



SUR L'ANISOTROPIE DES SABLES ÉOLIENS DE BOUTELDJA (NORD-EST DE L'ALGERIE)

TOUBAL A.C.

*F.S.T.G.A.T., U.S.T.H.B., BP 32, Bab-Ezzouar, 16111, Algérie,
toubal@hotmail.com*

RESUME

L'étude du phénomène d'anisotropie affectant les sables éoliens de Bouteldja (Nord-Est algérien), est conduite sous le double aspect hydrodynamique et géophysique. Les variations de la perméabilité et de la résistivité électrique des alluvions sont respectivement matérialisées sous forme d'ellipses et de diagrammes électriques. Un traitement mathématique approprié permet de calculer les perméabilités principales. La méthodologie adoptée prouverait le comportement anisotrope du milieu ainsi que la liaison entre la direction d'anisotropie électrique et celle des perméabilités principales.

MOTS CLES:

Anisotropie, Dépôts éoliens, Essais de nappe, Sondages électriques pluridirectionnels.

I. LE SITE EXPERIMENTAL

Le massif dunaire de Bouteldja occupe la partie orientale de la baie d'Annaba sur une surface d'environ 183 km² (Fig.1).

Il est constitué de sables éoliens d'âge quaternaire, épais de 25 m à l'est à 175 m à l'ouest. Les dunes sont ceinturées à l'est par les assises argilo-gréseuses de l'unité allochtone numidienne, d'âge oligocène. L'écoulement de la nappe se fait, vers le Nord, en direction de la mer, ainsi que vers le Sud, contribuant ainsi à alimenter la nappe captive de la plaine de Bouteldja.

Le Numidien qui, à l'est de Bou-Glès constitue le substratum de la nappe dunaire, est un exemple typique de milieu discontinu. L'orientation NE-SW est le trait structural dominant de cette unité qui est affectée de nombreux décrochements transversaux NW-SE.

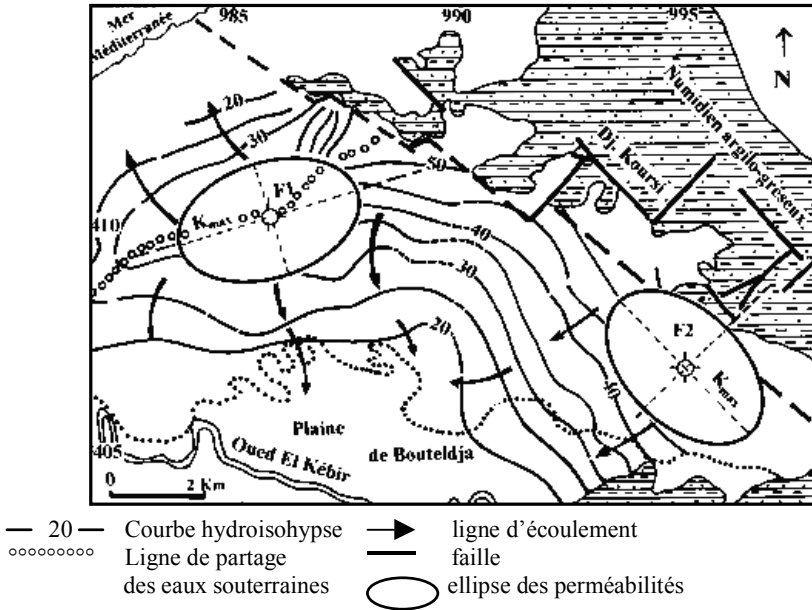


Fig. 1 : Le milieu récepteur. Relations existant entre l'Anisotropie des sables, l'écoulement de la nappe et la structure du soubassement numidien.

II. MESURES ET INTERPRETATION

II.1 Approche de l'anisotropie verticale par essais Lefranc

L'empilement de couches sableuses à granulométrie variable et la présence d'intercalations argileuses, de niveau tourbeux et d'horizons durcis (alios, latérites), induisent dans un plan vertical une macro-anisotropie très nette mise en évidence par les essais Lefranc (TOUBAL, 1983). Ces essais indiquent un coefficient d'anisotropie verticale variant de 1 à 6. La perméabilité horizontale est toujours plus grande que la perméabilité verticale, cette dernière pouvant même être nulle au niveau de couches argileuses étanches. La présence de ces épontes pélitiques confère à l'aquifère un aspect structuré à écoulement horizontal prédominant. On remarque par ailleurs une grande dispersion des valeurs de perméabilités équivalentes. La perméabilité horizontale peut ainsi varier de la valeur $2,6 \cdot 10^{-6}$ m/s à la valeur $1 \cdot 10^{-3}$ m/s, alors que la perméabilité moyenne varie dans l'intervalle $4,4 \cdot 10^{-6} - 8 \cdot 10^{-4}$ m/s.

II.2 Etude de l'anisotropie dans le plan de stratification

La distribution lenticulaire des matériaux péltiques au sein des masses sableuses et la disposition orientée des amoncellements dunaires sous l'action des vents dominants, sont responsables d'une anisotropie mesurée dans le plan de l'écoulement souterrain, parallèlement à la stratification. Cette forme d'anisotropie est mise en évidence par essais de pompage et sondages électriques pluridirectionnels (TOUBAL, 1998).

II.2.1 Essais de pompage

Deux méthodes d'interprétation tenant compte de l'anisotropie du milieu sont utilisées : la première, préconisée par SCHNEEBELI (1978) repose sur l'hypothèse du régime permanent; La seconde, mise au point par PAPADOPOULOS (1965) et NEUMAN (1975), s'applique aux mesures obtenues en régime transitoire sur trois piézomètres non alignés par rapport au puits de pompage, selon la méthode de Theïis ou celle de l'approximation logarithmique de Jacob. Les deux méthodes requièrent des dispositifs expérimentaux spécifiques (Fig.2).

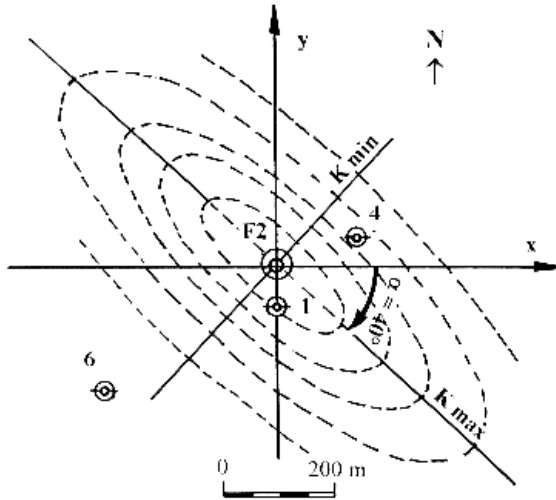


Fig. 2 : Dispositif de mesure et ellipse des perméabilités obtenue par la méthode de PAPADOPOULOS (1965).

On n'exposera ici ni le fondement des méthodes, ni la procédure des calculs que l'on retrouvera dans les documents cités. On notera cependant que les deux méthodes, permettent d'obtenir les perméabilités horizontales principales

(T_x, T_y) ainsi que l'angle θ que fait l'axe des abscisses avec celui des transmissivités maxima (T_x) (Tableau1).

Tableau 1 : Approche de l'Anisotropie horizontale

SITE	$T_x \text{ max}$ 10^{-3}	$T_y \text{ min}$ 10^{-3}	λ_H	$\theta \text{ }^\circ\text{C} (x, T_x)$	Direction	S %
F2 Jacob	3,7	0,12	5,55	40	N 130°	5,4
F2 Theis	2,82	0,11	5,06	40	N 130°	7,3
F1 Schneebeli	3,3	0,85	1,96	32	N 73°	

Les paramètres hydrodynamiques ainsi évalués sont conformes au schéma hydrogéologique proposé et des valeurs du coefficient d'emmagasinement S de 5 à 7% sont caractéristiques d'une nappe libre. Par ailleurs, il semblerait que l'on puisse utiliser indifféremment la méthode de Theis ou l'approximation de Jacob, car les résultats restent très comparables avec la même variation à 40° des directions T_x . Dans le secteur oriental du massif dunaire, les valeurs particulièrement élevées du coefficient d'anisotropie λ_H témoignent d'une forte anisotropie horizontale du milieu éolien.

II.2.2 Les sondages électriques pluridirectionnels

D'un point de vue purement formel, les lois de «l'écoulement» de l'électricité dans un conducteur sont analogues à celles de l'écoulement d'un fluide à travers un milieu poreux ; l'étude de l'anisotropie des perméabilités peut donc être perçue à travers celle des conductivités électriques (BRION, 1976). La méthode utilisée (TOUBAL, 1998), a consisté à exécuter à l'aplomb d'une même station, plusieurs sondages électriques dans des directions différentes et à porter sur un même diagramme la valeur de la résistivité apparente obtenue pour chaque direction, et pour une même longueur d'émission AB. La résistivité apparente correspondant à un dispositif Schlumberger s'écrit :

$$\rho_a = \pi \cdot a^2 \cdot \frac{E_s}{I} = \frac{\rho_m}{[\lambda^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta]^{1/2}} \quad (1)$$

Avec: E_s = composante du champ électrique suivant la direction AB,

$\rho_m = \sqrt{\rho_t \cdot \rho_l}$ résistivité moyenne,

$\lambda = \sqrt{\rho_t / \rho_l}$ coefficient d'anisotropie,

θ angle que fait le quadripôle avec l'axe x portant la résistivité transversale. La variation de résistivité apparente en fonction de l'orientation du dispositif permet de déterminer la direction présumée d'anisotropie qui, en vertu du paradoxe de l'anisotropie, devrait correspondre à l'axe des résistivités maxima (HABBERJAM, 1075).

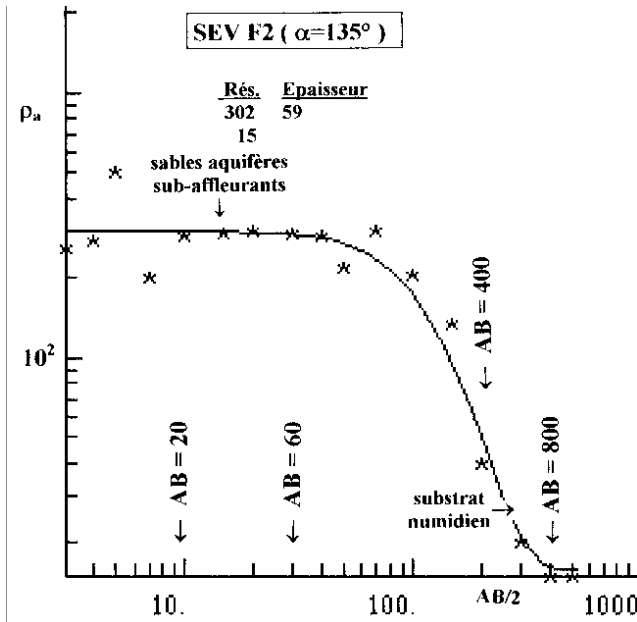


Fig. 3 : Exemple de SEV paramétrique

Les diagrammes électriques présentent un aspect similaire caractérisé en particulier par la présence d'un axe unique d'allongement ainsi que par une variation très nette de la direction d'anisotropie avec la profondeur (Fig. 5.a).

Dans le secteur oriental la nappe est sub-affleurante et une longueur d'émission de 60 mètres impliquant des résistivités variant entre 220 à 330 $\Omega.m$ permet une exploration adéquate de la couche saturée (Fig.3).

L'ensemble des mesures faites pour cette longueur d'émission montre que les résistivités maxima s'orientent généralement selon les directions N 101 et N 124° (fig. 4a et 5.d). En admettant une erreur azimutale maxima de 22°, les deux directions précitées peuvent somme toute être assimilées à une direction unique d'anisotropie sub-parallèle à l'axe des perméabilités maxima du modèle de PAPADOPOULOS (1965) (fig. 5.a et 5.d). Les Figures 4.a, 5.d et 5.e montrent enfin que cette même direction est conforme à l'orientation générale

des amoncellements dunaires. L'analogie électrique semble donc «jouer» et l'axe des résistivités apparentes maxima matérialise précisément la direction suivant laquelle les résistivités réelles atteignent leurs valeurs minima.

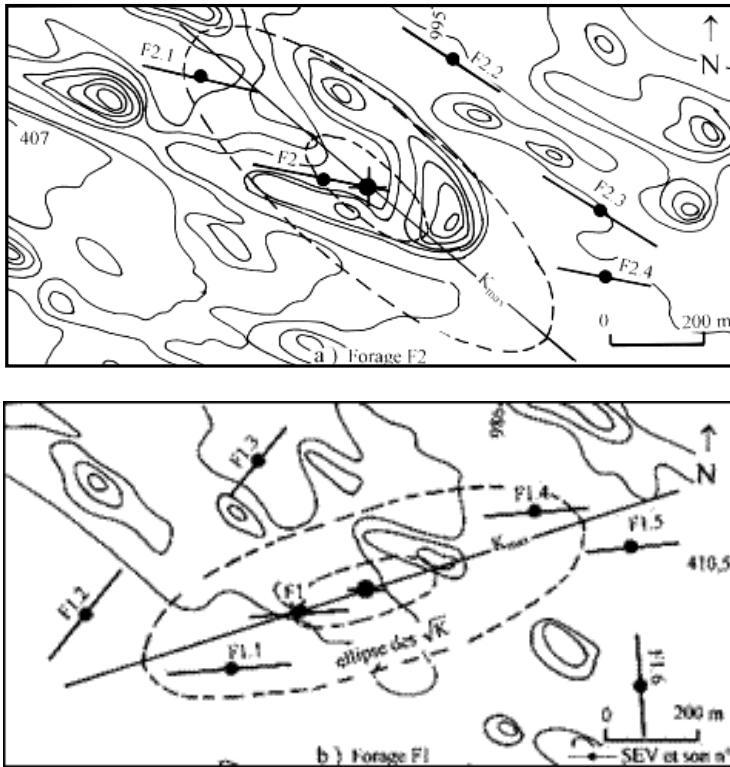


Fig. 4 : Anisotropie électrique et orientation des dunes.

Pour des longueurs AB de 400 puis de 800 mètres (Fig. 3), des valeurs de résistivité apparente variant de 10 à 30 Ω .m montrent que le substratum Numidien est largement atteint; Les diagrammes électriques établis pour de telles longueurs d'émission révèlent une réorientation de l'anisotropie électrique selon une direction NW - SE, que l'on pourrait attribuer à l'intense fracturation affectant le Numidien dans cette direction (Fig. 5.a et 5.c).

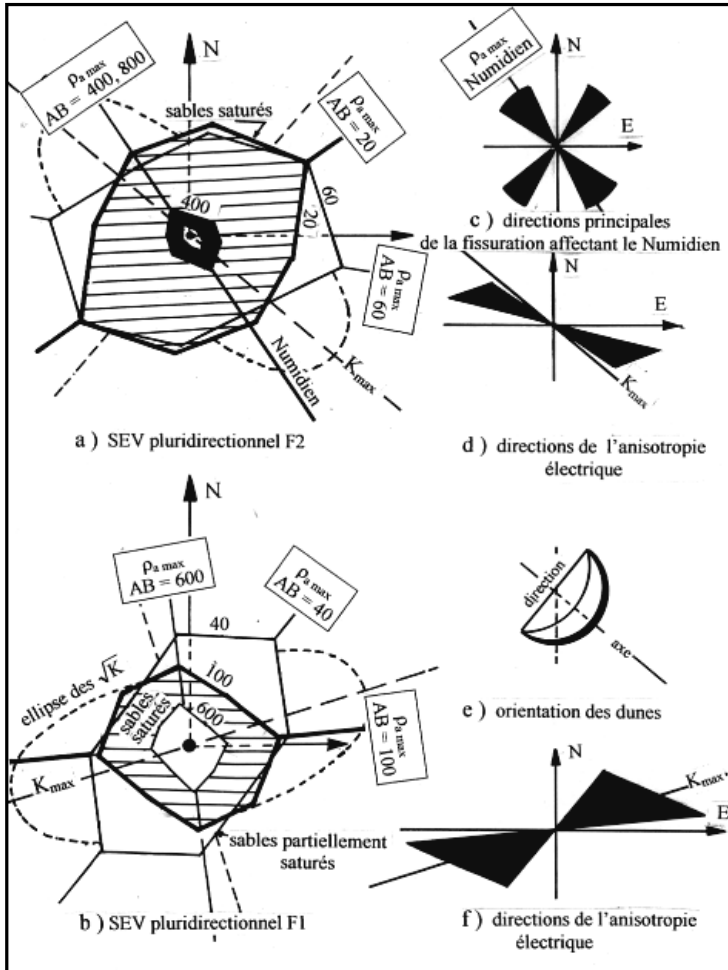


Fig. 5 : Anisotropie des sables éoliens. Synthèse des principaux résultats.

Dans le secteur central du massif dunaire, le parallélisme entre directions électriques (N 40 à 85°) et directions des perméabilités maxima (N 74°) paraît évident (Fig. 4.b, 5.b et 5.f), mais à la différence du secteur oriental, les directions d'anisotropie sont ici orthogonales à l'orientation générale des dunes et des corps argileux qui leur sont associés (N 30 à 50°).

Dans ce secteur, les modèles hydrodynamique et géophysique se démarquent donc carrément du schéma géologique. On remarque par ailleurs que la direction prédominante N 85° se confond avec le tracé de la crête hydraulique majeure qui jalonne le massif dunaire selon une direction ENE / WSW (Fig.1).

On notera que cette direction principale d'anisotropie se rapporte justement aux sondages électriques situés sur la crête hydraulique (F1, F1.1, F1.4, F1.5, fig. 4.b); Au fur et à mesure que l'on s'éloigne de cette ligne, les directions électriques s'orientent progressivement vers le Nord (N 40° pour F1.2 et F1.3 situés à 100 et 300 m puis carrément NS pour le SEV F1.6 situé à 450 m de la ligne). La ligne de partage des eaux souterraines constituerait selon toute logique un axe à la faveur duquel la perméabilité des terrains se serait considérablement accrue. L'écoulement des eaux souterraines sous de très forts gradients aurait favoriser l'apparition de phénomènes secondaires tels le creusement de micro-chenaux, le décolmatage, et autres effets induits par l'érosion souterraine.

III. CONCLUSION

La démarche entreprise a permis de faire une approche de l'anisotropie qui du reste influe sur les transferts de fluide dans les milieux poreux. Malgré les faiblesses inhérentes à tout modèle simplifié, bâti pour représenter une réalité beaucoup plus complexe, la méthodologie adoptée aboutit globalement à des résultats qui mériteraient d'être confirmés par une expérimentation plus élaborée.

La méthode électrique constitue incontestablement la méthode la moins coûteuse et la plus pratique pour la détermination de l'anisotropie des milieux aquifères et son emploi gagnerait à être généralisé dans les études de réservoirs;

A cet égard, deux résultats importants semblent se dégager:

- Comportement anisotrope du massif dunaire de Bouteldja; l'ensemble des mesures exprime l'existence de trois perméabilités principales différentes: verticale, horizontale longitudinale, enfin horizontale transversale.
- Possible liaison existant entre direction d'anisotropie électrique et direction des perméabilités principales. Cette liaison, si elle venait à être confirmée par des mesures plus nombreuses, offrirait au Géophysicien de nouvelles perspectives aussi bien dans le pronostic d'exploitation des réservoirs souterrains, que dans toutes les études qui requièrent la connaissance précise de la distribution des perméabilités ainsi que la direction réelle de l'écoulement souterrain (recharge artificielle, pollution, calcul de réserves dynamiques...).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BRION M. (1976). L'étude du phénomène de l'anisotropie électrique appliquée au milieu carbonaté fracturé. Thèse de doctorat 3^{ème} cycle, Université des Sciences et Technique du Languedoc, Montpellier, 140 p.
- HABBERJAM G.M. Apparent resistivity, anisotropy and stikes measurements. Geophysical prospecting, vol. 23, 211-247.
- NEUMAN S.P. (1975). Analysis of pumping tests data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed response. Water Resources Research, vol. 11, n° 2, pp. 329-342.
- PAPADOPOULOS I.J. (1965). Non steady flow to well in an infinite anisotropic aquifer. A.I.S.H., actes du colloque de Dubrovnik «Hydrologie des roches fissurées», 21-31.
- SCHNEEBELI G. (1978). Hydraulique souterraine. Editions Eyrolles, Paris, 362 p.
- TOUBAL A. C. (1983). Etude hydrogéologique du massif dunaire de Bouteldja, Thèse de doctorat 3^e cycle. Université des Sciences et de la Technologie de Bab Ezzouar, 500 p.
- TOUBAL A. C. (1998). Apports de la Géophysique à l'étude des problèmes d'hydrodynamique et d'invasion marine en milieu souterrain. Exemple des plaines d'Annaba de la Mitidja et de la Baie d'Alger. Thèse doctorat ès Sciences, I.S.T.-U.S.T.H.B., 226 p.