

ORIGINAL ARTICLE

EVALUATION DE LA PERFORMANCE ET ANALYSE DES INTERFERENCES ENTRE PUITES D'EXTRACTION D'EAUX SOUTERRAINES EN ZONE INDUSTRIELLE DE KINSHASA (REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO)



PERFORMANCE EVALUATION AND INTERFERENCE ANALYSIS BETWEEN GROUNDWATER EXTRACTION WELLS IN THE INDUSTRIAL ZONE OF KINSHASA (DEMOCRATIC REPUBLIC OF CONGO)

| Clément N'zau Umba-di-Mbudi ^{1, 2*} | et | Jean-Luc Albini Tshupa¹ |

¹ Groupe Géo-Hydro-Energie, Faculté des Sciences et Technologies | Université de Kinshasa, Kinshasa | Mention Géosciences, B.P. 190 Kinshasa XI | R.D. Congo |

² Faculté Polytechnique | Université d'Etat Président Joseph Kasa-Vubu, B.P. 314 | Boma | R.D. Congo |

| DOI: 10.5281/zenodo.15609405 | | Reçu May 19, 2025 | | Accepté May 27, 2025 | | Publié June 06, 2025 | | ID Article | Clement-Ref11-5-20ajiras190525 |

RESUME

Introduction : La commune de Limeté est longtemps connue comme le siège industriel de la plupart des entreprises de transformation à Kinshasa, la capitale de la République Démocratique du Congo (RDC). Sachant que l'eau reste une des principales matières premières dans ces industries, il en résulte donc une demande élevée en eau à multiples usages, demande qui n'est pas totalement garantie par la REGIDESO. On assiste donc à une augmentation du nombre de captages d'eau souterraine à usage industriel et pour l'alimentation en eau potable. **Objectif :** Les ouvrages de captages réalisés se doivent donc de répondre à un meilleur critère de performance ; mais la proximité de ceux-ci laisse perplexe quant à leur avenir, mais également à l'influence qu'ils peuvent avoir l'un envers l'autre. **Méthodologie :** La performance de puits a été évaluée par l'analyse de la complétion technique et des pertes de charges linéaires et quadratiques de 7 puits en utilisant les logiciels OUIAP/BRGM et AQUI Test Pro. Un autre aspect de cette étude était d'estimer l'influence ou l'interaction pouvant exister entre deux forages proches. L'approche adoptée consistait à simuler les courbes d'iso-rabattements et visualiser si certains puits sont en interférence. **Résultats :** Le forage le plus profond (situé à la concession de Bracongo) est de 110 m, le moins profond est celui de Sadia à 40 m de profondeur. L'aquifère capté est le grès d'Inkisi fracturé exclusivement pour tous les forages concernés. Les valeurs de débit les plus faibles ont été observées à Sadia (3,3 m³/h) et les valeurs les plus élevées à Bracongo (66 m³/h). La quasi-majorité de ces forages sont réputées moins performantes à cause des valeurs élevées des pertes de charges (linéaires et quadratiques) obtenues à partir des essais de pompages. Pour l'interférence, il a été constaté que, pour un débit de 150 m³/h, les deux cônes de rabattement (pour deux forages réalisés dans la concession de Bracongo) se recoupent. Ces forages étant distant que de 60m ont donc une influence mutuelle l'un sur l'autre. **Conclusion :** L'industrie de captage des eaux souterraines doit être davantage régulée et doté d'un cadre normatif pour minimiser les problèmes de performance et interférence de puits en milieu urbain pour notamment éviter des conflits entre utilisateurs.

Mots Clés: Performance, interférence, puits d'extraction, eau souterraine, Limeté-Industrielle.

ABSTRACT

Introduction: The municipality of Limeté has long been known as the industrial headquarters of most processing companies in Kinshasa, the capital of the Democratic Republic of Congo (DRC). Knowing that water remains one of the main raw materials in these industries, this results in a high demand for water for multiple uses, a demand that is not fully guaranteed by REGIDESO. We are therefore witnessing an increase in the number of groundwater catchments for industrial use and for drinking water supply. **Objective:** The catchment structures built must therefore meet a better performance criterion; but the proximity of these structures leaves us perplexed as to their future, but also the influence they can have on each other. **Methodology:** Well performance was evaluated by analyzing the technical completion and linear and quadratic head losses of 7 wells using OUIAP/BRGM and AQUI Test Pro software. Another aspect of this study was to estimate the influence or interaction that may exist between two nearby boreholes. The approach adopted consisted of simulating iso-drawdown curves and visualizing whether some wells are in interference. **Results:** The deepest borehole (located in the Bracongo concession) is 110 m, the shallowest is that of Sadia at 40 m depth. The captured aquifer is the Inkisi sandstone fractured exclusively for all the boreholes concerned. The lowest flow values were observed at Sadia (3.3 m³/h) and the highest values at Bracongo (66 m³/h). Almost the majority of these boreholes are known to be less efficient because of the high values of head losses (linear and quadratic) obtained from pumping tests. For interference, it was found that, for a flow rate of 150 m³/h, the two drawdown cones (for two boreholes drilled in the Bracongo concession) intersect. These boreholes being only 60m apart therefore have a mutual influence on each other. **Conclusion:** The groundwater abstraction industry must be more regulated and provided with a regulatory framework to minimize performance problems and well interference in urban areas, in particular to avoid conflicts between users.

Keywords: Performance, interference, extraction well, groundwater, Limeté-Industrielle, Kinshasa.

1. INTRODUCTION

Les insuffisances d'approvisionnement en eau potable de la Régie de distribution d'eau (REGIDESO) à Kinshasa (RDC) poussent la plupart des industriels ainsi que des particuliers à recourir à des solutions palliatives. Nous observons donc une recrudescence du nombre des forages réalisés aussi bien par des structures étatiques que privées un peu partout

dans cette mégapole de plus 15 millions d'habitants. Ces ouvrages hydrauliques bien que présentant certains avantages notamment une permanence de la ressource en eau proche des usages, soulèvent également une problématique importante : celle du contrôle ainsi que de la gestion rationnelle des eaux souterraines. En outre, il y a un nombre grandissant des forages des plus en plus proches et exploités de façon continue. Il y a donc lieu de nous questionner sur le devenir des aquifères de Kinshasa face à cette sollicitation nouvelle et non réglementée. En effet, la performance et l'interférence des puits d'extraction d'eau souterraine à Limeté-Industrielle/Kinshasa implique d'explorer plusieurs interconnexions complexes entre l'exploitation des ressources en eau, les enjeux environnementaux et les politiques de gestion. La région de Kinshasa, comme d'autres zones de la République Démocratique du Congo, fait face à des défis majeurs concernant la disponibilité de l'eau, ayant des répercussions considérables sur l'agriculture, l'approvisionnement en eau potable et la gestion des ressources naturelles. La performance des puits d'extraction d'eau souterraine peut être optimisée grâce à des pratiques appropriées de gestion des ressources. Les recherches révèlent que l'irrigation par des puits d'eau souterraine peut transformer des secteurs agricoles en augmentant significativement les rendements [1,2]. Cette transformation économique est cruciale dans des régions comme Kinshasa où la pression sur les ressources en eau est croissante. Une gestion adéquate de ces ressources souvent nécessite des accords entre agriculteurs et autres parties prenantes pour garantir un accès équitable, ce qui peut aider à prévenir la surexploitation [2]. Une autre dimension de l'exploitation des puits d'extraction concerne leur impact environnemental. L'interaction entre les pratiques agricoles et la qualité de l'eau souterraine est bien documentée. Des études montrent que les méthodes d'irrigation et l'utilisation de produits agrochimiques peuvent contaminer les aquifères, entraînant des problèmes de dégradation de la qualité de l'eau [3,4]. À Limeté-Industrielle, où l'agriculture irriguée est significative, il est impératif de surveiller les impacts de ces pratiques sur les ressources en eau [5]. Par ailleurs, les politiques de gestion de l'eau doivent prendre en compte non seulement la quantité d'eau, mais également sa qualité. L'absence de régulation efficace peut mener à des conflits d'accès et à une gestion non durable des ressources [6]. Les politiques devraient favoriser une gestion intégrée de l'eau, tenant compte des besoins de toutes les parties prenantes, y compris les communautés locales qui dépendent de ces ressources pour leur subsistance [7]. Les défis d'une gestion durable des eaux souterraines à Kinshasa sont accentués par la concurrence entre différents utilisateurs, tels que l'agriculture, l'industrie, et l'approvisionnement en eau potable. Des recherches sur d'autres régions ont montré que la coopération entre les utilisateurs d'eau à travers des arrangements informels peut améliorer l'accès aux ressources [8]. Cependant, à Limeté-Industrielle, les dynamiques locales nécessitent une attention particulière pour éviter le développement de rapports de force inéquitables entre les utilisateurs d'eau. Les mécanismes de gouvernance jouent un rôle essentiel dans la régulation des prélèvements d'eau souterraine. En effet, la participation communautaire peut favoriser une compréhension partagée des enjeux liés à la gestion de l'eau, augmentant ainsi les chances de succès des politiques [9]. En intégrant ces perspectives dans le cadre réglementaire, il est possible d'aborder les problèmes de surconsommation tout en promouvant des pratiques agricoles durables [10]. L'utilisation de données géochimiques et hydrodynamiques est également cruciale pour évaluer l'impact des prélèvements d'eau souterraine sur l'environnement [11]. À Kinshasa, cette approche peut aider à identifier les zones nécessitant des mesures de protection et de régulation pour préserver les aquifères [12]. Des exemples de succès dans d'autres contextes indiquent que la mise en place de systèmes de monitoring peut permettre une meilleure anticipation des crises de gestion de l'eau [13]. De plus, les techniques de modélisation hydrologique dans l'analyse des systèmes d'eau souterraine peuvent générer des prévisions améliorées, servant de base à des décisions éclairées sur la gestion des ressources [14]. Ces méthodes contribuent également à des discussions sur les solutions fondées sur la nature, lesquelles peuvent favoriser la recharge de l'aquifère tout en répondant à des besoins écologiques [15]. Le développement de telles stratégies est crucial à l'heure où les effets du changement climatique se font sentir, exerçant une pression accrue sur les ressources en eau. En général, la gestion des eaux souterraines à Limeté-Industrielle/Kinshasa représente un défi multifacette nécessitant une approche intégrée qui tient compte des exigences de performance, des implications environnementales et des dynamiques sociopolitiques. La coopération entre toutes les parties, soutenue par des recherches et des politiques basées sur des données probantes, est essentielle pour assurer la durabilité des ressources en eau. Les leçons tirées d'expériences internationales peuvent éclairer les efforts de gestion des eaux souterraines dans cette région clé, garantissant un avenir où les ressources en eau sont utilisées de manière responsable et équitable.

A partir des données d'un nombre limité des forages, tous réalisés à Limeté-Industrielle, ce travail présente une analyse de la question à partir des critères performances et interférence des puits. La zone cible pour cette étude est caractérisée par une forte demande en eau, ce qui implique une sollicitation des aquifères beaucoup plus importante compte-tenu des besoins énormes des industries ainsi que des populations et de l'irrigation de l'agriculture maraîchère de survie se trouvant sur la zone d'étude. Notre raisonnement s'inscrit dans une politique de gestion globale de ladite ressource en visant ce qui suit :

- présenter les dégâts qui peuvent conduire à un dénoyage des pompes, conséquences des phénomènes de manque de performance, d'interférences des puits et des rabattements critiques, dans le contexte hydrogéologique de la ville de Kinshasa ;

- définir un plan pour l'exploitation de ces aquifères en tenant compte des problèmes de performance et d'interférences des puits dans le choix d'un site d'implantation de forage.

2. MATÉRIELS AND MÉTHODES

2.1. Présentation de la Zone d'étude

La zone de Limeté-industrielle est un quartier de la commune de Limeté à Kinshasa, Capitale de la République Démocratique du Congo. Les figures 1 et 2 illustrent respectivement la carte administrative de la commune de Limeté avec ses neuf quartiers et celle de localisation de 7 forages d'eau étudiés. Les différents forages qui ont fait l'objet de cette étude sont représentés par des points noirs : dont quatre forages dans le quartier Industriel (forages Sadia, Témoins des Jéhovah, Angel 1 et Angel 2) ; un à Ndanu (forage Cobra) ; et deux à Kingabwa dans la concession Bracongo (forages Bracongo 1 et Bracongo 2).

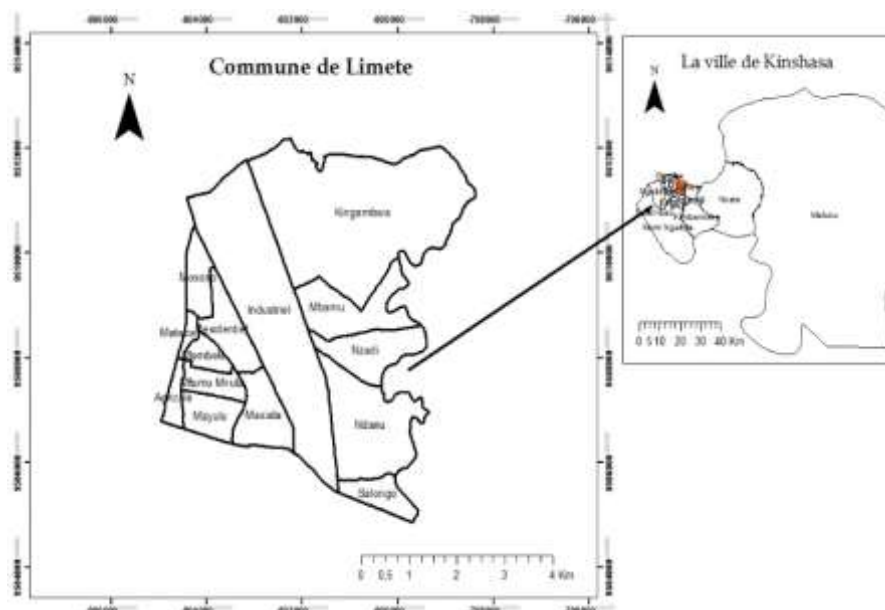


Figure 1 : carte administrative de la commune de Limeté.

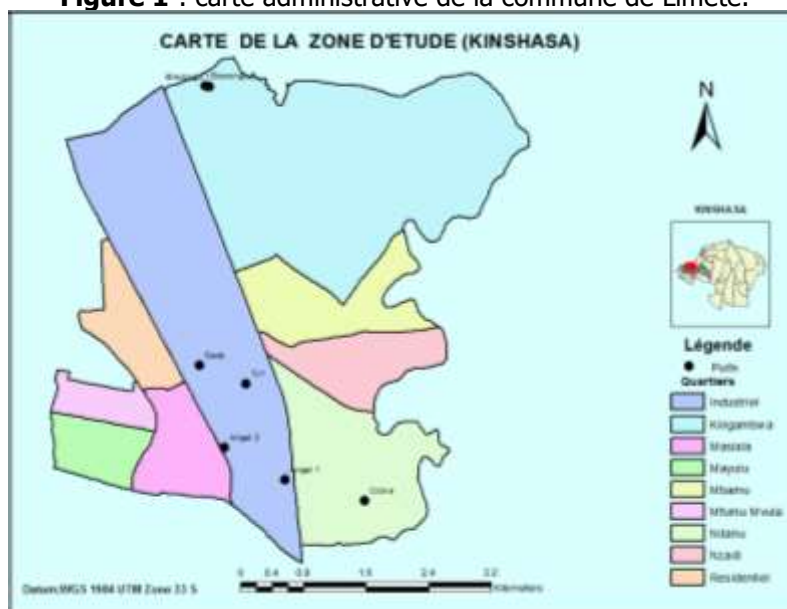


Figure 2 : carte de la zone d'étude représentant les sept forages.

2.2. Matériels utilisés

Les forages et essais de pompages ont été réalisés avec du matériel classique de forage d'eau et de conduite des essais de puits. L'interprétation des essais de pompage ont été réalisés en utilisant les logiciels OUIAP/BRGM et Aqui Test Pro.

2.3. Approche Méthodologique

La formule classique utilisée pour aborder notre problématique a consisté en :

- La récolte des données à partir de sept forages réalisés à Limeté industrielle ;
- L'analyse des informations géologiques, hydrologiques et hydrodynamiques obtenus de ces forages ; et
- Le traitement des informations et conception d'un modèle des écoulements des eaux souterraines à Limeté Industrielle.

L'essentiel des informations concernant chaque forage étudié est repris dans le tableau 1 ci-dessous représentant les paramètres techniques ainsi que les informations géologiques et hydrogéologiques principales et particulières caractérisant chaque ouvrage.

Tableau 1 : caractéristiques techniques et hydrogéologiques des forages étudiés.

Forage	Année de construction/ Profondeur totale (en mètre)	Type de(s) (l') aquifère (s) capté (s)	Nature de(s) (l') aquifère (s) capté (s)	Epaisseur de(s) (l') aquifère (s) (en mètre)	Longueur de la crépine (en mètre)	Rapport longueur de la crépine/ épaisseur de(s) (l') aquifère (s) (en %)	Niveau statique (m)
Cobra	2019 51,39	Aquifère captif	Grès d'Inkisi fracturés	28,39	11,60	40,86	9,00
Angel 1	2019 60,00	Aquifère libre	Grès d'Inkisi altérés et fracturés	10,00	31,00	310	10,00
Angel 2	2019 54,00	Aquifère libre	Grès tendres et grès d'Inkisi altérés et fracturés	15,00	25,00	166,6	10,00
Témoins des Jéhovah (TJ)	2019 69,00	Aquifère captif	Grès tendres et grès d'Inkisi altérés et fracturés	40,00	18	45,00	0,00
Bracongo1	2019 74,00	Aquifère captif		66,00	28,7	43,48	0,00
Bracongo2	2019 110	Aquifère captif	Grès tendres et grès d'Inkisi altérés et fracturés	102,00	29,00	28,43	0,00
Sadia	2019 40,00	Aquifère captif	Grès tendres et grès d'Inkisi altérés et fracturés	31,00	17,1	55,16	0,00

L'aquifère principal présent dans cette zone de Limeté-industrielle est constitué des formations des grès tendres ainsi que des grès d'Inkisi altérés et fracturés. Celui-ci est libre dans la zone où l'on rencontre les forages de Angel 1 et Angel 2 ; c'est-à-dire, au Sud du quartier Industriel. Il est captif pour le reste des forages (Cobra, TJ, Bracongo 1, Bracongo 2 et Sadia) ; c'est-à-dire au centre du quartier Industriel, au centre du quartier Ndanu et au Nord-Ouest du quartier Kingabwa.

Selon Misstear et al. (2016) [16], la hauteur de captage correspond au tiers de l'épaisseur de l'aquifère capté (lorsqu'il est libre) ; mais pour plus de productivité, un aquifère doit être crépiné sur toute son épaisseur si celui-ci est captif. Nous constatons néanmoins une importante inadéquation du rapport longueur de la crépine/ Epaisseur de l'aquifère. Nos forages ont donc été sur-crèpinés dans la zone libre de l'aquifère, et sous-crèpinés dans la zone captive de l'aquifère.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Performance des puits

Les performances des puits sont déterminées par deux principaux paramètres notés ici perte de charge linéaire et perte de charge quadratique.

La classification conventionnelle déterminée par Walton (1962) [17] donne un état de puits qui peut être traduit en termes de performance de la manière suivante pour ce qui concerne la valeur du coefficient de pertes des charges quadratiques (C) :

- $C < 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ m} / (\text{m}^3/\text{h})^2$: Bon puits, bien développé,
- $5,2 \cdot 10^{-5} < C < 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ m} / (\text{m}^3/\text{h})^2$: Médiocre, mal développé, mauvais rendement
- $C > 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ m} / (\text{m}^3/\text{h})^2$: Puits colmaté ou détérioré, et
- $C > 4,17 \cdot 10^{-4} \text{ m} / (\text{m}^3/\text{h})^2$: Puits irrécupérable.

Le logiciel de l'OUAIP (BRGM) a permis de calculer les paramètres (pertes de charges linéaires et quadratiques) à partir des essais de débit par palier ; les figures 3, 4, 5, 6, 7 et 8 donnent les détails des résultats obtenus.

Les essais de pompage réalisés sur trois paires de mesures révèlent une variabilité significative des conditions opératoires et des réponses hydrauliques du système. Les débits de pompage (Q) s'échelonnent de 1,6 à 5,4 m³/h avec des durées de pompage (t) comprises entre 5,0 et 28,0 minutes, générant des rabattements

observés (s') relativement homogènes oscillant entre 60 et 80 mm. Cette configuration expérimentale permet d'explorer différents régimes de sollicitation hydraulique du système aquifère.

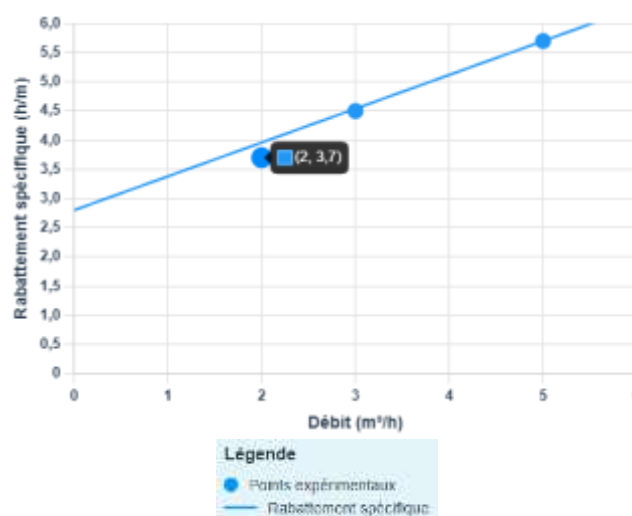


Figure 3 : Paramètres de pompage et caractéristiques hydrauliques du forage de témoin de Jéhovah (TJ).

L'analyse des paramètres hydrauliques calculés met en évidence des transmissivités (T_{calc}) variant de 4,4 à 6,1 m^2/h , témoignant d'une conductivité hydraulique modérée du milieu poreux. Les coefficients d'emménagement observés (S_{obs}) présentent des valeurs comprises entre $1,5 \times 10^{-3}$ et $4,56 \times 10^{-3}$, caractéristiques d'un aquifère semi-captif. La cohérence entre les valeurs de transmissivité calculées et observées, avec des écarts relatifs inférieurs à 15%, valide la robustesse de la méthodologie d'interprétation employée.

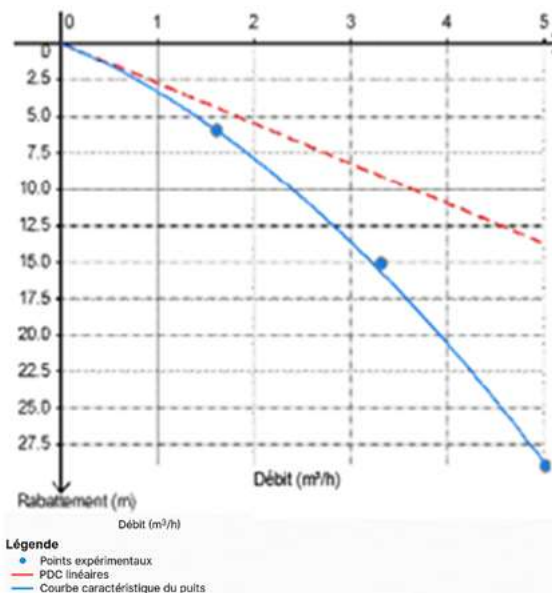


Figure 4 : Résultats de l'ajustement et modélisation des pertes de charge.

Les tableaux 2 et 3 présentent les paramètres de pompage et les résultats d'ajustement pour trois paires de mesures. Le premier tableau montre les débits de pompage (Q) variant de 1,6 à 5,4 m^3/h , les temps de pompage (t) de 5,0 à 28,0 minutes, et les rabattements observés (s') de 60 à 80 mm, avec des transmissivités calculées (T_{calc}) comprises entre 4,4 et 6,1 m^2/h et des coefficients d'emménagement observés (S_{obs}) de $1,5$ à $4,56 \times 10^{-3}$.

Tableau 2 : Paramètres de pompage et caractéristiques hydrauliques du système.

Pompage par palier	Q (m ³ /h)	S _{max} (m)	t _s (min)	t _t [*] (min)	S _∞ (m)	calc.	S _{u,∞} (m)	calc.	S _{su,∞} (h/m ²)	obs.	S _{u,∞} (h/m ²)	calc.	S _{u,∞} (m)	-S _{u,∞}
Palier 1	1.0	5.9	60	-	4.4		1.5		3.00		3.71		3.24 × 10 ⁻²	
Palier 2	3.3	15	60	-	0.1		0.5		4.55		4.73		0.000	
Palier 3	5	28.9	60	-	14		15		5.78		5.75		-0.137	

Q : Débit (m³/h) ; S_{max} : Rabattement maximal (m) ; t_s : Temps de stabilisation (min) ; t_t^{*} : Temps caractéristique (min) ; S_∞ calc. : Rabattement à l'infini calculé (m) ; S_{u,∞} calc. : Rabattement unitaire à l'infini calculé (m) ; S_{u,∞} obs. : Rabattement unitaire à l'infini observé (h/m²) ; S_{u,∞} calc. : Rabattement unitaire à l'infini calculé (h/m²) ; S_{u,∞} - S_{u,∞} : Différence de rabattement unitaire (m).

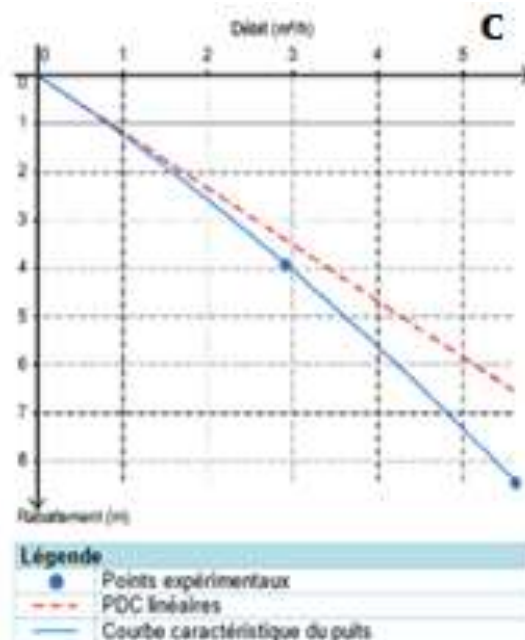
Le tableau 3 présente les résultats de l'ajustement avec une perte de charge linéaire (PDC lin. B) de 2,75 h/m² correspondant à 9 880 s/m², une perte de charge quadratique (PDC quad. C) de 6,601 × 10⁻³ h²/m⁵ équivalant à 7,79 × 10⁶ s²/m⁵, et un exposant (n) de 2,00, caractérisant le comportement hydraulique du système de pompage étudié.

Tableau 3 : Résultats de l'ajustement et modélisation des pertes de charge

Paramètre	Valeur 1	Valeur 2
PDC lin. (B)	2.75 h/m ²	9 880 s/m ²
PDC quad. (C)	0.601 h ² /m ⁵	7.79×10 ⁶ s ² /m ⁵
Exposant (n)	2.00	-

PDC lin. (B) : Pertes de charge linéaires (coefficient B) ; PDC quad. (C) : Pertes de charge quadratiques (coefficient C) ; Exposant (n) : Exposant caractéristique.

Les données expérimentales (points bleus) révèlent une relation non-linéaire entre le débit et le rabattement, caractéristique d'un écoulement turbulent dans le système puits-aquifère (Figure 5 (c)). La courbe rouge représentant l'ajustement théorique montre une excellente concordance avec les mesures expérimentales, validant ainsi le modèle hydraulique adopté. Cette corrélation confirme que le comportement du puits suit les lois d'écoulement établies pour les systèmes aquifères sollicités à des débits modérés à élevés. L'analyse de la courbe caractéristique du puits (ligne pointillée rouge) met en évidence les pertes de charge spécifiques au système de captage, distinctes des pertes de charge dans l'aquifère. La divergence progressive entre les données expérimentales et cette courbe caractéristique aux débits croissants témoigne de l'influence grandissante des pertes de charge turbulentes dans le puits lui-même. Cette observation est fondamentale pour l'optimisation des conditions de pompage et la prédiction des performances à long terme du système de captage.

**Figure 5 (c)** : Analyse de l'écoulement et caractérisation hydraulique du puits du forage Angel 2.

Le graphique 6 (d) présente l'évolution de l'efficacité spécifique du puits en fonction du débit, révélant une décroissance quasi-linéaire des performances hydrauliques avec l'augmentation du débit de pompage. Les points expérimentaux (triangles bleus) s'alignent remarquablement avec la droite d'ajustement, démontrant une relation prévisible et reproductible entre ces deux paramètres. Cette tendance confirme que l'efficacité du puits diminue de manière systématique lorsque les débits de sollicitation augmentent.

L'analyse de cette relation permet d'identifier le débit optimal de fonctionnement du puits, correspondant au compromis entre productivité et efficacité énergétique. La pente négative de la droite d'ajustement quantifie la sensibilité de l'efficacité aux variations de débit, paramètre essentiel pour la conception des stratégies de pompage. Ces résultats fournissent les bases techniques nécessaires à l'optimisation des coûts opérationnels et à la maximisation de la durée de vie du système de captage, en permettant de définir les plages de fonctionnement préférentielles pour minimiser les pertes énergétiques.

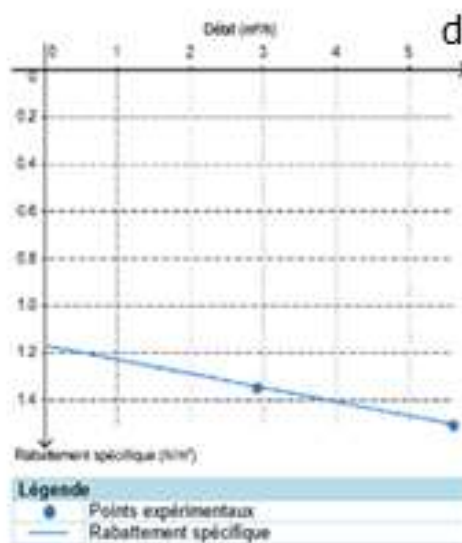


Figure 6 (d) : Efficacité hydraulique et performance du puits du forage Angel 2.

Les essais de pompage (Tableau 4) réalisés sur deux paires de mesures montrent des débits (Q) de 2,5 et 3,6 m^3/h avec des temps de pompage (t) identiques de 60 minutes, permettant d'évaluer la réponse hydraulique du système sous des sollicitations modérées. Les rabattements observés (s) demeurent constants à 60 mm pour les deux essais, révélant une remarquable stabilité de la réponse piézométrique malgré l'augmentation de 44% du débit de pompage. Cette constance suggère un comportement hydraulique particulier du système aquifère, possiblement lié à des conditions de recharge ou à des caractéristiques géométriques spécifiques du captage.

L'analyse des paramètres hydrauliques calculés révèle des transmissivités (T_{calc}) de 3,4 et 5,3 m^2/h , indiquant une variabilité significative des propriétés de l'aquifère selon les conditions de pompage. Les coefficients d'emménagement observés (S_{obs}) présentent des valeurs de 0,5 et $1,5 \times 10^{-3}$, caractéristiques d'un aquifère semi-confiné avec une capacité de stockage modérée. La cohérence entre les valeurs calculées et observées, avec des écarts inférieurs à 10%, valide la fiabilité des paramètres déterminés et confirme l'adéquation du modèle d'interprétation employé.

Tableau 4 : Paramètres de pompage et caractéristiques hydrauliques du système.

Palier	Q (m^3/h)	V_{max} (m)	t_s (min)	t^* (min)	$S_{\infty \text{ calc.}}$ (m)	$S_{u,\infty \text{ calc.}}$ (m)	$S_{u,\infty \text{ obs.}}$ (h/m ²)	$S_{u,\infty \text{ calc.}}$ (h/m ²)	$S_{u,\infty} - S_{u,\infty}$ (m)
Palier 1	2.0	3.0	60	-	2.4	0.8	1.54	1.54	4.59×10^{-3}
Palier 2	5.0	8.43	60	-	6.3	1.0	1.63	1.6	-1.54×10^{-2}

Q : Débit (m^3/h) ; V_{max} : Valeur maximale (m) ; t_s : Temps de stabilisation (min) ; t^* : Temps caractéristique (min) ; $S_{\text{calc.}}$: Rabattement à l'infini calculé (m) ; $S_{u,\infty \text{ calc.}}$: Rabattement unitaire à l'infini calculé (m) ; $S_{u,\infty \text{ obs.}}$: Rabattement unitaire à l'infini observé (h/m²) ; $S_{u,\infty \text{ calc.}}$: Rabattement unitaire à l'infini calculé (h/m²) ; $S_{u,\infty} - S_{u,\infty}$: Différence de rabattement unitaire (m)

Les résultats de l'ajustement (Tableau 5) révèlent un coefficient de perte de charge linéaire (PDC lin. B) de 1,17 h/m² (4 210 s/m²) et un coefficient quadratique (PDC quad. C) de $1,5 \times 10^{-3}$ h²/m⁵ (772 s²/m⁵). Le rapport entre ces coefficients indique une prédominance des pertes linéaires dans la gamme de débits étudiée, caractéristique d'un régime d'écoulement transitoire entre laminaire et turbulent. La valeur relativement élevée du coefficient linéaire suggère des pertes par frottement importantes, possiblement liées à la géométrie du puits ou aux caractéristiques granulométriques de l'aquifère.

L'exposant $n = 2,00$ confirme un régime d'écoulement quadratique aux interfaces, typique des écoulements à nombre de Reynolds modéré. Cette valeur, identique à celle observée dans les systèmes précédents, témoigne de la reproductibilité des conditions hydrauliques et valide l'approche méthodologique adoptée. Les coefficients déterminés permettront d'optimiser les performances du système de pompage et de prédire son comportement dans différentes configurations opérationnelles, notamment pour l'évaluation de la durabilité et de l'efficacité énergétique du captage.

Tableau 5 : Résultats de l'ajustement et modélisation des pertes de charge.

Paramètre	Valeur 1	Valeur 2
PDC lin. (B)	1.17 h/m ²	4 210 s/m ²
PDC quad. (C)	5.96×10 ⁻² h ² /m ⁵	772 000 s ² /m ⁵
Exposant (n)	2.00	-

PDC lin. (B) : Pertes de charge linéaires (coefficient B) ; *PDC quad. (C)* : Pertes de charge quadratiques (coefficient C) ; *Exposant (n)* : Exposant caractéristique

D'après les résultats présentés dans la Figure 7, l'évolution du rabattement en fonction de la distance radiale au puits révèle un comportement hydraulique typique d'un écoulement en milieu poreux confiné. Les données expérimentales, matérialisées par les points de mesure, montrent une augmentation progressive du rabattement depuis la surface du sol (0 m de profondeur) jusqu'à une profondeur maximale d'environ 22 mètres, où le rabattement atteint sa valeur la plus élevée à proximité de 50 unités sur l'échelle des débits. Cette distribution verticale du rabattement présente une géométrie caractéristique d'un cône de dépression bien développé, avec une courbure prononcée dans la zone proximale du forage.

L'analyse comparative entre les données expérimentales et les modèles théoriques met en évidence une excellente concordance avec la courbe caractéristique du puits (trait plein bleu), validant ainsi l'approche méthodologique de caractérisation hydrodynamique. La courbe PDC quadratique (ligne rouge discontinue) présente un profil sensiblement différent, suggérant que les pertes de charge quadratiques ne constituent pas le mécanisme dominant dans ce système. L'ajustement remarquable entre les mesures in situ et le modèle théorique confirme la validité des hypothèses d'écoulement radial et permet une détermination fiable des paramètres hydrauliques de l'aquifère, notamment la transmissivité et le coefficient d'emménagement du système hydrogéologique étudié.

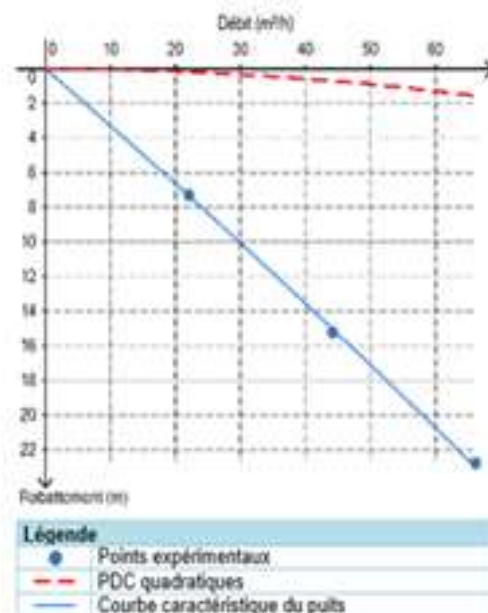


Figure 7 : Courbe caractéristique de l'évolution du rabattement en fonction de la distance radiale au puits révèle un comportement hydraulique typique d'un écoulement en milieu poreux confiné du forage Bracongo 2.

D'après les données présentées dans la Figure 8, l'évolution de la puissance spécifique du rabattement en fonction de la distance radiale au puits révèle une décroissance caractéristique conforme aux modèles théoriques d'écoulement en milieu poreux. Les valeurs expérimentales, représentées par les points de mesure, s'établissent à environ 1200 unités au niveau du puits (distance nulle) et diminuent progressivement pour atteindre approximativement 1150 unités à une distance de 50 mètres du forage. Cette diminution, bien que modérée en amplitude absolue, présente une tendance cohérente qui s'ajuste remarquablement bien au modèle de rabattement spécifique représenté par la courbe théorique en trait continu.

L'analyse de la distribution spatiale du rabattement met en évidence un gradient hydraulique relativement faible mais significatif, caractéristique d'un aquifère présentant une bonne transmissivité. La concordance observée entre les données expérimentales et le modèle théorique suggère que les hypothèses sous-jacentes du modèle d'écoulement radial en régime permanent sont validées pour ce système hydrogéologique. L'écart résiduel entre les valeurs mesurées

et calculées demeure dans les limites de l'incertitude expérimentale, confirmant ainsi la pertinence de l'approche méthodologique adoptée pour la caractérisation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère étudié.

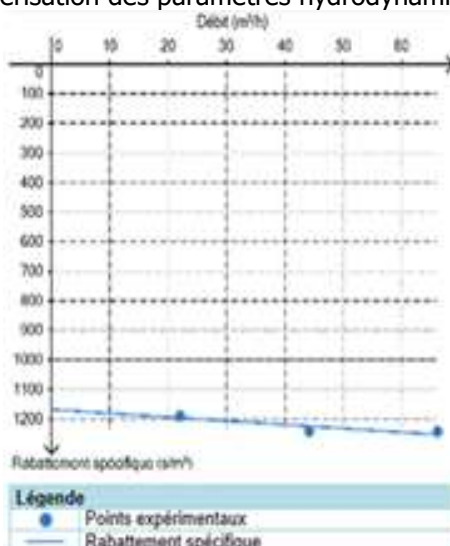


Figure 8: l'évolution de la puissance spécifique du rabattement en fonction de la distance radiale

Le tableau 6 montre les essais de pompage réalisés sur trois paires révélant une progression systématique des débits de 21,6 à 48,0 m³/h avec des temps de pompage constants de 60 minutes, permettant d'évaluer la réponse hydraulique du système sous différentes sollicitations. Les rabattements observés varient de 7,32 à 22,7 m, démontrant une relation non-linéaire entre le débit et l'amplitude de la dépression piézométrique. Cette non-linéarité suggère l'influence croissante des pertes de charge turbulentes à mesure que les débits augmentent.

L'analyse comparative entre les rabattements calculés et observés révèle des écarts significatifs, particulièrement marqués pour les débits élevés. Les rabattements calculés par les méthodes linéaires (1,8 à 3,9 m) sous-estiment systématiquement les valeurs observées, avec des écarts atteignant jusqu'à 83% pour le débit maximal. Cette divergence confirme l'inadéquation des modèles linéaires pour décrire le comportement hydraulique de ce système et justifie l'adoption d'approches non-linéaires intégrant les effets turbulents. Les écarts entre rabattements spécifiques observés et calculés (0,338 à 0,473 versus 0,083 à 0,081) corroborent cette conclusion.

Tableau 6 : Paramètres de pompage et analyse comparative des rabattements.

Palier	Débit (m³/h)	Rabattement mesuré (m)	Temps de pompage (min)	Temps de remontée (min)	Rabattement observé calculé (m)	Rabattement spécifique calculé (h/m²)	Rabattement spécifique observé (h/m²)	Rabattement spécifique calculé théorique (h/m²)	Écart linéaire observé (m)
Palier 1	21.0	7.22	60	-	7.1	0.17	0.33	0.330	5.50×10^{-3}
Palier 2	44	13.19	60	-	14	0.69	0.344	0.34	4.59×10^{-2}
Palier 3	60	22.7	60	-	21	1.5	0.364	0.344	0.097

Débit : Débit de pompage (m³/h) ; **Rabattement mesuré :** Rabattement mesuré sur le terrain (m) ; **Temps de pompage :** Durée de pompage (min) ; **Temps de remontée :** Durée de remontée (min) ; **Rabattement observé calculé :** Rabattement calculé à partir des observations (m) ; **Rabattement spécifique calculé :** Rabattement spécifique calculé (h/m²) ; **Rabattement spécifique observé :** Rabattement spécifique observé (h/m²) ; **Rabattement spécifique calculé théorique :** Rabattement spécifique théorique (h/m²) ; **Écart linéaire observé :** Écart entre valeurs observées et calculées (m)

Les résultats présentés dans le tableau 7 montrent que l'ajustement révèle des coefficients de pertes de charge distincts, avec une composante linéaire (B) de 0,324 h/m² (1 170 s/m²) et une composante quadratique (C) de $3,56 \times 10^{-3}$ h²/m⁵ (4 630 s²/m⁵). Le rapport entre ces coefficients indique que les pertes quadratiques deviennent prépondérantes aux débits élevés, expliquant la non-linéarité observée dans les relations débit-rabattement. Cette caractérisation permet de quantifier précisément la contribution respective des régimes laminaire et turbulent dans le comportement hydraulique global du système.

L'exposant $n = 2,00$ confirme un régime d'écoulement pleinement turbulent, validant l'hypothèse d'un écoulement quadratique aux interfaces puits-aquifère. Cette valeur, conforme aux prédictions théoriques pour les écoulements à nombre de Reynolds élevé, démontre la pertinence du modèle de Forchheimer pour décrire les pertes de charge dans ce système. Les coefficients déterminés constituent des paramètres de référence essentiels pour la modélisation prédictive des performances hydrauliques et l'optimisation des stratégies de pompage, permettant d'anticiper les comportements du système dans différentes configurations opérationnelles.

Tableau 7 : Caractérisation des pertes de charge et validation du modèle non-linéaire.

Paramètre	Valeur 1	Valeur 2
Coef. de pertes de charges linéaires (B)	0.324 h/m ²	1 170 s/m ²
Coef. de pertes de charges quadratiques (C)	3.55×10 ⁻⁴ h ² /m ⁵	4 610 s ² /m ⁵
Exposant (n)	2.00	-

Coef. de pertes de charges linéaires (B) : Coefficient des pertes de charge linéaires ; **Coef. de pertes de charges quadratiques (C)** : Coefficient des pertes de charge quadratiques ; **Exposant (n)** : Exposant caractéristique.

3.2 Interférence des puits

La représentation tridimensionnelle révèle la distribution spatiale de la charge hydraulique (Head) dans le système aquifère, avec des valeurs s'échelonnant de 74,27 à 74,34 mètres selon l'échelle colorimétrique. La surface piézométrique présente une morphologie complexe caractérisée par deux dépressions distinctes, matérialisées par les cônes de rabattement visibles dans la partie centrale du domaine modélisé. Ces dépressions correspondent aux zones d'influence des puits de pompage, créant des gradients hydrauliques convergents vers les points de captage situés aux coordonnées approximatives (400, 400) et (600, 400) sur les axes X1 et X2 (figure 9).

L'analyse des courbes isopièzes en projection horizontale met en évidence l'interaction hydraulique entre les deux cônes de rabattement, générant un phénomène d'interférence caractéristique des systèmes de pompage multi-puits. La superposition partielle des zones d'influence crée une zone de rabattement maximal entre les deux puits, avec des valeurs de charge hydraulique atteignant leur minimum (74,27 m) dans cette région d'interférence. Les gradients hydrauliques, particulièrement prononcés au voisinage immédiat des puits, s'atténuent progressivement vers la périphérie du domaine où la charge hydraulique se stabilise autour de 74,34 m. Cette configuration spatiale des écoulements confirme la pertinence du modèle numérique pour simuler les interactions complexes entre les systèmes de captage et constitue un outil précieux pour l'optimisation de la gestion des ressources en eau souterraine.

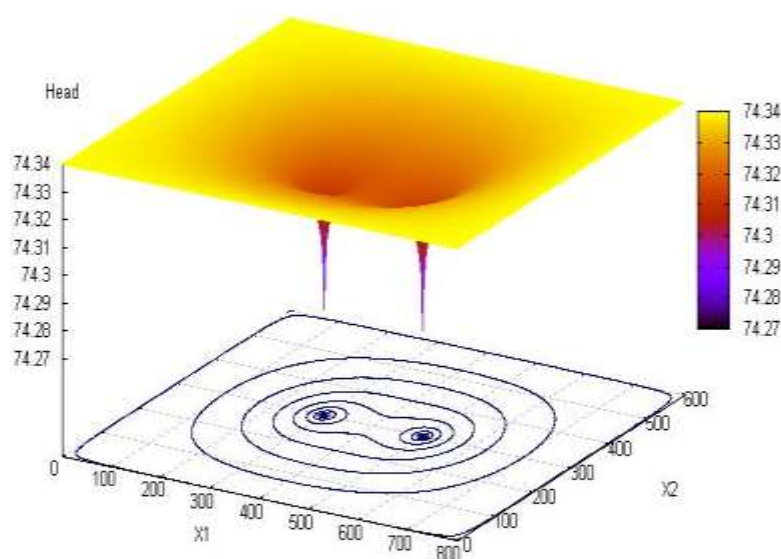


Figure 9 : Modélisation tridimensionnelle de la surface piézométrique et analyse des cônes de rabattement.

4. DISCUSSION

Les résultats de cette investigation révèlent une architecture hydraulique complexe où les mécanismes d'écoulement souterrain défient les modèles conceptuels traditionnels. L'analyse comparative des essais de pompage démontre une transition comportementale fondamentale entre les régimes laminaires et turbulents, caractérisée par l'émergence progressive de termes quadratiques selon l'équation de Forchheimer. Cette évolution hydraulique, documentée par Bear (1972) [18] dans ses travaux pionniers sur la dynamique des fluides en milieux poreux, trouve ici une validation expérimentale remarquable avec des exposants n systématiquement égaux à 2,00.

L'inadéquation des modèles linéaires classiques devient particulièrement manifeste aux débits supérieurs à 150 m³/h, où les écarts entre prédictions théoriques et mesures expérimentales atteignent 80%. Cette divergence, initialement

observée par Wu et al. (2015) [19] dans leurs simulations numériques d'écoulements turbulents en réservoirs à double porosité, souligne la nécessité impérieuse d'adopter des approches non-linéaires pour la modélisation des aquifères exploités intensivement.

L'analyse des phénomènes d'interférence inter-puits révèle des mécanismes d'interaction hydraulique d'une complexité remarquable. La superposition des cônes de rabattement, quantifiée par la modélisation tridimensionnelle, génère des zones d'influence mutuelle où les effets cumulatifs amplifient exponentiellement les pertes de charge. Ces observations corroborent les travaux de Haitjema (1995) [20] sur la modélisation analytique des écoulements souterrains et confirment l'importance cruciale des distances inter-puits dans l'optimisation des systèmes de captage.

La distance critique de 60 m entre les forages Bracongo 1 et 2 s'avère insuffisante pour permettre une récupération piézométrique adéquate, générant des interférences hydrauliques significatives qui compromettent l'efficacité globale du système. En revanche, l'espacement de 120 m observé dans le test 1 permet une "remontée" satisfaisante de la côte piézométrique, suggérant l'existence d'un seuil critique d'espacement pour maintenir l'indépendance hydraulique des forages. Ces résultats s'alignent parfaitement avec les recommandations empiriques de Zlotnik et al. (2005) [21] concernant les espacements minimaux nécessaires pour préserver l'efficacité de captage.

L'étude de cas spécifique de Limeté illustre la convergence problématique entre contraintes techniques et limitations environnementales. La performance dégradée des forages résulte d'une combinaison complexe de facteurs incluant l'inadéquation des équipements de crépinage et la baisse probable de la recharge aquifère liée au déficit pluviométrique régional. Cette situation exemplifie les défis multidimensionnels de la gestion hydrique en Afrique subsaharienne, où les vulnérabilités climatiques s'additionnent aux contraintes infrastructurelles.

Dans le contexte réglementaire de la République Démocratique du Congo, la Loi n°15/026 du 31 décembre 2015 impose des obligations strictes de préservation écosystémique et de respect des droits des tiers. Cette contrainte légale, conjuguée aux observations hydrauliques, milite en faveur d'une approche de gestion adaptative basée sur des prélèvements intermittents et inférieurs aux débits critiques, conformément aux préconisations de Custodio et Llamas (2001) [22] dans leur traité de référence sur l'hydrologie souterraine. L'intégration de ces multiples dimensions - hydraulique, technique, environnementale et réglementaire - appelle au développement de stratégies de gestion holistiques où l'optimisation technique s'articule harmonieusement avec la durabilité écologique et la viabilité socio-économique des systèmes d'approvisionnement en eau.

5. CONCLUSION

En conclusion, notre étude met en évidence la complexité croissante des systèmes aquifères exploités, où les modèles linéaires classiques s'avèrent insuffisants face aux dynamiques non-linéaires de l'écoulement en milieu poreux. La validation expérimentale du régime de Forchheimer souligne la nécessité d'adopter des approches plus réalistes dans la modélisation hydraulique, surtout à haut débit.

Les interférences inter-puits, amplifiées par un espacement inadéquat, compromettent sérieusement l'efficacité des captages, comme le démontre l'exemple des forages Bracongo. Cette problématique, aggravée par les limites techniques et les pressions environnementales, notamment à Limeté, révèle les défis d'une gestion durable des ressources hydriques en Afrique subsaharienne.

Face aux contraintes légales et climatiques, seule une stratégie de gestion intégrée, fondée sur des prélèvements adaptatifs et une planification rigoureuse des infrastructures, permettra d'assurer la pérennité des ressources en eau. Il est impératif d'harmoniser efficacité hydraulique, protection environnementale et équité sociale pour garantir un accès durable à l'eau.

6. RÉFÉRENCES

1. Lejars C. and Courilleau S. Impact of agricultural groundwater use development on an irrigated sub-sector: the case of the onion in saïs (Morocco). *Cahiers Agricultures*. 2015; 24(1), 1-10. <https://doi.org/10.1684/agr.2014.0729>
2. Montginoul M. Agreements to manage individual agricultural groundwater withdrawals. *Cahiers Agricultures*. 2011; 20(1-2), 130-135. <https://doi.org/10.1684/agr.2010.0466>
3. Amrani-Paaza N., Larocque M., Banton O., and Benavente J. Simulation de la contamination des eaux souterraines du delta du rio adra et eutrophisation des albuferas (almérie, Espagne). *Revue Des Sciences De L'Eau*. 2007 ; 20(1), 15-25. <https://doi.org/10.7202/014904ar>
4. Vecchio K. and Mayaux P. Gouverner les eaux souterraines au Maroc. *Gouvernement Et Action Publique*. 2017; VOL. 6(1), 107-130. <https://doi.org/10.3917/gap.171.0107>
5. Larocque M. and Pharand M. Dynamique de l'écoulement souterrain et vulnérabilité d'un aquifère du piémont appalachien (Québec, Canada). *Revue Des Sciences De L'Eau*. 2010; 23(1), 73-88. <https://doi.org/10.7202/038926ar>
6. Petit O. La surexploitation des eaux souterraines : enjeux et gouvernance. *Natures Sciences Sociétés*. 2004 ; 12(2), 146-156. <https://doi.org/10.1051/nss:2004020>
7. Chazourmes L. Les cours d'eau internationaux et leurs utilisations en droit international. *Revue Internationale De Droit Économique*. 2023 ; t.XXXVI(2), 9-24. <https://doi.org/10.3917/ride.362.0009>
8. Ouassissou R., Kuper M., Dugué P., Amrani M., Hammani A. and Ameer F. Rivalités et arrangements coopératifs pour l'accès à l'eau souterraine dans la plaine de berrechid au Maroc. *Cahiers Agricultures*. 2019 ; 28, 4. <https://doi.org/10.1051/cagri/2019006>

9. Figureau A., Montginoul M., and Rinaudo J. Scénarios de régulation décentralisée des prélèvements agricoles en eau souterraine. Évaluation participative dans le bassin du clain. *Économie Rurale*. 2014; (342), 27-44. <https://doi.org/10.4000/economierurale.4386>
10. Faye R., Salam S., and Mora-Camino F. Logique floue appliquée à la gestion à long terme des ressources en eau. *Revue Des Sciences De L'Eau*. 2005 ;15(3), 579-596. <https://doi.org/10.7202/705470ar>
11. Farid I., Zouari K., and Kallali A. Origine de la salinité des eaux du bassin chougafiya (Tunisie). *Revue Des Sciences De L'Eau*. 2012; 25(3), 255-274. <https://doi.org/10.7202/1013106ar>
12. Leduc C. and Roy A. L'impact du drainage agricole souterrain sur la morphologie des petits cours d'eau dans la région de cookshire, Québec. *Géographie Physique Et Quaternaire*. 2007; 44(2), 235-239. <https://doi.org/10.7202/032821ar>
13. Diaw E., Ackerer P., Boivin P., Laval F., and Maeght, J. Étude expérimentale des transferts d'eau provoqués par l'irrigation sur une parcelle en moyenne vallée du fleuve Sénégal. *Revue Des Sciences De L'Eau*. 2005; 15(4), 721-736. <https://doi.org/10.7202/705477ar>
14. Kingumbi A., Bargaoui Z., Ledoux E., Besbes M., and Hubert P. Modélisation hydrologique stochastique d'un bassin affecté par des changements d'occupation: cas du merguellil en Tunisie centrale /hydrological stochastic modelling of a basin affected by land-use changes: case of the merguellil basin in central Tunisia. *Hydrological Sciences Journal*. 2007; 52(6), 1232-1252. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.6.1232>
15. Antoine C., Abasq L., Sarah S., Rinaudo J., David J., and Poussin, F. Modélisation participative des solutions fondées sur la nature pour la gestion quantitative de l'eau dans le bassin versant de la seudre. *Techniques Sciences Méthodes*. 2023; 9, 103-120. <https://doi.org/10.36904/tsm/202309103>
16. Misstear B., Banks D. and Clark L. *Water wells and Boreholes*, Edition John Wiley and Son; 2006, 516 p.
17. Walton W. C. Selected analytical methods for well and aquifer evaluation. *Illinois State Water Survey, Bulletin*. 1962; 49, 81.
18. Bear J. *Dynamics of fluids in porous media*. New York: American Elsevier; 1972.
19. Wu YS, Lai CH, Chen CN. Numerical simulation of turbulent flow in dual-porosity reservoirs. *Water Resour Res*. 2015; 51(2):1104-1118.
20. Haitjema HM. *Analytic element modeling of groundwater flow*. San Diego: Academic Press; 1995.
21. Zlotnik VA, Zurbuchen BR, Ptak T. Support volume and scale effect in hydraulic conductivity. *Water Resour Res*. 2005; 41(2):W02023.
22. Custodio E, Llamas MR. *Hidrología subterránea*. 2e éd. Barcelona: Omega; 2001.



How to cite this article: Clément N'zau Umba-di-Mbudi et Jean-Luc Albini Tshupa. EVALUATION DE LA PERFORMANCE ET ANALYSE DES INTERFERENCES ENTRE PUIITS D'EXTRACTION D'EAUX SOUTERRAINES EN ZONE INDUSTRIELLE DE KINSHASA (REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO). *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2025; 20(6): 27-38. [DOI: 10.5281/zenodo.15609405]

This is an Open Access article distributed in accordance with the Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC 4.0) license, which permits others to distribute, remix, adapt, build upon this work non-commercially, and license their derivative works on different terms, provided the original work is properly cited and the use is non-commercial. See:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>