

Evaluation de la vulnérabilité intrinsèque de la nappe superficielle du plateau d'Allada et de sa plaine côtière à la pollution par les méthodes DRASTIC et GOD

Lassa Tossou

Chaire International de Physique Mathématiques et Applications (CIPMA)
de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC), Bénin
Ministère de l'Energie, de l'Eau et des Mines (MEEM)

Yalo Nicaise

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA) Institut National de l'Eau (INE)

Sambienou Wèré Gédéon

Chaire International de Physique Mathématiques et Applications (CIPMA)
de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC), Bénin

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA) Institut National de l'Eau (INE)

Alassane Abdoukarim

Afouda Abel

Mama Daouda

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA) Institut National de l'Eau (INE)

Approved: 22 September 2026

Posted: 24 September 2026

Copyright 2026 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Lassa, T., Yalo, N., Sambienou, W.G., Alassane, A., Afouda, A., & Mama, D. (2026).

Evaluation de la vulnérabilité intrinsèque de la nappe superficielle du plateau d'Allada et de sa plaine côtière à la pollution par les méthodes DRASTIC et GOD. ESI Preprints.

<https://doi.org/10.19044/esipreprint.9.2026.p871>

Résumé

L'évaluation de la vulnérabilité des nappes phréatiques constitue un enjeu majeur dans les régions où les pressions anthropiques, la croissance démographique et les dynamiques d'occupation du sol augmentent les risques de contamination. Cette étude analyse la vulnérabilité de l'aquifère superficiel du plateau d'Allada et de sa plaine côtière à l'aide des méthodes DRASTIC et GOD. Les paramètres hydrogéologiques, la dynamique de l'occupation du sol et la profondeur de la nappe ont été mobilisés pour produire des cartes de vulnérabilité. Les résultats montrent une vulnérabilité variant de faible à élevée selon les secteurs, avec une concordance globale

entre les deux méthodes. Les résultats obtenus ont permis de montrer que l'aquifère superficielle étudié est de vulnérabilité élevée à faible avec la classe de vulnérabilité faible (45 %), vulnérabilité modérée (35 %) et la classe de vulnérabilité élevée (20 %). Les zones les plus vulnérables sont localisées dans la zone de Ouidah ; Abomey-Calavi ; au nord de la commune d'Allada et au nord-ouest au niveau des limites du département du Couffo puis à l'est de la commune de Zè (Indices de vulnérabilité variant entre 153 et 200). La validation par les teneurs en nitrates confirme la pertinence des classifications obtenues. L'étude offre un outil d'aide à la décision pour orienter les aménagements, la gestion durable des ressources en eau et les mesures de protection des zones les plus sensibles.

Mots-clés : Vulnérabilité, DRASTIC, GOD, nappe phréatique, pollution, plateau d'Allada

Assessment of the Intrinsic Vulnerability of the Shallow Aquifer in the Allada Plateau and Coastal Plain to Contamination Using DRASTIC and GOD Methods

Lassa Tossou

International Chair in Mathematical Physics and Applications
(CIPMA) at the University of Abomey-Calavi (UAC), Benin
Ministry of Energy, Water and Mines (MEEM)

Yalo Nicaise

Laboratory of Applied Hydrology (LHA), National Water Institute (INE)

Sambienou Wèré Gédéon

International Chair in Mathematical Physics and Applications
(CIPMA) at the University of Abomey-Calavi (UAC), Benin
Laboratory of Applied Hydrology (LHA), National Water Institute (INE)

Alassane Abdoukarim

Afouda Abel

Mama Daouda

Laboratory of Applied Hydrology (LHA), National Water Institute (INE)

Abstract

Assessing groundwater vulnerability is a major challenge in regions where anthropogenic pressures, population growth, and land-use dynamics increase the risk of contamination. This study analyzes the vulnerability of the shallow aquifer of the Allada Plateau and its coastal plain using the DRASTIC and GOD methods. Hydrogeological parameters, land-use

dynamics, and groundwater depth were used to generate vulnerability maps. The results show vulnerability ranging from low to high depending on the sector, with overall agreement between the two methods. The results obtained demonstrate that the shallow aquifer under study exhibits vulnerability ranging from high to low, with 45% classified as low vulnerability, 35% as moderate vulnerability, and 20% as high vulnerability. The most vulnerable areas are located in the Ouidah area; Abomey-Calavi; north of the municipality of Allada and northwest at the boundaries of the Couffo department; and east of the municipality of Zè (vulnerability indices ranging from 153 to 200). Validation based on nitrate concentrations confirms the validity of the classifications obtained. The study provides a decision-making tool to guide development planning, sustainable water resource management, and protective measures for the most sensitive areas.

Keywords: Groundwater vulnerability, DRASTIC, GOD, pollution, Allada Plateau

Introduction

La protection des eaux souterraines constitue aujourd'hui un enjeu majeur de développement durable, en raison de leur rôle essentiel dans l'approvisionnement en eau potable, l'agriculture, l'industrie et le maintien des écosystèmes. Ces ressources présentent toutefois une vulnérabilité particulière, car les processus naturels de renouvellement et d'autoépuration des aquifères sont généralement lents. Ainsi, une contamination, même localisée, peut persister pendant plusieurs décennies et entraîner des conséquences économiques, sanitaires et environnementales difficilement réversibles (Freeze & Cherry, 1979 ; Foster, 1987 ; Vrba & Zaporozec, 1994 ; UNESCO, 2022).

Au Bénin, cette problématique revêt une importance particulière dans le Bassin Sédimentaire Côtier (BSC) où les aquifères du Continental Terminal constituent la principale source d'alimentation en eau des populations. Les travaux pionniers de Boukari (1996, 1998, 2007) ont permis de mettre en évidence le fonctionnement hydrodynamique et hydrogéochimique de ces aquifères, notamment ceux exploités sur le Plateau d'Allada et dans la ville de Cotonou. Ces études montrent que l'urbanisation, l'intensification des activités agricoles, les prélèvements croissants ainsi que les modifications de l'occupation des terres exercent une pression de plus en plus importante sur la qualité et la disponibilité des eaux souterraines.

Dans cette perspective, la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères constitue l'une des approches les plus pertinentes pour orienter les politiques de protection des ressources en eau. Elle permet d'identifier les secteurs naturellement les plus sensibles à l'infiltration des contaminants à

partir des caractéristiques hydrogéologiques du milieu, indépendamment de la nature des polluants (Vrba & Zaporozec, 1994 ; Civita & De Maio, 2004). Les cartes produites constituent ainsi des outils d'aide à la décision pour la gestion des territoires, l'implantation des ouvrages hydrauliques, la protection des périmètres de captage et la planification des activités susceptibles d'affecter la qualité des eaux souterraines.

Depuis les travaux fondateurs de Foster (1987) et d'Aller et al. (1987), plusieurs méthodes de cartographie de la vulnérabilité ont été proposées. Elles reposent sur des approches paramétriques, des analyses multicritères, des méthodes statistiques ou encore des modèles numériques (Civita, 1994 ; Gogu & Dassargues, 2000). Parmi celles-ci, les méthodes paramétriques demeurent les plus utilisées en raison de leur simplicité d'application, de leur faible exigence en données et de leur aptitude à être mises en œuvre dans les pays où les informations hydrogéologiques restent parfois limitées.

Les méthodes GOD et DRASTIC figurent parmi les modèles de référence pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères. La méthode GOD, proposée par Foster (1987), repose sur le degré de confinement de l'aquifère, la lithologie de la couverture et la profondeur de la nappe, tandis que la méthode DRASTIC (Aller et al., 1987) prend en compte sept paramètres hydrogéologiques contrôlant les mécanismes de transfert des polluants. Leur utilisation conjointe offre une évaluation plus robuste de la vulnérabilité intrinsèque en confrontant deux approches complémentaires, ce qui améliore la fiabilité de l'identification des secteurs prioritaires pour les actions de protection.

Cette démarche est particulièrement pertinente dans le contexte du Plateau d'Allada, reconnu comme l'un des principaux réservoirs stratégiques d'eau souterraine du bassin sédimentaire côtier béninois (Boukari, 1996 ; Boukari & Alassane, 2007 ; Alassane et al., 2015). Ces études montrent d'ailleurs que les aquifères côtiers béninois nécessitent une surveillance renforcée afin de préserver durablement leur qualité face aux pressions anthropiques croissantes et aux effets des changements globaux.

C'est dans cette optique que la présente étude se propose de cartographier la vulnérabilité intrinsèque de la nappe superficielle du Plateau d'Allada et de sa plaine côtière à l'aide des méthodes GOD et DRASTIC. Les résultats attendus fourniront des informations scientifiques utiles à la planification territoriale, à la protection des zones de recharge et à la gestion durable des eaux souterraines. Ils contribueront également à soutenir les politiques publiques mises en œuvre par le Gouvernement du Bénin pour accélérer l'accès universel à l'eau potable, en cohérence avec l'Objectif de Développement Durable n°6 des Nations Unies (ONU, 2015 ; UNESCO, 2022).

Milieu d'étude

D'une altitude de 100 m en moyenne (Adam et Boko, 1993), le plateau d'Allada est situé dans le département de l'Atlantique (**Figure 1**). Il est limité au nord par le département du Zou, à l'est par le département de l'Ouémé, au sud par le département du Littoral et la commune de Ouidah, et à l'ouest par les départements du Mono et du Couffo. Le plateau d'Allada se situe entre les coordonnées UTM 390000 à 450000 de longitude est et de 700000 à 750000 de latitude nord. Il couvre une superficie d'environ 2140 Km², soit plus de 66 % de la superficie totale du Département de l'Atlantique (Dissou, 1986).

Le climat est de type subéquatorial, alternant deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches. Les précipitations annuelles varient en moyenne entre 735 mm et 1 750 mm, tandis que les températures tournent autour de 27–28 °C.

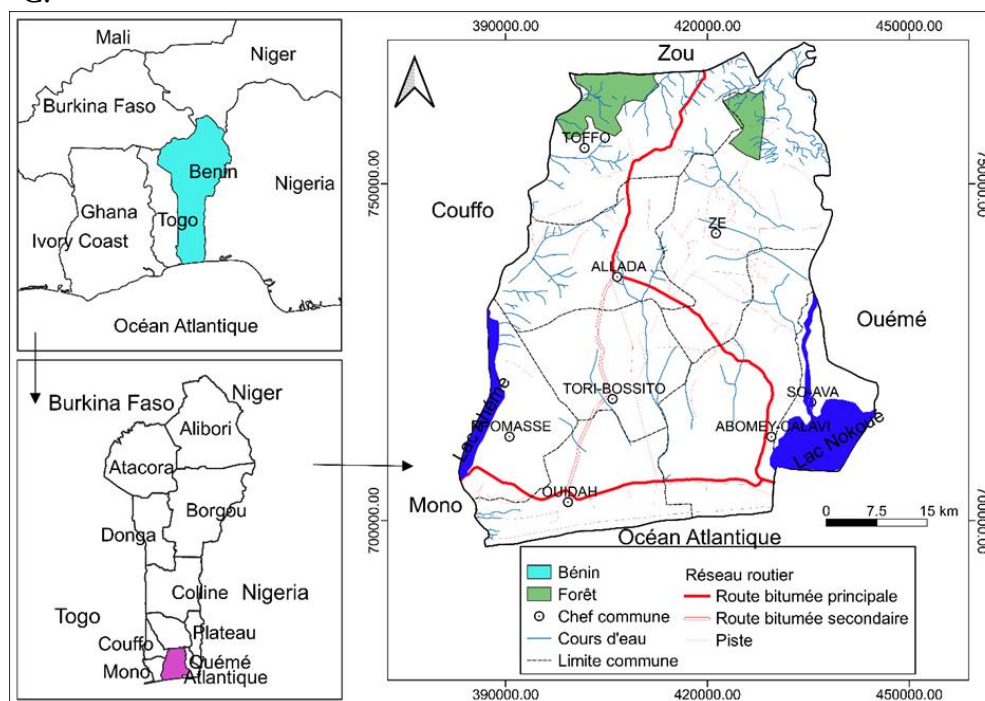


Figure 1 : Situation géographique du Plateau d'Allada et de sa plaine littorale

Le plateau étudié appartient au bassin sédimentaire côtier du Bénin, qui présente une structure monoclinale, c'est-à-dire des couches géologiques légèrement inclinées vers le sud-sud-est. Les formations les plus importantes sont celles du Continental Terminal, d'âge miocène à pliocène. Elles sont constituées essentiellement de : sables, argiles, sables argileux, niveaux conglomératiques localisés (Djekounou *et al.*, 2020).

Sur le plan hydrogéologique, le bassin sédimentaire côtier renferme quatre principaux aquifères : l'aquifère du Continental Terminal ; l'aquifère du Crétacé supérieur ; l'aquifère du Quaternaire ; l'aquifère du Paléocène (Akakpo *et al.*, 2021).

L'aquifère du Continental Terminal est le plus important et le plus exploité sur le plateau. Il s'agit généralement d'un aquifère à nappe libre, alimenté principalement par l'infiltration des eaux de pluie. Son niveau piézométrique devient de plus en plus profond du sud vers le nord du plateau. Les champs de captage les plus importants, comme Godomey, Ouèdo et Tori, exploitent cet aquifère pour alimenter l'agglomération de Cotonou et ses environs.

Matériel et méthodes

Les données mobilisées dans le cadre de cette étude comprennent les données collectées sur le terrain et celles extraites des bases de données existantes. Elles concernent les fiches renseignant sur les valeurs piézométriques issues des forages existants ainsi que les logs stratigraphiques ; les données pédologiques issues de l'IGN ; les images satellitaires Landsat (5 TM ; 7ETM+ et 8) pour les analyses d'occupation du sol ; les données de transmissivité, porosité et conductivité hydraulique extraites des travaux antérieurs et de la base de données de la DGEau.

La vulnérabilité met l'accent sur le comportement des polluants potentiels, la capacité de dispersion et d'épuration des sols, la qualité du système hydrique, la typologie de l'occupation du sol, les points sensibles ainsi que l'intrusion d'eau de mer. La présente étude porte sur l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines à l'échelle du Plateau d'Allada et de sa plaine côtière.

Ainsi, le terme de « vulnérabilité des aquifères » est appréhendé sous deux angles :

- la vulnérabilité intrinsèque, qui repose sur les conditions physiques du milieu naturel ;
- la vulnérabilité spécifique, qui intègre non seulement les paramètres naturels, mais également les propriétés des contaminants et la nature des activités anthropiques

En effet, la vulnérabilité intrinsèque des aquifères correspond à leur sensibilité naturelle à la contamination, déterminée exclusivement par les conditions géologiques, hydrogéologiques et pédologiques du milieu. Elle exprime la capacité du système sol, zone non saturée, aquifère à atténuer ou à favoriser le transfert des contaminants vers les eaux souterraines, indépendamment des caractéristiques des polluants et des pressions anthropiques.

La méthode GOD (Foster, 1987), la méthode SI (Schnebelen *et al.*, 2002) ainsi que bien d'autres méthodes existent pour la cartographie de la vulnérabilité. Diverses raisons peuvent motiver le Choix d'une méthode par rapport à une autre.

Dans la présente étude, deux méthodes différentes, mais complémentaires ont été utilisées. Il s'agit de :

- **La méthode DRASTIC** (Depth to Water, Recharge, Aquifer Media, Soil Media, Topography, Impact of Vadose Zone, and Conductivity) évaluant la vulnérabilité intrinsèque en se penchant sur un ensemble plus large de facteurs, y compris la conductivité hydraulique des aquifères, la topographie, la nature des sols et des formations géologiques, et la recharge efficace de l'aquifère ;
- **La méthode GOD** (Groundwater occurrence, Overall impact of the vadose zone, Depth to water, and net recharge). Cette méthode met l'accent sur la présence des eaux souterraines, l'impact global de la zone non saturée (Vadose zone), la profondeur de la nappe phréatique et la recharge nette. Elle évalue principalement la probabilité d'exposition des eaux souterraines à la contamination.

En combinant ces deux méthodes, on peut obtenir une évaluation plus complète de la vulnérabilité des eaux souterraines. La méthode GOD se concentre sur des paramètres relatifs à la qualité de l'eau, comme la profondeur de la nappe et la recharge, tandis que la méthode DRASTIC prend en compte des paramètres relatifs à la quantité d'eau et à la mobilité des polluants. Combiner ces deux approches peut aider à identifier les zones où les eaux souterraines sont à la fois exposées à des polluants potentiels (selon GOD) et susceptibles de subir une contamination (selon DRASTIC).

Ce choix a été pris en suivant les conditions que nous avons jugées utiles de considérer que voici :

- les informations disponibles dans les bases de données ou recueillies au cours des travaux de terrains sont relatives aux paramètres utilisés par ces méthodes ;
- la méthode DRASTIC est la plus utilisée pour la réalisation des cartes de vulnérabilité ce qui signifie qu'elles bénéficient d'un historique de succès ; elle est standardisée et prend en compte beaucoup de paramètres ;
- la facilité d'utilisation : Les méthodes DRASTIC et GOD sont relativement simples à utiliser, car elles se basent sur des paramètres facilement accessibles tels que la profondeur de la nappe phréatique, la recharge nette, la nature des formations géologiques, etc. Cela les rend accessibles même aux non-spécialistes ;

- **Adaptabilité** : Ces méthodes peuvent être adaptées aux conditions locales en utilisant des données spécifiques à la région, ce qui les rend pertinentes pour une variété de contextes hydrogéologiques.

Les deux méthodes ne tiennent pas compte des caractéristiques physico-chimiques propres à un contaminant. Ces caractéristiques sont considérées comme équivalentes à celles de l'eau. On obtient des cartes de vulnérabilité intrinsèque, c'est-à-dire liée aux caractéristiques naturelles du sol et du sous-sol (Alassane, 2004).

La méthodologie y relative se décline en quatre (4) étapes :

- a) la détermination des paramètres et l'attribution des notes ;
- b) l'élaboration de la hiérarchisation ;
- c) la pondération des critères et des paramètres ;
- d) le calcul de l'indice de vulnérabilité.

En effet, la méthode DRASTIC selon Aller et al., (1987), repose sur sept paramètres pondérés :

- a) **D** – profondeur de la nappe
- b) **R** – recharge efficace
- c) **A** – nature de l'aquifère
- d) **S** – sol
- e) **T** – topographie
- f) **I** – zone non saturée
- g) **C** – conductivité hydraulique

L'indice DRASTIC est calculé selon le modèle suivant :

$$ID = Dp \cdot Dc + Rp \cdot Rc + Ap \cdot Ac + Sp \cdot Sc + Tp \cdot Tc + Ip \cdot Ic + Cp \cdot Cc$$

(Où **D**, **R**, **A**, **S**, **T**, **I**, et **C** les sept paramètres de la méthode DRASTIC, **p** étant le poids du paramètre et **c**, la côte associée).

Les cotations et pondérations utilisées se basent sur le tableau normalisé de la méthode DRASTIC (voir annexe). La méthode GOD (Foster, 1987) quant à elle a permis d'évaluer trois paramètres :

- a) **G** : Groundwater occurrence : type de nappe (libre, semi-captive, captive)
- b) **O** : Overall lithology : lithologie de la zone non saturée
- c) **D** : Depth to water table : profondeur de la nappe

L'indice est donné par :

$$I = Cg \times Co \times Cd$$

Pour chaque paramètre, une carte a été élaborée. Une note (variant de 1 à 10 pour DRASTIC et de 0 à 1 pour GOD) est attribuée à chaque intervalle. Les paramètres de vulnérabilité identifiés sont les suivants :

- **Profondeur de la surface de la nappe** : Pour ce paramètre, il a été utilisé les niveaux statiques mesurées lors d'une campagne allant de la période du 17 au 20 Avril 2023. La profondeur de la nappe correspond à la distance verticale entre la surface du sol et le toit de

l'aquifère. Ce paramètre joue un rôle essentiel dans l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque, car plus la nappe est proche de la surface, plus elle est exposée à une contamination rapide. Les données de niveaux statiques issues des 64 points mesurés ont été utilisées pour déterminer ce paramètre. L'interpolation spatiale de ces données dans ArcGis a permis d'élaborer la carte thématique correspondante. Une note comprise entre 1 et 10 pour DRASTIC et de 0 à 1 pour GOD a été attribuée aux différentes classes de profondeur. Ces mêmes données ont été utilisées pour la méthode GOD

- **Recharge efficace** : Elle correspond à la quantité totale d'eau atteignant la surface piézométrique. Les données climatiques de la station de Cotonou ont permis l'estimation de la recharge moyenne annuelle de 1979 à 2008 par la méthode de Thornthwaite. La recharge a été estimée à partir de l'équation suivante Teixeira (1978):

$$P = ETR + R + IW + LW$$

- **P (Précipitations)** : La quantité totale d'eau tombée sous forme de pluie ou de neige sur une surface ou un bassin versant durant une période donnée ;
- **ETR (Évapotranspiration Réelle)** : La quantité d'eau qui retourne vers l'atmosphère sous forme de vapeur, combinant l'évaporation directe du sol et la transpiration des végétaux ;
- **R (Ruissellement)** : La quantité d'eau qui s'écoule en surface vers les cours d'eau sans s'infiltrer dans le sol (souvent noté Runoff) ;
- **IW (Infiltration Water)** : L'eau d'infiltration qui pénètre verticalement dans le sol ;
- **LW (Loss Water / Leachate Water / Lateral Water)** : Selon le contexte spécifique du modèle employé, ce terme désigne : Les pertes d'eau latérales (Lateral Water / Lateral Flow) ou infiltrations profondes hors du système. Les eaux de lixiviation / lixiviats (Leachate Water) dans le cas spécifique des calculs appliqués aux centres de stockage des déchets. Les variations de stock d'eau accumulée (Water Storage Change) parfois abrégées en ΔW ou (ΔW) .
- **Milieu aquifère & Impact de la zone non saturée (I)** : La zone non saturée correspond à la portion du sol comprise entre la surface du terrain et le toit de l'aquifère. La texture et la nature lithologique de cette zone conditionnent le temps de transfert des contaminants vers la nappe. La cotation numérique de ces deux paramètres est faite à partir des cartes géologiques et surtout des coupes de forages des projets d'hydrauliques villageoises. Les notes attribuées à ces formations, en fonction de leur texture, sont respectivement 6 et 8

(milieu aquifère) ; 3, 4, 6 et 8 (Impact de la zone non saturée). Contrairement à la méthode DRASTIC, des indices respectifs allant de 0 ; 4 à 0,8 ont été identifier (Milieu aquifère) ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4 et 0,7 (Zone non saturée) pour GOD.

- **Type de sol (S) :** La carte pédologique du Sud du Bénin, réalisée par Volkoff (1970) a permis de distinguer les types de sol et leur attribuer des côtes numériques. Les caractéristiques du sol contrôlent les mouvements verticaux des contaminants et influencent leur atténuation avant d'atteindre la nappe. Les principaux types de sols identifiés sont les sols peu évolués, les sols ferralitiques, les sols ferrugineux et les sols hydromorphes. Les notes attribuées à ces sols tiennent compte de leur capacité de rétention d'eau et de leurs propriétés physiques. Elles sont respectivement 1, 3, 4, 5, 6, 7 et 9.
- **Pente de terrain :** La carte des pentes et celle des indices sont générées à partir des cartes topographiques au 1/200 000 (Feuilles de Cotonou-Abomey-Porto-Novo), la seule échelle existante dans notre zone d'étude. La topographie influence la probabilité de ruissellement ou d'infiltration des eaux à la surface du sol. Les zones à faible pente favorisent l'infiltration, tandis que les fortes pentes accentuent le ruissellement. Ce paramètre a été dérivé du modèle numérique de terrain (MNT) issu des données SRTM de résolution 30m, à partir duquel les classes de pente ont été établies et notées selon le système de classification adopté.
- **Conductivité hydraulique :** Les rapports de pompage d'essais des projets d'hydrauliques villageoises nous ont fournis des informations relatives aux transmissivités. Ces dernières ont été traitées pour générer une carte de coefficients de perméabilité, source de cotation numérique. La conductivité hydraulique exprime l'aptitude du milieu aquifère à permettre la circulation de l'eau à travers ses pores ou fissures. Elle traduit la vitesse de propagation des substances dissoutes dans le milieu.

La validation des cartes de vulnérabilité constitue une étape essentielle pour apprécier la fiabilité des résultats issus des approches DRASTIC et GOD. Dans la présente étude, cette validation a été réalisée à partir des concentrations en nitrates (NO_3^-) mesurées dans les eaux souterraines. Ce choix se justifie par le caractère particulièrement pertinent des nitrates comme indicateur de contamination anthropique des aquifères superficiels. Leur présence dans les eaux souterraines peut notamment être associée aux apports agricoles, aux rejets domestiques, aux dispositifs d'assainissement autonomes et à l'infiltration des effluents issus des activités humaines. Dans le contexte du sud du Bénin, cette approche est d'autant plus pertinente qu'Agossou & Yang (2021) ont montré que les concentrations en

nitrates pouvaient être utilisées pour valider les cartes de vulnérabilité des eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier méridional. Leur comparaison de plusieurs méthodes, dont DRASTIC, DRASTIC intégrant l'occupation du sol et l'indice de vulnérabilité souterraine, montre que l'introduction des facteurs anthropiques améliore la capacité des modèles à identifier les secteurs effectivement exposés à la contamination. Plus particulièrement, la méthode DRASTIC pondérée par l'entropie et intégrant l'occupation du sol présentait la meilleure corrélation avec les concentrations en nitrates. Ainsi, 45 échantillons d'eau ont été prélevés dans la zone d'étude pour la validation de ces différentes cartes de validation.

Résultats et discussion

Carte des indices de vulnérabilité

La combinaison des cartes indicielles ont permis suivant chaque méthode d'obtenir les cartes de vulnérabilité suivant DRASTIC et GOD. La **Figure 2** présente la carte de vulnérabilité suivant la méthode DRASTIC. L'analyse de cette figure montre que l'aquifère de la plaine littorale est dans l'ensemble plus vulnérable à la pollution que celui du plateau.

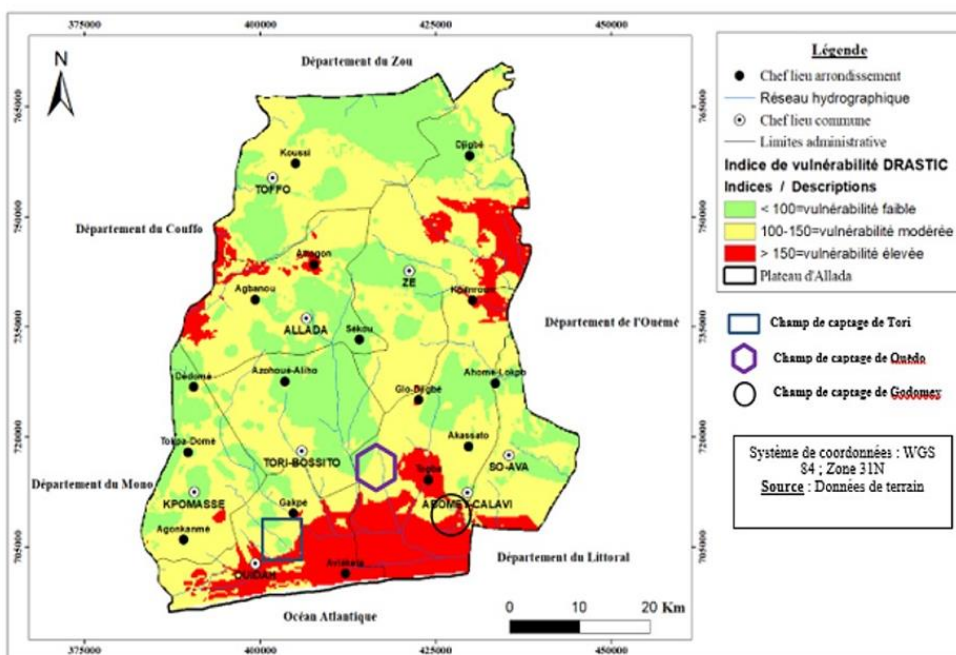


Figure 2 : Carte de vulnérabilité DRASTIC

Dans la plaine littorale, la vulnérabilité de la nappe à la pollution est plus élevée dans les cordons externes et médians de sables bruns et gris que dans les cordons de sables jaunes et les marécages. L'aquifère supérieur du plateau d'Allada est plus vulnérable à la pollution dans ses parties sud, Nord-

Nord-est et Nord-Ouest. Cette vulnérabilité diminue vers le Nord, le Sud-Est et le Sud-Ouest en passant par le centre du plateau.

En effet, l'aquifère du plateau d'Allada est caractérisé par les indices les plus bas allant de 95 à 200. Le secteur regroupant l'extrême sud, le Sud-Est, l'Est et le Nord-Est présente des indices de vulnérabilité de 153 à 200 ; le reste du plateau est dominé par ceux de 129 à 153.

En résumé, trois classes principales se dégagent : la classe de vulnérabilité élevée représentant 20% de la zone d'étude est caractérisée majoritairement par des formations sableuses de la plaine littorale ; la classe de vulnérabilité modérée représentant 35 % puis la classe de vulnérabilité faible représentant 45 % de la zone d'étude majoritairement représentée dans la partie nord caractérisée par des formations beaucoup plus argileuses.

Quant à la méthode de GOD représentée par la **Figure 3**, elle montre une nette distribution spatiale des indices. Le plateau d'Allada est presque entièrement caractérisé par des valeurs moyennes d'indice de vulnérabilité GOD variant de 0,3 à 0,5. Au Sud-Ouest ; Nord-ouest et Sud-Est, nous avons les localités de Kpomassè, Allada, la partie centrale de Abomey-Calavi qui sont définies par des valeurs moyennes d'indices GOD faible (0,1 à 0,3). Elle se retrouve aussi au Nord à Toffo en formant un filon en quittant le centre du plateau. Dans la plaine littorale, les valeurs les plus élevées de l'indice GOD (0,5 à 0,7) se rencontrent au Sud-Est de la commune de Ouidah en quittant Avlékété. Elles se disposent de manière dispersée sur toute l'étendue du plateau en petite portion quasi-négligeable.

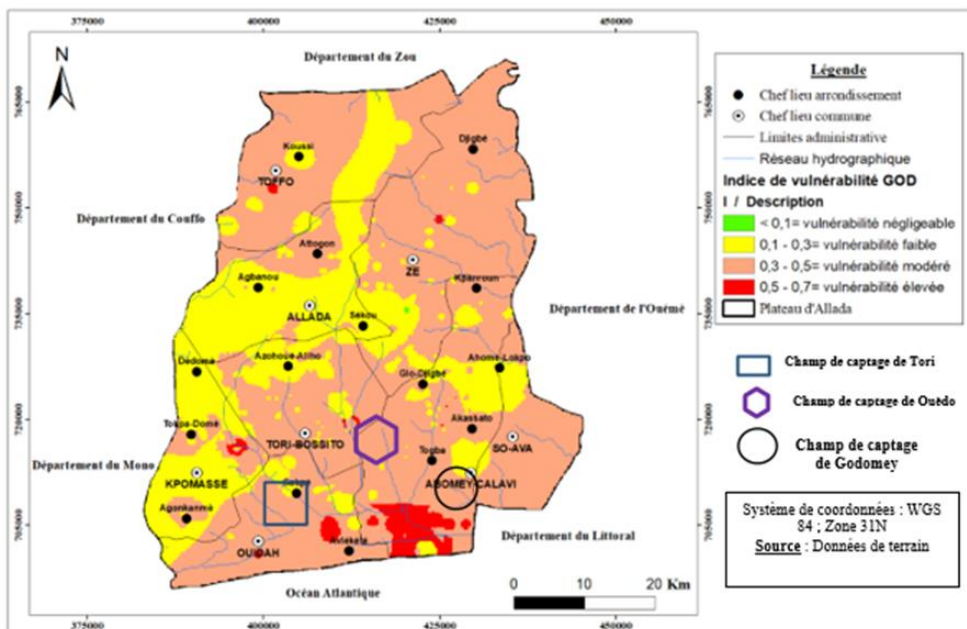


Figure 3 : Carte de vulnérabilité GOD

La distribution spatiale des valeurs d'indice GOD est influencée par l'épaisseur de la zone non saturée et sa nature lithologique déterminant le type de la nappe. Dans la zone basse littorale, c'est la variation spatiale de la profondeur de la surface piézométrique qui explique celle de l'indice GOD. En effet, les niveaux statiques sont plus faibles au Sud ($NS < 2$ m) que vers l'Est et le Nord où ils atteignent 5 m dans les sols limono-argileux. Sur le plateau, c'est plutôt la constitution de la zone non saturée et surtout sa granulométrie qui influence beaucoup la répartition spatiale des indices GOD. La répartition spatiale des valeurs d'indice GOD permet de conclure que la nappe superficielle de la plaine littorale est plus vulnérable à la pollution que celle du plateau.

En résumé, Les résultats obtenus par chacune des méthodes ont été analysés en fonction de la répartition des valeurs d'indices sur la carte (**Tableau I**), mais il est également intéressant de comparer les cartes entre elles. Il s'agit d'une comparaison de surface qui permet de voir, par le biais de recoupement de surface, dans quelle mesure les cartes diffèrent les unes des autres et les zones où les indices diffèrent. Pour ce faire, nous avons dans un premier temps effectué des regroupements d'indices calculés en respectant l'échelle de vulnérabilité de chaque méthode. Pour la méthode GOD, les deux premières classes de faibles indices ont été regroupées pour obtenir trois classes comme la carte des indices DRASTIC ; ce qui permet de voir la concordance des deux cartes.

Tableau I : Tableau comparative des indices DRASTIC et GOD

DRASTIC		GOD	
Classe d'indice	Degré de vulnérabilité	Classe d'indice	Degré de vulnérabilité
< 100	Faible	0 - 0,3	Négligeable à faible
100-150	Modéré	0,3 - 0,5	Modéré
>150	Elevé	0,5 - 0,7	Elevé

L'analyse suivant le regroupement d'indice du tableau montre que les deux cartes concordent pratiquement par endroit où les plages d'indice indiquent un degré de vulnérabilité faible et modéré. Sur le plateau, on note un décalage d'une classe d'indice entre les deux méthodes. En effet, pour la méthode GOD, toute l'étendue du plateau est caractérisée par la classe d'indice (0,3 - 0,5) lui attribuant une vulnérabilité modérée. Mais les résultats de la méthode DRASTIC confèrent à tout le plateau un degré de vulnérabilité faible à modéré.

La méthode GOD sous-évalue donc la vulnérabilité de l'aquifère du plateau par rapport à la méthode DRASTIC. Les effets de l'évaluation de la recharge, de la perméabilité de l'aquifère et du type de sol dans la méthode DRASTIC expliqueraient cette variation sur le plateau puisque la méthode GOD ne prend pas en compte ces paramètres. Ils ont contribué à rehausser les valeurs des indices DRASTIC sur le plateau.

En résumé, sur notre zone d'étude les indices DRASTIC calculés varient entre 93 et 200 avec une valeur moyenne de 137,23. Les valeurs les plus élevées sont obtenues dans la zone de Ouidah ; Abomey-Calavi ; au nord de la commune d'Allada et au nord-ouest au niveau des limites du département du Couffo puis à l'est de la commune de Zè entre 153 et 200.

La traduction de ces indices selon la classification proposée dans la méthodologie permet d'obtenir trois classes de vulnérabilité que sont :

- la classe de vulnérabilité faible dont $95 \leq Id < 129$ (**45 %**)
- la classe de vulnérabilité modérée dont $129 \leq Id < 153$ (**35 %**)
- la classe de vulnérabilité élevée dont $153 \leq Id < 200$ (**20 %**)

Sur le Continental Terminal, nous avons les proportions suivantes en termes de vulnérabilité (**Figures 4 et 5**) :

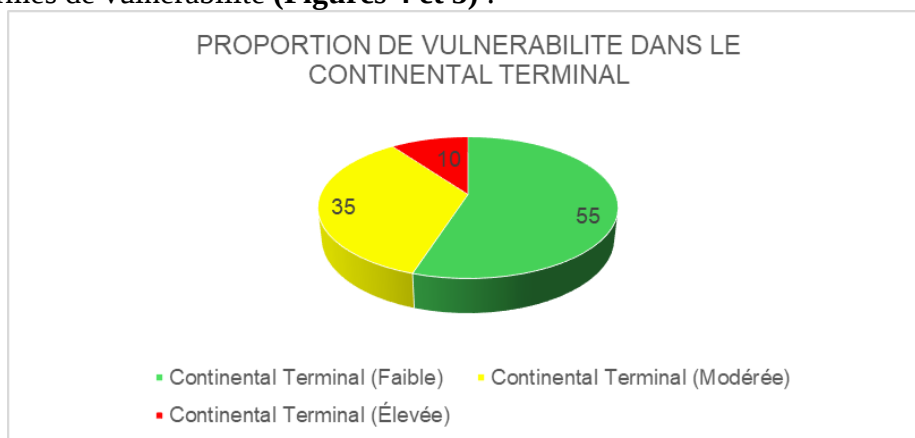


Figure 4 : Proportion de vulnérabilité sur le Continental Terminal

Sur le Quatenaire, nous avons les proportions suivantes :

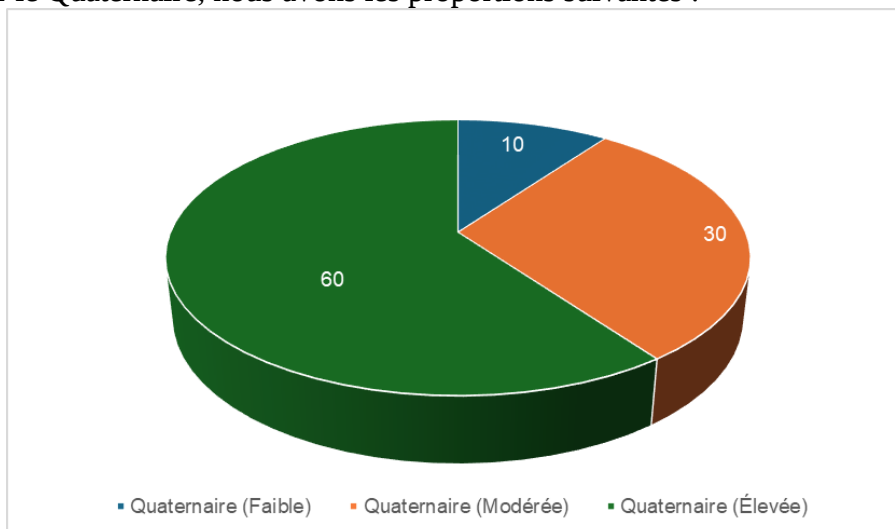


Figure 5 : Proportion de vulnérabilité sur le Quatenaire

Validation de la vulnérabilité par les concentrations en nitrates

La confrontation de la distribution spatiale des nitrates avec les classes de vulnérabilité révèle une concordance spatiale nette entre les secteurs à forte vulnérabilité et les concentrations élevées en NO_3^- . Les teneurs les plus importantes, comprises entre 50,01 et 77,12 mg/L, se rencontrent principalement dans les secteurs classés comme fortement vulnérables par les modèles DRASTIC et GOD. Cette distribution est particulièrement marquée dans le sud de la zone d'étude, notamment vers Abomey-Calavi et Ouidah ainsi que dans la partie orientale vers Zè (Figure 6).

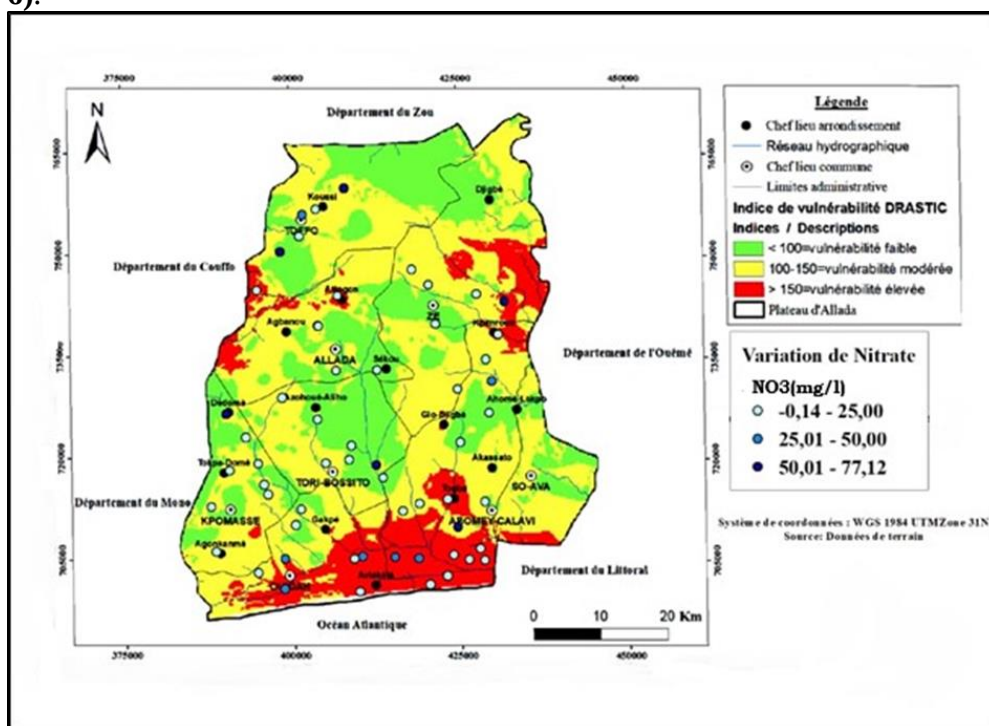


Figure 6 : Carte de corrélation des taux de nitrates et de la vulnérabilité DRASTIC à l'échelle du plateau d'Allada et de sa plaine côtière

Cette figure met ainsi en évidence une relation spatiale qui n'est vraisemblablement pas fortuite. Mais les secteurs caractérisés par une forte vulnérabilité correspondent globalement à ceux où les concentrations en nitrates sont les plus élevées. Cette concordance suggère que les conditions hydrogéologiques prises en compte par le modèle notamment la profondeur de la nappe, les caractéristiques du milieu aquifère et la capacité d'infiltration favorisent effectivement le transfert des substances dissoutes depuis la surface vers les eaux souterraines.

Cette observation rejoint les conclusions d'Agossou & Yang (2021) et Alassane (2004) dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin, où la

validation par les nitrates a confirmé la pertinence des indices de vulnérabilité pour identifier les secteurs présentant une plus grande sensibilité à la contamination. La concordance observée à Allada est donc particulièrement intéressante puisqu'elle montre que, malgré les différences de contexte local et de paramètres mobilisés, la distribution des nitrates constitue un indicateur indépendant permettant de conforter le diagnostic de vulnérabilité. Par ailleurs, la distribution des nitrates serait également liée à la densification de l'occupation humaine par les pressions anthropiques exercées sur le plateau d'Allada et de sa plaine littorale.

Néanmoins, les concentrations en nitrates inférieures au niveau naturel de référence, ce qui souligne que l'absence de fortes teneurs en NO_3^- ne traduit pas nécessairement une absence de pression anthropique. Dans la présente étude, les secteurs classés en vulnérabilité modérée présentent des concentrations en nitrates plus variables. Cette hétérogénéité pourrait traduire l'influence combinée de sources ponctuelles de pollution et des conditions locales de transfert. Autrement dit, la vulnérabilité intrinsèque d'un aquifère ne détermine pas à elle seule la présence d'un contaminant mais elle définit avant tout la facilité avec laquelle un polluant présent à la surface peut atteindre la nappe. La contamination réellement observée résulte donc de l'interaction entre vulnérabilité intrinsèque, intensité des pressions anthropiques et processus de transfert et d'atténuation.

À l'inverse, les secteurs classés en faible vulnérabilité présentent globalement des concentrations en nitrates faibles. Cette tendance apporte un argument supplémentaire en faveur de la cohérence des cartes DRASTIC et GOD. Elle suggère que les conditions naturelles de protection de l'aquifère notamment la présence de niveaux moins perméables, une profondeur plus importante de la nappe ou des conditions moins favorables à l'infiltration rapide limitent le transfert des contaminants depuis la surface.

La comparaison avec d'autres travaux récents en Afrique de l'Ouest renforce cette interprétation. Au Burkina Faso, Traoré et al. (2024) ont montré, dans le sous-bassin du Massili, que les concentrations élevées en nitrates étaient étroitement associées aux activités anthropiques. Leur étude, fondée sur 70 échantillons d'eau souterraine, rapporte que 10 % des échantillons dépassaient 50 mg/L et que l'analyse statistique mettait en évidence l'influence des activités humaines sur la contamination nitratée. Ces résultats sont particulièrement comparables à ceux obtenus dans le plateau d'Allada et de sa plaine littorale, où les teneurs les plus élevées sont également localisées dans des secteurs soumis à de fortes pressions anthropiques.

Ainsi, la concordance entre les indices de vulnérabilité et la distribution spatiale des nitrates constitue un argument fort en faveur de la fiabilité des cartes produites. Elle ne signifie toutefois pas que les nitrates

constituent une mesure directe de la vulnérabilité intrinsèque. Ils jouent plutôt le rôle de traceur de validation, permettant de vérifier si les secteurs théoriquement les plus sensibles correspondent effectivement à des secteurs où la contamination est davantage exprimée.

En définitive, la confrontation des résultats DRASTIC et GOD aux concentrations en nitrates montre une cohérence spatiale globalement satisfaisante entre vulnérabilité théorique et contamination observée. Cette convergence est particulièrement significative dans les secteurs littoraux et périurbains du plateau d'Allada, où la forte perméabilité des formations superficielles, la faible protection naturelle de la nappe et l'intensification des activités humaines constituent une combinaison favorable au transfert des contaminants.

Conclusion

L'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère du plateau d'Allada et de sa plaine côtière a permis d'identifier et de spatialiser les secteurs les plus exposés aux risques de contamination d'origine anthropique. L'approche adoptée a reposé sur l'intégration de données climatiques, géologiques, hydrogéologiques, piézométriques et satellitaires au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG), afin de caractériser les conditions de fonctionnement et la sensibilité du système aquifère.

L'application des méthodes DRASTIC et GOD, fondées sur des paramètres et des principes d'évaluation différents, a permis de caractériser et de cartographier la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère. Les deux approches aboutissent globalement à des tendances spatiales concordantes, avec une sensibilité particulièrement marquée dans les secteurs où les formations superficielles sont plus perméables et où la protection naturelle de l'aquifère est relativement faible.

Les résultats obtenus indiquent que 45% de zone d'étude présentent une vulnérabilité faible, 35% une vulnérabilité modérée et 20 % une vulnérabilité élevée. Les secteurs de vulnérabilité élevée se concentrent principalement au niveau de la bande littorale sableuse, où la forte perméabilité des formations superficielles favorise l'infiltration et le transfert potentiel des substances polluantes vers la nappe.

Ces résultats mettent ainsi en évidence la nécessité d'accorder une attention particulière aux zones de forte vulnérabilité dans les stratégies de gestion et de protection des ressources en eaux souterraines. La cartographie obtenue constitue, à cet égard, un outil d'aide à la décision pour l'aménagement du territoire, la prévention des sources de pollution et la gestion durable des ressources en eau souterraine du plateau d'Allada et de sa plaine côtière.

Remerciements

Cette étude est réalisée dans le cadre des travaux de thèse. Nos sincères remerciements vont à l'endroit de la Chaire International de Physique Mathématiques et Applications (CIPMA) de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC), Bénin et au Ministère de l'Energie, de l'Eau et des Mines. Un sincère merci au Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA) de l'Institut National de l'Eau (INE) de l'UAC.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Adam, K.S. & Boko, M. (1993). Le Bénin. Édicef et Flamboyant, 2e édition, 96 p.
2. Agossou, A., & Yang, J.-S. (2021). Comparative study of groundwater vulnerability to contamination assessment methods applied to the southern coastal sedimentary basin of Benin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 35, 100803. DOI : 10.1016/j.ejrh.2021.100803.
3. Akakpo, K., Ouedraogo, I. & Mensah, A. (2021). Lithostratigraphy and sedimentary environments of the Bénin coastal basin. *Journal of African Earth Sciences*, 182, 104208.
4. Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H. et *al.* 1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. National Water Well Association. Rapport EPA-600/2-87-035; 622p.
5. Alassane, A., Kpegli, K. A. R., van der Zee, S. E. A. T. M., Boukari, M., & Mama, D. (2018). Development of a conceptual groundwater flow model using a combined hydrogeological, hydrochemical and isotopic approach: A case study from southern Benin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 18, 50–67.
6. Alassane, A., Trabelsi, R., Dovonon, L.F., Odeloui, D.J., Boukari, M., Zouari, K., & Mama, D. (2015). Chemical evolution of the continental terminal shallow aquifer in the south of coastal sedimentary basin of Benin (West-Africa) using multivariate factor analysis. *J. Water Resour. Prot.*, 7, 496-515. .

7. Alassane A. (2004). Etude hydrogéologique du Continental Terminal et des formations de la plaine littorale dans la région de Porto-Novo (Sud du Bénin) : Identification des aquifères et vulnérabilité de la nappe superficielle. Thèse de doctorat du troisième cycle, Université Cheik Anta Diop de Dakar, 145p.
8. Bézèlguès S., Des Garets E., Mardhel V., Dörfliger N. (2002). Cartographie de la vulnérabilité de Grand - Terre et de Marie - Galatie (Guadeloupe). Phase1 : méthodologie de détermination de la vulnérabilité. Rapport BRGM -51783-FR, 41 p.
9. Boukari, M. (1996). Hydrodynamic and Hydrochemical Characterization of the Allada Plateau Aquifer System in the Benin Coastal Sedimentary Basin.
10. Boukari, M. (2007). Hydrogéologie de la République du Bénin (Afrique de l'Ouest).
11. Boukari, M. & Alassane, A. (2007). Les ressources en eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier de la République du Bénin.
12. Civita, M. (1994). Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Pitagora Editrice.
13. Civita, M., & De Maio, M. (2004). Assessing and Mapping Groundwater Vulnerability to Contamination. Pitagora Editrice.
14. Dissou M., 1986 : La République du Bénin. Milieux naturels, régions, l'économie agricole et régionale, le bas Bénin. République du Bénin, UNB/UVA/ER, mai 1986, 187 p.
15. Djekounou, A.N., Akakpo, S. & Gberindyer, D. (2020). *Hydrogeological framework of the coastal sedimentary aquifers in Benin*. Hydrogeology Journal, 28, 1215–1233.
16. Foster, S. (1987) Concepts fondamentaux en vulnérabilité des aquifères, risque de pollution et stratégie de protection : Conférence internationale, 1987, Noordwijk aan Zee, La vulnérabilité néerlandaise des sols et des eaux souterraines aux polluants. Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée, La Haye, 69-86.
17. Fetter, C. W. (2001). Applied Hydrogeology (4th ed.). Prentice Hall.
18. Foster, S. S. D. (1987). Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy. IAHS Publication, 38, 69–86.
19. Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Prentice Hall.
20. Gogu, R. C., & Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. Environmental Geology, 39(6), 549–559.
21. ONU. (2015). Transformer notre monde : le Programme de développement durable à l'horizon 2030.

22. Schnebelen, N., Platel, J.P., Lenindre, Y. et Baudry, D. (2002) Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5. Exploitation de segment, protection de la nappe phréatique de l'Oligocène dans la région de Bordeaux. Rapport BRGM/RP-51178-FR, 20p.
23. Teixeira, J. A. (1978). Estimativa da infiltração como parâmetro básico para o estudo do aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos do município de Olinda - PE (Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, Sao Carlos. Recuperado de <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/0/tde-20250523-142253/>
24. Traoré, H., Segda, B. G., & Dipama, J.-M. (2024). Pollution des eaux souterraines par les nitrates : cas du sous-bassin du Massili au Burkina Faso. *Sciences Naturelles et Appliquées*, 43(1), 71–86.
25. UNESCO. (2022). United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater – Making the Invisible Visible.
26. Volkoff, B. (1970). La matière organique des sols ferralitiques du nordeste du Brasil. *Cah ORSTOM, Paris, Sér. Pédol*, 15, 275-290.
27. Vrba, J., & Zaporozec, A. (1994). Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. *International Contributions to Hydrogeology*, Vol. 16.