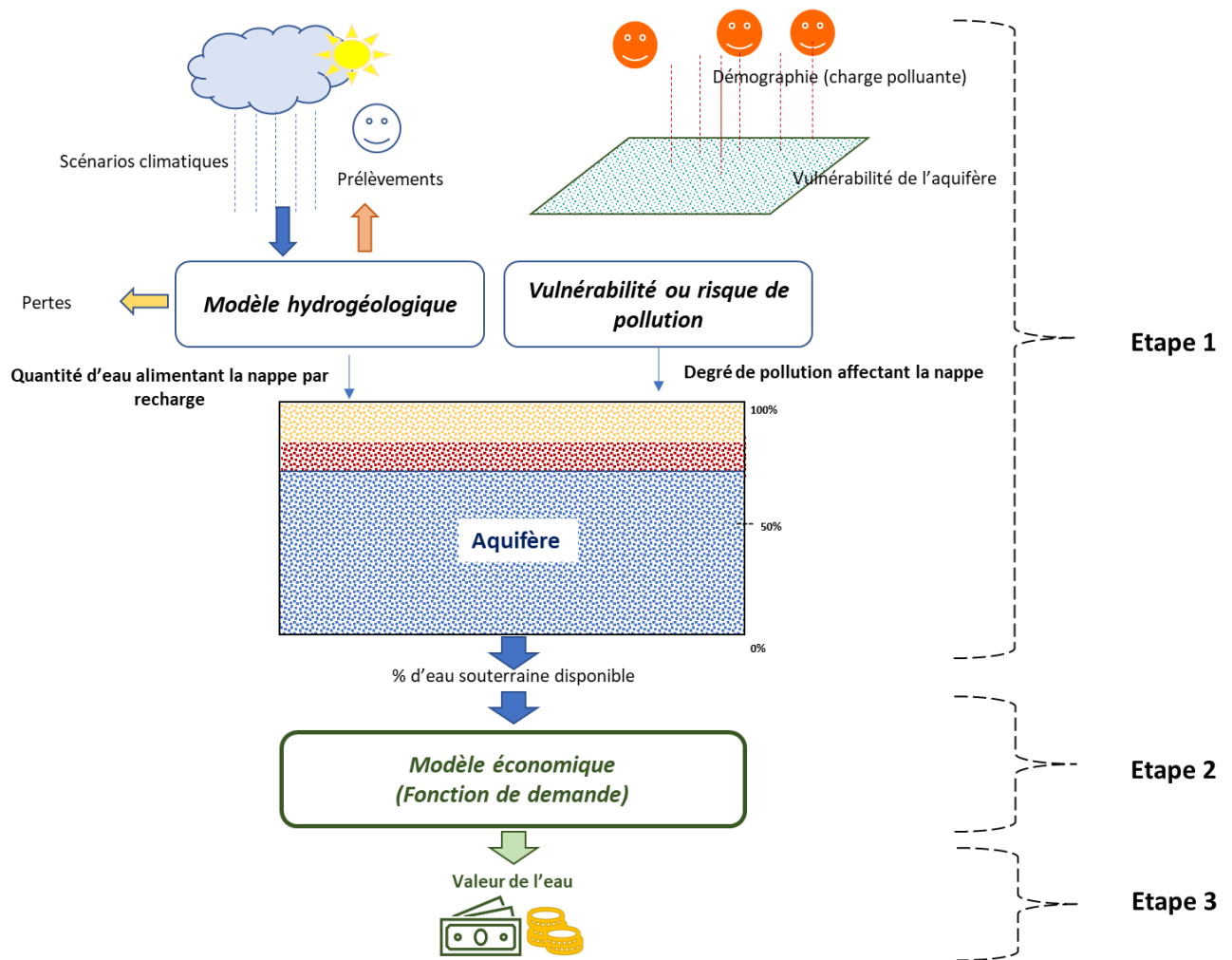


Figure 10: Cadre d'analyse de l'étude

2.2 Caractérisation des impacts des changements climatiques sur la recharge des eaux souterraines

La variabilité et le changement climatique influencent les systèmes d'eaux souterraines à la fois directement par la recharge et indirectement par des changements dans l'utilisation des eaux souterraines

(Vaessen et Brentführer, 2015). En effet, comme mentionné au point 1.1.3, en raison de la faible influence de la variabilité du climat sur les eaux qui se trouvent déjà sous la terre, le changement climatique n'a d'influence directe que sur les quantités d'eau qui s'infiltrant. C'est la raison pour laquelle les travaux de caractérisation de l'impact du climat futur sur les eaux souterraines, se concentrent sur la caractérisation des impacts du changement climatique sur les mécanismes de recharge (Ali *et al.*, 2012; Kahsay *et al.*, 2018; Liu, 2011; Meixner *et al.*, 2016; Mileham *et al.*, 2009; Pholkern *et al.*, 2018; Smerdon, 2017; Taylor, R. G. *et al.*, 2012).

Cette première étape du cadre d'analyse de l'étude vise à estimer la recharge actuelle et future des eaux souterraines dans un système aquifère situé dans le BSCT en Afrique de l'Ouest. Cet aquifère peu étudié se trouve dans une zone marquée par une forte croissance économique et démographique. Cela se traduit par des prélèvements d'eau importants (Barry *et al.*, 2022) associés à des signes de pollution (PRRESAF, 2017), le tout dans un contexte de changement climatique. Pour ce faire, l'étude s'est appuyée sur la méthode de Thornthwaite et Mather (1957). L'avantage de ce choix pour l'étude, compte tenu de la rareté des données disponibles, réside dans l'utilisation de données librement accessibles sur le Web (telles que les données climatiques locales actuelles et futures, les modèles d'élévation et les données relatives à l'utilisation des sols). Ainsi, les données relatives aux paramètres du bilan hydrique ont pu être rassemblées afin de mener à bien l'analyse projetée.

Dans le détail, la méthode d'estimation de la recharge spatialisée choisie est la méthode du bilan hydrique proposée par la méthode de Thornthwaite et Mather (1957), puis modifiée (Galvão *et al.*, 2018; Mattei *et al.*, 2020). La première étape consiste à dresser une carte du ruissellement de surface à partir des cartes pédologiques, d'occupation du sol et de pentes. La deuxième étape consiste à estimer les différentes valeurs de recharge pouvant être obtenues suivant le coefficient de ruissellement par la méthode de bilan hydrique. La troisième et dernière étape, consiste à dresser une carte des valeurs de percolation de l'eau pour élaborer la carte de la zone d'alimentation des eaux souterraines ont été établies. Selon Fenn *et al.* (1975) et Thornthwaite et Mather (1955) cités par Galvão *et al.* (2018) : la méthode se concentre sur la quantité d'eau libre présente dans le sol. Jusqu'à ce que la capacité en eau d'un sol soit atteinte, l'humidité du sol est un équilibre entre ce qui y pénètre par précipitation et ce qui le quitte par évapotranspiration. Si l'on compare la perte mensuelle d'humidité du sol par évapotranspiration avec les précipitations mensuelles, l'humidité du sol peut être comptabilisée par une simple méthode comptable.

L'équation du bilan hydrique est établie pour une colonne de sol allant de la surface de la terre à la base de la zone racinaire. La méthode propose de calculer les changements mensuels d'humidité dans le sol (ΔS) :

$$\Delta S = S_i + S_{i+1} \quad (1)$$

Où S_i et S_{i-1} sont, respectivement, les teneurs en eau du sol pour le mois actuel et pour le mois précédent.

Ainsi, selon l'évolution du taux d'humidité du sol pendant le mois en cours, l'évapotranspiration réelle (AE pour actual evapotranspiration) peut être déduite selon les relations suivantes :

$$AE = PET, \text{ si } P \geq PET \text{ et } AE = P + \Delta S \text{ si } P < PET \quad (2)$$

Avec P qui représente les précipitations et PET (Potential evapotranspiration) qui correspond à l'évaporation potentielle.

2.2.1 Estimation de la recharge

La procédure d'estimation de la recharge décrite par Dassargues (2020) suppose que la quantité d'eau dans le sol (et la zone partiellement saturée) peut être conceptualisée par une seule valeur de stock d'eau (S_i) exprimée en mm à la fin du mois i avec une capacité maximale de stock d'eau (S_{max}), une procédure comptable mensuelle est adoptée, comme décrite dans le schéma de la figure 11. L'humidité est ajoutée ou soustraite de selon que P_i (précipitations du mois i) est supérieur ou inférieur à PET_i (évapotranspiration moyenne du mois i). Ensuite, lorsque S_i est augmenté, sa valeur ne peut pas être supérieur à S_{max} , et un éventuel surplus d'eau est calculé englobant à la fois la recharge des eaux souterraines et le ruissellement. En revanche, lorsque S_i est diminué, sa valeur ne peut pas être inférieure à zéro, et un éventuel déficit en eau est généré, entraînant ET_i (évapotranspiration réelle moyenne du mois i) inférieure à PET_i .

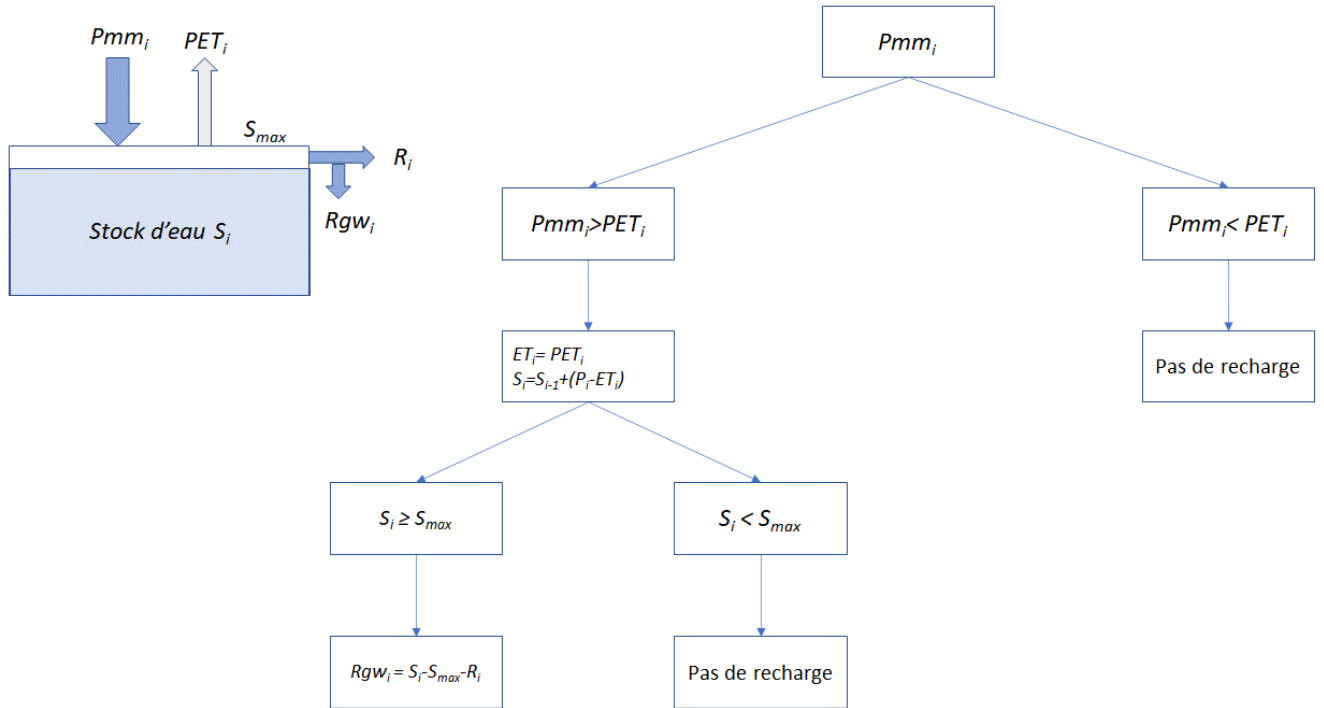


Figure 11: Schéma du modèle de bilan de Thorntwaite (adaptée d'après Dassargues (2020)) avec Pmm_i (Précipitation moyenne du mois i), PET_i (Evapotranspiration moyenne du mois i), ET_i (évapotranspiration réelle moyenne du mois i), S_i (Stock d'eau à la fin du mois i), S_{max} (capacité maximale de stock d'eau dans le sol)

La procédure détaillée pour calculer la recharge adaptée selon (Galvão et al., 2018) est décrite en Annexe A.

2.2.2 Données

D'après ce qui précède, l'estimation de la recharge actuelle et de la recharge future nécessite deux types de données :

- Les données entrant dans le fonctionnement interne du modèle de recharge : il s'agit des différentes valeurs de coefficient de ruissellement C que l'on rencontre dans le bassin, ainsi que la capacité au champ maximale WS_{max} (Water storage max) que l'on y trouve ;
- Et les données pour faire tourner le modèle de recharge : il s'agit des données climatiques (températures, précipitations et évapotranspiration) actuelles et futures dans le bassin.

2.2.2.1 Paramètres du modèle de recharge : C et WS_{max}

- Estimation des classes de ruissellement C

En raison de la rareté des données dans la zone d'étude, le choix s'est porté sur la méthode la plus simple pour mesurer le ruissellement qui peut être mise en œuvre. Le ruissellement est calculé à partir d'un coefficient de ruissellement C , fondé sur l'équation 3 proposée par l'American Society of Civil Engineers (ASCE)(1969) :

$$C = 1 - (C'_1 + C'_2 + C'_3) \quad (3)$$

avec C , la portion des précipitations qui participe au ruissellement, C'_1 le coefficient de perméabilité du sol, C'_2 le coefficient de capacité d'infiltration, et C'_3 le coefficient de pente (voir Tableau 1).

Tableau 1: Valeurs du coefficient de ruissellement (C) de la zone d'étude à partir de la table ASCE (1969).

Types et natures de la surface		Valeurs correspondantes de C'
Sol (C'_1)	Argiles	0,1
	Limons	0,2
	Sables	0,4
Occupation du sol (C'_2)	Terres cultivées	0,1
	Zones urbaines	0,1
	Prairies/savanes	0,2
	Forêts	0,2
Pentes (C'_3)	<2%	0,3
	2%–7%	0,2
	> 7%	0,1

- Valeur de WS_{max} :

Aucune étude n'a été faite dans le bassin afin d'estimer de manière précise la capacité de stockage maximale d'eau dans le sol. C'est la valeur de $WS_{max} = 100$ mm, utilisée dans de récents travaux dans les pays voisins avec des sols identiques à ceux du BSCT, qui a donc été retenue (Koudjega *et al.*, 2020; Totin, 2009).

2.2.2.2 Données climatiques

Les données utilisées pour caractériser le climat actuel et futur dans la zone d'étude (Figures 12 & 13) sont celles disponibles sur le portail de connaissances sur le changement climatique de la Banque mondiale (CCKP, 2021), avec une résolution de $1^\circ \times 1^\circ$ (soit 100 km x 100 km). Les projections climatiques futures sont issues des modèles CMIP5 (Taylor, K. E. *et al.*, 2012). On distingue y quatre scénarios climatiques basés sur les « Trajectoires représentatives de concentration » (RCP pour Representative Concentration Pathway), avec les RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5, allant du plus optimiste au plus pessimiste (CCKP,

2021) (Figure 12). Toutefois, les scénarios RCP 2.6 et RCP 6.0 n'ont pas été utilisés dans le cadre de notre étude.

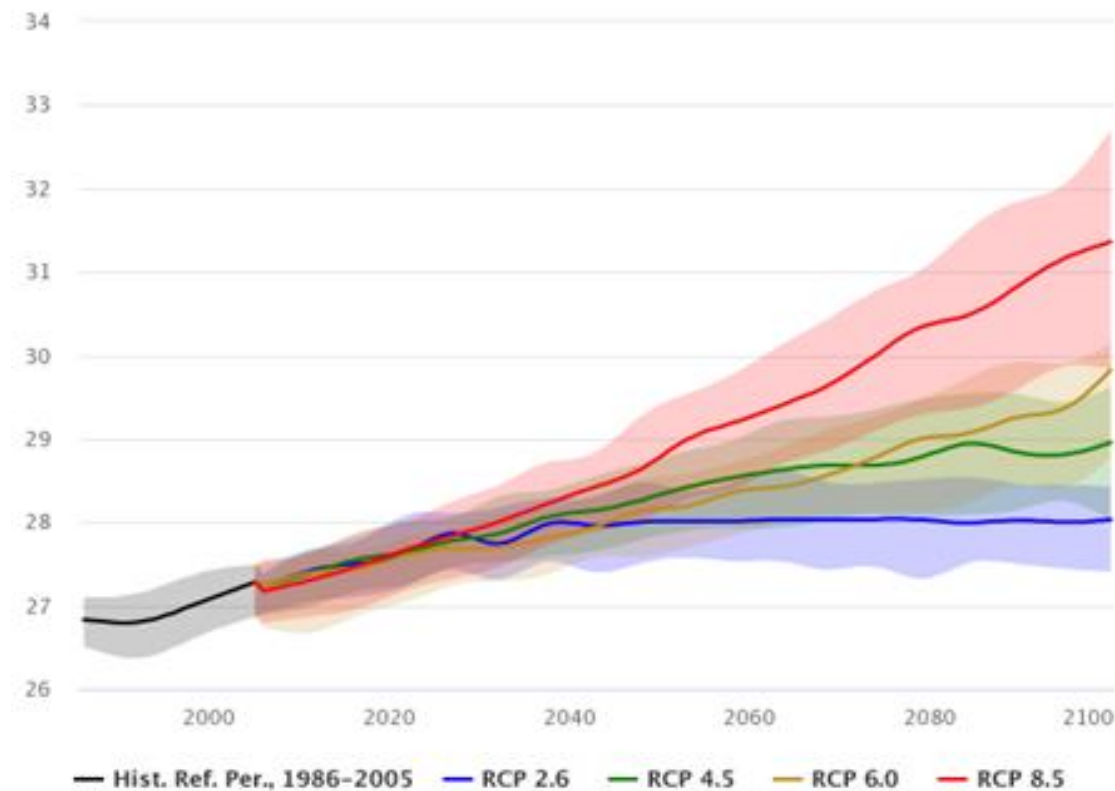


Figure 12: Température moyenne projetée dans la région des Maritimes, Togo; (Ref. Period: 1986-2005), Multi-Model Ensemble (CCKP, 2021)

Le scénario RCP 2.6, qui suppose une réduction très rapide et soutenue des émissions mondiales de gaz à effet de serre dès la première moitié du XXI^e siècle, est aujourd'hui largement considéré comme trop optimiste, voire irréaliste. Il repose en effet sur des hypothèses ambitieuses de transformation économique, technologique et politique à l'échelle mondiale, qui ne correspondent pas aux tendances d'émissions actuellement observées (notamment la poursuite de la hausse des émissions globales après 2020) (IPCC, 2019).

D'autre part, constatant qu'à l'horizon de notre étude, en 2060, les scénarios RCP 6.0 et RCP 4.5 montrent des tendances similaires, c'est ce dernier qui a été retenu. Le scénario RCP 4.5 est une voie intermédiaire

qui situe le niveau de réchauffement stable autour de $4,5 \text{ W/m}^2$. Le scénario RCP 8.5 correspond aux émissions de Gaz à effet de serre (GES) sans politique climatique explicite débouchant sur $8,5 \text{ W/m}^2$ en 2100 (Riahi *et al.*, 2011).

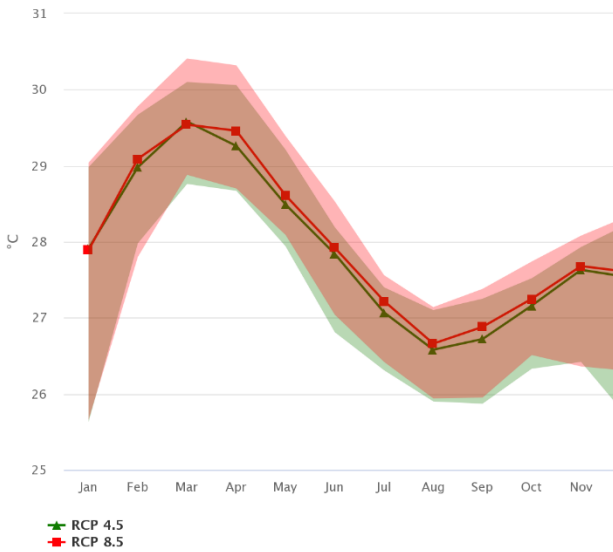
L'estimation de la recharge future des eaux souterraines s'est donc basée sur le scénario RCP 4.5 pour l'option optimiste et sur le scénario RCP 8.5 pour l'évolution pessimiste (voir tableau 2, figures 13 et 14).

Les projections climatiques révèlent une tendance haussière des températures (jusqu'à $+2^\circ$ et $+2,5^\circ$) et des précipitations (jusqu'à $+125 \text{ mm}$ et $+170 \text{ mm}$) dans la région du BSCT, sans égard au scénario. Toutefois, avec le scénario RCP 4.5, les augmentations sont moins importantes qu'avec le scénario RCP 8.5. Cet écart sera plus important de 2020 à 2039 qu'entre 2020 et 2040 (voir Figures 13 & 14).

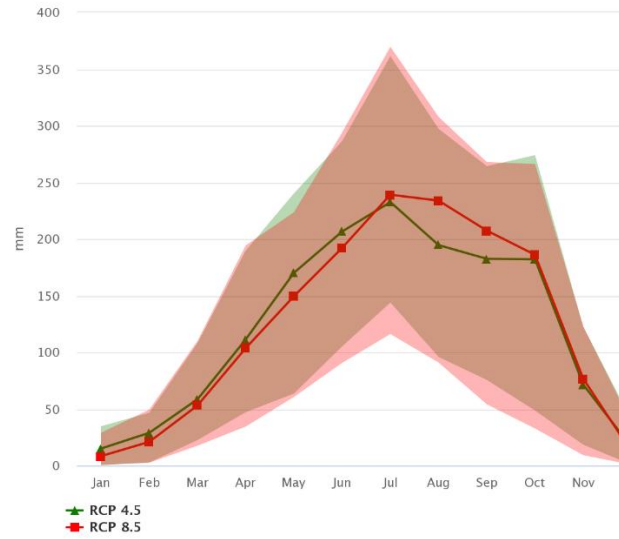
Il convient également de noter que la répartition des précipitations au cours de l'année sera également modifiée. Les augmentations seront plus prononcées durant la « petite » saison des pluies, et finalement les deux sommets se fondront en une seule saison des pluies de mars à novembre.

Tableau 2: Précipitations projetées pour 2020-2039 et 2040-2059, dans la Région Maritime du Togo (Période de référence 1986-2005), RCP-4.5 & RCP-8.5, Multi-model ensemble (CCKP, 2021).

	2020-2039		2040-2059	
Catégorie	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Jan	15	8	14	11
Fev	29	21	25	21
Mar	59	53	59	50
Avr	111	104	103	98
Mai	170	150	150	156
Juin	207	192	196	189
Juil	233	239	223	244
Auo	195	234	197	229
Sep	183	207	187	186
Oct	182	186	167	201
Nov	71	77	77	83
Dec	16	12	17	12

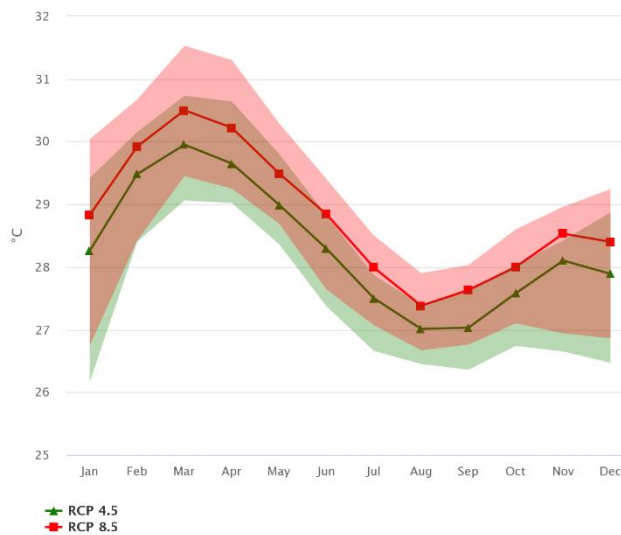


(a)

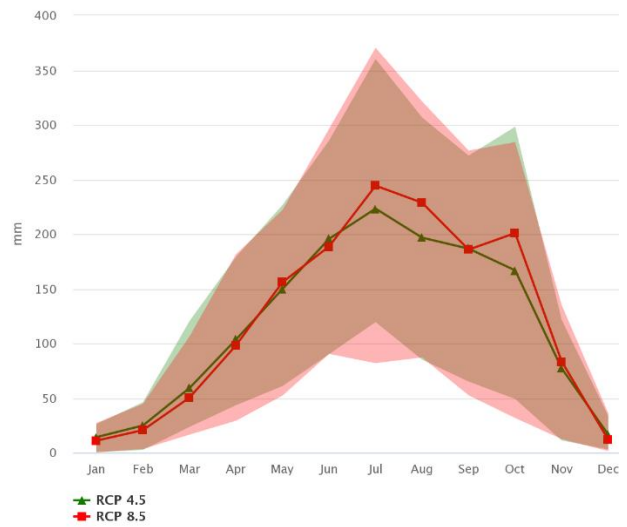


(b)

Figure 13: (a) Températures moyennes projetées pour la région maritime du Togo 2020-2039; (Reference Period:1986-2005), RCP 4.5 & RCP 8.5, Multi-Model Ensemble; (b) Précipitations projetées pour la région maritime du Togo 2020-2039; (Reference Period:1986-2005), RCP 4.5 & RCP 8.5, Multi-Model Ensemble(CCKP, 2021).



(a)



(b)

Figure 14: (a) Températures moyennes projetées pour la région maritime du Togo 2040-2059; (Reference Period:1986-2005), RCP 4.5 & RCP 8.5, Multi-Model Ensemble; (b) Précipitations projetées pour la région maritime du Togo 2040-2059; (Reference Period:1986-2005), RCP 4.5 & RCP 8.5, Multi-Model Ensemble(CCKP, 2021).

2.3 Méthode d'évaluation contingente

Comme il a été mentionné dans la section 1.1.4, il existe différentes méthodes d'évaluation de la valeur des biens environnementaux non marchands tels que les ressources en eau. Mais toutes ne sont pas applicables sur notre site d'étude. En effet, les méthodes de préférence révélées sont inadaptées dans ce contexte, car elles reposent sur l'observation des comportements réels des usagers vis-à-vis de services liés à l'eau. Or, dans la zone étudiée, ces services présentent une faible couverture géographique et un fonctionnement intermittent, ce qui empêche de dégager des comportements d'usage cohérents ou représentatifs. En l'absence de données fiables sur la consommation, les prix, ou les arbitrages effectués par les ménages, ces méthodes ne peuvent produire des estimations robustes de la valeur de l'eau. La méthode de transfert de bénéfices ne saurait être appliquée, puisqu'aucune étude antérieure n'y a été faite.

Le choix se porte donc naturellement sur l'une des techniques de préférences déclarées (modélisation des choix et évaluation contingente). Toutefois, la modélisation des choix, qui suppose une bonne compréhension des scénarios proposés, est peu appropriée dans ce contexte : les eaux souterraines, en tant que ressource invisible, restent abstraites pour de nombreux usagers, ce qui rendrait difficile l'appréciation d'options complexes de gestion.

Dans ce cadre, la méthode d'évaluation contingente apparaît comme la plus pertinente. Elle permet de recueillir directement le consentement à payer des usagers pour un service amélioré ou sécurisé, tout en s'adaptant à un contexte de faible information, sans exiger de données secondaires complexes.

2.3.1 Approche

L'évaluation contingente consiste selon différentes techniques d'éllicitation, à demander directement au répondant sa réaction sur un marché hypothétique de bien ou service pour mesurer la valeur qu'il place dans ce bien ou service, c'est-à-dire son consentement à payer (CAP). Elle est particulièrement recommandée dans les pays en développement pour les questions liées aux ressources en eau (Team, 1993; Whittington *et al.*, 1990). En général, il est question de recueillir le CAP des ménages sur une amélioration, ou un changement d'accès aux ressources en eau. En fonction de la question posée et du format de l'éllicitation, et donc de la valeur de la variable à expliquer de CAP, les CAP sont ensuite modélisés (Favre, 2018).

2.3.2 Questionnaire d'enquête

Le questionnaire d'enquête a été conçu après des discussions avec une trentaine de personnes-ressources actives dans le domaine de l'eau au Togo : le ministère de l'eau, des organismes non gouvernementaux, universitaires, etc. Le questionnaire d'enquête comprend quatre parties (annexe B). La section A contient des questions relatives aux habitudes des répondants en matière de consommation d'eau. Dans la section B, les questions cherchent à connaître l'opinion des répondants sur différents aspects touchant les ressources en eau en général et les eaux souterraines en particulier dans leur région. La section C aborde les questions liées à l'avenir des eaux souterraines du BSCT, avec notamment la question servant à recueillir le CAP des usagers. Il s'agit du sacrifice financier que les usagers sont prêts à consentir pour disposer d'une eau souterraine en quantité et de qualité. Le questionnaire se termine à la section D par des questions sur les caractéristiques socioéconomiques des répondants.

La section C contient des éléments importants de l'étude qui méritent d'être soulignés ici. Cette section décrit d'abord les ressources en eaux souterraines disponibles dans la BSCT, les pressions et les menaces auxquelles elles sont soumises. Un programme de gestion durable à mettre en œuvre par un Comité de bassin, composé de représentants de l'État, des collectivités locales et des usagers est donc proposé afin de garantir la pérennité de la ressource. Ledit programme prévoit un certain nombre d'actions dont les plus importantes sont présentées aux répondants sous la forme du tableau ci-après.

Tableau 3: présentation des actions prévues dans le programme de gestion durable des ressources en eau

Pour les ménages non connectés au réseau de la TdE	<i>1. Un raccordement au réseau de la TdE</i>
	<i>2. La fourniture d'un service de qualité 24h/24, avec la modernisation et l'extension du réseau de la TdE à toutes les zones habitées dans le bassin,</i>
	<i>3. Des actions de gestion durable des eaux souterraines : infrastructures d'assainissement, mesures de protection contre les pollutions et la surexploitation, etc,</i>
	<i>4. La possibilité de désigner des représentants au Comité de bassin</i>
Pour les ménages qui sont déjà connectés au réseau de la TdE	<i>1. La fourniture d'un service de qualité 24h/24, avec la modernisation et l'extension du réseau de la TdE à toutes les zones habitées dans le bassin,</i>
	<i>2. Des actions de gestion durable des eaux souterraines : infrastructures d'assainissement, mesures de protection contre les pollutions et la surexploitation, etc.</i>
	<i>3. La possibilité de désigner des représentants au Comité de bassin</i>

Il est ensuite demandé au répondant s'il voterait en faveur d'un tel programme (question 43, voir Figure 15).

43. Voteriez-vous pour un tel programme ?

a. Oui (continuer à la question 44) ☐

b. Non (passez à la question 45) ☐

Figure 15: Détails de la question 43 du questionnaire

La question 43 a été spécifiquement posée pour identifier les répondants qui, au départ, n'appuient pas le programme de gestion durable proposé. Cette section se poursuit par des questions sur le prix que le répondant serait prêt à payer pour la mise en place d'un tel programme, dans l'hypothèse où la majorité des résidents du bassin voterait OUI (question 46). Elle vise à recueillir le CAP des répondants (Figures 16 et 17).

Le format carte de paiement ou « *payment card* ou carte de paiement » a été retenu pour susciter la divulgation du CAP des répondants. Proposé par Mitchell et Carson (1981), il offre aux répondants une carte avec une série de chiffres. Les répondants étaient priés de choisir un chiffre sur la carte qui représente le mieux leur volonté maximale de payer.

Cette approche réduit les biais d'ancrage inhérents au sondage. Elle a aussi permis d'insérer dans la carte de paiement des images illustrant les montants proposés (Figure 17). Elles ont pour but de faciliter la perception des sommes proposées dans la carte de paiement, notamment pour les personnes peu scolarisées. La facture d'eau a été retenue comme instrument ou mode de paiement. Il est demandé à chaque ménage de payer un montant forfaitaire pour sa facture d'eau sur une base régulière. Ce fonds contribuera au programme de gestion durable des eaux souterraines dans le bassin.

46. Supposons que la plupart des gens ont voté en faveur du programme de préservation et de gestion durable des eaux souterraines et d'amélioration de l'accès aux services d'eau et d'assainissement, et que donc :

- Vous disposerez d'un branchement de la TdE à votre domicile avec un service de qualité.
- Le plan de protection et de gestion durable des eaux souterraines sera mis en œuvre.
- Le tout sous la supervision des représentants des usagers, des collectivités locales et de l'état.

Sachant que la mise en place d'un programme aussi ambitieux de gestion durable des eaux souterraines dans votre région nécessitera la contribution des usagers par la mise en place d'une redevance pour alimenter un fonds spécial ;

Considérant les difficultés économiques actuelles à l'échelle nationale et mondiale, et afin de permettre la mise en œuvre du programme par le comité de bassin ;

Combien consentiriez-vous à payer en plus par mois sur la facture d'eau de la TdE qui vous sera adressée ?

Veuillez cocher pour choisir l'un des montants ci-dessous :

Figure 16: Première partie de la question 46 du questionnaire

0 frs	75 Frs	350 Frs	800 Frs	1000 Frs	1400 Frs	2200 Frs	3500 Frs
							
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Figure 17: Suite de la question 46 et présentation de la carte de paiement illustrée utilisée dans le questionnaire

A la question 48 (Figure 18), il était demandé au répondant de préciser si le programme était adopté et pour une tranche de 1000 francs, comment il souhaiterait que l'argent soit utilisé. Elle a permis de faire dire aux répondants les portions du CAP à allouer à chacune des composantes de la valeur économique des eaux souterraines. En effet, sur les 1000 francs proposés la réponse « *a* » vise à recueillir la part attribuée par le répondant, à la valeur d'usage et les autres réponses sont les constituants de la valeur de non-usage. Les constituants de la valeur de non-usage ne seront pas discutés dans le cadre de ce travail.

L'hypothèse méthodologique retenue consiste à considérer que la répartition d'une somme arbitraire de 1000 Francs entre les différents usages exprimée par les répondants reflète leurs préférences relatives, exprimées en proportions. Il est ainsi supposé que ces proportions demeurent constantes quelle que soit la valeur absolue du montant à répartir. Cette hypothèse permet donc l'extrapolation des résultats à d'autres montants en conservant une structure proportionnelle identique.

48. Supposons toujours que le programme a été adopté, veuillez indiquer pour une tranche de **1000 francs** comment vous souhaiteriez que l'argent soit utilisé (*Attention : la somme totale doit être égale à 1000 francs*) :

- a. _____francs sur les 1000 doivent être utilisés pour permettre l'accès à l'eau et à l'assainissement pour tous.
- b. _____francs sur les 1000 doivent être utilisés pour lutter contre la pollution, surexploitation et les effets des changements climatiques.
- c. _____francs sur les 1000 doivent être utilisés pour protéger les cours d'eau et environnements reliés aux eaux souterraines.
- d. _____ francs sur les 1000 doivent être utilisés pour permettre aux générations futures d'hériter d'un aquifère avec de l'eau en quantité et en qualité.
- e. Ne sait pas ☐

Figure 18: Détails du contenu de la question 48 du questionnaire d'enquête

Enfin, la questions 50 (Figure 19) a été posée afin de déterminer, d'après les répondants, le degré d'efficacité de la mise en œuvre d'un tel programme. Les réponses ont ainsi servi à établir une relation entre le niveau d'efficacité (pourcentage d'eaux souterraines de qualité) et le CAP.

50. A quel niveau d'efficacité, en pourcentage, pensez-vous que le programme pourra aboutir?

(100% est complètement efficace et 0% est complètement inefficace)

Pourcentage _____%

Figure 19: Détails du contenu de la question 50 du questionnaire d'enquête

2.3.3 Considérations éthiques

L'enquête menée dans le cadre du présent projet de recherche, intitulée « *Enquête sur la valeur économique des eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier togolais* », a obtenu l'approbation du Comité d'éthique de la recherche pour les projets étudiants (CERPE 3) impliquant des êtres humains de l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Le projet a été jugé conforme à la Politique N° 54 sur l'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'UQAM (Annexe D).

2.3.4 Processus d'échantillonnage

Les limites administratives ne se superposant pas avec les limites du BSCT, la population du bassin découle d'une estimation. Le nombre de ménages dans le bassin a été estimé à environ 500 000. Pour une marge d'erreur de 5% et un intervalle de confiance de 95%, l'échantillon cible a été estimé à un minimum de 384 ménages. Un Pré-Test a été effectué en février 2021 dans la zone du Grand Lomé et sa périphérie. Cet exercice a permis (i) de s'assurer de la clarté du questionnaire, (ii) de vérifier le réalisme des valeurs proposées, et (iii) de préciser les détails de la procédure d'enquête. Des enquêteurs et des opérateurs de saisie ont été recrutés et formés pour la circonstance.

L'enquête en elle-même s'est déroulée entre mars et mai 2021, dans les sept (7) préfectures couvertes par le BSCT. En raison des restrictions sanitaires toujours en vigueur durant cette période post-covid 19, les enquêteurs n'ont pas, dans la plupart des cas, directement interrogé les répondants. Ils se sont contentés d'expliquer le but de l'enquête et de remettre les questionnaires qui ont ensuite été remplis par les répondants. Selon le choix du répondant, l'enquêteur est repassé pour récupérer le questionnaire rempli, ou le répondant l'a lui-même fait parvenir à un point de collecte de son choix. Les questionnaires ont également été distribués dans quatorze (14) lycées répartis dans toutes les préfectures du bassin, afin que les lycéens volontaires pour cette tâche les fassent remplir par leurs parents ou tuteurs. En raison des incertitudes qui découlent de cette démarche, notamment en ce qui concerne le nombre de

questionnaires à renvoyer, le choix a été fait d'élargir la taille de l'échantillon, et 900 questionnaires ont donc été distribués.

2.3.5 Estimation du CAP

L'étude part du postulat selon lequel : des eaux souterraines de qualité et abondantes influencent le bien-être des habitants du bassin. A travers du CAP, que l'on suppose traduit par l'habitant en termes monétaires et au regard de ses capacités, comme « l'effort qu'il est prêt à fournir pour disposer d'eau souterraine et des services qui lui sont associés ». Le CAP moyen des ménages du bassin correspond donc à la moyenne des CAP proposés par les répondants de l'échantillon. De même, le CAP médian des ménages du bassin est la médiane des CAP proposés par les répondants de l'échantillon.

Afin d'identifier les facteurs qui influencent le vote pour le programme de gestion durable et le CAP des ménages, un modèle de régression est appliqué en fonction de différentes variables explicatives.

2.3.6 Valeur d'économique totale et valeur d'usage

Partant de l'hypothèse que les précautions prises lors de l'échantillonnage et de la collecte de données, permettent d'avoir des résultats reflétant les dynamiques en cours dans le bassin, il est possible de les extrapoler à l'ensemble de la population du bassin. Les CAP proposés par chaque répondant correspondent donc à la valeur individuelle qu'ils attribuent aux eaux souterraines du BSCT. Ainsi, une fois déterminée cette valeur économique moyenne de l'eau souterraine pour un individu donné, la **valeur économique totale** (VET) est estimée en additionnant les valeurs économiques individuelles ou CAP du nombre total de personnes qui utilisent l'eau de l'aquifère, et en additionnant ces valeurs dans le temps (Boyle *et al.*, 1994; Freeman, 2003; Martin, 1999). La VET de l'eau souterraine du BSCT est déterminée selon la formule suivante :

$$VET = 12 \cdot CAP_{moyen\ mensuel} \cdot Nombre\ de\ ménages\ dans\ le\ BSCT \quad (4)$$

La **valeur d'usage** (VU) est déterminée selon la formule suivante :

$$VU = VET \cdot \% \text{ réponse faite par le répondant à la question } 48\ a \quad (5)$$

Avec le **% réponse 48 a**, la part attribuée par les répondants à la question 48a ramenée à 100.

2.4 Fonction de demande

La fonction de demande exprime la relation entre les prix et les quantités d'un produit présent sur un marché. Elle correspond à la quantité de biens (en abscisses) qu'un individu souhaite acheter en fonction du prix unitaire considéré (en ordonnées). Dans cette étude, cette logique est appliquée aux réponses à la question 50 du questionnaire, en mettant en relation la quantité d'eau souterraine de qualité souhaitée (en %) avec la capacité à payer (CAP) déclarée. Il s'agit là d'une demande marshallienne (Young et Loomis, 2014).

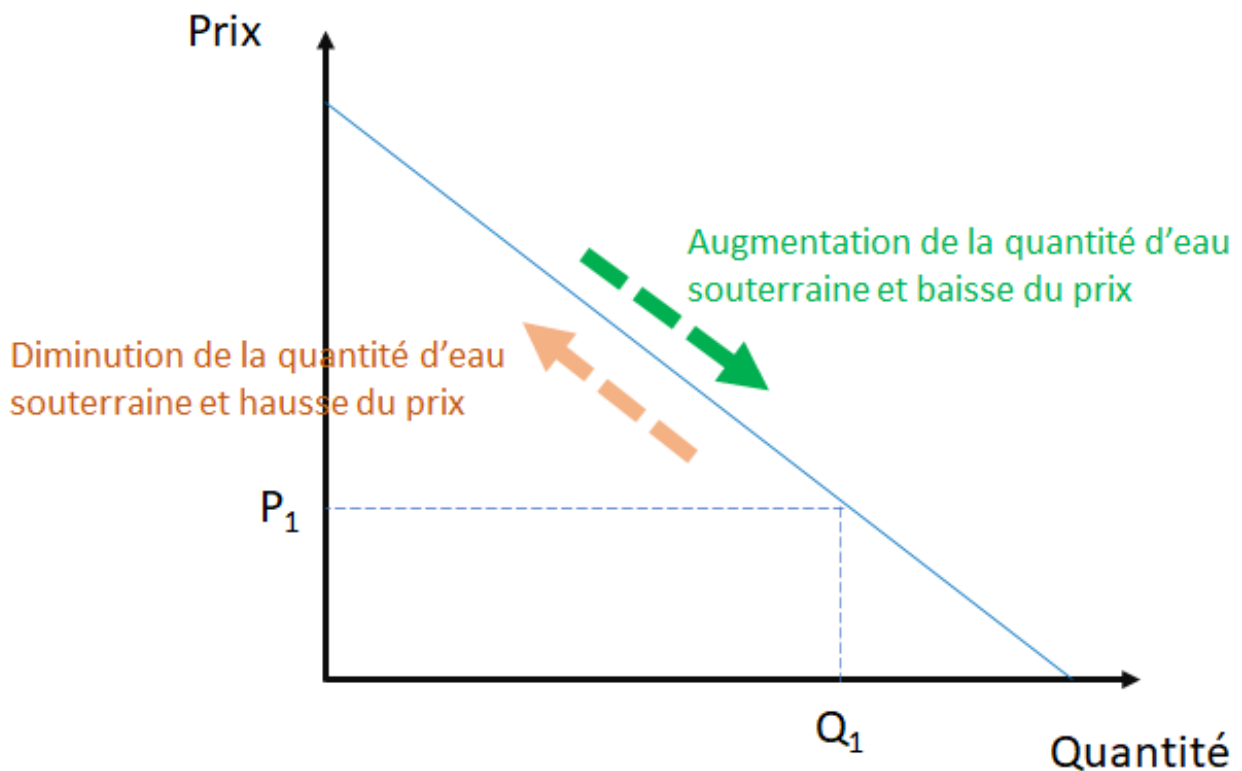


Figure 20: Fonction de demande des eaux souterraines fictive

A partir de cette relation, il est possible d'estimer une valeur monétaire pour chaque niveau de disponibilité en eau souterraine dans le BSCT. Les résultats peuvent être exploités en termes absolus, en valeurs de l'eau chiffrée ou de manière relative (Figure 20). Comme une fonction de demande classique, la quantité est représentée sur l'axe horizontal et le prix sur l'axe vertical. Les premières quantités d'eau sont rares et sont les bienvenues pour les usagers, car elles soulagent leurs besoins en eau. Avec les augmentations supplémentaires qui s'en suivent, le manque d'eau est graduellement résolu,

l'amélioration du bien-être pour une unité supplémentaire d'eau de qualité devient moins intéressante, ceci signifie une valeur marginale de l'eau qui devient plus faible.

Dans cette logique, une hausse du prix peut traduire une raréfaction de l'eau — souvent symptôme d'une mauvaise gestion ou d'un stress hydrique. À l'inverse, une baisse du prix refléterait une meilleure disponibilité, donc potentiellement une gestion plus efficace.

Ce type d'analyse offre un d'outil d'aide à la décision, en permettant de comparer la valeur économique de l'eau selon différents scénarios de gestion, d'aménagement ou de pression sur la ressource. Elle constitue également un levier de communication, en traduisant l'état quantitatif ou qualitatif des eaux souterraines en termes économiques compréhensibles pour les décideurs et le grand public.

CHAPITRE 3

RESULTATS DE RECHERCHE

Ce chapitre présente les résultats de la mise en œuvre du cadre d'analyse à travers la démarche méthodologique décrite au chapitre 3.

3.1 Impacts anthropiques sur les eaux souterraines du BSCT

Selon la thèse de K.A. Djongon (2022) (Voir résumé en Annexe C) , plus de 65% de la surface du BSCT et 73% de la surface de Lomé-Golfe (Figure 21) présentent des conditions pouvant conduire à un risque de dégradation des eaux souterraines situé entre modéré et élevé. Les zones présentant un risque élevé correspondent aux zones de carrières et aux usines d'exploitation des mines (phosphate et clinker), notamment la zone industrielle située sur la côte ainsi que les zones urbaines des grandes villes comme Lomé-golfe, Tsévié et Aného.

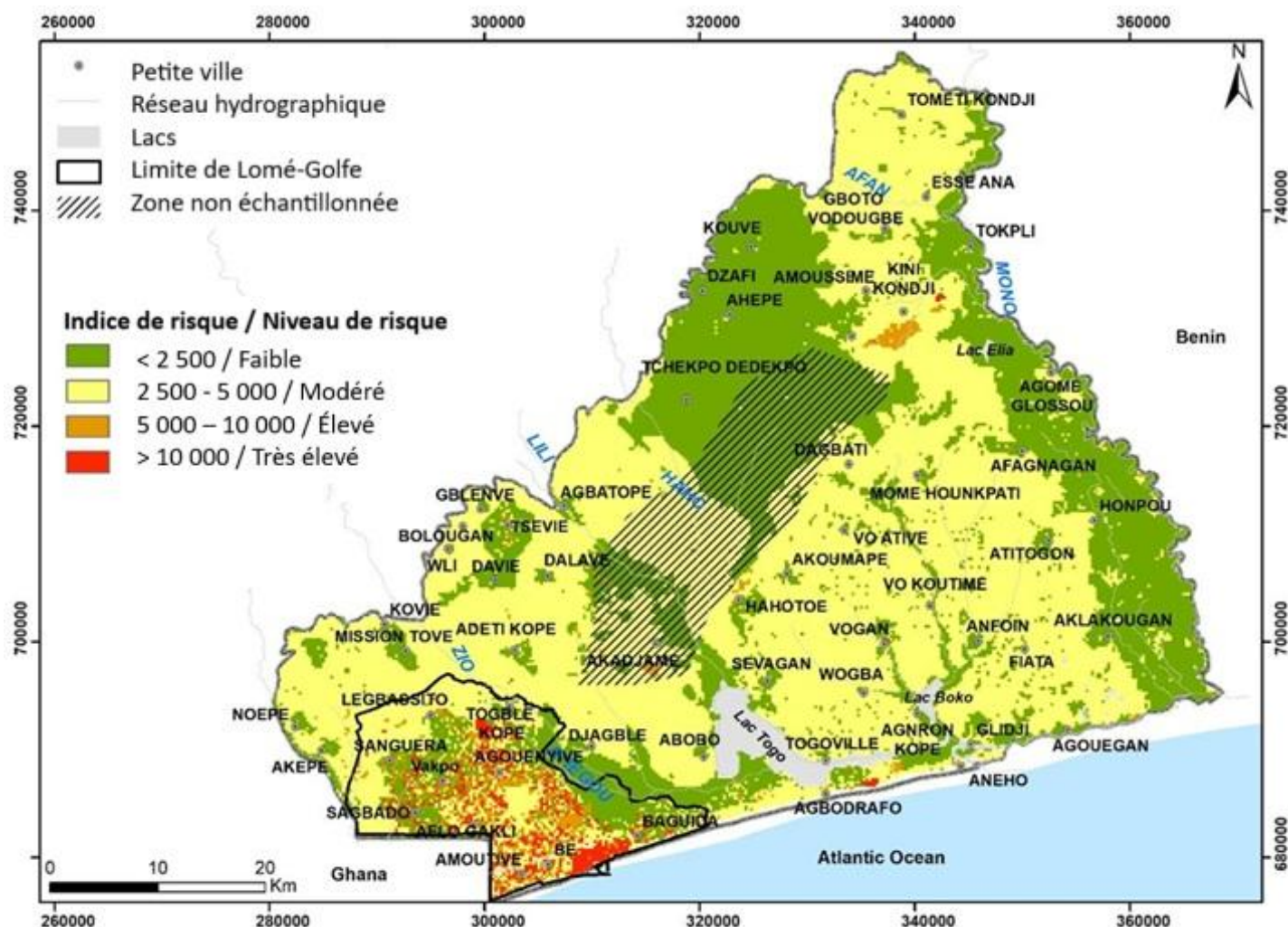


Figure 21: Carte de répartition spatiale des zones à risque de dégradation de la nappe du Continental Terminal du BSCT. La zone hachurée a un degré de confiance moyenne (Djongon, 2022)

3.2 Impacts des changements climatiques sur la recharge des eaux souterraines du BSCT

Les résultats présentés ci-dessous sont totalement nouveaux. Jusqu'à présent, aucune étude n'avait été entreprise pour caractériser et estimer la distribution spatio-temporelle de la recharge des eaux souterraines dans le BSCT. Ces premiers résultats obtenus découlent de la mise en œuvre de la procédure décrite au point 2.2.

3.2.1 Cartes de perméabilité, d'occupation de sol et des pentes

Le coefficient de perméabilité du sol (C_1) a été obtenu à partir de la carte pédologique du Togo (Lamoureux, 1960). Les sols ont été reclassés en trois types en fonction de leur granulométrie : faible

perméabilité (sol argileux), perméabilité modérée (loam sableux) et haute perméabilité (sable/sols sableux). Le résultat illustré à la figure 22 indique un bassin composé principalement de loam sableux. Les sables sont présents sur la côte atlantique et dans les lits des rivières, tandis que les argiles sont concentrées dans les secteurs en amont du lac Togo.

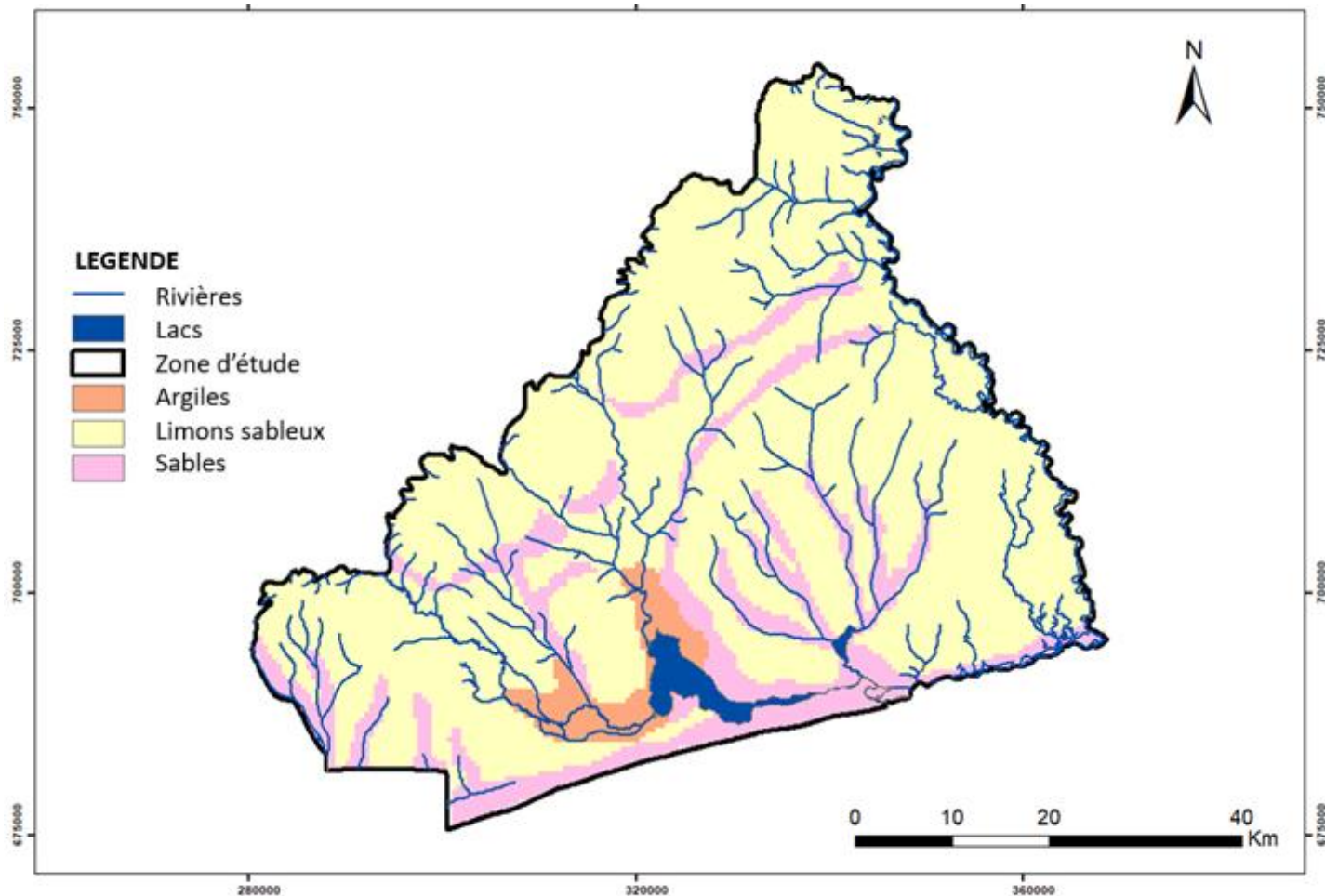


Figure 22: Carte de perméabilité du sol

Afin de caractériser l'occupation du sol, le **coefficient de capacité d'infiltration (C'_2)** est déduit d'une image satellite MODIS de la zone d'étude prise en 2019 (USGS, 2021). L'image a été reclassée selon les capacités d'infiltration indiquées dans le tableau 2 (Voir 2.2.2). Le résultat, obtenu sous forme de carte (figure 23), distingue les zones de perméabilité élevée (forêt et prairies/savane avec $C'_2 = 0,2$) qui sont majoritaires dans le bassin, et les zones de perméabilité moyenne et faible (terres cultivées et zones urbaines avec $C'_2=0,1$).

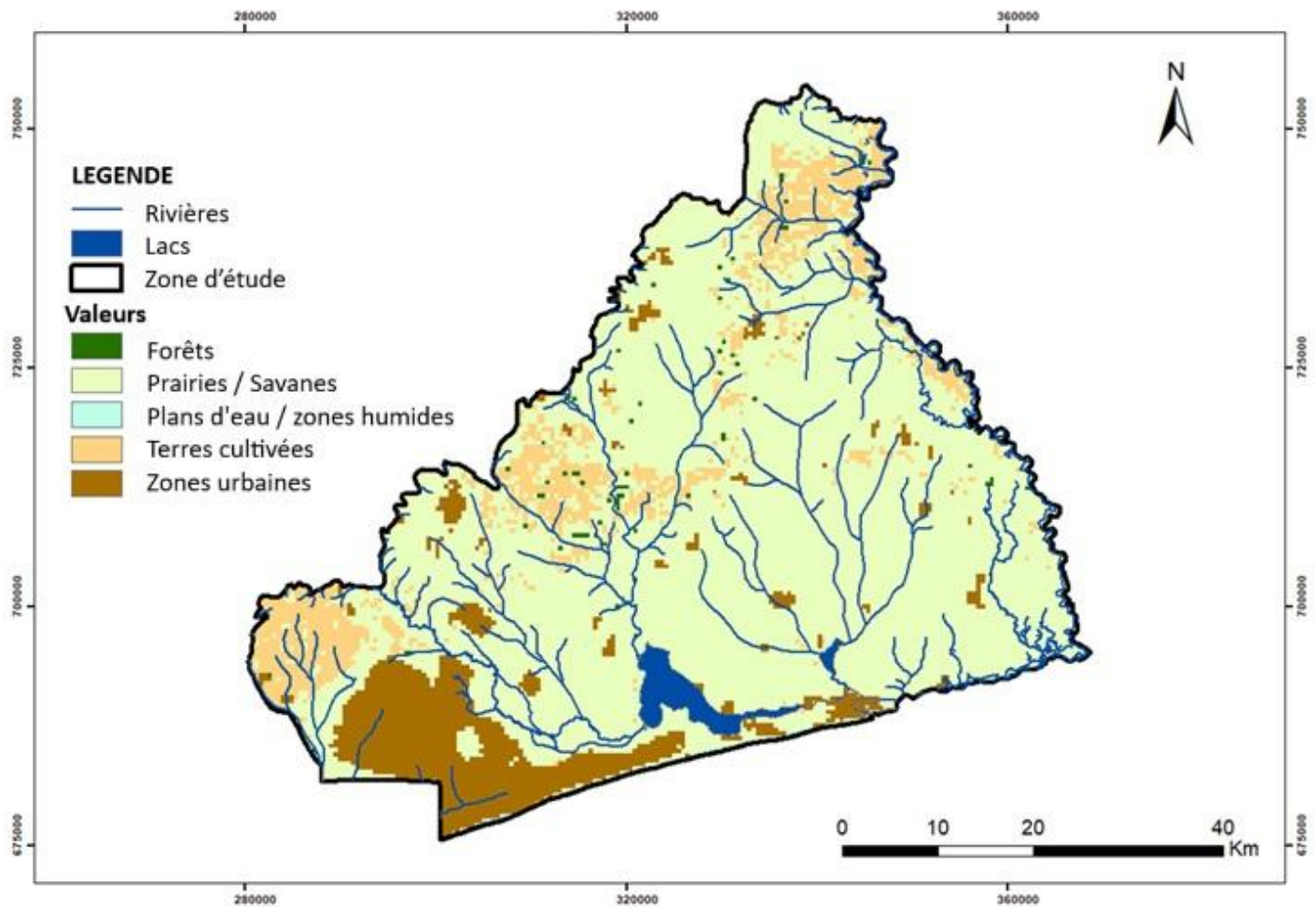


Figure 23: Carte d'occupation des sols

Le coefficient de pente (C'_3) a été généré également sous forme d'une carte (figure 24) à partir des données Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (USGS, 2021). Trois intervalles de pente ont été définis : $< 2\%$ (pentes basses) avec $C'_3 = 0,3$, $2-7\%$ (pentes modérées) avec $C'_3 = 0,2$, et $> 7\%$ (pentes élevées) avec $C'_3 = 0,1$ [15,16,42]. L'analyse de la carte C'_3 indique une topographie relativement plate, principalement 2% , sur la plus grande partie du bassin. Les pentes entre 2 et 7% sont généralement trouvées sur les rives des rivières, tandis que les pentes supérieures à 7% sont quasi inexistantes.

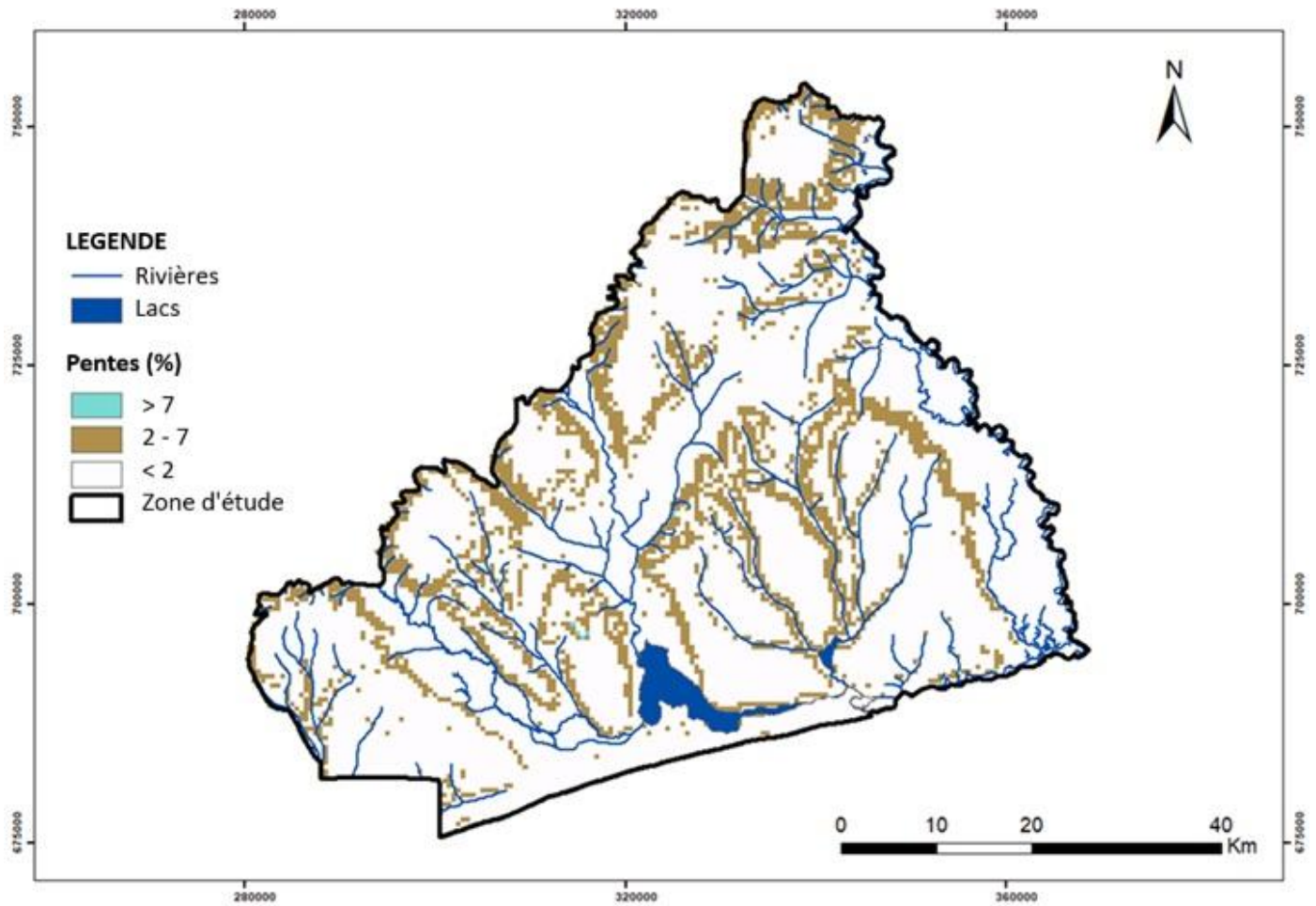


Figure 24: Carte des pentes

3.2.2 Carte de coefficients de ruissellement

L'application de la formule de C :

$$C = 1 - (C'_1 + C'_2 + C'_3), \quad (3)$$

à partir des différentes valeurs de C_1 , C_2 et C_3 précédemment identifiées, a permis de déterminer les valeurs de C qui peuvent être obtenues dans le bassin (voir tableau 4). C varie donc de 0,1 pour les zones de faible ruissellement à 0,7 pour les zones de ruissellement élevé. La même opération a été effectuée sur les cartes de coefficients C_1 , C_2 et C_3 à l'aide du logiciel QGIS. La carte du coefficient de ruissellement (C) obtenue (Figure 25) indique des valeurs de C variant de 0,1 à 0,6. En effet, du fait de la résolution (500 m), les pentes au-dessus de 7% situées sur les falaises autour des carrières ont été ignorées.

Tableau 4: Valeurs adoptées pour le coefficient de ruissellement (C)

Perméabilité du sol	C'1	Capacité d'infiltration	C'2	Pentes	C'3	Coefficient de ruissellement, C
Perméabilité élevée	0,4	Forêts	0,2	<2%	0,3	0,1
	0,4		0,2	2%–7%	0,2	0,2
	0,4		0,2	> 7%	0,1	0,3
	0,4	Prairies/savanes	0,2	<2%	0,3	0,1
	0,4		0,2	2%–7%	0,2	0,2
	0,4		0,2	> 7%	0,1	0,3
	0,4	Terres cultivées	0,1	<2%	0,3	0,2
	0,4		0,1	2%–7%	0,2	0,3
	0,4		0,1	> 7%	0,1	0,4
	0,4	Zones urbaines	0,1	<2%	0,3	0,2
	0,4		0,1	2%–7%	0,2	0,3
	0,4		0,1	> 7%	0,1	0,4
Perméabilité modérée	0,2	Forêts	0,2	<2%	0,3	0,3
	0,2		0,2	2%–7%	0,2	0,4
	0,2		0,2	> 7%	0,1	0,5
	0,2	Prairies/savanes	0,2	<2%	0,3	0,3
	0,2		0,2	2%–7%	0,2	0,4
	0,2		0,2	> 7%	0,1	0,5
	0,2	Terres cultivées	0,1	<2%	0,3	0,4
	0,2		0,1	2%–7%	0,2	0,5
	0,2		0,1	> 7%	0,1	0,6
	0,2	Zones urbaines	0,1	<2%	0,3	0,4
	0,2		0,1	2%–7%	0,2	0,5
	0,2		0,1	> 7%	0,1	0,6
Faible perméabilité	0,1	Forêts	0,2	<2%	0,3	0,4
	0,1		0,2	2%–7%	0,2	0,5
	0,1		0,2	> 7%	0,1	0,6
	0,1	Prairies/savanes	0,2	<2%	0,3	0,4
	0,1		0,2	2%–7%	0,2	0,5
	0,1		0,2	> 7%	0,1	0,6
	0,1	Terres cultivées	0,1	<2%	0,3	0,5
	0,1		0,1	2%–7%	0,2	0,6
	0,1		0,1	> 7%	0,1	0,7
	0,1	Zones urbaines	0,1	<2%	0,3	0,5
	0,1		0,1	2%–7%	0,2	0,6
	0,1		0,1	> 7%	0,1	0,7

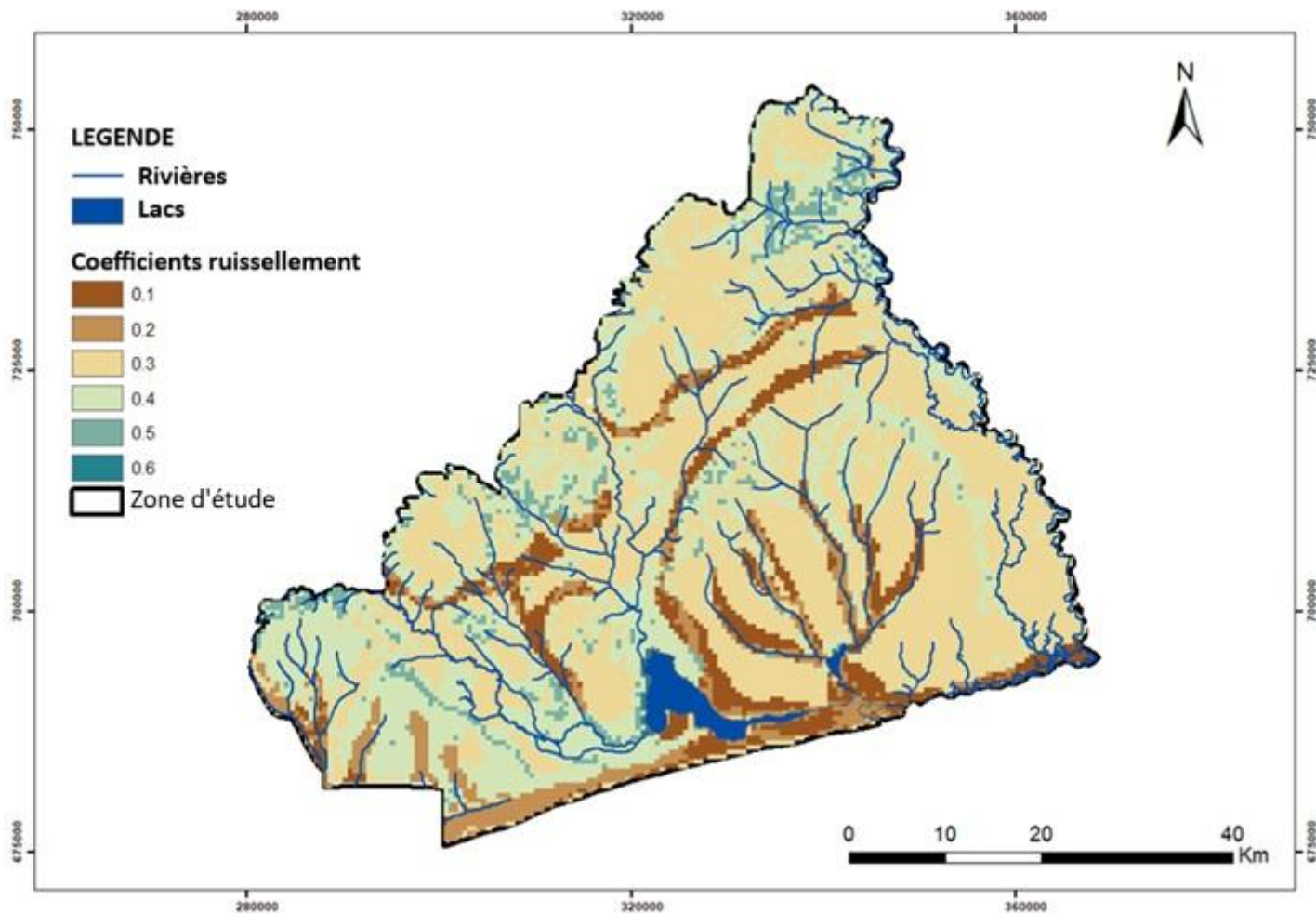


Figure 25: Carte des coefficients de ruissellement

3.2.3 Carte de recharge actuelle des eaux souterraines

L'introduction des données climatiques actuelles dans le modèle de calcul de la recharge pour toutes les classes de coefficients de ruissellement a fourni les résultats présentés dans le tableau 5. L'analyse de ces résultats montre que, sous le climat actuel, la recharge ne peut s'effectuer que dans les régions du bassin où les coefficients de ruissellement se situent entre 0,1 et 0,4. Les intervalles de recharge annuelle des eaux souterraines associées à ces coefficients vont de 225 mm à 46 mm, avec une recharge moyenne d'environ 136 mm (voir tableau 5).

Tableau 5: Recharge sous le climat actuel

Coefficient de ruissellement de surface C	Recharge (mm)												
	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
0,1				12	00	107	16		33	57			225
0,2					31	72	13		22	42			180
0,3						53	1		11	27			92
0,4						34				12			46
0,5													
0,6													
Recharge mensuelle maximale (mm)				12	31	266	30		66	138			

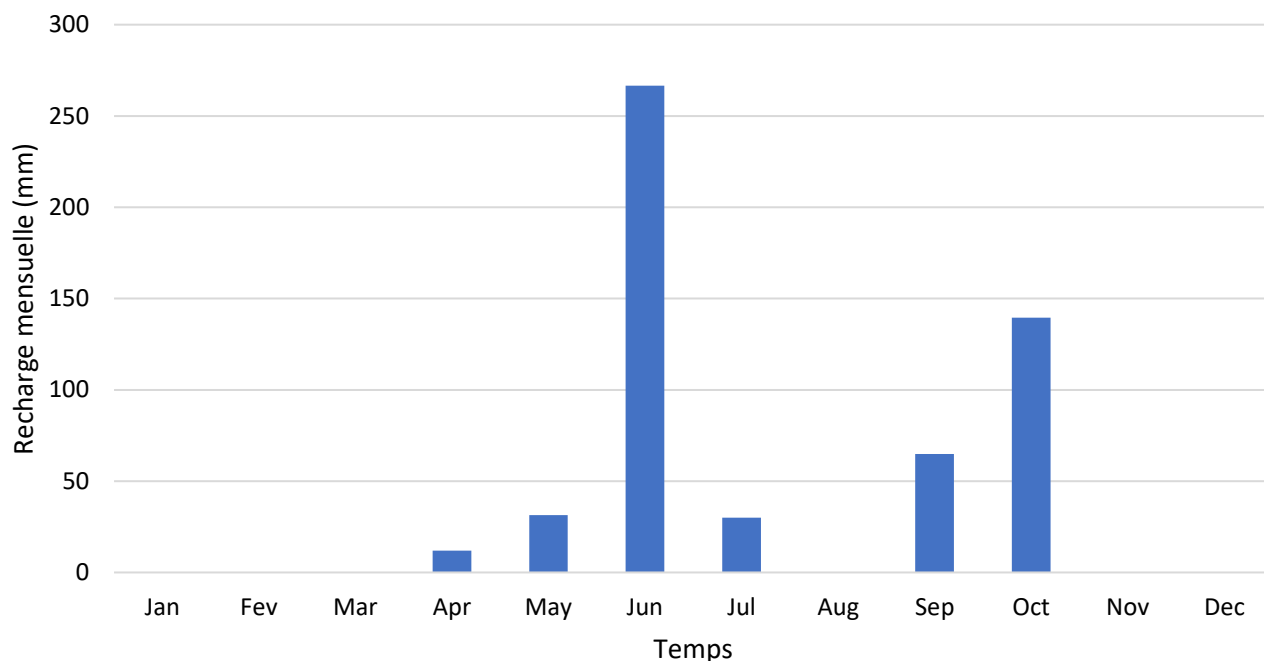


Figure 26: Distribution intra-annuelle de la recharge des eaux souterraines sous le climat actuel (1986-2005)

Une année type dans le climat actuel présente deux pics nets de recharge en réponse aux deux saisons des pluies. Le premier pic de recharge lié à la grande saison des pluies entre mai et juillet est suivi d'un second pic, plus petit et caractéristique de la petite saison des pluies (Figure 26).

Afin de mieux apprécier la répartition de la recharge au niveau du bassin, la carte du coefficient de ruissellement a été reclassée avec les valeurs de recharge correspondantes. La carte de recharge actuelle obtenue (Figure 27) montre que les zones de recharge moyenne (93 mm) et haute (225 mm) sont situées dans des zones voisines, qui correspondent à des sols sableux (en particulier sur la côte) et à des dépôts alluviaux. La recharge est relativement faible (47 mm) dans les zones marquées par l'agriculture, et elle est nulle dans les sols sableux marqués par l'urbanisation. Cette distribution spatiale de la recharge reflète directement la méthode de reclassification basée sur les coefficients de ruissellement. Elle met en évidence une cohérence attendue avec les faibles coefficients identifiés dans le tableau 2, en particulier dans les zones urbaines et agricoles sur sols argileux ou en pente modérée.

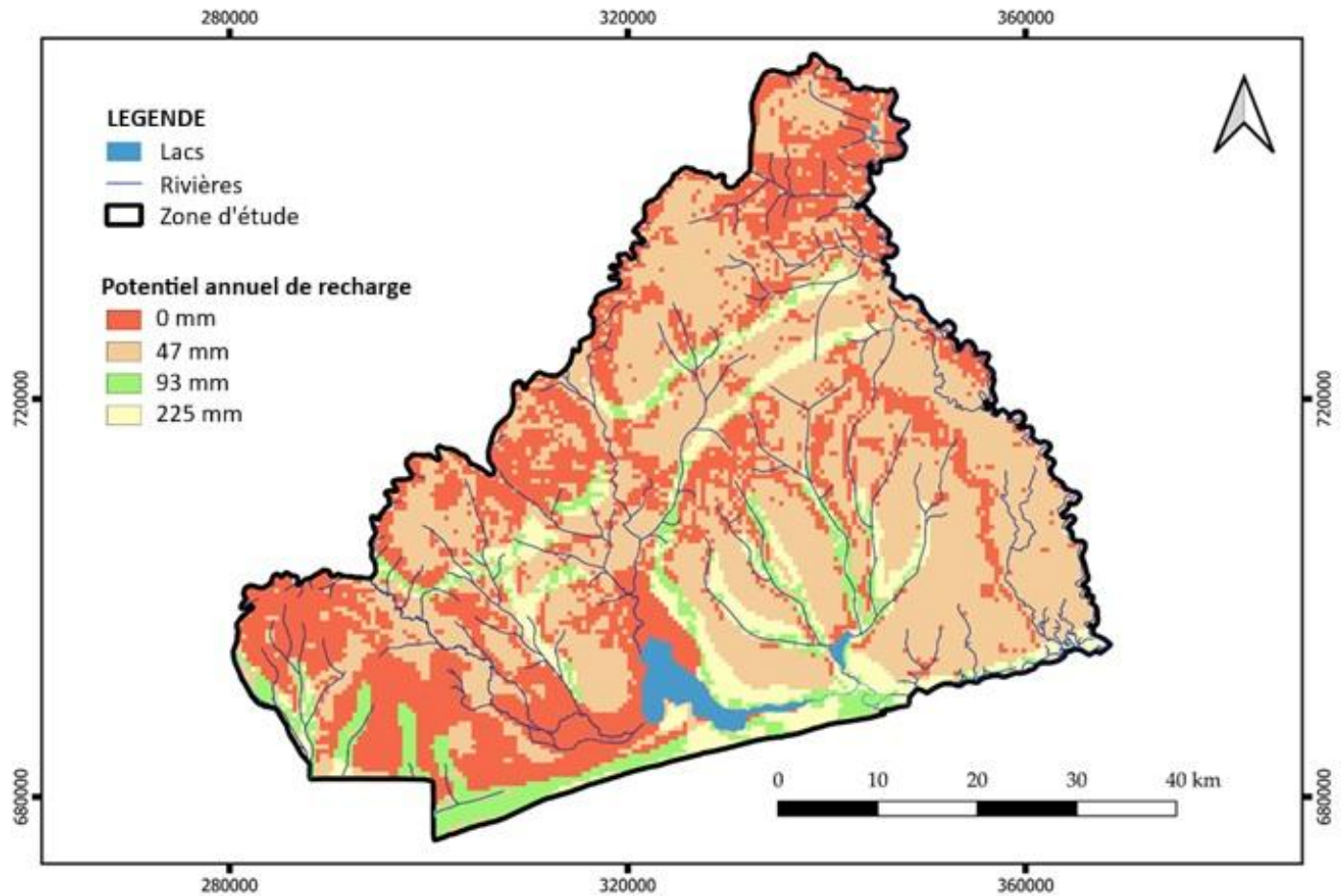


Figure 27: Carte de répartition de la recharge actuelle

3.2.4 Recharge future des eaux souterraines

- **Scénario RCP 4.5 sur les périodes 2020-2039 et 2040-2059**

L'introduction de projections climatiques selon le scénario RCP 4.5 sur la période 2020-2059, dans le modèle de recharge, donne les résultats présentés dans les tableaux 6 et 7. Pour rappel, le scénario RCP4.5 est une voie intermédiaire qui situe le niveau de réchauffement stable autour de $4,5 \text{ W/m}^2$, dans notre cas, il s'agit du scénario retenu comme optimiste.

On peut voir qu'en fonction du coefficient de ruissellement, la recharge annuelle dans le bassin se situera entre 3 mm (pour $C = 0,6$) et 457 mm (pour $C = 0,1$). Dans ce scénario, qui ne tient pas compte de la variation de l'intensité des pluies, les zones présentant des coefficients de ruissellement de 0,5 et de 0,6 se rechargent contrairement à ce qui a été observé au cours des 30 années précédentes. En effet, les pluies plus abondantes permettant de saturer plus longuement le sol, les zones avec les coefficients de

ruissellement de 0,5 et 0,6 ont donc la possibilité d'accumuler suffisamment d'eau pour qu'un surplus serve à la recharge des eaux souterraines.

Enfin, le processus de recharge se concentrera sur une seule phase au cours de l'année, contrairement aux deux pics observés actuellement. Cette évolution constitue l'une des conséquences majeures du changement climatique dans la région. En effet, alors que le climat actuel est marqué par deux saisons des pluies distinctes, générant deux pics de précipitations et, par conséquent, deux pics de recharge, les projections futures indiquent une transformation vers une unique grande saison des pluies. Ce changement se traduira hydrologiquement par un seul pic annuel de recharge.

Tableau 6: Recharge selon le scénario RCP 4.5 au cours de la période 2020-2039

Coefficient de ruissellement de surface C	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
0,1						109	77	104	87	80			457
0,2						83	63	83	68	61			358
0,3						56	49	61	49	43			258
0,4						30	34	40	30	25			159
0,5						5	19	19	12	6			61
0,6							3						3
Recharge mensuelle maximale (mm)						283	245	307	246	215			

Il convient également de noter que les seuils de recharge, c'est-à-dire les recharges minimales, seront plus faibles durant la période 2040-2059, qu'entre 2020-2039. Cela est attribuable à des précipitations qui seront supérieures à la période actuelle, mais plus faibles en 2040-2059 qu'en 2020-2039.

Tableau 7: Recharge selon le scénario RCP 4.5 au cours de la période 2040-2059

Coefficient de ruissellement de surface C	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
0,1						78	108	90	84	60			420
0,2						59	86	71	66	43			325
0,3							64	51	47	26			188
0,4							41	31	28	10			110
0,5							19	11	10				40
0,6													
Recharge mensuelle maximale (mm)						137	318	254	235	139			

- **Scénario RCP 8.4 sur les périodes 2020-2039 et 2040-2059**

Pour rappel, le scénario RCP8.5 correspond aux émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) sans politique climatique explicite débouchant sur 8,5 W/m² en 2100 (Riahi *et al.*, 2011). Il correspond au scénario pessimiste. Les tableaux 8 et 9 montrent les résultats du modèle de charge en utilisant les données climatiques du scénario 8.4. Ils présentent les mêmes observations et tendances que dans le scénario 4.5, sauf que dans ce cas les valeurs sont significativement plus élevées.

Tableau 8: Recharge selon le scénario RCP 8,4 au cours de la période 2020-2039

Coefficient de ruissellement de surface C	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
0,1						79	125	127	104	80			515
0,2						60	102	104	84	61			411
0,3							78	80	63	43			264
0,4							54	57	42	24			177
0,5							30	33	21	6			90
0,6							6	10	1				17
Recharge mensuelle maximale (mm)						139	395	411	315	214			

Par exemple, pour $C=0,1$ la recharge atteint 515 mm, et pour les zones les moins favorables ($C=0,6$) la recharge est supérieure à 17 mm. Comme dans le scénario 4.5, la période 2040-2059, qui est moins pluvieuse que la période 2020-2039, affiche donc une recharge plus basse.

Tableau 9: Recharge selon le scénario RCP 8.4 au cours de la période 2040-2059

Coefficient de ruissellement de surface C	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Total
0,1						66	122	115	78	86			467
0,2						47	98	92	60	66			363
0,3						28	73	70	41	46			258
0,4							49	47	22,	26			144
0,5							26	24	3	6			59
0,6								1					1
Recharge mensuelle maximale (mm)						141	368	349	204	230			

3.2.5 Discussion

Comme décrit ci-dessus, le modèle de Thornthwaite a été utilisé pour estimer la recharge actuelle et future selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (pour les périodes 2020-2039 et 2040-2059), dans le BSCT.

Les résultats résumés à la figure 28 montrent que, dans les deux scénarios, par rapport à la période actuelle, la recharge des eaux souterraines augmente et plus encore sous RCP8.5 que sous RCP4.5. Les résultats indiquent également qu'à l'avenir, la recharge se fera en un seul bloc, à la différence des deux pics de recharge actuellement observés. En effet, la recharge des eaux souterraines calculée par le modèle de Thornthwaite est directement tributaire des précipitations, et dans les deux scénarios, la zone où se trouve le bassin n'aura qu'une seule saison des pluies, comparativement aux deux saisons actuellement observées.

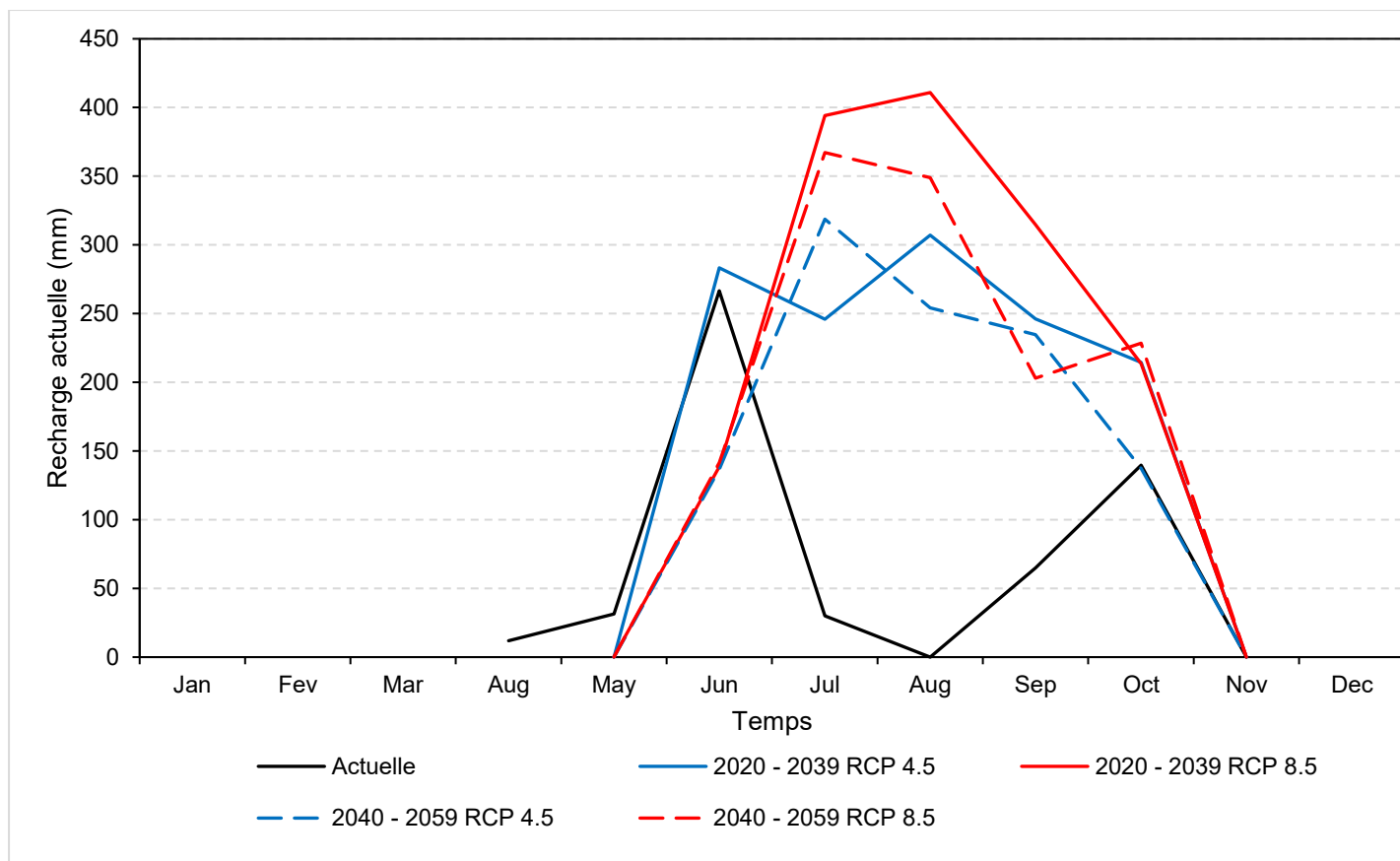


Figure 28: Évolution de la recharge des eaux souterraines dans le bassin sédimentaire côtier togolais

Cette évolution est en grande partie liée à la dépendance directe du modèle de Thornthwaite aux précipitations. Toutefois, au-delà de l'effet du climat, les caractéristiques physiques locales jouent un rôle déterminant dans la distribution de la recharge. Par exemple, le coefficient de ruissellement, influencé par la pente, la perméabilité des sols et la couverture végétale, conditionne fortement la capacité d'infiltration. Comme l'illustre la figure 29, la recharge décroît à mesure que le coefficient de ruissellement augmente. Ainsi, les zones classées C_1 (coefficient = 0,1), qui présentent des pentes faibles, des sols perméables et une couverture végétale dense, enregistrent les niveaux de recharge les plus élevés. À l'inverse, les zones C_6 (coefficient = 0,6), caractérisées par des pentes fortes et une faible capacité d'infiltration, présentent des valeurs très faibles de recharge.

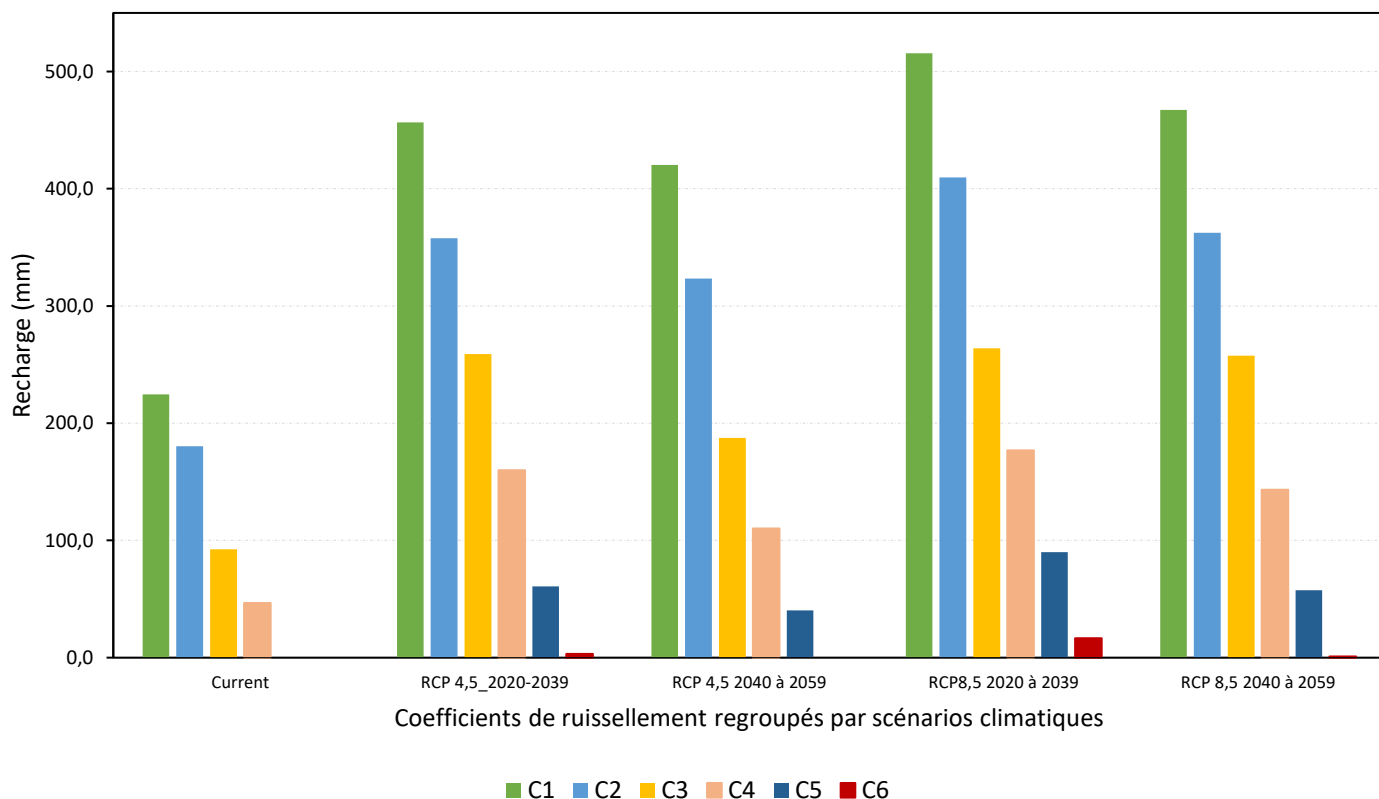


Figure 29: Évolution de la recharge selon le coefficient de ruissellement dans le bassin sédimentaire côtier togolais

Cependant, la surface occupée par chaque classe de ruissellement influe également sur le volume total d'eau infiltrée. Bien que les zones C_1 soient les plus favorables à la recharge, elles représentent une faible part de la superficie du bassin. À l'opposé, les zones C_3 (coefficient = 0,3), moins performantes en termes d'infiltration unitaire, couvrent une surface beaucoup plus étendue, ce qui se traduit par des volumes totaux de recharge plus élevés (voir tableau 10 et figure 30).

Tableau 10: Évolution de la recharge selon le coefficient de ruissellement dans le bassin sédimentaire côtier togolais

Coefficient de ruissellement de surface C	Surface (km ²)	Volume d'eau moyen annuel infiltré (Mm ³)				
		Actuel	RCP 4.5_2020-2039	RCP 4.5_2040-2059	RCP8.5_2020-2039	RCP 8.5_2040_2059
C1	323	72,6	147,4	135,6	166,4	150,8
C2	242	43,7	86,4	78,2	99	87,6
C3	1660	153,7	429,4	311,2	437,7	427,4
C4	997	46,6	159,3	109,9	176,2	142,9
C5	138		8,3	5,6	12,5	7,9
C6	28		0,1		0,05	0,03

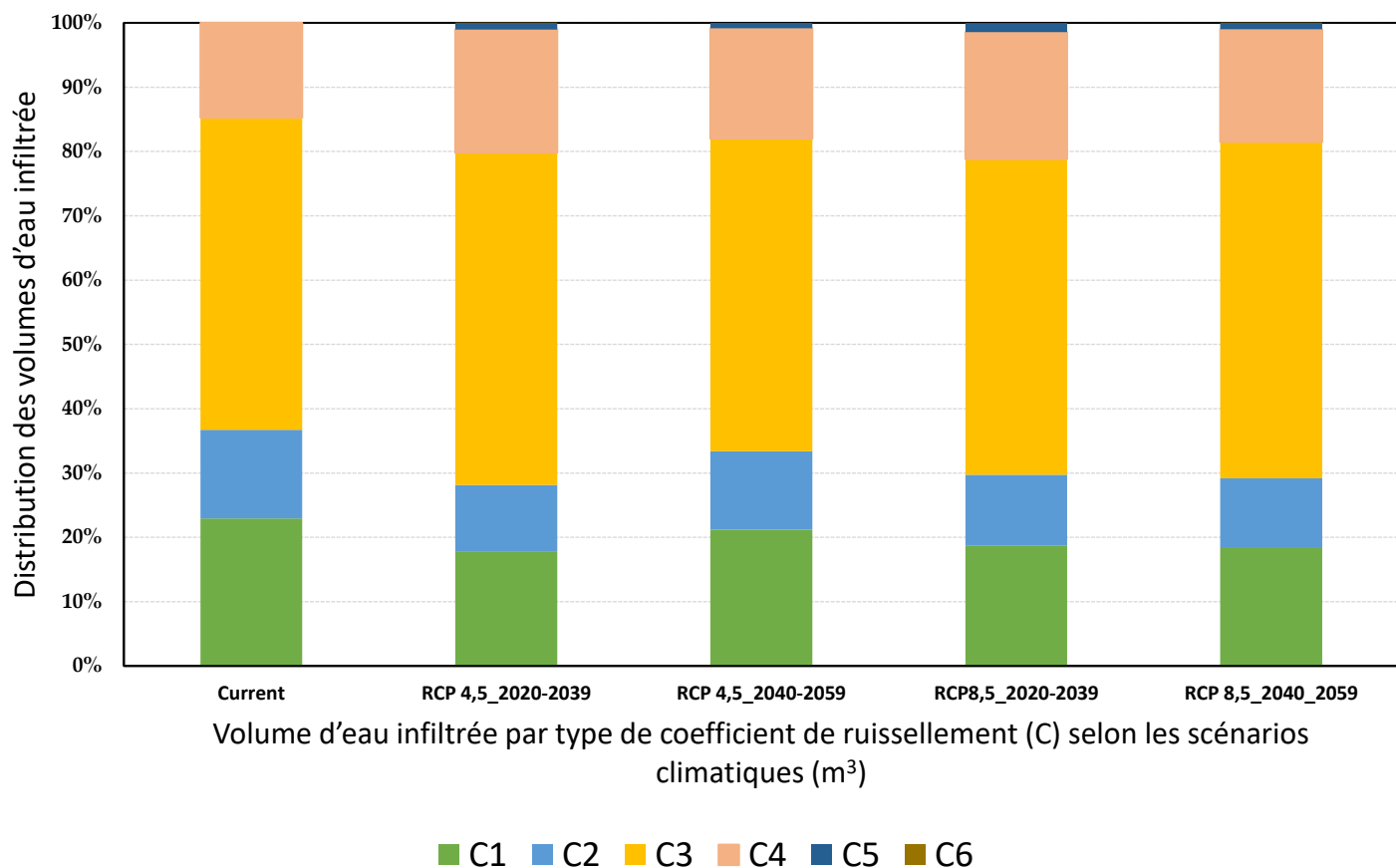


Figure 30: Évolution de la recharge en fonction des volumes infiltrés dans le bassin sédimentaire côtier togolais

Malgré ces résultats encourageants en apparence, plusieurs facteurs incitent à une lecture prudente des tendances observées.

D'abord, les données utilisées dans ce travail ne prennent pas en compte l'intensité future des précipitations. Or, il est en effet possible que dans le futur, l'augmentation des précipitations soit associée à une hausse de leur intensité et donc du ruissellement. Cela diminuerait la recharge prévue. Par conséquent, pour évaluer de manière plus précise la recharge, il faudrait inclure des informations sur les changements passés, présents et projetés de l'intensité des précipitations.

Ensuite, les changements dans l'utilisation des terres peuvent également modifier à la hausse ou à la baisse la recharge dans le futur. Avec une occupation du sol rendant les sols imperméables, la recharge sera réduite. Par contre, une occupation du sol qui favoriserait l'infiltration de l'eau, induira une hausse de la recharge. L'occupation du sol dans le futur est donc un autre paramètre à prendre en compte pour affiner les tendances d'évolution de la recharge dans le futur.

Par ailleurs, même si dans le bassin la recharge augmente dans le futur, elle n'alimentera directement que les nappes en contact avec la surface, c'est-à-dire : la nappe libre du continental terminal et la nappe semi-captive du Maastrichtien. En l'état actuel des connaissances, les potentiels échanges entre les différents réservoirs ne sont pas connus. Le risque de vidange et donc de perte de la ressource de l'aquifère captif du Paléocène ne peut donc pas être exclu.

Autre point d'attention : une augmentation rapide de la recharge ne saurait forcément être une évolution positive, étant donné que la nappe libre du continental terminal est presque affleurante, notamment dans la ville de Lomé. Une élévation considérable du niveau des eaux souterraines pourrait se produire, et il en découlerait des problèmes sanitaires, géotechniques et des inondations plus fréquentes. Cette situation se traduirait également par une augmentation de la vulnérabilité des populations et des infrastructures exposées.

Enfin, il convient de contextualiser les résultats obtenus, ne pas les prendre en valeurs absolues, mais plutôt de manière relative. En effet, dans la méthodologie adoptée, outre ses propres incertitudes liées au bilan hydrique (Dassargues, 2020; Healy, 2010), il est nécessaire d'ajouter les nombreuses incertitudes liées aux projections climatiques et à leur échelle (Aslam *et al.*, 2018). Bien que cette étude fournisse des résultats inédits sur la dynamique de recharge du Bassin Sédimentaire Côtier du Togo (BSCT), elle présente certaines limites inhérentes à la disponibilité et à la résolution des données, ainsi qu'aux choix méthodologiques adoptés. Pour affiner les estimations de recharge et renforcer leur portée opérationnelle, plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés. D'une part, l'intégration de données climatiques à haute résolution, notamment celles tenant compte de l'intensité des précipitations, permettrait de mieux capter les variations spatio-temporelles fines des apports hydriques (Maraun et Widmann, 2018). D'autre part, l'ajout de scénarios de changement d'occupation des sols offrirait une évaluation plus réaliste de l'évolution future des flux d'infiltration (Scanlon *et al.*, 2002; Wada *et al.*, 2010). De plus, le développement de modèles hydrogéologiques tridimensionnels, capables de simuler les échanges entre nappes et les dynamiques verticales et latérales des aquifères, améliorerait significativement la représentation des processus souterrains (Anderson *et al.*, 2015). Il est également essentiel d'intégrer les problématiques d'intrusion saline et de dynamique côtière, particulièrement pertinentes dans les systèmes aquifères littoraux exposés aux pressions anthropiques et climatiques (Werner *et al.*, 2013). Enfin, la validation des résultats à l'aide de données de terrain – piézométrie, qualité de l'eau, traçages – constitue une étape indispensable pour renforcer la crédibilité et la transférabilité des modèles (Healy, 2010). Ces pistes offrent

des perspectives concrètes pour le renforcement des connaissances et le développement d’outils d’aide à la décision en matière de gestion durable des ressources en eau souterraine du BSCT.

Une approche quantitative des incertitudes aurait permis d’enrichir l’analyse. En particulier, l’utilisation de méthodes de type Monte Carlo, consistant à faire varier aléatoirement les paramètres d’entrée (précipitations, température, coefficient de ruissellement, etc.) selon des lois de probabilité, aurait permis de produire des intervalles de confiance sur les résultats de recharge (Beven et Binley, 1992; Risbey *et al.*, 2021). De même, le recours à des ensembles de projections climatiques issus de plusieurs modèles régionaux (multi-model ensembles) aurait permis d’estimer la variabilité des résultats liés au choix du modèle climatique (Mote *et al.*, 2011). L’analyse de sensibilité globale (par exemple via la méthode de Sobol) aurait enfin permis d’identifier les paramètres les plus influents sur la recharge modélisée, guidant ainsi les efforts de collecte de données futurs (Saltelli *et al.*, 2008). Une telle approche contribuerait à une gestion plus prudente et informée des ressources en eau souterraine du BSCT.

Dans cette étude, l'utilisation de données climatiques moyennes pour l'ensemble du bassin constitue une limite importante, car elle ne permet pas de rendre compte des variations spatio-temporelles internes au bassin. Par conséquent, les résultats doivent être compris comme des tendances indicatives plutôt que comme des valeurs précises. Dans le cas spécifique de systèmes aquifères à petite échelle comme celui du Bassin sédimentaire côtier (BSC), des projections climatiques à haute résolution spatiale sont nécessaires, ainsi qu’un ajustement rigoureux du modèle fondé sur des résidus acceptables, c’est-à-dire des écarts raisonnables entre les valeurs observées et simulées.

3.2.6 Conclusions

Un travail inédit a été entrepris dans ce sous-chapitre. La recharge actuelle des eaux souterraines et son évolution future dans le cadre des scénarios climatiques RCP 4.5 « optimiste » et RCP 8.5 « pessimiste » ont été estimés dans le BSCT en utilisant la méthode du bilan Thornthwaite-Mather. Le travail s’est appuyé sur les températures et les précipitations observées dans la région entre 1991 et 2020, et sur les projections climatiques pour les périodes 2020-2039 et 2040-2059. L’évapotranspiration a été réalisée à l’aide de la méthode Thornthwaite, et le ruissellement a été estimé en fonction d’un coefficient qui tient compte de la pente, de la capacité d’infiltration et de la perméabilité du sol.

Dans le climat actuel, la recharge annuelle est comprise entre 47 mm et 225 mm. La carte de distribution spatiale de la recharge actuelle montre que la recharge dans le BSCT dépend pour l'essentiel de la nature du sol. La recharge la plus élevée se produit dans les dépôts sableux le long du littoral et sur les berges des cours d'eau. Les recharges les plus faibles sont dans le loam sableux, en particulier ceux marqués par l'urbanisation et l'agriculture. L'évolution de la recharge future est à la hausse. Selon le scénario « optimiste » RCP 4.5, la recharge annuelle se situera entre 3 mm et plus de 455 mm de 2020 à 2039, et entre 40 mm et 420 mm sur la période 2040-2059. Selon le scénario « pessimiste » RCP 8.5, la recharge dans le bassin sera comprise entre 16 mm et 515 mm par an de 2020 à 2039, et entre 1 mm et 467 mm par an sur la période 2040-2059.

Cette étude, la première dédiée à la question de la recharge dans la région, souligne des éléments de grande importance. Tout d'abord, elle montre que la recharge dans le bassin qui est principalement tributaire des précipitations, va augmenter en raison de l'augmentation de celles-ci. Dès lors, d'un point de vue quantitatif, le risque de pénurie d'eau s'en trouve réduit. À l'échelle mondiale, le BSCT se positionne dans une zone intermédiaire de variation de la recharge, entre les fortes diminutions observées en milieux arides et les augmentations relevées en régions froides ou en altitude, favorisées par la fonte accélérée des neiges et glaciers (Cárdenas Castillero *et al.*, 2021). Par ailleurs, l'étude a identifié des zones privilégiées de recharge des eaux souterraines. Cela offre la possibilité de mieux cibler les actions à entreprendre afin, de protéger la ressource du risque de pollution, et de se prémunir contre les risques de remontées de nappes. Dans un contexte de ressources limitées, il s'agit de renseignements précieux mis à la disposition des gestionnaires des ressources en eau.

3.3 Valeur économique des eaux souterraine du BSCT

3.3.1 Traitement de la base de données

Les données des formulaires d'enquête ont été saisies dans un premier temps sous le logiciel CSPro. La base de données obtenue a été exportée dans le logiciel Stata pour le traitement statistique et économétrique. Le pourcentage de réponses à l'enquête est de 60,3%. Ce pourcentage a été établi en prenant en compte le nombre de réponses obtenues par rapport au nombre total de participants initialement contactés. Le nettoyage des données a mis l'accent sur plusieurs aspects essentiels pour garantir la qualité et la fiabilité des résultats. Cela comprenait la vérification des incohérences et des valeurs manquantes, à l'aide de requêtes conditionnelles et d'outils d'identification de valeurs

manquantes dans Stata. A l'issue du nettoyage de la base, environ 6,7 % des formulaires reçus ont été écartés et un échantillon de 543 individus a été retenu pour le traitement statistique et économétrique.

3.3.2 Profil des répondants et perception des enjeux

La première étape de l'analyse vise à établir le profil des répondants et se faire une idée de ce qu'ils pensent comme enjeux en lien avec l'étude. 17 variables qualitatives et quantitatives ont été sélectionnées afin de dresser le profil socio-économique des répondants et pour analyser leur perception des enjeux actuels dans le BSCT (voir tableaux 11 & 12).

Le portrait type de l'échantillon révèle des ménages dirigés en majorité par des hommes qui sont propriétaires de leurs habitations (variables « Sexe » et « Pop_Loc »). Les ménages sont en moyenne constitués de 5 personnes avec un peu moins de 3 enfants (variables « Nb_pers_menage » et « Nb_enfants »). Ils vivent en majorité en zone urbaine (variable « Zone_resid »), ce qui est confirmé par le poids des préfectures d'Agoué et du Golfe qui constituent le Grand Lomé (variable « Lieu_resid »). En général, ils sont peu connectés au réseau d'eau potable publique de la TdE (variable « Branch_TdE »), ils compensent avec une majorité de forages et de puits dans les concessions (variable « Forage_resid »). On relève également qu'ils possèdent un minimum d'instruction, car très peu de répondants se déclarent ne pas avoir été scolarisés (variable « Niveau_etudes »). Sur le plan professionnel (variable « Occupation »), on constate une faible représentation de retraités et de personnes sans activité. Cela s'explique par le fait que l'enquête cible les « chefs de ménages ». Or en général en Afrique, les personnes âgées vivent avec leurs enfants qui prennent soin d'elles, au même titre que les personnes sans emploi et disposant de peu de ressources qui sont également prises en charge par des membres de la famille élargie. Le fort pourcentage de la modalité « Étudiant/Apprenti », s'explique par le fait que les deux types sont des apprenants, mais les seconds, déjà dans la vie professionnelle, possèdent souvent les ressources leur permettant d'assumer des charges familiales contrairement aux premiers.

Les variables liées à l'Age (« Age ») et au revenu moyen mensuel (« Revenus »), ont nécessité une analyse plus poussée. En ce qui concerne l'Age, la forte proportion de répondants se déclarant avoir « Entre 18 et 24 ans », a suscité des interrogations, notamment sur la représentativité ou la sincérité des réponses. En ce qui concerne les déclarations de revenus, ce n'est pas du tout étonnant. La majorité n'a pas souhaité s'exprimer et des doutes existent sur la sincérité des tranches de revenus déclarées, qui sont sûrement sous-estimées. C'est un fait sociologique que dans ces milieux, l'on ne parle pas de son patrimoine.

Tableau 11: Statistiques descriptives des caractéristiques des répondants

Variables	Modalités	Proportions (%)
Vote_prog	Non	16
	Oui	84
Sexe	Femme	28
	Homme	72
Age	Entre 18 et 24 ans	33,9
	Entre 25 et 34 ans	11,2
	Entre 35 et 44 ans	14,0
	Entre 45 et 54 ans	15,7
	Entre 55 et 64 ans	6,6
	Entre 65 et 74 ans	2,6
	75 ans ou plus	1,1
	Pas de réponse	14,9
	Préfère ne pas répondre	53,2
	Entre 0 et 34999 Frs	14,7
Revenus	Entre 35000 Frs et 74999 Frs	13,8
	Entre 75000 Frs 249999 Frs	10,3
	250000 Frs et plus	7,9
	Pas de réponse	14,2
	Pas scolarisé	1,5
Niveau_etudes	Primaire	3,0
	Collège	6,3
	Lycée ou formation	54,5
	Université	20,5
	Pas de réponse	22,7
	Cadre sup/prof libérale	11,8
Occupation	Fonct/Commerçant/trav autonome	26,2
	Artisan/Agriculteur	11,8
	Retraité	1,8
	Étudiant/Apprenti	17,5
	Sans activité	8,2
	Agée	9,9
	Bas-Mono	10,1
	Lacs	8,5
	Vo	20,8
Lieu_resid (Préfecture de résidence)	Golfe	31,9
	Zio	9,2
	Yoto	7,6
	Pas de réponse	2,0
	Rural	39,6
Zone_resid	Urbain	60,4
	Locataire	33,9
Prop_Loc	Propriétaire	66,1

Avis_qual_eau	Plutôt bonne	42,5
	Plutôt mauvaise	23,4
	Ne sait pas	34,1
Forage_resid (Forage ou puits à domicile)	Oui	70
	Non	30
Branch_TdE (Branchement de la TdE à domicile)	Non	63,2
	Oui	36,8
	Très préoccupants	61,1
Problèmes_environ (Avis sur les problèmes environnementaux)	Préoccupants	19,9
	Peu préoccupants	5,9
	Pas préoccupants	1,7
	Ne sait pas	11,4

Tableau 12: Statistiques descriptives des caractéristiques individuelles retenues (suite et fin)

Variables	Moyenne	Ecart type	max	min
BID (CAP proposé)	610,175	175,108	0	3500
Niveau_effi_prog	34,76	42,015	0	100
Nb_enfants	2,243	2,54	0	21
Nb_pers_menage	5,114	4,574	0	45

Les principaux aspects et caractéristiques des ménages interrogés concernant : le vote pour le programme, le sexe, l'âge, le niveau de scolarité et le lieu de résidence sont présentés ci-après.

Vote pour le programme

Selon le sondage, 84 % des participants expriment leur volonté de soutenir le programme de gestion durable des eaux souterraines du BSCT. Cette forte approbation peut être interprétée comme le reflet d'une préoccupation particulière des participants à l'égard des questions environnementales en général et celles liées aux eaux souterraines en particulier. La réponse des populations peut aussi simplement s'expliquer le désir d'avoir un meilleur accès aux services d'eau potable et d'assainissement. En effet, selon le ministère de l'eau et de l'hydraulique villageoise du Togo, le taux de desserte en eau potable de la région Maritime (sans Grand Lomé) au 31 décembre 2022 était de 74% en milieu urbain, 56,58% en milieu semi-urbain et de 39,41% en milieu rural, ce qui laisse de côté une grande partie des populations du bassin.

Sexe

D'après les résultats, 72 % des individus interrogés sont de sexe masculin, tandis que seulement 28 % sont des femmes. Cette disparité n'est guère surprenante étant donné que la population cible est constituée

principalement des chefs de ménage, un rôle qui est statistiquement plus souvent occupé par des hommes que par des femmes.

Age

La répartition par âge révèle que les jeunes de 18 à 24 ans sont la catégorie la plus représentée dans l'échantillon, constituant près de 34 % de celui-ci (Figure 31). Ce constat n'est pas étonnant sachant que l'âge médian de la population togolaise est de 20 ans (DGSCN, 2023). Il est également à noter que 14 % des participants ont choisi de ne pas divulguer leur âge. Ce taux élevé de non-réponses peut s'expliquer par les us et coutumes locales. Elles incitent les populations à être réservées sur les questions personnelles, notamment celles liées à l'âge et aux revenus, et à choisir des réponses par défaut.

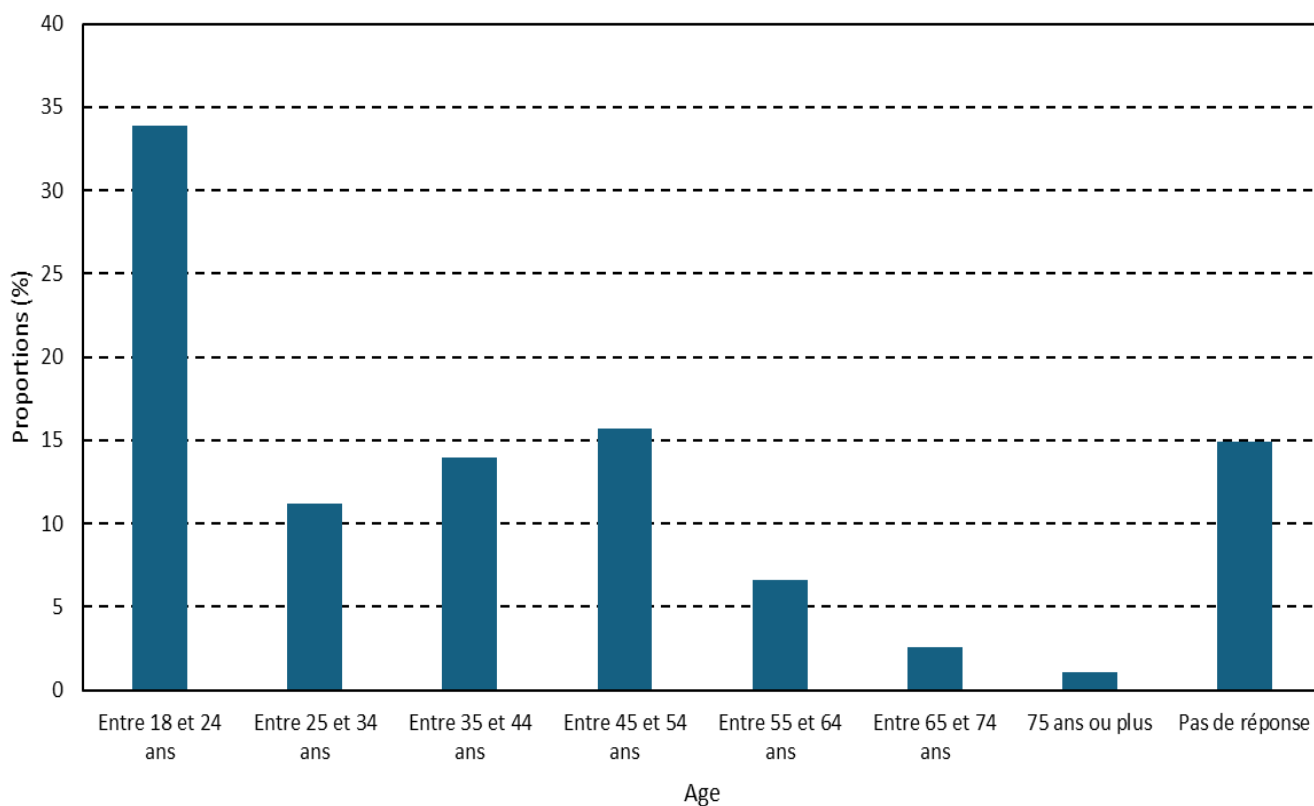


Figure 31: Répartition des répondants par tranche d'âge

Niveau étude

En ce qui concerne le niveau d'instruction, il est important de souligner que la majorité des individus de l'échantillon ont atteint un niveau d'éducation supérieur au collège. En effet, 54,5 % ont déclaré avoir un niveau d'études correspondant au lycée ou ont suivi une formation professionnelle, tandis que 20,6 % ont atteint le niveau universitaire (Figure 32). Il s'agit de la frange la plus active de la société. On y trouve les individus les plus instruits, mais aussi les chefs de ménage, en d'autres termes, ceux qui ont la responsabilité de répondre aux besoins fondamentaux de leur famille, tels que l'accès à l'eau.

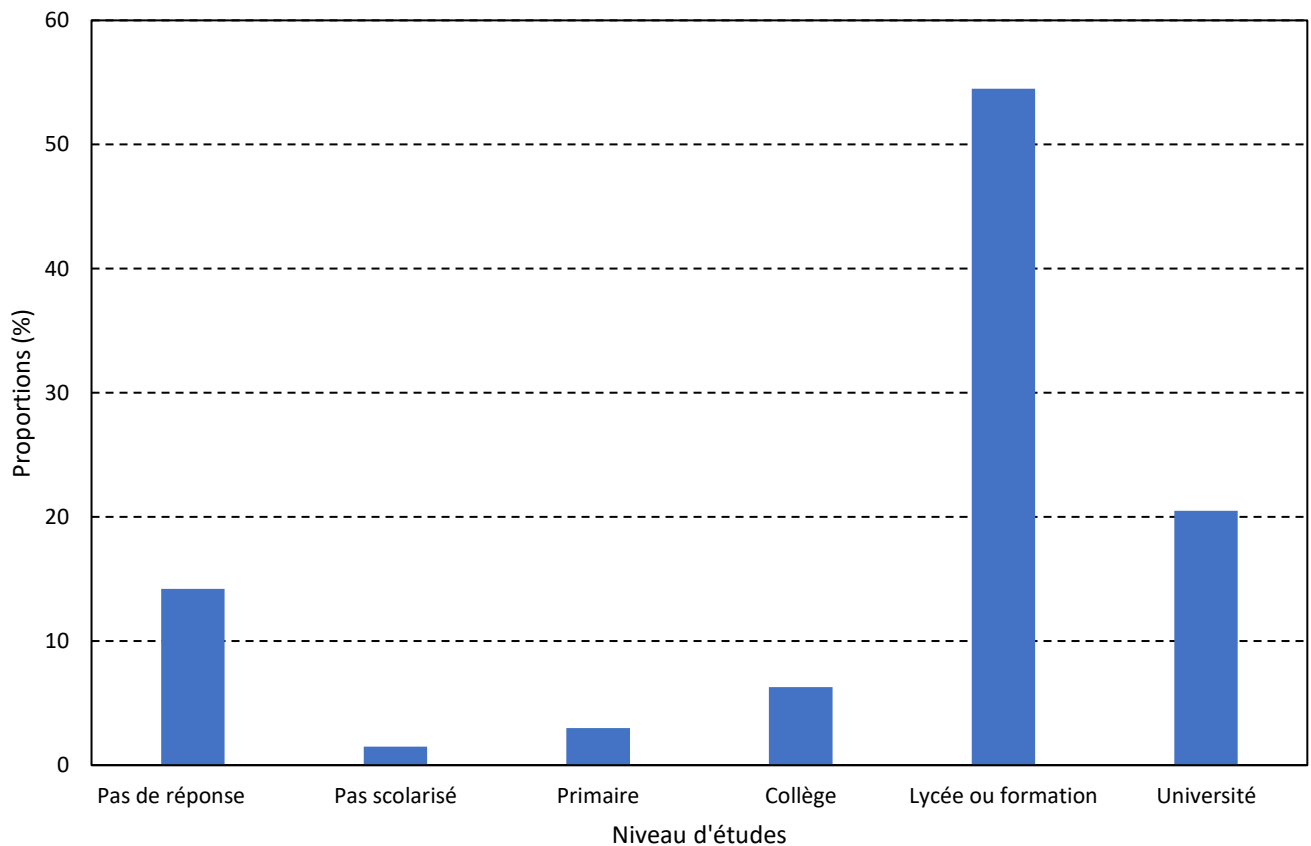


Figure 32: Répartition des répondants en fonction du niveau d'études

Zone de résidence

60% des répondants se déclarent résider en milieu urbain contre 40% en milieu rural. Ce qui est en phase avec la place prépondérante qu'occupe la capitale Lomé sur le plan démographique, soit environ 16,6% de la population du pays (DGSCN, 2023).

En résumé, les populations du bassin semblent conscientes et soucieuses des questions environnementales : la forte adhésion à la mise en place du programme de gestion durable proposé (variable « Vote_prog »), et les plus de 80% de personnes préoccupées par ces questions (variable « Problèmes_environ »), en témoignent. Toutefois, concernant leur opinion sur l'état de qualité des eaux (variable « Avis_qual_eau »), ils sont à peu près autant la juger de bonne qualité, de mauvaise qualité et à ne pas avoir d'avis.

Cependant, les répondants semblent assez pessimistes en ce qui concerne l'efficacité finale du programme qui sera mise en œuvre dans le bassin. En moyenne, ils estiment que le programme sera efficace à 34%.

3.3.3 CAP des ménages

Après avoir mieux cerné les participants à cette enquête, il est question de savoir quelle valeur ils accordent eaux souterraines de leur région.

Tableau 13: CAP moyen et médian

Variable	N	Moyenne	Ecart-type	Médiane	Min	Max
BID_47	543	516	654	350	0	3500

Les résultats de la mise en œuvre de la démarche décrite au point 3.3.5 du chapitre 3 dans le logiciel Stata contenus dans le tableau 13, donne : un CAP_{moyen mensuel} de 516 francs CFA (environ 0,86 \$ US) et un CAP_{médian mensuel} de 350 francs CFA (environ 0,58 \$ US).

A l'année le CAP_{moyen} est de 6 187,2francs CFA (environ 10,42\$ US) et le CAP_{médian} de 4 200 francs CFA (environ 7\$ US).

Les montants initialement exprimés en francs CFA ont été convertis en dollars américains selon la parité du pouvoir d'achat (PPA).

Ces résultats sont bien en deçà des CAP révélés par la méta-analyse mondiale sur la valeur des eaux souterraines réalisée par Neverre et Brouwer (2020). Dans cette étude, aux USA, le CAP_{moyen} était de 821,22\$, en Europe il était de 177,84\$, dans les autres pays (Iran, Tunisie, Canada, Vietnam et Bangladesh) il était de 60,61\$. Aucune étude semblable n'a été identifiée dans les régions d'Afrique subsaharienne à des fins de comparaisons. Nos résultats ne sont comparables qu'à ceux obtenus au Vietnam il y a bientôt 20 ans par Danh (2007). Il avait également trouvé une valeur moyenne du CAP_{moyen} équivalent à 8,86 USD

par an. Dans le cadre d'un intervalle de confiance de 95 %, la valeur moyenne du CAP oscille entre 9,60 à 10,86 USD.

Enfin, analysant le poids des CAP moyen par rapport aux revenus médians en 2020 dans ces différents pays, on constate que l'effort proposé par les Togolais n'est pas si éloigné de ceux consentis à travers le monde (WPR, 2020). Il est de 1,5 % du revenu médian au Togo, pour 1,4 % en Iran, 1,8 % en Tunisie, 1,9 % au Vietnam, 0,3 % au Canada, 0,8 % en Europe, 4,3 % aux USA et 5,4 % au Bangladesh.

3.3.4 Déterminants du Vote pour le programme

Nous cherchons à identifier les variables qui déterminent le vote pour un programme de gestion durable des eaux souterraines dans le BSCT. Ceci afin de mieux comprendre les facteurs influençant les décisions des votants. Cette compréhension est cruciale pour concevoir des stratégies efficaces de communication et de persuasion, adaptées aux préoccupations et aux motivations de la population.

Notre modèle économétrique d'analyse des facteurs affectant le vote pour un programme de gestion durable des eaux souterraines dans le BSCT repose sur la régression logistique (Berkson, 1944). En effet dans notre étude la variable expliquée (vote) prend la valeur 0 contre le programme ou 1 pour le programme ce qui rend inappropriée l'estimation linéaire. Le modèle général suppose Y , la variable expliquée et X la matrice des variables explicatives, la régression logistique s'exprime sous la forme de probabilité suivante :

$$\log\left(\frac{p(x)}{1-p(x)}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p \quad (6)$$

Où $p(x)$ désigne la probabilité $P(Y = 1|X = x)$ et $x = (x_1, \dots, x_p)$ est une réalisation de la matrice X des variables explicatives. Les coefficients $\beta_0, \dots, \beta_p$ sont estimés par la méthode du maximum de vraisemblance à partir des 543 observations.

Dans l'ensemble, quinze (15) variables ont été considérées dans notre étude pour analyser les déterminants du vote pour un programme de gestion durable des eaux souterraines dans le BSC, Après une procédure de recherche pas à pas par la méthode de sélection progressive (stepwise en Anglais) (Stata, 2023), 7 variables ont été retenues (Annexe E), Il s'agit:

- de l'âge («Age»), du fait de posséder un forage ou un puits à domicile («Forage_re»),
- de la préfecture de résidence («Lieu_resi»),
- de la profession («Occupation»),
- du fait d'être propriétaire ou locataire («Prop_Loc»),
- du revenu («Revenus») et
- du nombre d'enfants («Nb_enfants»).

La sélection progressive consiste à chaque étape d'estimation à un réexamen des tests de Student pour chaque variable explicative déjà introduite dans le modèle. S'il se trouve que des variables explicatives ne sont plus significatives, on retire du modèle la moins significative d'entre elles. Le processus continu ensuite jusqu'à ce que plus aucune variable explicative ne puisse être introduite ou retirée du modèle. (Voir le résultat de la régression logistique Stepwise dans Stata en Annexe E.

Lorsqu'on considère les différentes variables de notre modèle le modèle se spécifie sous la forme :

$$\text{Prob(oui)} = \beta_0 + \beta_1 \text{nb_enfants} + \beta_2 \text{occupation} + \beta_3 \text{Lieu_resi} + \beta_4 \text{Forage_resid} + \beta_5 \text{Age} + \beta_6 \text{revenus} + \beta_7 \text{Prop_loc} + \varepsilon \quad (7)$$

3.3.5 Déterminants du CAP

De nombreuses recherches ont montré que le CAP pouvait être influencé par différentes variables telles que: les caractéristiques du produit ou du bien (présentation, personnalisation ou marque), la politique de prix (mode de paiement et tarif) ou encore de l'environnement (Gall-Ely, 2009). Il s'agit de facteurs déterminants à connaître pour la mise en place d'une gouvernance efficace des ressources en eau. Dans notre cas, l'identification des facteurs qui influencent le CAP s'est faite sur l'analyse des variables explicatives du Vote pour ou contre le programme de gestion durable des eaux souterraines du BSCT et celles des propositions financières choisies sur la carte de paiement.

La méthode Tobit a été retenue pour analyser les déterminants de la CAP des ménages (variable « BID »). Cette approche est particulièrement adaptée, car 29 % des personnes interrogées ont rapporté une CAP égale à zéro. Dans ce cas, les données sont dites censurées, c'est-à-dire que pour une partie des individus, la valeur observée est limitée par un seuil (ici, zéro), sans refléter nécessairement leur volonté réelle. L'utilisation de la méthode des moindres carrés ordinaires (MCO) serait inadaptée, car elle ignorerait cette

censure, conduisant à des estimations biaisées. La méthode Tobit, en revanche, permet de tenir compte de ces valeurs nulles et d'estimer correctement les effets des variables explicatives.

Après une procédure de recherche pas à pas par la méthode de sélection progressive, 7 variables ont été retenues (Voir le résultat de la régression MCO Stepwise dans Stata en Annexe F). Il s'agit :

- de l'âge («Age»),
- du fait d'être connecté au réseau de la Tde («Branch_Tde»),
- de la préfecture de résidence («Lieu_resi»),
- du degré de sensibilisation aux questions environnementales («Problème_»),
- du niveau d'instruction («Niveau_et»),
- du revenu («Revenus »)
- et du niveau d'efficacité du programme espéré («Niveau_effi_prog»).

Lorsqu'on considère les différentes variables de notre modèle le modèle se spécifie sous la forme :

$$\begin{aligned}
 \mathbf{BID} = \gamma_0 + \gamma_1 \text{Age} + \gamma_2 \text{Branch}_{\text{TdE}} + \gamma_3 \text{Lieu}_{\text{resi}} + \gamma_4 \text{Problèmes}_{\text{environ}} + \gamma_5 \text{Niveau}_{\text{etu}} \\
 + \gamma_6 \text{revenus} + \gamma_7 \text{Niveau}_{\text{effi}_{\text{prog}}} + \varepsilon
 \end{aligned}
 \quad (8)$$

3.3.6 Résultats des estimations des modèles

Après l'identification des principales variables explicatives, une analyse plus précise est nécessaire pour vérifier la robustesse des modèles. Les résultats présentés dans le tableau ci-dessous (tableau 14) sont organisés en trois colonnes distinctes. La première colonne met en évidence les variables indépendantes prises en compte dans notre étude et la deuxième colonne présente les résultats du modèle « Vote ». La dernière colonne du tableau indique les résultats des estimations obtenues à l'aide du modèle « CAP ».

Tableau 14: Résultats des estimations Logit et Tobit

Variables	Vote (Logit)	CAP (Tobit)
Prop_Loc	-0,569** (0,042)	
Age_Entre 25 et 34 ans		294,008** (0,023)
Age_Entre 35 et 44 ans		232,28* (0,057)
Age_Entre 55 et 64 ans	1,686** (0,030)	

Lieu_resi_Agoè	-0,950** (0,010)	-531,566*** (0,000)
Lieu_resi_Vo		-289,32* (0,051)
Lieu_resi_Bas-Mono	-1,45*** (0,001)	
Niveau_et_Lycée_formation	0,539* (0,055)	
Revenus_0 et 34999 f	1,299*** (0,005)	231,405** (0,047)
Revenus_35000 Frs et 74999	1,2691*** (0,006)	234,46** (0,049)
Revenus_75000 Frs 249999f	2,698*** (0,009)	
Problème_ Préoccupants		296,38*** (0,004)
Forage_re_Non	0,511* (0,082)	
Nb_enfants	0,188*** (0,003)	
Occupatio_ Fonct/Commerçant/trav	-0,731** (0,035)	
Niveau_effi_prog		-1,66* (0,090)
Avis_qual_Ne sais pas		-175,88** (0,045)
_cons	1,414*** (0,000)	412,98*** (0,000)
Pseudo R2/R2	0.1601	0.0072
LR	LR chi2(10)= 66.12;Prob>chi2=0.0	LR chi2(9)= 49.31 ; Prob > chi2 = 0.00
Nb obs	543	543

*** p<0,01 ; ** p<0,05 ; *p<0,1 ; les P values en parenthèse

3.3.6.1 Résultats du modèle Logit – Déterminants du vote

L'estimation du modèle Logit, présenté dans le tableau 14, permet d'identifier les facteurs influençant significativement la probabilité de voter en faveur d'un programme de gestion durable des eaux souterraines. Les résultats montrent que plusieurs variables explicatives ont des effets statistiquement

significatifs, confirmant la pertinence des choix de spécification du modèle. Le test de vraisemblance (LR $\chi^2 = 66,12$; $p < 0,01$) permet de rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle tous les coefficients sont nuls, tandis que le pseudo R^2 de 0,1601 indique que les variables explicatives retenues permettent de capter une part non négligeable de la variation de la variable dépendante. De plus, la qualité prédictive du modèle, supérieure à 80 %, conforte la robustesse des résultats.

3.3.6.1.1 Variables sociodémographiques

La variable « **âge** » apparaît comme un déterminant significatif du vote, mais son effet n'est pas uniforme selon les tranches d'âge. En particulier, les individus âgés de 55 à 64 ans ont une probabilité significativement plus élevée de voter pour le programme, avec un coefficient estimé à 1,686 ($p < 0,05$). Cette valeur relativement élevée implique un effet marginal important. Toutes choses égales par ailleurs, appartenir à cette tranche d'âge augmente substantiellement la probabilité d'un vote favorable. Ce résultat peut s'interpréter à la lumière d'une plus grande conscience des enjeux liés à la gestion durable des ressources naturelles chez les personnes plus âgées, souvent davantage confrontées aux risques environnementaux et aux ruptures d'accès aux services de base. La magnitude du coefficient suggère que l'âge n'est pas seulement un prédicteur symbolique du soutien au programme, mais qu'il joue un rôle central dans la formation des préférences citoyennes.

Le nombre d'enfants au sein du ménage exerce également un effet positif sur la probabilité de vote, avec un coefficient estimé à 0,188 ($p < 0,01$). Cela signifie qu'un enfant supplémentaire accroît la probabilité de soutenir le programme. Bien que la valeur du coefficient soit relativement modeste, son interprétation en termes cumulatifs est importante, notamment pour les ménages de taille plus grande. Cette relation suggère que les parents projettent une préoccupation intergénérationnelle dans leur comportement politique, motivée par la volonté d'assurer un accès durable à l'eau pour leurs enfants.

Le niveau d'éducation secondaire (lycée ou formation professionnelle) est associé à une probabilité plus élevée de voter pour le programme, avec un coefficient de 0,539 ($p < 0,1$). Ce résultat est cohérent avec les théories selon lesquelles l'éducation améliore la capacité des individus à comprendre les enjeux environnementaux et à s'engager dans des actions collectives. La magnitude de l'effet, bien que modérée, témoigne d'un levier potentiel pour les politiques de sensibilisation.

3.3.6.1.2 Variables économiques

Les revenus constituent un déterminant majeur du vote. Les coefficients associés aux différentes tranches de revenu sont tous positifs et significatifs. Plus précisément, pour les individus ayant un revenu mensuel compris entre 75 000 et 249 999 francs CFA, le coefficient atteint 2,698 ($p < 0,01$), ce qui en fait l'effet le plus fort du modèle. Ce résultat met en évidence une corrélation étroite entre le niveau de revenu et le soutien au programme. La magnitude du coefficient indique que les individus à revenu élevé sont non seulement plus enclins à percevoir les bénéfices d'un programme de gestion de l'eau, mais aussi qu'ils disposent des moyens économiques pour en assumer les implications éventuelles (par exemple, en matière de contribution financière ou d'adhésion à un service structuré). À l'opposé, les revenus plus faibles (0 à 34 999 francs CFA) sont également positivement associés au vote (coefficient : 1,299, $p < 0,01$), ce qui montre que même les populations vulnérables perçoivent une valeur ajoutée au programme. Cela suggère que les bénéfices attendus (sécurité de l'accès, réduction des coûts d'approvisionnement informels) sont perçus comme supérieurs aux éventuels coûts.

3.3.6.1.3 Variables liées au lieu de résidence et à l'infrastructure

Lieu de résidence a un impact différencié sur le comportement de vote. Résider dans la préfecture d'Agoè réduit significativement la probabilité de voter pour le programme (coefficient : -0,950, $p < 0,05$), tout comme vivre dans le Bas-Mono (-1,45, $p < 0,01$). Le coefficient négatif élevé associé au Bas-Mono suggère une aversion marquée à l'égard du programme dans cette région. Une hypothèse plausible est que l'abondance relative de la ressource hydrique dans cette zone (située en aval du fleuve Mono) atténue la perception du risque de pénurie, et donc le besoin perçu de gestion durable. Ce résultat illustre l'importance du contexte géographique et environnemental dans la formation des attitudes vis-à-vis des politiques de ressources naturelles.

Ne pas disposer d'un **forage** dans son ménage est associé à une probabilité accrue de voter pour le programme (coefficient : 0,511, $p < 0,1$). Ce résultat est intuitif : les ménages dépourvus de solutions autonomes d'approvisionnement en eau sont plus sensibles à l'idée d'une gouvernance collective améliorée, qui pourrait leur garantir un meilleur accès à long terme.

3.3.6.1.4 Variables d'attitudes et de perception

Préoccupations environnementales : De manière contre-intuitive, les individus se déclarant préoccupés par les problèmes environnementaux ont une probabilité réduite de voter en faveur du programme

(coefficient : -0,960, $p < 0,1$). Ce résultat paradoxal pourrait s'expliquer par un scepticisme à l'égard de l'efficacité réelle des politiques publiques en matière d'environnement. Les individus les plus informés et critiques pourraient juger le programme insuffisant ou inadéquat, et par conséquent refuser de le soutenir, non pas par désintérêt, mais par exigence. Ce phénomène mérite des investigations qualitatives complémentaires (entretiens, focus groups) afin d'en cerner les motivations profondes.

Enfin en ce qui concerne la variable « **occupation** », les individus exerçant une activité de type fonctionnaire, commerçant ou travailleur indépendant montrent une probabilité significativement plus faible de voter pour le programme (coefficient : -0,731, $p < 0,05$). Cette variable peut refléter des effets d'opportunité ou d'exposition différentielle à la ressource. Par exemple, les travailleurs du secteur informel ou du commerce pourraient avoir accès à des sources d'approvisionnement parallèles ou moins dépendre de l'offre publique.

3.3.6.2 Résultats du modèle Tobit – Déterminants du CAP

L'estimation du modèle Tobit permet d'identifier et de quantifier les facteurs influençant le montant que les individus sont prêts à payer (CAP) pour soutenir un programme de gestion durable des eaux souterraines. Ce modèle est particulièrement adapté lorsque la variable dépendante est censurée, notamment en raison de la présence d'observations à zéro, qui peuvent refléter une absence de consentement ou un montant inférieur au seuil minimal observable.

Le test global de vraisemblance ($LR\ chi^2 = 49,31$; $p < 0,01$) montre que le modèle est statistiquement significatif, bien que le coefficient de détermination ($R^2 = 0,0072$) indique que beaucoup d'hétérogénéité individuelle reste inexpliquée par les variables observées.

3.3.6.2.1 Variables sociodémographiques

L'**âge** joue un rôle contrasté dans la détermination du CAP. Seules les tranches d'âge « 25-34 ans » (coefficient : 294,008, $p < 0,05$) et « 35-44 ans » (coefficient : 232,28, $p < 0,1$) ont un effet positif significatif, suggérant que les jeunes adultes en pleine activité professionnelle, avec des revenus plus stables, sont prêts à allouer des montants plus élevés que les plus jeunes (moins de 25 ans). Cette tendance peut traduire une prise de conscience accrue et un engagement citoyen plus marqué dans ces groupes. En revanche, contrairement aux résultats du modèle Logit (analysant le vote), les autres tranches d'âge, y

compris les plus âgées (55-64 ans), ne présentent pas d'effet notable sur le montant du CAP, indiquant une distinction entre la volonté de soutenir un programme (vote) et la disposition financière à y contribuer.

3.3.6.2.2 Variables économiques

Le **revenu** influence positivement le CAP, en particulier pour les individus dans les tranches inférieures à 75 000 F CFA. Les coefficients des tranches « 0–34 999 F CFA » (231,405, $p < 0,05$) et « 35 000–74 999 F CFA » (234,46, $p < 0,05$) révèlent que ces groupes sont prêts à payer en moyenne environ 230 F CFA de plus que la catégorie de référence. Ce résultat souligne une volonté de contribuer même parmi les ménages à revenu modeste, motivée par la perception des bénéfices à long terme du programme, tels que la sécurité hydrique et la santé publique. Paradoxalement, les revenus plus élevés (75 000 F CFA et plus) n'ont pas un effet significatif ou présentent un CAP moindre, possiblement en raison de l'accès à des solutions privées comme les forages, qui réduisent le besoin perçu de contribuer à un programme communautaire.

3.3.6.2.3 Lieu de résidence

Le **lieu de résidence** est l'un des déterminants les plus puissants du CAP. Les coefficients négatifs et significatifs pour les préfectures d'Agoè (-531,566 F CFA, $p < 0,01$) et de Vo (-289,32 F CFA, $p < 0,1$) indiquent que les résidents de ces zones sont prêts à payer nettement moins que ceux des autres localités (Golfe, Bas Mono, Lacs, Zio, Yoto). Cette variation reflète les disparités régionales en termes de développement économique, d'infrastructures et d'accès aux services de base. Les préfectures mieux dotées permettent à leurs habitants d'accumuler un capital plus important et d'être ainsi plus disposés à contribuer financièrement. À l'inverse, les localités moins développées rencontrent des obstacles socio-économiques qui limitent la capacité et la volonté de payer.

3.3.6.2.4 Facteurs liés aux perceptions et attitudes

Les **préoccupations environnementales** apparaissent comme un moteur significatif du CAP. Les individus se déclarant préoccupés par les problèmes environnementaux ont un CAP supérieur, avec un coefficient estimé à 296,38 ($p < 0,01$). Ce résultat souligne que, même si ces personnes peuvent se montrer critiques vis-à-vis des politiques publiques, elles sont néanmoins prêtes à s'engager financièrement, traduisant une attitude proactive en faveur de la protection environnementale.

En ce qui concerne l'appréciation du programme, les répondants exprimant un avis négatif ou incertain (« Ne sais pas ») affichent un CAP réduit de 175,88 F CFA ($p < 0,05$). Cela met en évidence l'importance de la confiance, de la clarté et de la transparence des politiques publiques dans la mobilisation des ressources volontaires. Une communication efficace est donc cruciale pour renforcer la disposition à payer.

Le **niveau perçu d'efficacité du programme** (niveau_eff_prog) présente un coefficient négatif mais significatif, ce qui peut sembler contre-intuitif. Une meilleure efficacité perçue pourrait en effet diminuer la nécessité ressentie de contributions supplémentaires, en raison d'une gestion plus satisfaisante des ressources. Cette relation pourrait être non linéaire et mérite une analyse plus approfondie.

3.3.6.2.5 Facteurs liés aux conditions d'accès à l'eau

L'absence de **forage** individuel est associée à une augmentation modeste mais significative du CAP (significatif à 10 %). Cette relation reflète la logique selon laquelle les ménages sans accès privé aux ressources en eau perçoivent davantage la valeur d'un programme structuré de gestion des eaux souterraines et sont donc plus enclins à s'y engager financièrement.

3.3.6.2.6 Conclusion

Dans l'ensemble, les résultats du modèle Tobit confirment que le consentement à payer est fortement conditionné par des facteurs socio-économiques (revenus, âge, lieu de résidence) et par les perceptions environnementales et institutionnelles. Les disparités régionales, la disponibilité des infrastructures, ainsi que la confiance envers le programme jouent un rôle déterminant dans la disposition financière des individus à soutenir un programme de gestion durable des eaux souterraines. Ces résultats soulignent l'importance d'adapter les politiques aux contextes locaux, de renforcer la communication autour du programme, et d'intégrer les préoccupations environnementales pour maximiser l'adhésion et le financement communautaire.

Résultats du modèle CAP

Les résultats du modèle Tobit sont pour la majorité semblable aux résultats du Logit précédemment interprétés. En considérant la significativité statistique et le signe des coefficients, on peut déduire une relation significative entre la variable BID et les variables telles que Lieu_resi ; pollution_at; revenus, age ; Avis_quali et niveau_eff_prog.

Les coefficients des modalités 2 et 6 de la variable Lieu_resi (c'est à dire les préfectures d'Agoo et de Vo) sont négatifs et significatifs. Les résidents dans ces localités ont de valeur du CAP moins élevée que celles des autres localités à savoir Golfe, Bas mono, Lacs, Golfe, Zio et Yoto. Les résultats indiquent que les disparités régionales en termes de développement économique, d'infrastructures et d'accès aux services de base influencent significativement la capacité des résidents à payer. Les préfectures avec des infrastructures mieux développées et plus d'opportunités économiques permettent à leurs habitants d'accumuler plus de capital, tandis que les préfectures moins développées rencontrent des obstacles qui limitent cette capacité.

Contrairement au modèle vote, la variable « Problèmes environnementaux » montre un effet positif. Le coefficient associé à la modalité 2 (être préoccupé par les problèmes environnementaux) est positif et une probabilité inférieure à 10 %. Cela suggère que les préoccupations environnementales augmentent la valeur CAP.

La variable « Revenu » est également positivement corrélée à la variable CAP. Les coefficients associés à la modalité 1, 2 et 3 (revenu moins de 74999 frs) sont positifs et significatifs, indiquant que les répondants ayant un revenu compris dans ces tranches paient un montant plus élevé de la valeur CAP que ceux de la dernière tranche (75000 Frs et plus). La présence de forages parmi les personnes à revenu élevé pourrait expliquer pourquoi ces individus paient un montant plus faible. Étant donné qu'ils disposent de solutions privées pour leur approvisionnement en eau, ils peuvent avoir moins de motivation ou de besoin de contribuer financièrement à un programme communautaire de gestion des eaux souterraines. En revanche, les personnes avec des revenus inférieurs à 75000 Frs, qui dépendent plus directement des ressources communautaires, ont une plus grande CAP.

Les modalités d'âge comprises entre 25 et 34 ans, ainsi qu'entre 35 et 44 ans, présentent des coefficients positifs. Cela signifie que les répondants appartenant à ces tranches d'âge ont une capacité à payer (CAP) plus élevée que les autres groupes d'âge. Ces résultats indiquent que les individus dans ces tranches d'âge sont généralement en pleine période d'activité professionnelle, avec des revenus plus stables et potentiellement plus élevés, ce qui leur permet de contribuer financièrement de manière plus significative. De plus, ces groupes d'âge peuvent être plus sensibilisés aux enjeux liés au programme, les incitant à investir davantage pour en assurer la réussite.

La variable Niveau_effi_prog a un coefficient négatif et significatif. Toute augmentation du niveau d'efficacité entraîne une hausse de la valeur CAP. Ce résultat peut refléter une complexité dans la relation entre l'efficacité du programme et le CAP des répondants. Une meilleure efficacité perçue peut diminuer la nécessité ressentie de contribuer davantage, en raison d'une meilleure gestion des ressources et d'une satisfaction accrue. La possibilité d'une relation non linéaire entre le niveau d'efficacité du programme et la valeur CAP est une hypothèse valable et utile pour expliquer des résultats contre-intuitifs.

Enfin, la variable « Problèmes environnementaux » montre un effet positif. Le coefficient associé à la modalité 2 (être préoccupé par les problèmes environnementaux) est positif et significatif, avec une probabilité inférieure à 1 %. Cela suggère que les répondants qui se préoccupent des problèmes environnementaux sont plus motivés et prêts à contribuer davantage que ceux qui ne sont pas préoccupés. Cette tendance peut s'expliquer par le fait que les personnes conscientes des enjeux environnementaux sont souvent plus enclines à soutenir financièrement des initiatives visant à résoudre ces problèmes, car elles en perçoivent directement l'importance et l'urgence. Leur engagement reflète une volonté de participer activement à la protection de l'environnement, même si cela implique des coûts supplémentaires. Cependant, cette disposition à contribuer ne s'accompagne pas nécessairement d'un soutien explicite au programme lui-même, comme le suggèrent d'autres résultats du modèle. Cela peut traduire une distinction entre l'adhésion aux objectifs environnementaux et la confiance dans les dispositifs proposés, certains répondants pouvant juger les mesures insuffisantes ou mal adaptées, malgré leur volonté d'agir.

3.3.7 Valeur économique totale et ses composantes

Les CAP offerts par chaque répondant reflètent la valeur individuelle qu'ils accordent aux eaux souterraines du BSCT. Ainsi à partir du CAP_{moyen annuel} obtenu et en appliquant l'équation (4), c'est-à-dire en le multipliant par le nombre de ménages dans le bassin, on obtient une VET de 3 093 600 000 de francs CFA (environ 5 232 830,90 US Dollars). Cette extrapolation a été effectuée en se basant sur une population de 500 000 ménages dans le bassin, en se référant au dernier recensement général de la population (DGSCN, 2023).

Sachant que le PANGIRE (MEAHV, 2010) estime les ressources en eaux souterraines du BSCT à environ 650 millions de m³, la valeur du mètre cube d'eau souterraine dans le BSCT, équivaudrait donc à 4,75 francs CFA.

Toutefois, l'évaluation de la valeur économique de l'eau dépend de l'unité de référence choisie. Si elle est rapportée au volume total des aquifères, on obtient effectivement une valeur de 4,75 F CFA/m³, ce qui fournit une estimation globale mais peu représentative du coût supporté par les usagers domestiques. En revanche, lorsque l'on considère le volume annuel effectivement consommé, la valeur change significativement. En effet, d'après Gnazou *et al.* (2017), chaque année on prélève en moyenne 25 995 300 m³. Or, en rapportant la VET estimée de 3 093 600 000 F CFA à ce volume annuel consommé, on obtient :

$$\frac{3\,093\,600\,000}{25\,995\,300} \approx 119,0 \text{ F CFA/m}^3 \quad (9)$$

Ainsi, le mètre cube d'eau passe de 4,75 F CFA (calculé sur la base du stock total des aquifères) à 119 F CFA (calculé sur la base de la consommation effective annuelle). Cette dernière valeur offre une représentation plus réaliste de l'usage domestique. À titre de comparaison, la Société Togolaise des Eaux (TdE) applique pour la tranche sociale de base un tarif d'environ 2 280 F CFA/m³ sur une base annuelle. L'approche par consommation permet donc d'évaluer la valeur de l'eau en lien direct avec les prix effectivement payés, tandis que la valorisation basée sur le volume total des aquifères reflète essentiellement les gains liés à l'amélioration de la qualité de l'eau, et non son coût réel pour les consommateurs.

En revenant au CAP_{moyen annuel} obtenu, il a été possible déterminer la part qui constitue la valeur d'usage et celle de la valeur de non-usage. La part correspondante à la valeur d'usage est la moyenne des réponses faite à question 48 a du questionnaire. Il y était demandé aux répondants quelle part du CAP voudraient ils voir attribuer à la valeur d'usage. Le traitement statistique dans stata (Voir le résultat des estimations des valeurs individuelles d'usage et de non-usage des répondants dans l'interface du logiciel Stata en Annexe G), révèle un CAP_{moyen mensuel} de 101, 8 Francs CFA, soient 19,74% de la VET. Par conséquent, la valeur de non-usage représente 80,26 % de la VET.

En résumé, les eaux souterraines du BSCT ont une VET de 3 093 600 000 de francs CFA (environ 5 232 831 US Dollars), dans laquelle on distingue la Valeur d'Usage qui est de 610 676 640 de francs CFA (environ 1 012 259 US Dollars) et la Valeur de Non-Usage qui est de 2 482 923 360 de francs CFA (environ 4 115 910 US Dollars).

Il est particulièrement révélateur de constater que les répondants accordent une part majoritaire à la valeur de non-usage, témoignant ainsi d'une préoccupation qui dépasse les seuls intérêts immédiats liés à l'exploitation directe de la ressource. Ce résultat suggère une reconnaissance de l'importance des

fonctions écologiques, sociales ou patrimoniales des eaux souterraines, bien au-delà d'une logique purement utilitariste.

Il convient de préciser que ces valeurs correspondent à des estimations annuelles. Une capitalisation, c'est-à-dire la conversion de ces flux annuels en une valeur patrimoniale actualisée sur des horizons de 30 à 60 ans, n'a pas été réalisée. Cela s'explique principalement par l'absence de taux d'actualisation fiables et pertinents pour ces longues périodes, ainsi que par le manque de données suffisantes sur la durabilité économique et écologique des ressources en eaux souterraines.

3.3.8 Conclusion

Dans ce sous-chapitre les composantes de la VET des eaux souterraines du BSCT ont été estimées, par le biais d'une enquête d'évaluation contingente, axée autour d'un scénario portant sur la mise en place d'un programme de gestion durable des eaux souterraines. Ce travail sans précédent dans la sous-région ouest africaine a permis également de se faire une idée sur les caractéristiques socioéconomiques des ménages du bassin et cerner leurs avis et opinions sur les enjeux liés aux eaux souterraines. Pour ce type d'études rares dans les pays en développement comme notre zone d'étude, un certain nombre de précautions ont été prises. La taille de l'échantillon a été volontairement augmentée afin de compenser les limites liées aux restrictions sanitaires, qui ont restreint la possibilité de réaliser des entretiens en présentiel avec l'ensemble des répondants. Ensuite, les montants proposés dans la carte de paiement ont été illustrés avec des images de vrais billets de banques et des pièces de monnaie afin de faciliter la perception des sommes proposées, notamment pour les personnes peu scolarisées.

Il ressort que les populations du bassin sont très soucieuses des questions environnementales, même si elles ont du mal à cerner les enjeux entourant les eaux souterraines. Elles sont largement en faveur de la mise en place d'actions fortes de gestion durable des eaux souterraines. Toutefois elles sont sceptiques vis-à-vis de l'atteinte des objectifs de ce programme. Les ménages sont toutefois prêts à consentir par an 6 187 francs CFA (environ 10\$ US) en moyenne de plus sur leurs dépenses liées à l'eau afin de contribuer à la mise en place de ce programme. Il a été donc possible d'estimer les eaux du bassin à un peu plus de 3 milliards de francs CFA, et le mètre cube revient à environ 4,75 francs CFA. Autre point important à souligner sur le CAP_{moyen mensuel} de 515,6 francs CFA, les ménages souhaitent que

- plus de 80% soient utilisés comme valeur de non-usage (401 francs CFA) à savoir lutter contre la pollution, surexploitation et les effets des changements climatiques, protéger les cours d'eau et environnements reliés aux eaux souterraines et pour permettre aux générations futures d'hériter d'un aquifère avec de l'eau en quantité et en qualité ;
- et à peine 20 %, (101 francs CFA) pour la satisfaction de leurs besoins directs, c'est-à-dire pour permettre l'accès à l'eau et à l'assainissement pour tous.

Cette étude rejoint les rares de ce type visant l'estimation de la valeur économique des eaux souterraines dans les pays en développement. Elle offre une base scientifique pour la caractérisation des eaux souterraines comme « actifs environnementaux », c'est-à-dire des ressources ayant une valeur patrimoniale et économique justifiant leur protection et leur gestion durable. Concrètement, cette base permet :

- de quantifier les bénéfices (usages directs et non-usages) liés aux eaux souterraines, ce qui facilite leur intégration dans les politiques de gestion des ressources naturelles ;
- de justifier économiquement la mise en œuvre du principe pollueur-payeur, en évaluant les pertes économiques potentielles liées à la dégradation de la qualité des nappes ;
- et de définir des redevances de prélèvement fondées sur la valeur d'usage estimée, dans le cadre d'une gestion plus équitable et incitative de la ressource.

Ces résultats peuvent ainsi servir d'appui aux décideurs pour concevoir des mécanismes de financement de la protection des eaux souterraines, ou pour intégrer leur valeur dans les comptes environnementaux nationaux.

3.4 Outil d'estimation hydroéconomique : application à l'analyse des impacts anthropiques et du changement climatique

En plus de permettre d'estimer la valeur des eaux souterraines, l'enquête a aussi été l'occasion de recueillir les éléments pour l'établissement d'une fonction de demande inverse des eaux souterraines du BSCT. Elle exprime le prix que les répondants sont prêts à payer en fonction de la quantité d'eau souterraine disponible ou extraite, à l'inverse de la fonction de demande classique qui donne la quantité demandée en fonction du prix (Griffin, 2016). Elle se présente sous la forme suivante :

$$P = f(Q) \quad (10)$$

avec :

- Q : quantité d'eau demandée (en mètres cubes, litres, etc.) ;
- P : prix de l'eau (prix payé par l'utilisateur pour l'accès à l'eau) ;

En général, la fonction de demande inverse des eaux est décroissante, avec des spécifications mathématiques différentes en fonction des secteurs et des contextes d'utilisation (Griffin, 2016). Elle est fortement influencée par de nombreux facteurs interdépendants.

Les facteurs à prendre en compte incluent les prix (Renzetti, 2002), les revenus (Nauges et Whittington, 2009), l'environnement, la qualité et la disponibilité (Ward et Pulido-Velázquez, 2008), les politiques tarifaires (Griffin, 2016; Olmstead *et al.*, 2007) et l'efficacité des usages (Renzetti, 2002). Il est essentiel de bien comprendre ces facteurs pour assurer une gestion durable de l'eau et élaborer des politiques de tarification adaptées.

Dans notre cas, l'établissement de la fonction de demande a consisté à relier deux informations importantes contenues dans le questionnaire d'enquête. Il s'agit :

- des prix proposés par les répondants (les BID choisis à la question 46),
- et les niveaux d'efficacité du programme qui lui sont associés à la question 50 (Figure 33) : c'est-à-dire les pourcentages d'eau souterraine de qualité qui seront disponibles suite à la mise en œuvre du programme de gestion proposé.

En répondant à cette question, l'utilisateur évalue le niveau d'efficacité en matière d'eau souterraine de qualité disponible qu'il espère obtenir après la mise en œuvre du programme.

50 . À quel niveau d'efficacité, en pourcentage, pensez-vous que le programme pourra aboutir ?

(100% est complètement efficace et 0% est complètement inefficace)

Pourcentage _____%

Figure 33: Détails de la question 50

Le résultat de la régression qui en découle est une fonction de demande linéaire pour l'eau souterraine, sous la forme suivante :

$$P = a - bQ \quad (11)$$

Avec :

- a : une constante qui correspond au prix de base (le prix lorsque la quantité d'eau disponible est égale à zéro),
- b : la pente de la fonction, qui mesure la sensibilité du prix à une variation de la quantité d'eau disponible,
- P : le prix de l'eau.

Les résultats présentés dans le tableau 15 (Voir le résultat de la régression entre les variables CAP et Niveau_eff dans Stata en Annexe H), nous donnent une fonction précise de forme illustrée par le graphique de la figure 34 et du type:

$$\text{Prix de l' eau} = 676,53 - 1,90 \% \text{ d' eau souterraine disponible} \quad (12)$$

Tableau 15: Résultats de la régression entre les variables CAP et Niveau_eff dans Stata

Variable	Coeff	Probabilité
Niveau_effi_prog	-1,90	0,009
const	676,53 (17)	0,000
Nbre obs	543	

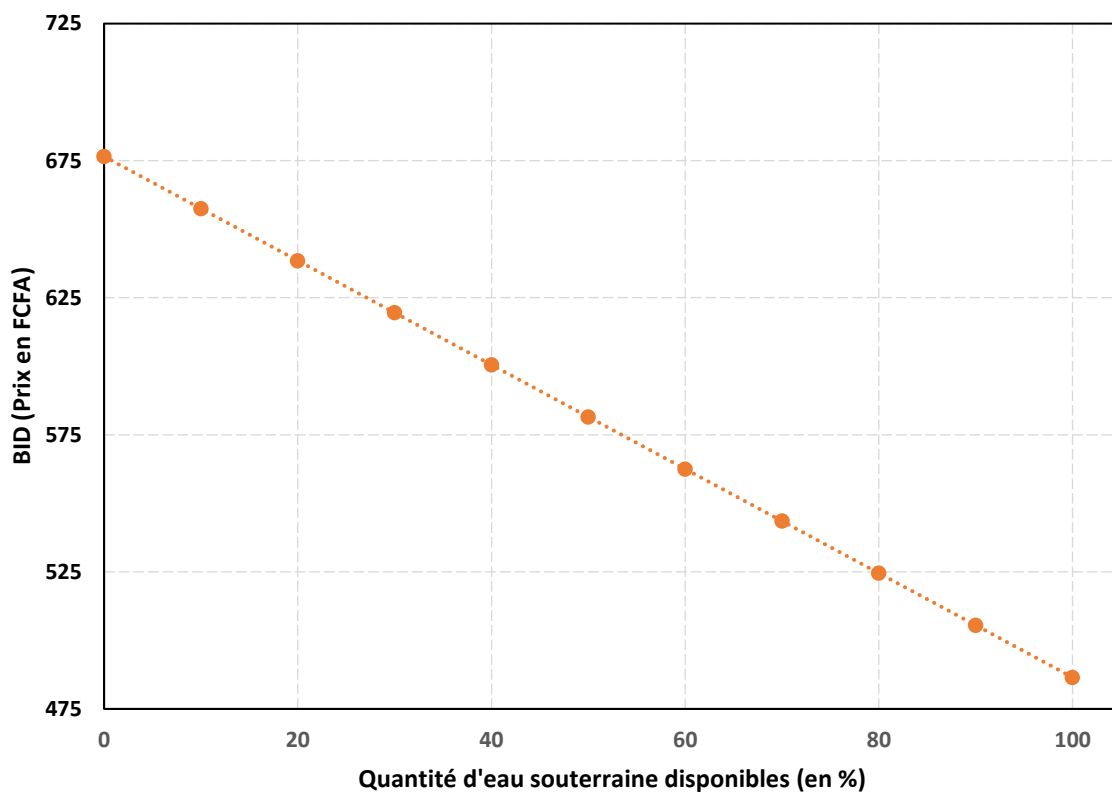


Figure 34: Représentation graphique de la fonction de demande inverse des eaux souterraines du BSCT

Afin de valider la relation ainsi établie, un test de linéarité est effectué entre la variable CAP et la Variable NIVEAU. Pour ce faire, une estimation par moindres carrés ordinaires (MCO) a été conduite, en régressant

la variable dépendante BID sur les variables explicatives NIVEAU et NIVEAU². L'objectif était de tester l'éventualité d'une relation non linéaire entre le niveau d'eau disponible et la disposition à payer.

Les résultats de l'estimation (Voir le résultat du test de linéarité dans Stata en Annexe I), montrent que le coefficient de la Variable Niveau est non significatif ; et que le coefficient du carré est significatif à 10% et de signe négatif. Ces résultats suggèrent l'existence d'une relation non linéaire, décroissante au-delà d'un certain seuil de disponibilité en eau.

3.4.1 Estimation hydro-économique des impacts anthropiques

Grâce à la fonction de demande inverse, il est possible d'évaluer la valeur des eaux souterraines qui pourraient être perdues si aucune mesure de protection n'était mise en place face aux pressions anthropiques.

En effet, selon Djongon (2022), 65% de la surface du bassin présente des risques de pollutions des eaux souterraines situés entre modéré et élevé. On peut dès lors formuler l'hypothèse que ce seront 65% des eaux souterraines qui seront dégradées, la quantité va donc diminuer.

En appliquant la formule 10, le prix moyen mensuel de l'eau augmentera de 66,5 francs CFA/m³.

Toutefois, cette estimation repose sur des hypothèses simplificatrices. Il est donc nécessaire de discuter les incertitudes associées à la spatialisation des risques et à leur traduction en pertes effectives, afin de consolider la portée des résultats pour l'aide à la décision.

3.4.2 Estimation hydro-économique des impacts des changements climatiques

La variation future du prix de l'eau en raison des modifications de la recharge causées par les changements climatiques a été évaluée en deux étapes. Pour commencer, il a été nécessaire d'estimer les variations de recharge moyenne à venir en se basant sur les résultats obtenus au point 2 du présent chapitre (Tableau 16), puis d'appliquer la formule 10.

Tableau 16: Variations moyennes de la recharge future sous l'effet des changements climatiques

		Minimum	Maximum	Moyenne	Variation
Recharge actuelle		47 mm	225 mm	136 mm	0
Horizon 2020-2039	RCP 4.5	3,3 mm	455 mm	230mm	93 mm
	RCP 8.5	16 mm	515 mm	266 mm	130 mm

Ensuite, en rapportant les variations obtenues à la superficie du bassin, qui est de 3 400 km², on obtient les résultats suivants :

- Pour le scénario RCP 4.5 : il s'agit d'une augmentation de plus de 316 727 000 de m³, soit + 48,7% de hausse par rapport à la quantité d'eau disponible actuellement.
 - En appliquant l'équation 10, la diminution est de 97,4 francs CFA/m³.
- Pour le scénario RCP 8.5 : il s'agit d'une augmentation de plus de 440 300 000 de m³, soit + 67,7% de hausse par rapport à la quantité d'eau disponible actuellement.
 - En appliquant l'équation 10, la diminution est de 61,3 francs CFA/m³.

3.4.3 Analyse comparative

En utilisant la même fonction de demande, on a pu représenter en valeur monétaire les impacts futurs de l'activité humaine et des changements climatiques sur les eaux souterraines du BSCT, et les comparer (Figure 35).

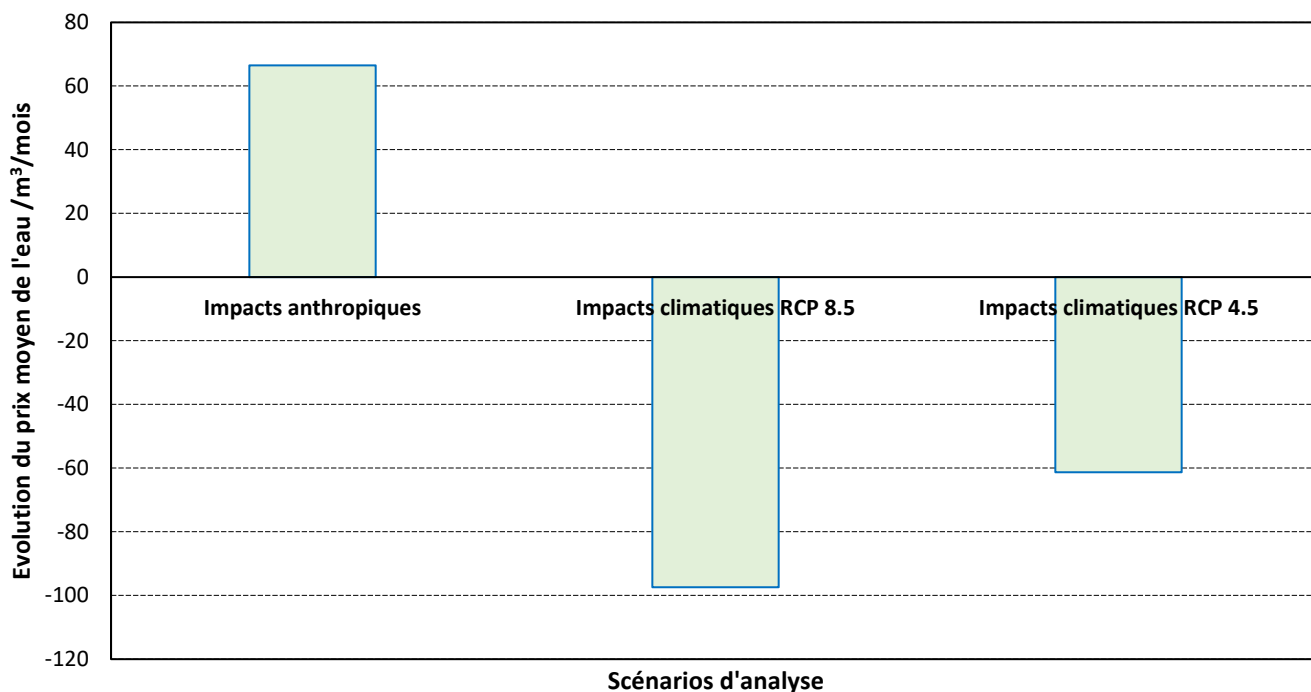


Figure 35: Comparaison entre l'évolution de la valeur moyenne de l'eau dans le BSCT en prévision des impacts anthropiques et climatiques

De cette comparaison, il ressort que les changements climatiques (quel que soit le scénario) pourraient induire une baisse de la valeur des eaux souterraines du BSCT (synonyme d'abondance), tandis que l'action humaine causerait une hausse de valeur (synonyme de raréfaction).

3.4.4 Conclusion

Les changements climatiques et la pollution anthropiques sont deux types de pressions qui ont un impact différent sur la quantité d'eau souterraine disponible. La fonction de demande inverse établie ici offre la possibilité de mesurer, dans un référentiel unique, leurs impacts. Ce référentiel, qui concerne le prix de l'eau et ses variations, a l'avantage d'être compréhensible par tous. La traduction des impacts de mécanismes complexes liés aux ressources en eau est rendue plus simple et claire. Grâce à cette transparence, il est possible de sensibiliser davantage les parties prenantes et de susciter leur adhésion. En résumé, cette approche permet d'intégrer de manière efficace des problèmes environnementaux complexes dans un contexte économique accessible et compréhensible par tous, ce qui facilite une gestion plus durable et concertée des ressources en eau.

En pratique, dans ce dernier sous-chapitre, la fonction de demande inverse a été utilisée pour estimer économiquement les impacts d'origine humaine et ceux liés aux changements climatiques sur les eaux souterraines du BSCT. Il ressort que :

- En l'absence de régulation, l'action de l'homme (notamment la pollution) causerait une diminution de l'eau disponible. Cette raréfaction se traduirait par une augmentation de sa valeur moyenne mensuelle individuelle de l'ordre de 66,5 francs CFA/m³.
- En revanche, les changements climatiques pourraient accroître la disponibilité en eau, provoquant une baisse de valeur comprise entre 61,3 et 97,4 FCFA/m³, selon l'ampleur de l'augmentation.

Ces éléments suggèrent que, dans ce contexte précis, les activités humaines non encadrées présentent un risque plus critique à court terme que les impacts attendus du climat. Toutefois, cette analyse ne prend pas en compte les coûts éventuels de dépollution ou de réhabilitation de la ressource, qui pourraient s'avérer particulièrement élevés et aggraver encore le poids économique des dégradations anthropiques.

En termes de recommandations, sachant que les ressources sont limitées au Togo, il faudrait les concentrées sur la lutte contre les actions anthropiques néfastes, à savoir la pollution et la surexploitation des eaux souterraines du BSCT. Pour une gestion efficace des ressources en eau, il est crucial que le pays mette en place dans le BSCT des politiques publiques robustes qui incluent :

- Contrôles stricts contre la pollution des eaux.
- Règlementation sur la surexploitation de l'eau souterraines.
- Incitation économique pour encourager les pratiques d'utilisation de l'eau durables (tarification, quotas, etc.).
- Planification anticipée pour gérer les effets des changements climatiques sur la disponibilité de l'eau.

En adoptant ces recommandations, le Togo pourra éviter les conséquences négatives des actions humaines non régulées et mieux se préparer à gérer les impacts des changements climatiques sur les ressources en eau.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Rappel des objectifs

Cette thèse avait pour objectif général de développer une méthode permettant d'associer la valeur économique aux eaux souterraines en fonction de leur disponibilité, en vue d'améliorer la perception de l'état de la ressource, de manière à contribuer à une meilleure gestion des eaux souterraines du BSCT, ou pour tout autre aquifère doté de faibles ressources en matière de gestion.

Pour ce faire, elle s'est appuyée sur trois objectifs spécifiques, ce sont :

- La caractérisation des impacts d'une menace probable sur les eaux souterraines du BSCT : en l'occurrence les changements climatiques,
- L'estimation de la valeur économique de l'eau souterraine du BSCT,
- Le développement d'une approche hydroéconomique de simulation des impacts anthropiques et climatiques sur les eaux souterraines.

L'hypothèse testée était que la combinaison des approches hydrogéologiques et économiques permet de créer un outil hydroéconomique capable de rendre les enjeux liés aux eaux souterraines compréhensibles et utiles à la fois pour les populations et les décideurs.

Pour atteindre ces objectifs : (i) une approche d'estimation des impacts des changements climatiques sur la recharge des eaux souterraines du BSCT a été mise en œuvre ; (ii) une enquête d'évaluation contingente auprès des ménages du bassin, suivie d'analyses économétriques ont été réalisées ; (iii) les résultats d'une thèse réalisée en parallèle de celle-ci, sur les impacts anthropiques sur les eaux souterraines du BSCT ont été capitalisés, et (iv) un outil d'estimation hydroéconomique a été développé et testé comparer la valeur des eaux souterraines du bassin suivant qu'elles soient soumises aux impacts climatiques ou anthropiques.

Synthèse des résultats

La mise en place d'une méthodologie mixte, couplant les approches hydrogéologiques et économiques, a permis de confirmer l'hypothèse selon laquelle, il est possible d'élaborer un outil qui rend la compréhension des enjeux liés aux eaux souterraines accessible à tous, à travers la valeur de l'eau. Ce qui

facilite ainsi la mise en œuvre des mesures de gestion durable de cette ressource. Dans le BSCT, les résultats obtenus, dans leur totalité, constituent des premières et des innovations

Ainsi, pour commencer, les impacts des changements climatiques sur les eaux souterraines du BSCT ont été caractérisés. La méthode de bilan de Thornthwaite–Mather, a permis de caractériser la recharge, malgré le peu de données disponibles sur la zone d'étude. Pour caractériser les termes du bilan hydrique : la méthode Thornthwaite a été utilisée pour obtenir l'évapotranspiration, un coefficient a été utilisé pour estimer le ruissellement en tenant compte de la pente, de la capacité d'infiltration et de la perméabilité du sol. Une carte a été élaborée pour la première fois afin de déterminer l'ampleur de la recharge actuelle des eaux souterraines du BSCT. Elle affiche des plages de recharges allant de 47 à 225 mm par an, et la moyenne annuelle sur tout le bassin est de 136 mm. Ensuite, la caractérisation de la recharge future suivant différents scénarios climatiques a été réalisée : selon le scénario « optimiste » RCP 4.5, la recharge annuelle se situera entre 3,31 mm et plus de 455 mm de 2020 à 2039, et entre 40 mm et 420 mm sur la période 2040-2059 ; et selon le scénario « pessimiste » RCP 85, la recharge dans le bassin sera comprise entre 16 mm et 515 mm par an de 2020 à 2039, et entre 1 mm et 467 mm par an sur la période 2040-2059. Ces résultats montrent que la recharge dans le bassin, qui est corrélée aux précipitations, va augmenter. Cela correspond aux prévisions d'augmentations notables de la recharge, qui sont attendues sous des climats tropicaux semblables au BSCT et sous les climats équatoriaux (Nyenje et Batelaan, 2009), en raison du changement climatique. Par contre, la zone sahélienne et l'Afrique australe connaîtront des tendances à une baisse future de la recharge (Ascott *et al.*, 2022; Chikozho, 2007; Cullis *et al.*, 2010; Dennis et Dennis, 2012; Kusangaya *et al.*, 2014). À l'échelle mondiale, le BSCT présenterait une modification de sa recharge intermédiaire entre : les pires projections liées à la réduction de la recharge ont été identifiées pour les zones arides et désertiques, et les recharges les plus élevées attendues dans les Régions du nord et dans les zones à haute altitude, où la capacité de recharge est maintenue ou augmente en raison de la fonte rapide des neiges et des glaciers due à l'augmentation des températures (Cárdenas Castillero *et al.*, 2021).

Cependant, des efforts et des recherches supplémentaires pour une prévision fiable des changements dans les principales variables climatiques, par la réduction des MCG à l'échelle du bassin et de les coupler avec des modèles hydrologiques pertinents tenant compte de toutes les composantes du cycle hydrologique (Kumar, 2012). Des efforts et des recherches supplémentaires sont également nécessaires pour une compréhension plus approfondie des processus physiques complexes et des mécanismes de rétroaction grâce à l'utilisation de modèles plus sophistiqués (Amanambu *et al.*, 2020). Il s'agit d'affiner

les termes du bilan hydrique dans le temps et dans l'espace, comme l'évapotranspiration, le ruissellement et l'humidité du sol (Kumar, 2012). En effet, comme toutes les méthodes des bilans, celle utilisée ici présente des incertitudes dans l'estimation de la recharge dues à l'imprécision du modèle conceptuel sous-jacent, à la prise en compte insuffisante de la variabilité spatiale et temporelle des composantes du bilan hydrique et à l'incertitude de la mesure ou de l'estimation des valeurs de ces composantes (Healy, 2010). Enfin, il y a la nécessité de comprendre les dimensions socioéconomiques de l'interaction climat-eaux souterraines grâce à une synergie multidisciplinaire (Holman, 2006), conduisant au développement de meilleures stratégies et modélisations d'adaptation aux changements climatiques et eaux souterraines (Amanambu *et al.*, 2020).

Ensuite, la valeur économique des eaux souterraines du BSCT a été estimée. Il s'agit à nouveau d'une première dans le contexte de l'Afrique subsaharienne. Elle a permis d'innover en termes de méthodologie par l'usage de cartes de paiement illustrées afin de faciliter l'appropriation par les usagers. La VET est estimée à 3 093 600 000 de francs CFA (environ 5 232 830,90 US Dollars), pour un CAP_{moyen mensuel} de 515,6 francs CFA (environ 0,86 \$ US). La Valeur d'Usage a été estimée à environ 20% de la VET pour une Valeur de Non-Usage de plus de 80% de la VET. Cela démontre que les usagers sont disposés à agir de manière positive sur les différentes dimensions de l'eau. Pas seulement sur la valeur d'usage de l'eau, mais aussi sur les aspects environnementaux, sociaux, culturels, etc. Ces propositions pour contribuer à la gestion durable des ressources en eau du bassin peuvent sembler faibles par rapport à celles mesurées ailleurs dans le monde. Néanmoins, elles sont significatives lorsqu'elles sont rapportées au niveau de vie des résidents du BSCT.

Ces résultats offrent une photographie ponctuelle du BSCT et de sa population : ils ne constituent pas des valeurs absolues, mais décrivent des tendances pertinentes. Leur intérêt réside dans la conversion d'indicateurs complexes (recharge, pollution, qualité, niveaux de nappes) en valeurs économiques plus accessibles. Sans cette démarche, il aurait été difficile pour les habitants du BSCT de saisir les enjeux liés aux eaux souterraines et d'y participer activement.

Sont-ils désormais mieux à même de contribuer à la gestion de leur ressource ? Ce travail n'apporte pas de réponse définitive, mais plusieurs éléments incitent à un optimisme prudent :

- La forte réceptivité observée lors des enquêtes, en particulier l'importance accordée à la Valeur de Non-Usage ;
- L'efficacité des cartes de paiement illustrées, qui ont facilité l'appropriation des résultats, même auprès de ménages peu familiers avec les outils économiques ;
- Le potentiel de l'outil développé, utilisable comme support pédagogique et stratégique pour le dialogue entre populations et décideurs.

Ainsi, si l'étude n'a pas transformé à elle seule les capacités de participation, elle en a posé les bases. Elle constitue un levier de mobilisation cognitif, symbolique et politique, qui reste à être saisi et prolongé par les institutions et acteurs locaux.

La troisième et dernière contribution originale de ce travail de thèse porte sur l'analyse hydroéconomique des impacts anthropiques et des changements climatiques a été faite. L'approche mise en œuvre ici se veut une simplification des démarches de modélisation hydroéconomiques coûteuses, gourmandes en données et ressources développées jusque-là (A. Alamanos, 2016 ; Acharya, 1998; Arasteh et Farjami, 2021 ; Brouwer et Hofkes, 2008 ; Harou *et al.*, 2009 ; Hossen *et al.*, 2021 ; Kahil *et al.*, 2016 ; MacEwan *et al.*, 2017 ; Medellin-Azuara *et al.*, 2009 ; Pulido-Velazquez *et al.*, 2008 ; Pulido-Velazquez *et al.*, 2016 ; Souza da Silva et Alcoforado de Moraes, 2021). Les questionnaires des ressources en eau du BSCT, disposent donc d'un outil à vocation opérationnelle et stratégique. Il se présente sous forme d'une fonction linéaire, qui relie la quantité d'eau souterraine de qualité disponible dans le système aquifère à une valeur monétaire. L'application qui en a été faite dans notre étude, révèle que sans mesures de gestion durable, l'action de l'homme causerait un gain de valeur moyenne mensuelle individuelle de 66,5 francs CFA/m³ (synonyme de raréfaction de la ressource), tandis que les changements climatiques génèreraient des pertes de 61,294 francs CFA/m³ ou de 97,41 francs CFA/m³ (synonyme d'abondance de la ressource). En se basant sur ces résultats, il serait envisageable de recommander aux décideurs de dédier les faibles ressources disponibles à la lutte contre la pollution et la surexploitation, pour s'adapter de manière plus efficace au changement climatique.

Ces résultats novateurs ouvrent un vaste champ de possibilités offert par l'approche interdisciplinaire couplant sciences de l'eau et sciences sociales. A côté des modèles hydroéconomiques complexes qui tentent de saisir, au moyen de modèles mathématiques formels reliant les processus hydrologiques pertinents aux « lois » économiques de l'offre et de la demande sous-jacentes à la fourniture de services

d'eau rares (Burnett *et al.*, 2017), une autre approche est proposée ici. Elle privilégie des simulations orientées vers l'identification de tendances et de dynamiques générales, plutôt que des démarches d'optimisation formelle. Ce choix méthodologique répond aux contraintes de disponibilité limitée en données et ressources, qui freinent la mise en œuvre de modèles plus complexes. Il convient toutefois de souligner les marges d'amélioration possibles, notamment en matière de raffinement méthodologique, qui pourraient permettre d'enrichir et de renforcer cette approche à l'avenir.

En effet, si l'objectif de ce travail était de tirer parti des complémentarités entre l'hydrogéologie et l'économie, une approche pleinement intégrée reposant sur les forces de chacune de ces disciplines permettrait d'accroître considérablement la robustesse des résultats. Du point de vue hydrogéologique, une meilleure précision dans les données, l'adoption de méthodes multi-approches, ainsi que l'utilisation d'outils de modélisation plus performants, auraient permis une représentation plus fine du fonctionnement des aquifères du BSCT. Plusieurs aspects majeurs n'ont pu être pris en compte, notamment les risques liés à l'intrusion marine, la dimension transfrontalière des aquifères, les spécificités des milieux urbains africains susceptibles de modifier les dynamiques de recharge, ou encore les interactions entre réservoirs aquifères. Par ailleurs, la réduction des incertitudes associées aux modèles climatiques, particulièrement à l'échelle de petits bassins, demeure un enjeu crucial. Enfin, les méthodes d'estimation de la valeur de l'eau, en constante évolution, offrent des possibilités d'adaptation intéressantes au contexte des pays du Sud, qui mériteraient d'être davantage explorées.

Implications pratiques et perspectives

Malgré ses limites, il serait dommage de ne pas tirer pleinement parti des apports de cette thèse.

- Grâce à la fonction de demande, les autorités togolaises disposent désormais d'un outil pour mieux communiquer sur les enjeux liés aux eaux souterraines du BSCT. *La direction des ressources en eau et l'agence nationale de gestion de l'environnement*, pourraient l'utiliser dans les études d'impact, les audits environnementaux ou l'évaluation de projets et programmes. Bref, un outil d'aide à la décision évolutif.
- Les CAP et la valeur estimée du mètre cube d'eau souterraine constituent une base scientifique pour définir les assiettes de redevances, conformément aux principes GIRE de pollueur-payeur et préleveur-payeur destinés à alimenter le Fonds GIRE.

- Ces valeurs pourraient également être intégrées à la comptabilité environnementale par l'observatoire national de l'environnement ou par les collectivités, en tant qu'« actifs ».
- La carte de recharge offre une base solide pour délimiter des périmètres de protection et sanctuariser les zones stratégiques de forte recharge.

Par ailleurs, la base de données issue de l'enquête d'évaluation contingente reste sous-exploitée. L'analyse plus fine des nombreuses variables collectées permettrait d'approfondir la compréhension des ménages, d'explorer les « conséquentialités de paiement et de politique », ou encore d'évaluer l'influence de la dimension transfrontalière sur les réponses.

Enfin, la création d'un panel de suivi, dans le temps et dans l'espace, des perceptions des usagers vis-à-vis des enjeux environnementaux constituerait une avancée majeure.

Conclusion finale

Cette thèse confirme qu'il est possible de combiner approches hydrogéologique et économique pour développer un outil hydroéconomique capable de valoriser les eaux souterraines et d'en faciliter la gestion durable. Trois résultats majeurs en ressortent : la caractérisation de la recharge du BSCT face aux changements climatiques, la première estimation de la valeur économique des eaux souterraines en Afrique subsaharienne, et la mise au point d'un outil simple mais opérationnel d'aide à la décision. Ce travail ouvre ainsi la voie à une meilleure intégration des sciences de l'eau et des sciences sociales au service de la gouvernance participative et stratégique des ressources hydriques.

ANNEXE A

Tableau de calcul de la recharge

Calcul de recharge adapté d'après (Galvão et al., 2018)

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
P_{mm} moy mensuelle (mm)												
T moy mensuelle (°C)												
Évapotranspiration potentielle PET (mm)												
Coefficient de ruissellement C												
DONNEES D'ENTREES												
Ruissellement de surface SR (mm) = $P_{mm} \times C$												
Infiltration INF (mm) = $P_{mm} - SR$												
IN-PET (mm) = $INF - PET$												
Capacité au champ du sol FC (mm) = $WS = (WS_{max}) 10^b(INf-PET)$, avec $b=0.3333$ pour $WS_{max}= 100mm$												
FC change (mm) = $FC_{actuel} - FC_{mois\ précédent}$												
WD Déficit hydrique (mm) = $(IN-PET) - FC$ lorsque IN-PET est négatif												
Évapotranspiration réelle AET (mm) = $PET - WD$												
Recharge R (mm) = $(IN-PET) - FC\ Change$, lorsque IN-PET est positif												

La première étape consiste à définir la valeur du coefficient de ruissellement pour laquelle la recharge souhaite être estimée. Ensuite, les données mensuelles de température, précipitations et d'évapotranspiration potentielle sont saisies dans le tableau . À partir de ces données, la première composante du bilan hydrique calculée est le ruissellement de surface SR, qui est le produit entre P_{mm} et

C. Il est alors possible de déterminer l'infiltration INF en retirant le SR des précipitations P_{mm} . L'étape suivante IN-PET consiste à retirer l'évapotranspiration potentielle PET de la quantité d'eau infiltrée pour obtenir la quantité d'eau dans le sol. Avec cette valeur, il est possible de déterminer la capacité de champ du sol FC suivant la formule WS du tableau 1. La ligne suivante décrit la variation de la capacité de champ du sol FC, d'un mois à l'autre. Le tableau décrit ensuite le calcul de l'évapotranspiration actuelle et du déficit hydrique, qui sont d'autres composantes du bilan hydrique.

Enfin, la recharge mensuelle est déterminée en retirant la variation de la capacité de champ du sol FC du mois, de la quantité d'eau qui a réussi à traverser toutes les profondeurs du sol, c'est-à-dire lorsque IN-PET est positif.

En reprenant la même approche pour les différentes valeurs du coefficient de ruissellement, il est donc possible d'estimer les intervalles de recharge susceptibles de se produire dans la zone d'étude. Par extension, étant donné que la recharge est une réponse du système aquifère aux conditions climatiques à travers les premiers mètres de sol, il est possible d'estimer les réponses des coefficients de ruissellement du bassin, à différents scénarios climatiques.

ANNEXE B

QUESTIONNAIRE D'ENQUETE

Lettre d'explication

Vous êtes invité(e) à participer au projet de recherche intitulé « *Enquête sur la valeur économique des eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier togolais* ».

Cette recherche est réalisée dans le cadre du projet de doctorat de **Rachid BARRY** dirigé par **Florent BARBECOT**, Professeur titulaire au département des sciences de la terre et de l'atmosphère de l'Université du Québec A Montréal (UQAM).

Ce projet de recherche est financé par la Chaire de recherche UQAM en hydrogéologie urbaine et la Banque Islamique de Développement (IsDB).

L'objectif de cette enquête vise à connaître la valeur que vous accordez à l'eau souterraine au sein du bassin sédimentaire côtier togolais dans la région maritime. De plus nous désirons connaître votre opinion sur différents aspects liés à la qualité et à la gestion de l'eau souterraine de votre région.

Votre participation à ce projet consiste à répondre à un questionnaire d'environ 15 à 20 minutes. Les informations recueillies dans le cadre de cette étude ne serviront qu'à des fins scientifiques. Les données obtenues seront détruites 10 ans après la fin de cette étude. Vous êtes libre de vous retirer de cette étude en tout temps. En revanche, une fois le questionnaire soumis, il ne sera plus possible de se retirer, car aucune information permettant de vous identifier n'aura été recueillie.

Les résultats de cette recherche seront disponibles sous forme de rapports techniques et sous formats vulgarisés sur les sites web suivants : <https://eau.gouv.tg/> (Site du ministère de l'eau du Togo) et <https://hydro-sciences.uqam.ca/> (Site de la chaire stratégique en hydrogéologie urbaine de l'UQAM).

Pour toutes questions ou commentaires, vous pouvez contacter **Rachid BARRY** aux numéros de téléphone suivants : **(+228) 90-10-10-54** et **(+1) 514-686-2332**. Ou encore par courriel : barry.ahmed_rachid@courrier.uqam.ca.

Les comités d'éthique de la recherche pour les projets étudiants (CERPE) ont approuvé ce projet de recherche et en assureront le suivi. Pour toute question concernant vos droits en tant que participant à ce projet de recherche ou si vous avez des commentaires à formuler, vous pouvez communiquer avec ce comité à l'adresse courriel : cerpe-pluri@uqam.ca

CONSENTEMENT:

Le fait de répondre au questionnaire constitue un consentement à participer au projet de recherche.

Il est important que vous répondiez à toutes les questions en y **exprimant votre point de vue. Il n'y a pas de bonne ou de mauvaise réponse !**

: _____

Date : ____/____/____

Questionnaire rempli par :

a. Usager ☐

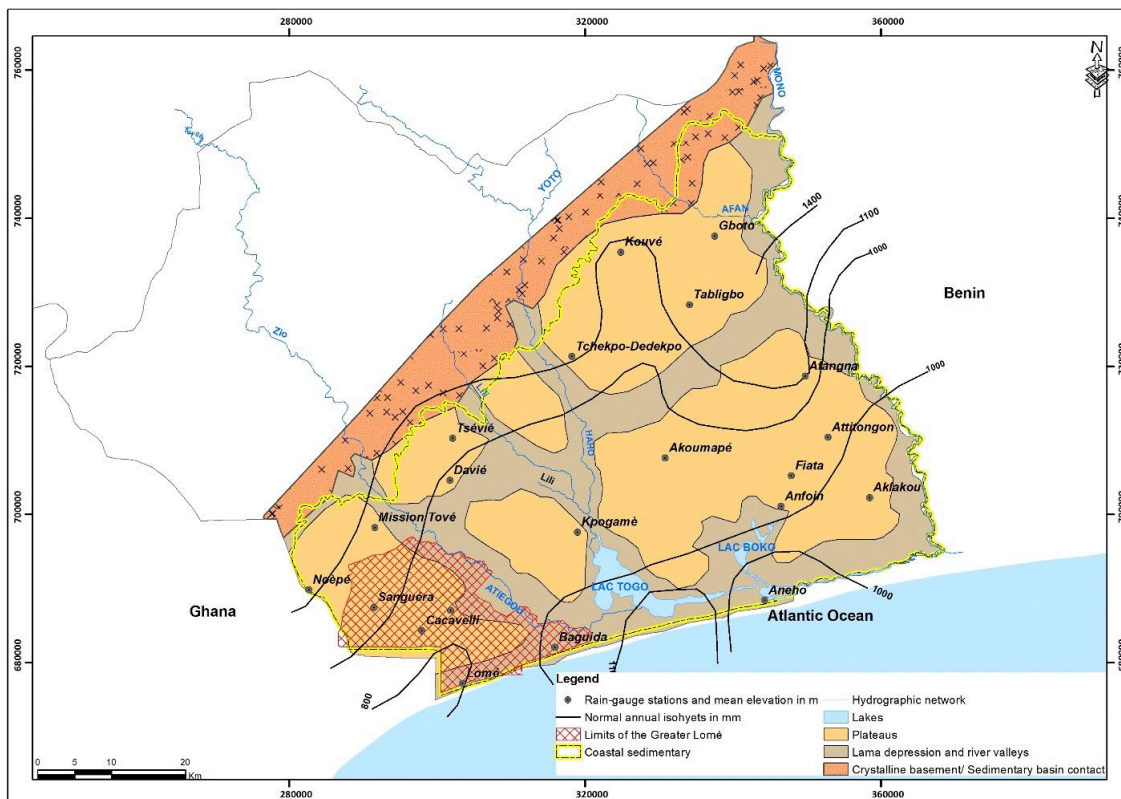
b. Enquêteur : _____

SECTION A : Premièrement, nous avons besoin de connaître quelques détails concernant votre résidence ainsi que vos habitudes de consommation d'eau à usage domestique

1. Depuis combien d'années habitez-vous dans le bassin sédimentaire côtier togolais ?

Nombre d'années _____

Il s'agit de la zone dans la région maritime située au sud d'une ligne allant de Noépé à l'est, à Tokpli à l'ouest et passant par Dalavé et Gati (voir carte de situation).



Carte de localisation du bassin sédimentaire côtier togolais

2. Quel est votre lieu de résidence principale la région située dans le bassin sédimentaire côtier togolais ?
 - a. Préfecture _____
 - b. Je préfère ne pas répondre à cette question ☐
3. Votre lieu de résidence se situe dans une :
 - a. Zone urbaine ☐
 - b. Zone rurale ☐
4. Etes-vous propriétaire ou locataire ?
 - a. Propriétaire ☒
 - b. Locataire ☐
5. Avez-vous une idée de la qualité de l'eau utilisée pour la consommation humaine dans la région située dans le bassin sédimentaire côtier togolais ?
 - a. Plutôt bonne ☐
 - b. Plutôt mauvaise ☐
 - c. Ne sait pas ☐
6. Comment évaluez-vous principalement la qualité de l'eau pour la consommation humaine ? (*Un seul choix possible*)
 - a. Aspect/Couleur / Odeur ☐
 - b. Résultats d'analyses chimiques/biologiques de l'eau ☐
 - c. Autre ☐ Expliquez : _____
7. Votre résidence dispose-t-elle d'un ouvrage de captage des eaux souterraines (Puits ou forage) ?
 - a. Oui ☐
 - b. Non ☐
8. Votre résidence dispose-t-elle d'un branchement au réseau de la TdE ?
 - a. Oui (Passez à la question 10) ☐
 - b. Non (Continuez à la question 9) ☐
9. Pour quelle raison ne disposez-vous pas d'un branchement privé au réseau de la TdE ?
 - a. Le réseau n'est pas disponible là où j'habite. ☐

- b. Le réseau est disponible mais, le branchement coute trop cher. ☐
- c. Le réseau est disponible mais, le cout du service (facture) est trop cher. ☐
- d. Le réseau est disponible mais, j'ai déjà un puits ou un forage chez moi. ☐
- e. Je suis locataire et la résidence n'en dispose pas. ☐
- f. Autre : ☐ Expliquez : _____

10. Quelle est votre source principale d'approvisionnement en eau ? *(Un seul choix possible)*

- a. Branchement de la TdE de ma résidence ☐
- b. Forage ou puits privé de ma résidence ☐
- c. Branchement de la TdE à partir d'un voisin ☐
- d. Achat d'eau (Borne Fontaine, forage privé, camion-citerne, etc.) ☐
- e. Cours d'eau de surface (rivière, lac)
- f. Autre ☐: Expliquez _____

11. A combien estimez-vous les frais mensuels liés à votre source d'approvisionnement en eau principale ?

- a. _____ Francs CFA par mois
- b. Ne sait pas. ☐

12. En plus de votre source d'approvisionnement principale, disposez-vous d'une source secondaire d'approvisionnement en eau ?

Ou encore, vous arrive-t-il de vous approvisionner en eau hors de chez vous-même ponctuellement ?

- a. Non ☐
- b. Oui : précisez laquelle (un seul choix possible)
 - i. Forage ou puits privé de ma résidence ☐
 - ii. Branchement de la TdE à partir d'un voisin ☐
 - iii. Achat d'eau (Borne Fontaine, forage privé, camion-citerne, etc.) ☐
 - iv. Cours d'eau de surface (rivière, lac). ☐
 - v. Autre ☐ : Expliquez _____

13. A combien estimez-vous les frais mensuels liés à votre source d'approvisionnement en eau secondaire ?

- a. _____ Francs CFA par mois

- b. Ne sait pas. ☐
14. Pour quelle raison principale, avez-vous besoin d'une source secondaire d'approvisionnement en eau ? (*Un seul choix possible*)
- a. Pour pallier les ruptures de service de la TdE ☐
 - b. Ma source d'eau principale n'est pas de qualité. ☐
 - c. Pour faire des économies sur ma facture ou sur mes dépenses en eau. ☐
 - d. Je vends de l'eau à mes voisins. ☐
 - e. J'exerce une activité qui nécessite de grandes quantités d'eau. ☐
 - f. Autre ☐ : Expliquez _____
15. Quelle principale source d'eau utilisez-vous pour **l'eau de boisson** ? (*Un seul choix possible*)
- a. Eau de la TdE ☐
 - b. Eau de forage ou de puits ☐
 - c. Eau embouteillée ou pure water ☐
 - d. Eau de rivière ☐
 - e. Autre ☐ : Expliquez _____
16. Quelle principale source d'eau utilisez-vous pour **la cuisine** ? (*Un seul choix possible*)
- a. Eau de la TdE ☐
 - b. Eau de forage ou de puits ☐
 - c. Eau embouteillée ou pure water ☐
 - d. Eau de rivière ☐
 - e. Autre ☐ : Expliquez _____
17. Quelle principale source d'eau utilisez-vous pour **la lessive** ? (*Un seul choix possible*)
- a. Eau de la TdE ☐
 - b. Eau de forage ou de puits ☐
 - c. Eau embouteillée ou pure water ☐
 - d. Eau de rivière ☐
 - e. Autre ☐ : Expliquez _____
18. Quelle principale source d'eau utilisez-vous pour **l'hygiène du corps (douche, bain)** ? (*Un seul choix possible*)
- a. Eau de la TdE ☐

- b. Eau de forage ou de puits ☐
 - c. Eau embouteillée ou pure water ☐
 - d. Eau de rivière ☐
 - e. Autre ☐ : Expliquez _____
19. Quelle principale source d'eau utilisez-vous pour **les latrines (wc, urinoirs)** ? (Un seul choix possible)
- a. Eau de la TdE ☐
 - b. Eau de forage ou de puits ☐
 - c. Eau embouteillée ou pure water ☐
 - d. Eau de rivière ☐
 - e. Autre ☐ : Expliquez _____
20. Êtes-vous satisfait de votre approvisionnement en eau ?
- a. Oui (continuer à la question 22) ☐
 - b. Non (passer à la question 21) ☐
 - c. Ne sait pas (continuer à la question 22) ☐
21. Quelle raison *principale* fait que vous n'êtes pas satisfait de l'approvisionnement en eau ? (Un seul choix possible)
- a. Approvisionnement pas suffisant ou irrégulier ☐
 - b. Longue file d'attente ☐
 - c. Distance parcourue trop longue ☐
 - d. Mauvais goût / Mauvaise qualité ☐
 - e. Cout du service élevé ☐
 - f. Autre ☐ : Précisez _____
 - g. Ne sait pas ☐
22. Consommez-vous de l'eau embouteillée ou en sachet (Pure water) ?
- a. Oui (Continuez à la question 23) ☐
 - b. Non (Passez à la question 25) ☐
23. Pour quelle raison *principale* **consommez-vous** de l'eau embouteille ou en sachet (Pure water) ? (Un seul choix possible)
- a. Elle a meilleur gout que l'eau du robinet ou de ma source d'eau. ☐

- b. Mon eau est/ou pourrait être contaminée par des polluants. ☐
 - c. Elle est la seule disponible quand je ne suis pas à la maison. ☐
 - d. Elle est plus sûre pour les enfants et les nourrissons. ☐
 - e. Autre ☐ : Expliquez _____
24. En moyenne, combien de litres d'eau embouteillée ou en sachet (Pure water) consommez-vous par semaine ?
- a. _____ litres par semaine.
 - b. Ne sait pas ☐
25. Quelle est la principale raison pour laquelle **vous ne consommez pas** d'eau embouteillée ou en sachet (Pure water) ? *(Un seul choix possible)*
- a. Parce que l'eau embouteillée ou en sachet coute trop cher. ☐
 - b. J'ai des doutes sur la qualité de ces eaux ☐
 - c. Les eaux embouteillées ou en sachets (Pure water) génèrent de la pollution avec les plastiques. ☐
 - d. J'ai parfaitement confiance en la qualité de l'eau que je consomme. ☐
 - e. Les eaux embouteillées ou en sachets (Pure water) ne sont pas disponibles à la vente là où je réside. ☐
 - f. Autre ☐ : Expliquez _____
26. Quel usage principal faites-vous de vos eaux usées domestiques (issues des cuisines, salles de bain, lessives, entretien ménager, etc.) ? *(Un seul choix possible)*
- a. Rejet vers le réseau d'égouts ou de caniveaux ☐
 - b. Rejet vers un puisard ou une fosse septique ☐
 - c. Rejet vers les rigoles ou des cours d'eau ☐
 - d. Rejet dans la rue ou dans la nature ☐
 - e. Autre ☐ : Expliquez _____
27. Quel type de toilettes/latrines votre ménage utilise-t-il ?
- a. Chasse d'eau ou latrines avec une fosse septique ☐
 - b. Pas de latrines, défécation à l'air libre (champ, brousse, sac plastique) ☐
 - c. Autre ☐ : Expliquez _____
 - d. Je préfère ne pas répondre à cette question ☐

28. Combien de ménages partagent ces toilettes/latrines avec vous ?

- c. Non partagés (un ménage) ☐
- d. Deux ménages ☐
- e. Trois ménages ou plus ☐
- f. Toilettes publiques ☐
- g. Je préfère ne pas répondre à cette question ☐

SECTION B : Maintenant, nous aimerions connaître votre opinion sur différents aspects qui touchent les ressources en eau en général et les eaux souterraines en particulier dans votre région.

29. Selon vous, à quel point chacune des questions suivantes qui affectent la société en général est importante pour vous ?

Affirmations	Très important	Important	Pas important
Questions sociales (<i>instabilité politique, corruption, terrorisme, insécurité civile, immigration clandestine, drogue ...</i>)	☐	☐	☐
Détérioration de l'environnement (<i>changement climatique, pollution, perte d'écosystèmes ...</i>)	☐	☐	☐
Situation économique actuelle (<i>coût de la vie, chômage, logement ...</i>)	☐	☐	☐
Situation sanitaire liée au Corona Virus	☐	☐	☐
Autre: ☐			

30. Selon vous, les problèmes environnementaux sont :

- a. Très préoccupants ☐
- b. Préoccupants ☐
- c. Peu préoccupants ☐

d. Pas préoccupants ☐

e. Ne sait pas ☐

31. Selon vous, à quel point chacun des problèmes environnementaux suivants est important pour vous ?

Affirmations	Très important	Important	Pas important
a. Changement climatique : <i>hausse des températures, diminution des pluies, sécheresses, inondations, etc.</i>	☐	☐	☐
b. Pollution atmosphérique et sonore	☐	☐	☐
c. Mauvaise gestion des ressources en eau : <i>pollution et surexploitation.</i>	☐	☐	☐
d. Perte d'écosystèmes : <i>disparition de la faune et la flore.</i>	☐	☐	☐

32. Selon vous quelle est la principale source d'approvisionnement en eau dans votre région ?

a. Eau de surface (rivières, fleuves, lacs) ☐

b. Eau souterraine ☐

c. Eau de pluie ☐

d. Ne sait pas ☐

33. Avez-vous déjà entendu parler de la loi de 2010 portant **Code de l'eau** au Togo ?

a. Oui ☐

b. Non ☐

34. Par rapport aux autres régions du Togo, vous diriez que la région où se situe le bassin sédimentaire côtier :

a. Dispose de plus de ressources en eau ☐

- b. Dispose des mêmes ressources en eau ☐
 - c. Dispose de moins de ressources en eau ☐
 - d. Ne sait pas ☐
35. Quel est votre avis sur la quantité d'eau disponible dans la région où se situe le bassin sédimentaire côtier ?
- a. Très abondante ☐
 - b. Abondante ☐
 - c. Faible ☐
 - d. Ne sait pas ☐
36. Quel est votre avis sur la qualité des eaux dans la région où se situe le bassin sédimentaire côtier ?
- a. Très bonne ☐
 - b. Bonne ☐
 - c. Moyenne ☐
 - d. Mauvaise ☐
 - e. Ne sait pas ☐
37. Selon vous, l'exploitation des ressources en eau (eaux souterraines, rivières, lacs, lagunes) doit être :
- a. Libre ☐
 - b. Règlementée ☐
 - c. Ne sait pas ☐
38. Selon vous, l'exploitation des ressources en eau (eaux souterraines, rivières, lacs, lagunes) **à des fins économiques, c'est-à-dire pour gagner de l'argent**, doit être :
- a. Libre ☐
 - b. Règlementée ☐
 - c. Ne sait pas ☐
39. Selon vous, à qui doit être confié la gestion (*la surveillance de la qualité, la protection, le contrôle des usages, etc.*) des ressources en eau de votre région ?
- a. A l'état ☐
 - b. Au secteur privé ☐

c. A une structure mixte regroupant l'état et les usagers (citoyens, agriculteurs, industries, etc.) ☐

d. Ne sait pas ☐

40. Quel est selon vous, votre degré de connaissance sur les eaux souterraines de votre région ?

a. Très bon ☐

b. Bon ☐

c. Faible ☐

d. Nul ☐

41. Pourriez-vous me dire à quel point vous pensez être exposé à chacun des risques liés à l'eau suivants ?

Affirmations	Risque très fort	Risque fort	Risque faible
a. Risques liés à la contamination des eaux par des produits chimiques toxiques utilisés en agriculture : <i>engrais, pesticides, herbicides, etc...</i>	☐	☐	☐
b. Risques liés à la contamination des eaux par des produits chimiques toxiques issus des activités industrielles ou économiques : fuites d'hydrocarbures, rejets de produits chimiques, etc...	☐	☐	☐
c. Risques liés à l'absence de réseau d'assainissement : <i>le contenu des latrines, des fosses septiques, des dépotoirs, des cimetières, qui se retrouvent dans les eaux souterraines et les rivières.</i>	☐	☐	☐
d. Risques liés à l'intrusion d'eau de mer salée qui s'infiltre dans les terres à cause de l'élévation du niveau marin et des pompes anarchiques des eaux souterraines.	☐	☐	☐

e. Risques liés aux sécheresses qui entraînent la baisse des niveaux des nappes et des cours d'eau	☐	☐	☐
f. Risques liés aux inondations	☐	☐	☐

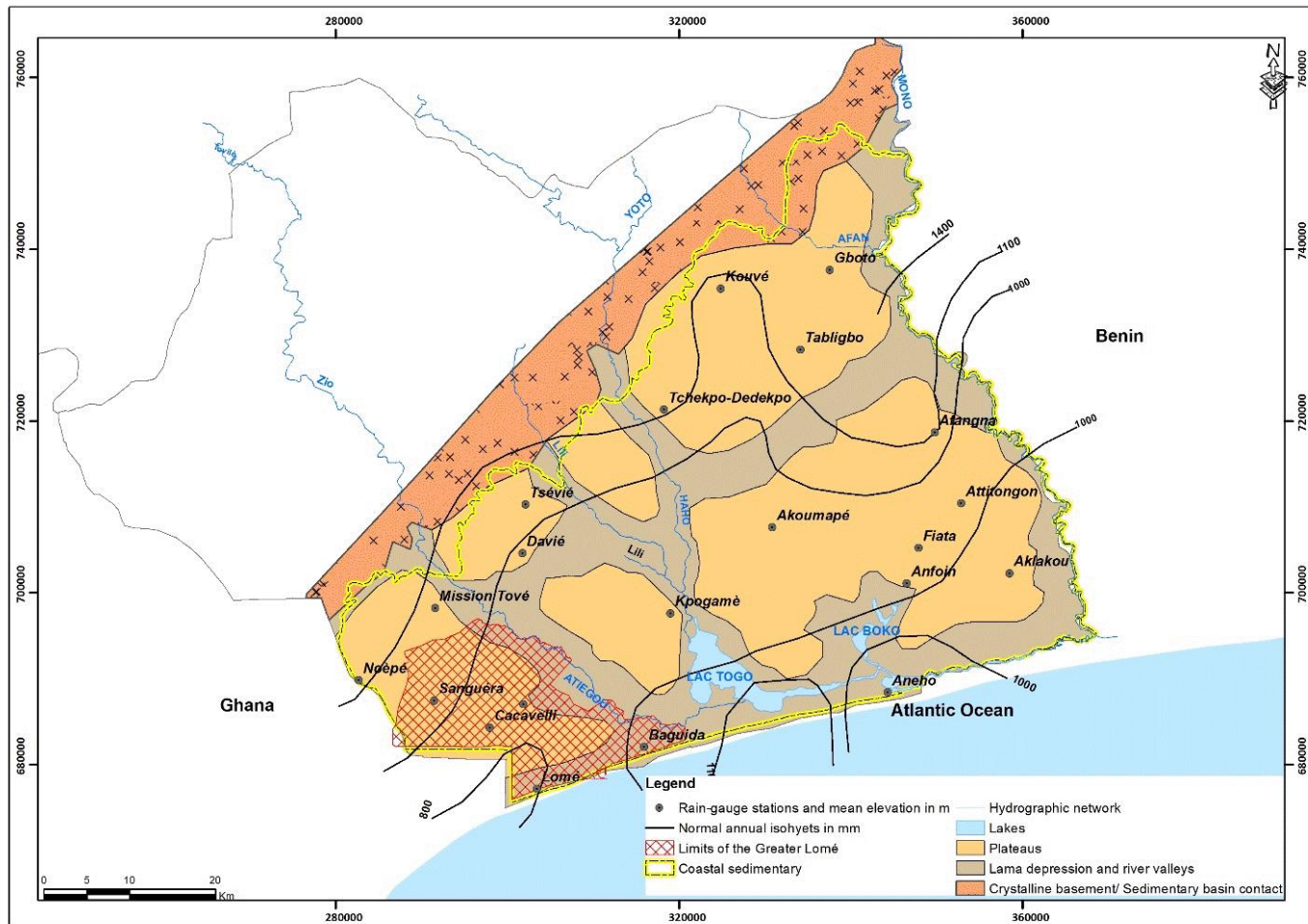
42. Pensez-vous que le scénario de crise suivant : ***forte sécheresse avec des rivières et des nappes à leur bas niveau et de mauvaises qualités, et avec le service de la TdE qui serait arrêté***, pourrait-il se produire dans votre région au cours des 10 prochaines années ?

- a. Très probable ☐
- b. Probable ☐
- c. Peu probable ☐
- d. Inenvisageable ☐
- e. Ne sait pas ☐

SECTION C : le futur des eaux souterraines du Bassin Sédimentaire Côtier togolais

Veuillez attentivement les informations ci-dessous et ensuite répondre à la question 47

Le ***bassin sédimentaire côtier togolais*** s'étend sur une bonne partie de la région maritime (voir carte) au sud, d'une ligne reliant grossièrement Noepe à Tabligbo. On y trouve 3 nappes d'eau souterraine.



Carte de localisation du bassin sédimentaire côtier togolais

Ces eaux souterraines permettent le développement de nombreuses activités :

- La TdE y prélève d'importantes quantités d'eau qui sont ensuite fournies aux usagers.
- Les agriculteurs y prélèvent de l'eau pour l'irrigation.
- Les entreprises et industries y puisent de l'eau pour leurs besoins.
- Les particuliers réalisent des puits et des forages pour satisfaire leurs besoins domestiques ou pour la vente.

Elles jouent aussi rôle important dans l'écosystème de la région :

- Elles alimentent les cours d'eau de surface durant la saison sèche.

- Elles assurent le maintien des zones humides de la région ainsi que la biodiversité animale et végétale, qui s'y trouve.

Mais cette précieuse ressource fait face à plusieurs menaces.

- *La pollution* : causée par les déchets issus des latrines, des dépotoirs anarchiques, de l'agriculture, des industries, des cimetières, etc... et qui se retrouvent dans la nappe.

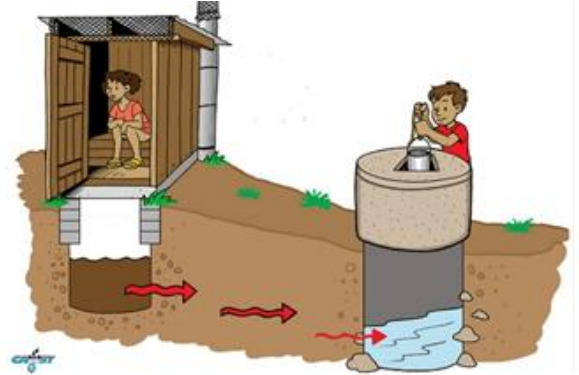


Image illustrant quelques sources de pollution affectant les eaux souterraines dans le bassin sédimentaire côtier togolais : par l'usage de pesticides en agriculture, des dépotoirs anarchiques, et des infrastructures d'assainissement inadaptées

- *Le risque de surexploitation* : si les prélèvements dépassent la recharge de la nappe, cela entraînerait une diminution de la ressource et une entrée d'eau de mer salée dans la nappe, ce qui rendrait, l'eau et les sols inutilisables. D'autre part une surexploitation de la nappe pourrait poser des problèmes géotechniques, d'affaissement des sols menaçant la stabilité des bâtiments et des routes.

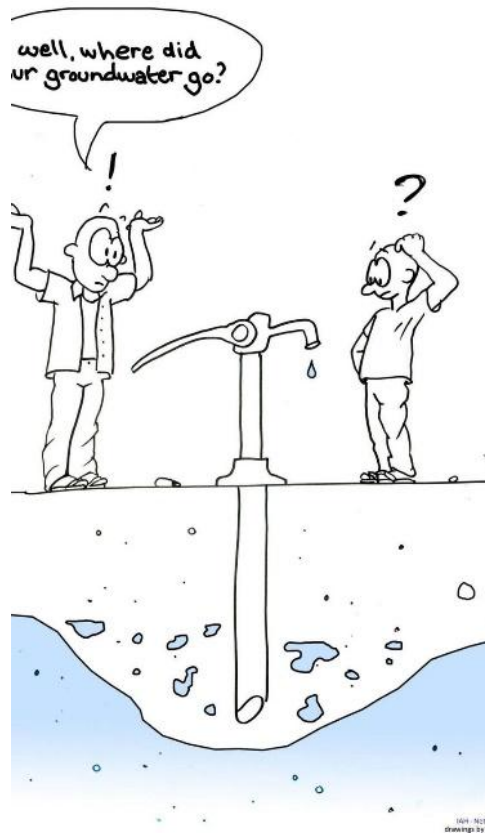


Image illustrant les effets éventuels de la surexploitation des eaux souterraines

La pollution et la surexploitation pourraient être accélérées en raison des **changements climatiques**, avec des plus fortes sécheresses et l'élévation du niveau de la mer.

Une telle situation est susceptible d'entraîner des répercussions négatives sur la santé des usagers, ainsi que sur l'état de la faune et de la flore, et aussi mettre en péril de nombreuses activités économiques.

Etant donnée l'importance socio-économique des eaux souterraines pour les populations résidents dans le bassin sédimentaire côtier togolais et leur rôle central dans le fonctionnement écosystémique local, il est prévu sous la direction d'un Comité de bassin – *constitués de représentants de l'état, des collectivités locales et des usagers* – la mise en place d'un programme qui assurerait (voir tableau) :

Pour les ménages non connectés au réseau de la TdE	1. Un raccordement au réseau de la TdE
	2. La fourniture d'un service de qualité 24h/24, avec la modernisation et l'extension du réseau de la TdE à toutes les zones habitées dans le bassin.
	3. Des actions de gestion durable des eaux souterraines : infrastructures d'assainissement, mesures de protection contre les pollutions et la surexploitation, etc.
	4. La possibilité de désigner des représentants au Comité de bassin
Pour les ménages qui sont déjà connectés au réseau de la TdE	1. La fourniture d'un service de qualité 24h/24, avec la modernisation et l'extension du réseau de la TdE à toutes les zones habitées dans le bassin.
	2. Des actions de gestion durable des eaux souterraines : infrastructures d'assainissement, mesures de protection contre les pollutions et la surexploitation, etc.
	3. La possibilité de désigner des représentants au Comité de bassin

43. Voteriez-vous pour un tel programme ?

- a. Oui (continuer à la question 44) ☐
- b. Non (passez à la question 45) ☐

44. Pourriez-vous dire la principale raison pour laquelle vous seriez prêt à adhérer à ce programme ? (Un seul choix de réponse possible)

- a. Je souhaite bénéficier d'un bon service d'eau potable et d'assainissement. ☐
- b. Je souhaite que tout le monde dans la région bénéficie d'un bon service d'eau potable et d'assainissement. ☐
- c. Je souhaite la conservation des ressources naturelles, en particulier les ressources en eau. ☐
- d. Je pense aux générations futures. ☐
- e. J'aime la région. ☐
- f. Autre ☐ : Expliquez _____

45. Certaines raisons ont pu justifier votre choix CONTRE le programme.

Êtes-vous d'accord ou en désaccord avec les raisons suivantes ?

Raisons	D'accord	En désaccord
a. Je ne crois pas que l'eau souterraine de la région soit à ce point menacée	☐	☐
b. Je ne crois pas que les polluants constituent un risque pour la santé	☐	☐
c. Je ne vivrai pas dans la région dans le futur	☐	☐
d. Je ne crois pas que ce programme puisse être mené à bien	☐	☐

46. Supposons que la plupart des gens ont voté en faveur du programme de préservation et de gestion durable des eaux souterraines et d'amélioration de l'accès aux services d'eau et d'assainissement, et que donc :

- a. Vous disposerez d'un branchement de la TdE à votre domicile avec un service de qualité.
- b. Le plan de protection et de gestion durable des eaux souterraines sera mis en œuvre.
- c. Le tout sous la supervision des représentants des usagers, des collectivités locales et de l'état.

Sachant que la mise en place d'un programme aussi ambitieux de gestion durable des eaux souterraines dans votre région nécessitera la contribution des usagers par la mise en place d'une redevance pour alimenter un fonds spécial ;

*Considérant les difficultés économiques actuelles à l'échelle nationale et mondiale,
et afin de permettre la mise en œuvre du programme par le comité de bassin ;*

***Combien consentiriez-vous à payer en plus par mois sur la facture d'eau de la
TdE qui vous sera adressée ?***

Veuillez cocher pour choisir l'un des montants ci-dessous :

0 frs	75 Frs	350 Frs	800 Frs	1000 Frs	1400 Frs	2200 Frs	3500 Frs
							
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

47. Certaines raisons ont pu justifier votre choix de ne pas payer pour la mise en œuvre du programme.

Etes-vous d'accord ou en désaccord avec les raisons suivantes ?

Raisons	D'accord	En désaccord
a. Je ne devrais pas avoir à payer pour résoudre un problème causé par d'autres	☐	☐
b. Je n'ai pas les moyens de payer pour l'amélioration de l'environnement	☐	☐
c. Ce devrait être le gouvernement qui paie	☐	☐
d. Ce devrait être les préleveurs et les pollueurs d'eau souterraine qui payent	☐	☐
e. Autres :	☐	☐

48. Supposons toujours que le programme a été adopté, veuillez indiquer pour une tranche de **1000 francs** comment vous souhaiteriez que l'argent soit utilisé (*Attention : la somme totale doit être égale à 1000 francs*) :

- _____ francs sur les 1000 doivent être utilisés pour permettre l'accès à l'eau et à l'assainissement pour tous.
- _____ francs sur les 1000 doivent être utilisés pour lutter contre la pollution, surexploitation et les effets des changements climatiques.
- _____ francs sur les 1000 doivent être utilisés pour protéger les cours d'eau et environnements reliés aux eaux souterraines.
- _____ francs sur les 1000 doivent être utilisés pour permettre aux générations futures d'hériter d'un aquifère avec de l'eau en quantité et en qualité.
- Ne sait pas ☐

49. Pensez-vous que le programme de gestion décrit plus haut serait complètement efficace ?

C'est-à-dire que grâce à ce programme, toute l'eau souterraine du bassin, soit de bonne qualité et en quantité suffisante ?

- *En d'autres termes, un **programme efficace à 100%** conduirait à un niveau de qualité/quantité d'eau souterraine de 100%.*
- *Un **programme efficace à 50%** conduirait à un niveau de qualité/quantité d'eau souterraine de 50%.*

- a. Oui (Passez à la question 51) ☐
- b. Non (Passez à la question 50) ☐
- c. Pas certain (Passez à la question 50) ☐
- d. Ne sait pas (Passez à la question 51) ☐

50. A quel niveau d'efficacité, en pourcentage, pensez-vous que le programme pourra aboutir?
(100% est complètement efficace et 0% est complètement inefficace)

Pourcentage _____%

51. Selon vous, le programme de gestion durable des eaux souterraines décrit plus haut sera effectivement mené dans les cinq prochaines années.

- a. Je suis tout à fait d'accord ☐
- b. Je suis d'accord ☐
- c. Je ne suis pas d'accord ☐
- d. Je ne suis absolument pas d'accord ☐
- e. Je ne sais pas ☐

52. Selon-vous dans le but de contribuer à la gestion durable des eaux souterraines, la facture de la TdE sera effectivement modifiée dans les cinq prochaines années ?

- a. Je suis tout à fait d'accord ☐
- b. Je suis d'accord ☐
- c. Je ne suis pas d'accord ☐
- d. Je ne suis absolument pas d'accord ☐
- e. Je ne sais pas ☐

53. Saviez-vous que les eaux souterraines de votre région s'étendent du Ghana à l'ouest au Nigéria à l'est ?

- a. Oui ☐

- b. Non ☐
54. Ces nouvelles informations modifient-elles votre avis sur le programme de gestion durable des eaux souterraines envisagé au Togo, dans votre région ? *(Un seul choix de réponse possible)*
- a. Non - *Je souhaite que le Togo poursuive et mène à bien son programme* ☐
 - b. Oui - *Je souhaite que le programme du Togo tienne plus compte de l'impact de ses voisins*
☐
 - c. Oui – *Je souhaite que le Togo suspende son programme jusqu'à la mise en place d'un programme commun avec tous les pays partageant les mêmes eaux souterraines* ☐
 - d. Je ne sais pas ☐
55. Ces nouvelles informations modifient-elles la contribution mensuelle que vous étiez prêt à payer pour une gestion durable des eaux souterraines de votre région ? *(Un seul choix de réponse possible)*
- a. Non ☐
 - b. Oui - Je veux donner plus : ☐
 - c. Oui - Je veux donner moins : ☐
 - d. Oui - Je ne veux plus contribuer ☐
 - e. Je ne sais pas ☐
56. Etes-vous pour la mise en place d'un programme de gestion durable des eaux souterraines réunissant **le Togo, le Ghana, le Bénin, et le Nigéria** ?
- a. Oui ☐
 - b. Non ☐
 - c. Je ne sais pas ☐
57. Etes-vous pour le paiement d'une contribution par les ménages et les usagers **du Togo, du Ghana, du Bénin, et du Nigéria** afin de contribuer à la mise en place d'un programme de gestion durable des eaux souterraines réunissant les 4 pays ?
- a. Oui ☐
 - b. Non ☐
 - c. Je ne sais pas ☐

SECTION D : Voici quelques questions pour nous aider à dresser votre profil socioéconomique.

58. Vous êtes :

- a. Un homme ☐
- b. Une femme ☐

59. Quel est votre âge :

- a. Entre 18 et 24 ans ☐
- b. Entre 25 et 34 ans ☐
- c. Entre 35 et 44 ans ☐
- d. Entre 45 et 54 ans ☐
- e. Entre 55 et 64 ans ☐
- f. Entre 65 et 74 ans ☐
- g. 75 ans ou plus ☐
- h. Je préfère ne pas répondre à cette question ☐

60. Quel est votre niveau de scolarité/formation le plus élevé ?

- a. Pas scolarisé ☐
- b. Primaire ☐
- c. Collège ☐
- d. Lycée ☐
- e. Université ☐
- f. Pas scolarisé+ Apprentissage ☐
- g. Primaire + Apprentissage ☐
- h. Collège+ Apprentissage ☐
- i. Lycée+ Apprentissage ☐
- j. Université+ Apprentissage ☐
- k. Je préfère ne pas répondre à cette question ☐

61. Quelle est votre occupation principale actuelle ?

- a. Cadre supérieur et profession libérale ☐
- b. Commerçant et travailleur autonome ☐
- c. Employé de bureau ☐

- d. Artisan ou travailleur manuel ☐
- e. Agriculteur ☐
- f. Sans activité ☐
- g. Retraité ☐
- h. Étudiant ☐
- i. Apprenti ☐
- j. Autre (précisez) : _____

62. Parmi les catégories suivantes, laquelle reflète le mieux le revenu moyen mensuel **de votre ménage** pour l'année **2021** ?

- a. Entre 0 et 34999 Frs ☐
- b. Entre 35000 Frs et 74999 Frs ☐
- c. Entre 75000 Frs 249999 Frs ☐
- d. 250000 Frs et plus ☐
- e. Je préfère ne pas répondre à cette question ☐

63. Combien de personnes vivent dans votre foyer, y compris vous-même ?

- a. : _____
- b. Je préfère ne pas répondre à cette question ☐

64. Nombre d'adultes vivant dans votre foyer, y compris vous-même :

- a. _____
- b. Je préfère ne pas répondre à cette question ☐

65. Nombre d'enfants (< 18 ans) vivant dans votre foyer :

- a. _____
- b. Je préfère ne pas répondre à cette question ☐

ANNEXE C

Impacts anthropiques sur les eaux souterraines du BSCT, d'après Djongon (2022)

La nappe du Continental Terminal représente une importante source d'alimentation en eau au sud du Togo et surtout dans le Bassin Sédimentaire Côtier. Cette partie du pays représente un poumon du pays car elle rassemble sur cette petite surface (soit 6% de la surface du pays) environs 40% de la population du pays dont la majorité n'ont pas accès aux réseaux de distribution d'eau potable. A cet effet, la population fait recours à la réalisation des forages individuels ou puits qui sont majoritairement réalisés manuellement avec de faible profondeur et qui ne captent que la nappe phréatique du Continental Terminal. Ce prélèvement excessif d'eau de cette nappe fait qu'elle est la plus exploitée par rapport aux 2 autres nappes profondes qui sont celles du Paléocène et du Maëstrichtien.

Malgré l'importance du prélèvement, les mesures du niveau des eaux de la nappe du CT par la Direction des Ressources en Eau de Lomé entre 2015 et 2021 révèle une tendance à la hausse montrant l'importance de la recharge de cette nappe. Cependant, d'après les études antérieures ainsi que des mesures des paramètres physico-chimique réalisées lors de ce projet de thèse sur les eaux du CT, il ressort que la qualité des eaux de cette nappe est dégradée avec des valeurs de conductivité électrique (CE) situées entre $82.3 \mu\text{S.cm}^{-1}$ et $9620 \mu\text{S.cm}^{-1}$ avec une moyenne de $1057.8 \mu\text{S.cm}^{-1}$. La majorité des échantillons mesurée ayant des valeurs de CE supérieures à $700 \mu\text{S.cm}^{-1}$ sont situées dans la partie sud du bassin et surtout dans Lomé-Golfe (la capitale du Togo).

Eu égard ce qui précède, les points cruciaux pour les ressources en eaux dans le Bassin Sédimentaire Côtier du Togo ne sont pas liés à l'aspect quantitatif des eaux du CT mais qualitatif.

Pour étudier alors les facteurs de la dégradation de la qualité des eaux de la nappe du CT, ce projet de thèse s'est basé sur 3 grands objectifs spécifiques : i) Caractériser les eaux à l'origine de l'alimentation de la nappe du Continental Terminal (CT) par le bilan hydrogéochimique en étudiant les isotopes stables des eaux de pluie, de surface et souterraines du Bassin Sédimentaire Côtier, ensuite ii) évaluer la vulnérabilité intrinsèque de cette nappe par la méthode DRASTIC pour étudier la sensibilité que possède cette nappe à être contaminée s'il y a une source de pollution à la surface et enfin iii) évaluer les risques de dégradation des eaux de ladite nappe en

combinant les menaces et la vulnérabilité intrinsèque et développer un outil d'aide à la décision pour permettre aux gestionnaires de simuler ces risques en fonction des effets du changement climatique et des actions anthropiques.

Les études isotopiques des eaux échantillonnées à travers tout le bassin a permis de faire un lien entre les eaux de pluies, de surface et souterraines. En effet, les eaux souterraines notamment celle de la nappe du CT présentent des signatures isotopiques qui sont alignées autour de la droite météorique local qui présente une pente de 7,3 proche de celle de la droite météorique globale de Craig (1961). Ceci révèle alors que cette nappe est majoritairement alimentée par des eaux de précipitation ayant une masse d'air d'origine océanique. La cartes isoscapes des eaux du CT ont montré que cette recharge ne se passe pas dans les mêmes conditions entre l'extrême nord du bassin et le sud. Au nord, les signatures isotopiques des eaux souterraines sont plus enrichies et l'hypothèse serait que ces eaux se seraient évaporées dans la zone vadose avant que le résidu n'atteigne les eaux en profondeur ou que la signature isotopique représente une recharge à court terme des eaux de début de saison pluvieuse et que, le sol étant déjà humecté, les eaux des mois les plus pluvieuses ruissèlent majoritairement pour alimenter les cours d'eau.

A partir de ces études isotopiques il est démontré que les eaux de cette nappe du CT se rechargent par les eaux de pluie qui, lors de leur infiltration, sont susceptibles de conduire les polluants qui seraient responsables de la dégradation de la qualité des eaux. Cependant quelle serait la capacité protectrice que peut posséder cet aquifère pour éviter la dégradation de ces eaux face à l'infiltration des polluants venant de la surface.

Pour vérifier cette capacité protectrice, la seconde étude basée sur la vulnérabilité de la nappe du CT par la méthode DRASTIC de Aller et al (1987) a permis de montrer qu'environ 60 % de la superficie du bassin possède une vulnérabilité située entre modérée et élevée. Les zones les plus vulnérables sont situées dans les bas-fonds des cours d'eau, le sud-ouest de Lomé-Golfe ainsi que le long de la côte. La superposition de la carte des conductivités électriques mesurées dans des échantillons d'eau de la nappe du CT sur celle des zones de vulnérabilité révèle une parfaite adéquation entre ces deux cartes, confirmant l'efficacité de la méthode DRASTIC pour évaluer les facteurs de dégradation des eaux de cet aquifère. En effet, cette superposition des deux cartes a permis de montre que les eaux présentant des conductivités électriques inférieures à 700 $\mu\text{S.cm}^{-1}$

¹ sont majoritairement situées au niveau des zones de faible vulnérabilité alors que les eaux de forte minéralisation (supérieure à 700 $\mu\text{S.cm}^{-1}$) sont localisées dans les zones de vulnérabilité modérée et élevée.

Il est évident que la vulnérabilité d'une zone ne confère pas automatiquement le risque de dégradation de la qualité des eaux souterraines dans ladite zone. Il faut la présence d'une source de pollution avant que cette zone ne représente un risque pour la dégradation des eaux souterraines.

Pour cela, la troisième partie de ce projet s'est penchée sur la combinaison de la carte de vulnérabilité intrinsèque avec les menaces dues aux actions anthropiques pour réaliser une première carte de risques de dégradation de la qualité des eaux du CT en temps « tx = temps correspondant la période de notre étude ». Selon cette étude, plus de 65% de la surface du BSCT et 73% de la surface de Lomé-Golfe (capitale du Togo) présente un risque de dégradation situé entre modéré et élevé. Les zones présentant les risques élevés correspondent aux zones de carrières et des usines d'exploitation des mines (phosphate et clinker), la zone industrielle située sur la côte ainsi que les zones urbaines des grandes villes comme Lomé-golfe, Tsévié et Aneho. Pour valider la carte de risque, la carte de conductivité électrique (CE) et celle des teneurs en nitrates des eaux ont été superposées sur la carte de risque. Les résultats ont montré une concordance entre cette carte de risque et celles de CE et des teneurs en nitrates.

Afin de permettre aux gestionnaires de mettre à jour ou de simuler le risque de dégradation de la qualité des eaux de cette nappe phréatique, un outil d'aide à la décision (ModVuRiDE du CT) a été proposé permettant d'intégrer uniquement en entrée du système certaines cartes et de créer à la sortie une carte de risque en fonction des scénarii.

ANNEXE D

CERTIFICAT D'APPROBATION ETHIQUE



No. de certificat : 2022-4288
Date : 2021-12-08

CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE

Le Comité d'éthique de la recherche pour les projets étudiants impliquant des êtres humains (CERPE plurifacultaire) a examiné le projet de recherche suivant et le juge conforme aux pratiques habituelles ainsi qu'aux normes établies par la Politique No 54 sur l'éthique de la recherche avec des êtres humains(2020) de l'UQAM.

- Titre du projet : Enquête sur la valeur économique des eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier togolais
- Nom de l'étudiant : Ahmed Rachid Barry
- Programme d'études : Doctorat en sciences de la Terre et de l'atmosphère
- Direction(s) de recherche : Florent Barbecot; Manuel Rodriguez

Modalités d'application

Toute modification au protocole de recherche en cours de même que tout événement ou renseignement pouvant affecter l'intégrité de la recherche doivent être communiqués rapidement au comité.

La suspension ou la cessation du protocole, temporaire ou définitive, doit être communiquée au comité dans les meilleurs délais.

Le présent certificat est valide pour une durée d'un an à partir de la date d'émission. Au terme de ce délai, un rapport d'avancement de projet doit être soumis au comité, en guise de rapport final si le projet est réalisé en moins d'un an, et en guise de rapport annuel pour le projet se poursuivant sur plus d'une année au plus tard un mois avant la date d'échéance (2022-12-08) de votre certificat. Dans ce dernier cas, le rapport annuel permettra au comité de se prononcer sur le renouvellement du certificat d'approbation éthique.

Caroline Vrignaud
Pour le président, Raoul Graf, M.A., Ph.D.
Président CERPE plurifacultaire et Professeur titulaire, département de marketing

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'CV' or similar initials.

ANNEXE E

Résultat de la régression logistique Stepwise dans Stata

Logistic regression

Number of obs = 543

LR chi2(10) = 66.12

Prob > chi2 = 0.0000

Log likelihood = -205.87957

Pseudo R2 = 0.1384

Vote_prog	Coefficient	Std. err.	z	P> z	[95% conf. interval]	
_ILieu_resi_7	-1.458916	.4395658	-3.32	0.001	-2.320449	-.5973833
_IRevenus_3	2.698658	1.027654	2.63	0.009	.6844935	4.712822
_IForage_re_2	.5113059	.2942087	1.74	0.082	-.0653325	1.087944
Nb_enfants	.1885017	.062522	3.01	0.003	.0659608	.3110426
_IAge_5	1.686445	.7783287	2.17	0.030	.1609493	3.211942
_IOccupatio_3	-.7318408	.3471801	-2.11	0.035	-1.412301	-.0513803
_ILieu_resi_2	-.9505438	.3682219	-2.58	0.010	-1.672246	-.2288421
_IProp_Loc_1	-.5690482	.2802266	-2.03	0.042	-1.118282	-.0198141
_IRevenus_1	1.299451	.4603391	2.82	0.005	.3972032	2.201699
_IRevenus_2	1.269166	.4638229	2.74	0.006	.3600895	2.178242
_cons	1.414304	.2706304	5.23	0.000	.8838787	1.94473

ANNEXE F

Résultat de la régression MCO Stepwise dans Stata

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	543
Model	26241674.2	15	1749444.95	F(15, 527)	=	4.49
Residual	205542925	527	390024.526	Prob > F	=	0.0000
				R-squared	=	0.1132
				Adj R-squared	=	0.0880
Total	231784599	542	427646.862	Root MSE	=	624.52

BID_47	Coefficient	Std. err.	t	P> t	[95% conf. interval]	
_Ilieu_resi_5	-165.7677	80.38504	-2.06	0.040	-323.6821	-7.853233
_IAge_2	171.8815	86.70733	1.98	0.048	1.547038	342.2159
_INiveau_et_4	110.4825	57.23426	1.93	0.054	-1.952856	222.9178
_IProblème_2	197.8447	69.10859	2.86	0.004	62.08253	333.6068
_Ilieu_resi_2	-318.816	105.3006	-3.03	0.003	-525.6764	-111.9556
Niveau_effi_prog	-1.257237	.649789	-1.93	0.054	-2.533731	.0192581
_Ilieu_resi_6	-236.2839	112.8757	-2.09	0.037	-458.0254	-14.54241
_Ilieu_resi_7	-205.9689	117.6719	-1.75	0.081	-437.1324	25.19462
_IRevenus_1	235.7524	78.99445	2.98	0.003	80.56972	390.9351
_IRevenus_2	304.622	81.13526	3.75	0.000	145.2337	464.0102
_IRevenus_3	232.9337	93.76295	2.48	0.013	48.73872	417.1288
_IBranch_Td_1	125.2482	57.33541	2.18	0.029	12.61421	237.8822
_INiveau_et_1	447.8586	227.5549	1.97	0.050	.8325563	894.8846
_Ilieu_resi_8	-464.3515	200.6362	-2.31	0.021	-858.4964	-70.20662
_Ilieu_resi_4	-167.1759	86.96271	-1.92	0.055	-338.012	3.660229
_cons	453.4756	81.09174	5.59	0.000	294.1729	612.7783

ANNEXE G

Résultats des estimations des valeurs individuelles d'usage et de non-usage des répondants dans l'interface du logiciel Stata

```
. tabstat valeur_usage_47, stat(count mean sd p50 min max)
```

Variable	N	Mean	SD	p50	Min	Max
valeur_us~47	543	101.8692	191.2688	0	0	1210

```
.  
.  
.
```

```
. tabstat valeur_no_usage_47, stat(count mean sd p50 min max)
```

Variable	N	Mean	SD	p50	Min	Max
valeur_no~47	543	401.2431	580.0387	175	-1000	3500

ANNEXE H

Résultats de la régression entre les variables CAP et Niveau_eff dans Stata

```
. reg BID Niveau_effi_prog
```

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	543
Model	3487108.18	1	3487108.18	F(1, 541)	=	6.89
Residual	273681050	541	505879.945	Prob > F	=	0.0089
				R-squared	=	0.0126
				Adj R-squared	=	0.0108
Total	277168158	542	511380.366	Root MSE	=	711.25

BID	Coefficient	Std. err.	t	P> t	[95% conf. interval]	
Niveau_effi_prog	-1.909094	.7271406	-2.63	0.009	-3.337459	-.4807294
_cons	676.5362	39.62962	17.07	0.000	598.6894	754.383

ANNEXE I

Résultat du test de linéarité

```
. reg BID Niveau_effi_prog Niveau_effi_progsq
```

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	543
Model	4446100.95	2	2223050.47	F(2, 540)	=	4.40
Residual	272722057	540	505040.847	Prob > F	=	0.0127
				R-squared	=	0.0160
				Adj R-squared	=	0.0124
Total	277168158	542	511380.366	Root MSE	=	710.66

BID	Coefficient	Std. err.	t	P> t	[95% conf. interval]	
Niveau_effi_prog	2.529716	3.302151	0.77	0.444	-3.956919	9.016352
Niveau_effi_progsq	-.0470287	.0341286	-1.38	0.169	-.1140697	.0200124
_cons	661.9307	40.99079	16.15	0.000	581.4097	742.4516

.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIE

- A. Alamanos, S. X., N. Mylopoulos and P. Stålnacke. (2016). Hydro-economic modeling and management with limited data: The case of Lake Karla Basin, Greece. *European Water* 54: 3-18, 2016.
- Acharya, G. (1998). *Hydrological-economic linkages in water resource management* [Phd thesis, University of York].
- AfDB. (2000). *The Africa water vision for 2025: Equitable and sustainable use of water for socioeconomic development*. <https://www.afdb.org/fileadmin/uploads/afdb/Documents/Generic-Documents/african%20water%20vision%202025%20to%20be%20sent%20to%20wwf5.pdf>
- Akouvi, A., Dray, M., Violette, S., de Marsily, G. et Zuppi, G. M. (2008). The sedimentary coastal basin of Togo: example of a multilayered aquifer still influenced by a palaeo-seawater intrusion. *Hydrogeology Journal*, 16(3), 419-436. <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0246-1>
- Ali, R., McFarlane, D., Varma, S., Dawes, W., Emelyanova, I., Hodgson, G. et Charles, S. (2012). Potential climate change impacts on groundwater resources of south-western Australia. *Journal of Hydrology*, 475, 456-472. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.043>
- Allen, R. C. et Gisser, M. (1984, 1984/07/01). Competition Versus Optimal Control in Groundwater Pumping When Demand is Nonlinear. *Water Resources Research*, 20(7), 752-756. <https://doi.org/10.1029/WR020i007p00752>
- Amanambu, A. C., Obarein, O. A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S. S., Balogun, O., Oyebamiji, A. et Ochege, F. U. (2020). Groundwater system and climate change: Present status and future considerations. *Journal of Hydrology*, 589, 125163.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W. et Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic press.
- Arasteh, M. A. et Farjami, Y. (2021). New hydro-economic system dynamics and agent-based modeling for sustainable urban groundwater management: A case study of Dehno, Yazd Province, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 72. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103078>
- Armandine Les Landes, A., Aquilina, L., De Ridder, J., Longuevergne, L., Pagé, C. et Goderniaux, P. (2014). Investigating the respective impacts of groundwater exploitation and climate change on wetland extension over 150 years. *Journal of Hydrology*, 509, 367-378. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.039>
- Arriaza, M., Gómez-Limón, J. A. et Upton, M. (2002, 2002/03/01). Local water markets for irrigation in southern Spain: A multicriteria approach. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 46(1), 21-43. <https://doi.org/10.1111/1467-8489.00165>
- Ascott, M. J., Macdonald, D. M. J., Sandwidi, W. J. P., Black, E., Verhoef, A., Zongo, G., Tirogo, J. et Cook, P. (2022). Time of emergence of impacts of climate change on groundwater levels in sub-Saharan Africa. *Journal of Hydrology*, 612. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128107>
- Aslam, R. A., Shrestha, S. et Pandey, V. P. (2018, Jan 15). Groundwater vulnerability to climate change: A review of the assessment methodology [Review]. *Sci Total Environ*, 612, 853-875. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.237>
- Asprilla-Echeverria, J. (2021). The social drivers of cooperation in groundwater management and implications for sustainability. *Groundwater for Sustainable Development*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100668>
- Bachmat, Y. et Collin, M. (1987). Mapping to assess groundwater vulnerability to pollution. (p. 297-307). *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, Proceedings and Information*,

- Barry, R., Barbecot, F., Rodriguez, M., Djongon, A. et Akakpo, W. (2022). Urban development and intensive groundwater use in African coastal areas: The case of Lomé urban area in Togo. Dans *Groundwater for Sustainable Livelihoods and Equitable Growth* (p. 77-94). CRC Press.
- Bateman, I. J., Day, B. H., Georgiou, S. et Lake, I. (2006). The aggregation of environmental benefit values: Welfare measures, distance decay and total WTP. *Ecological Economics*, 60(2), 450-460. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.04.003>
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S. et Palutikof, J. P. (2008). *Climate Change and Water - IPCC Technical Paper VI*.
- Becker, N. et Friedler, E. (2012). Integrated hydro-economic assessment of restoration of the Alexander-Zeimar River (Israel-Palestinian Authority). *Regional Environmental Change*, 13(1), 103-114. <https://doi.org/10.1007/s10113-012-0318-1>
- Bergkamp, G. et Cross, K. (2006). Groundwater and ecosystem services: towards their sustainable use. (p. 177-193). International Symposium on Groundwater Sustainability, Alicante, Spain. InterAcademy Panel.
- Berkson, J. (1944). Application of the logistic function to bio-assay. *Journal of the American statistical association*, 39(227), 357-365.
- Beven, K. et Binley, A. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6(3), 279-298.
- Blivi, A. (1993). Morphology and current dynamics of the coast of Togo. *Geo-Eco-Trop (Belgium)*.
- Bocanegra, E., Da Silva, G. C., Custodio, E., Manzano, M. et Montenegro, S. (2009). State of knowledge of coastal aquifer management in South America. *Hydrogeology Journal*, 18(1), 261-267. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0520-5>
- Boughariou, E., Allouche, N., Jmal, I., Mokadem, N., Ayed, B., Hajji, S., Khanfir, H. et Bouri, S. (2018). Modeling aquifer behaviour under climate change and high consumption: Case study of the Sfax region, southeast Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 141, 118-129. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.02.006>
- Boyle, K., Bergstrom, J., Job, C., Kealy, M., Bergman, R., Ankrah, R., Ali, G., Alsadek, J., Ballard, G. et Daub, V. (1994). A framework for measuring the economic benefits of ground water. *Paper Number EE-0259*.
- Braune, E. et Xu, Y. (2010, Mar-Apr). The role of ground water in sub-Saharan Africa [Research Support, Non-U.S. Gov't]. *Ground Water*, 48(2), 229-238. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00557.x>
- Brett - Crowther, M. R. (2009). Taming the Anarchy: Groundwater Governance in South Asia. *International Journal of Environmental Studies*, 66(6), 818-821. <https://doi.org/10.1080/00207230903138281>
- BRG, BGS, BRGM, EAWAG et UNESCO. (2022). *Ressources en eau de la région CEDEAO - Groundwater resources in the ECOWAS region* Échelle : 1:5000000.
- Brouwer, R. et Hofkes, M. (2008). Integrated hydro-economic modelling: Approaches, key issues and future research directions. *Ecological Economics*, 66(1), 16-22. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.02.009>
- Brunner, K. et Meltzer, A. H. (1971). The Uses of Money: Money in the Theory of an Exchange Economy. *The American Economic Review*, 61(5), 784-805. <http://www.jstor.org/stable/1813142>
- Burnett, K., Wada, C., Endo, A. et Taniguchi, M. (2017). The economic value of groundwater in Obama. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 11, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.10.002>
- Burri, N. M., Weatherl, R., Moeck, C. et Schirmer, M. (2019, Sep 20). A review of threats to groundwater quality in the anthropocene. *Sci Total Environ*, 684, 136-154. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.236>

- Cárdenas Castillero, G., Kuráž, M. et Rahim, A. (2021). Review of Global Interest and Developments in the Research on Aquifer Recharge and Climate Change: A Bibliometric Approach. *Water*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/w13213001>
- Carter, S.-S. A. R. et Bevan, J. (2008). Groundwater development for poverty alleviation in sub-Saharan Africa. Dans *Applied groundwater studies in Africa* (p. 35-52). CRC Press.
- CCKP. (2021, 2022/07/20). *Climate Projections CMIP5 Data, Togo*. The World Bank Group. Récupéré le 2022/07/20 de <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/togo/cmip5>
- CCME. (2010). *Document d'orientation technique sur la valeur de l'eau* : Conseil canadien des ministres de l'environnement.
- Charalambous, A. N. (2019). Groundwater and its economic nature. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 53(2), 176-188. <https://doi.org/10.1144/qjegh2019-068>
- Chatterjee, R. S., Fruneau, B., Rudant, J. P., Roy, P. S., Frison, P.-L., Lakhera, R. C., Dadhwal, V. K. et Saha, R. (2006). Subsidence of Kolkata (Calcutta) City, India during the 1990s as observed from space by Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (D-InSAR) technique. *Remote Sensing of Environment*, 102(1-2), 176-185. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.02.006>
- Chikozho, C. (2007). Globalizing Integrated Water Resources Management: A Complicated Option in Southern Africa. *Water Resources Management*, 22(9), 1241-1257. <https://doi.org/10.1007/s11269-007-9223-7>
- Collignon, B. (1994). Impact des activités humaines sur les ressources en eau souterraine en Afrique sahélienne et soudanienne. Dans *Enregistreurs et indicateurs de l'évolution de l'environnement en zone tropicale*. Presses Universitaires de Bordeaux, Talence (p. 11-26). Presses Universitaires de Bordeaux (France).
- Corona, C. R., Gurdak, J. J., Dickinson, J. E., Ferré, T. P. A. et Maurer, E. P. (2018). Climate variability and vadose zone controls on damping of transient recharge. *Journal of Hydrology*, 561, 1094-1104. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.028>
- Cullis, J., Strzepek, K., Tadross, M., Sami, K., Havenga, B., Gildenhuys, B. et Smith, J. (2010). Incorporating climate change into water resources planning for the town of Polokwane, South Africa. *Climatic Change*, 108(3), 437-456. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9891-9>
- Danh, V. T. (2007). *Economic value of groundwater protection in the Mekong Delta* Cantho University]. Cantho City, Vietnam.
- Darouich, H. M., Pedras, C. M. G., Gonçalves, J. M. et Pereira, L. S. (2014). Drip vs. surface irrigation: A comparison focussing on water saving and economic returns using multicriteria analysis applied to cotton. *Biosystems Engineering*, 122, 74-90. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.03.010>
- Dassargues, A. (2020). *Hydrogéologie appliquée: science et ingénierie des eaux souterraines*. Dunod.
- Dennis, I. et Dennis, R. (2012). Climate change vulnerability index for South African aquifers. *Water SA*, 38(3). <https://doi.org/10.4314/wsa.v38i3.7>
- DGSCN. (2023). *Cinquième Recensement Général de la Population et de l'Habitat 2022*. Lomé-TOGO : Direction Générale de la statistique et de la Comptabilité Nationale (DGSCN).
- DHE. (1984). *Alimentation en eau de Lomé: Ressources en eau souterraine, synthèse des données hydrogéologique*. Lomé- TOGO : Direction de l'Hydraulique et de l'Energie.
- Djongon, K. A. (2022). *Modélisation de la vulnérabilité des aquifères phréatiques côtiers du Golfe de Guinée sous les effets conjugués des perturbations anthropiques et du changement climatique: cas de la nappe du Continental Terminal du Bassin Sédimentaire Côtier du Togo* université Paris-Saclay].
- Downing, R. A. (1989). Some Aspects of the Economics of Groundwater Conservation and Protection. Dans *Developments in Water Science* (p. 181-199). Elsevier B.V. [https://doi.org/10.1016/S0167-5648\(08\)70538-0](https://doi.org/10.1016/S0167-5648(08)70538-0).

- Easter, K. W. et Hearne, R. (1995). Book Review: Groundwater Markets and Irrigation Development: Political Economy and Practical Policy. *Land Economics*, 71(2), 261-264.
- Esteban, E. et Albiac, J. (2011). Groundwater and ecosystems damages: Questioning the Gisser–Sánchez effect. *Ecological Economics*, 70(11), 2062-2069. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.06.004>
- Favre, M. (2018). *La demande en eau des ménages face au changement global : l'accès individuel généralisé est-il durable ? Le cas de la Tunisie* [PhD, Montpellier SupAgro]. France.
- Fenn, D. G., Hanley, K. J. et DeGeare, T. V. (1975). *Use of the water-balance method for predicting leachate generation from solid-waste-disposal sites*.
- Foster, S. (1987). *Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy: International Conference, 1987, Noordwijk Aan Zee, the Netherlands Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants The Hague, Netherlands Organization for Applied Scientific Research*. Netherlands Organization for Applied Scientific Research.
- Foster, S., Chilton, J., Moeng, M., Cardy, F. et Schiffler, M. (2000). *Groundwater in rural development: facing the challenges of supply and resource sustainability*. The World Bank.
- Freeman, A. M. (2003). *The measurement of environmental and resource values : theory and methods* (2nd ed. éd.). Resources for the Future.
- Gall-Ely, M. L. (2009). Définition, mesure et déterminants du consentement à payer du consommateur: synthèse critique et voies de recherche. *Recherche et Applications en Marketing (French Edition)*, 24(2), 91-113.
- Galvão, P., Hirata, R. et Conicelli, B. (2018). Estimating groundwater recharge using GIS-based distributed water balance model in an environmental protection area in the city of Sete Lagoas (MG), Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 77(10). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7579-z>
- Gaye, C. B. et Tindimugaya, C. (2018). Review: Challenges and opportunities for sustainable groundwater management in Africa. *Hydrogeology Journal*, 27(3), 1099-1110. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1892-1>
- Giordano, M. (2009). Global Groundwater? Issues and Solutions. *Annual Review of Environment and Resources*, 34(1), 153-178. <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.030308.100251>
- Girard, C., Rinaudo, J.-D. et Pulido-Velazquez, M. (2015). Index-Based Cost-Effectiveness Analysis vs. Least-Cost River Basin Optimization Model: Comparison in the Selection of a Programme of Measures at the River Basin Scale. *Water Resources Management*, 29(11), 4129-4155. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1049-0>
- Gnazou, M. D. T. (2016). *CARTOGRAPHIE HYDROCHIMIQUE ET BACTERIOLOGIQUE, Rapport partiel du Projet de Réduction des Risques Environnementaux et Sanitaires liés à l'Activité des Vendeurs d'Eau de Forage dans le Grand-Lomé (PRRESAF)*.
- Gnazou, M. D. T., Sabi, B. E., Lavalade, J. L., Schwartz, J., Akakpo, W. et Tozo, A. (2017). Multilayered aquifer modeling in the coastal sedimentary basin of Togo. *Journal of African Earth Sciences*, 125, 42-58. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.10.008>
- Green, T. R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Hiscock, K. M., Treidel, H. et Aureli, A. (2011). Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology*, 405(3-4), 532-560. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.002>
- GRET et DRE-MEHV. (2021). *Etude de faisabilité d'un projet de GIRE du bassin versant du lac Togo - Diagnostic initial*.
- Griebler, C. et Avramov, M. (2015). Groundwater ecosystem services: a review. *Freshwater Science*, 34(1), 355-367. <https://doi.org/10.1086/679903>
- Griffin, R. C. (2016). *Water Resource Economics: The Analysis of Scarcity, Policies, and Projects*. MIT Press. <https://books.google.ca/books?id=Si2DjgEACAAJ>
- Gurdak, J. J. (2017). Climate-induced pumping. *Nature Geoscience*, 10(2), 71-71. <https://doi.org/10.1038/ngeo2885>

- Hardin, G. (1968). The Tragedy of the Commons. *Science*, 162(3859), 1243-1248. <http://www.jstor.org.proxy.bibliotheques.uqam.ca/stable/1724745>
- Harou, J. J., Pulido-Velazquez, M., Rosenberg, D. E., Medellín-Azuara, J., Lund, J. R. et Howitt, R. E. (2009). Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. *Journal of Hydrology*, 375(3-4), 627-643. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.037>
- Havril, T., Tóth, Á., Molson, J. W., Galsa, A. et Mádl-Szőnyi, J. (2018). Impacts of predicted climate change on groundwater flow systems: Can wetlands disappear due to recharge reduction? *Journal of Hydrology*, 563, 1169-1180. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.020>
- Healy, R. W. (2010). *Estimating groundwater recharge*. Cambridge university press.
- Hermans, C., Erickson, J., Noordewier, T., Sheldon, A. et Kline, M. (2007, Sep). Collaborative environmental planning in river management: an application of multicriteria decision analysis in the White River Watershed in Vermont. *J Environ Manage*, 84(4), 534-546. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.07.013>
- Holman, I. P. (2006). Climate change impacts on groundwater recharge-uncertainty, shortcomings, and the way forward? *Hydrogeology Journal*, 14, 637-647.
- Holzer, T. L. et Johnson, A. I. (1985). Land subsidence caused by ground water withdrawal in urban areas. *GeoJournal*, 11, 245-255.
- Hossen, M. A., Connor, J. et Ahammed, F. (2021). Review of hydro-economic models (HEMs) which focus on transboundary river water sharing disputes. *Water Policy*. <https://doi.org/10.2166/wp.2021.114>
- Hoyos, D. (2010). The state of the art of environmental valuation with discrete choice experiments. *Ecological Economics*, 69(8), 1595-1603. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.04.011>
- IPCC. (2019). Global Warming of 1.5 C An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change. *Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. <https://www.ipcc.ch/sr15/>. Accessed, 1.
- Johnston, R. J. et Rosenberger, R. S. (2009). Methods, Trends and Controversies in Contemporary Benefit Transfer. *Journal of Economic Surveys*. <https://doi.org/10.1111/j.1467-6419.2009.00592.x>
- Kahil, M. T., Ward, F. A., Albiac, J., Eggleston, J. et Sanz, D. (2016). Hydro-economic modeling with aquifer–river interactions to guide sustainable basin management. *Journal of Hydrology*, 539, 510-524. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.057>
- Kahsay, K. D., Pingale, S. M. et Hatiye, S. D. (2018). Impact of climate change on groundwater recharge and base flow in the sub-catchment of Tekeze basin, Ethiopia. *Groundwater for Sustainable Development*, 6, 121-133. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.12.002>
- Kakar, N., Kakar, D. M. et Barrech, S. (2020). Land subsidence caused by groundwater exploitation in Quetta and surrounding region, Pakistan. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 382, 595-607. <https://doi.org/10.5194/piahs-382-595-2020>
- Kaneko, S. et Toyota, T. (2011). Long-term urbanization and land subsidence in Asian Megacities: an indicators system approach. *Groundwater and subsurface environments: Human impacts in Asian coastal cities*, 249-270.
- Kebede, S. (2013). Functions of Groundwater. Dans S. Kebede (dir.), *Groundwater in Ethiopia: Features, Numbers and Opportunities* (p. 205-220). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30391-3_6.
- Kim, K.-R., Owens, G., Kwon, S.-I., So, K.-H., Lee, D.-B. et Ok, Y. S. (2010). Occurrence and Environmental Fate of Veterinary Antibiotics in the Terrestrial Environment. *Water, Air, & Soil Pollution*, 214(1-4), 163-174. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0412-2>
- Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J. J., Kupfersberger, H., Kværner, J., Muotka, T., Mykrä, H., Preda, E., Rossi, P., Uvo, C. B., Velasco, E. et Pulido-Velazquez, M. (2014). Climate change impacts

- on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology*, 518, 250-266. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.037>
- Konikow, L. F. (2015, Jan-Feb). Long-term groundwater depletion in the United States. *Ground Water*, 53(1), 2-9. <https://doi.org/10.1111/gwat.12306>
- Konikow, L. F. et Kendy, E. (2005). Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeology Journal*, 13(1), 317-320. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0411-8>
- Koudjega, K. H., Kodja, D. J. et Vissin, W. E. (2020, 2020-05-27). Evaluation de la Recharge des Eaux Souterraines Profonde de l'Aquifère du Paléocène Supérieure dans le Bassin du Mono-Couffo au Benin [Recharge, Eaux souterraines, Aquifère du Paléocène supérieure, Mono-Couffo, Piézométrie.]. 2020, 20(2), 11. <https://doi.org/10.52155/ijpsat.v20.2.1567>
- Koundouri, P. (2004). Potential for groundwater management: Gisser-Sanchez effect reconsidered. *Water Resources Research*, 40(6). <https://doi.org/10.1029/2003wr002164>
- Kumar, C. (2012). Climate change and its impact on groundwater resources. *International Journal of Engineering and Science*, 1(5), 43-60.
- Kusangaya, S., Warburton, M. L., Archer van Garderen, E. et Jewitt, G. P. W. (2014). Impacts of climate change on water resources in southern Africa: A review. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 67-69, 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.09.014>
- Lall, U., Josset, L. et Russo, T. (2020). A Snapshot of the World's Groundwater Challenges. *Annual Review of Environment and Resources*, 45(1), 171-194. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-025800>
- Lamouroux, R. (1960). *Carte pédologique du togo*. Office de la Recherche scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM), IRD.
- Lansford, N. H. et Jones, L. L. (1995). Recreational and Aesthetic Value of Water Using Hedonic Price Analysis. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 20(2), 341-355. <http://www.jstor.org.proxy.bibliotheques.uqam.ca/stable/40987743>
- Lapworth, D. J., Nkhuwa, D. C. W., Okotto-Okotto, J., Pedley, S., Stuart, M. E., Tijani, M. N. et Wright, J. (2017). Urban groundwater quality in sub-Saharan Africa: current status and implications for water security and public health. *Hydrogeol J*, 25(4), 1093-1116. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1516-6>
- Latinopoulos, D. (2007). Multicriteria decision-making for efficient water and land resources allocation in irrigated agriculture. *Environment, Development and Sustainability*, 11(2), 329-343. <https://doi.org/10.1007/s10668-007-9115-2>
- Lauffenburger, Z. H., Gurdak, J. J., Hobza, C., Woodward, D. et Wolf, C. (2018). Irrigated agriculture and future climate change effects on groundwater recharge, northern High Plains aquifer, USA. *Agricultural Water Management*, 204, 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.022>
- Lemieux, J.-M., Hassaoui, J., Molson, J., Therrien, R., Therrien, P., Chouteau, M. et Ouellet, M. (2015). Simulating the impact of climate change on the groundwater resources of the Magdalen Islands, Québec, Canada. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 400-423. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.02.011>
- Lerner, D. N. (2002). Identifying and quantifying urban recharge: a review. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 143-152. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0177-1>
- Li, P., Karunanidhi, D., Subramani, T. et Srinivasamoorthy, K. (2021, Jan). Sources and Consequences of Groundwater Contamination. *Arch Environ Contam Toxicol*, 80(1), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00805-z>
- Liu, H.-H. (2011). Impact of climate change on groundwater recharge in dry areas: An ecohydrology approach. *Journal of Hydrology*, 407(1-4), 175-183. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.024>

- Loomis, J. et Feldman, M. (2003). Estimating the benefits of maintaining adequate lake levels to homeowners using the hedonic property method. *Water Resources Research*, 39(9). <https://doi.org/10.1029/2002wr001799>
- Loomis, J., Smith, A. et Huszar, P. (2005). Estimating the economic benefits of maintaining residential lake levels at an irrigation reservoir: A contingent valuation study. *Water Resources Research*, 41(8). <https://doi.org/10.1029/2004wr003812>
- López-Vera, F. (2012). Groundwater: The Invisible Resource. *International Journal of Water Resources Development*, 28(1), 141-150. <https://doi.org/10.1080/07900627.2012.642238>
- MacDonald, A. M., Bonsor, H. C., Dochartaigh, B. É. Ó. et Taylor, R. G. (2012). Quantitative maps of groundwater resources in Africa. *Environmental Research Letters*, 7(2). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024009>
- MacEwan, D., Cayar, M., Taghavi, A., Mitchell, D., Hatchett, S. et Howitt, R. (2017). Hydroeconomic modeling of sustainable groundwater management. *Water Resources Research*, 53(3), 2384-2403. <https://doi.org/10.1002/2016wr019639>
- Mankad, A. et Walton, A. (2015). Accepting managed aquifer recharge of urban storm water reuse: The role of policy-related factors. *Water Resources Research*, 51(12), 9696-9707. <https://doi.org/10.1002/2015wr017633>
- Maraun, D. et Widmann, M. (2018). *Statistical downscaling and bias correction for climate research*. Cambridge University Press.
- Margat, J. (1977). *De la surexploitation des nappes souterraines*. Bureau de recherches géologiques et minières, Service géologique national.
- Margat, J. et Van der Gun, J. (2013). *Groundwater around the world: a geographic synopsis*. Crc Press.
- Martin, M. (1999). *Estimation de la valeur économique des ressources en eaux souterraines de la région située au nord de Montréal: application de l'approche contingente et de la méthode des coûts évités* [PhD, Institut national de la recherche scientifique]. Québec.
- Masindi, V. et Foteinis, S. (2021). Groundwater contamination in sub-Saharan Africa: Implications for groundwater protection in developing countries. *Cleaner Engineering and Technology*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100038>
- Masiyandima, M. et Giordano, M. (2007). Sub-Saharan Africa: opportunistic exploitation. Dans *The agricultural groundwater revolution: Opportunities and threats to development* (p. 79-99). CABI.
- Mattei, A., Barbécot, F., Goblet, P. et Guillon, S. (2020). Pore water isotope fingerprints to understand the spatiotemporal groundwater recharge variability in ungauged watersheds. *Vadose Zone Journal*, 19(1). <https://doi.org/10.1002/vzj2.20066>
- Maurer, B. (2006). The Anthropology of Money. *Annual Review of Anthropology*, 35(1), 15-36. <https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.35.081705.123127>
- Mazzoni, A., Heggy, E. et Scabbia, G. (2018). Forecasting water budget deficits and groundwater depletion in the main fossil aquifer systems in North Africa and the Arabian Peninsula. *Global Environmental Change*, 53, 157-173. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.09.009>
- MEAHV. (2010). *Plan d'Actions National de Gestion Intégrée des Ressources en Eau - Togo*. Lomé-Togo : Ministère de l'Eau, de l'Assainissement et de l'Hydraulique Villageoise.
- MEAHV. (2015). *Plan d'Action National pour le Secteur de l'Eau et de l'Assainissement (PANSEA) du Togo*. Dans d. I. E. r. e. d. I. H. V. Ministère de l'Eau (dir.). Lomé-Togo.
- Medellin-Azuara, J., Mendoza-Espinosa, L. G., Lund, J. R., Harou, J. J. et Howitt, R. E. (2009, Aug). Virtues of simple hydro-economic optimization: Baja California, Mexico [Research Support, Non-U.S. Gov't]. *J Environ Manage*, 90(11), 3470-3478. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.05.032>
- MEHV. (2021). *Stratégie d'approvisionnement en eau potable au Togo*. Lomé - TOGO : MEHV (Ministère de l'Eau et de l'Hydraulique Villageoise).

- Meixner, T., Manning, A. H., Stonestrom, D. A., Allen, D. M., Ajami, H., Blasch, K. W., Brookfield, A. E., Castro, C. L., Clark, J. F., Gochis, D. J., Flint, A. L., Neff, K. L., Niraula, R., Rodell, M., Scanlon, B. R., Singha, K. et Walvoord, M. A. (2016). Implications of projected climate change for groundwater recharge in the western United States. *Journal of Hydrology*, 534, 124-138. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.027>
- MERF. (2022). *Quatrième Communication Nationale sur les Changements Climatiques Togo*. Lomé-TOGO : MERF (Ministère de l'Environnement et des Ressources Forestières)
- Messner, F., Zwirner, O. et Karkuschke, M. (2006). Participation in multi-criteria decision support for the resolution of a water allocation problem in the Spree River basin. *Land Use Policy*, 23(1), 63-75. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2004.08.008>
- Mileham, L., Taylor, R. G., Todd, M., Tindimugaya, C. et Thompson, J. (2009). The impact of climate change on groundwater recharge and runoff in a humid, equatorial catchment: sensitivity of projections to rainfall intensity. *Hydrological Sciences Journal*, 54(4), 727-738. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.4.727>
- Millennium ecosystem assessment, M. (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis* (vol. 5). Island press Washington, DC.
- Mitchell, R. C. et Carson, R. T. (1981). *An experiment in determining willingness to pay for national water quality improvements*. Resources for the Future Washington, DC.
- Morris, B. et Foster, S. (2006). *Assessment of groundwater pollution risk [M/OL]*.
- Mote, P., Brekke, L., Duffy, P. B. et Maurer, E. (2011). Guidelines for constructing climate scenarios. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 92(31), 257-258.
- Musolff, A., Leschik, S., Reinstorf, F., Strauch, G. et Schirmer, M. (2010). Micropollutant loads in the urban water cycle. *Environmental science & Technology*, 44(13), 4877-4883.
- National Research Council, N. (1997). *Valuing ground water: economic concepts and approaches*. National Academies Press.
- Nauges, C. et Strand, J. (2007). Estimation of non-tap water demand in Central American cities. *Resource and Energy Economics*, 29(3), 165-182. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2006.05.002>
- Nauges, C. et Van den Berg, C. (2009). Demand for Piped and Non-piped Water Supply Services: Evidence from Southwest Sri Lanka. *Environmental and Resource Economics*, 42(4), 535-549. <https://doi.org/10.1007/s10640-008-9222-z>
- Nauges, C. et Whittington, D. (2009). Estimation of Water Demand in Developing Countries: An Overview. *The World Bank Research Observer*, 25(2), 263-294. <https://doi.org/10.1093/wbro/lkp016>
- Neverre, N. et Brouwer, R. (2020). A global meta-analysis of groundwater quality valuation studies. *European Review of Agricultural Economics*, 47(3), 893-932. <https://doi.org/10.1093/erae/jby043>
- Nkhonjera, G. K. et Dinka, M. O. (2017). Significance of direct and indirect impacts of climate change on groundwater resources in the Olifants River basin: A review. *Global and Planetary Change*, 158, 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.09.011>
- Nlend, B., Celle-Jeanton, H., Huneau, F., Ketchemen-Tandia, B., Fantong, W. Y., Boum-Nkot, S. N. et Etame, J. (2018). The impact of urban development on aquifers in large coastal cities of West Africa: Present status and future challenges. *Land Use Policy*, 75, 352-363. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.03.007>
- Nyassogbo, K. (1984). L'urbanisation et son évolution au Togo. *Les cahiers d'outre-mer*, 37(146), 135-158.
- Nyenje, P. M. et Batelaan, O. (2009). Estimating the effects of climate change on groundwater recharge and baseflow in the upper Ssezibwa catchment, Uganda. *Hydrological Sciences Journal*, 54(4), 713-726. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.4.713>
- OECD. (2019). *Visualise Urbanisation in Africa* <http://africapolis.org/explore>.
- Oiro, S., Comte, J.-C., Soulsby, C., MacDonald, A. et Mwakamba, C. (2020). Depletion of groundwater resources under rapid urbanisation in Africa: recent and future trends in the Nairobi Aquifer

- System, Kenya. *Hydrogeology Journal*, 28(8), 2635-2656. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02236-5>
- Olmstead, S. M., Michael Hanemann, W. et Stavins, R. N. (2007, 2007/09/01/). Water demand under alternative price structures. *Journal of environmental economics and management*, 54(2), 181-198. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jeem.2007.03.002>
- Owen, R., Mirghani, M., Diene, M., Tuinhof, A. et Taylor, P. (2010). *Groundwater Management in IWRM.Training Manual*. Cap-Net, The Africa Groundwater Network (AGW-Net) and GW-MATE (Ground Water Management Advisory Team). <http://web.worldbank.org/website/external/topics/extwat>
- Ozer, P., Hountondji, Y. C. et De Longueville, F. (2017). Evolution récente du trait de côte dans le golfe du Bénin. Exemples du Togo et du Bénin. *Geo-Eco-Trop: Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Écologie Tropicales*, 41(3).
- Pappalardo, M. (2010). *Donner une valeur à l'environnement : la monétarisation, un exercice délicat mais nécessaire La Revue » du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD)*.
- Petit, O. (2004). La surexploitation des eaux souterraines : enjeux et gouvernance. *Natures Sciences Sociétés*, 12(2), 146-156. <https://doi.org/10.1051/nss:2004020>
- Pholkern, K., Saraphirom, P. et Srisuk, K. (2018, Aug 15). Potential impact of climate change on groundwater resources in the Central Huai Luang Basin, Northeast Thailand. *Sci Total Environ*, 633, 1518-1535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.300>
- PRRESAF. (2017). *Projet de Réduction des Risques Environnementaux et Sanitaires liés à l'Activité des Vendeurs d'Eau de Forage*.
- Pulido-Velazquez, M., Andreu, J., Sahuquillo, A. et Pulido-Velazquez, D. (2008). Hydro-economic river basin modelling: The application of a holistic surface-groundwater model to assess opportunity costs of water use in Spain. *Ecological Economics*, 66(1), 51-65. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.12.016>
- Pulido-Velazquez, M., Marques, G. F., Harou, J. J. et Lund, J. R. (2016). Hydroeconomic Models as Decision Support Tools for Conjunctive Management of Surface and Groundwater. Dans *Integrated Groundwater Management* (p. 693-710). https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_27.
- Quintana Ashwell, N. E., Peterson, J. M. et Hendricks, N. P. (2018). Optimal groundwater management under climate change and technical progress. *Resource and Energy Economics*, 51, 67-83. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2017.10.005>
- Rathay, S. Y., Allen, D. M. et Kirste, D. (2018). Response of a fractured bedrock aquifer to recharge from heavy rainfall events. *Journal of Hydrology*, 561, 1048-1062. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.042>
- Renzetti, S. (2002). *The economics of industrial water use*. Edward Elgar Publishing.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N. et Rafaj, P. (2011). RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109(1), 33-57.
- Richey, A. S., Thomas, B. F., Lo, M. H., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., Voss, K., Swenson, S. et Rodell, M. (2015, Jul). Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. *Water Resour Res*, 51(7), 5217-5238. <https://doi.org/10.1002/2015WR017349>
- Risbey, J. S., Monselesan, D. P., Black, A. S., Moore, T. S., Richardson, D., Squire, D. T. et Tozer, C. R. (2021). The identification of long-lived southern hemisphere flow events using archetypes and principal components. *Monthly Weather Review*, 149(6), 1987-2010.
- Rodella, A.-S., Zaveri, E. D. et Bertone, F. M. D. C. (2023). *The Hidden Wealth of Nations: The Economics of Groundwater in Times of Climate Change-Executive Summary*.

- Rodrigues, G. C., Paredes, P., Gonçalves, J. M., Alves, I. et Pereira, L. S. (2013). Comparing sprinkler and drip irrigation systems for full and deficit irrigated maize using multicriteria analysis and simulation modelling: Ranking for water saving vs. farm economic returns. *Agricultural Water Management*, 126, 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.05.005>
- Rosenberg, N. J., Epstein, D. J., Wang, D., Vail, L., Srinivasan, R. et Arnold, J. G. (1999, 1999/08/01). Possible Impacts of Global Warming on the Hydrology of the Ogallala Aquifer Region. *Climatic Change*, 42(4), 677-692. <https://doi.org/10.1023/A:1005424003553>
- Russo, T. A. et Lall, U. (2017). Depletion and response of deep groundwater to climate-induced pumping variability. *Nature Geoscience*, 10(2), 105-108. <https://doi.org/10.1038/ngeo2883>
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M. et Tarantola, S. (2008). Introduction to sensitivity analysis. *Global sensitivity analysis. The primer*, 1-51.
- Sawyer, D., Bourassa, Y. et Justason, A. (2001). *Évaluer nos environnements locaux. Projet sur l'évaluation des ressources : Document guide*. Dans M. d. I. e. d. Nouveau-Brunswick (dir.). Canada.
- Scanlon, B. R., Healy, R. W. et Cook, P. G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 18-39. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2>
- Schkade, D. A. et Payne, J. W. (1994). How people respond to contingent valuation questions: a verbal protocol analysis of willingness to pay for an environmental regulation. *Journal of environmental economics and management*, 26(1), 88-109.
- Schotting, R. (2009). Water, the intangible element.
- Slansky, M. (1959). *Contribution à l'étude géologique du bassin sédimentaire côtier du Dahomey et du Togo*. Université, Faculté des Sciences.
- Smerdon, B. D. (2017). A synopsis of climate change effects on groundwater recharge. *Journal of Hydrology*, 555, 125-128. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.047>
- Smith, V. K. et Desvousges, W. H. (1985). The Generalized Travel Cost Model and Water Quality Benefits: A Reconsideration. *Southern Economic Journal*, 52(2), 371-381. <https://doi.org/10.2307/1059623>
- Sophocleous, M. (2003). Environmental implications of intensive groundwater use with special regard to streams and wetlands. *Intensive use of groundwater: challenges and opportunities*, 93-112.
- Souza da Silva, G. N. et Alcoforado de Moraes, M. M. G. (2021). Decision Support for the (Inter-)Basin Management of Water Resources Using Integrated Hydro-Economic Modeling. *Hydrology*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/hydrology8010042>
- Sowter, A., Bin Che Amat, M., Cigna, F., Marsh, S., Athab, A. et Alshammari, L. (2016). Mexico City land subsidence in 2014–2015 with Sentinel-1 IW TOPS: Results using the Intermittent SBAS (ISBAS) technique. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 230-242. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.06.015>
- Stata. (2023). *Stepwise estimation*. Récupéré le 2023 de <https://www.stata.com/manuals13/rstepwise.pdf>
- Steward, D. R. et Allen, A. J. (2016). Peak groundwater depletion in the High Plains Aquifer, projections from 1930 to 2110. *Agricultural Water Management*, 170, 36-48. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.003>
- Stigter, T. Y., Ribeiro, L. et Dill, A. M. M. C. (2005). Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology Journal*, 14(1-2), 79-99. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0396-3>
- Swain, S., Taloor, A. K., Dhal, L., Sahoo, S. et Al-Ansari, N. (2022). Impact of climate change on groundwater hydrology: a comprehensive review and current status of the Indian hydrogeology. *Applied Water Science*, 12(6). <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01652-0>
- Taniguchi, M. (2011). *Groundwater and subsurface environments : human impacts in Asian coastal cities*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-53904-9>

- Taylor, K. E., Stouffer, R. J. et Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American meteorological Society*, 93(4), 485-498.
- Taylor, R. G., Koussis, A. D. et Tindimugaya, C. (2009). Groundwater and climate in Africa—a review. *Hydrological Sciences Journal*, 54(4), 655-664. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.4.655>
- Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J. S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T. R., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M. F. P., MacDonald, A., Fan, Y., Maxwell, R. M., Yechieli, Y., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Shamsudduha, M., Hiscock, K., Yeh, P. J. F., Holman, I. et Treidel, H. (2012). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3(4), 322-329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>
- Team, T. W. B. W. D. R. (1993). The Demand for Water in Rural Areas: Determinants and Policy Implications. *The World Bank Research Observer*, 8(1).
- Tellam, J. H., Rivett, M. O. et Israfilov, R. G. (2006). Towards management and sustainable development of urban groundwater systems. Dans *Urban Groundwater Management and Sustainability* (p. 1-9). Springer.
- TFEUDFD. (1969). Effect of Urban Development on Flood Discharge-Current Knowledge and Future-Needs. *Journal of the Hydraulics Division*, 95(1), 287-310. <https://doi.org/https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001940>
- Thorntwaite, C. W. et Mather, J. R. (1955). The water budget and its use in irrigation. Dans *Water: The Yearbook of Agriculture* (p. 346–358). U. S. Department of Agriculture.
- Thorntwaite, C. W. et Mather, J. R. (1957). *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*.
- Totin, V. S. H. (2009). *Assessment of global change impacts on groundwater in the coastal sedimentary basin of Benin (West Africa)*.
- UN. (2018). *Sustainable Development Goal 6 Synthesis Report on Water and Sanitation*. U. Nations.
- UNWater. (2021). *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2021 : la valeur de l'eau*. U. Nations.
- USGS. (2021). *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*. Sioux Falls, SD, USA : USGS.
- Vaessen, V. et Brentführer, R. (2015). *L'intégration de la gestion des eaux souterraines pour les Organismes de Bassins Transfrontaliers en Afrique - Module 11*. Dans BGR (dir.), : BGR.
- van Rooyen, J. D., Watson, A. P. et Miller, J. A. (2020). Combining quantity and quality controls to determine groundwater vulnerability to depletion and deterioration throughout South Africa. *Environmental Earth Sciences*, 79(11). <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08998-1>
- Vázquez-Suñé, E., Sánchez-Vila, X. et Carrera, J. (2005). Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain. *Hydrogeology Journal*, 13(3), 522-533.
- Vrba, J. et Zaporozec, A. (1994). *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability—IAH International Contributions to Hydrogeology* (H. Publication, dir. vol. 16).
- Vrzel, J., Ludwig, R., Gampe, D. et Ogrinc, N. (2019, Feb 1). Hydrological system behaviour of an alluvial aquifer under climate change. *Sci Total Environ*, 649, 1179-1188. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.396>
- Wada, Y., Van Beek, L. P., Van Kempen, C. M., Reckman, J. W., Vasak, S. et Bierkens, M. F. (2010). Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters*, 37(20).
- Wakida, F. T. et Lerner, D. N. (2005, Jan). Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study. *Water Res*, 39(1), 3-16. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.07.026>
- Ward, F. A. et Pulido-Velázquez, M. (2008). Efficiency, equity, and sustainability in a water quantity–quality optimization model in the Rio Grande basin. *Ecological Economics*, 66(1), 23-37. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.08.018>

- Werner, A. D., Bakker, M., Post, V. E., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C. T. et Barry, D. A. (2013). Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*, 51, 3-26.
- Whittington, D. (1992). Possible Adverse Effects of Increasing Block Water Tariffs in Developing Countries. *Economic Development and Cultural Change*, 41(1), 13.
- Whittington, D. (1998). Administering contingent valuation surveys in developing countries. *World Development*, 26(1), 10.
- Whittington, D. (2002). Improving the Performance of Contingent Valuation Studies in Developing Countries. *Environmental and Resource Economics*.
- Whittington, D., Briscoe, J., Mu, X. et Barron, W. (1990). Estimating the Willingness to Pay for Water Services in Developing Countries: A Case Study of the Use of Contingent Valuation Surveys in Southern Haiti. *Economic Development and Cultural Change*, 38(2), 293-311.
- Whittington, D., Choe, K. et Lauria, D. (1997). The Effect of Giving Respondents "Time to Think" on Tests of Scope: An Experiment in Calamba, Philippines. In: Kopp R.J., Pommerehne W.W., Schwarz N. (eds) *Determining the Value of Non-Marketed Goods. Studies in Risk and Uncertainty*, 10.
- Whittington, D. et Cook, J. (2018). Valuing Changes in Time Use in Low- and Middle-Income Countries. *Journal of Benefit-Cost Analysis*, 10(S1), 51-72. <https://doi.org/10.1017/bca.2018.21>
- Whittington, D., Smith, K., Okorafor, A., Okore, A., Lui, J. L. et McPhail, A. (1992). Giving respondents time to think in contingent valuation studies: A developing country application. *Journal of environmental economics and management*, 22(3).
- Wilson, M. A. et Hoehn, J. P. (2006). Valuing environmental goods and services using benefit transfer: The state-of-the art and science. *Ecological Economics*, 60(2), 335-342. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.08.015>
- WPR. (2020). *Median Income by Country 2024*. World Population Review. Récupéré le 2025/01/30 de <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/median-income-by-country>
- Young, R. et Loomis, J. (2014). *Determining the Economic Value of Water Concepts and Methods*. Routledge. <https://doi.org/https://doi.org/10.4324/9780203784112>
- Yüceer, H., Baba, A., Gönülal, Y. Ö., Uştuk, O., Gerçek, D., Güler, S. et Uzelli, T. (2021). Valuing Groundwater Heritage: the Historic Wells of Kadiovacık. *Geoheritage*, 13(4). <https://doi.org/10.1007/s12371-021-00625-0>