

## Rôle des transferts thermiques sur la corrosion des concentriques utilisés dans les puits producteurs d'eau albienne

### Role of thermal transfer on the corrosion of the concentrics used in wells producing Albien water

Noureddine Bouzid, Noureddine Settou, Touhami Lanez, Abdelkader Djelloul, Ahmed Abdelhafid Bebbba and Fatiha Chelgham

Volume 22, Number 3, 2009

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/037778ar>  
DOI: <https://doi.org/10.7202/037778ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Bouzid, N., Settou, N., Lanez, T., Djelloul, A., Bebbba, A. A. & Chelgham, F. (2009). Rôle des transferts thermiques sur la corrosion des concentriques utilisés dans les puits producteurs d'eau albienne. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 22(3), 397–406. <https://doi.org/10.7202/037778ar>

Article abstract

The Haoud-Berkaoui region comprises three producing oil fields: Haoud-Berkaoui, Benkahla and Guellala, all located 100 km west of Hassi-Messaoud (Algéria). Oil is recovered from this heterogeneous medium sized layer by injecting water under pressure into the geological formations; the water is extracted from the Albien aquifer by 15 producing wells. To improve exploitation conditions and to increase injection capacities of this water, concentrics were installed within the producing wells to introduce anti-corrosion products. The life time of these facilities, initially predicted to be five years, has been reduced to only two years; important water leaks as well as deterioration of the wellheads have been noticed. The concentrics in the producing wells were in a very advanced state of corrosion, with apparent holes.

Chemical analyses of water samples taken from several wells showed that their ion concentrations varied from 107 to 258 mg•L<sup>-1</sup> for calcium, 73 to 139 mg•L<sup>-1</sup> for magnesium, 24 to 36 mg•L<sup>-1</sup> for potassium, 282 to 304 mg•L<sup>-1</sup> for sodium, 459 to 648 mg•L<sup>-1</sup> for chlorides, while bicarbonate concentrations varied from 116 to 176 mg•L<sup>-1</sup>. The water from these wells is generally hard, rich in sulphates, but poor in dissolved CO<sub>2</sub> gas and lacking H<sub>2</sub>S and oxygen. The pH was neutral or slightly basic with values ranging between 7.02 and 7.58.

A temperature gradient ( $\Delta T$ ) was measured along the depth of the well, variable with depth, with a maximum gradient of 16 °C. The temperature gradient profile showed that  $\Delta T$  was small at the surface of the well and then increased considerably at 584 m depth. For depths between 584 m and 984 m,  $\Delta T$  was somewhat attenuated but remained high. It is in this zone that the concentric was most affected by corrosion.

The corrosion of the concentric in an Albien medium under heat transfer was examined using electro-chemical techniques. The rate of corrosion increased sharply with increasing temperature, regardless of the water quality (i.e., treated with anti-bacterial or anti-corrosion agents, or not). These thermal effects are attributed to the acceleration of kinetic exchange reactions between the metal and the solution and are mainly linked to the energetic contribution associated with the heat flux crossing the concentric by conduction and convection.

The efficiency of the anti-corrosion treatments was evaluated using the equation  $\% E = 100 (V_{corr} - V_{corr}') / V_{corr}'$ , where  $V_{corr}$  and  $V_{corr}'$  are the rates of corrosion with and without treatment, respectively. The best treatment efficiency of 30 % was obtained at a zero temperature gradient. The total absence of FeS eliminated the possibility of bacterial corrosion; the sulfato-reducing bacterium effect was eliminated by the bactericidal treatment.

# RÔLE DES TRANSFERTS THERMIQUES SUR LA CORROSION DES CONCENTRIQUES UTILISÉS DANS LES PUIITS PRODUCTEURS D'EAU ALBIENNE

*Role of thermal transfer on the corrosion of the concentrics used in wells producing Albien water*

---

NOUREDDINE BOUZID<sup>1\*</sup>, NOUREDDINE SETTOU<sup>2</sup>, TOUHAMI LANEZ<sup>2</sup>, ABDELKADER DJELLOUL<sup>3</sup>,  
AHMED ABDELHAFID BEBBA<sup>2</sup> ET FATIHA CHELGHAM<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Physique des Matériaux, Université de Ouargla, BP 511, 30000 Ouargla, Algérie

<sup>2</sup>Laboratoire de Valorisation et de Promotion des Ressources Sahariennes, BP 511, 30000 Ouargla, Algérie

<sup>3</sup>LASPIIA Laboratoire des Structures, Propriétés et Interactions Inter Atomiques, Centre Universitaire Khenchela, Algérie

---

## RÉSUMÉ

L'eau de l'aquifère albien de la région de Haoud-Berkaoui est utilisée à grande échelle et à des fins variées dans le Bas-Sahara algérien, notamment dans le domaine de l'extraction pétrolière. Pour améliorer les conditions d'exploitation de l'eau souterraine, des concentriques ont été installés au sein des puits producteurs pour l'acheminement d'inhibiteurs de corrosion. La durée de vie de ces concentriques, prévue initialement pour cinq années, a été réduite à seulement deux ans, des fuites importantes d'eau ainsi que des dégradations au niveau des têtes de puits ayant été constatées.

Les analyses chimiques des échantillons d'eau de plusieurs forages montrent que ces derniers sont de nature incrustante, chargés en sulfates, peu riches en gaz carbonique dissous et ne contiennent pas de H<sub>2</sub>S ni d'oxygène. Il a été possible, par thermométrie, de mettre en évidence l'existence d'un gradient de température, variable en fonction de la profondeur et pouvant atteindre 16 °C.

La corrosion du concentrique sous transfert thermique a été examinée à l'aide des techniques électrochimiques. La

vitesse de corrosion augmente considérablement en fonction du gradient de température croissant, quelle que soit la nature de l'eau (ayant ou non subi un traitement préalable par bactéricides et inhibiteurs). La meilleure efficacité des traitements employés a été obtenue pour un gradient nul et n'atteint que 30 %. L'absence totale de FeS élimine toute possibilité de corrosion d'origine bactérienne, le gradient de température semble favoriser l'accélération de la cinétique d'échange entre le métal et l'eau.

**Mots clés:** *Albien, corrosion, simulation numérique, thermométrie, gradient de température.*

## ABSTRACT

The Haoud-Berkaoui region comprises three producing oil fields: Haoud-Berkaoui, Benkahla and Guellala, all located 100 km west of Hassi-Messaoud (Algeria). Oil is recovered from this heterogeneous medium sized layer by injecting water under pressure into the geological formations; the water

---

\*Auteur pour correspondance :

Téléphone : (213) 775590814

Télécopie : (213) 29712627

Courriel : [bx\\_djamel5@yahoo.fr](mailto:bx_djamel5@yahoo.fr)

is extracted from the Albien aquifer by 15 producing wells. To improve exploitation conditions and to increase injection capacities of this water, concentrics were installed within the producing wells to introduce anti-corrosion products. The life time of these facilities, initially predicted to be five years, has been reduced to only two years; important water leaks as well as deterioration of the wellheads have been noticed. The concentrics in the producing wells were in a very advanced state of corrosion, with apparent holes.

Chemical analyses of water samples taken from several wells showed that their ion concentrations varied from 107 to 258 mg·L<sup>-1</sup> for calcium, 73 to 139 mg·L<sup>-1</sup> for magnesium, 24 to 36 mg·L<sup>-1</sup> for potassium, 282 to 304 mg·L<sup>-1</sup> for sodium, 459 to 648 mg·L<sup>-1</sup> for chlorides, while bicarbonate concentrations varied from 116 to 176 mg·L<sup>-1</sup>. The water from these wells is generally hard, rich in sulphates, but poor in dissolved CO<sub>2</sub> gas and lacking H<sub>2</sub>S and oxygen. The pH was neutral or slightly basic with values ranging between 7.02 and 7.58.

A temperature gradient ( $\Delta T$ ) was measured along the depth of the well, variable with depth, with a maximum gradient of 16°C. The temperature gradient profile showed that  $\Delta T$  was small at the surface of the well and then increased considerably at 584 m depth. For depths between 584 m and 984 m,  $\Delta T$  was somewhat attenuated but remained high. It is in this zone that the concentric was most affected by corrosion.

The corrosion of the concentric in an Albien medium under heat transfer was examined using electro-chemical techniques. The rate of corrosion increased sharply with increasing temperature, regardless of the water quality (i.e., treated with anti-bacterial or anti-corrosion agents, or not). These thermal effects are attributed to the acceleration of kinetic exchange reactions between the metal and the solution and are mainly linked to the energetic contribution associated with the heat flux crossing the concentric by conduction and convection.

The efficiency of the anti-corrosion treatments was evaluated using the equation  $\% E = 100 (V_{\text{corr}} - V'_{\text{corr}}) / V_{\text{corr}}$ , where  $V_{\text{corr}}$  and  $V'_{\text{corr}}$  are the rates of corrosion with and without treatment, respectively. The best treatment efficiency of 30% was obtained at a zero temperature gradient. The total absence of FeS eliminated the possibility of bacterial corrosion; the sulfato-reducing bacterium effect was eliminated by the bactericidal treatment.

**Key-words:** *Albien, corrosion, numeric simulation, thermometry, temperature gradient.*

## 1. INTRODUCTION

La région de Haoud-Berkaoui, objet de cette étude, comprend trois champs producteurs de pétrole brut, Haoud-Berkaoui, Benkahla et Guellala, et est située à 100 km à l'ouest de Hassi-Messaoud (Algérie).

La récupération du pétrole de ce gisement de dimension moyenne est assistée par l'injection d'eau sous pression dans les formations géologiques. L'eau utilisée fut, jusqu'à la fin des années 80, extraite de la nappe jurassique située à une profondeur de 2 900 m; cette eau était traitée au niveau de chaque tête de puits par des inhibiteurs de corrosion et des bactéricides. Cette option fut abandonnée suite à des problèmes de corrosion dus à une forte teneur en H<sub>2</sub>S, provoquant l'obstruction des puits injecteurs par du sulfure de fer (BOURENANE, 1998).

Au début des années 90, l'eau du Jurassique fut remplacée par celle de l'Albien. Cette opération avait pour but l'amélioration des conditions d'exploitation et l'augmentation des capacités d'injection.

L'Albien représente la ressource essentielle en eau dans le Bas-Sahara algérien du point de vue potentiel et superficie. La nappe albienne s'étend sur une superficie de 600 000 km<sup>2</sup>. Elle couvre tout le sud-est algérien et s'étend dans le sud tunisien et le nord-ouest libyen. Sa capacité réservoir est estimée à environ 50 000 milliards de m<sup>3</sup>, elle pourrait fournir un débit de 1 000 m<sup>3</sup>·sec<sup>-1</sup> pendant deux mille ans, c'est une nappe fossile et profonde (jusqu'à 2 000 mètres), sa teneur en oxygène est très faible (au-dessous de la limite de détection de la technique d'analyse employée) et sa salinité moyenne se situe entre 0,6 et 2 g·L<sup>-1</sup>.

L'aquifère albien a été exploité à des fins agricoles (système d'irrigation par foggaras) et pour des besoins domestiques; puis, suite au développement des techniques de forage, son exploitation s'est étendue au domaine pétrolier, notamment pour le lavage des puits salés, les opérations de dessalage, dans les piscines des tours de refroidissement, dans les échangeurs de chaleur et dans les opérations de maintien de pression par injection.

Dans la région de Haoud-Berkaoui, l'eau albienne est extraite par 15 puits producteurs d'eau alimentant l'unité d'injection composée de plusieurs électropompes à haute pression munies de filtres à sable d'une finesse de 2 µm. Après l'opération de filtration, l'eau est expédiée vers les puits injecteurs (32) pour maintenir la pression du gisement. Les équipements de surface et de fond du système d'injection doivent être protégés contre la corrosion. Celle-ci a causé en 1986 le percement des tubages de production; c'est le cas de la catastrophe du puits OKN325,

laquelle était due au lessivage de la couche de sel du Sénonien par la remontée de l'eau de la nappe albienne vers la nappe du Sénonien (BOURENANE, 1998).

Le dispositif de maintien de pression par injection d'eau comporte :

- des puits sources (puits producteurs d'eau), forés à une profondeur de 1 000 à 1 300 m avec une complétion composée de tubes de production de 17,78 cm (7 pouces) de diamètre et de longueur totale égale à 1 123 m et de concentriques (garnitures de traitement) en acier de nuance API5CT N80 de 4 216 cm (1 660 pouces) de diamètre, appelés communément macaronis (Figure 1). Ces derniers assurent l'acheminement des produits de traitement ;
- une unité de pompage dont l'alimentation est assurée par l'eau provenant des puits sources ;
- une unité de traitement chimique de l'eau conçue de manière à permettre l'injection des inhibiteurs de corrosion et des bactéricides par acheminement de produits chimiques de l'unité de pompage jusqu'à la tête du puits source, à travers des lignes de 5,08 cm (2 pouces) de diamètre (Figure 2). Cette opération a été envisagée pour améliorer la durée de vie des concentriques qui sont fortement affectés par la

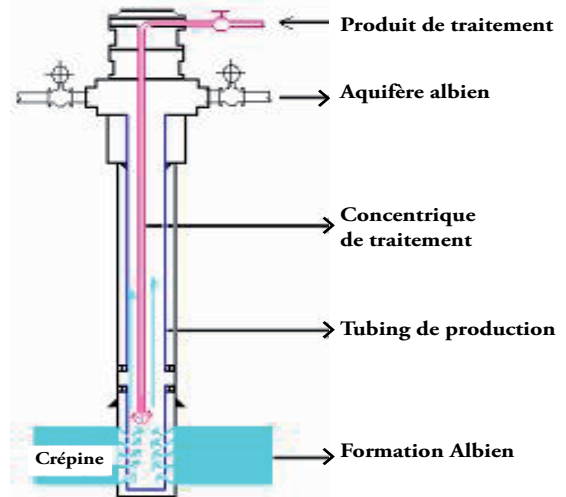


Figure 1 Schéma d'un puits producteur d'eau albienne.  
*Diagram of well producing Albien water.*

corrosion. En effet, la durée de vie de ces derniers, prévue initialement pour cinq années, a été fortement réduite à seulement deux ans. Des concentriques remontés des puits producteurs étaient dans un état de corrosion très avancé avec des perforations apparentes. Les pertes en temps et argent sont considérables et le coût du traitement est estimé à environ 300 000 \$ US par année.

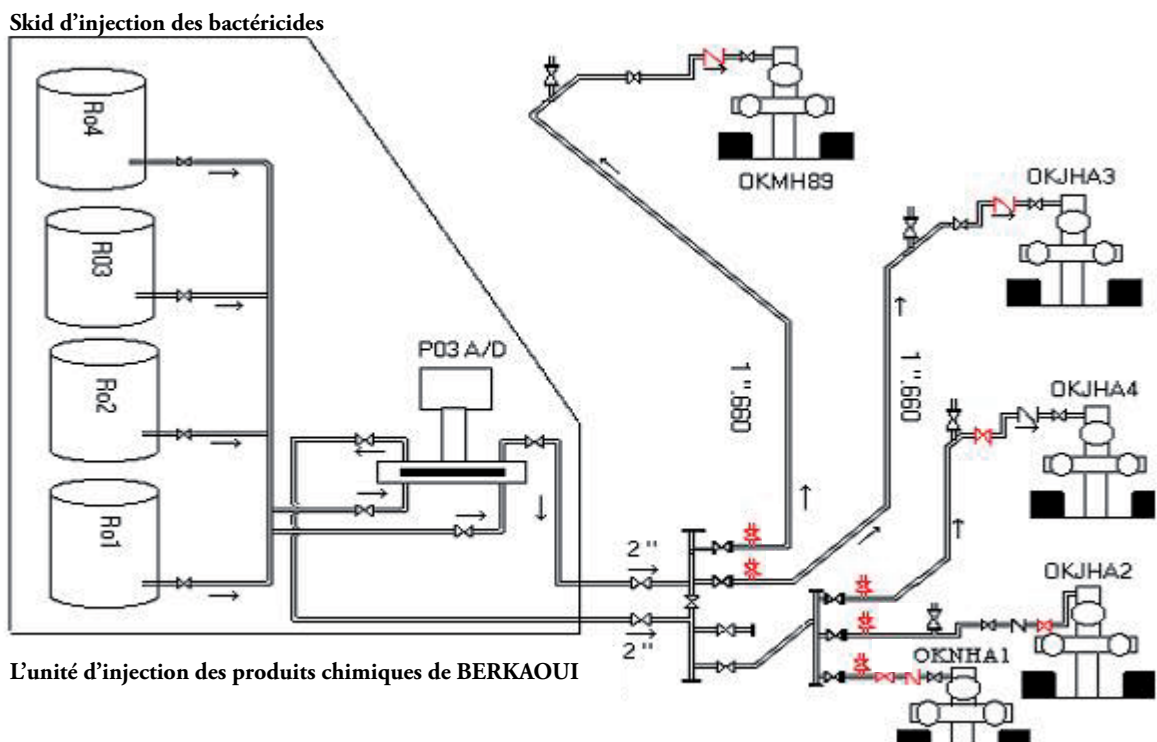


Figure 2 Unité de traitement chimique de Haoud-Berkaoui.  
*Chemical treatment unit of Haoud-Berkaoui.*

La présente étude a pour objectif, d'une part, de déterminer les causes de la dégradation rapide des concentriques dans les puits producteurs d'eau de l'aquifère albien, principalement la détermination des propriétés physico-chimiques de l'eau, et d'autre part, l'étude de l'effet du gradient de température imposé à l'acier dans les conditions réelles d'exploitation des puits. En effet, les mesures de température effectuées de part et d'autre du concentrique pour une profondeur donnée présentaient des écarts allant jusqu'à 16 °C. L'efficacité des traitements par inhibiteurs a été testée en milieu albien et en présence d'un gradient de température.

## 2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les différentes méthodes expérimentales employées dans ce travail sont les analyses chimiques de l'eau, les essais au marbre, la thermométrie et les essais électrochimiques.

### 2.1 Prélèvements et analyse des échantillons d'eau

Les échantillons d'eau ont été prélevés en tête de puits producteurs d'eau. Huit forages de la région de Haoud-Berkaoui ont été sélectionnés à cet effet. Les prélèvements se font dans des flacons en polyéthylène, et ce, après une période de dégorgement du puits de quelques heures. Toutes les opérations de prélèvements ont été réalisées selon les méthodes de RODIER (1996) et les normes AFNOR (1990).

Les principales grandeurs chimiques analysées ont été le pH, le calcium, le magnésium, le potassium, le sodium, les chlorures, les bicarbonates, les sulfates, les nitrates et le gaz carbonique dissous. Pour les essais au marbre, la mesure du pH est réalisée sur un échantillon d'eau fraîche, prélevé dans un erlenmeyer de 250 mL. Le pHs ou pH de saturation est mesuré sur le même échantillon d'eau, auquel nous avons rajouté un tiers en volume de poudre de CaCO<sub>3</sub>. Cette mesure a été réalisée 48 heures après la première. L'indice de saturation,

qui permet de déterminer la nature de l'eau, est donné par la relation  $I_s = pH - pH_s$ .

Les analyses bactériologiques ont été réalisées sur le site en suivant la méthode de dilutions successives. Le dénombrement bactérien se fait après 21 jours.

### 2.2 Thermométrie

La connaissance des profils de température dans les conditions statique et dynamique des puits producteurs et injecteurs d'eau (Figure 1) et l'évolution de ce profil en fonction du débit d'eau produite est nécessaire afin d'évaluer le fonctionnement interne du puits. On désire déterminer en régime d'écoulement à contre-courant l'évolution du gradient de température  $\Delta T$  sur les parois des concentriques de traitement le long d'un puits producteur d'eau albienne.

Nous nous intéressons de ce fait à la modélisation des écoulements incompressibles et visqueux dans des conduites axisymétriques et annulaires. Ces écoulements peuvent être laminaires ou turbulents avec des gradients de température longitudinaux importants dans des configurations géométriques diverses; ceci faisant intervenir de nombreux phénomènes au niveau de l'écoulement qu'il est nécessaire d'analyser correctement. Parmi ces phénomènes, la variation importante de la température peut influencer la nature de l'écoulement dans le domaine d'étude (DOS BERNARDES, 1999). Le modèle choisi nécessite donc l'écriture d'une équation régissant la température découlant du principe de la conservation de l'énergie; cette dernière est de type convection diffusion (COMOLET, 1994).

La modélisation des écoulements est décrite par des relations mathématiques entre les vitesses d'écoulement ( $U, V$ ), la pression  $P$  et la température  $T$  dans un repère cylindrique ( $O r z$ ). Elle a été possible grâce à l'utilisation des équations de bilan déduites des principes de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie qui sont comme suit:

Équation de continuité:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rV) + \frac{\partial U}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Équation de la quantité de mouvement suivant l'axe  $Oz$ :

$$\rho \left( V \frac{\partial U}{\partial r} + U \frac{\partial U}{\partial z} \right) = - \left( \frac{1}{Fr^2} \right) \rho - \frac{\partial P}{\partial z} + \left( \frac{1}{Re} \right) \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U}{\partial r} \right) \right) + \left( \frac{1}{Re} \right) \frac{d\mu}{dT} \left( 2 \frac{\partial T}{\partial z} \cdot \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial r} \left( \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial U}{\partial r} \right) \right) \quad (2)$$



Équation de la quantité de mouvement suivant l'axe  $Or$  :

$$\rho \left( V \frac{\partial V}{\partial r} + U \frac{\partial V}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial r} + \left( \frac{1}{\text{Re}} \right) \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V}{\partial r} \right) - \frac{V}{r^2} \right) + \left( \frac{1}{\text{Re}} \right) \frac{d\mu}{dT} \left( 2 \frac{\partial T}{\partial r} \cdot \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial z} \left( \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial U}{\partial r} \right) \right) \quad (3)$$

Équation de l'énergie :

$$\rho \left( V \frac{\partial T}{\partial r} + U \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \left( \frac{1}{\text{Re Pr}} \right) \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + 2\mu \left( \frac{1}{\text{Re Ec}} \right) \left[ \left( \frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{V}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu \left( \frac{1}{\text{Re Ec}} \right) \left( \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial U}{\partial r} \right)^2 \quad (4)$$

Dans ces équations  $Fr$ ,  $Re$ ,  $Pr$  et  $E_c$  sont les nombres de Froude, Reynolds, Prandtl et Eckert.  $\mu$  et  $\rho$  représentent respectivement la viscosité dynamique du fluide et sa densité :

$\mu$  est exprimée en  $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  par la relation: 
$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + aT + bT^2} \quad (5)$$

dans laquelle  $\mu_0 = 1,161 \cdot 10^{-3} \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $a = 0,033368 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $b = 0,00022 \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$  (JOULIE, 1998);  $\rho$  étant prise égale à  $998,8 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Le modèle choisi pour la turbulence est le modèle de longueur de mélange (modèle zéro équation), il présente une très bonne approche pour la prise en compte des effets turbulents dans les conduites cylindriques.

Ces équations sont discrétisées par la méthode des volumes finis (MVF) en utilisant deux types de maillages : maillage décalé pour évaluer le champ de vitesse et maillage principal centré pour évaluer la pression et la température.

L'algorithme SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) est utilisé pour la résolution des équations discrètes (PATANKAR, 1980).

Le système linéaire est ensuite résolu par l'algorithme TDMA (TriDiagonal-Matrix Algorithm) qui consiste à effectuer un balayage du domaine de calcul, ligne par ligne ou colonne par colonne; cet algorithme est traduit en un programme informatique écrit en langage Fortran (MECHRI, 2003).

### 2.3 Essais électrochimiques

Pour tester l'efficacité du traitement par inhibiteurs, deux puits producteurs d'eau, GLAHA1 et GLAHA2, ont été sélectionnés en fonction de leur disponibilité pour la remontée des concentriques. Le puits GLAHA1 est un puits avec complétion sans concentrique ; l'eau non traitée de ce puits est utilisée comme eau de service des installations de production. Le puits GLAHA2 est, quant à lui, équipé d'une garniture de traitement composée de 117 concentriques d'une longueur totale de 1 050 m.

Les essais électrochimiques ont été réalisés à l'aide d'une chaîne électrochimique constituée d'un générateur de courant ou de tension de type PGP201, d'une cellule d'essai contenant la solution corrosive, le tout étant relié à un micro-ordinateur doté d'un logiciel VOLTA MASTER1, permettant le traitement automatique des grandeurs électrochimiques.

La cellule d'essai, inspirée du brevet d'invention (BELLAOUCHOU *et al.*, 1998a) est représentée par un banc expérimental similaire à un puits producteur d'eau composé d'un tubage de production, où circule le fluide chaud (l'eau albienne) ascendant, et d'un concentrique de traitement où circule le fluide froid descendant (l'inhibiteur de corrosion). L'ensemble constitue deux cylindres coaxiaux.

Le premier cylindre est composé d'une cuve en verre munie de deux orifices permettant l'introduction de l'électrode de référence au calomel saturée en KCl et de l'électrode auxiliaire en platine. Cette cuve est destinée à contenir l'eau de l'Albien. Le deuxième cylindre est composé d'une cuve cylindrique de dimension plus petite, munie d'une ouverture au fond où est placé l'électrode de travail, puis remplie de la solution inhibitrice.

Le chauffage de l'eau du premier cylindre et de la solution inhibitrice du second est assuré par deux résistances chauffantes commandées par un thermostat réglable pour assurer le contrôle de la température ; la lecture de cette dernière se fait à l'aide d'un thermomètre digital.

Les électrodes de travail ont été découpées à partir d'un concentrique, les échantillons ont subi un polissage sur papier abrasif de granulométrie décroissante puis finis à l'alumine.

### 3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats des analyses chimiques, ceux des essais au marbre et le dénombrement bactérien, sont rassemblés dans le tableau 1. D'un forage à l'autre, les teneurs en ions varient de 107 à 258 mg·L<sup>-1</sup> pour le calcium, de 73 à 139 mg·L<sup>-1</sup> pour le magnésium, de 24 à 36 mg·L<sup>-1</sup> pour le potassium, de 282 à 304 mg·L<sup>-1</sup> pour le sodium et de 459 à 648 mg·L<sup>-1</sup> pour les chlorures. Les teneurs en bicarbonates varient de 116 à 176 mg·L<sup>-1</sup>.

Les valeurs trouvées montrent que les compositions chimiques des différents forages sont relativement identiques et les disparités observées ne sont pas très significatives. Il s'agit de manière générale d'une eau dure, chlorurée et riche en sulfates, elle n'est pas très chargée en gaz dissous. Nous n'avons détecté aucune présence de H<sub>2</sub>S et les quantités de CO<sub>2</sub> dissous sont faibles, le gaz carbonique dissous est essentiellement sous forme de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. L'alcalinité de cette eau est entièrement due aux bicarbonates. Les valeurs de pH sont neutres ou légèrement basiques, ce qui a pour effet de favoriser la précipitation de calcite (CaCO<sub>3</sub>).

Les essais au marbre confirment que l'eau est de nature incrustante. De fait, tous les indices de saturation sont positifs (Tableau 1). La présence de sulfates dans l'eau entraîne

**Tableau 1** Analyses chimiques, essai au marbre et dénombrement bactérien des eaux de la région de Haoud-Berkaoui.

*Table 1* Chemical analyses, marble tests and bacterial enumeration for waters from the Haoud-Berkaoui area.

Puits	GLAHA1	OKPHA5	OKJHA3	GLAHA4	OKJHA4	OKJ21	OKM88
Ca <sup>2+</sup> (mg·L <sup>-1</sup> )	194	181	258	171	154	139	132
Mg <sup>2+</sup> (mg·L <sup>-1</sup> )	78	75	86	121	139	114	33
K <sup>+</sup> (mg·L <sup>-1</sup> )	32	32	32	31	35	36	33
Na <sup>+</sup> (mg·L <sup>-1</sup> )	282	298	304	294	285	282	245
Cl <sup>-</sup> (mg·L <sup>-1</sup> )	470	459	472	481	648	562	596
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg·L <sup>-1</sup> )	176	170	161	131	137	137	139
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg·L <sup>-1</sup> )	546	618	762	564	523	450	465
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg·L <sup>-1</sup> )	13	10	13	14	10	12	11
CO <sub>2</sub> (mg·L <sup>-1</sup> )	18	18	22	28	35	37	16
pH	7,47	7,02	7,58	7,14	7,20	7,20	7,26
pHs	6,87	6,88	6,83	6,86	6,72	6,58	6,70
Is	0,60	0,14	0,75	0,28	0,48	0,62	0,56
Germes·mL <sup>-1</sup>	100	10	1000	1000	1000	10	

normalement sa contamination par les bactéries sulfato-réductrices (BSR), ces dernières étant présentes dans tous les puits examinés.

Le schéma de la figure 3 montre une coupe longitudinale d'un puits producteur d'eau équipé de concentriques de traitement, dont le « casing » est coulé contre une paroi rocheuse représentant la structure géologique. La détermination du profil de température a été possible en tenant compte du bilan thermique suivant :

$$d\phi_1 + d\phi_2 + d\phi_3 + d\phi_4 = 0$$

Où  $d\phi_1$  est le flux thermique induit par la convection du fluide chaud,  $d\phi_2$  le flux thermique induit par la convection du fluide froid,  $d\phi_3$  est celui lié à la conduction à travers les parois du concentrique de traitement et  $d\phi_4$  étant le flux thermique induit par la conduction à travers les parois du « casing » vers la structure géologique. Le gradient de température étant défini par la relation  $\Delta T = T_{p3} - T_{p4}$ , dans laquelle  $T_{p3}$  et  $T_{p4}$  désignent les températures de part et d'autre de la paroi du concentrique.

Nous avons vérifié la bonne intégration des équations phénoménologiques (1) à (5) en comparant les résultats obtenus avec ceux du logiciel PERFORM III développé par la société Schlumberger. La validation a été effectuée par application sur un cas réel représentant un puits producteur d'eau. L'écart

entre les résultats obtenus par les deux approches ne dépasse pas 0,5 % (MECHRI, 2003).

Après la validation du logiciel, nous avons déterminé les conditions d'écoulement caractérisées par les nombres de Reynolds et de Prandtl pour les deux fluides avec une injection en continu de l'inhibiteur à la température d'entrée de 25 °C pour un dosage de 20 ppm, équivalant à un débit de 0,1 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>. Le fluide chaud (eau albienne) circule dans l'espace annulaire du fond vers la surface avec un débit de 23,5 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> (correspondant à la valeur réelle du débit variant entre 23,5 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> et 57 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>) et une température d'entrée de 60 °C, correspondant à la température réelle du fond du puits.

Le profil du gradient de température calculé le long du puits producteur d'eau (Figure 4) montre que  $\Delta T$  est faible en tête du puits, puis augmente considérablement quand la profondeur atteint 580 m. Pour une profondeur comprise entre 580 m et 980 m,  $\Delta T$  est quelque peu atténué mais reste cependant élevé : c'est dans cette zone que le concentrique est le plus affecté par le phénomène de corrosion.

Les résultats des essais électrochimiques pour différents gradients de température  $\Delta T$  sont représentés dans le tableau 2. La vitesse de corrosion augmente de manière continue au fur et à mesure que  $\Delta T$  croît. Ce comportement de l'acier vis-à-vis du gradient de température est le même, quelle que soit la

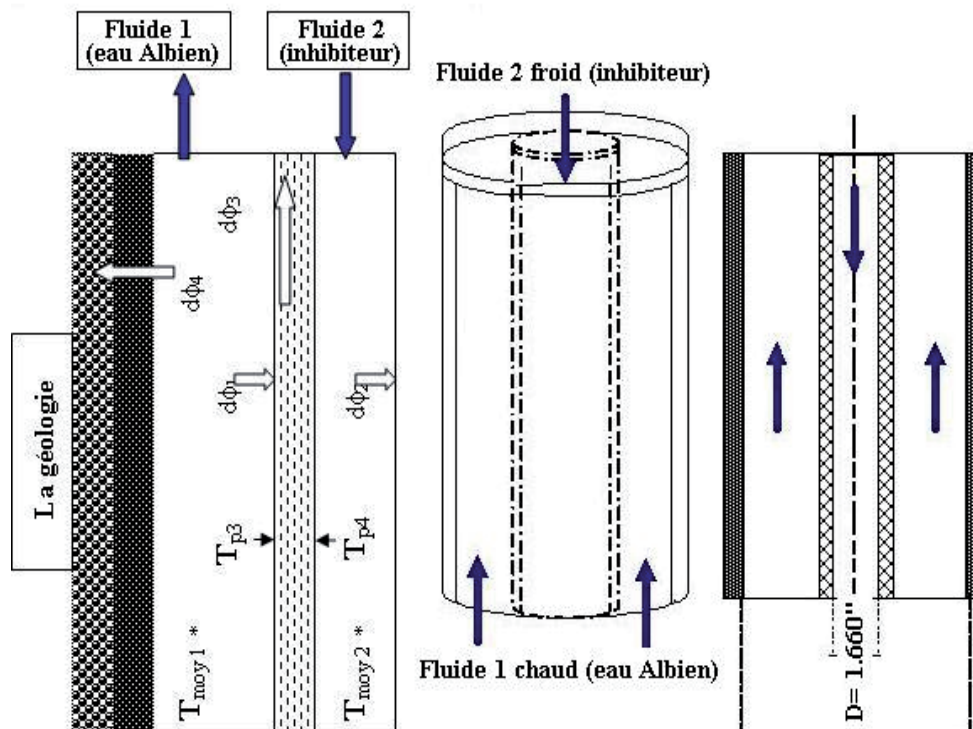


Figure 3 Coupe longitudinale d'un puits producteur.  
Longitudinal cross-section of a producing well.



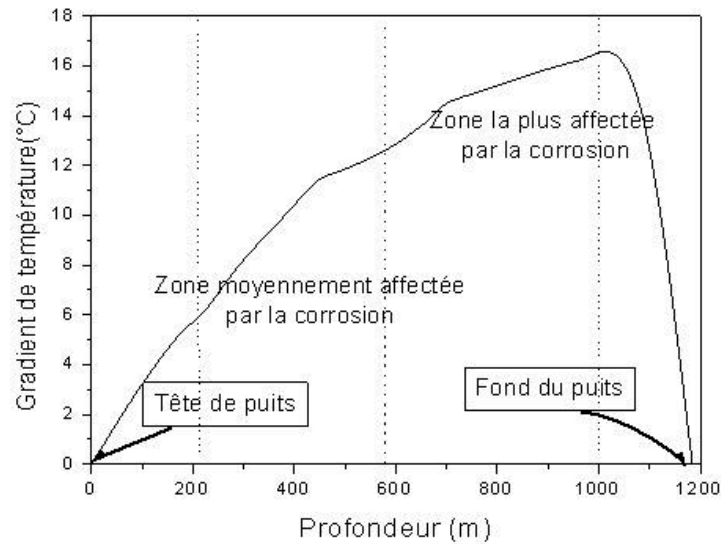


Figure 4 Gradient de température en fonction de la profondeur du puits (Cas du puits GLAHA2).  
Temperature gradient versus well depth (GLAHA2 well).

Tableau 2 Variation de la vitesse de corrosion en fonction de  $\Delta T$ .  
Table 2 Corrosion rate versus  $\Delta T$ .

$\Delta T$ (°C)	0	3	6	9	12	16	20	24
$V_{corr}$ (mm•an <sup>-1</sup> ) Eau non traitée	0,066	0,155	0,163	0,182	0,184	0,212	0,265	0,297
$V_{corr}$ (mm•an <sup>-1</sup> ) Eau traitée	0,046	0,120	0,123	0,137	0,145	0,189	0,220	0,273
$E$ %	30,3	22,5	24,5	24,7	21,1	10,8	16,9	8,0

nature de l'eau (traitée ou non). Ces effets thermiques que nous attribuons à l'accélération de la cinétique de réaction d'échange entre le métal et la solution, sont essentiellement liés à l'apport énergétique accompagnant le flux de chaleur traversant le concentrique par conduction. Ceci entraîne une augmentation de la vitesse de corrosion. De tels phénomènes ont également été observés sur les échangeurs de chaleur en acier inoxydable, employés dans le procédé de fabrication de l'acide phosphorique par voie humide : le transfert de chaleur à travers les tubes entraîne une augmentation importante de la vitesse de corrosion et l'agressivité devient de plus en plus prononcée suite à l'abrasion due aux particules solides de gypse et à la présence d'impuretés solubles telles que F<sup>-</sup> et Cl<sup>-</sup> (BELLAOUCHOU *et al.*, 1993; BELLAOUCHOU *et al.*, 1998b; BELLAOUCHOU *et al.*, 2000; GUENBOUR *et al.*, 1988a; GUENBOUR *et al.*, 1988b).

L'efficacité du traitement des eaux effectué au niveau des champs de la région de Haoud-Berkaoui a été évaluée à l'aide de la formule suivante  $\% E = 100 (V_{corr} - V'_{corr}) / V_{corr}$ , dans laquelle  $V_{corr}$  et  $V'_{corr}$  désignent respectivement les vitesses de corrosion, avec et sans traitement. Les différentes valeurs de  $\% E$  obtenues montrent que le traitement par inhibiteurs, effectué au niveau des champs producteurs d'eau, n'est pas en mesure d'augmenter la durée de vie des concentriques, l'efficacité maximale étant obtenue pour un gradient de température nul et n'atteint que 30 %. Pour les valeurs élevées du gradient, cette variable diminue considérablement. Cet état de fait est inacceptable pour les pétroliers qui exigent une efficacité de l'ordre de 90 % comme critère de choix pour un inhibiteur donné. Le gradient de température semble donc agir de manière très néfaste et son effet est incontournable car il est imposé au concentrique dans les conditions réelles d'exploitation.

Des essais complémentaires par diffraction et fluorescence de rayons X ont été réalisés sur des dépôts de corrosion prélevés à différentes profondeurs sur un concentrique retiré du puits après une exploitation de deux années. Les dépôts sont essentiellement constitués de magnétite qui résulte de la décomposition de l'hydroxyde ferrique, un des produits de corrosion primaire; aucune trace de  $\text{FeS}_2$  n'a été détectée. La teneur en sulfure d'hydrogène dissous étant nulle et l'absence totale de pyrite ( $\text{FeS}_2$ ), qui est le résultat final du métabolisme des bactéries sulfato-réductrices, nous permettent d'exclure toute corrosion d'origine bactérienne (ARBAOUI, 2004). L'effet des bactéries a donc été éliminé grâce au traitement par bactéricides.

#### 4. CONCLUSION

Les résultats des analyses physicochimiques de l'eau des différents puits et les valeurs des indices de saturation montrent que l'eau de l'Albien de la région de Haoud-Berkaoui est de nature incrustante vis-à-vis des carbonates; elle n'est pas très chargée en gaz dissous, son alcalinité est entièrement due aux bicarbonates. Les pH des différents forages sont neutres ou légèrement basiques.

La simulation des écoulements a permis de mettre en évidence l'existence d'un gradient de température de part et d'autre des parois du concentrique, variable en fonction de la profondeur du puits. Ces effets thermiques sont accélérateurs de la cinétique de réaction d'échange entre le métal et la solution. L'efficacité maximale des inhibiteurs de corrosion est obtenue pour un gradient nul et n'atteint que 30 %, ce qui montre que les traitements par inhibiteurs employés pour lutter contre le fléau de la corrosion sont peu efficaces. L'effet du gradient de température est incontournable puisqu'il est imposé au concentrique dans les conditions réelles d'exploitation.

#### REMERCIEMENTS

Ce travail rentre dans le cadre d'un contrat de recherche soutenu par la compagnie de pétrole (SONATRACH), contrat N° I/133/HMD/2000.

Les auteurs remercient la direction de production de la région de Haoud-Berkaoui et l'équipe du Centre de développement et de recherche (CDER) de Boumerdès pour leur contribution à l'étude expérimentale.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR, (1990). Recueil des normes françaises, eaux, méthodes d'essais, 736 p.
- ARBAOUI N. (2004). *Effet du gradient de température sur la vitesse de corrosion des concentriques de traitement des puits producteurs d'eau Albien*. Mémoire de Magister, Univ. Ouargla, Algérie, pp. 35-42.
- BELLAOUCHOU A., A. GUENBOUR et A. BENBACHIR (1998a). *Conception et réalisation d'une cellule d'étude de corrosion sous transfert thermique*. Brevet d'Invention N° 24977, OMPI Casablanca, Maroc.
- BELLAOUCHOU A., A. GUENBOUR et A. BENBACHIR (1993). Corrosion behaviour of stainless steel in phosphoric acid polluted by sulphide ions, *Corros. Sci.*, 49, 656.
- BELLAOUCHOU A., A. GUENBOUR, A. BENBACHIR, L. ARIES et F. DABOSI (1998b). Alliage 904L: comportement électrochimique en milieux phosphoriques pollués par les ions sulfures et fluorures en condition de corrosion-abrasion, *Mater. Tech.*, 9-10, 21-29.
- BELLAOUCHOU A., A. GUENBOUR et A. BENBACHIR (2000). The corrosion of an austenitic stainless steel in phosphoric acid: Effect of sulphide ions and abrasive action, *Bul. Electrochem.*, 16, 166-177.
- BOURENANE A. (1998). Historique de la région de Haoud-Berkaoui, document technique puits. Proceeding des 3<sup>e</sup> Journées Scientifiques et Techniques de SONATRACH, JST3, Algérie.
- COMOLET R. (1994). *Mécanique expérimentale des fluides*. Tome 2, 4<sup>e</sup> édition, Masson, Paris.
- DOS BERNARDES M.A. (1999). Numerical analysis of natural laminar convection in radial solar heater, *Int. J. Therm. Sci.*, 38, 42-50.
- GUENBOUR A., J. FAUCHEU, A. BENBACHIR, F. DABOSI et N. BU (1988a). Electrochemical study of corrosion-abrasion of stainless steels in phosphoric acids, *Br. Corros. J.*, 23, 234-238.
- GUENBOUR A., J. FAUCHEU et A. BENBACHIR (1988b). On the mechanism for improved passivation by addition of molybdenum to austenitic stainless steels in O-phosphoric acid, *Corros. NACE*, 44, 214-220.

JOULIE R. (1998). Mécanique des fluides appliqués, Édition ELLIPSES, Paris, France, p. 157.

MECHRI L. (2003). *Simulation des écoulements et étude de la corrosion sur les concentriques dans un puits producteur d'Albien*. Mémoire de Magister Univ. Ouargla, Algérie.

PATANKAR S.V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*. Éditeur Hemisphere Publishing Corporation, Washington, DC, USA, pp. 27-137.

RODIER J. (1996). *L'analyse de l'eau*. 8<sup>e</sup> édition, Dunod, Paris, France.