

Département Dynamiques de l'environnement côtier
Laboratoire Écologie pélagique

Alain AMINOT
Xavier PHILIPPON



Ifremer

Rapport interne DYNECO Pélagos/05-04

Octobre 2005

Perméabilité des sédiments de la Baie de Seine

Numéro d'identification du rapport : DIR/SER/Typdoc/An/Num Diffusion : libre <input checked="" type="checkbox"/> restreinte <input type="checkbox"/> interdite <input type="checkbox"/> Validé par : Version du document :		date de publication nombre de pages : 23 bibliographie : oui illustrations : oui langue du rapport : français
Titre du rapport : Perméabilité des sédiments de la Baie de Seine		
Auteurs : AMINOT Alain, PHILIPPON Xavier		Organisme / Département / Laboratoire IFREMER/DYNECO/EP
Référés/relecture : MONBET Yves, BASSOULLET Philippe		IFREMER/DYNECO/PHYSED
Cadre de la recherche Programme : PGB01 Dynamique et santé des écosystèmes côtiers et estuariens		
Résumé : La perméabilité d'un nombre limité de sédiments prélevés en Baie de Seine a été évaluée à l'aide de perméamètres à charge constante et à charge variable. Par ailleurs, des caractéristiques sédimentaires telles que la porosité et la granulométrie ont été mesurées afin d'appliquer les relations usuelles de calcul de la perméabilité. On note une forte surestimation des valeurs calculées par rapport aux valeurs mesurées, comme l'ont déjà constaté d'autres auteurs. Cette différence est importante car elle montre que les mesures conduisent à privilégier dans le sédiment superficiel les processus de diffusion par rapport à l'advection, ce qui n'aurait pas paru être le cas si seules les valeurs calculées avaient été prises en compte. Abstract : Permeability of a limited number of sediments sampled in the Bay of Seine was measured using a constant and a variable head permeameter. In addition, sedimentary characteristics such as porosity and granulometry were measured in order to apply the usual relations for the determination of the permeability. One notes a strong over-estimate of the computed values compared to the measured values, like already mentioned by other authors. This difference is an important point because it shows that measurements result in privileging in the surface sediment diffusion processes compared to advection, which would not have appeared to be the case if only calculated values had been taken into account. Mots-clés : sédiments, perméabilité, Baie de Seine Keywords : sediments, permeability, Baie of Seine		

PERMÉABILITÉ DES SÉDIMENTS DE LA BAIE DE SEINE

Sommaire

- 1. Introduction**
- 2. Campagnes et prélèvements**
- 3. Perméabilité : définition et mesure**
 - 3.1 Définition, loi de Darcy
 - 3.2 La mesure à charge constante
 - 3.3 La mesure au perméamètre à charge variable
 - 3.4 Estimation de la porosité
- 4. Granulométrie**
 - 4.1 Granulomètre
 - 4.2 Résultats
- 5. Estimation de la perméabilité à partir de la granulométrie**
 - 5.1 Relation de Hazen
 - 5.2 Relation de Carman-Kozeny
 - 5.3 Relation de Krumbein-Monk
 - 5.4 Relation de Chapuis
 - 5.5 Tableau récapitulatif de comparaison mesures-calculs
- 6. Synthèse et conclusion**
- Annexe : Détermination des grandeurs granulométriques caractéristiques**
- Bibliographie**

Nous remercions Bernard Boutier pour le prélèvement de sédiments, à notre demande, lors de la campagne RNOSED 2003, ainsi que Yves Monbet et Philippe Bassoullet pour leurs conseils de rédaction du document.

1 INTRODUCTION

Les sédiments sableux sont généralement considérés comme relativement perméables. Cette perméabilité peut induire des phénomènes d'advection à l'intérieur du sédiment, d'une part, et entre l'eau surnageante et le sédiment, d'autre part, soit sous l'effet des vagues, soit sous l'effet de gradients de pression superficiels (Boudreau, 1997). Les gradients de pression peuvent résulter de l'interaction du courant et des aspérités à la surface du sédiment (monticules et entonnoirs des terriers de la faune endogée, rides, etc.) ou du vortex créé par l'agitation dans les chambres benthiques.

Comme les phénomènes d'advection modifient les flux d'échanges de solutés entre l'eau et le sédiment, il importait d'en évaluer l'importance potentielle afin de permettre un traitement satisfaisant des données de flux acquises au cours des campagnes PNEC de 1994 et 1997. Des tests de perméabilité ont été entrepris sur les sédiments de la Baie de Seine. Ils ont pu être réalisés grâce aux prélèvements de sédiments effectués à notre demande, lors de la campagne RNO 2003, par Bernard Boutier. Des mesures de granulométrie ont été effectuées en complément afin d'appliquer les formules de calcul de la perméabilité reposant sur des critères de taille de particules.

Il importe de noter que les mesures de perméabilité n'ont pas pu être effectuées sur des carottes de sédiment intactes, mais sur du sédiment remanié. L'examen de la littérature semble néanmoins indiquer que les autres auteurs ayant produit des mesures dans le domaine côtier ont procédé de façon similaire. En effet, l'information qu'ils fournissent sur leur méthode est particulièrement succincte, sinon absente, mais les éléments disponibles suggèrent qu'ils leur était impossible de traiter des carottes intactes.

2 CAMPAGNES ET PRÉLÈVEMENTS

Les sédiments ont été prélevés lors de la campagne RNOSED03 de juin 2003 en Baie de Seine. Six échantillons nous ont été rapportés, dont 5 sur des stations RNO et un sur une station spécifique, à notre demande (code xx, ci-dessous).

Le prélèvement a été fait au petit carottier Reineck. Toute la carotte a été prélevée.

Coordonnées des stations de la campagne RNOSED03 (Bernard Boutier) sur lesquelles la perméabilité a été mesurée.

Station	Longitude	Latitude	Correspondance avec les stations des campagnes précédentes (cf. cartes)
RNO 03-037	W 00° 00,12'	N 49° 28,50'	1992-1994, st 16
RNO 03-038	W 00° 02,31'	N 49° 27,61'	1997, st S1
RNO 03-047	W 00° 11,96'	N 49° 27,08'	1997, st S3
RNO 03-051	W 00° 06,51'	N 49° 23,34'	1992-1994, au centre des st 10-11-16-17
RNO 03-067	W 00° 13,86'	N 49° 38,57'	1992-1994, st 13
RNO 03-0xx	W 00° 14,97'	N 49° 31,97'	1992-1994, st 12

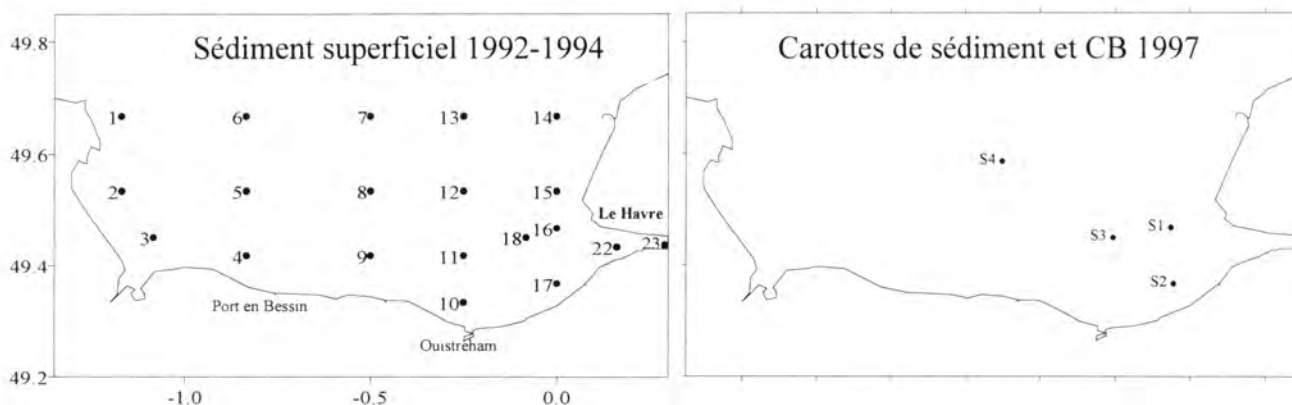


Figure 1. Position des stations de prélèvement des campagnes 1992-1994 et 1997 en Baie de Seine. CB = chambres benthiques.

3 PERMÉABILITÉ : DÉFINITION ET MESURE

3.1 Définition, loi de Darcy

La **perméabilité** d'un milieu correspond à son aptitude à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression. La **Loi de Darcy** dit que la vitesse d'un fluide à travers un milieu poreux est proportionnelle au gradient de charge hydraulique \vec{i} appliqué :

$$\vec{V} = K \times \vec{i},$$

où K = *coefficient de perméabilité* ou *conductivité hydraulique*. K a la dimension d'une vitesse (m/s en unités SI), mais dépend à la fois du milieu traversé et du fluide. Exprimée en grandeurs, la loi s'écrit :

$V = Q/S = K \times (\Delta P/\Delta x)$, avec Q = débit, S = section et $\Delta P/\Delta x$ = gradient de pression. On peut introduire la *perméabilité intrinsèque* k , propriété du milieu poreux, indépendante du fluide considéré. La loi s'exprime donc :

$$Q/S = (k/\eta) (\Delta P/\Delta x), \eta = \textit{viscosité dynamique} \text{ du fluide. Ainsi :}$$

$$k = \eta \times (Q/S) \times (\Delta x/\Delta P),$$

En unités SI on a Q en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, S en m^2 , η en $\text{Pa} \cdot \text{s}$ et $\Delta P/\Delta x$ en $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$, donc k est en m^2 ($\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m} \cdot \text{Pa}^{-1} = \text{m}^2$). En exprimant Q en $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, S en cm^2 , η en poise et $\Delta P/\Delta x$ en $\text{atm} \cdot \text{cm}^{-1}$, k est en *darcy*, sachant que $1 \text{ darcy} \cong 10^{-12} \text{ m}^2$ (exactement : $0,97 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$) [voir, par exemple le site <http://www.ens-lyon.fr/Planet-Terre/Infosciences/Geodynamique/Chimie-enveloppes/Articles/darcy.html>].

Si le fluide est de l'*eau* : pour passer de K en m/s à k en m^2 , on multiplie par 10^{-7} .

On a appliqué deux **méthodes de mesure** en laboratoire du coefficient de perméabilité (ou conductivité hydraulique) K des sables. L'une est la mesure à charge constante réalisée en utilisant deux éprouvettes placées à hauteurs différentes et reliées par un tube (appareil de test de fuites mis à notre disposition par Jacky Dupont, TSI-DM). L'autre est la mesure à charge variable réalisée à l'aide d'un perméamètre (appareils du laboratoire de géologie, mis à notre disposition par Nabil Sultan, GM-LES).

3.2 La mesure à charge constante

3.2.1 Principe de mesure

Le dispositif de mesure à **charge constante** est constitué de deux éprouvettes placées à hauteurs différentes et reliées par un tube (figures 2 et 3). L'éprouvette supérieure permet de créer une charge hydraulique constante et de réaliser les mesures de débit dans le système. L'éprouvette inférieure reçoit le sédiment à travers lequel on va laisser s'écouler l'eau (de bas en haut). La charge constante est obtenue en bouchant l'éprouvette supérieure et en laissant entrer l'air par un tube plongeant dans l'eau de l'éprouvette. Ainsi, lorsque l'air bulle dans l'éprouvette, la pression au niveau de l'entrée d'air à la base du tube est constante et égale à la pression atmosphérique, quelle que soit la hauteur d'eau dans l'éprouvette. Par ailleurs, on laisse déborder l'éprouvette inférieure, ce qui fixe automatiquement le niveau d'eau dans cette éprouvette et permet d'obtenir la différence constante de hauteur d'eau, donc la charge constante.

Il y a égalité des débits Q_1 (dans l'éprouvette supérieure) et Q_2 (dans l'éprouvette inférieure). Les débits sont exprimé en cm^3/s et les vitesses en cm/s . La charge hydraulique correspond à la différence de hauteur d'eau entre les points A et B.

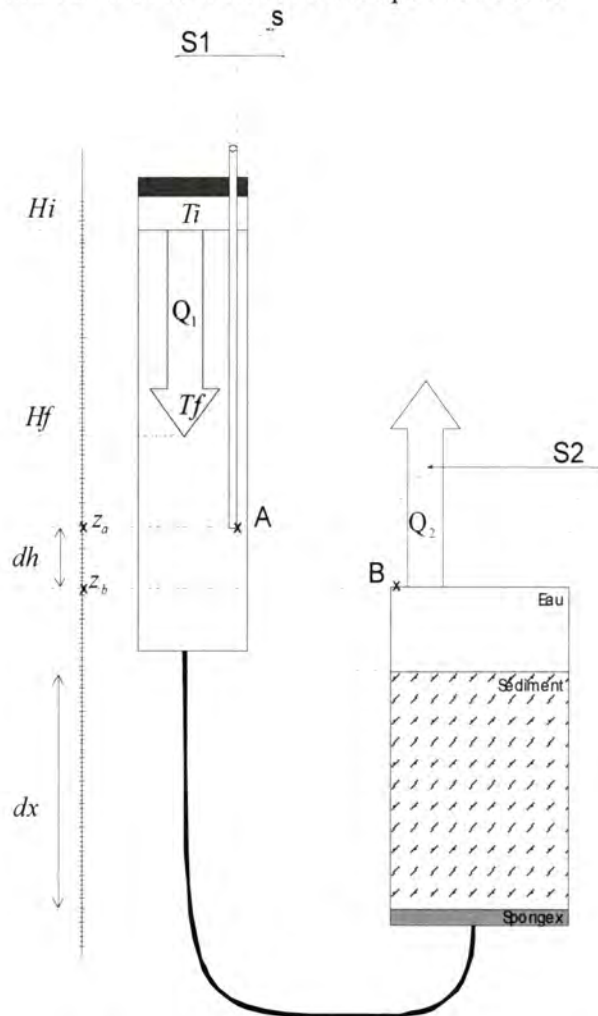


Figure 2. Schéma de principe du dispositif de mesure de la perméabilité.

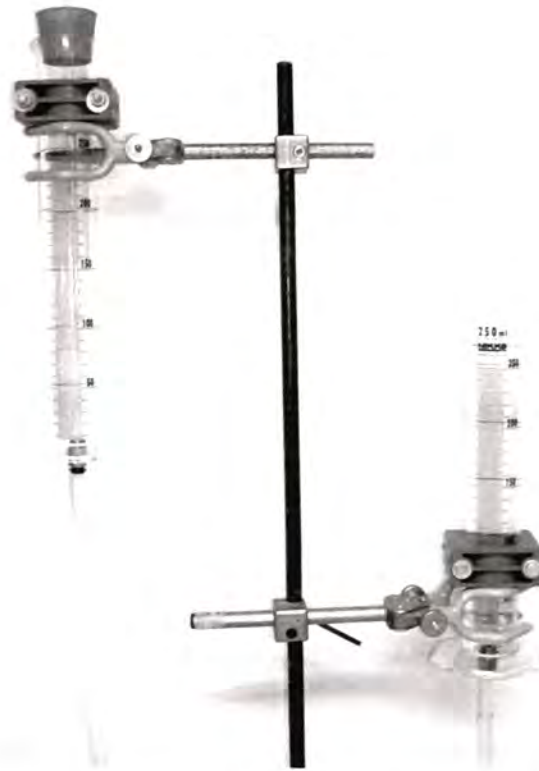


Figure 3. Photographie du dispositif utilisé pour la mesure de la perméabilité des sédiments.

Soient S_1 et S_2 les sections internes des éprouvettes 1 et 2, et s la section externe de la canne de verre, en cm^2 . On a donc :

$$Q_1 = V_1 \times (S_1 - s) \text{ et } Q_2 = V_2 \times S_2$$

$$V_2 = V_1 \times \frac{S_1 - s}{S_2}$$

Au temps initial T_i (s) la hauteur d'eau est H_i (cm) ;

Au temps final T_f (s) la hauteur d'eau est H_f (cm) ;

d'où :

$$V_2 = \frac{H_i - H_f}{T_i - T_f} \times \frac{S_1 - s}{S_2}$$

Selon la loi de Darcy $V_2 = K \times i$, avec un gradient de charge i tel que $i = \frac{-dh}{dx}$, en écoulement unidirectionnel, où dh est la charge hydraulique entre les niveaux A et B et dx l'épaisseur de sédiment (« i » est sans dimension; les dimensions de « h » et « x » étant en « cm »).

Le coefficient de perméabilité K est donc calculé comme suit (ici en cm/s) :

$$K = \frac{H_i - H_f}{T_i - T_f} \times \frac{S_1 - s}{S_2} \times \frac{dx}{dh}$$

Les surfaces étant connues et dx et dh étant fixées par les conditions d'expérience, on mesure les temps d'écoulement ($T_i - T_f$) pour des hauteurs successives ($H_i - H_f$). La régression de ΔH en fonction de ΔT donne la moyenne de $\Delta H / \Delta T$ pour le calcul de K .

3.2.2 Application aux sédiments de la Baie de seine

Le sédiment doit être bien saturé en eau afin de reproduire les conditions du milieu.

Pour cela, on a procédé de plusieurs façons :

- Test A. On a ajouté le sédiment dans l'éprouvette contenant 100 mL d'eau. Une légère homogénéisation de la suspension eau-sédiment permet d'éliminer l'air emprisonné.

Cette mise en place entraîne très certainement une plus grande proportion des particules les plus fines en haut de la colonne sédimentaire.

Dans le cas de ce protocole A, des mesures ont été faites soit après un court temps de repos du sédiment dans l'éprouvette (0,5 à 2 h ; code A1), soit après un temps relativement plus long (14 h à 4 jours ; code A2). Ce second test visant à bien saturer le sédiment comme en conditions naturelles.

- Test B. Suite aux différences constatées entre les deux durées de repos du sédiment, on a laissé le sédiment dans l'eau pendant plusieurs jours et on l'a introduit dans l'éprouvette ne contenant qu'un petit volume d'eau (5 mL).

Dans les tests A et B, plusieurs prises d'essai (codées en lettres minuscules a, b, c, ...) ont, en général, été effectuées pour la mesure de la perméabilité.

On notera que le test est, de toutes façons, réalisé sur du sédiment remanié et que l'agencement des grains n'a pas de raisons de correspondre à la réalité. *Il serait intéressant de comparer les résultats obtenus avec des carottes sédimentaires non perturbées.* Néanmoins, la plupart des mesures trouvées dans la littérature sont effectuées avec un sédiment remanié.

3.2.3 Résultats obtenus avec les sédiments de la Baie de seine

Le tableau ci-dessous et la figure 4 résument les résultats obtenus. Les valeurs grisées paraissent suspectes et n'ont pas été retenues.

Valeurs de la perméabilité intrinsèque en darcy.

Protocole	tps équil.	aliquot	037	038	047	051	067	0xx
A1	court	a	4,0	3,6	21	0,98	0,81	0,92
A1	0,5 à 2 h	b		7,7	7,3			
A1		c			3,2			
A1		d			4,5			
A1		e			1,2			
A2		long	a	2,5	-	-	0,70	0,55
A2	14 h à 4 j	b			6,2			
A2		c			2,6			
B	court	f	-	1,2	0,58	1,8	0,89	-
B		g		2,0	0,73	0,47		
B		h		5,3	0,53			
B		h		1,8				
B		h		1,6				

On constate que la perméabilité diminue lorsque le sédiment est resté longtemps immergé : le rapport moyen des « k » pour les essais « A2 » par rapport aux essais « A1 » est

de 0,70. De même, pour les essais B où le sédiment a été immergé plusieurs jours, la valeur diminue encore, parfois très sensiblement comme pour le sédiment 47 (facteur d'environ 5). Les perméabilités obtenues par la méthode B devraient être plus plausibles, car le sédiment, en contact avec l'eau depuis longtemps, correspond mieux à un sédiment naturel. Malheureusement, la méthode B n'a pas été appliquée à tous les sédiments.

On conclut néanmoins que **les perméabilités, mesurées par la méthode à charge constante, sont globalement inférieures à 2 darcy.**

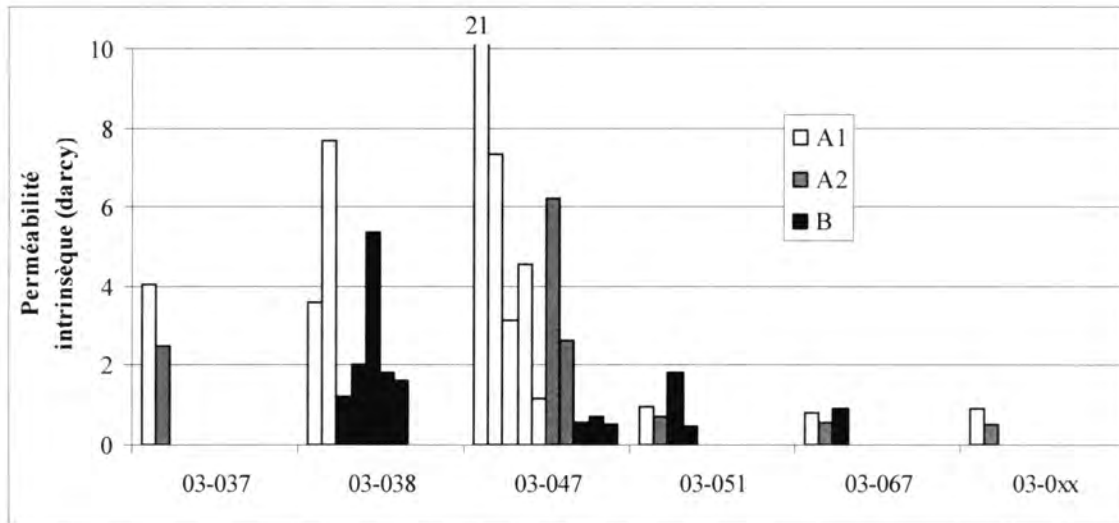


Figure 4. Comparaison des perméabilités intrinsèques mesurées à charge constante, en appliquant différents protocoles (voir texte).

3.3 La mesure au perméamètre à charge variable

3.3.1 Principe de la méthode

Le principe général des perméamètres utilisés (Nabil Sultan, GM-LES) est proche de celui de l'expérience à charge constante. Le perméamètre à charge variable est équipé d'une cellule oedométrique de type Wykeham-Farrance. Le sédiment est confiné dans cette cellule cylindrique (diamètre ~ 5 cm et hauteur 2 cm) dans laquelle il est plus ou moins comprimé par un piston supportant une charge que l'on peut faire varier. Le cylindre est relié à un fin tube rempli d'eau que l'on laisse s'écouler à travers le sédiment. On note les niveaux de l'eau et on chronomètre le temps d'écoulement. La perméabilité est calculée par une fonction reliant ces deux données.

Comme on doit imposer une certaine pression (donc compression) au sédiment, la perméabilité mesurée est fonction de cette compression. On a donc fait des mesures à plusieurs pressions puis extrapolé à pression nulle, considérant que la couche de sédiment de surface n'était soumise à aucune compression résultant de couches de sédiments placées au-dessus.

3.3.2 Résultats obtenus avec les sédiments de la Baie de seine

Les graphes de la figure 5 montrent les perméabilités obtenues pour différentes compressions. L'extrapolation à compression nulle a été faite à partir de l'équation obtenue en appliquant « $y = 0$ ». L'imprécision sur la valeur obtenue n'a pas été estimée, mais on voit sur les graphiques qu'elle n'est pas élevée, compte tenu de la précision recherchée ici. En tout état

de cause, elle reste faible par rapport aux autres sources d'incertitude. Les valeurs de perméabilité intrinsèque (darcy) obtenues sont les suivantes :

Sédiment	037	038	047	051	067
Perméabilité (darcy)	0,025	0,94	0,43	0,31	0,46

Avec cette méthode, toutes les valeurs de perméabilité sont inférieures à 1 darcy.

Le sédiment « xx » n'a pas pu être testé. Le sédiment 37, qui contient le plus de particules fines (voir figure 7) a, avec cette méthode, la plus faible perméabilité tandis que le 38, qui en contient le moins, a la perméabilité la plus élevée. Le sédiment 51 ayant donné une réponse inattendue en fonction de la compression, la mesure a été répétée à plusieurs reprises avec plusieurs compressions. Si la variabilité (inexpliquée) paraît assez élevée, la perméabilité extrapolée, reste néanmoins entre 0,2 et 0,6 darcy, environ, dans les cas extrêmes.

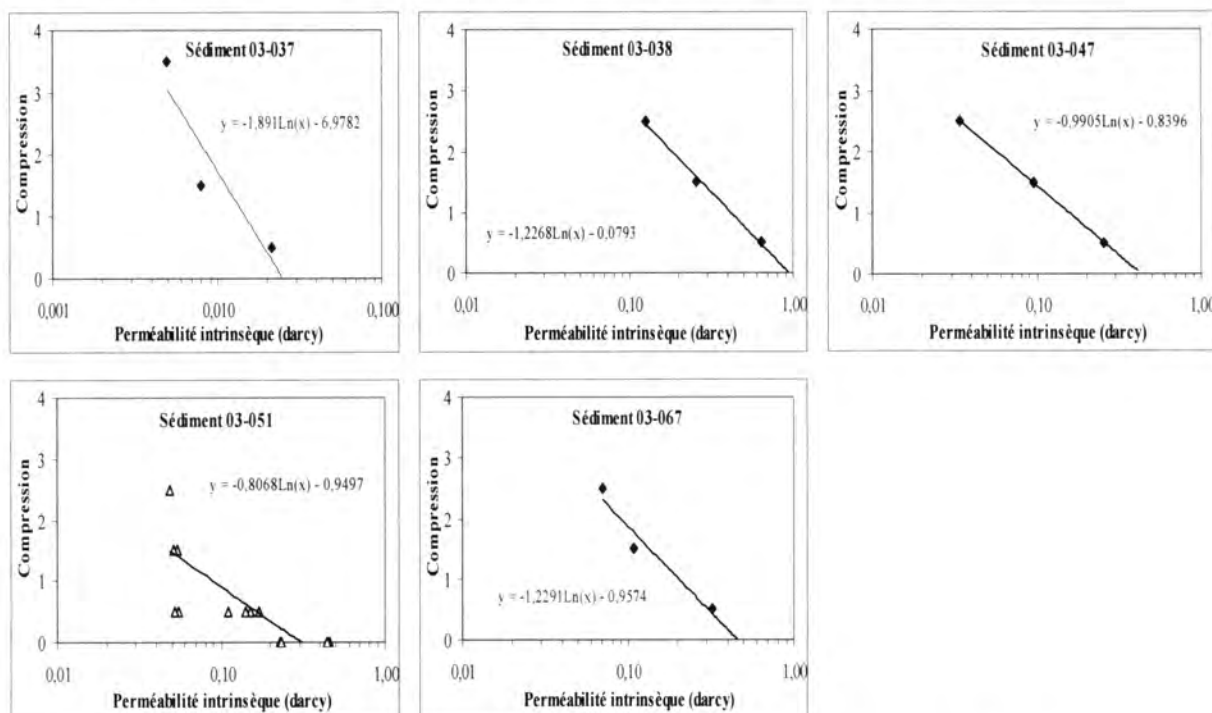


Figure 5. Mesures de perméabilité, à l'aide des perméamètres, à différentes compressions (kilogrammes sur le bras de levier). Extrapolation à compression zéro.

On a tenté de vérifier s'il y avait un minimum de cohérence entre les perméabilités trouvées et la nature granulométrique du sédiment. Il paraîtrait, en effet, logique que la perméabilité soit d'autant plus faible que la proportion de fraction fine est plus élevée.

Le graphe de la figure 6 montre la relation entre le logarithme de l'inverse de la perméabilité et le pourcentage de la fraction inférieure à 63 μm . Le résultat obtenu paraît tout à fait cohérent, ce qui ne semblait pas être le cas avec la méthode à charge constante. En l'absence d'élément permettant d'expliquer la différence entre les méthodes, on considérera les résultats de la méthode au perméamètre comme les plus cohérents.

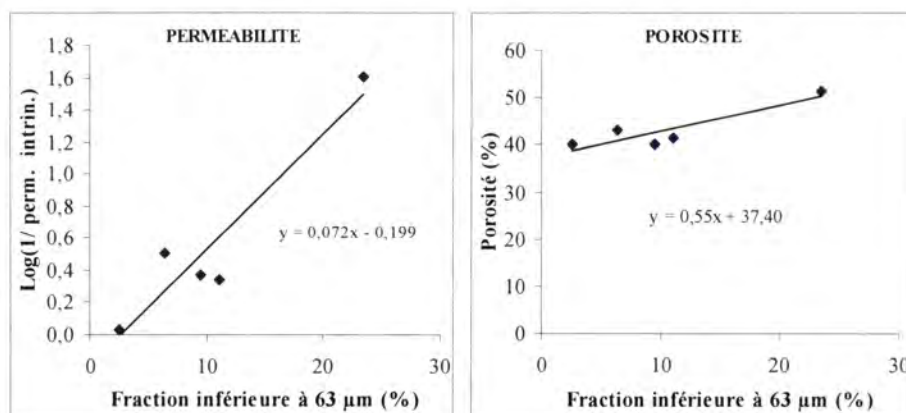


Figure 6. Relations entre la fraction fine (< 63 µm) et la perméabilité ou la porosité.

3.4 Estimation de la porosité

La porosité (p) est la proportion de vide du sédiment : $p = V_{\text{vide}} / (V_{\text{solide}} + V_{\text{vide}})$. Intervenant dans certains calculs de la perméabilité à partir de la granulométrie, elle a été déterminée à partir des échantillons de sédiment récupérés après les mesures à l'aide des perméamètres. Le sédiment a été pesé avant et après séchage comme d'habitude (d'où V_{vide}), et le volume de solide (V_{solide}) déterminé en appliquant une masse volumique de $2,6 \text{ kg/dm}^3$, valeur mesurée antérieurement par F. Andrieux-Loyer. Mais, ces échantillons ayant été compressés, il a fallu déterminer le volume initial à pression nulle. Pour cela, on a utilisé la mesure de la variation d'épaisseur du sédiment sous l'effet de la charge appliquée, valeur fournie par le perméamètre. Comme le solide est incompressible dans les conditions expérimentales, la diminution de volume correspond seulement à la perte d'eau interstitielle.

Sédiment	037	038	047	051	067
Porosité %	49-54*	40	40	43	39-44*

* les gammes correspondent à des réplicats en conditions différentes.

En reliant la porosité à la fraction fine (figure 6) on obtient une relation cohérente.

4 GRANULOMÉTRIE

La granulométrie peut être utilisée pour calculer la perméabilité à l'aide de plusieurs types de formules empiriques.

4.1 Granulomètre

Nous avons utilisé le granulomètre LS Coulter de géologie (nous remercions Nabil Sultan, GM-LES, Brest, pour l'accès à l'instrument). Les sédiments sont tamisés à 2 mm. Le granulomètre détermine les volumes dans 93 classes de tailles.

4.2 Résultats

Les résultats sont présentés sur les figures 7 et 8, en abscisses normale et logarithmique.

On a comparé les résultats granulométriques obtenus à l'Ifremer à ceux fournis par le Laboratoire d'Analyse Brest-Océan (LABO) à partir des échantillons RNO qui lui avaient été confiés. La figure 9 montre qu'il y a quelques différences, non systématiques, entre les deux mesures granulométriques. En particulier, pour les deux échantillons 38 et 51, le LABO y trouve des proportions plus élevées de particules fines (< 100 µm). Cela est attribué à

l'échantillonnage différent, puisque le LABO a reçu le premier centimètre supérieur de la carotte (en général un peu plus « vaseux ») alors que nous avons analysé un extrait mélangé de toute la carotte.

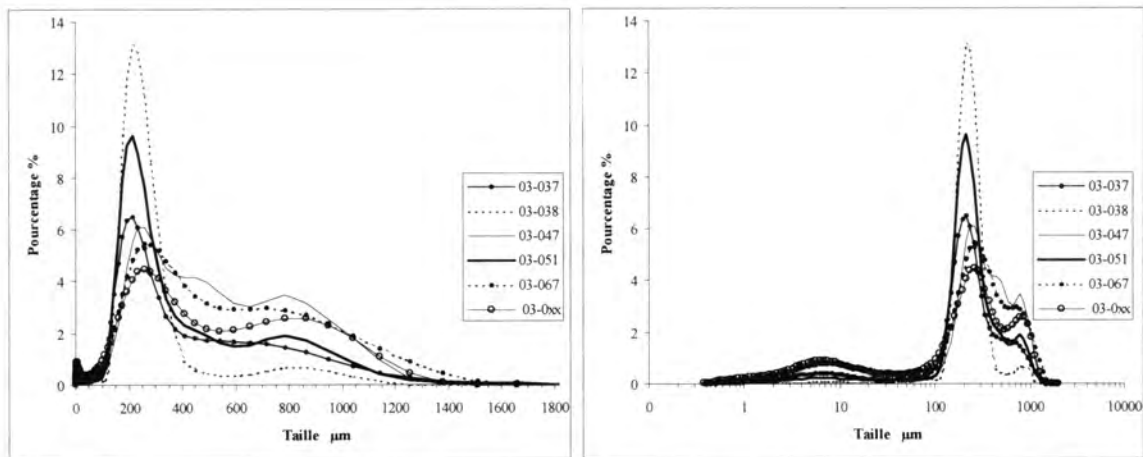
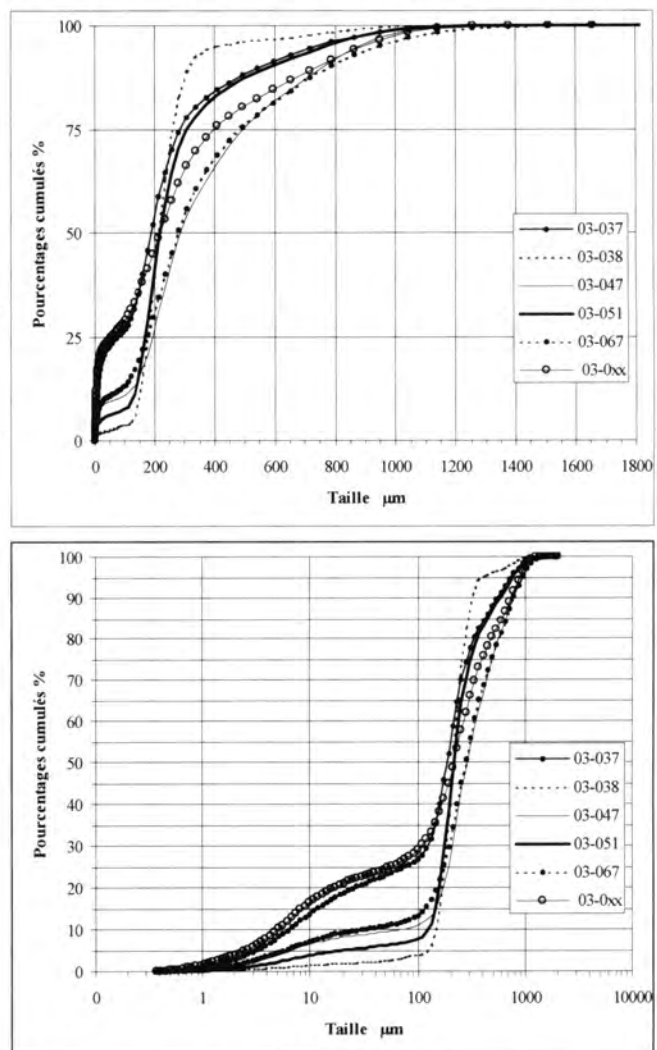


Figure 7. Spectres granulométriques des sédiments de la campagne RNO 2003.

Figure 8. Pourcentages cumulés des fractions granulométriques des sédiments de la campagne RNO 2003.



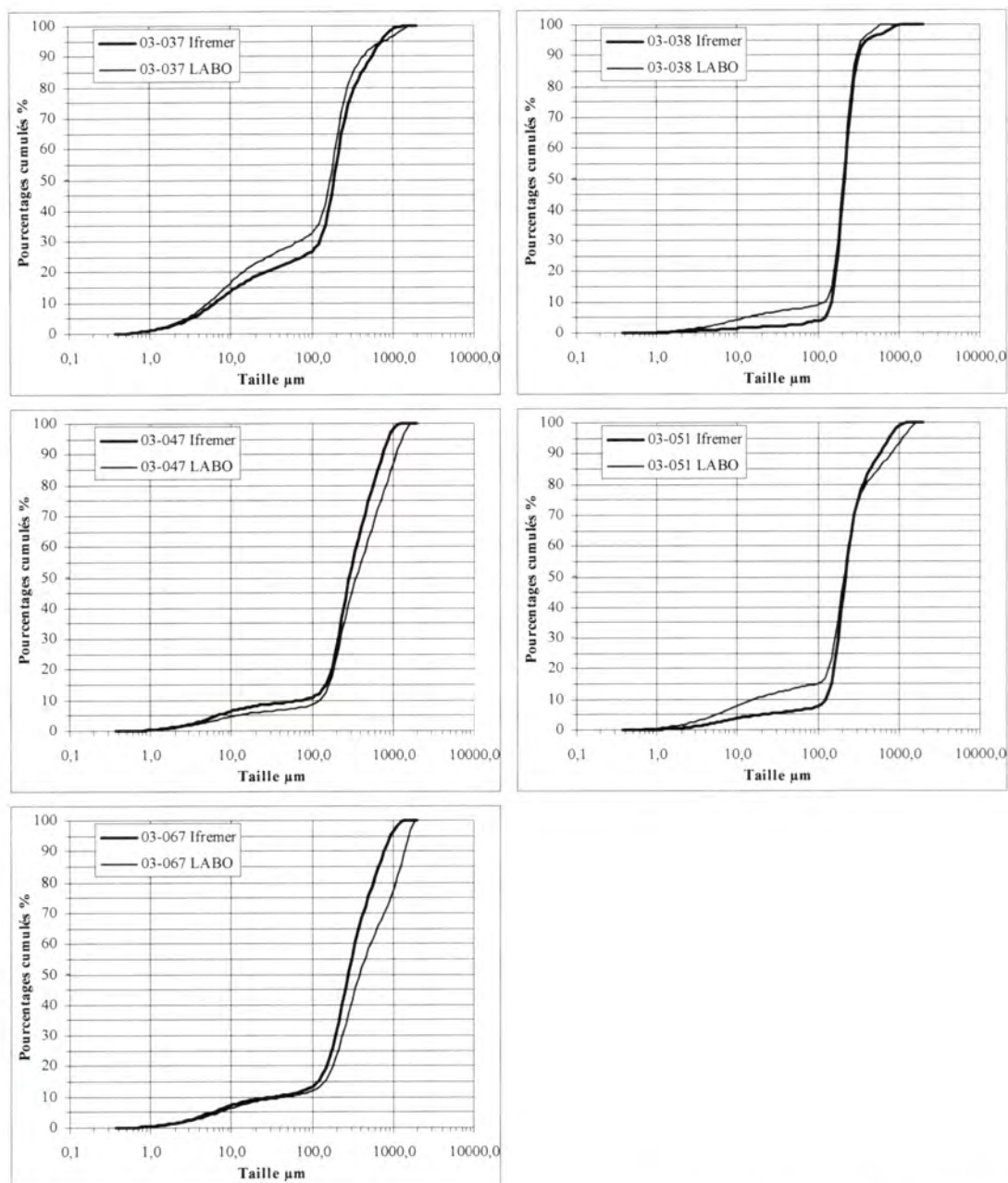


Figure 9. Comparaison des granulométries laser de l’Ifremer et du L.A.B.O. sur les mêmes sédiments.

Les granulométries laser mettent en évidence les classes de particules fines, de taille généralement inférieure à 20-30 μm et présentant un pic vers 7-8 μm (limite « fine-very fine silt »). Les sédiments examinés ont des pourcentages cumulés de 5-10 % au-dessous de 20 μm (jusqu’à ~ 20 % aux stations 37 et xx). Le tableau ci-dessous (voir définitions en annexe) présente les pourcentages cumulés. On note aussi que le sédiment 38, légèrement à l’ouest (< 2 milles) du 37, est peu envasé (un peu plus selon les résultats LABO que selon les résultats Ifremer). On suppose qu’il correspond à la bande de sable moyen observable sur la carte de Lesueur et al. (2003). Il est très proche de la localisation de la station S1 (chambre

benthique et carottage) des campagnes de 1997. La station 37 est, elle, très proche de la station 16 où les chambres benthiques ont été posées en 1994.

POURCENTAGES GRANULOMÉTRIQUES CUMULÉS

Station	< 63 μm	< 125 μm	< 250 μm	< 500 μm	< 1000 μm	Total < 2000 μm
03-037	24,0	30,0	68,3	88,1	98,7	100,0
03-038	2,8	5,0	71,1	96,1	99,7	100,0
03-047	9,7	12,5	41,2	75,3	98,0	100,0
03-051	6,5	9,8	62,1	87,3	98,9	100,0
03-067	11,3	15,8	43,7	75,8	96,3	100,0
03-0xx	25,5	32,1	56,3	80,6	97,6	100,0

Taille des percentiles 10, 25, 50, 60 et 75 (en μm). Classes granulométriques Wentworth, C_U et indice de Trask déterminés sur le sédiment tamisé à 2 mm (cf. annexe).

Station	d_{10}	d_{25}	d_{50}	d_{60}	d_{75}	Classe	C_U d_{60}/d_{10}	I. Trask $(d_{75}/d_{25})^{1/2}$
03-037	6,3	76	189	218	288	Fine sand	34	1,9
03-038	147	176	212	229	259	Fine sand	1,6	1,2
03-047	74	193	289	353	496	Medium sand	4,8	1,6
03-051	126	169	218	244	311	Fine sand	1,9	1,3
03-067	33	174	279	335	487	Medium sand	10	1,7
03-0xx	5,0	56	219	270	399	Fine sand	54	2,7

Il faut remarquer que les deux sables « moyens » (stations 47 et 67) contiennent néanmoins environ 10 % de particules < 63 μm et 12 à 15 % de particules < 125 μm , ce que ne montraient pas les granulométries de 1992, effectuées par tamisage à sec.

Les calculs en unités phi conduisent aux valeurs de critères ci-dessous (cf. annexe).

Station	Aux tailles des percentiles en μm correspondent les valeurs en unité phi :				
	d_5	d_{16}	d_{50}	d_{84}	d_{95}	ϕ_{95}	ϕ_{84}	ϕ_{50}	ϕ_{16}	ϕ_5
03-037	3,2	13,4	189	402	740	8,30	6,23	2,41	1,31	0,43
03-038	129	161	212	287	409	3,00	2,64	2,23	1,80	1,29
03-047	6,8	153	289	642	882	7,20	2,71	1,79	0,64	0,18
03-051	21	149	218	426	770	5,65	2,75	2,20	1,23	0,38
03-067	5,7	126	279	647	940	7,45	2,98	1,84	0,63	0,09
03-0xx	2,6	9,5	219	582	889	8,60	6,72	2,19	0,78	0,17
	D'où les critères suivants									
	Moyenne Géométrique MG phi	Moyenne Géométrique MG μm	Écart type $\sigma(\phi)$		Coefficient d'asymétrie (skewness)		Coefficient de kurtosis			
03-037	3,3	100	2,4		0,53		1,67			
03-038	2,2	214	0,5		-0,07		1,26			
03-047	1,7	305	1,6		0,21		2,11			
03-051	2,1	240	1,2		0,02		2,45			
03-067	1,8	283	1,7		0,25		2,03			
03-0xx	3,2	106	2,8		0,52		1,22			

En fonction des valeurs de ces critères, les sédiments peuvent être décrits comme suit :

Station	Description des sédiments selon le critère (cf. annexe) :		
	Classement (écart type)	Asymétrie	Kurtosis
03-037	très mal classé	forte asymétrie vers grains fins	très leptokurtique
03-038	assez bien à bien classé	symétrique	leptokurtique
03-047	mal classé	asymétrie vers grains fins	très leptokurtique
03-051	mal classé	symétrique	très leptokurtique
03-067	mal classé	asymétrie vers grains fins	très leptokurtique
03-0xx	très mal classé	forte asymétrie vers grains fins	leptokurtique

On note globalement que les sédiments n'ont pas une distribution « normale », mais sont dissymétriques au profit des particules fines. Néanmoins, le coefficient de « kurtosis » caractérise les sédiments comme « leptokurtiques », c'est-à-dire que la distribution centrale est plus régulière (pic étroit) que celle des extrémités.

5 ESTIMATION DE LA PERMÉABILITÉ À PARTIR DE LA GRANULOMÉTRIE

Des relations empiriques ont été établies par différents auteurs pour calculer la perméabilité à partir des caractéristiques granulométriques. Une recherche sur internet a montré que l'on trouve de nombreuses formules de calcul qui se basent, à l'origine, sur celle de Hazen (1911) avec des modifications supposées prendre en compte la forme des grains ou la porosité. Il est parfois difficile de déterminer l'origine des modifications d'une formule (paramètres pris en compte ou valeur des coefficients) ainsi que de savoir quelles sont les unités à utiliser.

5.1 Relation de Hazen

Elle relie la *conductivité hydraulique* K à la taille granulométrique du percentile 10 %, soit d_{10} = diamètre *au-dessous* duquel on trouve 10 % des particules (en masse).

Selon Chapuis (2004), la **relation d'origine** est : K (cm/s) = $(d_{10})^2$, (d_{10} en « mm »).

Mais en général on la trouve sous la forme :

$$K$$
 (cm/s) = $C_H \times (d_{10})^2$, avec « d_{10} » exprimé en « cm ».

Le coefficient empirique C_H dépend des caractéristiques d'homogénéité du sédiment et devrait être entre 120 et 150 (Fetter, 1994).

Normalement la formule de Hazen s'applique aux sables meubles (non consolidés). Elle n'est considérée applicable que pour des sédiments de d_{10} **compris entre 100 μ m et 3 mm** et de coefficient d'uniformité C_U (= d_{60}/d_{10}) **inférieur à 5** (Chapuis, 2004).

Farag (2004) utilise la modification de Shepherd (1989) :

$$K$$
 (m/s) = $0,002 \times (d_{10})^{1,7}$, avec « d_{10} » exprimé en « mm ».

Zwahlen et Renard (2002) fournissent la relation :

$$k$$
 (perm. intrinsèque) = $6,54 \cdot 10^{-4} \times (d_{10})^2$, avec « d_{10} » en « mètre » (EQ1)

Dans l'article de Rush et al. (2001) on trouve une autre expression de la perméabilité intrinsèque « k » selon Hazen :

$$k_H = 1,019 \cdot 10^3 \text{ (m}^2\text{s)} \times (d_{10})^2 \times v \text{ (} v = \text{viscosité cinématique)}.$$

Ici on introduit la viscosité cinématique, soit $v = \eta/\rho$ (à la puissance de 10 près, v et η s'expriment par le même nombre puisque ρ est proche de 1). Mais les auteurs n'indiquent pas les unités utilisées ni comment est obtenu le coefficient $1,019 \cdot 10^{-3}$.

La relation proposée sur le site www.geo.utexas.edu/courses... introduit la porosité :

$$K = (g/v) \times C_H \times f(p) \times (d_{10})^2$$

où : g = accélération de la pesanteur ; $C_H = 6 \cdot 10^{-4}$; $f(p) = (1 + 10(p - 0,26))$, expression fonction de la porosité « p ». Le terme « v », non précisé, ne peut être que la viscosité cinématique d'après l'expression reliant « k » et « K » (§ 3.1). Par conséquent, il vient :

$$k = 6 \cdot 10^{-4} \times f(p) \times (d_{10})^2 \quad \text{(EQ2)}$$

Toutefois, l'unité dans laquelle doit être exprimée la taille granulométrique d_{10} n'était pas précisée, mais il ne peut s'agir que du « μm ».

On note que cette relation ressemble à celle fournie préalablement pour K mais avec, ici, une correction de porosité. Or la valeur de cette correction a une incidence non négligeable sur le résultat car, par exemple :

- pour $p = 0,3$: $f(p) = 1,4$;
- pour $p = 0,4$: $f(p) = 2,4$;
- pour $p = 0,5$: $f(p) = 3,4$.

On a calculé les perméabilités avec les équations EQ1 et EQ2. Il n'est pas sûr que ces formules s'appliquent aux sédiments ayant un $C_U > 5$. Porosités : voir § 3.4. Voir tableau récapitulatif § 5.5.

5.2 Relation de Carman-Kozeny

La relation proposée sur le site www.geo.utexas.edu/courses... donne la perméabilité intrinsèque « k » :

$$k = C \times d^2 \times p^m / (1 - p)^n,$$

où C = constante empirique dépendant de la forme des grains (si sphères $C = (1/180)$) ; d = diamètre « caractéristique » (généralement $d = d_{50}$) ; p = porosité ; exposants typiques : $m = 3$ et $n = 2$, mais aussi $3 \leq m \leq 9$ et $n = 0$.

Pour des **sphères**, on obtient la relation proposée dans l'article de Rush et al. (2001) :

$$k_{CK} = p^3 \times d_{50}^2 / (180 \times (1 - p)^2).$$

Si « d_{50} » est en « μm », « k » est en « darcy ».

On a appliqué cette relation. Voir tableau récapitulatif § 5.5.

5.3 Relation de Krumbein-Monk

La relation de base de Krumbein-Monk, qui fournit la perméabilité intrinsèque, est la suivante (d'après Pfannkuch et Paulson, non daté) :

$$k_{KM} \text{ (darcy)} = 760 \times GM^2 \times e^{-1,31 \cdot \sigma(\phi)} ;$$

Ici, GM est la moyenne géométrique de diamètre de grain (en « mm ») et $\sigma(\phi)$ est l'écart-type sur l'échelle ϕ (phi) ; voir calculs de ces grandeurs en annexe.

La formule proposée dans l'article de Rush et al. (2001) est peu différente :

$$k_{KM} = 7,50 \times 10^{-4} \times d_{50}^2 \times e^{-1,31 \cdot \sigma(\phi)},$$

mais les unités, forcément différentes, ne sont pas précisées (d_{50} devrait être en mètre).

Normalement la formule de Krumbein-Monk a été développée pour des sédiments bien classés (well sorted) de **taille moyenne entre $-0,75\phi$ et $1,25\phi$** , avec des **écart-types $\sigma(\phi)$ de $0,04\phi$ à $0,8\phi$** . On voit donc, d'après le tableau des critères de la section § 4.2, que **la formule ne s'applique à aucun de nos sédiments**. Le calcul de la perméabilité n'a donc pas été fait.

5.4 Relation de Chapuis

Chapuis (2004) a comparé des mesures et des estimations par différentes relations. Il propose une relation applicable aux sables vaseux de coefficient d'uniformité < 12 :

$$K_{(cm/s)} = 2,4622 \times [d_{10}^2 \times e^3 / (1 + e)]^{0,7825}; \text{ avec } e = p / (1 - p).$$

Donc, en introduisant « p » au lieu de « e », en mettant d_{10} en μm au lieu de mm et en convertissant en perméabilité intrinsèque en « darcy » :

$$k_{(darcy)} = 2,4622 \times [d_{10}^2 \times p^3 / (1 - p)^2]^{0,7825} \times 10^{-3}.$$

Sur la base de ses mesures, Chapuis indique une estimation à un facteur 2 près (entre 0,5 et 2 fois la perméabilité mesurée).

Normalement, la formule ne devrait pas s'appliquer aux sédiments 37 et xx dont le coefficient d'uniformité est supérieur à 12 ($C_U = 34$ et 54). Voir tableau récapitulatif § 5.5.

5.5 Tableau récapitulatif de comparaison mesures-calculs

Les cellules grisées correspondent à des sédiments ayant des caractéristiques hors de la gamme d'application de la formule (dans le cas où cette gamme est spécifiée pour la formule considérée).

Station	d_{10}	d_{50}	$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$	Perméabilité intrinsèque (darcy)					
				Mesure*	Hazen EQ1	Hazen EQ2	Hazen Shepherd	Carman-Kozeny	Chapuis
03-037	6,3	189	34	0,025	0,026	0,085	0,037	115	0,029
03-038	147	212	1,6	0,94	14	46	7,7	45	1,6
03-047	74	289	4,8	0,43	3,6	12	2,4	83	0,54
03-051	126	218	1,9	0,31	10	34	5,9	65	1,6
03-067	33	279	10	0,46	0,71	2,3	0,61	90	0,17
03-0xx	5,0	219	54	< 0,5	0,016	0,1	0,025	133	0,018

* Mesure au perméamètre à charge variable, sauf station xx.

Comme on peut le voir, les estimations diffèrent très nettement des mesures, par excès. Étrangement, ce sont les sédiments dont le C_U est hors gamme qui donnent les valeurs les plus proches des mesures. On voit aussi que, même si des formules sont supposées se référer à un même auteur (cas des formules de Hazen), elles peuvent conduire à des résultats très différents. Ce sont les formules de Chapuis (2004) qui paraissent fournir (*globalement*) les résultats les plus proches des mesures. Rush et al. (2001) trouvaient des excès de 4 à 5 fois

avec les relations de Hazen et Carman-Kozeny. Ici, on trouve des surestimations encore plus grandes, *bien que les valeurs calculées soient du même ordre de grandeur que celles trouvées par Rush et al.* : les formules ne sont donc pas adaptées aux types de sédiment trouvés en Baie de Seine. Pour leur part, Forster et al. (2003) ne trouvent qu'un facteur d'environ 3 en excès par la relation de Carman-Kozeny, avec une gamme de valeurs calculées d'environ 10-20 darcy.

6 SYNTHÈSE ET CONCLUSION

Les mesures granulométriques montrent l'asymétrie de distribution des particules de la Baie de Seine, avec la présence d'une fraction fine (plus ou moins importante selon la zone de prélèvement) se surimposant à la fraction sableuse. Cette fraction fine est attribuée aux apports estuariens (Lesueur et al., 2003).

Les mesures de perméabilité conduisent à des valeurs nettement inférieures à celles que l'on peut calculer à l'aide des relations habituellement employées intégrant des données caractéristiques de la granulométrie, comme les pourcentages de certaines classes de taille, et/ou la porosité du sédiment. La correspondance avec les résultats des formules de Chapuis (2004) est nettement meilleure.

La différence entre les mesures et les calculs semble résulter des limites d'application des formules utilisées. Celles-ci ont été déterminées empiriquement sur des types de sédiments qui ne correspondent pas à ceux de la Baie de Seine et les limites d'application sont souvent dépassées.

On en conclut que la fraction fine du sédiment (même en faible proportion) doit jouer un rôle important dans le « colmatage » des interstices entre les grains de la fraction sableuse, ce qui réduit considérablement la perméabilité par comparaison à un sédiment sableux de caractéristiques granulométriques globalement similaires, mais dépourvu de fines. Ce résultat est important dans la mesure où la diminution de perméabilité réduit le phénomène d'advection de l'eau sus-jacente dans la couche superficielle du sédiment au profit des phénomènes de diffusion. En d'autres termes, cela tend à valider également les calculs de flux diffusifs, d'une part, et l'utilisation de chambres benthiques avec agitation interne, d'autre part.

Le fait que le sédiment soit remanié pour les mesures doit normalement conduire à une perméabilité encore plus faible des sédiments « en place » du fait d'une relative accumulation de particules fines dans la couche superficielle, facteur favorable à la réduction de l'échange par advection verticale.

ANNEXE

DÉTERMINATION DE GRANDEURS GRANULOMÉTRIQUES CARACTÉRISTIQUES

Pour caractériser les sédiments on utilise plusieurs critères issus de l'analyse des classes granulométriques, notamment la taille moyenne, la taille médiane, l'écart type (anglais : *standard déviation*), le coefficient d'uniformité (*uniformity coefficient*), le coefficient phi d'asymétrie (*phi coefficient of skewness*), le coefficient phi de kurtosis (*phi coefficient of kurtosis*). [D'après Pfannkuch et Paulson, non daté].

Pour déterminer ces paramètres, on se réfère à la courbe des classes de taille cumulées afin de déterminer le diamètre au-dessous duquel on trouve un pourcentage défini de la masse (ou du volume) des grains. On notera « d_{10} » le diamètre qui **laisse passer 10 %** (= percentile 10 % = P10) du sédiment (10 % plus fin que d_{10}), et donc qui en retient 90 %.

On utilise aussi l'échelle PHI (ϕ) telle que $\phi = -\log_2 d$, avec d = diamètre de grain en millimètre. Note : la conversion inverse, d'unités phi en mm, se fait par : $d = 2^{-\phi}$.

Attention, la classification PHI repose sur une courbe cumulée des *pourcentages de grains plus gros que la taille phi* donnée. Par conséquent, on notera bien que :

d_{10} correspond à ϕ_{90} ou que ϕ_{84} correspond à d_{16} , etc.

Médiane

C'est le diamètre laissant passer (ou retenant) 50 % des grains (percentile 50 % = P50) :

$$M_d = d_{50}$$

Moyenne

Il existe plusieurs formules de calcul du diamètre granulométrique moyen, mais on trouve généralement la suivante, calculée **en unité phi** :

$$M_\phi = (\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}) / 3$$

Attention, cette moyenne est en unité phi et se convertit en millimètre (si nécessaire) avec : $d = 2^{-\phi}$ (cf. ci-dessus). Rappel : ϕ_{84} correspond à d_{16} en unité phi, etc.

Écart type

$$\sigma_\phi = [(\phi_{84} - \phi_{16}) / 4] + [(\phi_{95} - \phi_5) / 6,6]$$

Note : l'écart type est toujours **exprimé en unité phi** dans les équations où il intervient.

Indice de Trask ou de classement (ou sorting index)

Ce coefficient est défini de la manière suivante :

$$S_0 = \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}}$$

Coefficient d'uniformité

Ce coefficient peut être défini de différentes manières selon les auteurs, mais on trouve couramment le rapport suivant :

$$C_U = d_{60} / d_{10}$$

Coefficient phi d'asymétrie (*phi coefficient of skewness*)

$$\alpha_\phi = [(\phi_{84} + \phi_{16} - 2\phi_{50}) / 2(\phi_{84} - \phi_{16})] + [(\phi_{95} + \phi_5 - 2\phi_{50}) / 2(\phi_{95} - \phi_5)]$$

Note : ce coefficient est **sans dimension**, mais *toujours calculé en unité phi*.

Si $\alpha_\phi = 0$, la distribution est symétrique.

Si $\alpha_\phi > 0$ (positif) il y a une asymétrie en faveur des sédiments fins.

Si $\alpha_\phi < 0$ (négatif) il y a une asymétrie en faveur des sédiments grossiers.

Coefficient phi de kurtosis (*phi coefficient of kurtosis*)

Ce coefficient, plus complexe, mesure l'homogénéité de taille des grains aux extrémités de la distribution par rapport à celle des grains au centre.

$$\beta_\phi = (\phi_{95} - \phi_5) / 2,44(\phi_{75} - \phi_{25})$$

Note : ce coefficient est **sans dimension**, mais *toujours calculé en unité phi*.

Si $\beta_\phi = 1$: la distribution est normale, on dit que l'échantillon a un kurtosis normal ou est « mesokurtique ».

Si $\beta_\phi > 1$: la distribution est plus symétrique au centre qu'aux extrémités, l'échantillon est dit « leptokurtique » (ou encore excessivement étroit, pointu).

Si $\beta_\phi < 1$: la distribution est plus symétrique aux extrémités qu'au centre, l'échantillon est dit « platykurtique » (ou encore excessivement aplati).

Résumé de la description d'un sédiment en fonction de ses caractéristiques statistiques

(description en français d'après Aubouin et al., 1968).

Classement du sédiment

Écart type	Description (anglais)	Description (français)
< 0,35 phi	Very well sorted	Très bien classé
0,35 – 0,50 phi	Well sorted	Bien classé
0,50 – 0,71 phi	Moderately well sorted	Assez bien classé
0,71 – 1,0 phi	Moderately sorted	Moyennement classé
1,0 – 2,0 phi	Poorly sorted	Mal classé
2 – 4 phi	Very poorly sorted	Très mal classé
> 4 phi	Extremely poorly sorted	Extrêmement mal classé

Asymétrie du sédiment (skewness)

Coef. d'asymétrie	Description (anglais)	Description (français)
De +1,0 à +0,30	Strongly fine skewed	Forte asymétrie en faveur des grains fins
De +0,30 à +0,10	fine skewed	Asymétrie en faveur des grains fins
De +0,10 à –0,10	near symmetrical	Symétrique
De –0,10 à –0,30	Coarse skewed	Asymétrie en faveur des gros grains
De –0,30 à –1,0	Strongly coarse skewed	Forte asymétrie en faveur des gros grains

Kurtosis

Coef. de kurtosis	Description (anglais)	Description (français)
< 0,67	Very platykurtic	Très platykurtique
0,67 – 0,90	Platykurtic	Platykurtique
0,90 – 1,11	Mesokurtic	Mésokurtique
1,11 – 1,50	Leptokurtic	Leptokurtique
1,50 – 3,00	Very leptokurtic	Très leptokurtique
> 3,00	Extremely leptokurtic	Extrêmement leptokurtique

BIBLIOGRAPHIE

Andrieux F., 1997. Les formes de phosphore particulaire et sédimentaire en environnement côtier : méthodes d'analyse, biodisponibilité, échanges. Thèse Université de Bretagne Occidentale, 330 p.

Andrieux-Loyer F., Aminot A., 2001. Phosphorus forms related to sediment grain size and geochemical characteristics in french coastal areas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 52 : 617-629.

Aubouin J., Brousse R., Lehman J.-P., 1968. Précis de géologie, Tome 1 Pétrologie. Dunod Université.

Avoine J., 1981. L'estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse 3ème cycle, Caen, 236 p.

Avoine J., Crevel L., 1986. Influence des apports fluviaux en Baie de Seine. In "La Baie de Seine", 24-26 avril 1985. IFREMER, Actes de colloque n° 4, 125-134.

Boudreau B.P., 1997. Diagenetic models and their implementation. Springer, Berlin. 414 p.

Chapuis R.P., 2004. Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Canadian Geotechnical Journal* 41 : 787-795.

Farag N. O., 2004. Estimating the Hydraulic Conductivity using Empirical Formulae, Field Permeability and Pumping Tests. *Journal of the Housing and Building Research Center*, 1 : 47-55. (<http://www.hbrc.edu.eg/ehbrc/journal/SG34.pdf>).

Fetter C.W., 1994, *Applied Hydrogeology*, Prentice Hall, N.J. (in Lee S.S., 1999).

Forster S., Bobertz B., Bohling B., 2003. Permeability of sands in the coastal areas of the southern Baltic Sea : mapping a grain-size related sediment property. *Aquatic Geochemistry* 9 : 171-190.

Hazen A., 1911. Discussion of « Dams on sand formation », by A.C. Koenig. *Transactions of the American Society of Civil Engineering* 73 : 199-203. (in Chapuis, 2004).

Larsonneur, 1971. Manche centrale et baie de Seine : géologie du substratum et des dépôts meubles. Thèse, Caen, 394 p.

Lee S.S., 1999. A modeling study on vadose zone leaching, saturated zone mixing and groundwater flow in heterogeneous aquifer (Vadose-groundwater model). Chapitre 4, PhD, University of Rhode Island, USA (<http://www.vadose.net/CHAP4E.htm>).

Lesueur P., Lesourd S., Lefebvre D., Garnaud S. and Brun-Cottan J.C., 2003. Holocene and modern sediments in the Seine estuary (France) : a synthesis. *Journal of Quaternary Science* 18 : 339-349.

Pfannkuch H.O., Paulson R. Grain Size Distribution and Hydraulic Properties. <http://www.cs.pdx.edu/~ian/geology2.5.html>

Rush A., Forster S., Huettel M., 2001. Bacteria, diatoms and detritus in an intertidal sandflat subject to advective transport across the water-sediment interface. *Biogeochemistry* 55 : 1-27.

Shepherd R.G., 1989. Correlation of permeability and grain size. *Groundwater* 27(5) : 633-638. (in Farag, 2004).

Zwahlen et Renard, 2002. Hydrologie générale. Cours de l'université de Neuchâtel. (<http://www.unine.ch/chyn/RENARD/hydrogeh/node16.html>)

*Impression : Service IDM/RIC
IFREMER – Centre de Brest
BP 70 – 29280 Plouzané
Tél. : 02 98 22 43 53*