

## POTEAUX MIXTES EN TUBE CARRÉ ET CIRCULAIRE REMPLIS DE BÉTON SOUS SOLLICITATION AXIALE ET SOLLICITATIONS COMBINÉES

M. MIMOUNE\*, F.Z. MIMOUNE\* et A. DJEBABLAH\*\*

\* Professeur. \*\* Magister.

Laboratoire de Mécanique des Sols et des Structures. Université Mentouri, Constantine.

Résumé : Dans cet article, on présente une étude paramétrique sur des poteaux mixtes en tube d'acier circulaire ou carré remplis de béton. Un programme de calcul en fortran a été établi afin d'étudier l'influence de plusieurs paramètres dont l'effet du remplissage en béton, le type de section, l'élanement du poteau, et les caractéristiques mécaniques des matériaux. Cette étude est menée selon la méthode de calcul des poteaux de l'EC4 en compression axiale et en compression-flexion.

**Mots clés :** acier-béton, élanement, interaction, poteau mixte, sollicitation, tube.

## 1. Introduction

Les poteaux mixtes composés de tubes en acier remplis de béton sont de plus en plus employés dans des applications structurales de grande importance dans le monde. Ce type d'élément peut offrir d'énormes avantages, allant de la résistance et la ductilité aux aspects d'esthétique et de sécurité [1], [2],[3], [4], [5], [6], [7], [8]. Les éléments en acier ont l'avantage d'offrir de très hautes résistances à la traction et de plages de ductilité importantes, alors que les éléments en béton [9] ont l'avantage des grandes résistances en compression et de rigidité. Leur association permet de combiner leurs avantages et d'obtenir des éléments mixtes possédant des résistances très élevées. Dans le cas des poteaux, on peut distinguer deux configurations : les poteaux mixtes en profilé partiellement ou totalement enrobés (figure 1), qui feront l'objet d'étude dans un prochain article, et les poteaux mixtes en tube rempli de béton (figure 2), où la section du tube peut être circulaire, carrée ou rectangulaire. Ce dernier type offre plusieurs avantages par rapport au premier, parmi les plus importants : un renforcement extérieur au béton fourni par le tube en acier et la **résistance aux charges élevées par le tube en acier** avant que le béton ne soit coulé. Cet article est consacré à une étude paramétrique basée sur le règlement Européen de constructions mixtes acier-béton.

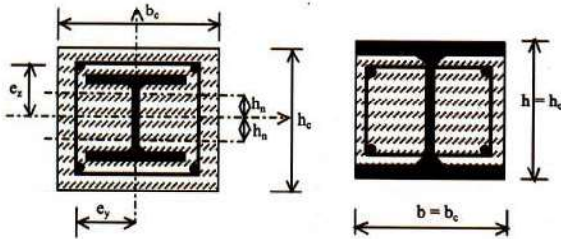


Figure 1. Exemple des sections transversales des poteaux partiellement ou totalement enrobés de béton.

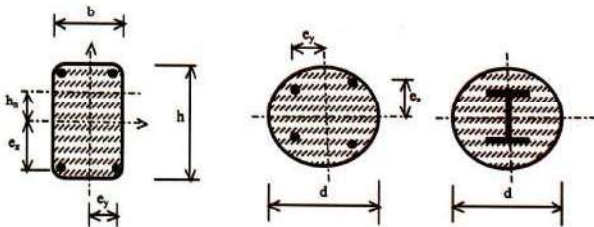


Figure 2. Exemple des sections transversales des poteaux en tube rempli de béton.

## 2. Méthodes de calcul selon L'EC 4

L'EUROCODE 4 [11] propose deux méthodes de calcul. La première est une méthode générale

qui exige la prise en compte des effets du second ordre et des imperfections, applicable à des sections de poteaux dissymétriques et à des poteaux de section variable sur leur hauteur. Elle nécessite l'utilisation d'outil informatique. La deuxième, est une méthode simplifiée, utilisant les courbes européennes de flambement des poteaux en acier [10] tenant compte implicitement des imperfections qui affectent ces poteaux. Cette méthode est limitée au calcul de poteau mixte de section uniforme sur toute la hauteur et doublement symétrique.

### 1.1 Hypothèses de calcul

L'application de la méthode de calcul considère qu'il y a interaction totale entre la section d'acier et la section de béton jusqu'à la ruine. Les imperfections géométriques et structurales sont prises en compte également. On considère également que les sections planes restent planes lors de la déformation du poteau. Des limites sont imposées en ce qui concerne l'élançement des parois de la section du tube [13], [14], [15]. Enfin, la résistance au cisaillement à l'interface entre l'acier et le béton ne peut dépasser 0,4 MPa.

### 1.2 Domaines d'applicabilité de la méthode

Le domaine d'application concerne les sections transversale constantes et doublement symétriques sur la toute la hauteur du poteau. La contribution de l'acier est évaluée par le coefficient  $\delta$  qui doit être compris entre 0,2 et 0,9, il se calcule par :

$$\delta = \frac{A_a \cdot f_y}{N_{pl.Rd}} \quad (1)$$

D'autres limitations sont encore exigées qui ont trait à l'élançement réduit du poteau qui ne doit pas dépasser la valeur de 2,0. L'aire de la section transversale de l'armature longitudinale ne doit pas dépasser 4% et doit être au moins égale à 0,3 % de l'aire de béton pour les poteaux partiellement et totalement enrobés. Pour les poteaux de tube rempli de béton, les armatures ne sont pas nécessaires.

### 2.3 Résistance des poteaux mixtes sollicités à la compression axiale.

Pour le calcul de la résistance du poteau, il suffit d'additionner les résistances plastiques des éléments constitutifs de la section mixte.

Dans le cas d'un tube rempli de béton, la résistance est donnée par l'expression suivante :

$$N_{pl.Rd} = A_a \cdot \frac{f_y}{\gamma_{Ma}} + A_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} + A_s \cdot \frac{f_{sk}}{\gamma_s} \quad (2)$$

Pour les profils creux circulaires remplis de béton,

avec un élancement réduit ne dépassant pas 0.5 et le plus grand moment fléchissant de calcul admis, calculé par la théorie du premier ordre,  $M_{\max, sd}$  ne doit pas dépasser  $N_{sd} \cdot d/10$ .

La résistance plastique de compression est donnée par :

$$N_{pl.Rd} = A_a \cdot \eta_2 \cdot \frac{f_y}{\gamma_{Ma}} + A_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot \left[ 1 + \eta_1 \cdot \frac{t}{d} \cdot \frac{f_y}{f_{ck}} \right] + A_s \cdot \frac{f_{sk}}{\gamma_s} \quad (3)$$

$$\text{Avec : } e = \frac{M_{sd}}{N_{sd}} \quad (4)$$

• Pour  $0 < e \leq d/10$  :

$$\eta_1 = \eta_{10} \cdot \left( 1 - 10 \cdot \frac{e}{d} \right) \quad \eta_2 = \eta_{20} + (1 - \eta_{20}) \cdot 10 \cdot \frac{e}{d} \quad (5)$$

• Pour  $e > d/10$  :  $\eta_1 = 0$   $\eta_2 = 1$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{10} = 4.9 - 18.5\bar{\lambda} + 17\bar{\lambda}^2 \\ \eta_{10} \geq 0 \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \left\{ \begin{array}{l} \eta_{20} = 0.25(3 + 2\bar{\lambda}) \\ \eta_{20} \leq 1 \end{array} \right.$$

(6)

Le poteau mixte présente une résistance suffisante au flambement si, pour les deux axes, la condition suivante est satisfaite :

$$N_{sd} \leq \chi N_{pl.Rd} \quad (7)$$

Pour le calcul du coefficient de réduction, on peut se reporter à la référence [11].

#### 2.4 Poteaux mixtes sollicités à la compression et à la flexion uni axiale [11] :

Pour chacun des axes de symétrie, il est nécessaire de procéder à une vérification indépendante en raison des différentes valeurs d'élancement, de moments fléchissant et de résistance à la flexion pour les deux axes.

Pour ne pas alourdir le texte, nous n'allons pas présenter les détails de la méthode de calcul. Le lecteur pourra se reporter aux références [14] et [15]. Les imperfections sont à prendre en compte que pour le plan où la ruine est susceptible de se produire. Pour l'autre plan de flexion, il est inutile d'en tenir compte. Si l'on a des doutes sur le plan de ruine, on se place en sécurité en tenant compte des imperfections dans les deux plans.

L'élément structural est considéré résistant si :

$$\begin{aligned} M_{y, sd} &\leq 0,9 \cdot \mu_y \cdot M_{pl, y, Rd} \\ M_{z, sd} &\leq 0,9 \cdot \mu_z \cdot M_{pl, z, Rd} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{et } \frac{M_{y, sd}}{\mu_y \cdot M_{pl, y, rd}} + \frac{M_{z, sd}}{\mu_z \cdot M_{pl, z, rd}} \leq 1.0 \quad (9)$$

### 3. Etude paramétrique.

Dans cette étude, nous allons montrer l'influence des différents paramètres qui rentrent dans la formulation de la capacité portante des sections mixtes, sur le comportement mécanique des poteaux mixtes acier-béton. Cette étude est basée sur la méthode EC4 [11], citée ci-dessus, et appliquée sur des poteaux de longueur courante de 3,5m. Ces éléments sont étudiés sous charge axiale de compression et sous sollicitation combinée en compression-flexion.

Deux types de sections creuses ont été choisis : les tubes rectangulaires et les tubes circulaires en acier S.235, S.275 et S.355. Les tubes sont remplis de béton armé ou non de résistance allant de 30 à 50 MPa. Les caractéristiques géométriques des profils employés sont données dans les tableaux suivants :

Dimension D (mm)	t mm	Aa mm <sup>2</sup>	I mm <sup>4</sup>	Wpl mm <sup>3</sup>
101,6	3,6	1108	1336000	34590
114,3	3,6	1252	1920000	44130
139,7	4	1705	3929000	73680
219,1	5,9	3949	22440000	268000
273	6,3	5278	46960000	448200
355,6	8	8736	132000000	966900
406,4	8,8	10992	217310000	1391000

Tableau 1 : caractéristiques géométriques des tubes circulaires.

Dimension hxb	t mm	R mm	Aa mm <sup>2</sup>	I <sub>yy</sub> mm <sup>4</sup>	W <sub>pl</sub> mm <sup>3</sup>
150x150	8	18,4	4346	14240000	227600
180x180	8	18,4	5306	25640000	337700
200x200	8	18,4	5946	35890000	423100
300x300	10	23	11290	115600000	1216000
250x250	8	18,4	7546	72640000	678500

Tableau 2 : caractéristiques géométriques des tubes carrés.

### 4. Organigrammes de calcul des différents types de sections mixtes

Un programme de calcul a été établi en Fortran [1] pour traiter les différents calculs en se basant sur la méthode de l'Eurocode 4. Les organigrammes de calcul correspondants aux deux types de sections de poteaux sont présentés ci-dessous :

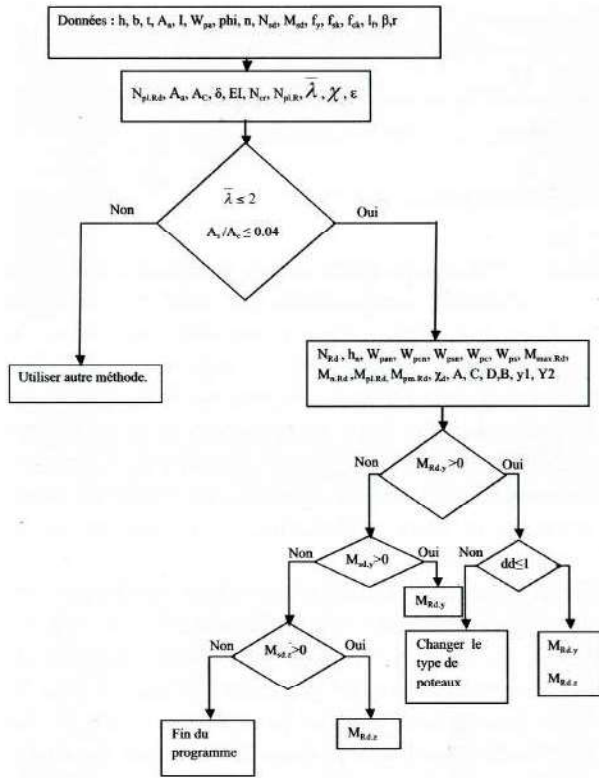


Figure 3 : Organigramme de calcul des sections en tube rectangulaire rempli de béton.

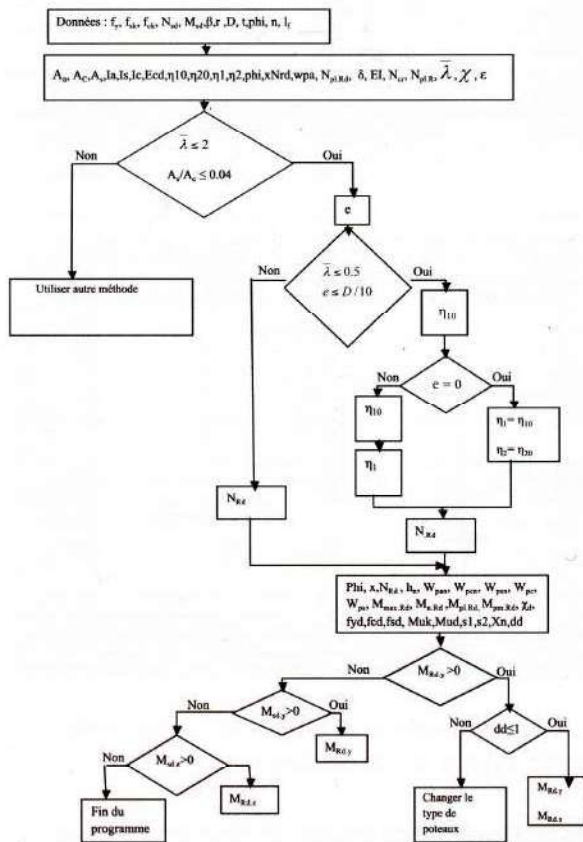
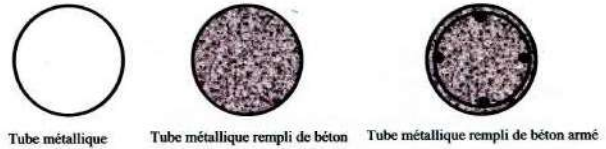


Figure 4 : Organigramme de calcul des sections en tube circulaire rempli de béton.

### 5. Effet du remplissage en béton des profilés tubulaires en béton

Afin d'étudier l'effet du remplissage sur la résistance axiale en compression, nous allons comparer les poteaux en tube d'acier seul avec les poteaux en tube d'acier rempli de béton ou de béton armé. Les figures 5 et 7 illustrent les sections de poteaux étudiés.



Tube métallique Tube métallique rempli de béton Tube métallique rempli de béton armé

Figure 5 : Sections de poteaux de tube circulaire étudiées.

Les poteaux mixtes étudiés présentent un élancement inférieur à 0.5. Les tubes sont en acier S.235, Le béton de remplissage présente une contrainte  $f_{ck} = 30$  MPa et pour l'acier d'armature  $f_{sk} = 420$  MPa. Les résultats montrent que les résistances axiales des poteaux en tube circulaire rempli de béton représentent quasiment trois fois la résistance pour les sections métalliques seules ( $D/t > 35$ ). L'apport des armatures est également positif, mais n'entraîne pas une augmentation spectaculaire mais remarquable, particulièrement, pour les sections avec les rapports  $D/t$  élevés.

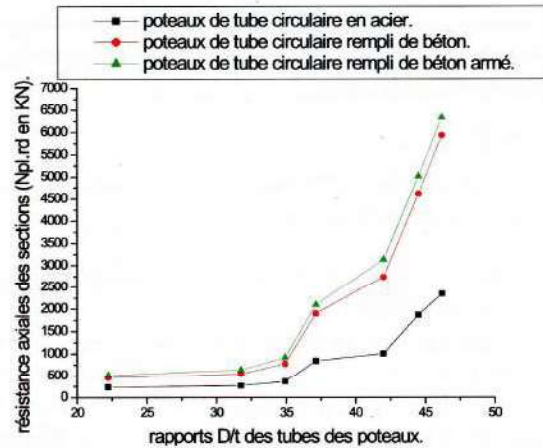
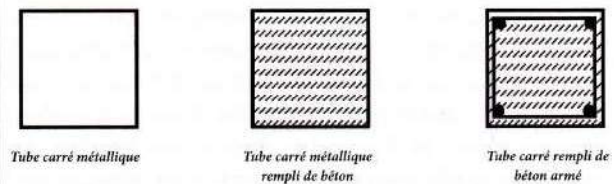


Figure 6 : Résistances axiales en compression des sections circulaires en fonction du rapport D/t.



Tube carré métallique Tube carré métallique rempli de béton Tube carré rempli de béton armé

Figure 7 : Sections de poteaux de tube circulaire étudiées.

On peut constater que les sections en tube carré rempli de béton armé ont également une résistance axiale à la compression plus importante que celle

de l'acier seul [17], [18]. La différence entre la résistance axiale sections mixtes et celle de la section métallique est très importante, notamment pour les poteaux dont le rapport  $b/t$  dépasse 23.

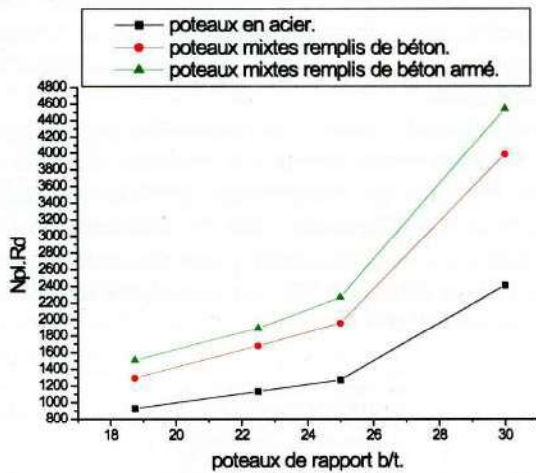


Figure 8 : Résistances axiales en compression des sections en tube carré en fonction du rapport  $b/t$ .

## 6. Influence de la nuance de l'acier du tube sur la résistance axiale en compression

Pour les sections circulaires, jusqu'à un rapport  $D/t = 35$ , la nuance d'acier semble ne pas influencer la résistance en compression, vraisemblablement en raison de la faible épaisseur du tube. Pour les rapports  $D/t > 35$ , l'augmentation de la nuance améliore légèrement la résistance axiale des sections de poteaux mixtes, notamment pour l'acier S.355.

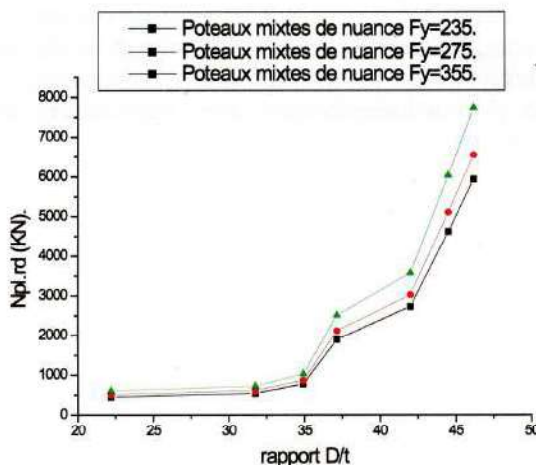


Figure 9 : Résistances axiales en compression des poteaux en tube circulaire remplis de béton en fonction du rapport  $D/t$ . Influence de la nuance d'acier du tube.

Contrairement au cas précédent, on constate que la nuance d'acier du tube carré influence significativement la résistance en compression axiale notamment pour les rapports  $b/t > 25$ .

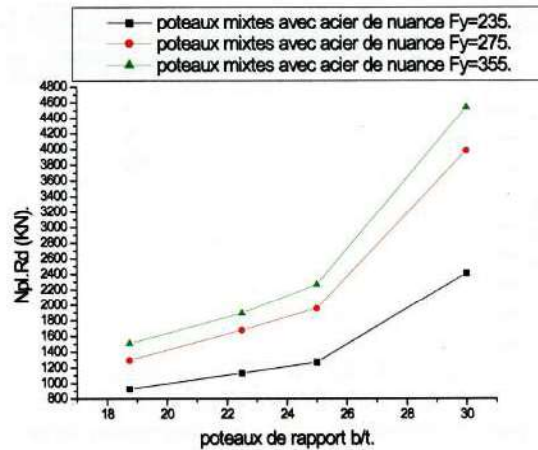


Figure 10 : Résistances axiales en compression des sections en tube carré remplies de béton en fonction du rapport  $b/t$ . Influence de la nuance d'acier du tube.

## 7. Influence de la résistance du béton sur la résistance axiale en compression du poteau

Les résultats obtenus montrent que la classe du béton n'a pas d'incidence sur la résistance en compression axiale. L'effet de frettage procuré par le tube a probablement permis aux différentes classes de béton de se comporter de la même manière. La différence enregistrée est à attribuer au supplément d'acier suite à l'augmentation du rapport  $D/t$ .

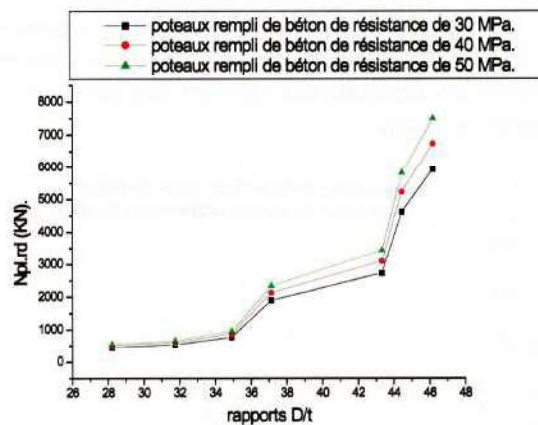


Figure 11 : Résistances axiales en compression des sections circulaires remplies de béton en fonction du rapport  $D/t$ . Influence de la classe du béton.

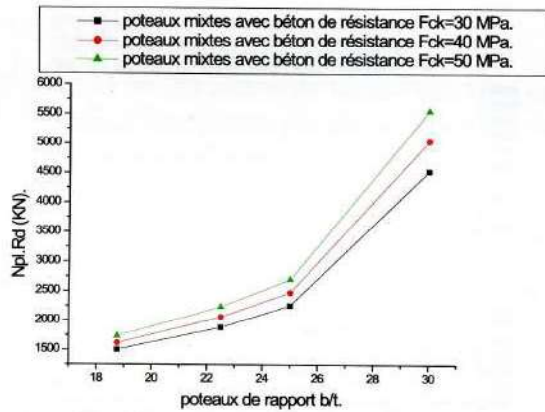


Figure 12 : Résistances axiales en compression des sections carrées remplies de béton en fonction du rapport b/t. Influence de la classe du béton.

La lecture des valeurs obtenues dans le cas des tubes carrés montrent que la résistance axiale en compression est sensiblement influencée par la classe du béton contrairement aux sections circulaires quelque soit le rapport b/t.

## 8. Influence de la forme de la section transversale sur la résistance en compression axiale

La comparaison des résistances axiales en compression, obtenues pour des sections tubulaires carrées et circulaires remplies de béton, figure 13, ne fait ressortir quasiment aucune différence, si ce n'est une légère variation pour le rapport b/t = 30. Les études expérimentales [7], [16] ont montré que les tubes circulaires remplis de béton donnent de meilleurs résultats par rapport aux tubes carrés remplis de béton.

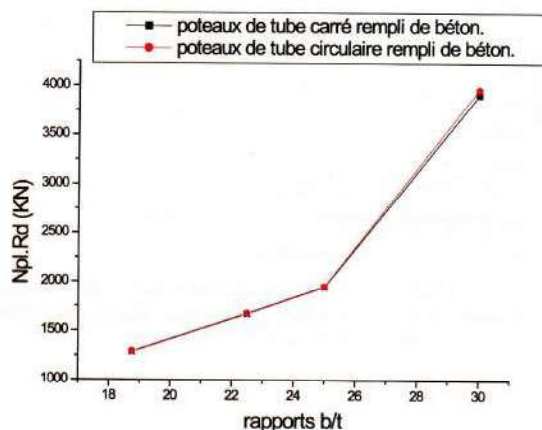


Figure 13 : Comparaison entre les sections circulaires et les sections en tube carré.

## 9. Comportement en compression et flexion combinées

Les mêmes poteaux avec les mêmes longueurs et caractéristiques des matériaux ont été étudiés sous la combinaison de la compression et de la flexion, afin de tracer les courbes d'interaction moment-effort normal.

Les résultats du calcul sont représentés par la figure 14. On peut remarquer que la présence d'armature dans le béton de remplissage améliore les résistances particulièrement pour les élancements D/t supérieurs à 42. Par contre pour des élancements plus faibles ( $D/t = 34.92$ ), les armatures semblent ne pas donner d'effet.

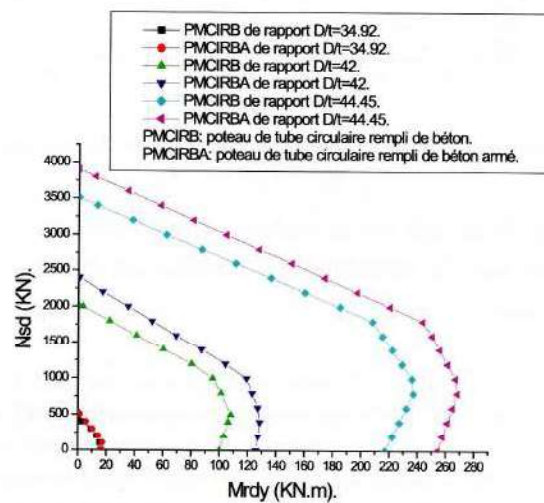


Figure 14 : Interaction Moment - Effort normal pour les sections circulaires remplies de béton.

Quelque soit l'élancement du poteau carré, la présence d'armature semble influencer les résistances. En effet, la figure 15 montre clairement le rôle des armatures dans l'amélioration de la résistance, qui croît proportionnellement avec l'élancement des poteaux.

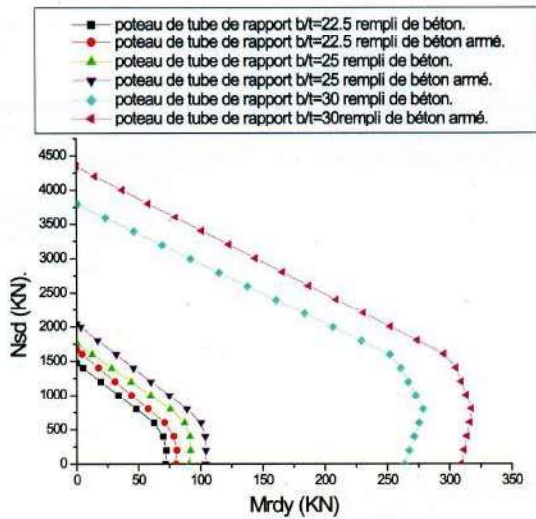


Figure 15 : Interaction Moment - Effort normal pour les sections en tube carré rempli de béton.

En ce qui concerne l'influence de la résistance du béton et de l'acier de construction, les résultats montrent que l'effet des caractéristiques des matériaux est amplifié avec l'augmentation de l'élanement du poteau et évidemment avec l'augmentation de la nuance d'acier de construction et de la résistance du poteau. On donne à titre d'exemple la figure 16.

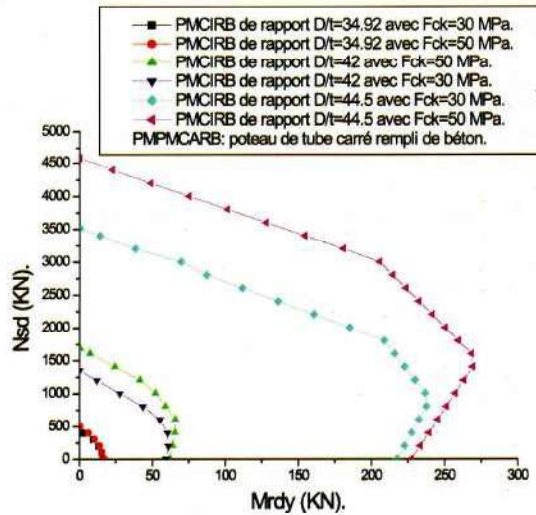


Figure 16 : Interaction moment - effort normal pour un tube circulaire rempli de béton.

La comparaison entre les poteaux en tube circulaire et en tube carré traduite sur la figure 17, montre une superposition des courbes d'interaction pour les deux types de sections mixtes. Dans le cas de section d'acier seul, la section circulaire donne de meilleurs résultats par rapport à la section en tube

carré. La différence de comportement est encore plus importante si l'on compare le tube rempli de béton avec un profilé métallique totalement enrobé. La figure 18 illustre clairement cette différence qui est en faveur du tube rempli de béton. Les photos de la figure 19 donnent un aperçu sur le mode de ruine des poteaux mixtes en profilé totalement enrobé et en tube rempli de béton. Cette figure est donnée à titre d'illustration pour montrer l'importance de l'enrobage du béton par le tube d'acier. Les résultats d'essais, effectués sur des poteaux courts et relativement élancés, comparés avec le code Algérien et cinq codes de calcul étrangers feront l'objet d'un prochain article.

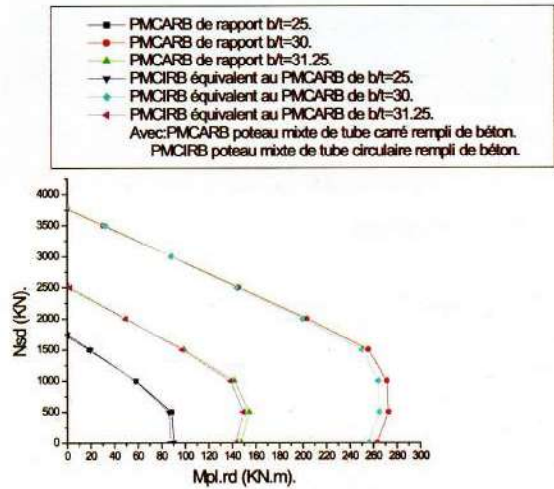


Figure 17 : comparaison entre les sections mixtes en tube circulaire et en tube carré.

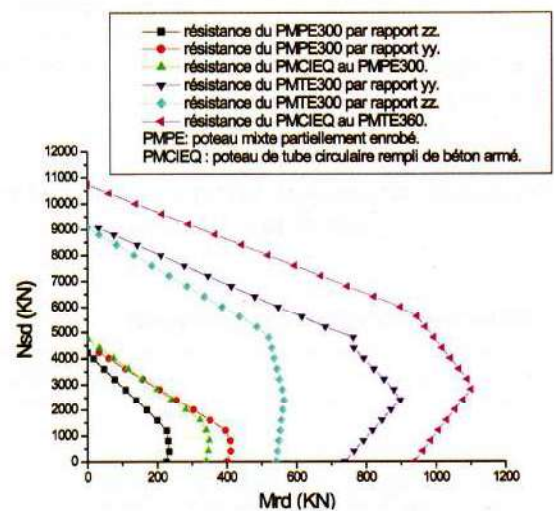


Figure 18 : Courbes d'interaction de tube rempli de béton et profilé totalement enrobé de béton.



Figure 19 : Mode de ruine des poteaux mixtes acier-béton [19].

## 10. Conclusion

L'étude numérique menée selon la méthode de calcul des poteaux de l'EC4 en compression axiale et en compression-flexion a montré que le comportement des poteaux mixtes acier-béton est sensiblement influencé par plusieurs paramètres, notamment leurs géométries et élancements et les caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs, la nature des sollicitations. La géométrie de la section a une influence non négligeable, particulièrement en compression axiale. Les élancements  $D/t$  et  $b/t$  doivent être pris en compte afin de ne pas affaiblir les parois du tube et par conséquent sa résistance, malgré la présence du béton. La forme géométrique de la section, circulaire ou carrée, semble ne pas influencer la résistance en compression axiale mais a un effet considérable en sollicitations combinées en flexion-compression. Les caractéristiques mécaniques favorisent la résistance quelque soit la nature de la sollicitation.

## 11. Références bibliographiques

- [1] Djebablah A., Mimoune F.Z. Etude du comportement mécanique des poteaux mixtes acier-béton sous sollicitations combinées. Mémoire de magister 2008. Université de Sétif.
- [2] Zhao-Hui Lu, Yan-Gang Zhao. Suggested empirical models for the axial capacity of circular CFT stub columns. J. of Contr. Steel Research. 66 (2010) 850-862.
- [3] X. dai, D. Lam. Numerical modeling of the axial compressive behavior of short concrete-filled elliptical steel columns. J. of Contr. Steel Research. 66 (2010) 931-942.
- [4] Qing Quan Liang. High strength circular concrete-filled steel tubular slender beam-columns, Part I: Numerical analysis. J. of Contr. Steel Research. 67 (2011) 164-171.
- [5] Qing Quan Liang. High strength circular concrete-filled steel tubular slender beam-columns, Part II: fundamengtal behavior. J. of Contr. Steel Research. 67 (2011) 172-180.
- [6] Manojkmar V. Chitawadagi, Mattur C. Narasimhan, S.M. Kulkarni. Axial capacity of rectangular concrete-filled steel tube columns – DOE approach. Constr Build Mater 24 (2010) 585-595.
- [7] Y.C. Wang. Tests on slender composite columns. J. of Contr. Steel Research. 49 (1999) 25-41
- [8] Mohanad Mursi, Brian Uy. Strength of slender concrete filled high strength steel box columns. J. of Contr. Steel Research.60 (2004) 1825-1848.
- [9] Eurocode 2, EN 1992-1-1 Eurocode 2 – Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2005.
- [10] Eurocode 3, EN 1993-1-1 Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2005.
- [11] Eurocode 4, EN 1994-1-1 Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2005.
- [12] Johansson M. The Efficiency of Passive Confinement in CFT Columns. *Steel and Composite Structures*, Vol. 2, No. 5, October 2002, Techno-Press, 379-396.
- [13] J. M Aribert – Construction mixte acier-béton \_ Calcul des poteaux mixtes. Techniques de l'ingénieur. C 2 562.
- [14] A. Albitar, Ph. Beguin et J.P. Grimault – Application de l'Eurocode 4. Dimensionnement des poteaux mixtes. Première partie : Poteaux sollicités en compression axiale. Revue CTICIM, N°1-1996. pp 87-103.
- [15] A. Albitar, Ph. Beguin et J.P. Grimault – Application de l'Eurocode 4. Dimensionnement des poteaux mixtes. Deuxième partie : Poteaux sollicités en compression et flexion combinées. Revue CTICIM, N°2-1996. pp 49-72.
- [16] G. Giakoumelis, D. Lam – Axial capacity of circular concrete-filled tube columns. J. of Contr. Steel Research. 60 (2004) 1049-1068.
- [17] M. Mimoune - Design and behavior of steel-concrete composite columns according to fire code. Symposium Disaster's Management and safety of Building in Arab Countries. 29 mars – 02 avril 2008. Riyadh – Saudi Arabia.
- [18] M. Mimoune - Design of steel-concrete composite columns subjected to axial compression. Fourth Saudi Technical Conference and Exhibition. STCEX 2006. 2 – 6 january 2006. Riadh – Saudi Arabia.
- [19] Mimoune M., Mimoune F. Z., Ait Youcef M. - Axial capacity of circular concrete-filled steel tube columns. World Journal of Engineering. 8(3) (2011) 229-236.



## IMPACT DU REJET DE LA SAUMURE DES STATIONS DE DESSALEMENT SUR L'ENVIRONNEMENT

M.BESSENASSE<sup>1</sup> - A.GUENDOZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université SAAD Dahlab (Blida) – Algérie. e-mail : mbessenasse@yahoo.fr

<sup>2</sup> Université SAAD Dahlab (Blida) – Algérie. e-mail : ah\_guendouz@yahoo.fr

### RESUMÉ :

L'Algérie a vécu plus d'une décennie la sécheresse, les ressources conventionnelles en eau étaient insuffisantes pour subvenir aux besoins de la population, ce qui a incité les autorités algériennes à chercher d'autres ressources pour garantir l'alimentation en eau potable de cette population. La solution la plus adaptée et qui ne dépend pas des aléas climatiques, était le dessalement d'eau de mer. Le dessalement de l'eau de mer en Algérie revêt un caractère stratégique : il remplacera les ressources naturelles dans la majorité des villes du nord algérien. Quel que soit le procédé utilisé, toutes les stations de dessalement produisent d'importantes quantités de saumure. Les statistiques parlent de centaines de milliers de tonnes de saumure qui sont rejetées quotidiennement dans la mer depuis des stations de dessalement. Les techniques de dessalement peuvent présenter un risque environnemental : les rejets de saumure, d'eau chaude, de produits chimiques ne doivent pas contaminer l'écosystème. Le plus urgent est la gestion de ces impacts vu les montants d'investissements pour ces projets. Les stations de dessalement doivent désormais inclure les coûts des traitements de ces rejets en amont.

**Mots- clés :** Dessalement, Saumure, Environnement, Traitement, Pollution.

### ABSTRACT :

Algeria has lately experienced more than a decade of severe drought conditions that created hydric stress. Conventional water resources were thus not sufficient enough to ensure potable water allocation to the populations at acceptable levels. In this regard, high authorities have thought of other means to address that water shortage mainly through desalination. The latter is a solution that is not dependent upon climate and the hazard of lack of precipitation. Desalination in Algeria is regarded as a strategic solution as it will surely replace natural water resources in the great majority of coastal cities in the northern part of the country. Whatever the processes in use, desalination plants produce large amounts of wastes essentially in the form of very salty mixtures (brines). In addition, hot water and chemicals can also be rejected. Those effluents could be considered as an environmental contamination risk to the immediate and the close ecosystem. It is therefore of utmost importance to deal with the downstream impact of such rejects. Considering the huge amounts of money invested in this field, the priority should also be put on prevention and remediation measures whose cost should be imperatively included in the global cost of such projects.

**Key words :** desalination, brines, environment, remediation, pollution.

## 1. INTRODUCTION:

Nous sommes aujourd'hui 6 milliards sur Terre et en 2050, nous serons 9 milliards, concentrés à 70 % dans les villes. La pression sur les ressources planétaires en sera d'autant plus importante alors que nous observons déjà des signes de pénurie avec des tensions fortes sur les marchés des matières premières. L'intense activité humaine de ces 100 dernières années s'est appuyée sur l'énergie fossile, entraînant un changement climatique qui menace directement notre mode de vie. La double croissance économique et démographique de notre planète a pour conséquence une pression importante sur l'ensemble des ressources naturelles. Jamais les tensions sur les matières premières n'ont été aussi fortes.

Avec plus de 2.4 milliards de personnes vivant près d'une mer, le dessalement de l'eau de mer apparaît comme une alternative, qui alimente déjà plus de 200 millions d'habitants. Plus de 1% de la production d'eau potable mondiale est produite par dessalement.

L'apport en eau par des moyens non conventionnels a été dominé pendant ces dernières années par le développement de nouvelles techniques de dessalement des eaux de mer basés sur les procédés thermiques ou les procédés non thermiques ou membranaires et sont devenus un enjeu économique pour pallier au problème de la disponibilité des ressources en eau et le stress hydriques, comme c'est le cas en Algérie.

Nous nous sommes intéressés dans ce travail à étudier l'influence des rejets liquides issus du dessalement, entre autre la saumure sur la composition de l'eau d'appoint et son impact sur l'environnement et le développement durable.

## 2. LE DESSELEMENT EN ALGERIE :

Pour pallier le manque d'eau potable dans le pays, l'Algérie a décidé de miser sur des usines de dessalement d'eau de mer. 43 usines est le nombre que les autorités comptent atteindre à l'horizon 2019 pour répondre aux besoins domestiques nationaux Ref [4].

Selon les prévisions du Centre de recherche de dessalement au Moyen-Orient (Medrec), l'Algérie est appelée ainsi à se classer derrière l'Arabie saoudite, les Emirats arabes unis et les USA. L'Algérie sera à l'abri grâce aux méga-stations qui sont ou seront réalisées d'ici à 2019 dont la plus grande

station de dessalement de la Maqta d'une capacité de production de 500 000 m<sup>3</sup>/j et plus de 30 stations d'une capacité allant de 2 500 à 500 000 m<sup>3</sup>/j, et produire plus de 2,5 millions de m<sup>3</sup>/j à travers ce vaste programme (voir le tableau 1)

Tableau N°1 : Programme de dessalement en Algérie Ref.[10]

Région	Nombre d'unités	Capacité (m <sup>3</sup> /j) en 2006	Capacité (m <sup>3</sup> /j) en 2010	Capacité (m <sup>3</sup> /j) en 2020 - 2030
Ouest	6	90 000	1 390 000	1 390 000
Centre	6		720 000	810 000
Est	4		150 000	380 000
Total	16	90 000	2 260 000	2 580 000

Quel que soit le procédé utilisé, toutes les stations de dessalement produisent d'importantes quantités de saumure. Les statistiques parlent de centaines de milliers de tonnes de saumure qui sont rejetées quotidiennement dans la mer depuis des stations de dessalement. Ces rejets hypersalins des stations effectués à proximité du rivage risquent de contaminer la nappe phréatique et de causer la perte d'espèces végétales.

Trois types de pollution peuvent être causés par le dessalement. Le premier type c'est le rejet des saumures concentrées, qui s'infiltrent dans le sol entraînant une pollution et perturbe l'écosystème marin. Le deuxième type, c'est les émissions des gaz à effet de serre découlant de la grande consommation d'énergie, impliquant le réchauffement climatique. La plupart des usines et surtout les plus grandes ont, en effet recours aux énergies fossiles telles que le gaz ou le pétrole pour leur fonctionnement. Le troisième type de pollution concerne les produits chimiques utilisés pour nettoyer les membranes des stations de dessalement opérant avec le mode d'osmose inverse, afin d'éviter les bio-salissures, la formation de tartre et autres nuisances notamment lors du prétraitement.

### 3. LE REJET DE LA SAUMURE :

Après le processus de dessalement, l'eau est séparée en deux parties :

- perméat (fraction de l'eau qui a été dessalée)
- concentrat (de concentration élevée et est rejeté à la mer)

Ce dernier contient une concentration en sel très élevée car il regroupe les quantités de sel qui se trouve dans l'eau d'entrée avant le processus de dessalement en plus des produits chimiques utilisés dans le prétraitement et l'entretien des installations.

Toutes les usines de dessalement utilisent des produits chimiques pour le prétraitement de l'eau d'alimentation ainsi que le post-traitement de l'eau produite. La plupart des produits sont utilisés avant tout comme agents biocides, antitartres, anti-salissures et anti-mousses, et ils finissent par

modifier la composition de la saumure concentrée. La présence de certains métaux, qui sont des produits de la corrosion du circuit, influent aussi sur la composition de la saumure concentrée.

Ces produits chimiques ne sont pas les mêmes pour les principaux procédés de dessalement, à savoir MSF et l'osmose inverse. Les phases de pré- et de post-traitement des procédés de production d'eau potable sont exposées sur le tableau 2.

L'eau saumure après dessalement est une eau du point de vue caractéristiques physico-chimiques (salinité, solides dissous (TDS), dureté et alcalinité, bilan ionique, température, pH, conductivité turbidité, concentration en gaz dissous tel que l'oxygène et le dioxyde de carbone) est une eau impropre à tout usage agricole ou industriel, est loin d'être potabilisée.

Tableau 2 : Résumé des phases de prétraitement et post-traitement au cours de la production d'eau potable par dessalement (Mickley et al.)

Phase de prétraitement	Objet	Produits chimiques ajoutés	Devenir des produits
Ajustement du pH à 7	Diminue la concentration des carbonates (et la précipitation des carbonates). Protège la membrane contre l'hydrolyse	Acide ( $H_2SO_4$ )	Modifie le pH de l'eau produite et de la saumure concentrée, le sulfate est retenu dans la saumure concentrée
Antitartre	Prévient la formation de tartre sur les membranes	Agents chélateurs et dispersants	Les complexes formés sont retenus dans la saumure concentrée
Coagulation-filtration	Prévient les salissures et l'encrassement des membranes	Coagulants-floculants	Les agents floculants formés se séparent par décantation et sont éliminés par filtration
Désinfection	Prévient l'encrassement biologique et élimine les microorganismes qui se nourrissent de la matière des membranes	Chlore (ou biocides, UV)	Chlore également réparti dans le perméat et la saumure concentrée
Déchloration	Protège les membranes sensibles au chlore	Bisulfate de sodium ou charbon actif granulaire (CAG)	Réagit avec le chlore pour former du sulfate et du chlorure qui sont retenus dans la saumure concentrée
Élimination des gaz dissous	Élimine les gaz nauséabonds, $C$ , le radon et $HS$	Aération, Dégazage	Oxyde $HS$ et $nH_4$ dans l'eau produite et dans la saumure concentrée
Ajustement du pH à 7	Prévient la corrosion du système de distribution, protège la flore et la faune aquatiques en cas de rejet en surface	$NaOH$ , carbonate de sodium anhydre, chaux	Accroît le niveau de sodium dans l'eau produite et dans la saumure concentrée
Désinfection	Prévient la prolifération bactérienne dans le système de distribution, protège la flore et la faune aquatique si nécessaire	Chlore (ou Chlorométrie)	Le chlore est retenu dans l'eau produite et dans la saumure concentrée
Réduction du niveau de chlore	Élimine le chlore et d'autres oxydants	Bisulfite de sodium ou CAGE	Accroît les niveaux de sulfates et de chlorures dans l'eau produite et dans la saumure concentrée
Oxygénation	Accroît l'oxygène dissous à un niveau concourant au développement de la flore et de la faune aquatique	Aération	Accroît l'oxygène dissous dans la saumure concentrée
Élimination d'autres formes chimiques	Diminue tous les polluants susceptibles d'être présents dans l'eau produite et dans la saumure concentrée	Est fonction des formes chimiques	

#### 4. IMPACTS DE LA SAUMURE SUR L'ENVIRONNEMENT

Il est indiscutable que c'est la saumure qui exerce le plus fort impact sur le milieu marin. Le volume total de saumure libérée dans ce milieu est déterminant pour les dommages qu'il peut induire. Un rejet de saumure concentrée en grandes quantités appelle un examen plus soigné des impacts potentiels sur l'environnement, comme c'est le cas des méga-stations de dessalement en Algérie, en l'occurrence celle d'El Hamma (200 000 m<sup>3</sup>/j), que quand il s'agit d'un rejet en petites quantités.

À part le volume proprement dit, les modalités et l'emplacement du rejet sont essentiels pour les impacts qui peuvent en résulter. La longueur de l'émissaire, sa distance au rivage, son niveau au-dessus du fond de la mer, l'existence ou non d'un diffuseur, ainsi que la profondeur de l'eau et les caractéristiques hydrologiques (courants, vagues) peuvent conditionner la dispersion de la saumure et l'efficacité de la dilution au point de rejet

et, par voie de conséquence, l'impact potentiel sur l'environnement.

La salinité accrue affecte les organismes marins par le processus d'osmose qui consiste en la diffusion d'eau pure à travers une membrane qui est perméable à l'eau mais non aux ions qui y sont dissous. Par conséquent, le contenu en sels diffère de part et d'autre de la membrane, l'eau pure diffusera à travers la membrane à partir du compartiment ayant une faible concentration des ions dissous vers le compartiment ayant une concentration supérieure d'ions dissous. Quand des organismes marins sont exposés à une variation de la salinité (contenu en sels plus élevé dans le milieu externe que dans les fluides de l'organisme) ils sont soumis à un choc osmotique qui est préjudiciable pour la plupart d'entre eux en fonction de leur tolérance à la salinité.

Des impacts ont été signalés par exemple pour l'usine TIGNE (Malte) où l'effluent a affecté la croissance des algues à proximité de l'émissaire de saumure.

Tableau 3 : Impacts néfastes sur l'environnement associés aux procédés de dessalement [9].

Impact	Degré d'impact	Origine de l'impact	Techniques d'atténuation
Pollution thermique Réduction de l'oxygène dissous dans les eaux réceptrices, Effets nocifs pour les espèces thermorésistantes	M M	Saumure chaude	Mélange de la saumure avec de l'eau froide avant le rejet Bassins de retenue
Salinité accrue Effets nocifs pour les espèces résistantes aux sels	M	Saumure concentrée	Dilution de la saumure avant rejet Récupération de sels Bon choix de l'emplacement pour l'émissaire afin de permettre le maximum de brassage et de dispersion
Désinfectants	E	Chlore et ses composés Réaction du chlore avec des composés organiques – hydrocarbures principalement	Utilisation d'autres désinfectants. Mesures de protection contre les polluants au prélèvement de l'usine
Métaux lourds Toxicité	M	Corrosion du matériel de l'usine	Conception et choix judicieux du matériel de l'usine en recourant à des matériaux résistants à la corrosion
Produits chimiques : - Eutrophisation des eaux réceptrices - Toxicité - Hausse du pH	E F F	Adjonction d'agents anticorrosion et antitartre	Réduction au minimum de l'utilisation de produits chimiques Utilisation d'additifs sans danger pour l'environnement
Pollution atmosphérique : Plus acides Effet de serre Poussières	F M M	Utilisation de combustibles et activités d'élimination	Utilisation d'énergies propres et renouvelables autant que possible Application de systèmes mixtes et de production couplée. Purification des gaz avant émission dans l'atmosphère
Sédiments Turbidité et limitation de la photosynthèse Difficultés de respiration	M	Perturbation des sables par des activités	Réduction au minimum et contrôle des activités d'excavation et remblayage
chez les animaux aquatiques	M	d'excavation et de dragage	Bonne maîtrise du ruissellement dans la zone du site
Bruit	F	Activités de Construction Pompes et autres appareils au cours de l'exploitation de l'usine	Limitation des activités de construction aux seuls horaires de travail. Choix du matériel le moins bruyant

E : Impact de degré élevé

M : de degré moyen

F : de degré faible

## 5. CONCLUSION :

Le dessalement d'eau de mer apporte une solution rapide à la pénurie d'eau douce, mais apporte avec lui beaucoup d'inconvénients tel que :

- Besoin énergétique important ;
- Utilisation de produits chimiques ;
- Rejets des saumures concentrées et chaudes dans le cas de la distillation ;
- Traces de métaux lourds dans les rejets ;
- Aucune législation spécifique au rejet de saumure.

Cette étude nous montre que la production d'eau douce par des procédés non conventionnels comme le dessalement de l'eau de mer, est caractérisée par la production en parallèle d'une eau saumâtre fortement chargée en sel. Le retour de cette eau à la mer provoque une variation de la composition chimique en s'ajoutant aux rejets de produits chimiques des traitements correctifs de l'eau d'appoint et aux rejets issues de la pollution marine tels que l'hydrogène sulfuré ou les composés ammoniacaux et hydro-carburants. Ces rejets ont un impact négatif sur l'environnement et la préservation des éco-systèmes. Faut-il orienter le choix d'un procédé de dessalement en considérant une station de neutralisation de la saumure avant son rejet à la nature ? Des études ont montrés que le procédé RO par osmose inverse pose les mêmes problèmes.

Le problème des rejets est un problème qu'il faut traiter en urgence vue la vitesse à laquelle le nombre d'installations de dessalement d'eau de mer en Algérie augmente en même temps que les rejets d'eaux saumâtres

Les paramètres évalués pour l'eau saumâtre rejetée en mer ont montré des valeurs très élevées par rapport à la norme ce qui influe négativement sur l'environnement marin. Les rejets de saumures fortement chargées ont pour conséquence la variation de la composition chimique de l'eau de mer qui altère l'équilibre des éco-systèmes et l'environnement marin. La diminution de la concentration en oxygène dissous a une conséquence sur la vie des espèces marines.

L'eau de mer, par ses propriétés physico-chimiques et également par la fraction vivante qu'elle renferme, est une eau de nature entartrante, corrosive et pose des problèmes dans l'exploitation tel que l'entartrage et la corrosion des équipements de l'installation de dessalement.

Les solutions à apporter pour la production d'eau par dessalement sont le choix du procédé adéquat sur tous ses aspects économiques, technologiques et environnementaux, les traitements de neutralisation de la saumure, les dosages précis dans les traitements de correction de l'eau à dessaler.

## 6. RECOMMANDATIONS :

- L'emplacement du rejet doit être soigneusement choisi en fonction des flux marins, afin d'éviter les zones biologiques sensibles et de favoriser la dispersion des saumures.
- Rejeter la saumure à travers un système de diffuseurs qui permettent de diluer rapidement la salinité et de retrouver les concentrations du milieu naturel.
- Les eaux rejetées doivent être à la même température que les eaux naturelles afin d'éviter la perturbation du milieu aquatique et l'invasion d'espèces indésirables (avantage de l'osmose inverse par rapport au procédé thermique qui rejette de très gros débits avec un écart de température).
- Préférer l'osmose inverse aux procédés thermiques et cela à cause des produits de corrosion et de détartage (corrosion faible due à la température ambiante et les parties métalliques des installations O.I sont en acier inoxydable)

D'après le Fonds mondial pour la nature (WWF) : «Dessaler l'eau de mer est un procédé qui coûte cher, consomme beaucoup d'énergie et rejette dans l'atmosphère des tonnes de gaz à effet de serre.» De ce fait, WWF craint que le dessalement de l'eau de mer soit une solution de facilité et détourne l'attention des solutions de recharge moins coûteuses et moins agressives pour l'environnement comme l'augmentation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau ou le recyclage des eaux usées. Cette organisation estime que les activités intensives de dessalement peuvent provoquer le développement de saumures et entraîner la destruction de précieuses régions côtières et, ainsi, contaminer la vie marine, les cours d'eau, les zones humides, les eaux souterraines et plus généralement les éco-systèmes qui assurent l'épuration de l'eau et la protègent contre les catastrophes.

Mais malgré tout cela, le meilleur moyen de réduire les effets de la saumure est de traiter cette saumure avant son rejet à la mer. Une sérieuse réflexion doit être engagée pour évaluer les coûts de projets pour assurer une gestion fiable des stations de dessalement d'eau de mer, et doivent insérer les coûts de traitement des rejets.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1]. Abdelmomen, El hassadi., Horizon and future of water desalination in Libya, Revue –Desalination N°220, 2008
- [2] A.D.E [Algérienne des eaux – Alger],. Documents internes – Rapports de mission, 2003.
- [3]. Arab Water World (AWW) – Volume 31 – N° 7, July 2007.
- [4] Bessenasse Mohamed., Seawater desalination: Study of the coastal stations in Algiers region. Revue Desalination –, N° 250, pp 423 – 427, Janvier 2010.
- [5] Danis, P., Dessalement de l'eau de mer, Editions Techniques de l'ingénieur, Paris, 2003.
- [6] Degrémont.,(2 volumes) - Mémento technique de l'eau, Editions Lavoisier, 2005.
- [7]. Demet ,Alegul., Cost analysis of seawater desalination with reverse osmosis in Turkey, Revue – Desalination N°220, 2008.
- [8] Hydroplus., - Le magazine professionnel de l'eau, N° 153 – mai, p.14, 2005.
- [9] Maurel, A., Dessalement des eaux de mers et des eaux saumâtres, Editions Lavoisier, Paris, 2002.
- [10] Ministère Algérien des ressources en eaux., Rapport de mission, 2008.

École Nationale Supérieure des Travaux Publics

## APPEL À PUBLICATION

La revue ALGÉRIE EQUIPEMENT est un espace d'expression scientifique ouvert à toutes et à tous les chercheurs des universités ou des centres de recherches.

Les domaines consacrés aux publications sont le génie civil, les travaux publics, les matériaux, le transport, l'hydraulique, la géologie, l'environnement, les procédés et méthodes de conceptions ou de calculs.

Les recommandations aux auteurs sont disponibles sur le site de l'École Nationale Supérieure des Travaux Publics :

[www.enstp.edu.dz](http://www.enstp.edu.dz)

# ALGÉRIE ÉQUIPEMENT

Vient d'avoir

**20**ans

Vous trouverez sur le site  
[www.enstp.edu.dz](http://www.enstp.edu.dz)  
la liste de l'ensemble des auteurs  
et des articles qui ont été édités