Contribution du transport de particules en suspension à l'érosion interne des sols

Migration de particules en milieu poreux

Ahmed Benamar, Abdellah Alem, Nasr Ahfir, Huaqing Wang

L.M.P.G. Université du Havre
BP 540 Quai Frissard
F-76058 Le Havre cedex

benamar@univ-lehavre.fr

RÉSUMÉ. *Nous présentons ici les résultats d'une étude expérimentale de transport et dépôt de particules de limon dans une colonne de laboratoire avec un écoulement à flux imposé et une injection instantanée des particules en suspension dans deux milieux : un gravier et des billes de verre. La solution analytique de l'équation de convection -dispersion avec cinétique de dépôt est utilisée pour déterminer les paramètres hydro dispersifs. Les résultats montrent que la dispersivité diminue lorsque la vitesse d'écoulement augmente et elle est plus importante dans les billes de verre. La restitution des particules est globalement meilleure pour les billes de verre et la cinétique de dépôt augmente avec la vitesse jusqu'à un certain seuil au-delà duquel elle décroît. L'analyse de l'effluent par micro granulométrie montre que la taille des particules restituées diminue avec la vitesse d'écoulement.*

ABSTRACT. *The present laboratory study is devoted to investigate the behaviour of particulate transport in a porous medium. The flow tests are performed on two materials (crushed gravel and glass beads) using pulse injections of suspended silt particles. The breakthrough curves were well described by analytical solution of a convective-dispersive equation with a first-order deposition kinetic. The results show the decrease of dispersivity while flow rate increases. The recovery rate is higher in the glass beds medium. The decrease of the deposition rate of suspended particles beyond a critical flow velocity is unusual in comparison with the results available in literature. Micro-granular spectrum analysis of the outlet shows the decrease of the silt particle size recovered with the flow rate.*

MOTS-CLÉS : *milieu poreux, particules en suspension, transport, cinétique de dépôt, dispersion.*

KEYWORDS: *Porous media, Suspended Particles, transport, deposition rate, dispersion.*

1. Introduction

Les mécanismes de transport de colloïdes dans un milieu poreux ont été largement étudiés. Le transport de particules dans les formations géologiques superficielles n'a suscité l'attention que depuis quelques années. Comprendre le transfert des particules en suspension dans un milieu poreux a une grande implication sur la réduction du risque de contamination des ressources hydriques. Le transport de particules en suspension joue un rôle important dans des domaines aussi divers que l'industrie (filtration, chromatographie, traitement de l'eau) ou les sciences de la terre et le génie civil (hydrogéologie, environnement, érosion interne). La mobilité des particules dans le sol peut d'une part favoriser, voire accélérer, la propagation des polluants vers les nappes souterraines [RAY96]. D'autre part, elle peut mener à l'instabilité et même la rupture d'ouvrages hydrauliques. L'érosion interne est encore aujourd'hui un mode de rupture des barrages dangereux et mal connu. L'érosion interne est l'entraînement vers l'aval des particules constitutives du remblai ou de la fondation sous l'action d'un écoulement provenant de la retenue ou de la nappe. Elle ne se développe que si deux conditions nécessaires sont réunies : l'arrachement des particules et leur transport. Ce phénomène se développe au sein d'une masse de sol dont la granulométrie n'assure pas l'autofiltration. L'hétérogénéité d'un matériau ne peut que favoriser ou aggraver le phénomène en ajoutant localement une suffusion externe à une suffusion interne d'ensemble. Les matières en suspension (MES) jouent également un rôle déterminant dans la contamination des sols et des aquifères en raison de la capacité d'adsorption de certains polluants et des bactéries sur le matériel particulaire [MCG02]. Dans ce domaine de transport de masse en milieu poreux, beaucoup d'études sont consacrées aux éléments dissous et aux colloïdes (taille < 1 µm) mais peu de travaux concernent le transport de particules et notamment celui des solides en suspension [WAN00, MAS02]. C'est la migration de telles particules qui est à l'origine de l'érosion interne des sols. Cette étude permettra d'évaluer les conditions de transfert de ces particules dans un milieu poreux après leur arrachement à la structure granulaire. Le transport et le dépôt des MES dans un milieu poreux dépendent de mécanismes liés à l'environnement physico-chimique mais aussi à la taille et la nature des particules [SIL95]. Lorsque la dimension des particules dépasse 10 µm les effets physico-chimiques deviennent négligeables par rapport aux effets hydromécaniques [GOH99]. Plusieurs restrictions peuvent s'imposer au transport des MES : l'obstruction des pores par des particules de dimension plus grande, la filtration, le dépôt dans le milieu poreux lorsque les forces de gravité deviennent dominantes. La migration des matières organiques et dissoutes est régie par la convection, la dispersion et les échanges physico-chimiques avec le milieu. Deux phénomènes, autres que la convection et la dispersion, sont importants dans l'étude du transport des particules : dépôt et détachement des particules au cours du transport.

2. Méthodologie expérimentale et modélisation

2.1. *Essais de transport dans une colonne*

Le dispositif expérimental [BEN05], est constitué (figure 1) d'une colonne contenant un milieu poreux (gravier ou billes de verre) soumis à un écoulement, d'un point d'injection de MES à l'entrée et d'appareillages de mesure de débit et de concentration de l'effluent. Plusieurs colonnes de longueurs différentes et de diamètre intérieur 62 mm sont utilisées. Le gravier (porosité proche de 47 %) dont la dimension des grains varie de 1,5 mm à 3,15 mm (d_{50} = 2,35), forme un milieu poly disperse avec des grains anguleux et donc une large distribution porale. Les billes de verre (porosité voisine de 42 %) de dimension 3 mm, forment un milieu mono disperse avec des pores de tailles voisines (figure 2). L'injection instantanée (MES et traceur passif) permet de s'affranchir des problèmes de filtration et de favoriser le transport des particules dans le milieu. Les MES injectées, à une concentration de la suspension de 0,1 g/l, sont des particules de limon poly disperses, de forme irrégulière et de dimension moyenne 6 μm. Le volume injecté de 20 ml représente 2 % du volume des pores et il est choisi de façon à ne pas perturber l'écoulement dans la colonne. Les vitesses de Darcy utilisées lors des essais varient entre 0,0134 cm/s et 0,437 cm/s. Dix essais sont effectués dans chaque échantillon en le rinçant à l'eau après chaque essai. Pour différentes vitesses d'écoulement, l'effluent est suivi à la sortie de la colonne par un fluorimètre et un turbidimètre afin de comparer le comportement des MES par rapport au traceur passif à travers notamment les courbes de restitution. L'analyse est basée sur une approche de dynamique des systèmes. On sollicite le dispositif en écoulement permanent avec des injections instantanées de traceur (MES) pour ensuite obtenir une courbe de restitution. On vérifie le bilan de masse, puis on identifie la fonction de transfert (temps de séjour, coefficient de dispersion du milieu, taux de restitution).

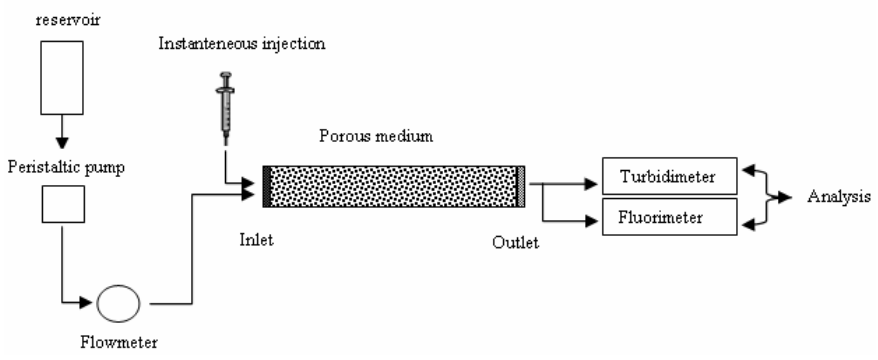

Figure 1. *Schéma synoptique du dispositif expérimental.*

(a)

(b)

Figure 2. *Images des deux milieux poreux étudiés : (a) gravier; (b) billes de verre.*

2.2. *Modèle mathématique et interprétation des essais de traçage*

En régime permanant de l'écoulement dans un milieu poreux saturé unidimensionnel, le transport et le dépôt des MES injectées sont décrits par l'équation (1) de convection – dispersion incluant un terme de cinétique de dépôt des particules de premier ordre [GRO98].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} - K_{dep} \cdot C \qquad [1]$$

C est la concentration de la suspension, t le temps, x la distance parcourue, D_L le coefficient de dispersion longitudinale, u la vitesse moyenne d'écoulement et K_{dep} le coefficient cinétique de dépôt (considérée constante). Cette équation décrit l'évolution dans le temps de la concentration C des MES dans le milieu poreux ainsi que la quantité de particules retenues de façon irréversible (relargage des particules déposées négligé). La dispersion dans ce modèle est due essentiellement à la variation des vitesses d'écoulement dans le milieu poreux à l'échelle microscopique et s'exprime par $D_L = \alpha_L.u$, α_L étant la dispersivité longitudinale. Dans l'équation (1), pour une injection instantanée, les conditions initiales et aux limites s'écrivent :

$$\left.\begin{array}{l} C(t=0,x)=0 \\ C(t,x=0)=m/Q\cdot\delta(t) \\ C(t,x=\infty)=0 \end{array}\right\} \qquad [2]$$

$\delta(t)$ est la fonction de Dirac en temps , Q le débit d'écoulement, m la masse de traceur injectée. La solution analytique de l'équation (1) avec les conditions (2) est donnée par l'équation 3 [WAN00] :

$$C(t,x) = \frac{mx}{Q\sqrt{4\pi D_L t^3}} \exp\left(-K_{dep}\, t\right) \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{4 D_L t}\right) \qquad [3]$$

Cette solution a été développée sous forme adimensionnelle [BEN05] pour obtenir les paramètres de transport tels que la dispersivité α_L, le coefficient cinétique de dépôt K_{dep} et le taux de restitution R. Cette modélisation 1D avec une cinétique de dépôt simple et irréversible utilise un nombre de paramètres réduits de façon à

déterminer chacun d'eux en maîtrisant les autres. La dispersion dans ce modèle est due essentiellement à la variation des vitesses d'écoulement dans le milieu poreux à l'échelle microscopique. Le dépôt des MES dans le sol peut se produire selon deux mécanismes [MCG02]: la filtration mécanique où une particule plus grosse que le pore qu'elle tente de traverser est bloquée; la filtration vraie (ou profonde) qui couvre l'interception, la diffusion et la sédimentation lorsque la dimension des particule est beaucoup plus petite que celle des pores. La filtration mécanique est généralement négligée lorsque le rapport de la dimension caractéristique du grain constituant le milieu poreux à celle de la particule est supérieure à 20. Cette condition est largement vérifiée dans le cadre de cette étude (rapport > 100).

3. Comportement de transport des particules en suspension

Le transfert des MES dans un milieu poreux est régi par la convection, la dispersion et le dépôt. Le rapport de la convection à la dispersion est donné par le nombre de Péclet (*Pe*). La dispersion est caractérisée par le coefficient de dispersivité longitudinale α_L. Ce terme est une simplification de la dispersion hydrodynamique incluant les processus de dispersion mécanique et de diffusion moléculaire. Dans les essais effectués lors de cette étude, la convection est prédominante par rapport à la dispersion, et la diffusion moléculaire est négligeable. La dispersivité est habituellement utilisée pour caractériser le comportement dispersif d'un soluté dans un milieu poreux. Ce paramètre est calculé pour les deux milieux poreux utilisés à différentes vitesses d'écoulement. Sa valeur varie entre 0,47 cm et 1,29 cm. La dispersivité diminue lorsque la vitesse d'écoulement augmente et elle est plus importante dans les billes de verre où la connectivité porale est plus importante. Les résultats bruts des courbes de restitution montrent un transport plus rapide des MES par rapport au traceur passif à partir d'une vitesse dite « critique » et qui dépend du milieu poreux et de la nature des particules. Le rapport moyen entre la vitesse des particules et celle du traceur passif est voisin de 1,1. Ce comportement de transport est expliqué par le fait que les grosses particules « échantillonnent » les vitesses les plus élevées dans la colonne du fait de leur faible diffusion. La figure 3 montre l'évolution de la dispersion avec la vitesse de Darcy, obtenue par des essais avec l'injection du traceur conservatif dans le gravier. La dispersion augmente de façon linéaire avec la vitesse d'écoulement augmente et elle est plus importante dans les billes de verre où la connectivité porale est plus importante. Cette différence tend à s'estomper aux valeurs élevées de la vitesse d'écoulement pour lesquelles la convection est dominante. Dans les deux milieux poreux, la dispersion augmente avec la longueur de la colonne. Cette augmentation est plus marquée à partir d'une certaine longueur (66 cm) et elle est plus importante dans les billes de verre.

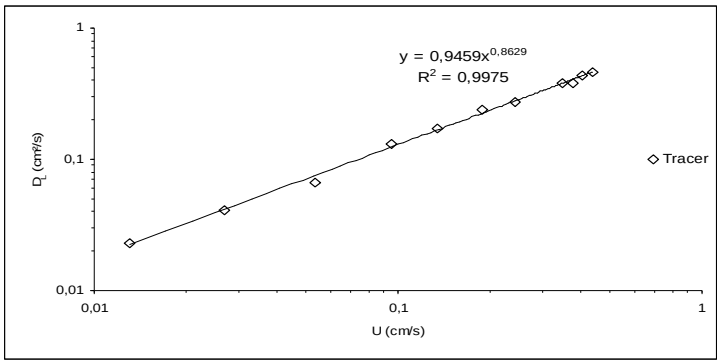

Figure 3. *Variation de la dispersion avec la vitesse d'écoulement dans le gravier.*

4. Effets de l'écoulement sur le transport et dépôt de particules

4.1. *Cinétique de transport et rétention des particules*

La restitution des MES est globalement meilleure pour les billes de verre alors que ce milieu a une perméabilité (et une porosité) inférieure à celle du gravier. Ce résultat montre donc que les paramètres globaux d'un milieu poreux ne suffisent pas pour caractériser ses caractéristiques de transfert des MES et que l'organisation de l'espace poral est un élément déterminant. La cinétique de dépôt augmente avec la vitesse jusqu'à un certain seuil au-delà duquel elle décroît (figure 4). Cette vitesse « critique » décrit le changement de comportement de transport et dépôt. Les différentes études sur les colloïdes et les particules rapportent une évolution en loi puissance [MAS02].

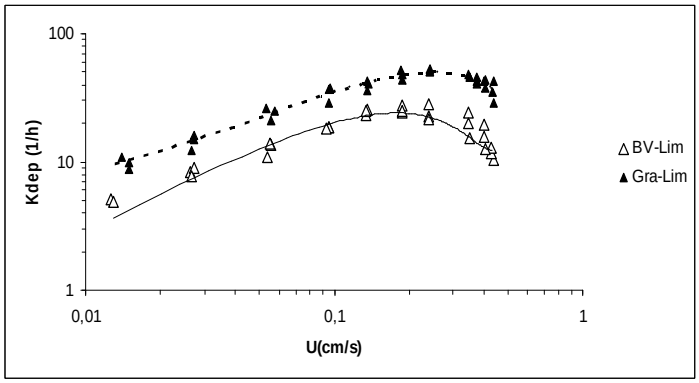

Figure 4. *Evolution de la cinétique de dépôt avec la vitesse de Darcy.*

Dans notre cas cette puissance est voisine de 0,6 pour les deux milieux poreux. On peut alors distinguer deux parties dans le comportement de transport : un effet géométrique de la structure porale pour des vitesses modérées; un effet hydrodynamique au-delà de la « vitesse « critique ».

4.2. *Sélection granulaire des particules transportées*

L'analyse de l'effluent par micro granulométrie (figure 5) montre que la taille des particules restituées diminue avec la vitesse d'écoulement. Pour les faibles vitesses, les chemins préférentiels de transport sont moins disponibles et les forces hydrodynamiques sont trop faibles pour mobiliser les particules de grande dimension sur lesquelles les effets de gravité deviennent prépondérants. Les particules prennent alors des détours conduisant à des chemins plus longs et par conséquent à des temps de séjour dans le milieu poreux plus longs. A forte vitesse, la restitution des grosses particules est plus importante pour le gravier qui présente par sa structure porale des macro pores susceptibles de générer un écoulement préférentiel. La restitution des MES est globalement meilleure pour les billes de verre alors que ce milieu a une perméabilité (et une porosité) inférieure à celle du gravier. Ce résultat montre donc que les paramètres globaux d'un milieu poreux ne suffisent pas pour caractériser ses caractéristiques de transfert des MES et que l'organisation de l'espace poral est un élément déterminant. Ces comportements différents pour les deux milieux poreux montrent l'importance jouée par la structure porale dans le transport et le dépôt des MES dans un milieu poreux.

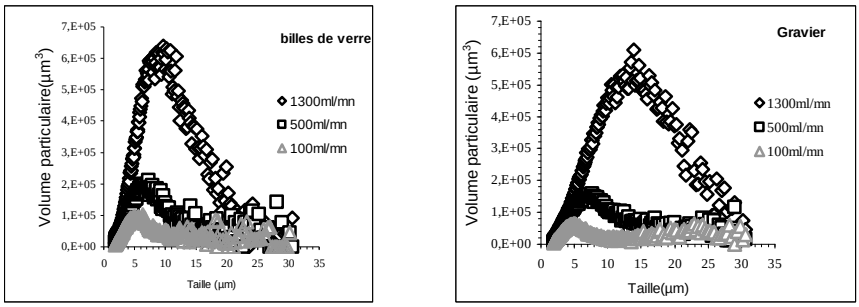

Figure 4. *Courbes granulométriques des suspensions transportées*

5. Conclusions

Cette étude a conduit également à mettre en évidence une vitesse critique pour laquelle le comportement de transport de MES dans le milieu poreux change. Le taux de restitution augmente avec la vitesse d'écoulement et il est plus important pour les billes de verre. La cinétique de dépôt est alors plus importante dans le

gravier. Son évolution avec la vitesse d'écoulement montre une analogie avec le comportement observé sur la célérité de transport des MES par rapport au traceur dissous. On peut dissocier deux régimes d'écoulement dans lesquels les effets géométriques et les effets hydrodynamiques n'ont pas la même importance. Il reste cependant à confirmer cette différence de comportement par des investigations à l'échelle du pore. Les comportements de transport différents pour les deux milieux poreux montrent l'importance jouée par la structure porale dans le transport et le dépôt des MES dans un milieu poreux. L'analyse granulométrique de l'effluent a montré que lorsque la vitesse d'écoulement devient importante, la restitution des grosses particules est meilleure dans le gravier. Ceci met en évidence l'influence de la structure porale de ce milieu qui permet un transport privilégié par les macro pores.

6. Bibliographie

Benamar A., Wang H., Ahfir N., Alem A.,Masséi N., Dupont J.P., « Effets de la vitesse sur le transport et la cinétique de dépôt de particules en suspension en milieu poreux saturé», *C.R. Geosciences*, vol. 337, 2005, p. 497-504.

Gohr Pinheiro I., Schmitz P., Houi D., «Particle capture in porous media when physico-chemical effects dominate», *Chemical Engineering Science*, vol. 54, 1999, p. 3801- 3813.

Grolimund D., Elimelich M., Borcovec M., Barmettler K., Kretzschmar R., Sticher H., «Transport of in situ mobilized colloidal particles in packed soil columns», *Environ. Sci. Technol*, vol. 32, 1998, p. 3562-3569.

Massei N., Lacroix M., Wang H.Q., Dupont J.P., «Transport of particulate material and dissolved tracer in a highly permeable porous medium: comparaison of the transfer parameters», *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 57, 2002, p. 21-39.

McGechan M.B., Lewis D.R., «Transport of particulate and colloid-sorbed contaminants through soil, Part 1: general principles», *Biosystems Engineering*, vol. 83, 2002, p. 255-273.

Silliman S.E., «Particle transport through two-dimensional, saturated porous media : influence of physical structure of the medium», *Journal of Hydrology*, vol. 167, n° 1-4, 1995, p. 79-98.

Wang H.Q., Lacroix M., Masséi N., Dupont J.P., «Particle transport in porous medium : determination of hydrodispersive characteristics and deposition rates», *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des Planètes,* vol. 331, 2000, p. 97-104.

Benamar, A., Wang, H.Q., Ahfir, N-d., Alem, A., Masséi, N., Dupont, J.P. (2005) « Inertial effects on the transport and the rate deposition of fine particles in a soil » C.R. Acad. Sci. Paris, *Geosciences de surface*

La pagination et les titres courants de l'article sont insérés dans l'en-tête, en Times New Roman maigre, corps 9.

Format>Disposition>En-têtes>pages paires et impaires différentes

Format>Disposition>En-têtes>1re page différente

Affichage>En-tête> :

>en-tête page paire>insérer le numéro de page (#) suivi de 5 espaces blancs et du nom de la revue. Volume – n°/année de parution dans le cas d'un numéro courant ; ex : Revue internationale de génie électrique. Volume 7 – n° 1/2005

>en-tête page paire>insérer n° de page (#) puis 5 espaces blancs puis l'acronyme de la revue, volume, année de parution et point, puis un titre court du numéro dans le cas d'un numéro spécial ; ex : RIGE – 7/2005. Matériaux électriques

>en-tête de page impaire>insérer le titre courant de l'article (**40 caractères maximum**) puis 5 espaces blancs et le numéro de page.

4. Composition de la première page de l'article

– Le titre de l'article en français, doit être informatif et concis **(sur un maximum de 3 lignes).** L'auteur en fournit une version abrégée (pour le titre courant, de 40 caractères au maximum à insérer dans l'en-tête des pages impaires). Le titre est composé en Times New Roman 18 gras romain minuscule, interligné 20 pts exactement, aligné à gauche. Il est précédé d'une ligne de blanc et bordé d'un trait supérieur fin distant de 20 pts. (Format>Bordure supérieure>trait 1/4 ; option> distance du texte>haut : 20 pts). Il est suivi de deux lignes de blanc, interlignées 12 pts exactement. S'il y a un sous-titre, il est en corps 14 gras romain interligné 16, précédé et suivi d'une ligne de blanc.

– prénom et nom des auteurs : en corps 12 gras romain minuscule, interlignés 14 pts ;

– coordonnées des auteurs (appartenance, adresse professionnelle et adresse électronique, pas de téléphone ni de fax) : en corps 10 italique maigre, interligné 12 pts. Elles sont précédées et suivies d'une ligne de blanc.

Un modèle de première page comportant plusieurs auteurs à des adresses différentes est donné à la fin de ce modèle.

– Le résumé et les mots-clés sont indiqués impérativement en français et en anglais, dans l'ordre suivant : résumé, abstract, mots-clés, et keywords si l'article est rédigé en français. Abstract, résumé, keywords et mots-clés si l'article est en anglais. Cet ensemble est composé en corps 9 italique maigre, minuscule, (sauf les termes : *RÉSUMÉ. ABSTRACT. MOTS-CLÉS : KEYWORDS*: qui sont en capitales accentuées en corps 7) interligné 11 points et espacés de 3 pts entre les paragraphes. Le premier paragraphe (résumé) est bordé d'un trait supérieur fin distant de 4 pts et le dernier (Keywords) est bordé d'un trait inférieur fin distant lui aussi de 4 pts.

– En pied de page de cette première page sont reportés les éléments de l'en-tête paire avec la pagination de l'article, en corps 9 romain maigre, minuscule, et sera mise à jour lors de la composition du numéro par le service fabrication.

5. Titre des sections ou titre d'« inter »

Ils sont alignés à gauche, sans alinéa, en numérotation décimale (toujours en roman même si le titre qui suit est en italique) ; les espaces définis « avant » et « après » ces inters se gèrent en fonction de leur place dans le texte (en haut de page, ou immédiatement suivis d'un autre « inter », etc.). Ils se présentent ainsi :

2. Titre de niveau 1 (24 pts avant, 12 après)

2.1. *Titre de niveau 2 (24 pts avant s'il n'est pas précédé d'un inter de niveau 1, 12 pts après)*

2.1.1. *Titre de niveau 3* (style Inter-3) (12 pts avant, 6 après)

2.1.1.1. Titre de niveau 4 (style Inter-4) (12 pts avant, 6 après)

Les inters ne doivent pas être isolés en bas de page, mais toujours suivis d'un paragraphe (format>paragraphe>enchaînement>paragraphes solidaires).

6. Les notes de bas de page

Elles sont en corps 9, interligné 11 pts, justifié sans alinéa, numérotées de 1 à n à l'intérieur de l'article, surmontées d'un filet maigre de 2,5 cm (Affichage>Normal> Notes>format paragraphe>retrait droit 9,5 cm ; espace avant et après le filet : 2 pts). L'appel de note dans le texte est en corps 8 [1], non exposant, (format>police> espacement>décalage haut 3 pts).

7. Figures et tableaux

Les figures, illustrations et tableaux (imprimés en noir et blanc seront exécutés de préférence en niveaux de gris) doivent être incorporés au texte. Les figures et illustrations sont numérotées de 1 à n à l'intérieur de l'article, les tableaux également. Des légendes explicites les accompagnent, composées en Times New Roman 10 justifiées, sans alinéa, Figure x en romain gras suivi d'un point gras, texte en italique maigre, avec un espace de 24 points après.

1. Note composée en corps 9, sans alinéa.

Cadre ou quadrillage se font en trait fin. Une ligne de blanc au-dessus, une ligne de blanc entre figure ou tableau et sa légende. Deux lignes de blanc sous la légende.

Figure 3. *Consignes*

8. Formules

Les formules qui font l'objet d'un renvoi dans le texte sont numérotées de [1] à [n] entre crochets. Ce numéro, placé sur la première (ou dernière) ligne de la formule, est aligné sur la marge de droite. La formule commence à 1 cm à gauche, précédée et suivie d'une ligne de blanc. Si la formule doit être coupée (pour cause de longueur) mettre 1/2 ligne de blanc entre les lignes de l'expression.

$$d(\mathbf{x},\Gamma) = d(\mathbf{x}, C_k) \text{ avec } k = \arg\min_{i\in I} \left(d(\mathbf{x}, C_i), c_i \neq f(\mathbf{x})\right) \qquad [5]$$

9. Enumérations

Les auteurs utiliseront uniquement des tirets, de différentes tailles s'il existe plusieurs niveaux. **Ne pas utiliser de puces ou de flèches.**

– énumération de premier niveau

- énumération de deuxième niveau

Pour ces énumérations, les paragraphes sont espacés de 3 pts seulement. Le texte doit toujours revenir en début de ligne.

10. Remarque ou note

Les termes « remarque » ou « note » se composent en petites capitales maigres suivies d'un point, puis d'une espace, puis d'un tiret long et sans alinéa.

NOTE. — .. . ou REMARQUE. — ...

11. Typographie

— Pour les textes rédigés en français :

– les signes suivants [**: ; ? %**], se composent avec une espace insécable avant et une espace après ;

– la virgule et le point n'ont pas d'espace avant ;

– les guillemets typographiques ont **«** une espace insécable avant **» ;**

– les signes : **(**parenthèses**) {**accolades**} [**crochets**]** n'ont pas d'espace à l'intérieur ;

– points de suspension... (sans espace avant) ;

– une espace avant et après les signes : **= , + , -.**

— Pour les textes rédigés en anglais, la typographie est différente (pas d'espace avant les signes **: ; ? %** et guillemets **"**pour l'anglais**"** sans espace).

Remerciements (non gras, non italique, non numéroté, sans alinéa)

Le texte des remerciements se place après la conclusion, séparé de celle-ci par deux lignes de blanc, avant la bibliographie, avec le style du texte courant.

12. Bibliographie

Composées en Times New Roman 9 romain, interligné 11 points, les références sont rassemblées en fin d'article par ordre alphabétique, espacées les unes des autres de 6 points. Leur référence est du type (Kolski, 1997) pour un auteur, (Kolski *et al.*, 1998) pour plusieurs auteurs. Elles sont justifiées avec un alinéa négatif de 5 mm (Format>Paragraphe>Retrait de 1re ligne négatif de 0,5 cm).

– Pour les ouvrages : titre en italique, le reste en romain.

– Pour les revues et actes de conférences : titre de l'article entre guillemets, titre de la revue ou de la conférence en italique, le reste en romain.

– Pour les rapports internes et les thèses : texte tout en romain.

Voici, en guise d'exemple, quelques cas de figures parmi les plus courants :

Kolski C., *Interfaces homme-machine*, Paris, Hermès, 1997.

Demeure I., Farhat J., « Systèmes de processus légers : concepts et exemples », *Technique et Science Informatiques*, vol. 13, n° 6, 1994, p. 765-795.

Lallouet A., « DP-LOG : un langage logique data-parallèle », *Actes des 6e journées francophones de programmation logique et programmation par contraintes JFPLC'97*, Orléans, 26-28 mai 1997, Paris, Hermès, p. 53-68.

Braun T., Diot C., Hoglander A., ROCA V., An experimental user level implementation of TCP, Rapport de recherche n° 265, septembre 1995, INRIA.

Nawrocki A., Contribution à la modélisation des câbles monotorons par éléments finis, Thèse de doctorat, Université de Nantes, 1997.

Nous donnons ci-après un modèle de présentation du haut de première page dans le cas de plusieurs auteurs avec plusieurs appartenances. Les noms des auteurs sont séparés par un tiret long (caractère spécial) maigre. L'appartenance est notée par une

(ou plusieurs) astérisque(s) placé(s) en correspondance avant le texte de l'appartenance. Pour une adresse électronique commune à plusieurs auteurs, les noms des auteurs sont réunis entre deux accolades, séparés chacun par une virgule.

Si l'article appartient à une rubrique, le nom de celle-ci est inséré au-dessus du filet supérieur, composé en capitales, Times New Roman, corps 12 maigre.

NOM DE LA RUBRIQUE

Couplage endommagement du béton

Etude d'une modélisation numérique

Laurent Molez*, — Bruno Gérard** — Gilles Pijaudier *,*****

* *Laboratoire de Mécanique et Technologie, ENS de Cachan*
CNRS/Université Pierre et Marie Curie
61 avenue du Président Wilson, F-94235 Cachan cedex

{nom, nom}@laboratoire.fr

** *Electricité de France, Direction des Etudes et Recherches*
Dépt. MTC, BP 1, F-77818 Moret-sur-Loing cedex

*** *Institut Universitaire de France*

Remise des articles

Les articles adressés en soumission seront envoyés sous format PDF par version électronique au rédacteur en chef de la revue concernée. *Après acceptation définitive,* ils seront adressés au service fabrication, avec :

1. la version électronique par e-mail **uniquement si le logiciel est word pour PC,** N.B. Les auteurs utilisant Latex effectueront eux-mêmes les corrections nécessaires,
2. une sortie papier pour document témoin,
3. [et une copie des polices de caractères utilisées, dans le cas de symboles particuliers],
4. la cession de droits signée de tous les auteurs de l'article,
5. la fiche « annexes pour le service fabrication » comportant tous les renseignements utiles à la fabrication du numéro.