

DURABILITÉ DES FORAGES D'EAU EN MILIEU DE SOCLE : CAS DE LA RÉGION DU PORO

Omer Zephir DE LASME*, **Konan David KOUAKOU**,
Assoué Sylvestre KOUADIO et **Zahibo Oscar ONETIE**

Université Peleforo GON COULIBALY Korhogo (UPGC), UFR SCIENCES BIOLOGIQUES, Département Géosciences, Côte d'Ivoire

(reçu le 26 Février 2026; accepté le 11 Mai 2026)

* Correspondance, e-mail : drdelasme@gmail.com

RÉSUMÉ

Cette étude a pour objectif de mieux appréhender les facteurs techniques qui gouvernent la durabilité des forages d'eau en milieu de socle, spécifiquement dans la région du Poro (Nord de la Côte d'Ivoire). La méthodologie a été mise en œuvre à travers la quantification des pertes de charges hydrauliques pendant l'opération de pompage, et l'évaluation de la marge de sécurité des ouvrages exploités. Le traitement des données collectées dans la zone d'étude a mis en évidence une proportion importante (64,5%) des forages exploités avec une prédominance des pertes de charges linéaires, sous un régime d'écoulement laminaire. Toutefois, seulement près de 36 % des ouvrages de captage bénéficient d'une très grande marge de sécurité, pendant que 16% sont exploités avec une faible marge de sécurité. Dans le jeu des forages étudiés dans la région de Poro, la proportion de la marge de sécurité n'est pas étroitement liée au type de perte de charge hydraulique qui prévaut pendant l'exploitation de l'ouvrage. Néanmoins, ces facteurs sont des indicateurs de durabilité intrinsèque à intégrer dans la liste de contrôle des forages avant leur mise en exploitation.

Mots-clés : *sécurité, eau potable, pertes de charges, durabilité, Côte d'Ivoire.*

ABSTRACT

Sustainability of water boreholes in basement area : the case of Poro Region, Ivory Coast

The objective of this study is to gain better understand the technical factors that govern the durability of water wells in hardrock environments, specifically in the Poro region (northern Côte d'Ivoire). The methodology involved quantifying hydraulic head losses during pumping operations and assessing the safety margin of boreholes in operation. Analysis of data

collected in the study area revealed significant proportion (64.5%) of the boreholes that exhibit predominantly linear pressure losses under laminar flow conditions. However, only about 36% of groundwater extraction structures have a very high safety margin, while 16% are operated with a low safety margin. Among the wells studied in the Poro region, the safety margin is not closely linked to the type of hydraulic head loss that prevails during the pumping operation. Nevertheless, these factors are indicators of intrinsic sustainability that should be included in the well checklist prior to their exploitation.

Keywords : *safety, drinking water, hydraulic pressure losses, sustainability, Ivory Coast.*

I - INTRODUCTION

L'eau est la ressource la plus précieuse et conditionne l'installation humaine et la réalisation de projets de développement. Face à une demande croissante et à une pollution accrue, la situation mondiale est critique : plus d'un milliard de personnes n'ont pas accès à l'eau potable, et un tiers de la population mondiale pourrait faire face à une pénurie d'ici 2026 [1]. En Côte d'Ivoire, le problème de l'alimentation en eau potable de façon régulière est perçu dans les régions rurales que dans les zones urbaines [2]. Bien que le pays possède d'importantes ressources en eau de surface, leur fiabilité pour l'eau potable diminue en raison de la pollution et de l'évaporation [3]. L'implantation des forages et puits modernes pour l'exploitation des eaux souterraines s'est donc imposée comme une solution économique et de qualité. En effet, dans le milieu de socle, ces eaux constituent souvent la seule source d'approvisionnement durable. La région de Poro Poro particulièrement, a été affectée par des sécheresses récurrentes entraînant une baisse pluviométrique de 10 à 20 % et une diminution de la recharge des nappes [4]. C'est ainsi que plusieurs ouvrages hydrauliques (forages et puits) sont aujourd'hui rendus non-fonctionnels (tariement, pannes), ou ne couvrent plus les besoins en eau des populations. Pour garantir un approvisionnement durable de l'eau en milieu de socle, il s'avère nécessaire de mener des études approfondies pour identifier les facteurs de la durabilité des forages. Dans cette optique, la présente étude s'intéressera à l'évaluation des différentes pertes de charges et la marge de sécurité lors de l'exploitation des forages.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Cadre d'étude et contexte géologique

La région du Poro est une zone du Nord de la Côte d'Ivoire, située dans le référentiel UTM WGS84, fuseau 30 N, entre 8° 26' et 10° 27' N et 5°17' et 6°19' O. Son chef-lieu est Korhogo. S'étendant sur 13400 km², elle est limitée au Nord par le Mali et compte 1040461 habitants [5]. Le climat est de type soudano-guinéen [6], alternant une saison des pluies (mai-octobre) et une saison sèche (novembre-avril), avec une pluviométrie moyenne annuelle de 1560 mm. Le réseau hydrographique est dominé par le fleuve Bandama et ses affluents. Le régime hydrologique est caractérisé par un étiage de décembre à juin et une crue unique en septembre, atteignant un débit maximal de 300 m³/s [7]. Ce régime est fortement corrélé aux précipitations saisonnières. La région est administrativement divisée en quatre départements (Korhogo, Sinématiali, Dikodougou et M'Bengué) (**Figure 1**). Parallèlement à ces caractéristiques physiques, Le contexte géologique de la région du Poro s'intègre dans l'histoire du craton ouest africain [7], Cette région appartient au socle cristallin et cristallophyllien. Les formations géologiques composant le sous-sol de la région sont une succession de bandes de roches métamorphiques, schisteuses ou migmatitiques, et surtout de roches plutoniques [8], Plusieurs travaux [9] ont porté sur la géologie et la tectonique de cette région. Il ressort de ces études que la tectonique est polyphasée et a abouti à la mise en place d'une fracturation très développée dans ces formations.

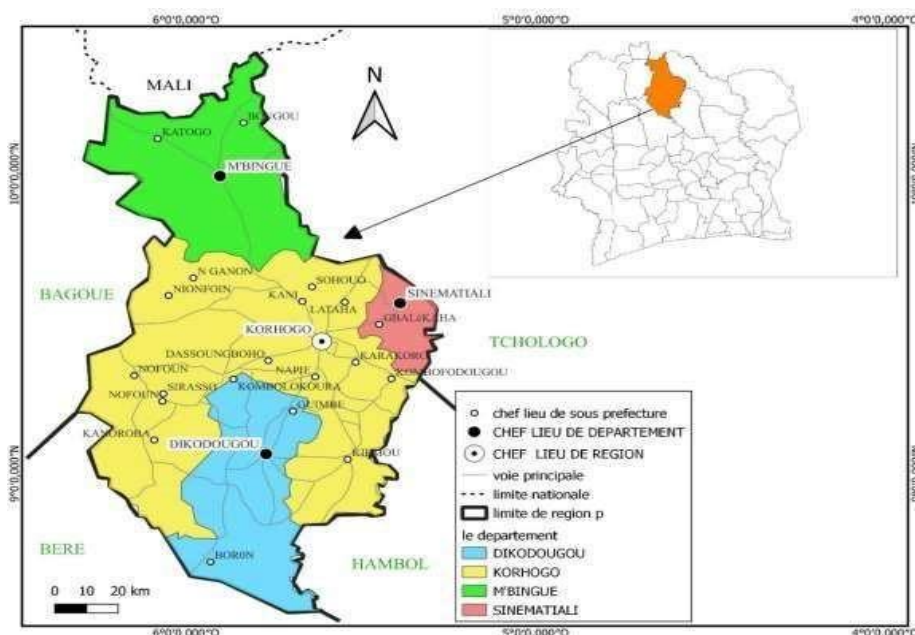


Figure 1 : Situation géographique de zone d'étude (Nord de la cote d'ivoire)

II-2. Période d'étude et réalisation pratique des activités sur le terrain

La période d'étude s'est étalée sur douze mois, de juin 2024 à juin 2025, afin de suivre l'évolution des travaux dans la région du Poro. Les activités de terrain ont démarré par une campagne de foration et de collecte de données primaires, incluant l'élaboration et le suivi des plans d'équipement des ouvrages. Ces missions ont été menées en collaboration étroite avec des équipes locales spécialisées en hydraulique, garantissant ainsi la fiabilité technique des observations. En parallèle, des levés GPS ont été effectués pour géolocaliser avec précision les points d'intérêt, en particulier les nouveaux sites de forage. L'ensemble de ces données de terrain a ensuite été intégré dans un Système d'Information Géographique (SIG) afin d'être traité et analysé sous l'angle de la pérennité des ressources en eau

II-3. Données et Logiciels utilisés

Pour mener à bien cette étude, plusieurs types de données ont été collectés et exploités afin de réussir cette étude sur la durabilité des forages.

II-3-1. Données utilisées

La réalisation de cette étude repose sur l'exploitation de plusieurs types de données essentielles. En premier lieu, les données cartographiques mobilisées incluent la carte géologique des degrés carrés (W4°48 et 6°26, et N 8°48 et 10°24) couvrant la zone d'étude. Ces ressources intègrent également la carte topographique ainsi que le découpage administratif, le tout à l'échelle 1/200 000 pour les degrés carrés mentionnés. Par ailleurs, l'analyse s'appuie sur les données issues des fiches techniques de 31 forages, obtenues auprès du groupe BARAN International dans le cadre du projet « EAU POUR TOUS ». Ces documents techniques regroupent des informations cruciales telles que les fiches de sondage, les comptes rendus d'essais de pompage, ainsi que les caractéristiques structurelles des ouvrages. Ces données précisent les profondeurs de forage, les épaisseurs d'altération et de socle, les débits de foration et d'air-lift, sans oublier les niveaux statiques et les différentes arrivées d'eau identifiées.

II-3-2. Logiciels et outils informatiques utilisés

Pour le traitement et l'analyse de ces informations, plusieurs outils informatiques ont été nécessaires. Le logiciel ArcGIS 10.5 a été utilisé pour la conception et la réalisation des différentes cartes thématiques. Le logiciel OUAIP version 2.1 a permis l'interprétation rigoureuse des essais de puits par palier. Enfin, Microsoft Excel a été utilisé pour effectuer le calcul de pourcentage ainsi que l'analyse statistique descriptive des résultats des données des forages.

II-4. Méthodologie

II-4-1. Quantification des pertes de charges

a) Détermination des paramètres de la courbe caractéristique de forage

La détermination des paramètres fondamentaux de la courbe caractéristique du forage, illustrée par la figure 2, a été réalisée de manière automatisée à l'aide de l'outil OUAIP. Ce processus permet d'identifier les coefficients **B** et **C** dans l'équation de la courbe caractéristique. Ces valeurs sont essentielles car elles expriment la contribution respective des différents types de pertes de charges qui surviennent pendant l'exploitation de l'ouvrage. Plus spécifiquement, le paramètre **C** représente la perte de charge quadratique, pendant que le coefficient **B** représente la perte de charge linéaire. La prédominance du type de perte de charge permet de déduire la nature (laminaire ou turbulente) de l'écoulement qui prévaut dans l'aquifère pendant l'exploitation du forage d'eau.

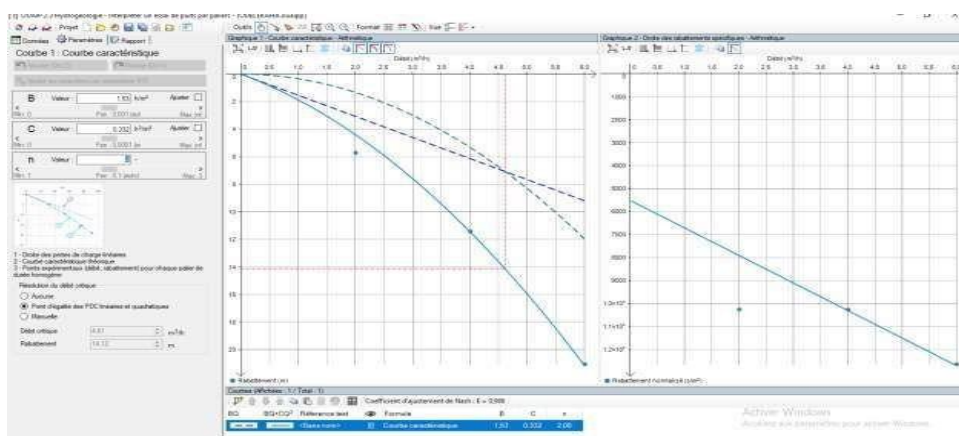


Figure 2 : Exemple d'affichage de la courbe caractéristique d'un forage

b) Quantification des composantes de la perte de charge totale

$$C + B = 100\%$$

$$C = \text{perte de charge quadratique} = 100 * (C / (C + B))$$

$$B = \text{perte de charge linéaire} = 100 * (B / (C + B))$$

II-4-2. Détermination de la marge de sécurité de l'équipement d'exhaure

II-4-2-1. Détermination du débit critique (Q_c)

Le débit critique est le débit au point d'équivalence entre les pertes de charge linéaires et quadratiques, marquant le seuil au-delà duquel les turbulences s'accroissent au risque de détériorer l'ouvrage. Pour garantir une précision

optimale, le logiciel OUAIP a été utilisé pour déterminer la valeur théorique du débit à ce point d'inflexion, après la construction de la courbe caractéristique de l'ouvrage traduite par l'équation $S=f(Q)$ où S est le rabattement du niveau d'eau dans le forage et Q désigne le débit pompé pendant une période précise de l'exploitation.

II-4-2-2. Fixation du débit d'exploitation (Q_{exp})

Le débit d'exploitation a été déterminé à partir des résultats des essais de pompage, en prenant le débit critique (Q_c) comme limite supérieure de sollicitation. Cette valeur a été ajustée en appliquant un coefficient de sécurité pour prévenir le dénoyage de la pompe et la détérioration de l'ouvrage. La fixation de la valeur du débit d'exploitation vise à assurer une extraction durable qui respecte l'équilibre hydrodynamique local.

II-4-2-3. La marge de sécurité des installations

La marge de sécurité du dispositif d'exploitation est appréciée qualitativement par l'écart du débit d'exploitation d'avec le débit critique à ne pas dépasser. L'écart entre le débit d'exploitation et le débit critique peut être mesuré par la différence entre les deux paramètres ou la valeur numérique du rapport entre les deux. L'approche du rapport (Q_{EX}/Q_C) a été privilégiée dans ce travail en raison de son approximation du coefficient arbitraire choisi par les opérateurs afin de fixer le débit de l'exploitation permanente du forage en activité. L'évaluation qualitative de la marge de sécurité repose sur la classification empirique suivante :

$(Q_{exp}/Q_c) < 0,5$: correspond à une excellente marge de sécurité.

$0,5 < (Q_{exp}/Q_c) < 0,75$: correspond à une marge acceptable

$(Q_{exp}/Q_c) \geq 0,75$: correspond à une faible marge de sécurité.

II-4-3. Identification de relation entre le régime hydrodynamique et la sécurité des ouvrages hydrauliques

En vue d'identifier le mécanisme qui expliquerait l'un des facteurs de durabilité (type de perte de charge prédominant et/ou l'écart au débit critique), il a été entrepris une analyse statistique descriptive avec deux variables qualitatives, notamment la nature de l'écoulement au voisinage du forage qui peut être turbulent, intermédiaire ou laminaire, définie par la proportion des pertes de charges prédominantes durant le pompage d'eau. La variable quantitative traduisant la valeur de la marge de sécurité des ouvrages d'exploitation est définie par le rapport entre le débit critique de l'ouvrage (Q_c) et le débit d'exploitation réel (Q_{ex}).

III - RÉSULTATS

III-1. Quantification des pertes de charges

Les résultats de cette étude attestent que les pertes de charge linéaires représentent 20 forages, soit environ 64,5 % des forages étudiés (**Figure 3**). Cela traduit la prédominance de l'écoulement laminaire pendant la phase de pompage d'eau souterraine. L'ouverture des crépines positionnées dans la zone saturée de l'aquifère devient alors la porte d'entrée de cette eau vers l'intérieur du forage d'où l'eau sera refoulée à l'extérieur de l'aquifère grâce à la pompe immergée. Ainsi, le dispositif de captage de l'eau souterraine fonctionne aisément, sans une contrainte particulière pouvant détériorer son état physique. Cependant, il a été observé que lorsque les pertes de charge quadratiques deviennent significatives, le régime d'écoulement devient fortement turbulent (3 forages, soit 9,7 %) ou moyennement turbulent (8 forages, soit 25,8 %). Cela entraîne une sollicitation d'appoint du massif filtrant dont la structure devient moins stable accompagné parfois de la réduction de son volume initial, en raison de l'écoulement rapide et forcé à travers l'ouverture des crépines. Ce type d'écoulement déstabilisant la structure du massif filtrant réduit ainsi progressivement la durée de vie du dispositif de captage.

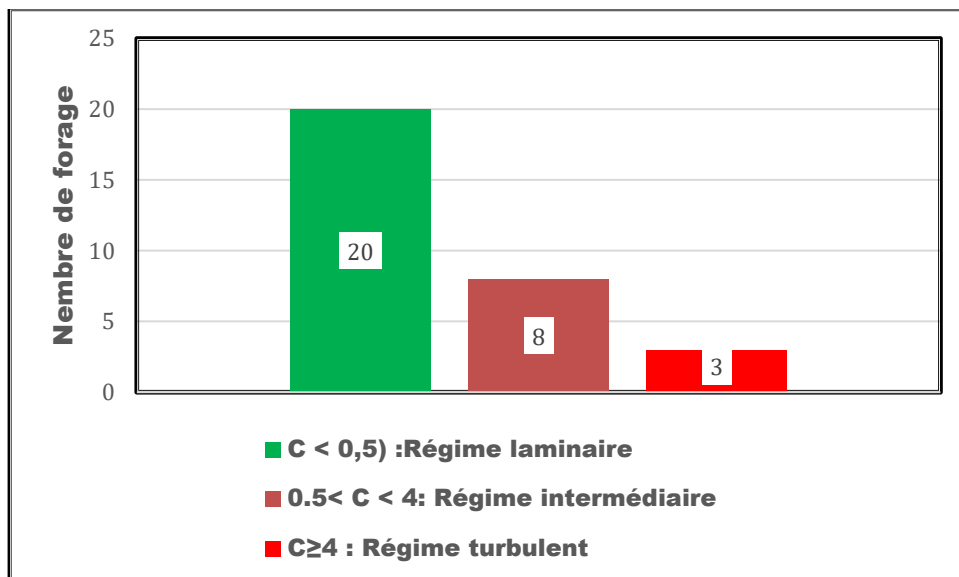


Figure 3 : Caractérisation du régime d'écoulement des forages par l'analyse du coefficient de perte de charge (C)

III-2. Marge de sécurité des installations d'exploitation

La distribution des forages selon les valeurs du rapport Q_{exp}/Q_c a mis en évidence les trois qualificatifs de la marge de sécurité illustrées par la **Figure 4**. Il a été dénombré 11 forages (soit 35 %) dont la valeur individuelle du rapport Q_{exp}/Q_c est inférieure à 0,5. Ce sont des forages exploités avec une marge de sécurité « élevée », car le débit d'exploitation est inférieur à la moitié du débit critique ; 15 forages (soit 48 %) sont distingués avec une valeur de rapport Q_{exp}/Q_c comprise entre 0,5 et 0,75. Ce groupe de forage a été mis en exploitation avec une marge de sécurité « acceptable », car le débit d'exploitation se rapproche du débit critique tout en restant raisonnable. Enfin, 5 forages (16 %) ont présenté des valeurs individuelles du rapport Q_{exp}/Q_c qui est strictement supérieur à 0,75, Ces derniers sont mis en exploitation avec leur potentiel maximum, et très proche de la limite à ne pas dépasser (débit critique). Ce faisant, il ne sera pas possible d'augmenter le débit de ce forage pour l'ajuster à la croissance des besoins en eau des utilisateurs de ces forages. La durée d'utilisation de ces forages est donc limitée dans le temps, en raison de la marge de sécurité « faible » définie lors de la mise en service.

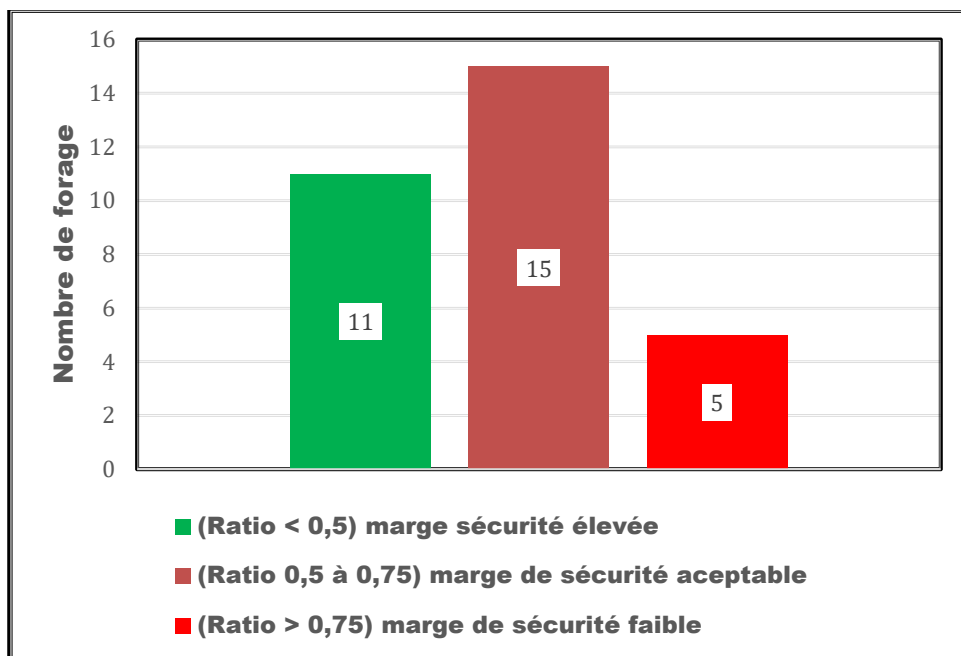


Figure 4 : Distribution des forages selon la marge de sécurité

III-3. Relation entre régime d'écoulement et marge de sécurité

L'analyse statistique bivariée avec la nature du régime d'écoulement et la marge de sécurité, illustrée par la **Figure 5**, permet d'interroger l'existence d'une dépendance fonctionnelle entre le régime d'écoulement et la marge de

sécurité du dispositif de captage des eaux souterraines. De prime abord, l'hypothèse selon laquelle une marge de sécurité élevée serait l'apanage d'un écoulement laminaire, tandis qu'une marge faible résulterait d'un régime turbulent, semble intuitive au regard des instabilités et des pertes de charge singulières propres aux hautes vitesses. Toutefois, l'examen rigoureux des descripteurs statistiques infirme de manière catégorique cette supposition. En premier lieu, il convient d'observer l'absence de regroupement des points expérimentaux autour d'une tendance linéaire. On constate également une dispersion hétérogène, particulièrement marquée pour les faibles valeurs du régime d'écoulement laminaire (faible, compris entre 0 et 1). Dans cette zone, correspondant généralement aux phases d'amorçage ou aux faibles débits, le ratio de sécurité fluctue de manière erratique entre 0,1 et 0,95. Cela démontre qu'à un régime identique peuvent correspondre des états de sûreté diamétralement opposés. En effet, le débit critique est tributaire des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère capté et du dispositif de captage, alors que la fixation du débit d'exploitation est guidée par l'objectif du forage plutôt que son potentiel de durabilité. Par conséquent, le régime d'écoulement ne constitue pas, en soi, un indicateur de fiabilité ou un prédictif du niveau de sécurité. En second lieu, l'analyse de la régression linéaire vient étayer ce constat de décorrélation. La droite de tendance présente une pente quasi nulle ($a = 0,0022$), traduisant une absence totale de sensibilité du ratio de sécurité aux variations de la dynamique du fluide. Qui plus est, le coefficient de détermination, dont la valeur est de $R^2 = 0,0003$, indique que le modèle linéaire n'explique qu'une fraction infime (0,03 %) de la variance observée. En d'autres termes, la corrélation entre ces deux grandeurs est statistiquement nulle. En définitive, les résultats obtenus démontrent que la marge de sécurité est indépendante du régime d'écoulement au sein du domaine d'étude considéré.

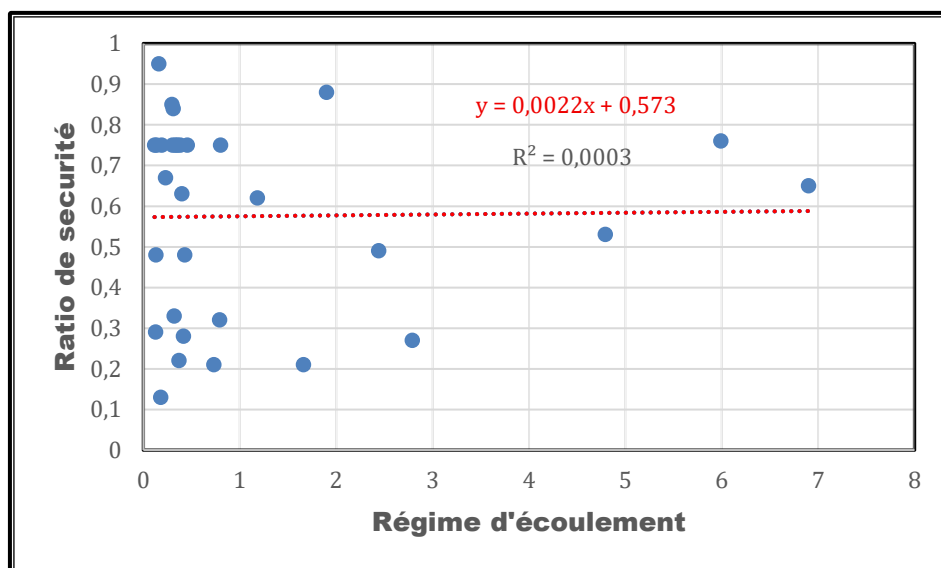


Figure 5 : *Distribution de la marge de sécurité en fonction du régime d'écoulement*

V - DISCUSSION

IV-1. Influence de la quantité des pertes de charges linéaires ou quadratiques

L'analyse des données hydrodynamiques révèle que la majorité des forages (64,5 %) fonctionnent sous un régime de pertes de charge linéaire. Cette configuration est idéale, car elle correspond à un écoulement laminaire qui préserve l'intégrité des installations et garantit une exploitation durable et stable dans le temps. À l'opposé, environ 35 % des ouvrages présentent des pertes de charge quadratiques, réparties entre les régimes intermédiaire et turbulent. Dans ces cas précis, la résistance à l'écoulement augmente de manière disproportionnée, provoquant une chute brutale de l'efficacité hydraulique. Ce phénomène est critique : il accélère la détérioration des infrastructures et peut rendre l'extraction de l'eau techniquement difficile, voire totalement impossible. Ces observations sont corroborées par les travaux de [10] menées dans les régions du N'Zi, de l'Iffou et du Moronou. Cette convergence scientifique confirme que la maîtrise des turbulences est un facteur universel et indispensable pour optimiser la productivité et la longévité des forages dans ces zones géographiques.

IV-2. Durabilité suivant la marge de sécurité des installations

L'analyse de la répartition des forages selon la valeur du rapport Q_{exp}/Q_c révèle une gestion globalement prudente de la ressource, puisque 83 % des ouvrages bénéficient d'une marge de sécurité jugée « élevée » ou « acceptable ». Cette large majorité indique que la plupart des débits d'exploitation restent nettement inférieurs au seuil critique, une pratique recommandée par des auteurs comme [11] ou [12] pour limiter les risques de dégradation prématurée des équipements et de rabattement excessif des nappes. Toutefois, la présence de 16 % de forages en zone de sécurité « faible » constitue un point de vigilance majeur ; pour ces derniers, le débit d'exploitation frôle le débit critique, ce qui expose l'aquifère et les pompes à des contraintes hydrodynamiques sévères.

IV-3. Corrélation entre le régime d'écoulement et la marge de sécurité

L'analyse de la relation entre la dynamique du fluide et la sûreté du système révèle un paradoxe intéressant : contrairement à l'intuition technique qui associerait la stabilité d'un écoulement laminaire à une meilleure sécurité, les données expérimentales démontrent une indépendance totale entre ces deux variables. Cette absence de corrélation est doublement confirmée, d'abord par la forte dispersion des ratios de sécurité pour un même régime laminaire (lent), puis par l'analyse statistique rigoureuse où le coefficient de détermination

($R^2=0,0003$) s'avère quasi nul. Le fait que la dynamique de l'écoulement n'explique que 0,03 % de la variance de la marge de sécurité indique que cette dernière peut être régie par des facteurs exogènes au régime hydraulique (tel que l'objectif du programme d'accès à l'eau potable, et l'intégrité structurelle des composantes de l'équipement).

V - CONCLUSION

L'étude met en lumière l'importance capitale de l'écoulement laminaire dans la durabilité des forages. L'analyse révèle que 64,5 % des ouvrages bénéficient d'un écoulement laminaire garantissant une faible usure, tandis que l'apparition de pertes de charge quadratiques dans les régimes turbulents (9,7 %) et intermédiaires (25,8 %) accélère la détérioration des installations. Parallèlement, l'évaluation de la robustesse via le ratio Q_{exp} / Q_{crit} souligne une vulnérabilité contrastée, avec 16 % des forages présentant une marge de sécurité critique (ratio $> 0,75$). La pérennité structurelle liée au régime et la sécurité d'exploitation liée au ratio de débit sont deux paramètres indépendants, imposant ainsi des stratégies de gestion et de maintenance préventive distinctes pour optimiser durablement les ressources hydrauliques. Dans cette optique, des recherches futures pourraient approfondir l'impact des pertes de charge générées spécifiquement lors de la phase de construction des ouvrages. Il serait également pertinent de se pencher sur l'optimisation des débits d'exploitation afin de concilier efficacité et longévité. Enfin, la réalisation d'études géophysiques et hydrogéologiques complémentaires permettrait de mieux caractériser les aquifères locaux et d'affiner les modèles de gestion durable

RÉFÉRENCES

- [1] - WORLD WATER FORUM, "Local action for a global change. Final report", (2006)
<http://www.worldwaterforum4.org.mx/files/report/FinalReport.pdf>
(Consulté en Mai 2026)
- [2] - J. KOUAMÉ, "Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du Sud-Est de la Côte d'Ivoire (Abidjan Aboisso)", Mémoire de DEA, Université de Cocody Abidjan, (2023) 76 p.
- [3] - D. KONATE, "Caractérisation hydrogéologique d'un système aquifère en zone de socle : cas des départements de Boundiali et Kouto, Nord de la Côte d'Ivoire", Mémoire de Master, Université Jean Lorougnon Guédé, (2017) 62 p.

- [4] - H. KHODJA, H. LUBES-NIEL, R. SABATIER, J. M. MASSON, E. SERVAT et J. E. PATUREL, "Analyse spatio-temporelle de données pluviométriques en Afrique de l'Ouest. Recherche d'une rupture en moyenne", *Revue de statistique appliquée*, 46 (1) (1998) 95 - 110
- [5] - RGPH, "Recensement général de la population et de l'habitat (RGPH), Données sociodémographiques et économiques par localités", (2021) 17 p.
- [6] - A. J. P. ATTIKORA, "Amélioration génétique du karité (*Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn) en Côte d'Ivoire : Analyse de la diversité morphologique des arbres élites identifiés", Mémoire de Master, Faculté de Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège, (2018) 90 p.
- [7] - J. P. JOURDA, "Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'ouest", Thèse de doctorat, Université de Cocody-Abidjan, (2005) 429 p.
- [8] - K. B. K. POTHIN, P. GIOAN et C. GONAYES, "Bilan géochronologique du socle précambrien de la Côte d'Ivoire", *Bioterre*, 01 (2000) 36 - 47
- [9] - S. LEMOINE, "Évolution géologique de la région de Dabakala (Nord-Est de la Côte d'Ivoire) au Protérozoïque inférieur", Thèse de doctorat d'état, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, (1988) 334 p.
- [10] - A. K. S. KOUADIO, "Étude comparative de la productivité des forages d'eau en milieu de socle cristallin et cristallophyllien dans la région du N'zi, Iffou et Moronou", Mémoire DEA, Univ. N. Abrogoua, Abidjan, (2013) 84 p.
- [11] - F. G. DRISCOLL, "Groundwater and Wells", Ed. Johnson Filtration Systems Inc., St. Paul, Minnesota, (1986) 1108 p.
- [12] - G. CASTANY, "Principes et méthodes de l'hydrogéologie", Ed. Dunod, Paris, (1982) 238 p.