

# Etude de l'érodibilité

---

## 1 Caractérisation de la sensibilité à l'érosion

Les objectifs des recherches décrites dans cette partie sont d'une part l'identification des corrélations éventuelles qui relieraient ces paramètres physiques à l'érodibilité des sols et d'autre part l'amélioration de la compréhension du comportement du sol face à l'érosion. Dans un souci de compréhension et d'exhaustivité, nous procédons en deux étapes :

- la recherche de paramètres explicatifs et de corrélation pour l'ensemble des sols testés compactés au voisinage de l'optimum Proctor,
- l'étude de la variation de la sensibilité à l'érosion pour un sol compacté dans un état différent de l'optimum Proctor.

### 1.1 Recherche de corrélations entre la sensibilité à l'érosion et les propriétés physiques du sol

L'étendue des ouvrages concernés par l'érosion et l'importante variabilité des sols qui les constituent laissent supposer la nécessité de vastes campagnes de mesures pour caractériser la sensibilité à l'érosion.

La recherche de corrélation entre les différents paramètres mesurés et la sensibilité à l'érosion permet d'optimiser les campagnes de mesures. Elle offre la possibilité de parvenir à une évaluation de la sensibilité à l'érosion après l'identification des paramètres prépondérants.

En se focalisant sur ces paramètres simples à mesurer, il est possible d'augmenter l'étendue géographique investiguée grâce à la diminution des coûts d'essais. L'extrapolation de la sensibilité à l'érosion peut aussi être envisagée d'après des données de la littérature (par comparaison). L'utilisation de méthodes géostatistiques (krigeage) peut être envisagée pour reconstruire une carte des érodibilités. à partir de données géotechniques simples.

Pour l'ensemble des sols testés avec le JET, nous avons systématiquement mesuré les paramètres suivants : la teneur en eau, la densité, l'optimum Proctor, les limites d'Atterberg et la distribution granulométrique. Par ailleurs, grâce à la mesure de la teneur en eau et de la densité, le degré de saturation de l'échantillon avant l'essai JET est calculé.

L'objectif des recherches décrites dans cette partie est l'identification des corrélations éventuelles reliant ces paramètres physiques à l'érodibilité des sols. Cette recherche est menée en ayant recours aux outils d'analyse statistique que sont les corrélations linéaires multiples avec les tests d'hypothèse (Bois et Obled, 2003 ; Tomassone et al., 1992), ainsi que l'analyse en composantes principales (Duby et Robin, 2006). L'interprétation des essais est effectuée suivant la méthode énergétique.

#### **a) Principe de l'analyse et amélioration métrologique**

##### ***Principe de l'analyse***

Comme pour la comparaison des érodimètres, les sols sont compactés de manière dynamique en suivant la norme Proctor.

Pour un même sol testé, sa sensibilité à l'érosion est fortement dépendante de la densité initiale, et donc de sa teneur en eau lors du compactage. Afin de caractériser l'influence des autres paramètres sur l'érodibilité, cette recherche de corrélations est effectuée avec les échantillons compactés à proximité de l'optimum Proctor normal (teneur en eau = optimum +/- 1,5 %).

Sur les mélanges sablo-argileux reconstitués, K20-S80, K50-S50, des mesures complémentaires ont été effectuées. La cohésion non drainée ( $C_u$ ) a été mesurée grâce à un scissomètre de laboratoire et la perméabilité a été mesurée avec un perméamètre à charge variable.

##### ***Amélioration métrologique***

Pour ces mêmes sols, une balance immergée est disposée sous l'échantillon testé afin de mesurer les évolutions de masse déjaugée au cours des essais lorsque l'on arrête le jet (mesure de profondeur). Cette modification métrologique a pour objectif d'améliorer la détermination de la masse érodée sur la surface du moule, et s'affranchir de l'hypothèse d'isotropie de l'érosion nécessaire lors de la mesure par pied à coulisse. Ce dispositif de pesée permet d'avoir accès à une quantification intégrale sur le volume.

La mesure repose sur la déformation d'une poutre encastrée de dimensions connues. Grâce à cette déformation, il est possible de connaître le moment fléchissant. La valeur de l'effort appliqué peut être déduite. Cela impose aussi que cette charge soit positionnée de

manière précise par rapport à l'encastrement. La précision est aussi affectée par la qualité de l'encastrement.



Figure IV-1 : Balance immergeable pour la mesure sous le jet.

Le support a été réalisé par assemblage boulonné d'une plaque d'acier rehaussant la balance, et d'un support plat et stable en PVC épais. Par contre, l'horizontalité n'est pas réglable. La calibration tension - masse a été faite dans l'air avec des pesons, à l'aide d'une seconde balance. Les résultats sont considérés représentatifs car la pente moyenne tension – masse obtenue est identique avec la calibration d'usine.

La précision obtenue sur la mesure est de l'ordre de +/- 1 g dans l'air, pour une position centrée des masses. Un faible fluage de l'ordre d'une différence de masse de 1,1 g a été constaté avec le temps, sur une durée de 2h20. Pour cet instrument de mesure une erreur totale de +/- 2g est considérée dans nos conditions d'utilisation.

Nous supposons que la variation de masse déjaugée est essentiellement due à l'expulsion hors du moule de particules érodées. Au cours de l'essai, les variations de la saturation de l'échantillon et le dépôt de particules érodées peuvent être négligés. En supposant que la poussée d'Archimède s'applique sur la masse totale pesée, nous pouvons exprimer la masse érodée déjaugée par :

$$M_{\text{érodée immergée}} = (M_{\text{sol érodée}} + M_{\text{eau érodée}}) - \rho_w V_{\text{érodé}} \quad (IV-1)$$

$M_{\text{érodée immergée}}$  : masse de sol humide érodé mesuré en immersion [kg].

$M_{\text{sol érodée}}$  : masse de sol sec érodée [kg].

$M_{\text{eau érodée}}$  : masse d'eau attachée au sol érodé [kg].

La masse volumique déjaugée s'exprime par :

$$(\rho - \rho_w) = \frac{M_{\text{érodée immergée}}}{V_{\text{érodé}}} \quad (IV-2)$$

Ainsi à l'aide de la mesure de la masse érodée immergée et de la masse volumique sèche initiale, nous pouvons calculer la masse sèche érodée:

$$M_{\text{sol érodé}} = \rho \frac{M_{\text{érodée immergée}}}{(\rho - \rho_w)(1 + w)} = \rho_d \frac{M_{\text{érodée immergée}}}{(1 + w)\rho_d - \rho_w} \quad (IV-3)$$

## b) Outils de l'analyse linéaire

### *La corrélation linéaire*

Afin de quantifier la qualité d'une corrélation, nous utilisons deux variables, le coefficient de corrélation (ou ce dernier au carré  $r^2$ ) et la p-value. Le coefficient de corrélation ( $r$ , qui peut être négatif) est défini comme la covariance des 2 variables considérées, ici l'indice d'érosion et un des paramètres, divisée par le produit des écarts types de chacune des 2 variables. Il s'exprime sous la forme :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (IV-4)$$

Considérons l'hypothèse, dite nulle, de l'absence de corrélation significativement non nulle entre les variables. La p-value évalue la validité de cette hypothèse, c'est à dire qu'elle évalue la probabilité de se tromper en rejetant l'hypothèse « nulle ». Dans le cas du logiciel utilisé (XLstat – Addinsoft 2007), cette détermination est basée sur le coefficient de corrélation linéaire. La variable  $s$ , définie par l'équation ( IV-4 ) est calculée avec l'effectif de l'échantillon ( $n$ ).

$$s = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (IV-5)$$

Si les grandeurs de la corrélation suivent une loi normale et sont indépendantes (hypothèse nulle), la variable  $s$  suit une loi de Student-Fisher. En fonction du nombre de degrés de libertés (taille de l'échantillon moins deux paramètres) et le risque que l'on veut considérer pour rejeter l'hypothèse nulle, on recherche la valeur  $t$  associée dans une table de Student-Fisher pour un test bilatéral. Si la valeur de  $t$  lue dans le tableau est supérieure à notre valeur de  $t$ , l'hypothèse « nulle » ne peut être rejetée. Plus notre valeur sera importante par rapport à la valeur  $t$  lue, plus on sera éloigné du risque considéré. Il est aussi possible de calculer directement un risque de se tromper associée à notre valeur de  $t$  en recherchant par

analyse inverse la p-value. On retrouvera ces informations dans le livre de Tomassone et al. 1992.

En général, il est admis une p-value de 5% pour écarter l'hypothèse « nulle ». Etant donné la faible taille de notre échantillon par rapport aux différents sols testés et le fait que celui-ci regroupe un ensemble de caractéristiques différentes, on acceptera une p-value de 35 % avant de la rejeter. Il faut noter que cet accroissement du seuil d'acceptation conduit à augmenter le risque de se tromper en rejetant l'hypothèse nulle.

### **c) L'Analyse en Composantes Principales**

L'ACP consiste à représenter les paramètres dans un espace factoriel de dimension égale à leur effectif et centré sur le barycentre des grandeurs. Chaque paramètre est associé à un vecteur qui passe par le barycentre du nuage de l'échantillon. La position des différentes grandeurs dans l'espace factoriel est définie d'après le degré de corrélation entre paramètres. Le produit scalaire de deux vecteurs positions des variables est égal au coefficient de corrélation ( $r$ ) entre les deux paramètres associés au vecteur. Cette analyse définit donc les relations linéaires inter variables. Pour représenter cet espace avec le minimum de variables, on recherche les axes principaux qui sont paramétrés par une valeur propre et une combinaison linéaire des variables.

Les axes avec la valeur propre la plus élevée sont les axes explicatifs. En projetant les variables dans les plans définis par les axes principaux, il est possible de savoir si les grandeurs sont fortement corrélées à ces axes principaux.

Une représentation consiste à tracer les projections dans les jeux de 2 axes principaux. Une grandeur est d'autant mieux expliquée dans le plan considéré que sa position est proche du cercle de rayon unité. Deux paramètres sont en relation linéaire lorsque leur position sont très proches ou diamétralement opposées ( $r = \pm 1$ ). Des variables avec 2 directions perpendiculaires sont considérées comme complémentaires pour expliquer la dispersion.

## **1.2 Analyse de la sensibilité à l'érosion avec l'aide de la corrélation présente dans la littérature**

Dans la littérature, certains paramètres ont été utilisés pour exprimer des corrélations avec l'indice du HET. La confrontation HET - JET que nous avons effectuée au Chapitre III-5 a validé l'analyse générale de la sensibilité de l'érosion d'interface indépendamment de l'érodimètre utilisé, JET ou HET.

a) **Comparaison avec l'analyse de Wan et Fell**

Le Tableau IV-1 présente les valeurs du coefficient de corrélation et celles de la p-value pour les différents paramètres. Les valeurs en gras dans le tableau correspondent aux corrélations pour lesquelles cette p-value est inférieure à 5%. De manière générale, Wan et Fell (Interpretative report HET, 2002) obtiennent des p-values plus faibles de par l'effectif plus important de leur étude pour les plages d'exploration considérées.

Variables	Corrélation avec l'indice JET		Corrélation avec l'indice HET		Corrélation avec l'indice HET	
	r	p-value	Wan et Fell (fines soils)		Wan et Fell (All soils)	
			r	p-value	r	p-value
Masse volumique sèche	0,198	0,0%			-0,49	0,0%
Degré compactage	-0,014	24,7%	0,11	30,0%	-0,05	54,0%
Teneur en eau	-0,131	93,5%			<b>0,5</b>	0,0%
$\Delta w/w_{opt}$	0,038	44,8%	0,14	18,0%	0,09	29,0%
<b>Saturation</b>	0,245	82,6%	<b>0,36</b>	0,0%	<b>0,47</b>	0,0%
Fraction sableuse	0,194	15,1%			-0,68	0,0%
Fraction de fines	-0,194	25,6%			0,64	0,0%
<b>Fraction argileuse</b>	0,173	25,6%	<b>0,31</b>	0,2%	<b>0,67</b>	0,0%
LL	0,306	31,3%			0,62	0,0%
<b>IP</b>	0,195	7,0%	<b>0,25</b>	1,2%	<b>0,59</b>	0,0%
<b>Activité</b>	<b>0,334</b>	25,4%			0,37	0,0%

Tableau IV-1 : Corrélations linéaires entre l'indice du jet et les différents paramètres, et corrélations linéaires entre l'indice du HET et les grandeurs mesurées par Wan et Fell (Interpretative report HET, 2002).

L'analyse des valeurs de r indique tout d'abord qu'aucune corrélation significative entre l'un des paramètres et l'indice du JET n'apparaît clairement. Cette absence de corrélation peut probablement s'expliquer par la grande variabilité des sols testés qui sont de nature physique très différente. Par comparaison des valeurs de coefficients de corrélation et des p-values pour notre étude avec celle de Wan et Fell (2002), les variables qui semblent les plus pertinentes dans le cadre d'une analyse linéaire des sols sont : l'activité de l'argile, l'indice de plasticité, les fractions de sable, de fines, le degré de saturation et la masse volumique sèche.

A partir de ce constat, et en première approche de recherche de corrélations, nous pouvons utiliser les mêmes paramètres géotechniques pour les deux appareils. L'étude paramétrique de Wan et Fell (2004) propose une corrélation entre l'indice du HET ( $I_{HET}$ ) et neuf paramètres sous la forme suivante :

$$I_{\text{HET}} = -1020 + 0,00957\rho_d - 0,042 \frac{\rho_d}{\rho_{\text{dopt}}} + 0,10w + 0,0097\Delta w_R - 0,0056Ff + 0,042Fa - 0,0090LL + 0,11IP + 0,44\text{PinHole} \quad (IV-6)$$

avec :

$\rho_d$  : masse volumique sèche [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] ;

$\rho_{d\text{opt}}$  : masse volumique sèche optimale pour un compactage suivant la norme Proctor [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] ;

$w$  : teneur en eau de l'échantillon au moment du compactage [%] ;

$w_{\text{opt}}$  : teneur en eau optimale pour le compactage Proctor normal [%] ;

$$\Delta w_R = \frac{w - w_{\text{opt}}}{w_{\text{opt}}} [\%] ;$$

$Ff$  : fraction massique de fines par rapport à la masse totale de sol, les fines étant définies comme les grains de taille inférieure à 0,075 mm [%] ;

$Fa$  : fraction massique d'argile par rapport à la masse totale de sol, l'argile étant définie comme les grains de taille inférieure à 5 $\mu\text{m}$  pour Fell et 2 $\mu\text{m}$  dans le cadre de la thèse [%] ;

$LL$  : limite de liquidité [%] ;

$IP$  : indice de plasticité [%] ;

$\text{PinHole}$  : valeur du pin-hole test, compris entre 1 (D1) et 6 (ND1).

Au regard de la valeur du pin-hole test et de son coefficient associé dans l'équation (IV-6), il convient de noter la contribution significative de ce terme dans la corrélation. Cet essai au principe très similaire à celui du HET n'a pas été réalisé dans le cadre de cette étude. De manière complémentaire, nous calculons l'activité de l'argile qui est le rapport de l'indice de plasticité [%] à la fraction massique d'argile [%]. Pour chaque paramètre, le nombre d'individus est de 36 et la plage de variation est présentée dans le Tableau IV-2.

En recherchant une régression linéaire avec le logiciel Xlstat, avec les paramètres utilisés par Wan et Fell (2002), une expression de l'indice d'érosion du jet est obtenue. Ce modèle est construit en minimisant l'erreur entre la prédiction et la mesure en utilisant les moindres carrés. Une des conditions statistiques nécessaires est l'indépendance des erreurs entre elles, qui suivent une loi normale identique. Cette dernière hypothèse a été vérifiée en menant un test du «  $\chi^2$  » sur les résidus.

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
$\rho_d$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1316	1963	1700	136
Degré compactage [%]	89,3	102,2	98,9	2,7
Teneur en eau [%]	10,0	26,1	16,5	3,5
$\Delta w_R$ [%]	-17,0	10,3	-3,7	7,1
Saturation [%]	58,8	92,4	75,6	6,9
Fraction de sable [%]	1,0	52,1	17,4	14,0
Fraction de fine [%]	47,9	99,0	82,6	14,0
Fraction d'argile [%]	6,8	65,9	28,5	15,3
LL [%]	0,0	69,0	38,4	17,6
IP [%]	0,0	44,0	21,3	15,2
Activité	0,00	1,03	0,64	0,32

Tableau IV-2 : Variabilité des paramètres concernant les sols de l'analyse.

$$I_{JET} = -6,020 + 0,01143 \rho_d - 0,1636 \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}} + 0,307 w - 0,00905 \Delta w_R - 0,01299 Ff - 0,0104 Fa + 0,0645 LL - 0,029 IP \quad (IV-7)$$

L'expression proposée conduit à un coefficient de corrélation de 0,644 entre la grandeur mesurée et la valeur prédite pour chaque point. La faiblesse du coefficient de corrélation peut être expliquée par la réalisation d'une analyse uniquement linéaire, et un échantillon couvrant une zone trop vaste.

En comparant l'expression de Wan et Fell pour les sols fins (équation ( IV-6 )) avec notre équation ( IV-7 ), les paramètres qui contribuent suivant le même signe entre les deux équations sont :

- la constante ;
- la masse volumique sèche ;
- la teneur en eau ;
- l'indice de compaction ;
- la fraction fine.

Les autres paramètres contribuent de manière opposée à la valeur de l'indice.

Il paraît difficile de conclure sur l'importance des paramètres surtout que certains sont liés entre eux par définition, ou par le comportement du sol. Cela explique la nécessité de multiplier les variables afin d'expliquer la dispersion.



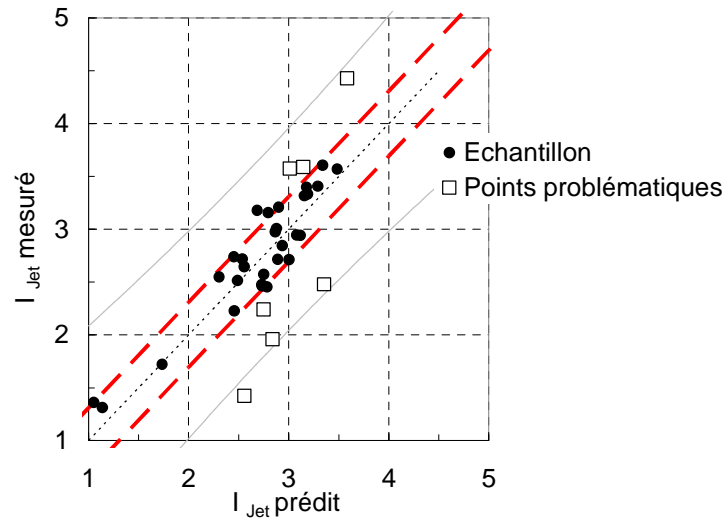


Figure IV-2 : Indice du JET, valeurs mesurées en fonction des valeurs calculées.

La Figure IV-2 représente la valeur mesurée de l'indice du JET en fonction de la valeur calculée avec l'équation ( IV-7 ). La valeur moyenne des écarts est calculée et un écart de +/- 0,308 est matérialisé par les lignes pointillées. Les deux courbes en trait fin continu représentent un intervalle de confiance de 95% c'est-à-dire une probabilité d'avoir une droite de corrélation comprise dans cet intervalle à partir de nos points.

Nous constatons que la corrélation est satisfaisante pour la majorité des essais. Les points éloignés de l'identité, identifiés sur la figure Figure IV-2 comme points problématiques, correspondent aux sols Mix 0 Mix 1 et TF avec MP. Ces deux derniers sols ayant une forte plasticité, les écarts peuvent être dus à des défauts de compactage et à une mauvaise répartition volumique de l'énergie de compactage.

Concernant Mix 0 et Mix 1, les écarts s'expliquent probablement par une variabilité naturelle dans la qualité de l'argile ou la présence de matériau spécifique.

#### b) Critique de l'utilisation de la méthode de Hanson et Cook

La rétro-analyse de l'essai JET développée par Hanson et Cook (2004) repose sur l'estimation du temps en fonction de la profondeur d'affouillement. Ainsi à chaque profondeur d'affouillement correspond une erreur entre un temps estimé et un temps mesuré. Nous calculons la somme des carrés des erreurs pour la durée de l'essai. Cette valeur est ensuite divisée par la durée totale de l'essai au carré. En en prenant la racine, on obtient l'erreur relative moyenne faite sur chaque point. La Figure IV-3 représente cette erreur relative en fonction de la durée de l'essai. Nous constatons que pour des essais de courte durée, donc pour des sols très érodables, cette erreur peut atteindre 0,12. Lorsque la durée de

l'essai est plus importante, c'est-à-dire pour des sols peu érodables, cette erreur est moindre et inférieure à 0,04.

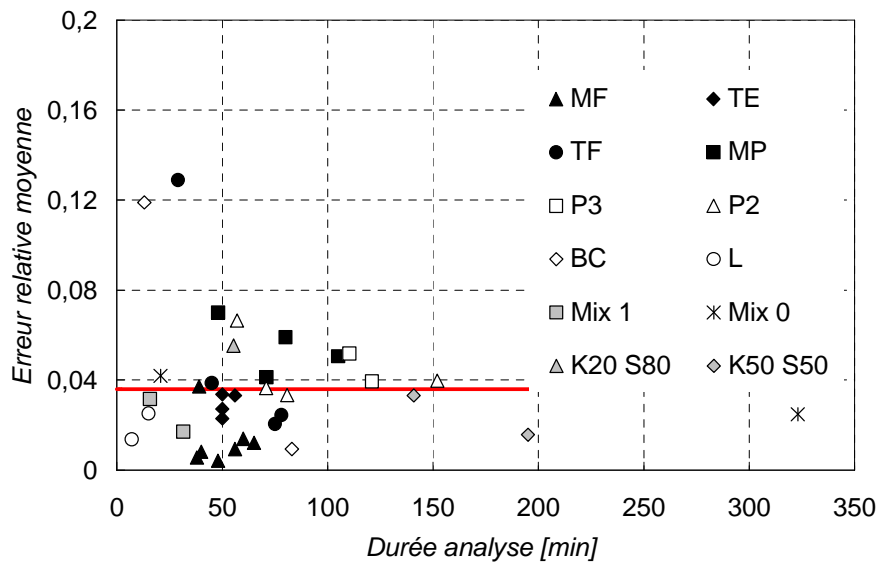


Figure IV-3 : Erreur relative moyenne entre le temps estimé et le temps mesuré par point en fonction de la durée de l'essai.

La variabilité temporelle de l'erreur relative met en évidence les limites de la méthode d'interprétation de Hanson et Cook (2004) qui consiste à supposer une évolution asymptotique de la contrainte jusqu'à la contrainte seuil. A partir de celle-ci, ils déterminent le coefficient d'érosion et donc l'indice du JET. Cela revient à supposer deux lois de comportement. Cette limitation est certainement amplifiée dans le cas de réalisation d'essais sur échantillons compactés. En effet le compactage dynamique engendre des variations de densité et de répartition en eau sur l'épaisseur compactée, et certainement une sensibilité à l'érosion différente avec la profondeur (plus ou moins marquée). D'ailleurs au cours de certains essais d'érodibilité, avec le JET ou le HET, les interfaces entre les couches de compactage peuvent être observées visuellement sur des échantillons très argileux.

L'ensemble des remarques précédentes nous conduit à affiner notre recherche par la recherche de paramètres physiques plus pertinents et à utiliser l'indice de sensibilité à l'érosion (qui représente le comportement de l'échantillon de manière moyenne sur le temps).

## 1.3 Analyse de la sensibilité à l'érosion avec recherche de paramètres

### a) Définition des variables et de la méthodologie

Conformément aux résultats de l'étude de confrontation des érodimètres, nous utilisons le coefficient  $\alpha$  (rapport de la masse érodée et de l'énergie dissipée par érosion) afin de définir l'indice de résistance à l'érosion  $I_\alpha$  tel que :

$$I_\alpha = -\log(\alpha) \quad (IV-8)$$

Les valeurs de  $\alpha$  étant comprises entre  $10^{-6}$  kg.J<sup>-1</sup> et  $10^{-1}$  kg.J<sup>-1</sup>, les valeurs de  $I_\alpha$  sont comprises entre 1 et 6. Les faibles valeurs de  $I_\alpha$  caractérisent des sols très érodables et les fortes valeurs des sols faiblement érodables.

De nombreux auteurs (dont Kenney et Lau, 1985 ; Panagiotopoulos et al., 1997 ; Pham, 2008) ont souligné la forte influence de la granulométrie et de l'argile sur la sensibilité à l'érosion. Par ailleurs nos essais ont montré la grande difficulté rencontrée lors d'une recherche de corrélation dans le cas des sols à caractère plastique.

Afin de prendre en compte cette influence prépondérante de la granulométrie et de la plasticité, nous proposons de discrétiser le sol suivant plusieurs classes granulométriques et suivant les limites d'Atterberg.

### *Critère de granulométrie*

Dans le Tableau IV-3 sont définies les classes granulométriques utilisées pour décrire la distribution granulométrique des sols testés.

Catégorie	Classe granulométrique	Unité	Classe
Argile	[0 - 2[	µm	1
Limons	[2 - 74[	µm	2
Sables fins	[74 - 425[	µm	3
Sables grossiers	[425 - 4750[	µm	4

*Tableau IV-3 : Définition des classes granulométriques des sols testés.*

Les classes granulométriques correspondent aux coupures définies par le Earth Manual (1990) pour les tests ou une classification, limons < tamis # 200 (ouverture d'environ 74 µm), limites dpour les classes granulométriques, limons < tamis # 200 (ouverture d'environ 74 µm), limites d'Atterberg ( fraction < #40 (ouverture d'environ 425 µm)) et les fraction > #4,

ouverture d'environ 4,75 mm correspondantes à des graviers. Concernant les argiles, la limite a été fixée arbitrairement à 2µm.

Pour chacune de ces classes granulométriques, un diamètre moyen associé est calculé par :

$$\log_{10}(d_{50,Xi}) = \frac{\left( \left( 1 - \sum_{k=1}^{i-1} p_k \right) \log(d_{\max_{Xi}}) + \left( \sum_{k=1}^i p_k \right) \log(d_{\min_{Xi}}) \right)}{1 + p_k} \quad (IV-9)$$

$p_k$ : fraction de la classe k du sol comprise entre les diamètres  $d_{\min_{Xk}}$  et  $d_{\max_{Xk}}$

$d_{50,Xi}$  : diamètre moyen de la classe granulométrique i considérée.

A partir de ces diamètres moyens, on peut calculer une surface développée définie comme la somme des surfaces spécifiques équivalentes de chaque classe granulométrique par unité de volume et pondérée par le pourcentage massique représentatif de la classe ( $p_i$  : poids de la classe granulométrique, sans unité). La surface développée représente une surface de contact mécanique équivalente compris dans un mètre cube de sol. En supposant que les grains soient sphériques la surface développée ( $S_d$  en  $m^2/m^3$ ) s'exprime par :

$$S_d = \sum_{i=1}^4 6 \frac{\rho_d}{\rho_s d_{50,Xi}} (p_i) \quad (IV-10)$$

Notons que pour les argiles la surface développée est très largement sous-estimée, car les grains ne sont pas sphériques. Cependant la spécificité des argiles est prise en compte par les limites d'Atterberg.

### ***Eau et fraction argileuse***

En faisant l'hypothèse que la majeure partie de l'eau soit adsorbée par la fraction argileuse, nous définissons la teneur en eau de la fraction argileuse sous la forme :

$$w_{\text{Argile}} = \frac{w}{F_a} \quad (IV-11)$$

La comparaison de la teneur en eau de la fraction d'argile avec les limites d'Atterberg PL et LL permet d'introduire deux nouvelles grandeurs l'écart de liquidité ( $w_{LL}$ ) et l'écart de plasticité  $w_{PL}$  :

$$w_{LL} = LL - w_{\text{Argile}} \quad (IV-12)$$

$$w_{PL} = w_{\text{Argile}} - PL \quad (IV-13)$$

Deux cas sont distingués en considérant la teneur en eau optimale (à l'optimum avec une énergie de compactage normale) :

si  $w_{LL, optimale} > 0$ , l'argile est en déficit d'eau par rapport à la limite de liquidité, le sol est considéré en état hydrique « déficitaire ».

si  $w_{LL, optimale} < 0$ , l'argile est en excédent d'eau par rapport à la limite de liquidité, le sol sera dit comme état hydrique « excédentaire ».

Cet état hydrique sera utilisé pour différencier le comportement des sols sur les différentes figures.

Pour le calcul de  $w_{LL}$  et  $w_{PL}$ , les sols notés comme NP ont une limite de liquidité et une limite de plasticité considérée comme nulle.

## b) Etude des corrélations avec un paramètre

Une première étape dans la recherche de corrélations consiste à analyser l'éventualité de corrélations entre l'une des variables que nous venons d'introduire et l'indice de résistance à l'érosion  $I_\alpha$ .

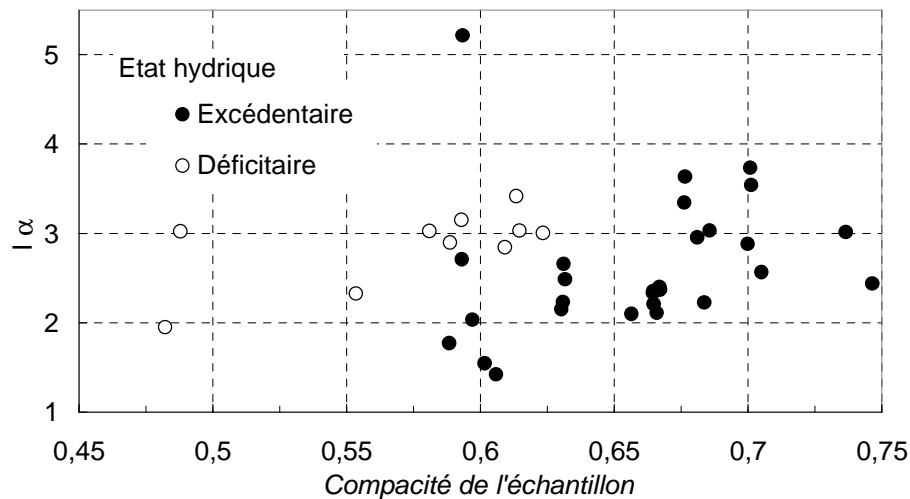
Les plages de variation des différentes grandeurs utilisées dans cette étude sont présentées dans le Tableau IV-4.

Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
$I_\alpha$	1,424	5,218	2,720	0,775
Fraction d'argile Fa [%]	6,8	65,9	26,4	16,4
Fraction de limon Fl [%]	30,5	92,2	54,5	16,8
Fraction de sable fin Fsf [%]	0,5	51,9	14,1	14,3
Fractions de sable grossier Fsg [%]	0,2	18,8	5,1	6,6
$w_{LL}$ [unité]	-2,782	0,339	-0,547	-2,782
$w_{PL}$ [unité]	0,101	2,782	0,718	0,101
$\log(S_d)$	5,49	6,99	5,98	0,38
c [unité]	0,48	0,75	0,64	0,07
Saturation S [unité]	0,59	0,92	0,76	0,07
$w_{Argile}$ [unité]	0,351	2,782	0,881	0,351
w [%]	10,0	26,1	16,4	4,2
$\rho_d$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1316	1966	1712	161

Tableau IV-4 : Gamme de variation des paramètres mesurés et utilisés dans l'analyse statistique.

### ***Indice de résistance à l'érosion en fonction de la compacité***

Afin d'étudier l'influence de l'état hydrique du sol au compactage (« état hydrique excédentaire » ou « état hydrique déficitaire »), nous représentons sur le graphique suivant l'indice  $I_\alpha$  en fonction de la compacité et distingué suivant l'état hydrique.



*Figure IV-4 : Indice de résistance à l'érosion en fonction de la compacité et de l'état hydrique.*

La distinction des sols suivant l'état hydrique tend à faire apparaître deux ensembles de points dont l'indice de résistance à l'érosion croît avec la compacité de manière sensiblement identique. Toutefois les corrélations linéaires que l'on pourrait tracer seraient caractérisées par une forte dispersion. Cette dispersion souligne l'influence probable d'autres paramètres tels que la granulométrie dont l'influence peut être prise en compte par la surface développée, ou la variabilité de la teneur en eau dont l'influence sera étudiée dans la partie suivante.

### ***Influence de la surface développée sur la compacité***

La notion de surface d'échange pour un volume de sol donné est importante pour la formation des capillaires et la répartition de l'eau au sein du sol. La surface développée va être utilisée en tant que paramètre de description du matériau. Les grandeurs de compacité et d'érodibilité vont être discutées par rapport à la surface développée dans un mètre cube de sol.

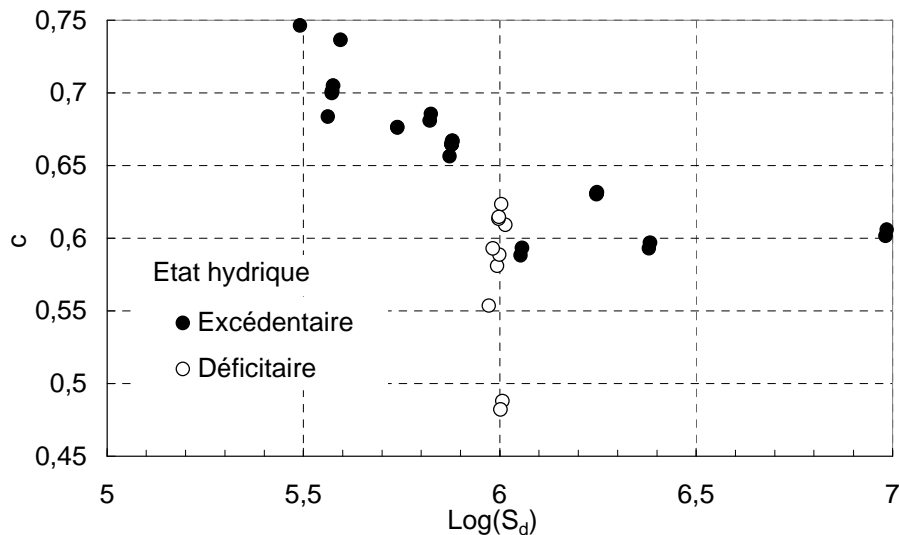


Figure IV-5 : Compacité atteinte en fonction de la surface développée.

Sur la Figure IV-5, la compacité est représentée en fonction de la surface développée. Trois types de familles apparaissent :

- Les sols en état hydrique déficitaire (essentiellement argileux) avec une surface développée moyenne ( $\log(S_d) = 6$ ), ceux-ci ont une compacité fortement variable avec une surface développée constante. Ainsi, lors du compactage, le comportement serait fortement influencé par la minéralogie de l'argile qui n'est pas pris en compte dans le calcul de la surface développée.
- Les sols en état hydrique excédentaire avec une faible surface développée ( $\log(S_d) < 6$ ) ont une compacité qui croît avec la diminution de la surface développée. Cela sous-entendrait un comportement plutôt d'arrangement granulaire dont la compacité dépendrait essentiellement de la distribution granulométrique.
- Puis, la troisième classe de sol qui a une compacité constante égale à 0,6 pour une surface développée importante,  $\log(S_d) > 6$ . Ce type de comportement laisserait supposer la formation et la destruction de ponts capillaires lors du compactage. Les sols correspondants à ce type de comportement sont limoneux : L ; Mix 1 ; TE ; Mix 0. Ces 3 sols sont composés à partir d'éléments d'origine géologique identique : des Loess, « silts éoliens » avec une fraction argileuse plus ou moins importante.

Pour la compacité atteinte à proximité de l'optimum, deux paramètres permettent de l'expliquer en partie: la teneur en eau des fines (argiles et limons) avec le paramètre état de liquidité et la surface développée.

La Figure IV-6 présente la formation de mottes pour le sol BC et le sol L. Dans le cas du sol L, les mottes se cassaient plus facilement tandis que pour le sol BC celles-ci étaient très difficiles à casser.

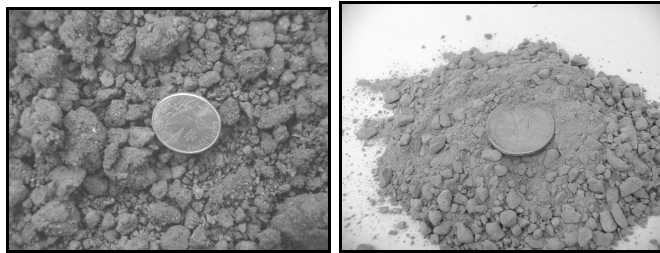


Figure IV-6 : Différence de granulométries après ajout d'eau pour le sol BC (gauche,  $IP = 44$ ) et le sol L (droite,  $IP = NP$ ).

La présence prononcée d'argile dans le matériau conduit à une forte structuration du matériau du fait de la présence de mottes difficiles à casser. Celles-ci se cassent plus aisément au contact de la dame. Ainsi, une croûte, que l'on retrouve sur les essais d'érosion, est formée. Pour éviter les problèmes, les morceaux sont en général cassés au préalable.

Le potentiel d'absorption hydrique de l'argile dépend de la minéralogie de l'argile, et des conditions thermodynamiques (température, pression de vapeur d'eau) au sein du sol. Une partie de la demande d'eau de l'argile sera comblée par l'apport d'eau liquide à la surface des plaquettes. Lorsque la demande en eau de l'argile est totalement comblée (cas d'une dilution élevée avec brassage, e.g. sédimentométrie), l'argile sera peu floculée ou du moins à des échelles inférieures, sur les photographies à l'échelle de 0,5 cm – en sédimentométrie à l'échelle du  $\mu\text{m}$ .

### ***Indice de résistance à l'érosion et surface développée***

La Figure IV-7 représente l'indice de résistance à l'érosion en fonction de la surface développée. L'érodibilité serait plutôt linéairement décroissante par rapport au logarithme de la surface développée pour les sols en état hydrique excédentaire. Par contre, de fortes disparités sont visibles pour les sols en état hydrique déficitaire, l'érodibilité semble indépendante de la surface développée atteinte dans un mètre cube.



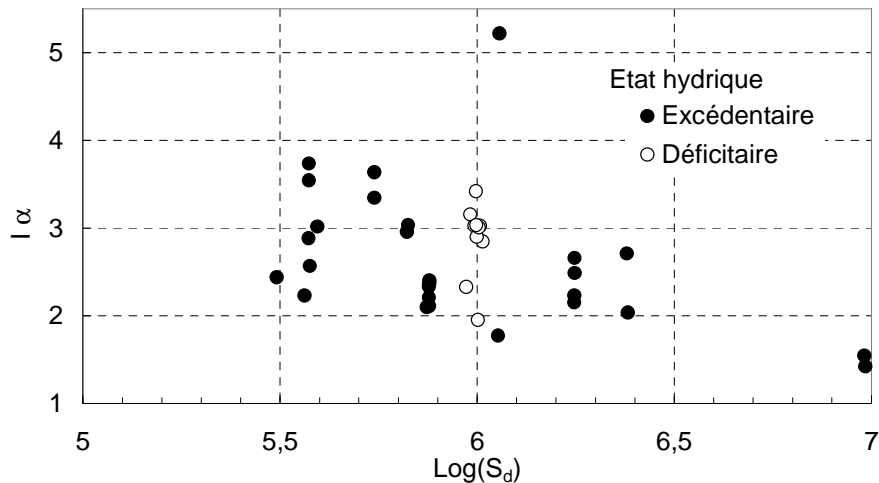


Figure IV-7 : Indice de résistance à l'érosion en fonction de la surface développée.

Pour les sols en état hydrique excédentaire, il apparaît le sol Mix 1 qui est un mélange de L et BC. Il est probable que d'un mélange de sols d'érodibilités données puisse résulter un sol d'indice d'érodibilité supérieure aux sols initiaux. Ce qui met en avant le rôle du compactage ainsi que de la capacité du sol à se réarranger, et donc de la granulométrie. Mais, l'analyse de cette dernière ne conclut à aucune liaison linéaire entre la présence de classe granulométrique et la sensibilité à l'érosion.

## 1.4 Recherche systématique par analyse statistique

Dans le but d'identifier les paramètres susceptibles d'être corrélés avec la sensibilité à l'érosion, une analyse en composantes principales (ACP) est menée. Dans une première partie, l'ACP va permettre de réduire le nombre de variables afin de décrire au mieux la dispersion du nuage. Dans un deuxième temps, des corrélations sont construites en utilisant les variables déduites. Ces dernières seront comparées à une corrélation construite avec 8 paramètres.

### a) L'analyse en composantes principales

Dans l'ACP, les essais sur un sol donné sont pondérés de manière à ce que la somme de leur poids soit égale à 84 (Plus petits communs multiples du nombre d'essai pour chaque sol). Ainsi deux essais sur un sol requièrent une pondération de 42, 4 essais requièrent une pondération de 21... Cela permet de donner une représentation identique pour chaque sol dans l'analyse et donc de donner un poids identiques aux caractéristiques représentatives du sol. Par contre, chaque essai ne possèdera pas le même poids.

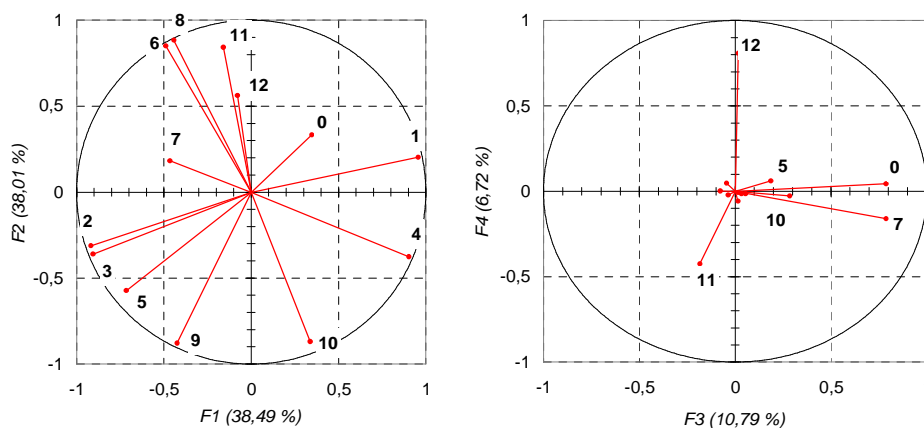
On recherche les variables expliquant au mieux la dispersion du nuages. Donc, 2 variables perpendiculaires sont conservées, les variables fortement corrélées (à proximité du cercle, formant entre elles un angle de  $180^\circ$  ou  $0^\circ$ ) sont réduites à 1 variable, en général la plus physique. Les variables loin du cercle sont en général conservées si leur apport est jugé comme indispensable.

### Analyse en composantes principales comprenant toutes les variables

Les résultats de l'ACP sont montrés sur la Figure IV-8. Les 4 premiers axes de l'analyse représentent 94% (avec les pondérations considérées) de la dispersion de l'échantillon.

En observant le plan défini par F1 et F2, on constate que certains paramètres sont fortement liés entre eux, de part leur proximité du cercle unité et de leur écart angulaire :

- compacité, masse volumique sèche, teneur en eau ;
- l'état de plasticité, l'état de liquidité et la teneur en eau de l'argile.



#### Légende

<b>0</b>	$I \alpha$	<b>5</b>	Fl (limon)	<b>9</b>	$\text{Log}(S_d)$
<b>1</b>	$w_{LL}$	<b>6</b>	$\rho_d$	<b>10</b>	W
<b>2</b>	$w_{PL}$	<b>7</b>	$S_r$	<b>11</b>	Fsf (sable fin)
<b>3</b>	$w_{\text{Argile}}$	<b>8</b>	c	<b>12</b>	Fsg (sable grossier)
<b>4</b>	Fa (argile)				

Figure IV-8 : Résultats de l'analyse en composantes principales (1) - présentation des axes principaux 1, 2, 3 et 4 avec le pourcentage d'interventions des différentes variables.

Pour la première ligne, on conservera la compacité comme variable physique. Sur la seconde ligne, on conservera l'état de liquidité qui semble plus pertinent pour décrire l'état de l'eau au sein du matériau sol.

### Analyse en composantes principales successives

Ainsi, on refait une ACP en considérant les variables suivantes : fraction d'argile, fraction de sable fins, fraction de sables grossiers, la fraction de limon, l'état de liquidité, la saturation, la compacité, la surface développée, et l'indice de résistance à l'érosion, soit 9 paramètres.

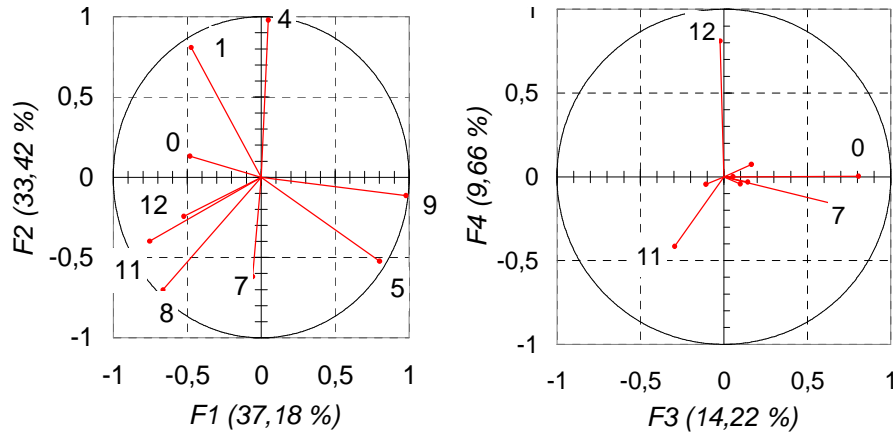


Figure IV-9 : Résultats de l'analyse en composantes principales (2) - présentation des axes principaux 1, 2 avec le pourcentage d'interventions des différentes variables.

En observant la Figure IV-9, on ne voit aucune corrélation forte. Par contre, le plan F3, F4 porte 20% de l'information avec des variables peu corrélées dans ce plan et le plan F1, F2. Les variables conservées sont donc la variable saturation, fractions de sables fins, fractions de sables grossiers. On conserve la fraction d'argile du fait de sa proximité avec le cercle et donc on peut éliminer par construction la fraction de limon. La surface développée est éliminée par construction, avec sa bonne corrélation avec l'axe F1 (déduction possible par les autres variables).

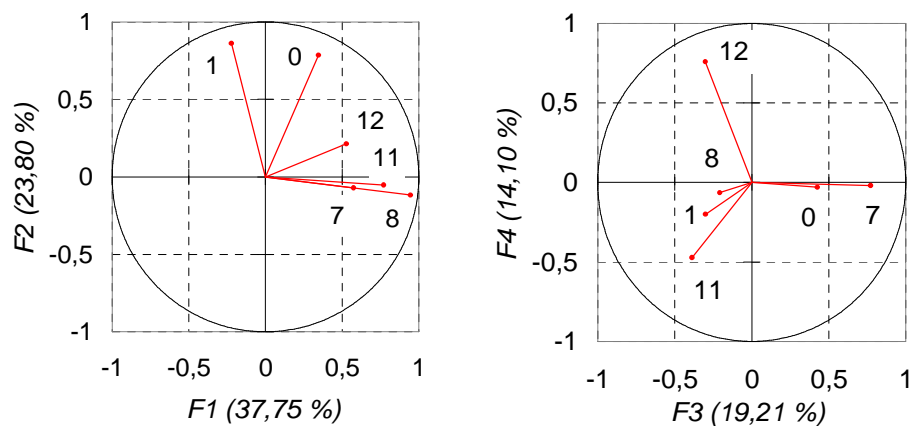


Figure IV-10 : Résultats de l'analyse en composantes principales (3) - présentation des axes principaux 1, 2 avec le pourcentage d'interventions des différentes variables.

En effectuant à nouveau une ACP, sur les variables restantes, on va éliminer la fraction argileuse du fait de la proximité du cercle unité. Ainsi, on aboutit au graphique de la Figure IV-10. Grâce à cette analyse, on élimine les paramètres concernant la fraction de sable. En effet, ces dernières semblent particulièrement représentées par l'axe 3, et 4 ainsi que par l'axe 1. La saturation est quant à elle conservée dans l'analyse du fait qu'elle est peut portée par l'axe 1 et 2 par contre fortement représentée sur l'axe 3.

Donc, il nous reste 3 paramètres pour exprimer l'indice de résistance à l'érosion : la compacité, la saturation et l'état de liquidité. Les fractions de sables seront supposées comme peu représentatives.

## b) Construction de corrélations linéaire

### *Corrélation à 3 paramètres*

Avec ces trois paramètres, on construit une relation linéaire avec l'indice d'érodibilité de faible corrélation  $R^2 = 0,34$ , sans pondérer les échantillons, Figure IV-11.

$$I_{\alpha} = -0,97 + 0,47 w_{LL} - 0,37 c + 5,41 S_r \quad (IV-14)$$

L'ajout de la fraction de sables fins pour l'analyse mène à un  $R^2$  égal à 0,35. Ce qui est peu intéressant. Le fait d'ajouter la variable fraction de sables grossiers et de sables fins conduit à un coefficient de corrélation de 0,39.

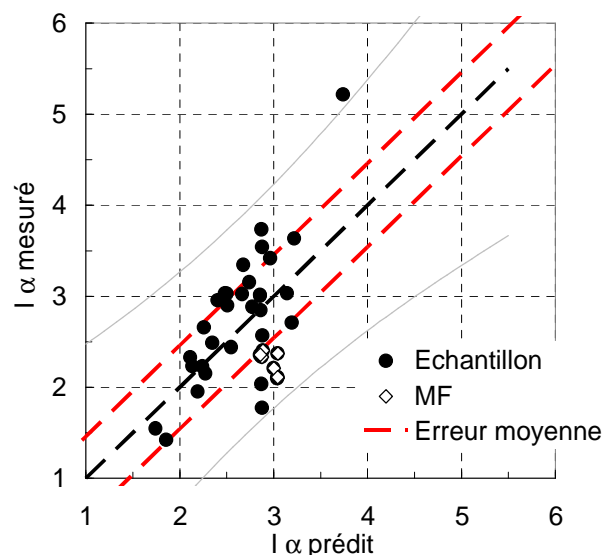


Figure IV-11 : Indice de résistance à l'érosion mesuré en fonction de l'indice de résistance à l'érosion prédit pour la corrélation à 3 paramètres.

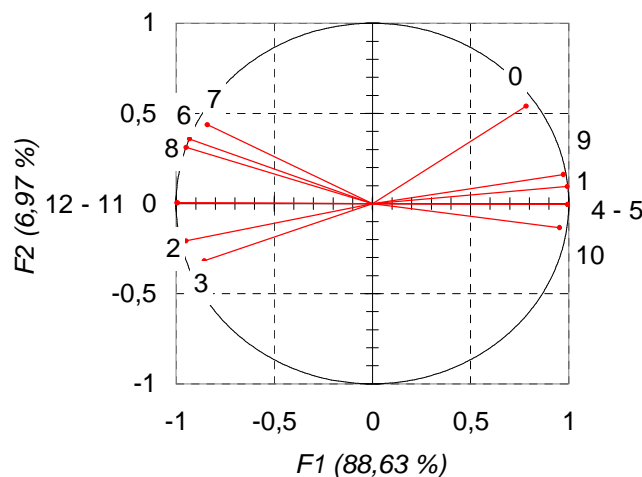
En observant les résidus entre la prédiction et la mesure, on s'aperçoit que un sol est représenté avec une erreur redondante et constante dans un sens identique : MF. Le modèle sur-évalue la valeur de l'indice de résistance à l'érosion. Hors ce dernier est dispersif de catégorie D2, avec un grade 4 au crumb-test au bout de 6h. Cela justifie la surévaluation du coefficient du fait d'un sol plutôt dispersif. Les autres sols à problèmes (Mix 0 et Mix 1) concernent le mélange d'argile BC et de L, comme sur l'analyse menée précédemment. Eux se justifieraient d'après la présence d'un élément aux caractéristiques mécaniques surprenantes : le Loess. Le sol TF qui est notée comme très dispersif au « pin-hole test » ne ressort pas de l'analyse, ce qui est étonnant.

### *Corrélation à 3 paramètres en séparant les argiles dispersives*

Donc, on reconstruit la corrélation en supprimant de l'analyse le sol MF. Le coefficient de corrélation obtenue vaut 0,592.

$$I_{\alpha} = -2,31 + 0,69 w_{LL} + 1,41c + 6,07 S_r \quad (IV-15)$$

On constate que le fait de supprimer ce sol dispersif conduit à diminuer la constante, mais cette diminution est compensée par une augmentation des coefficients. Etant donné l'impact de la dispersion sur la corrélation, une ACP est menée sur les sols à tendances dispersives au « pin-hole test » MF et TF.



*Figure IV-12 : Résultats de la première analyse en composantes principales pour les sols dispersifs - présentation des axes principaux 1, 2.*

Sur une première analyse (Figure IV-12) avec l'ensemble des variables, pour les sols dispersifs, la fraction argile et la fraction de limons ont les mêmes projections. L'information est identique, on supprime la fraction argile. Idem pour les sables, on supprime la fraction de sables grossiers. On procède ainsi par élimination jusqu'à obtenir 3 – 4 variables.

Sur une deuxième analyse, pour les sols dispersifs, les sables fins et limons portent une information identique. De plus, la surface développée est à proximité de la fraction d'argile. On garde seulement la surface développée pour la granulométrie. On constate que l'état de liquidité et l'état de plasticité, ainsi que la teneur en eau sont corrélées. On conserve la variable état de plasticité.

Suite à une troisième analyse, on va supprimer la variable masse volumique sèche. En effet, l'information sera portée par la compacité.

Suite à la quatrième analyse on supprime la variable surface développée. Cette dernière sera représentée par l'état de plasticité.

On aboutit à la corrélation linéaire suivante qui possède un coefficient  $R^2 = 0,84$ .

$$I_{\alpha} = 5,69 - 12,73 w_{PL} - 4,59 c + 4,68 S_r \quad (IV-16)$$

On constate que la constante est très élevée, et que pour ces sols l'érodibilité aurait tendance à décroître avec la compacité. Mais, le degré de saturation réhausse la valeur. Si on considère les 3 variables prédictives précédentes, la corrélation admet un coefficient de corrélation de 0,81.

$$I_{\alpha} = -1,36 + 8,69 w_{LL} + 2,68 c + 2,08 S_r \quad (IV-17)$$

On voit que la valeur de la constante proposée est entre les deux constantes définies sur la totalité de l'échantillon et l'échantillon moins le sol MF. Le sol apparaît comme beaucoup plus sensible à la compacité et à l'état de liquidité. Cela est certainement induit par le fait que l'on soit en présence de 2 sols très plastiques au sens de l'indice de plasticité.

On constate que les sols se différencient grâce à 3 variables : compacité, état de liquidité (ou de plasticité), et degré de saturation. Ces dernières permettent d'expliquer une partie des données. Par contre, il est nécessaire pour l'érodibilité de considérer la dispersivité de l'argile au sens du « crumb-test » et du « pin-hole test ».

Ainsi, nous avons proposé deux corrélations une pour les sols dispersifs, une autre pour les sols non dispersifs de 3 paramètres ayant un  $R^2$  de 0,60. Les paramètres qui ressortent sont la teneur en eau de l'argile comparée à une des limites d'Atterberg, la compacité, et le degré de saturation.

### ***Corrélation à 8 paramètres***

Après la première analyse en composantes principales, un ensemble de 8 variables semblent appropriés pour expliquer notre indice de résistance à l'érosion.

Ainsi, si on recherche le meilleur modèle explicatif en terme de coefficient de corrélation en sélectionnant entre 2 et 8 variables sur les 12 disponibles. Les variables qui ressortiront seront en partie celle déduite de l'ACP, la Figure IV-8 (corrélée linéairement à l'indice de résistance à l'érosion), et des variables complémentaires expliquant la dispersion, donc dans les autres quadrants de l'ACP.

Les essais sont pondérés en fonction de l'apport de chaque sol en terme de projection du sol sur les axes F1, F2, F3, F4. Si l'élément apporte trop d'information, on le pondérera de 1/3 suivant les cas, sauf cas extrêmes justifiés par rapport à l'observation expérimental, ou la présence d'un homologue avec une plus grande érodibilité.

Ils permettent d'expliquer avec une corrélation linéaire 0,62 (sans pondération) de la dispersion en ajoutant 5 variables contenant de l'information redondante.

$$\begin{aligned}
 I_{\alpha} = & -0,665 \\
 & +0,166 Fa + 0,138 F1 \\
 & -1,971 w_{LL} - 8 \cdot 10^{-3} w_{Argile} \\
 & -5,645 \log(S_d) \\
 & + 34,237 w + 34,996 c - 3,877 S
 \end{aligned}
 \tag{IV-18}$$

On constate que l'information ajoutée concerne la composition granulométrique (2 paramètres), la teneur en eau de l'argile, la teneur en eau globale et le logarithme de la surface développée. Ces dernières permettent de mieux expliquer la dispersion. Mais, on n'améliore pas qualitativement l'explication avec 3 paramètres en considérant les sols dispersifs et non dispersifs.

### ***Synthèse***

Les paramètres du sol utilisés peuvent être distingués suivant l'échelle d'observation. Ce sont les suivants :

- A l'échelle de l'argile :  $w_{LL}$  ; la teneur en eau de l'argile.
- A l'échelle du matériau : les fractions composants le sol ; la surface développée
- A l'échelle du sol compacté : la compacité ; la saturation ; la teneur en eau.

La principale hypothèse de travail utilisée est l'uniformité de la masse volumique solide. Hors, celle-ci peut s'avérer très variable suivant les minéraux et donc la fraction granulométrique. La deuxième hypothèse est l'absorption de l'eau par l'argile.

Le modèle qui ressort à 3 paramètres semble mettre en évidence le rôle de l'eau, et son état au sein du sol, eau liée à l'argile ou non. L'autre paramètre qui est mis en évidence semblant plus rationnel est la compacité.

Les modèles proposés expliquent la même variabilité que ceux proposés par Wan et Fell (2004) pour le HET. L'utilisation du modèle proposé à 8 paramètres améliore la prédiction sur les extrêmes. Par contre, en distinguant les sols à tendance dispersive, des sols non dispersifs, on explique la même quantité d'information.

Une des variables définies dans l'étude est la surface développée qui apparaît comme un paramètre explicatif de la compacité.

La teneur en eau est importante. Elle intervient à toutes les échelles. L'intérêt de l'étude est de l'avoir utilisée à différentes échelles y compris à l'échelle de l'argile. Sur cette base, il est possible de construire un paramètre état de liquidité  $w_{LL}$  qui permet de différencier les comportements du sol : état hydrique « déficitaire » et état hydrique « excédentaire ». Le comportement des sols à état hydrique « déficitaire » est difficilement quantifiable de manière linéaire avec les paramètres employés, une forte variation est observée avec un paramètre constant (Figure IV-5, Figure IV-7). Un seul paramètre ne peut prédire leur comportement.

Dans le cadre d'une autre étude, il serait souhaitable d'étudier la minéralogie de l'argile et son impact sur la structure. La fraction de sable n'intervient pas en tant que paramètres. Par contre les fractions argileuses et limoneuses interviennent.

Cette partie a essayé d'expliquer l'indice de résistance à l'érosion à proximité de l'optimum Proctor normal (teneur en eau =  $w_{opt} \pm 1,5\%$ ) à partir de paramètres géotechniques. Dans la partie suivante vont être étudiés les effets que peuvent induire sur l'érodibilité (via l'indice de résistance à l'érosion) :

- un compactage à différents teneurs en eau et à différentes énergies, donc la compacité.
- la variation du degré de saturation et son influence sur l'indice de résistance à l'érosion.



## 2 Variation de la sensibilité à l'érosion pour un sol compacté dans un état différent de l'optimum Proctor

Le comportement des sols est étroitement dépendant de son état de compactage. Or à l'échelle de l'ouvrage, l'état de compactage peut s'avérer être inhomogène et au cours de la vie de l'ouvrage une variation naturelle de l'état hydrique peut être constatée. En conséquence l'objet de cette partie est la caractérisation de la variabilité de l'indice de résistance à l'érosion en fonction de la modification de l'état de compactage et de la saturation.

Nous présentons l'analyse des résultats de la campagne d'essais couplant la mesure d'érodibilité à d'autres caractéristiques géotechniques. Cette campagne est basée sur une préparation des échantillons de sol compactés dynamiquement (énergie normale ou modifiée) avec différentes teneurs en eau. L'indice de résistance à l'érosion est étudié en fonction de l'énergie de compactage, de la teneur en eau et de la saturation. Des paramètres complémentaires seront mesurés en fonction de la teneur en eau et comparés à l'indice de résistance à l'érosion.

De manière systématique, lorsque deux grandeurs sont représentées en fonction de la teneur en eau au compactage, l'échelle située à gauche du graphique correspond à l'indice de résistance à l'érosion.

Conformément aux éléments énoncés dans la partie précédente, la masse de sol érodé est calculée par :

$$M_{sol\ érodé} = \rho_d \frac{M_{érodée\ immergée}}{(1+w)\rho_d - \rho_w} \quad (IV-19)$$

Après la saturation, la mesure de la prise de masse de l'échantillon permet de corriger la valeur de sa teneur en eau.

L'étude partira de la notion de masse volumique sèche et donc de compacité pour un sol donné, pour aboutir sur l'influence de la saturation et de la méthode de saturation sur l'indice de résistance à l'érosion. Différents sols sont testés.

### 2.1 Compactage à différentes teneur en eau et indice de résistance à l'érosion

Les sols utilisés pour cette étude sont des sols naturels : P2, P3, L, et des sols reconstitués à partir de matériaux naturels : Mix 1, ou de référence : K20 S80, K50 S50. Le

sol L occupe une place particulière du fait de sa position extrême dans l'analyse statistique. Le sol P2 est compacté avec deux énergies différentes : Proctor normal (P2 NP) et Proctor modifié (P2 MP).

Les courbes masse volumique sèche et indice de résistance à l'érosion sont présentées en fonction de la teneur en eau au compactage pour les six sols testés de la Figure IV-13, à la Figure IV-18.

#### **a) Masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau**

Le sol admet une compacité optimale pour une teneur en eau donnée, définissant un degré de saturation optimal après compactage. Le pic de masse volumique est plus ou moins marqué suivant les sols. La teneur en eau,  $w_{opt}$ , pour laquelle ce maximum est observé, varie suivant le type de sol.

Concernant le sol P2 NP, une des valeurs semble se distinguer. Une de explications possibles est une utilisation du sol P3 au lieu de P2 par inadvertance.

Les sols K20 S80 et L possèdent une courbe de masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau de forme plutôt triangulaire. La faible présence de fraction argileuse pourrait expliquer ce phénomène.

#### **b) Indice de résistance à l'érosion en fonction de la teneur en eau**

Du côté sec, c'est-à-dire pour une teneur en eau inférieure à la teneur en eau de l'optimum Proctor, la sensibilité à l'érosion des sols testés décroît ( $I_{\alpha}$  augmente). Du côté humide, deux comportements distincts peuvent être observés :

- Pour les sols K20 S80 et K50S50, la sensibilité à l'érosion s'accroît.
- Pour les sols P2 NP et P2 MP, la sensibilité à l'érosion reste relativement stable et elle décroît pour les sols L et Mix 1.

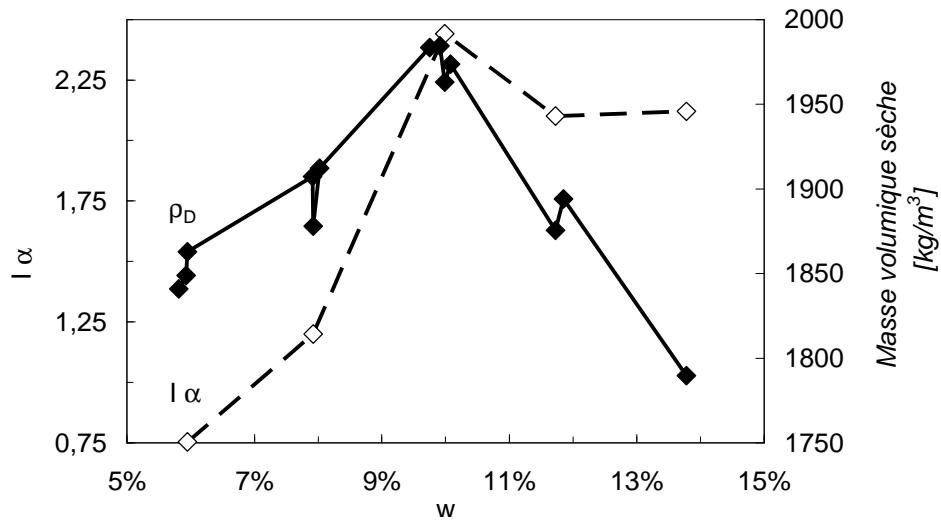


Figure IV-13 : Présentation de l'indice de résistance à l'érosion, et de la masse volumique sèche, en fonction de la teneur en eau massique du mélange 20% Kaolin – 80 % Sable de Fontainebleau.

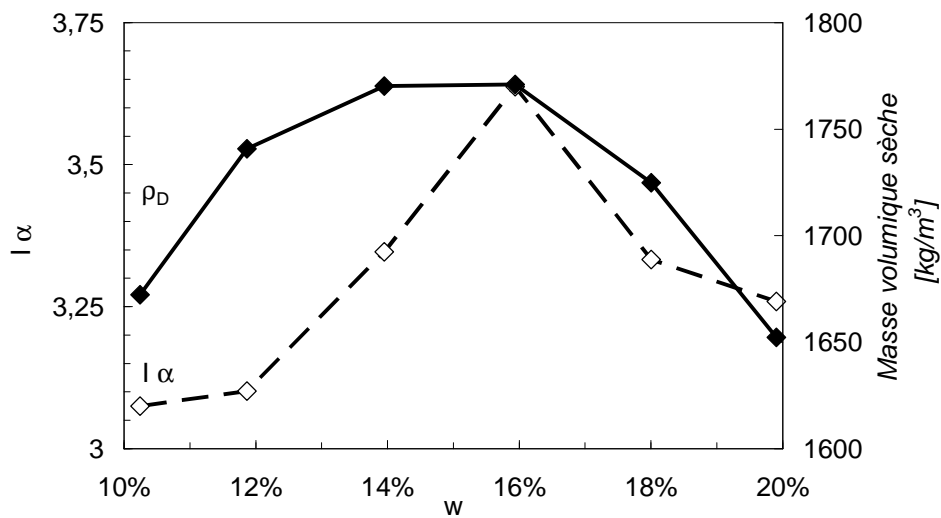


Figure IV-14 : Présentation de l'évolution de l'indice de résistance à l'érosion, et de la masse volumique sèche, en fonction de la teneur en eau massique du mélange 50% Kaolin – 50% Sable de Fontainebleau.

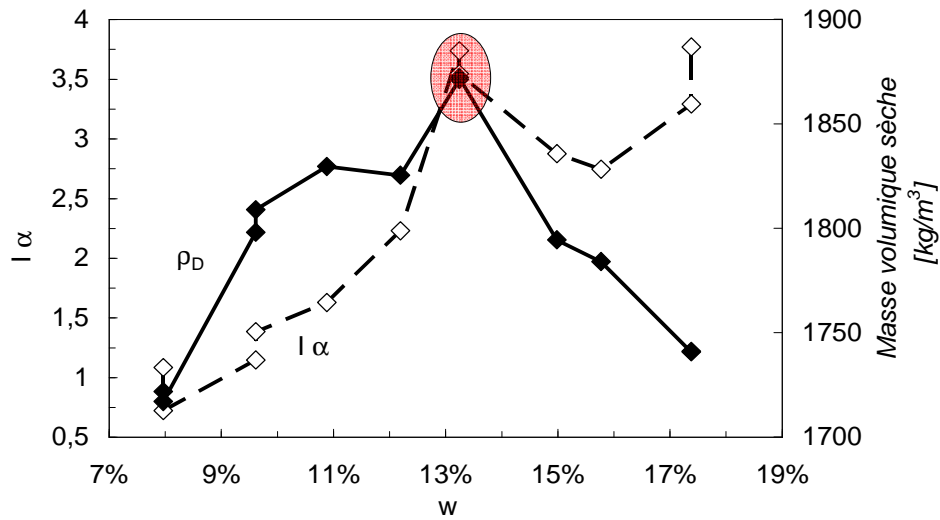


Figure IV-15 : Présentation de l'évolution de l'indice de résistance à l'érosion, et de la masse volumique sèche, en fonction de la teneur en eau massique du matériau sol naturel P2 – énergie de compactage Normale (N).

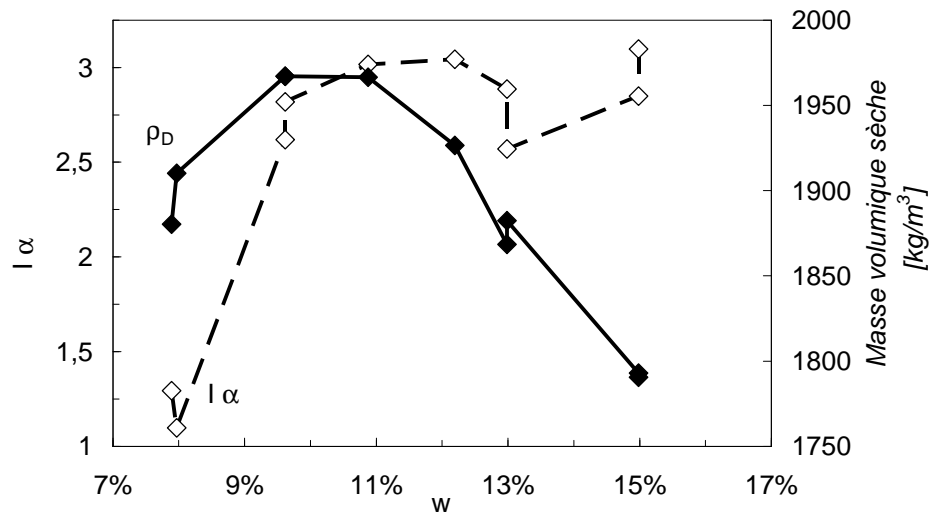


Figure IV-16 : Présentation de l'évolution l'indice de résistance à l'érosion, et de la masse volumique sèche, en fonction de la teneur en eau massique du matériau sol naturel P2 – énergie de compactage Modifiée (M).

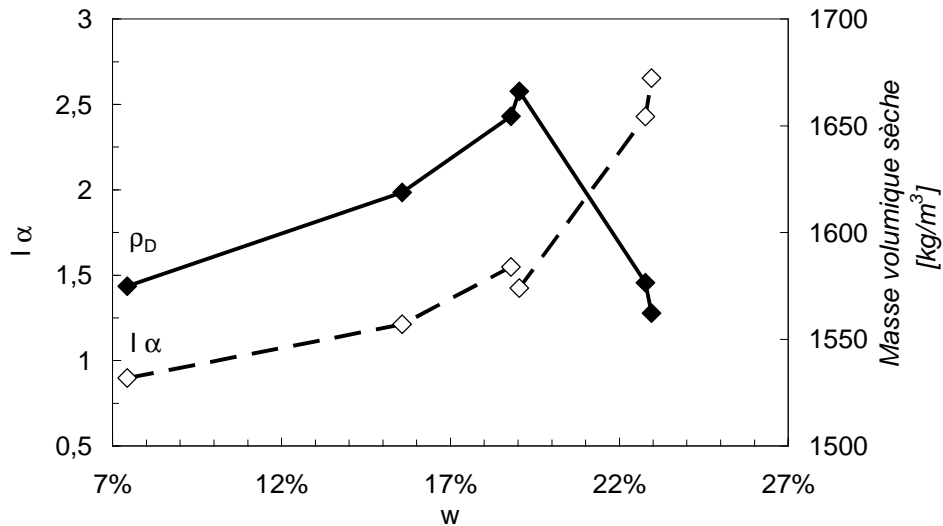


Figure IV-17 : Présentation de l'évolution de l'indice de résistance à l'érosion, et de la masse volumique sèche, en fonction de la teneur en eau massique du matériau sol naturel L.

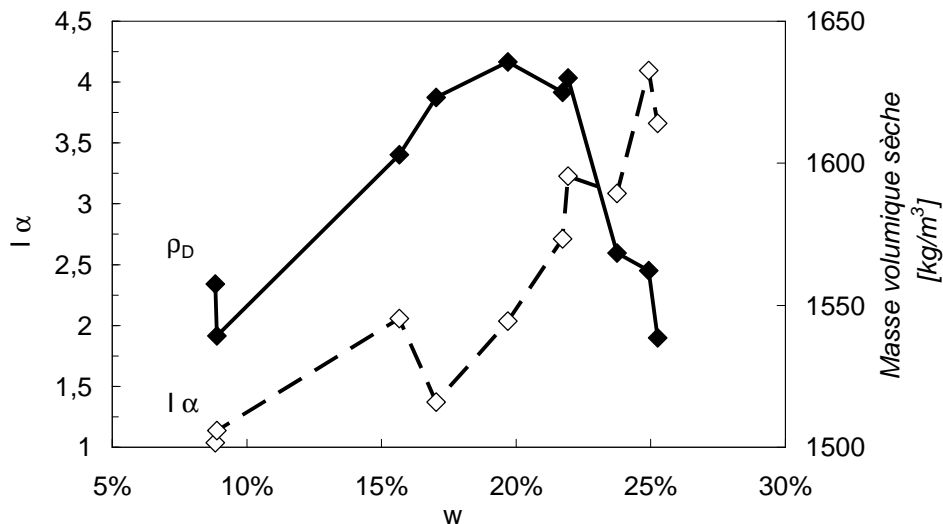


Figure IV-18 : Présentation de l'évolution de l'indice de résistance à l'érosion, et de la masse volumique sèche, en fonction de la teneur en eau massique du matériau sol reconstitué Mix 1.

Ainsi seuls deux sols, Mix 1 et L, ne présentent pas un minimum d'érodibilité. Pour eux, l'indice de résistance à l'érosion semble augmenter avec la teneur en eau et cette augmentation est plus prononcée après l'optimum de teneur en eau. Cette différence est certainement induite par la présence de sol L, qui comme nous l'avons vu au chapitre précédent, présente une forte surface développée.

Pour les sols P2 et P3, une évolution similaire a été mesurée au Bureau of Reclamation entre le HET et le JET (Wahl et Erdogan, 2008) pour les coefficients d'érosion. Par contre, les optima d'érodibilité sur le coefficient d'érosion  $k_d$  semblent plus marqués que dans le cas présenté ci-dessus.

En conclusion, vis-à-vis de l'évolution de la masse volumique sèche, la sensibilité à l'érosion n'évolue pas de manière unique pour tous les sols testés et il convient d'affiner l'étude. La masse volumique sèche ne peut être considérée comme un paramètre suffisamment explicatif. Pour considérer cette dernière, il est nécessaire de se positionner par rapport à la teneur en eau optimale, et donc à la saturation post-compactage.

**c) Différence de sensibilité à l'érosion entre le côté sec et le côté humide**

La différence entre la valeur maximale et la valeur minimale de l'indice de résistance à l'érosion est calculée. Pour l'ensemble des sols testés, cette différence varie de 0,6 à 3 (Tableau IV-5).

Sols	I $\alpha$			IP	Fraction argileuse [%]
	Minimum	Maximum	Maximum - Minimum		
Mix 1	1,0	4,1	3,1	11	21,8
L	0,9	2,7	1,8	NP	6,8
K50 S50	3,1	3,6	0,6	13	17,9
K20 S80	0,8	2,4	1,7	NP	12,1
P2 MP	1,1	3,1	2,0	4	13,0
P2 NP	0,7	3,8	3,0	4	13,0
P3	1,4	4,1	2,7	15	26,0

*Tableau IV-5 : Tableau synthétique de variation de l'indice de résistance à l'érosion avec la teneur en eau.*

Dans le but de tenir compte à la fois de l'indice de plasticité et de la limite de liquidité, la différence maximale d'indice de résistance à l'érosion est tracée en fonction des projections par rapport à la ligne A (IP=0,73 (LL-20)) du diagramme de Casagrande (voir Figure III-1). Sur la Figure IV-19 sont représentées les valeurs de la différence de I  $\alpha$  en fonction des projections sur la ligne A et sur la Figure IV-20, en fonction des projections perpendiculaires à la ligne A-A partir de ces représentations et de la classification de Casagrande, nous pouvons en conclure que la variabilité d'érodibilité s'accroît avec l'accroissement de la plasticité. A l'inverse la variabilité décroît pour les sols plus éloignés de la ligne A. Par contre, les sols K50 S50 et P2 compacté avec l'énergie modifiée ne sembleraient pas être identifiables à ce comportement.

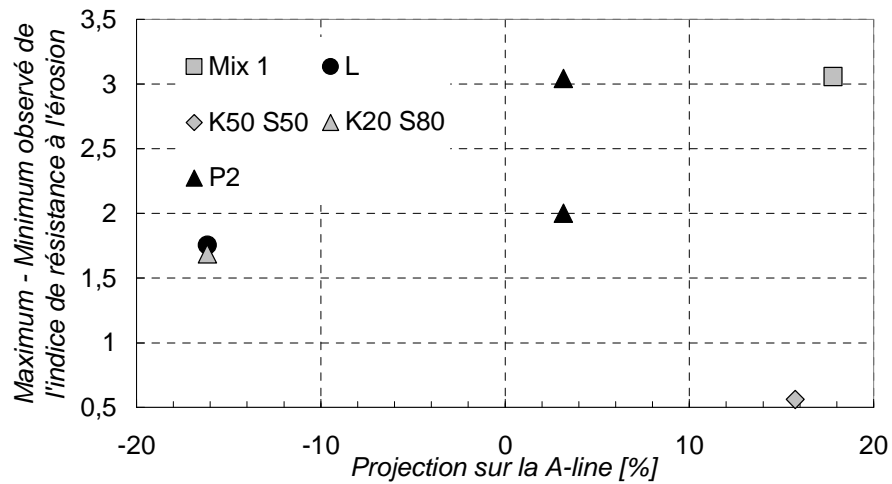


Figure IV-19 : Différence maximale d'érodibilité en fonction de la projection sur la ligne A.

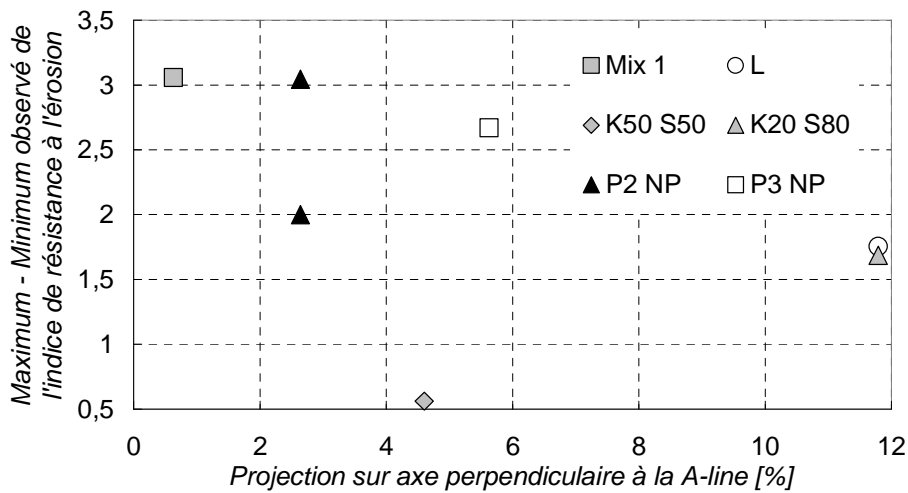


Figure IV-20 : Différence maximale d'érodibilité en fonction de la projection sur la direction perpendiculaire à la ligne A.

La minéralogie de l'argile, la différence de comportement lors du compactage sont probablement les facteurs explicatifs complémentaires.

## 2.2 Compactage à différentes énergies et sensibilité à l'érosion

Cette section va présenter l'analyse de l'influence de l'énergie de compactage sur l'indice de résistance à l'érosion. Le sol P2 est compacté avec deux énergies distinctes. Conformément aux résultats classiques présents dans la littérature, l'accroissement de l'énergie de compactage permet d'accroître la densité sèche, et la teneur en eau optimale diminue.

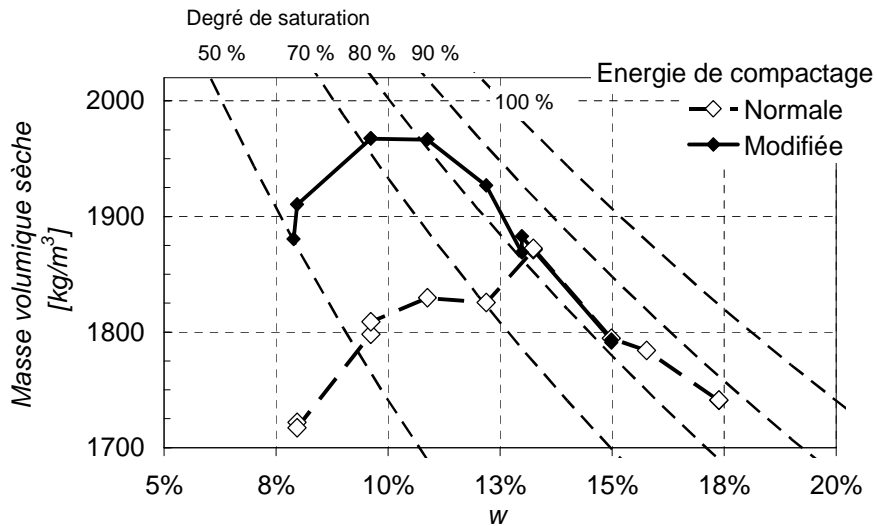


Figure IV-21 : Masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau et représentation des courbes iso-saturation.

Si le sol est compacté avec une teneur en eau supérieure à la teneur en eau optimale pour l'énergie considérée, la masse volumique sèche décroît avec la teneur en eau en suivant une courbe de saturation constante. Cette saturation ne varie pas en fonction de l'énergie ; ainsi, pour un sol donné on peut définir une saturation optimale dans le cadre d'un compactage dynamique.

Si la teneur en eau est inférieure à la teneur en eau optimale, la masse volumique sèche semble évoluer en suivant le gradient de saturation dans le plan masse volumique sèche, teneur en eau.

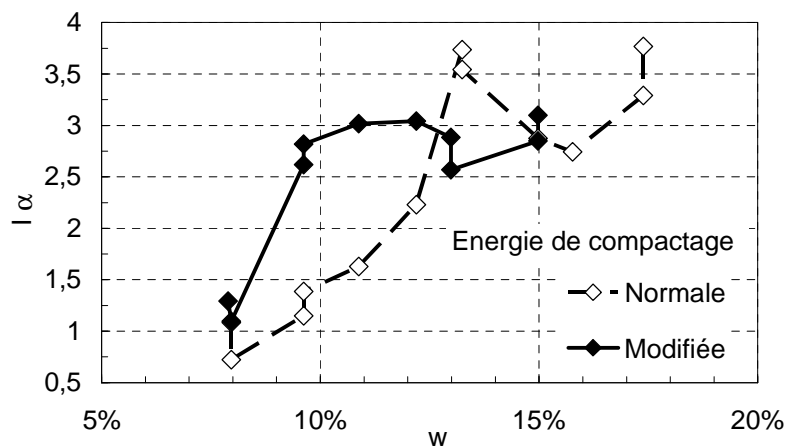


Figure IV-22 : Indice de résistance à l'érosion en fonction de l'énergie de compactage.



L'analyse des variations de l'indice de résistance à l'érosion en fonction de la teneur en eau indique que pour les deux énergies de compactage :

- du côté sec ( $w < 13\%$  pour l'énergie normale et  $w < 11\%$  pour l'énergie modifiée), la sensibilité à l'érosion décroît ( $I_\alpha$  augmente) lorsque la teneur en eau augmente
- par contre du côté humide, la sensibilité à l'érosion est globalement constante.

L'évolution de la masse volumique sèche peut expliquer la différence d'érodibilité observée du côté sec. Par contre, la masse volumique sèche ne peut pas expliquer les différences de sensibilité à l'érosion côté sec et côté humide. En effet, à même masse volumique sèche côté sec et côté humide, le sol est plus sensible à l'érosion côté sec que côté humide.

Pour tenter d'expliquer cette différence de sensibilité, nous étudions l'effet de la saturation. Sur la Figure IV-23, l'évolution de l'indice de résistance à l'érosion est représentée en fonction du degré de saturation pour un compactage à énergie normale et modifiée pour le sol P2. Pour les deux énergies de compactage, l'indice de résistance à l'érosion est tout à fait comparable et s'accroît avec la saturation.

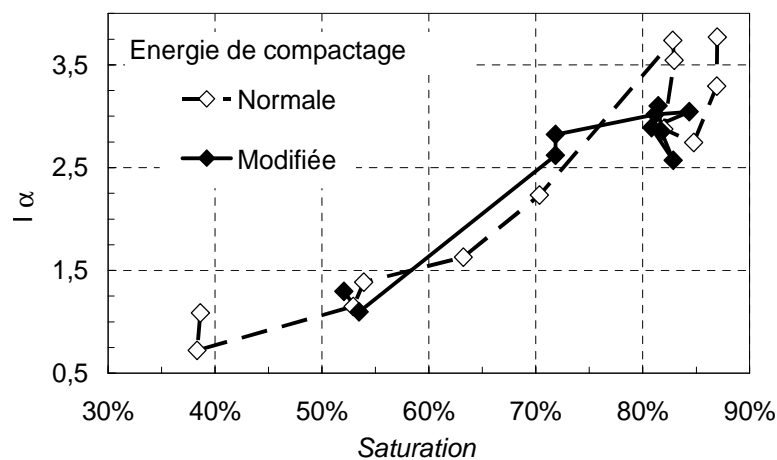


Figure IV-23 : Evolution de l'indice de résistance à l'érosion en fonction du degré de saturation atteint après un compactage à énergie normale et un compactage à énergie modifiée, cas du sol P2.

Il est possible de voir le compactage comme une absorption d'énergie par le squelette granulaire et l'eau :

- Du côté sec, l'énergie mécanique du compactage est utilisée pour diminuer la compacité. La teneur en eau aurait pour effet de lubrifier les grains et diminuer les effets capillaires.

- A l'optimum, l'arrangement des grains est le plus compact possible pour l'énergie de compactage considérée : c'est-à-dire que l'on a une absorption optimale de l'énergie par le sol.
- Au-delà de l'optimum, une légère augmentation de la teneur en eau conduit à augmenter l'énergie dissipée par le fluide ce qui s'accompagne d'une diminution de la compacité. Au finale cette « ventilation » de l'énergie conduit à un degré de saturation identique.

Les effets de l'eau se feront aussi sentir sur la formation de micelles autour de l'argile au sein du matériau compacté. Selon Lambe (1958), une argile pure compactée du côté sec et du côté humide ne possède pas la même texture (effets sur la perméabilité). Cette texture diffère avec un arrangement aléatoire des particules d'argile du côté sec et une orientation privilégiée des particules du côté humide.

Par conséquent, du côté sec, la différence d'érodibilité entre une énergie normale et modifiée serait expliquée par la compacité. Du côté humide, l'explication de l'érodibilité semble plus à rapprocher de la saturation optimale et du comportement des matériaux en présence d'eau.

Pour approfondir cette étude de l'influence de la saturation, préalablement à l'essai d'érosion, les échantillons sont saturés juste après le compactage.

### **2.3 Saturation - imbibition et sensibilité à l'érosion**

L'étape de saturation des échantillons à volume constant ou non a été menée sur les sols P2, K20 S80 et Mix 1. Pour les sols compactés avec une teneur en eau initiale inférieure à l'optimum Proctor, la prise de masse est importante, aussi bien dans le cas d'une imbibition que suite à un essai de perméabilité. Par contre pour une teneur en eau supérieure à l'optimum Proctor, des problèmes pour saturer l'échantillon sont rencontrés. Les hypothèses d'explications proposées sont des vitesses différentes de dissipations de pression interstitielle et la présence de pores occlus plus nombreux du côté humide.

Par ailleurs l'existence d'un degré de saturation limite de l'ordre de 90% lors d'un compactage dynamique semble justifier cette présence de pores occlus.

Si la phase de saturation est effectuée à volume constant ou par imbibition à déformation libre, les effets sur la sensibilité à l'érosion sont différents. Les effets de la saturation à volume constant sur l'indice de résistance à l'érosion semblent identiques quelque

soit le sol (Figure IV-24, Figure IV-25, Figure IV-26). Du côté sec, la saturation améliore la résistance du sol, tandis que du côté humide elle semble la diminuer.

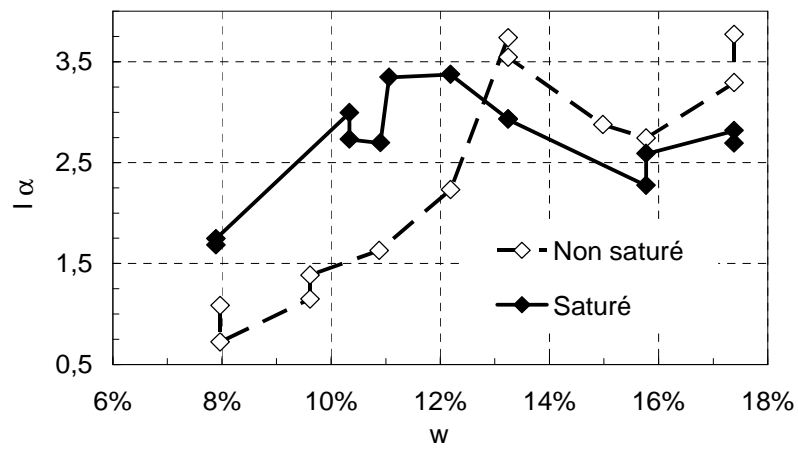


Figure IV-24 : Effets de la saturation à volume constant sur l'indice de résistance à l'érosion, sol P2.

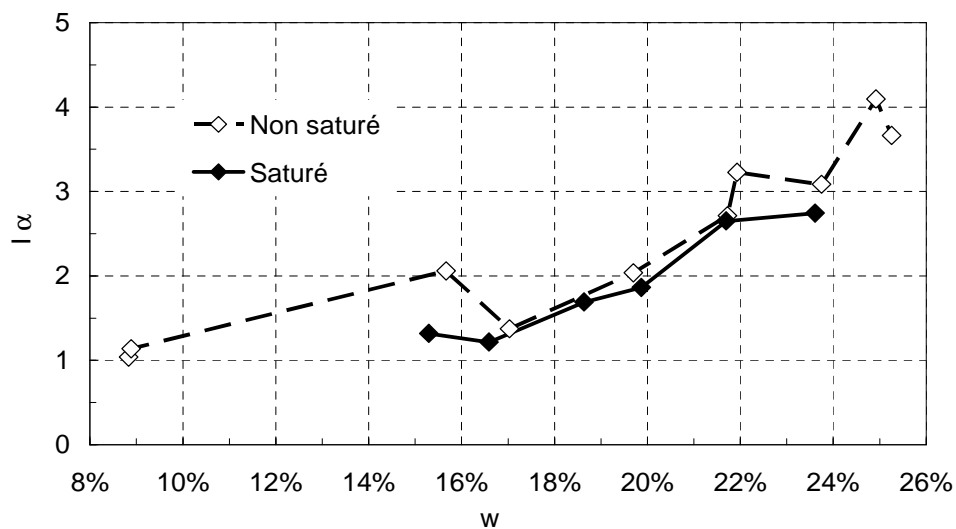


Figure IV-25 : Effets de la saturation à volume constant sur l'indice de résistance à l'érosion, sol Mix 1.

En expérience semi confiné ou par immersion, du côté sec, l'imbibition déstabilise le sol et l'indice de résistance à l'érosion décroît (Figure IV-26).

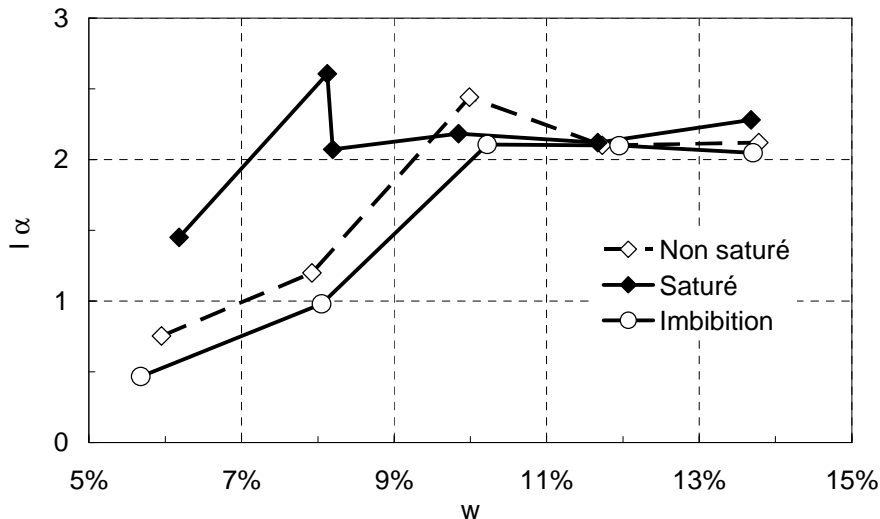


Figure IV-26 : Effets de la saturation à volume constant l'indice de résistance à l'érosion et effets d'une imbibition (18h – 20 h), sol K20 S80.

Si on observe les courbes de la masse érodée en fonction du temps pour différents types de saturation (Figure IV-27), la saturation diminue de manière significative la sensibilité à l'érosion. Nous pouvons aussi noter que la sensibilité à l'érosion augmente dans le cas d'un sol imbibé.

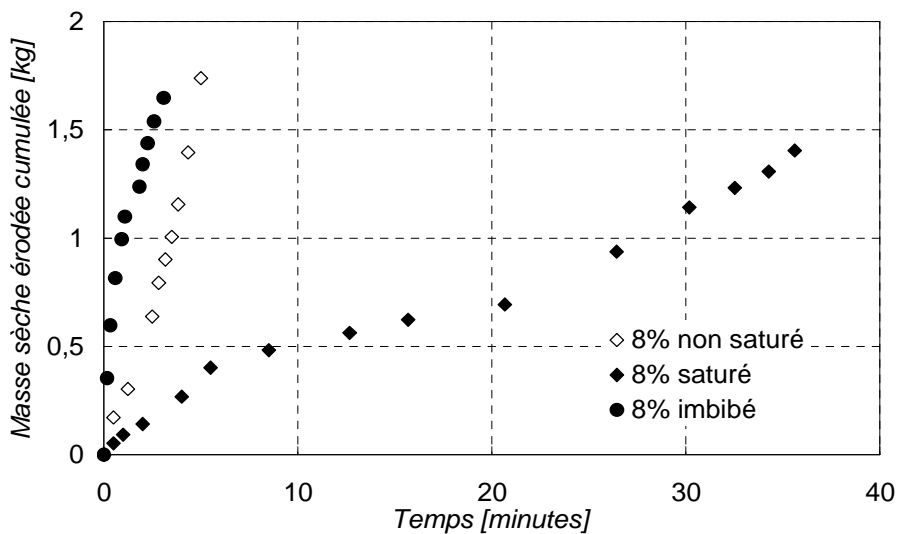


Figure IV-27 : Evolution de la masse érodée sèche en fonction du temps, sol K20 S80.

La notion de « double couche » autour des plaquettes d'argiles, (Mitchell, 1993) peut expliquer cet effet de l'imbibition. Du côté sec, cette double couche est peu développée. Le fait d'injecter de l'eau conduit à augmenter la taille de cette double couche. Si le milieu est non confiné, l'augmentation de l'épaisseur de cette double couche conduit à un gonflement de l'échantillon, et donc à une diminution de la masse volumique sèche. Si on empêche le gonflement, l'eau aura tendance à aller entre les particules d'argile, et le volume de sol

gardera une compacité constante. L'eau sera mise en commun entre plusieurs particules d'argile. Cela créera une certaine « carence » en eau. Cette « carence » en eau de l'argile conduira à stabiliser le sol par rapport aux phénomènes d'érosion en gardant les particules liées entre elles.

Du côté humide, les particules sont déjà hydratées à leur maximum et la double couche est parfaitement développée. Ainsi, la prise de masse sera faible, puisque seuls des pores occlus sont non saturés. La faiblesse de cette prise de masse, explique la constance de la sensibilité à l'érosion, que le sol soit saturé, imbibé ou non.

Par contre, nous pouvons penser que l'accroissement du degré de saturation au delà d'une valeur initiale de 90% (valeur maximale atteinte lors de nos essais) puisse induire une augmentation de la pression interstitielle dans tout l'échantillon et donc une plus grande sensibilité à l'érosion. .

La saturation a tendance à rendre le sol, compacté du côté sec, moins sensible à l'érosion. Plus le milieu sera confiné pour la saturation, moins le sols sera sensible. Une saturation en milieu confiné conduit à une diminution de la sensibilité à l'érosion du côté sec. Si cette saturation est effectuée en milieu moins bien confiné, une augmentation de la sensibilité à l'érosion est observée. Dans le cas confiné, l'eau ajoutée peut stabiliser la structure en comblant le besoin en eau des argiles sans les déstabiliser.

Le lien entre la sensibilité à l'érosion et l'observation d'une zone limitée par l'influence de l'imbibition pose la question concernant le lien entre la cinétique d'érosion et la vitesse de percolation d'où la mesure de perméabilité.

## **2.4 Sensibilité à l'érosion, cohésion et perméabilité**

Sur les sols K50 S50 et K20 S80, des essais complémentaires à celui de l'érodibilité ont été menés : mesure de cohésion non drainée et perméabilité.

### **a) Cohésion non drainée- non saturée et indice de résistance à l'érosion**

Du côté sec, les cohésions non drainées (mesurées au scissomètre sur les faces du moule Proctor) sont plus élevées (Figure IV-28). C'est l'effet des forces capillaires qui est le plus important, du fait de la faible présence d'eau par rapport à la surface. De par cette évolution de la cohésion non drainée, aucune corrélation avec l'indice de résistance à l'érosion n'apparaît pour les deux sols testés (Figure IV-29).

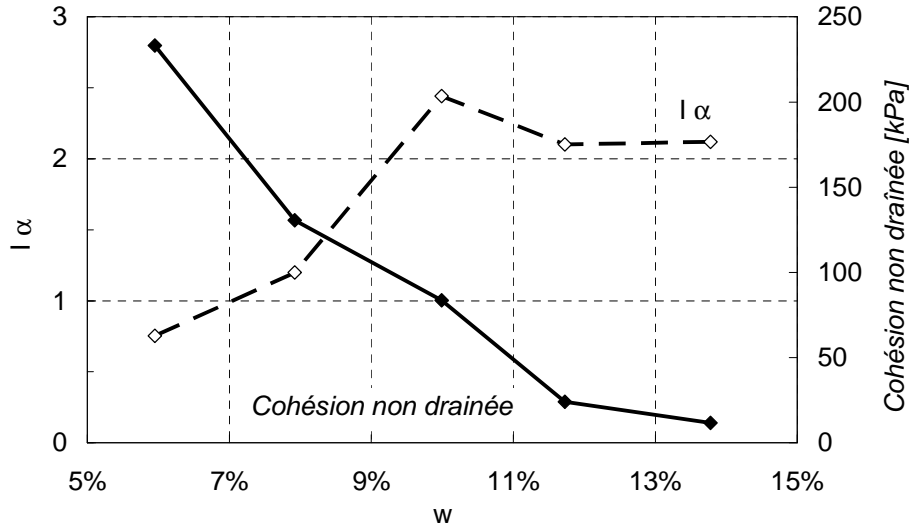


Figure IV-28 : Indice de résistance à l'érosion et cohésion non drainée en fonction de la teneur en eau, sol K20 S80.

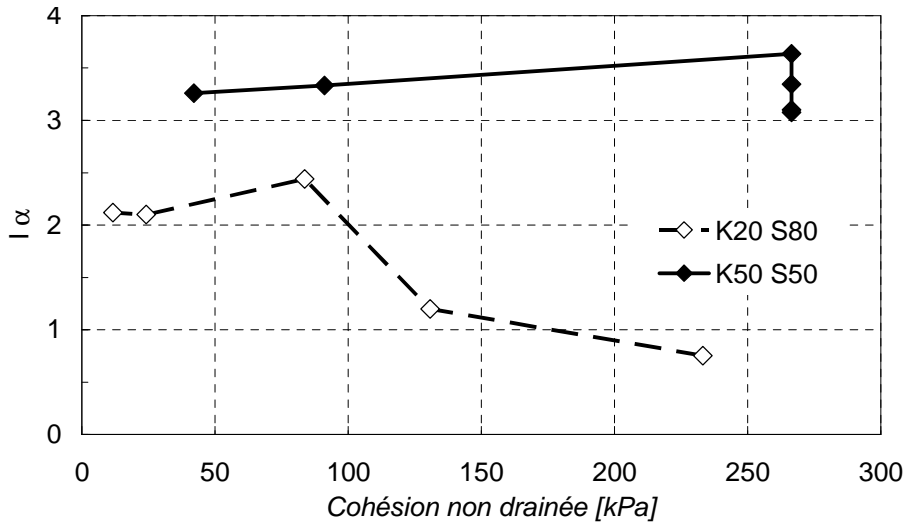


Figure IV-29 : Indice de résistance à l'érosion en fonction de la cohésion non drainée, sols K20 S80 et K50 S50.

### b) Perméabilité et indice de résistance à l'érosion

Sur les 2 mélanges sablo-argileux K50 S50 et K20 S80, la perméabilité a été mesurée pour les différents échantillons compactés. Sur la Figure IV-30 est représentée l'évolution de la perméabilité en fonction de la teneur en eau au compactage pour le sol K20 S80.

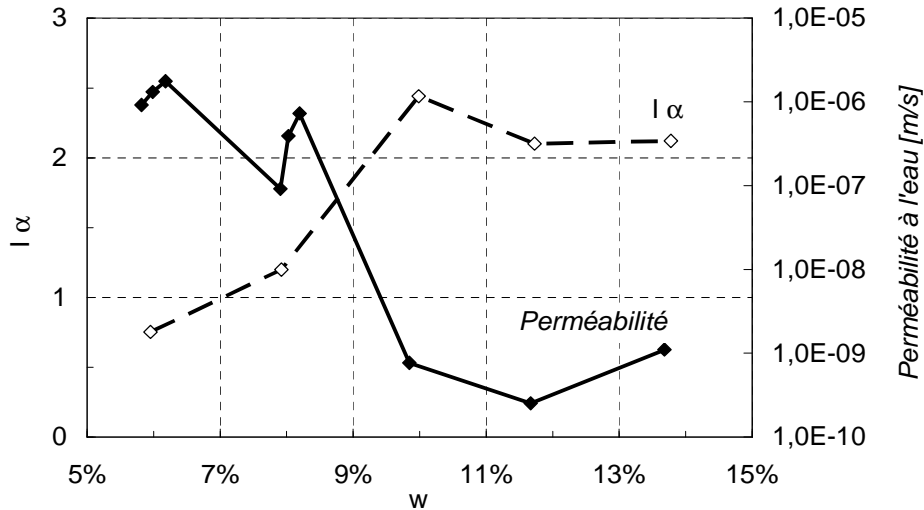


Figure IV-30 : Indice de résistance à l'érosion et perméabilité en fonction de la teneur en eau au compactage, sol K20 S80.

Nous pouvons observer que la perméabilité décroît d'un facteur 1000 entre 6% et 10% de teneur en eau, puis qu'elle semble se stabiliser. La perméabilité représentée sur la Figure IV-30 traduit aussi une variation de masse volumique. En aucun cas, la masse volumique n'est pas constante entre les différentes teneurs en eau. En effet, l'échantillon est le résultat d'un compactage Proctor avec la teneur en eau donnée. Cette évolution nous conduit à confronter la perméabilité avec l'indice de résistance à l'érosion (Figure IV-31).

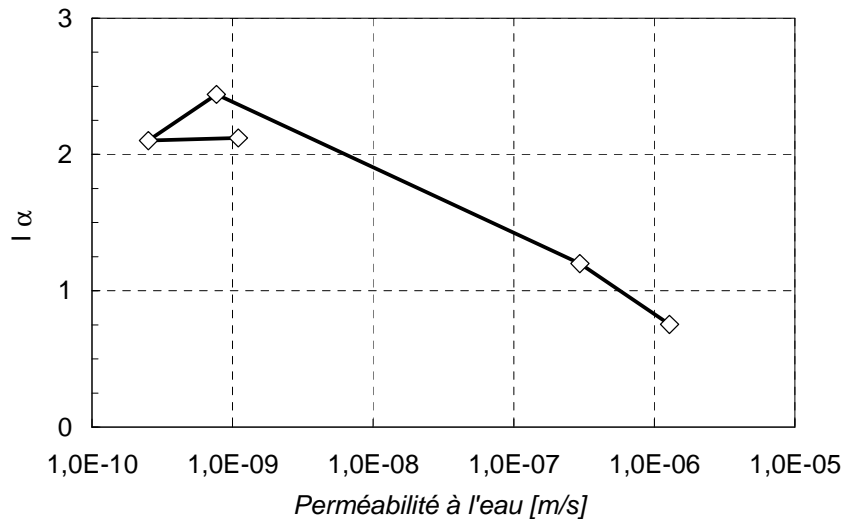


Figure IV-31 : Indice de résistance à l'érosion en fonction de la perméabilité, sol K20 S80.

Pour ce sol testé, la perméabilité apparaît être un paramètre linéairement corrélé (équation ( IV-20 )) avec l'indice de résistance à l'érosion.

$$I_{\alpha} = -0,1764 \log(k[\text{m/s}]) - 1,5339 \quad (R^2 = 0,9202, n = 5) \quad (IV-20)$$

Cependant, deux nuages de point se distinguent sur la Figure IV-31. Ces deux nuages se différencient par un saut de teneur en eau de 2% autour de l'optimum Proctor. Cela pourrait être induit par une différence de structure.

Pour les autres types de sols, cette corrélation devra être redéfinie systématiquement. Par ailleurs elle ne permettra pas de différencier les sols faiblement et fortement sensibles à l'érosion. En conséquence cette corrélation doit être considérée comme une caractérisation complémentaire à notre modèle de corrélation entre les différents paramètres physiques et  $I_{\alpha}$  défini pour les sols à l'optimum Proctor.

### 3 Synthèse de la caractérisation de la sensibilité à l'érosion

L'analyse menée de l'influence des différents paramètres sur la sensibilité à l'érosion aboutit à trois principaux résultats :

- Pour les différents sols compactés au voisinage de l'optimum Proctor ( $w = \text{optimum} \pm 1,5 \%$ ), les paramètres physiques prépondérants ont été identifiés et une loi de corrélation linéaire a été proposée entre l'indicateur de résistance à l'érosion et 3 paramètres ayant un  $R^2$  de 0,60 en distinguant les sols dispersifs à l'essai du « pin-hole test ». Les 3 paramètres sont la compacité, la teneur en eau de l'argile comparée à la limite de liquidité et le degré de saturation.
- La variation de la sensibilité à l'érosion de part et d'autre de l'optimum Proctor pourrait être estimée en partie par la mesure de la perméabilité du sol. Ce qui rejoindrait la notion de compacité en y faisant intervenir la surface développée.
- De part et d'autre de l'optimum Proctor, l'influence de la saturation à volume constant et de l'imbibition ont été mises en évidence. Ces effets ne sont pas identiques pour tous les sols et dépendent notamment de la plasticité. Ce constat montre la nécessité de caractériser la sensibilité à l'érosion du sol dans les différents états de saturation qu'il peut atteindre sur site.
- L'effet du degré de saturation est de première importance, et le cycle de l'eau vue par un ouvrage ou de sécheresse peut impliquer des vitesses d'érosion différentes.

La nécessité de tenir compte de l'état de l'eau au sein du sol semble mise en évidence par l'effet de la saturation sur la résistance à l'érosion. Le lien existant entre l'érosion et la perméabilité semble aussi aller dans ce sens. La présence des argiles ainsi que leur nature semblent régir en partie le comportement vis-à-vis de l'érosion.



## **4 Perspectives pour la caractérisation de la sensibilité à l'érosion**

### **4.1 Pour l'amélioration de la caractérisation**

Dans le cadre d'une meilleure appréhension de la résistance à l'érosion, il est nécessaire de caractériser l'état de l'eau au sein de la matrice de sol, ainsi que de développer ou améliorer des procédés de mesure existants.

L'amélioration de la compréhension de la sensibilité à l'érosion et notamment des écarts observés entre les états sec et humide du matériau nécessitera aussi certainement une caractérisation très fine de la structure. Cette approche à l'échelle microscopique devrait faciliter la définition d'une expression faisant intervenir des paramètres mesurables à l'échelle macroscopique.

Dans le cadre de la recherche d'une expression paramétrique de la sensibilité à l'érosion valide pour tout type de sol, tout état de compactage et de saturation, il conviendrait de mesurer systématiquement la perméabilité. Cette mesure doit être effectuée sous très faible gradient hydraulique pour éviter tout phénomène de suffusion au cours de la mesure. Pour les matériaux argileux, cela signifie l'utilisation préalable de « dioxyde de carbone » tel que suggérer pour la saturation d'éprouvettes triaxiales, ou autres méthodes, ainsi que d'importantes durées d'essais.

### **4.2 En terme d'améliorations métrologiques**

La précision des analyses de l'influence des différents paramètres sur l'érodibilité a été améliorée par la pesée des échantillons immergés. Afin d'améliorer encore la précision de la mesure, il conviendrait de pouvoir ajuster l'horizontalité. Un jeu de pesons parfaitement lisses et de volume connu permettrait d'avoir une référence. Ainsi, avant une mesure il serait possible de vérifier la réponse du système. Le support devrait être réalisé dans un matériau plus rigide que le PVC. Ces précautions permettraient certainement d'éviter les phénomènes qui parasitent la mesure, notamment le fluage du support.