FORMATION TECHNIQUE
AREAS
30-06-2008

CALCUL DU RISQUE d'EROSION LINEAIRE: Théorie générale

Avec le soutien et le concours financier des Départements de Seine-Maritime, de l'Eure, de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et du FEDER

CALCUL DU RISQUE d'EROSION LINEAIRE: Théorie générale

PLAN

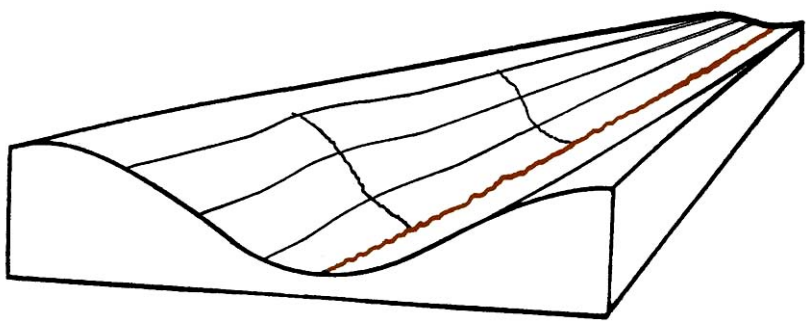
1. Rappels et définitions
2. Méthodes disponibles.
3. Calcul du risque érosif par la méthode des vitesses limites.
4. Calcul du risque érosif par la méthode des forces tractrices limites.
5. Estimation du risque érosif par les méthodes statistiques.

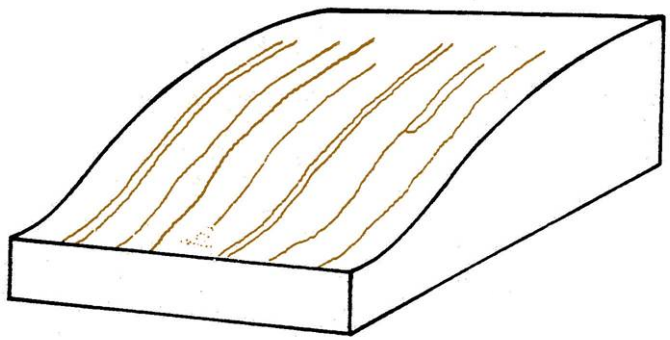
I - L'érosion linéaire correspond au processus d'arrachement par : <u>le ruissellement</u>

- Lorsqu'un écoulement se déplace sur un sol, les particules qui sont au contact de l'écoulement sont susceptibles d'être déplacées.

EROSION LINEAIRE

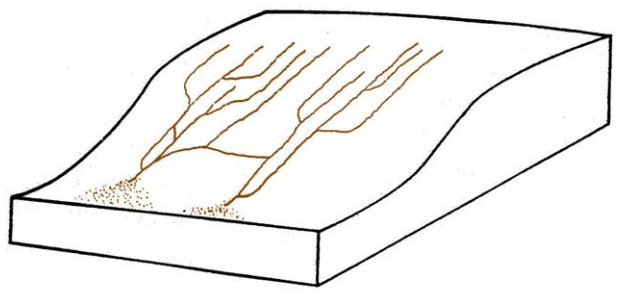
Forme linéaire dans talweg





Forme en parallèle sur versant

Forme en chevelu sur versant



Schémas de B. LUDWIG

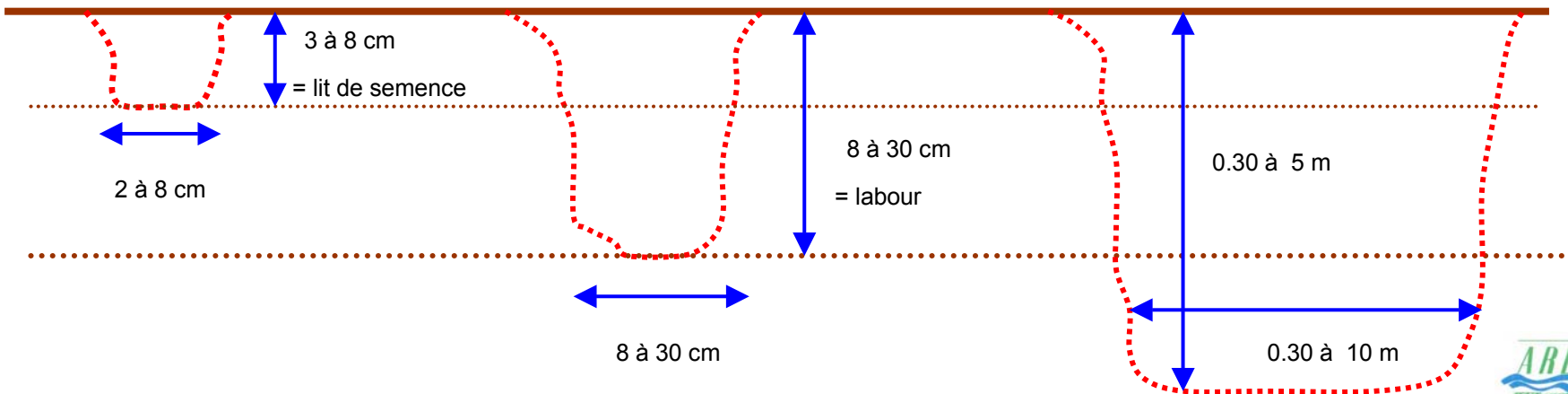
Figures d'érosion linéaire

Définitions

griffures

rigoles

ravines



- N’oublions pas que l’érosion linéaire peut aussi être associée à des phénomènes d’érosion en nappe (splash) sous pluie intenses sur sol peu couvert !
  - Pas d’exclusité !

- Quand on règle l’un des 2, le second reste actif et déplace des sédiments.

Formes d'érosion en fonction des processus de détachement des particules de sol et des caractéristiques du ruissellement

(d'après Auzet et al., 1990)

		Processus sur les versants					
		Caractéristiques du ruissellement					
		Absence de ruissellement		Présence de ruissellement			
				Vitesse d'écoul^t (Ve) < au seuil critique (Vc)		Vitesse d'écoul^t (Ve) > au seuil critique (Vc)	
		Effet de la pluie sur la surface : détachement des particules		Effet de la pluie sur la surface : détachement des particules			
		OUI	NON	NON	OUI	NON	OUI
Processus dans le talweg	Absence de ruisselle ment	Pas d'érosion Formation d'une croûte de battance	Pas d'érosion	Pas d'érosion	Erosion diffuse sur versant	**Rigoles sur versant**	
	Ve<Vc	Cas impossibles					
	Ve>Vc			**Erosion concentrée dans talweg**			

Source : Ph. Martin INRA Thèse Pratiques culturales, ruissellement et érosion diffuse sur les plateaux limoneux du nord Ouest de l'Europe Applications aux intercultures du Pays de Caux 1997

Méthodes issues de l'hydraulique et de mesures statistiques de terrain

1. Méthodes issues des lois de l'hydrauliques:
   a. Méthodes de comparaison des vitesses
   b. Méthode de comparaison des forces tractrices
2. Méthodes statistiques
   a. Thèse de B Ludwig

II
Méthode de calcul du risque érosif par les lois de l'hydraulique.

Les conditions de leur mise en mouvement sont appelées : **« Conditions critiques ».**

Elles sont fonction du rapport entre:

- soit les vitesses :

vitesse de l'écoulement > vitesse critique

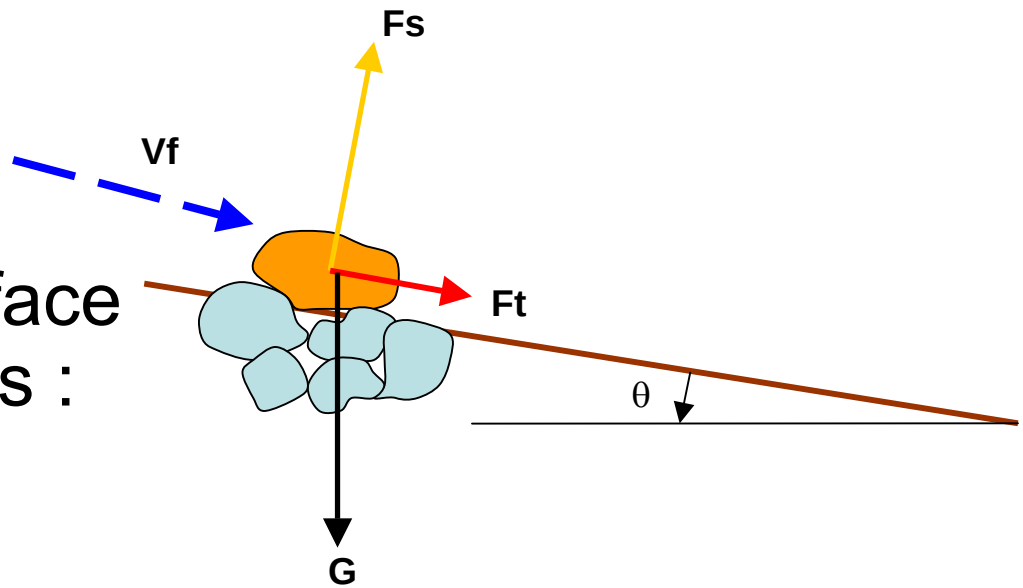
$$V_e > V_c$$

- soit les tensions tangentielles exercées sur les particules :

force tractrice de l'écoulement > forces tractrices critiques

2 – a - Méthodes par les vitesses critiques

(souvent utilisées pour des matériaux non cohérents)



Toute particule à la surface du fond subit trois forces :

- G = la gravité
- Ft = une force tractrice
- Fs = une force de sustentation

Méthode couramment utilisée pour définir les conditions limites d'arrachement des particules :

→Comparaison de la vitesse de l'écoulement à la vitesse critique.

- Généralement, la vitesse de l'écoulement est estimée par l'équation de Manning Strickler :

$$Ve = Ks \; Rh^{2/3} \; I^{1/2}$$

Ve = vitesse moyenne de l'écoulement;
Ks = constante de rugosité de Manning Strickler;
Rh = Rayon hydraulique;
I = Pente locale.

Choix du coefficient de Minning-Strickler : Ks

Source : R. AGOSTINI, A. BIZZARRI, M. MASETTI, Ouvrages flexibles pour les tronçons torrentiels et fluviaux, Première partie Ouvrages transversaux pour aménagement hydraulique et dérivation d'eau, 1982

Table n. 2 - Valeurs du coefficient de rugosité pour lits naturels [20].

	MINIMUM	NORM.	MAX.
1. Cours d'eau mineurs (largeur à la surface libre au niveau de crue <30 mètres (100 ft)).			
a) *Cours d'eau de plaine*			
1. Sans obstacle et droit, sous régime de crue, sans fentes ou profondes dépressions	0,025	0,030	0,033
2. Comme ci-dessus, mais pierreux et herbu	0,030	0,035	0,040
3. Sans obstacle, torteux, avec quelques dépressions et depôts	0,033	0,040	0,045
4. Comme ci-dessus, mais pierreux et herbu	0,035	0,045	0,050
5. Comme au point 4, sous régime de maigre, avec des talus et tronçons plus irréguliers	0,040	0,048	0,055
6. Comme au point 4, plus pierreux	0,045	0,050	0,060
7. Des tronçons à courant lent, fort herbus, avec de profondes dépressions	0,050	0,070	0,080
8. Des tronçons herbus, de profondes dépressions, ou des tronçons principaux avec troncs et végétation	0,075	0,100	0,150
b) *Cours d'eau de montagne, lit sans végétation, berges abruptes, arbres et végétation le long des berges submergées en régime de crue*			
1. Fond: graveleux, pierreux et quelques blocs rocheux	0,030	0,040	0,050
2. Fond: pierreux avec de gros blocs rocheux	0,040	0,050	0,070

Suite:

Source : R. AGOSTINI, A. BIZZARRI, M. MASETTI, Ouvrages flexibles pour les tronçons torrentiels et fluviaux, Première partie Ouvrages transversaux pour aménagement hydraulique et dérivation d'eau, 1982

2. Lits exondés			
a) *Prairie; sans broussaille*			
1. Herbes au ras-le-sol	0,025	0,030	0,035
2. Hautes herbes	0,030	0,035	0,050
b) *Surface cultivées*			
1. Sans culture	0,020	0,030	0,040
2. Culture en rangées	0,025	0,035	0,045
3. Culture sur parcelle	0,030	0,040	0,050
c) *Sous-bois*			
1. Sous-bois clairsemé, herbu	0,035	0,050	0,070
2. Broussaille et arbres clairsemés, en hiver	0,035	0,050	0,060
3. Comme ci-dessus, en été	0,040	0,060	0,080
4. Sous-bois mi-épais, à épais en hiver	0,045	0,070	0,110
5. Comme ci-dessus, en été	0,070	0,100	0,160
d) *Arbres*			
1. Saules, en été, droits	0,110	0,150	0,200
2. Sol déboisé, avec souches, sans pousses	0,030	0,040	0,050
3. Comme ci-dessus, mais avec plusieurs pousses	0,050	0,060	0,080
4. Arbres de haut fût avec sous-bois clairsemé, niveau de crue au-dessous des frondaisons	0,080	0,100	0,120
5. Comme ci-dessus, mais avec niveau de crue à hauteur de frondaisons	0,100	0,120	0,160
3. Cours d'eau majeurs (largeur de la surface libre de crue >30 mètres (100 ft))			
La valeur de *n* est inférieure à celle des cours d'eau possédant les même caractéristiques, puisque, leurs berges présentent effectivement moins de résistance			
a. Tronçon régulier sans pierres ni sous-bois	0,025	—	0,060
b. Tronçon irrégulier et rugeux	0,035	—	0,100

- MAIS :

  Il faut déterminer la vitesse d'écoulement près du fond. C'est l'une des difficultés de cette approche.

  - Proxy a proposé une approximation pour la vitesse du fond : $V_f = 0{,}6\ V_{e\,moy}$.

  - D'autres auteurs indiquent :

$$1{,}3\ V_f < V_e < 1{,}5\ V_f$$

Les chercheurs ont établi des tables des vitesses critiques limites:

1ére Table:

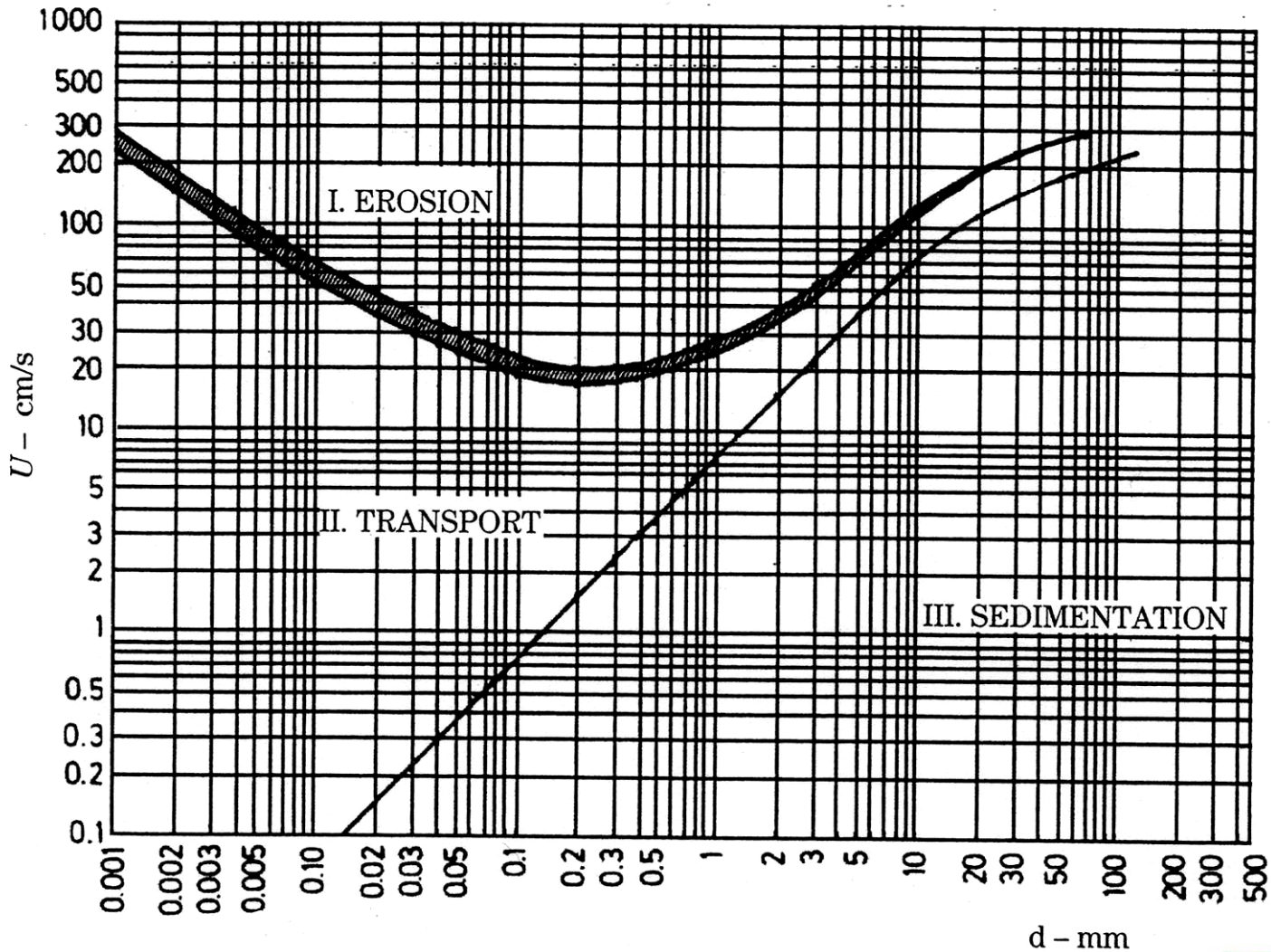
Table n. 1 - Valeurs approximatives des vitesse limites au fond [17], [18], [19].

Matériaux du lit	Vitesse en m/s, courant	
	sans charriage de matériaux colloïdaux	avec charriage de matériaux colloïdaux en suspension
Sable fin (non colloïdal)	0,45	0,75
Sol argileux-sablonneux (non colloïdal)	0,55	0,75
Sol argileux-limoneux	0,60	0,90
Limons normaux	0,75	1,05
Graviers fins	0,75	1,50
Argile compacte	1,15	1,50
Graviers grossiers	1,20	1,85
Galets et cailloutis	1,50	1,70
Schistes argileux	1,85	1,85

Source : R. AGOSTINI, A. BIZZARRI, M. MASETTI, Ouvrages flexibles pour les tronçons torrentiels et fluviaux, Première partie Ouvrages transversaux pour aménagement hydraulique et dérivation d'eau, 1982

120 - Vitesses limites d'entraînement

D'après Hjulström (1935)



Source : A. LENCASTRE, Hydraulique générale, 1996, Librairie Eyrolles

119 - Vitesses limites d'entraînement : données pratiques[1]

a) Profondeurs d'eau h = 1m. Canaux rectilignes

1 - *Matériaux non-cohérents*

Matériau	Diamètre mm	Vitesse moyenne m / s	Matériau	Diamètre mm	Vitesse moyenne m / s
	0,005	0,15			
Vase	0,050	0,20	Cailloux fins.....	15,0	1,20
Sable fin	0,250	0,30	Cailloux moyens.	25,0	1,40
Sable moyen	1,000	0,55	Gros cailloux	40,0	1,80
Sable gros	2,500	0,65	Gros cailloux	75,0	2,40
Gravier fin	5,000	0,80	Gros cailloux	100,0	2,70
Gravier moyen ...	10,000	1,00	Gros cailloux	150,0	3,50
Gravier gros	15,000	1,20	Gros cailloux	200,0	3,90

2 - *Matériaux cohérents : U en m/s*

Nature du lit / Matériau cohérent du lit	Très peu compacté avec un indice de vide de 2,0 à 1,2	Peu compacté avec un indice de vide de 1,2 à 0,6	Compacté avec un indice de vide de 0,6 à 0,3	Très compacté avec un indice de vide de 0,3 à 0,2
Argiles sableuses (pourcentage de sable inférieur à 50 %)	0,45	0,90	1,30	1,80
Sols avec beaucoup d'argiles.....	0,40	0,85	1,25	1,70
Argiles	0,35	0,80	1,20	1,65
Argiles très fines	0,32	0,70	1,05	1,35

Les chercheurs ont établi des tables des vitesses critiques limites: 2éme table

Source : A. LENCASTRE, Hydraulique générale, 1996, Librairie Eyrolles

suite

b) Facteur de correction pour des profondeurs d'eau $h \neq 1$m

Profondeur moyenne - m	0,3	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Facteur de correction	0,8	0,9	0,95	1,0	1,1	~1,1	1,2	~ 1,2

c) Facteur de correction pour canaux avec des courbes

Sinuosité	Rectiligne	Peu sinueux	Moyennement sinueux	Très sinueux
Facteur de correction	1,00	0,95	0,87	0,78

(1) Extrait de [**23**]

Source : A. LENCASTRE, Hydraulique générale, 1996, Librairie Eyrolles

1. B - Autre méthode pour estimer l'érosion : par la comparaison des tensions critiques

(méthode moins employée)

- La tension tangentielle τ exercée par l'écoulement sur le fond

  $\tau = \rho \; Rh \; I$

  τ = force tractrice (N/m²)

  ρ = poids unitaire de l'eau (10 000 N/m³)

  Rh = rayon hydraulique (m)

  comme Largeur >>>hauteur alors Rh # h

  I = pente du cours d'eau (m/m)
- Cette tension est comparée à la tension critique du fond du chenal τ_0 lue dans les tables.

Pour plus de détails voir tables et exemples fournis en annexes.

Cette tension critique : $\tau = \rho Rh I$

peut s'exprimer différemment sachant que $V = Ks\, Rh^{2/3} I^{1/2}$

Par combinaison on obtient

$$\tau = \rho V^{3/2} I^{1/4} Ks^{-3/2}$$

ou $$\tau = \rho V^{2} I^{-1/3} Ks^{-2}$$

- Cette tension critique doit être comparée avec la tension tangentielle exercée par le courant.

τ_0

Lane (1953) donne différentes valeurs de la force de traction critique selon la taille des particules, la nature du matériau et la cohésion.

123 - Force critique d'entraînement dans eaux claires d'après LANE (1)

Les valeurs ci-dessous concernent des canaux rectilignes. Pour des canaux avec *peu de courbes* (terrain faiblement accidenté) on doit prendre 0,90 des valeurs indiquées ; pour une *quantité moyenne de courbes* (terrain moyennement accidenté) on prend 0,75 ; pour des canaux avec *beaucoup de courbes* (terrain très accidenté) on prend 0,60.

1 – Matériaux non-cohérents gros

Au fond, on prend comme valeur pour le projet $\tau_{0\ (crit.)}(N/m^2) = 8d_{75}$ (cm) (d_{75} est le diamètre auquel correspond, dans la courbe de composition granulométrique, 75 % en poids, de matériaux de diamètre inférieur).

Sur les côtés on prend $\tau'_{0\ (crit.)} = K\ \tau_{0\ (crit.)}$ (K est fonction de l'angle de repos θ du matériau et de l'angle des côtés avec l'horizontale).

2 – *Matériaux non-cohérents fins* : $\tau_{0(crit.)}$ – N/m²

Diamètre moyen d_{50} en mm	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0
Eau claire	1,2	1,3	0,15	2,0	2,9	6,8
Eau avec peu de sédiments fins	2,4	2,5	0,27	2,9	3,9	8,1
Eau avec beaucoup de sédiments fins	3,8	3,8	0,41	4,4	5,4	9,0

Source : A. LENCASTRE, Hydraulique générale, 1996, Librairie Eyrolles

Suite:

τ_0

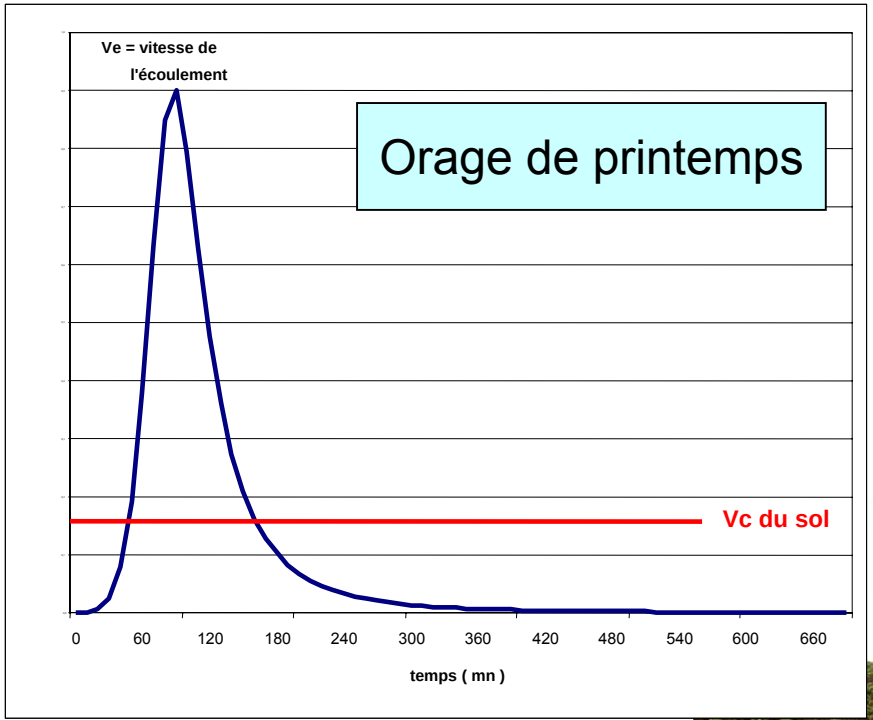
Lane (1953) donne différentes valeurs de la force de traction critique selon la taille des particules, la nature du matériau et la cohésion.

3 – *Matériaux cohérents* : $\tau_{0\,(crit)}$ – N/m²

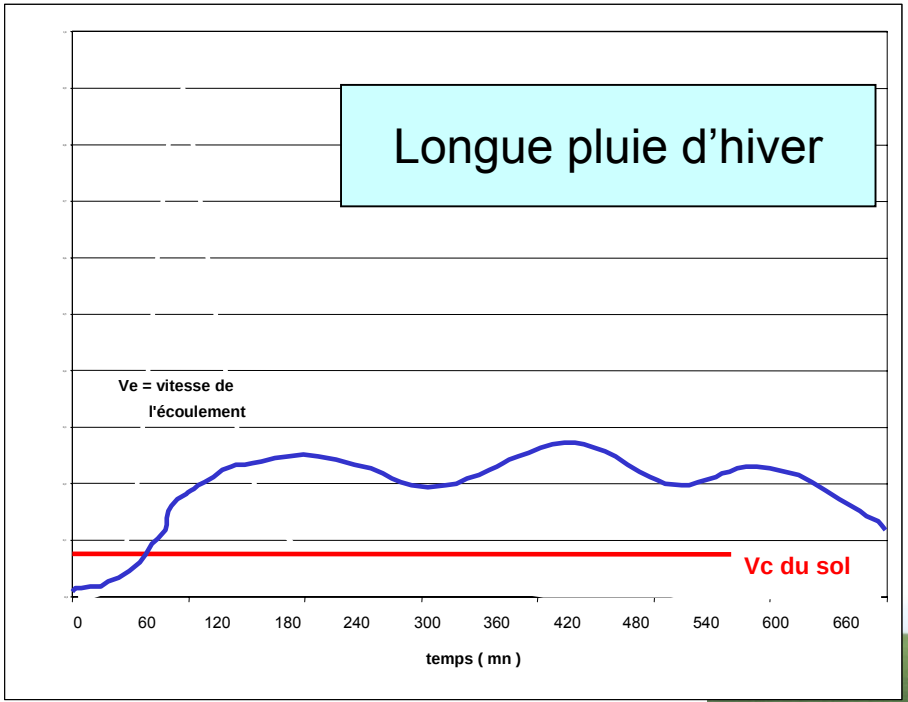
Nature du lit / Matériau cohérent du lit	Très peu compacté avec un indice de vide de 2,0 à 1,2	Peu compacté avec un indice de vide de 1,2 à 0,6	Compacté avec un indice de vide de 0,6 à 0,3	Très compacté avec un indice de vide de 0,3 à 0,2
Argiles sableuses (pourcentage de sable inférieur à 50 %	2,0	7,7	16,0	30,8
Sols avec beaucoup d'argiles.....	1,5 1,2	6,9 6,1	14,9 13,7	27,5 25,9
Argiles	1,0	4,7	10,4	17,3

Source : A. LENCASTRE, Hydraulique générale, 1996, Librairie Eyrolles

En premier bilan
cela explique assez bien les formes de ravines différentes en été et en hiver :



- Vitesse très élevée
  → Q élevé
  = fort ruissellement
  sur une grande largeur



- écoulement élevé
  → V >= V limite
  → Q moyen, mais

  sur une grande durée

III
Méthodes issues de la thèse de B. Ludwig.

En pays de caux, sur limon battant et en système de grande culture largement orienté vers les productions industrielles,

L'érosion annuelle en ravine et en rigole sur un petit BV (ordre de Stralher 1 à 2) dans les années 1988 à 1992 représente:

modèle de bruno LUDVIG sur l'estimation des sections de ravine
(thèse)

$$S = 1{,}93(SR4^{0{,}65} * Pt^{0{,}78} * Si^{1{,}04}) + E$$

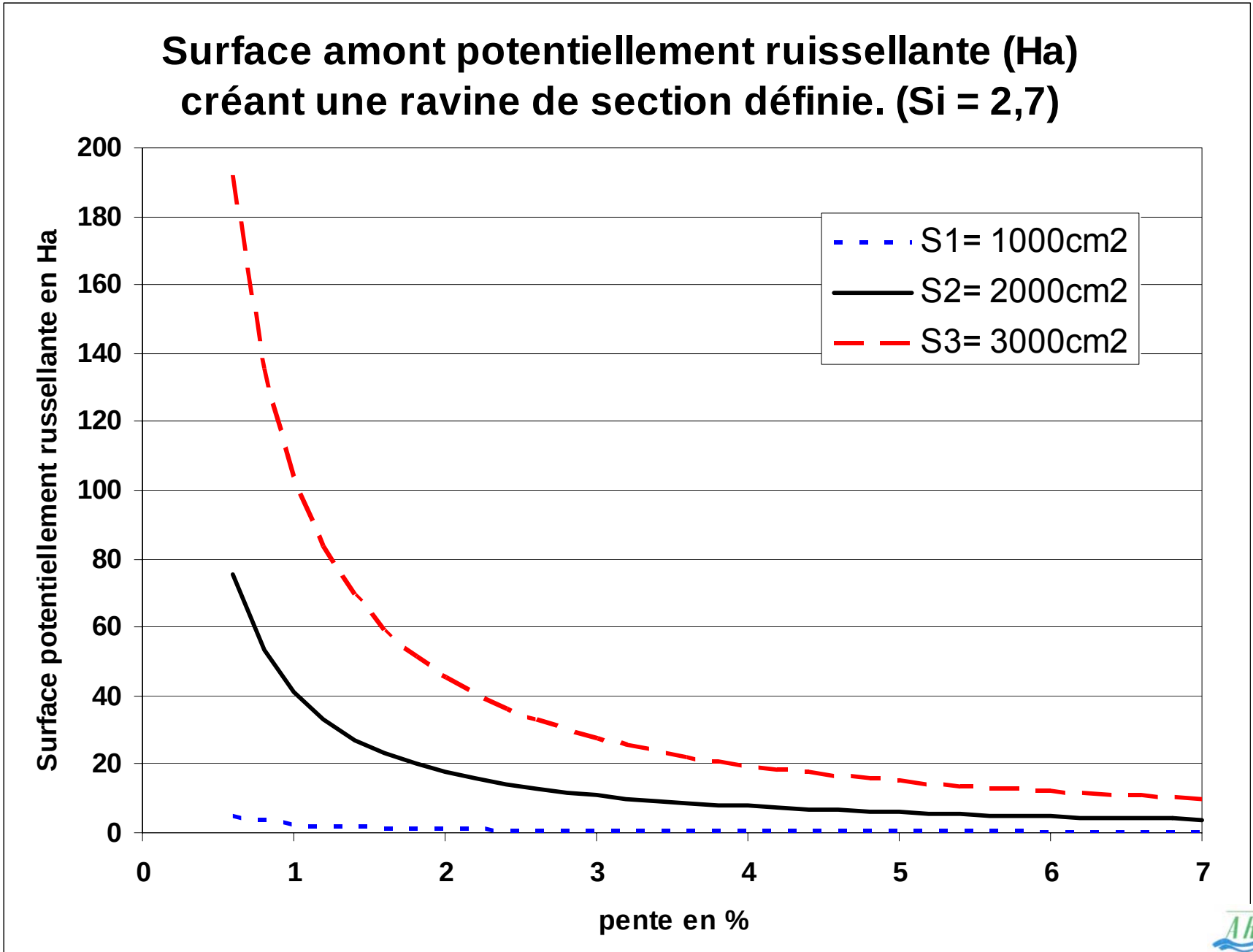
S = section en cm ^{2}
SR4 = superficie potentiellement ruissellante en are
Pt = pente en %
Si = sensibilité à l'incision note de 0 à 5; 2,7 en moyenne
E = erreur moyenne = 800 cm^2

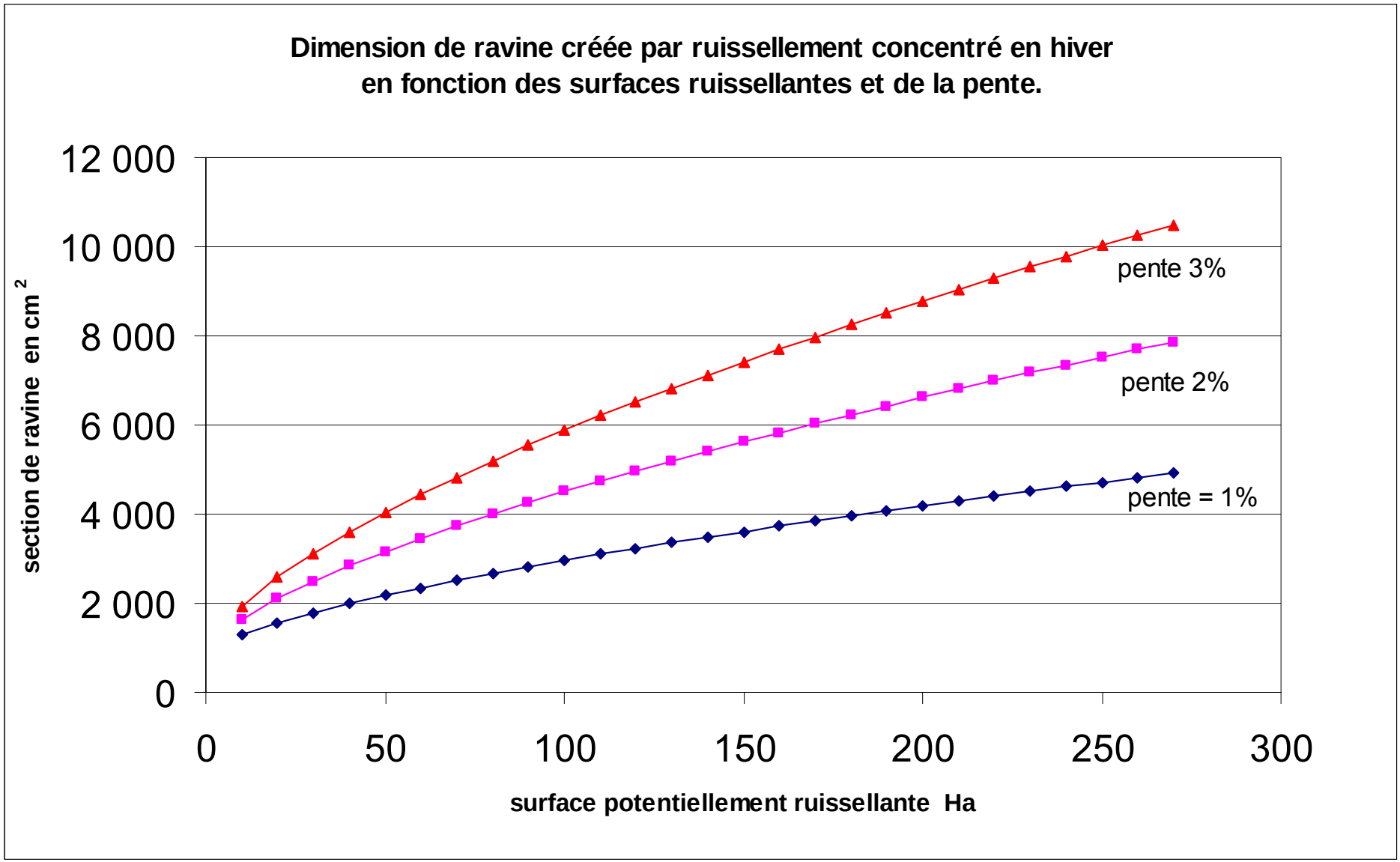
$$SR4\ seuil = ((S - E) / (Pt^{0{,}78} * 1{,}93 * Si^{1{,}04}))^{1{,}54}$$

Taux d'érosion moyen sur les BVE du Pays de Caux de 88 à 92

(source : thèse de bruno LUDWIG)

campagne d'observation	taux moyen d'érosion m^3/ha	Précipitation cumulées en mm (Blosseville)	
		totales	à I> 10 mm/h
1988-1989	2,37	355	65
1989-1990	1,28	409	60
1990-1991	5,48	482	83
1991-1992	3,54	318	91
Moyenne	**3,17**		


Surface amont potentiellement ruissellante (Ha)
créant une ravine de section définie. (Si = 2,7)
Surface potentiellement russellante en Ha
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
1
2
3
4
5
6
7
pente en %
S1= 1000cm2
S2= 2000cm2
S3= 3000cm2


Dimension de ravine créée par ruissellement concentré en hiver
en fonction des surfaces ruissellantes et de la pente.
12 000
10 000
8 000
6 000
4 000
2 000
0
section de ravine en cm 2
0
50
100
150
200
250
300
surface potentiellement ruissellante Ha
pente 3%
pente 2%
pente = 1%

Exemple : Haute-Normandie
Appréciation de l'importance du risque d'érosion de talweg
(Sensibilité à l'arrachement partout pareil)

Surface Potentiellement ruisselante (ha) (à une date donnée)	Pente de l'axe de ruissellement (%)				
	< 0,5	0,5 - 2	2 – 5	5 -10	> 10
$\leq 2^0$	Nul	Nul	Faible		
$\leq 2^4$		Faible	Moyen		Elevé
$\leq 2^8$			Elevé		
$> 2^8$		Moyen			

(Dans le détail, cela résulte des différents travaux de recherche de l'INRA, et notamment de la thèse de Bruno LUDWIG)

Résultats des Equipes de Leuven en Belgique

- Pour les ravines temporaires (estivales):

$W \# 6{,}92\ Q^{0{,}54}$

W = largeur de la ravine

Q = débit estimé par la méthode rationelle

ou

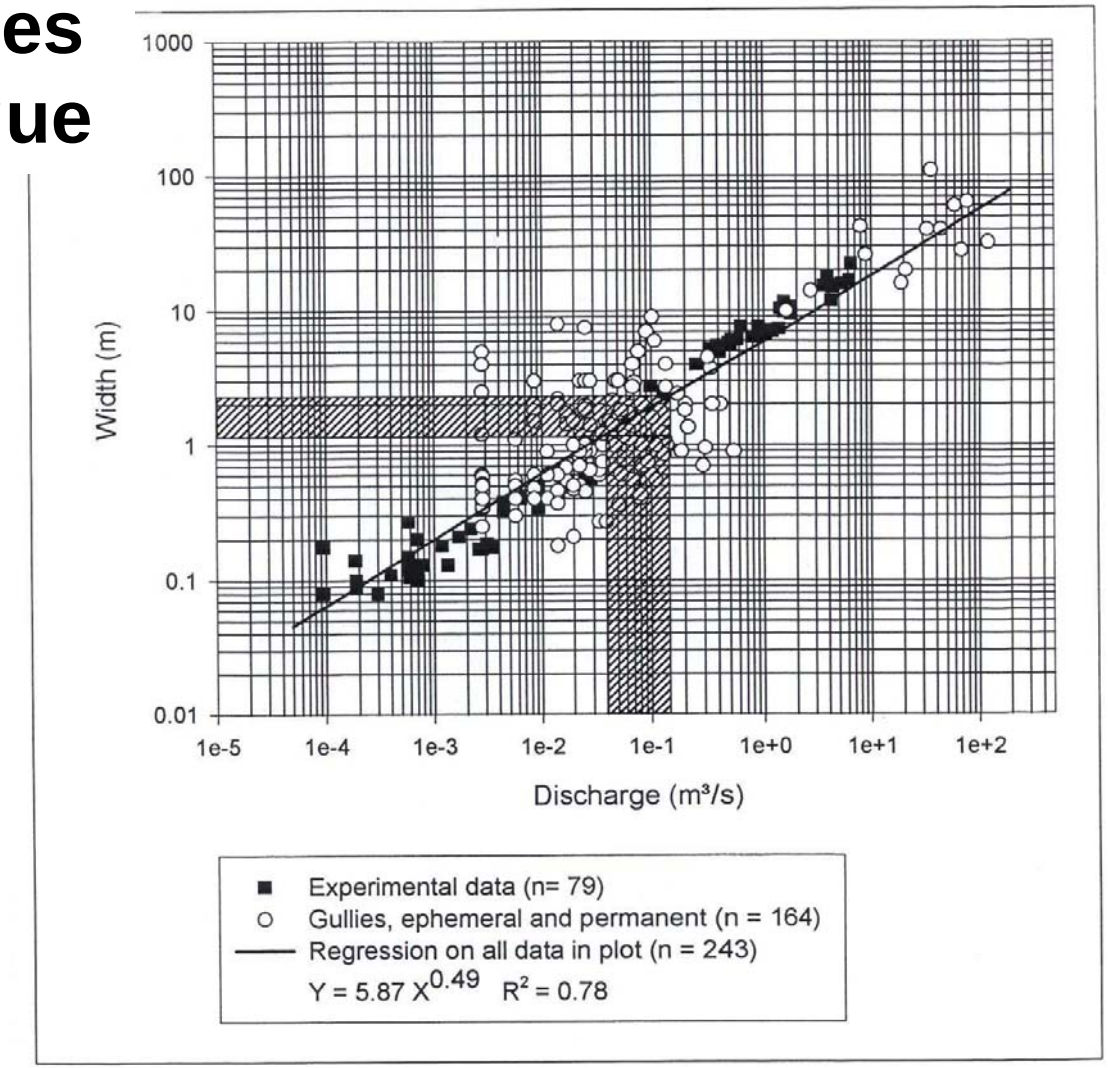


Fig. 3.6: Similar as figure 3.5 (experimental data for rills, gullies and small rivers) but with additional data on ephemeral gullies (Portugal and Belgium, Nachtergaele et al. in press, subm.) and permanent historical gullies (Australia, Prosser 1996). For these data, observed channel width has been plotted versus calculated peak flow discharge (using rational method in Prosser 1996) and CN-method in Nachtergaele et al. in press, subm.).

Résultats des Equipes de Leuven en Belgique (suite)

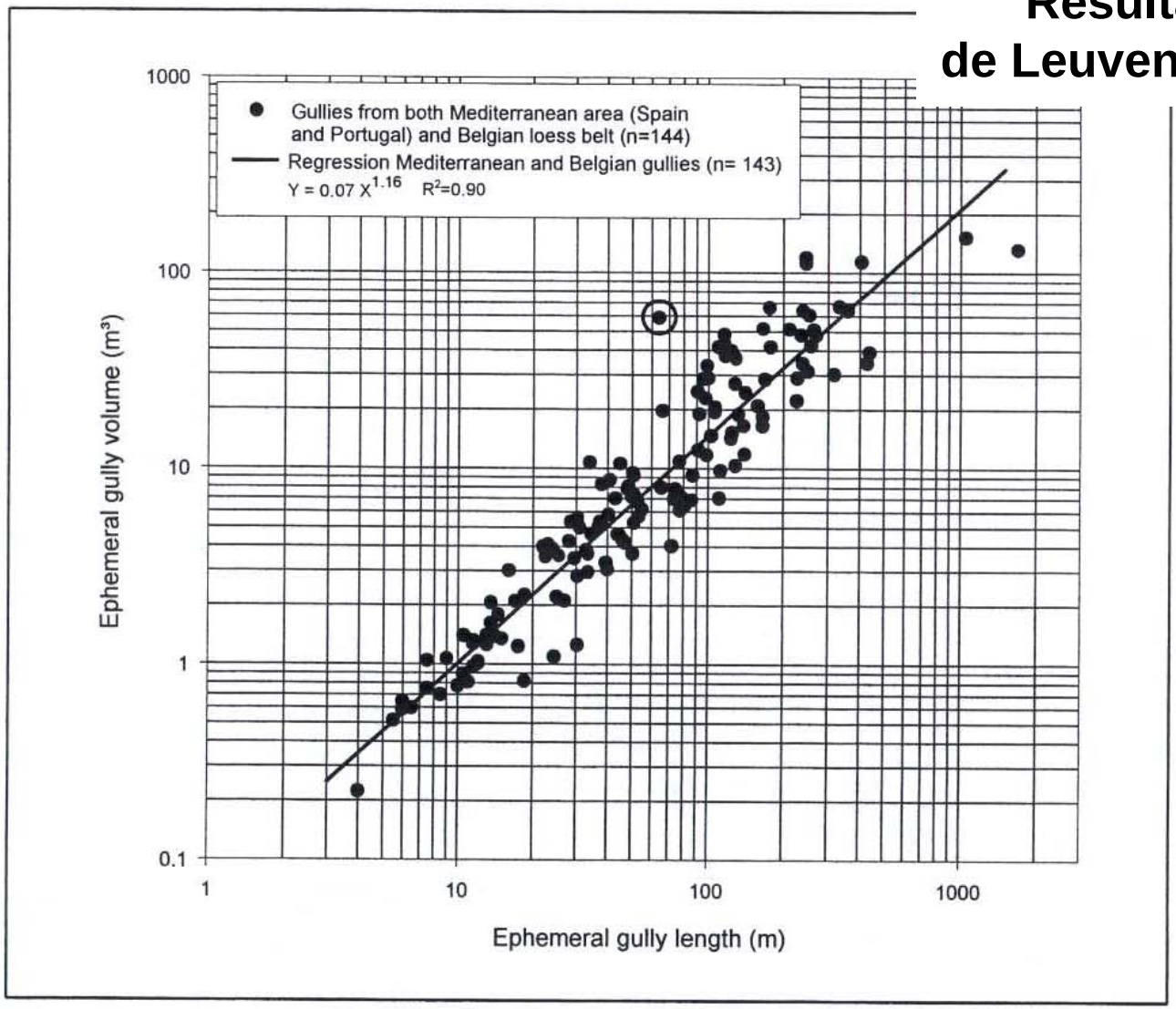


Fig. 4.14: Concentrated flow length versus measured ephemeral gully volumes on a double logarithmic scale for two Mediterranean areas: Alentejo (Southeast Portugal) and Guadalentin (Southeast Spain) (N = 86) and summer and winter gullies from the Belgian loess belt (N = 58). The encircled data point is an outlier.

Exemple d'évolution temporelle des ravines temporaires:

Résultats des Equipes de Leuven en Belgique (suite)

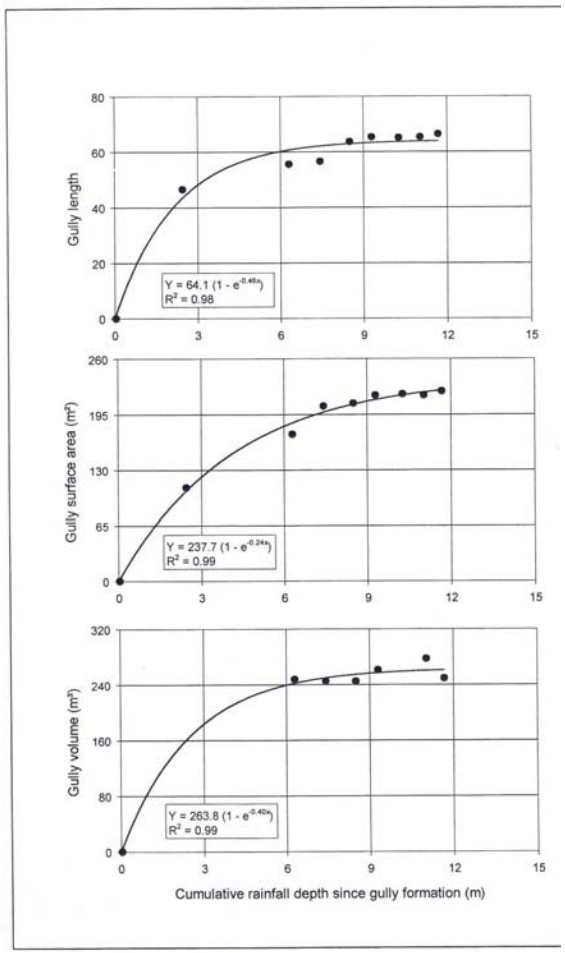


Fig. 4.21: The evolution of gully length, gully surface area and gully volume, as a f rainfall since gully formation.

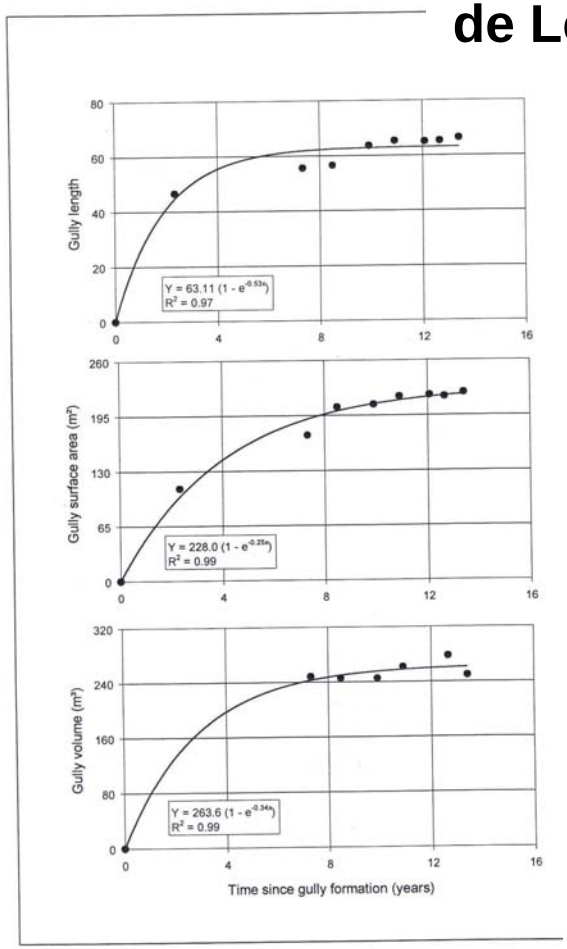


Fig. 4.20: The evolution of gully length, gully surface area and gully volume, (years) since gully formation.

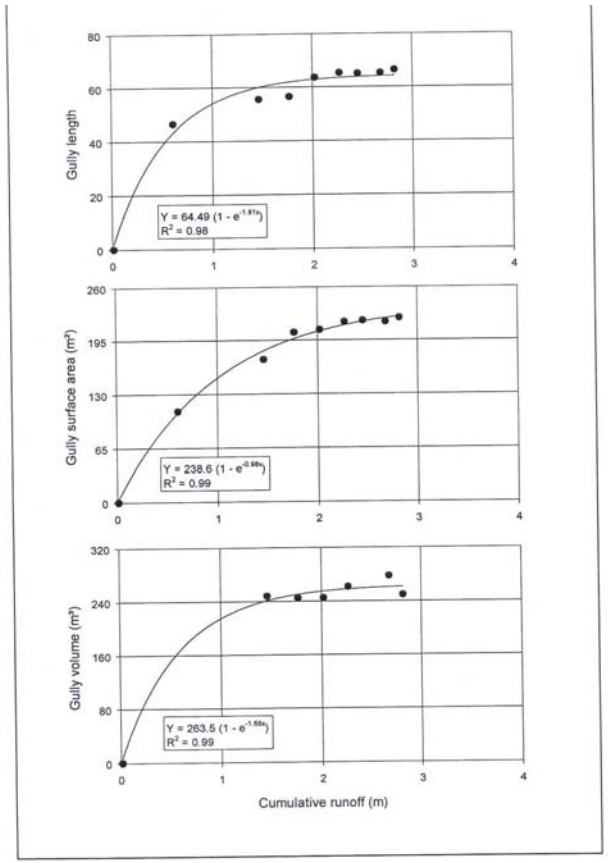
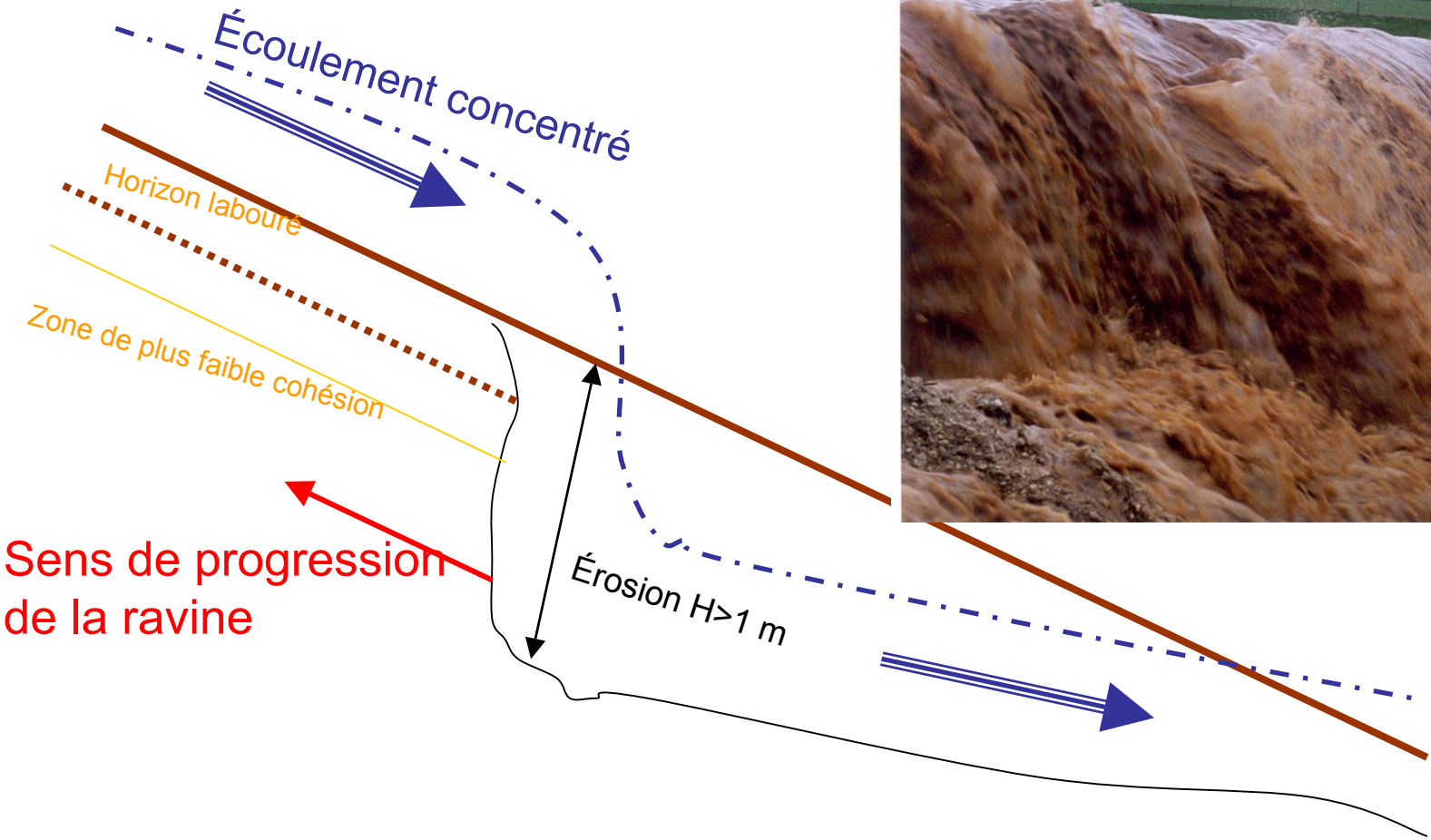


Fig. 4.22: The evolution of gully length, gully surface area and gully volume, as a funct runoff since gully formation. Cumulative runoff was estimated as: $\sum$ [(daily rainfal mm] where n = the number of days with more then 8 mm of rain since the time of gully 20, 1986).

IV
Autres processus particuliers

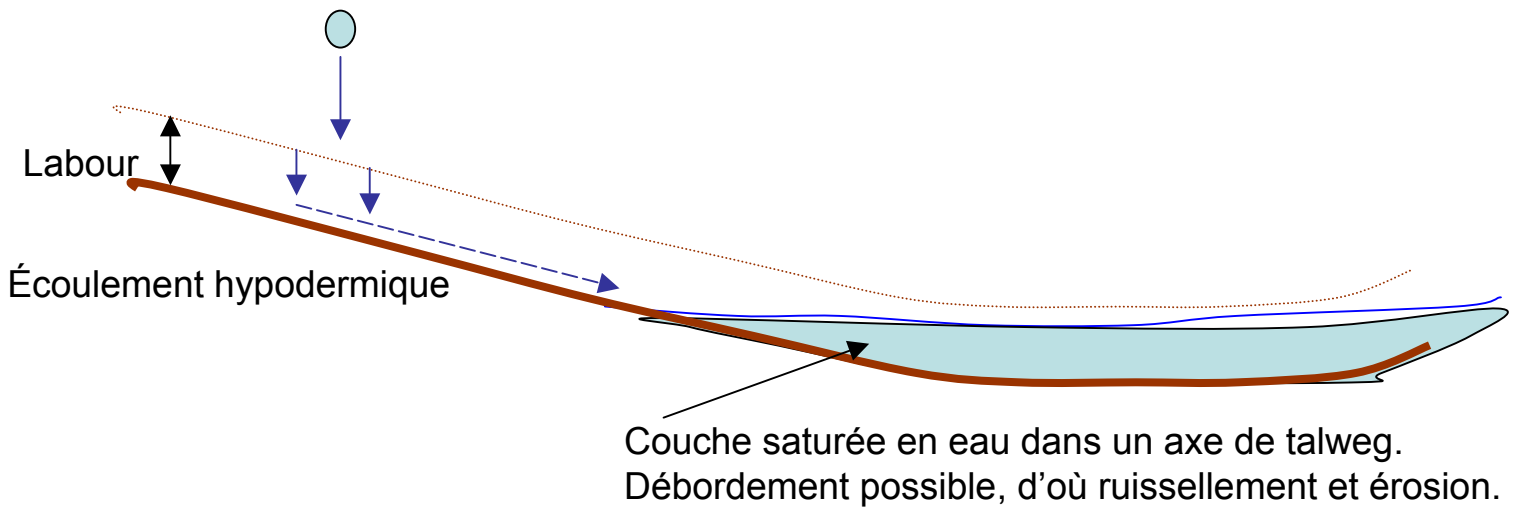
1 - Erosion par régression en tête de ravine:

c'est un phénomène particulier dû à l'énergie de la chute d'eau.



Exemple en mouvement, plus éboulement des parois

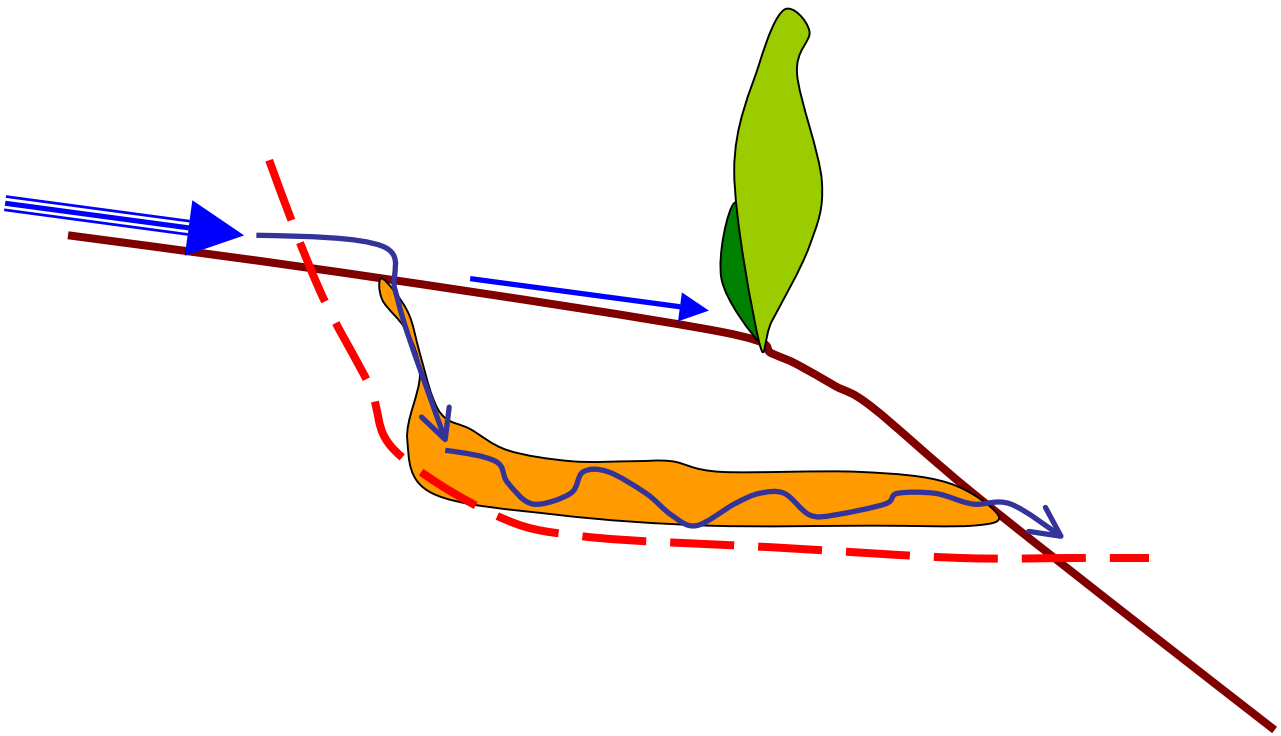
2 - Erosion par ruissellement sub-superficiel



- Le profil de sol ou la succession de couches géologiques superficielles peut comporter de grandes différences de fonctionnement hydrologique.
- Une faible conductivité hydraulique verticale d'une couche superficielle peut entraîner un écoulement latéral sub-superficiel. Cet écoulement sature en eau les points bas :
  - il les rend alors moins cohérents et donc plus érodables,
  - en cas de débordement, l'érosion se déclenche rapidement,
  - sur une ravine établie, l'écoulement dure et peut inciser le fond du chenal.

3 - Erosion par « PIPE »

- Forme particulière due à l'engouffrement du ruissellement dans une galerie creusée par les animaux
- Sorte de « renard »



En résumé, les paramètres importants

(en gras, sur lesquels il est possible d'agir)

« Résistance du sol à l'arrachement »

1. Matériau **non cohérent ou cohérent** (2)
2. Diamètre des grains
3. Densité de l'écoulement (1)
4. **Hauteur/largeur de l'écoulement** (Rh) (1)
5. **Pente de l'écoulement**
6. **Compaction du matériau**
7. Epaisseur de la lame d'eau (1)
8. Angle de frottement interne du matériau
9. Forme des grains
10. Si matériau cohérent→ (texture, densité, % MO, % Na, ratio de dispersion…)

« Capacité de l'écoulement à arracher »

- Vitesse de l'écoulement au fond du lit (1)
  ≈ **vitesse moyenne de l'écoulement**
- **Pente**
- **Largeur, profondeur** (Rh)
- **Coefficient de Manning** (2)
  ⇒ donc débit (1 et 2)
  ↳donc aussi de tout ce qui conditionne l'émission d'un ruissellement : (taille BV, **occupation du sol, couvert végétal, coefficient de ruissellement**, humidité initiale…)

En résumé, les paramètres importants

Un grand nombre de ces paramètres évolue dans le temps :

- à l'échelle d'un même épisode (1)
- au cours de l'année (2) (surtout en milieu agricole)

⇒ Il est nécessaire de tenir compte de la dynamique du processus.

FIN