



SEMINAIRE

SUR LES PETITS BASSINS VERSANTS MINIERES

Dans le cadre de la fin des travaux du projet
« Fonctionnement des petits bassins versants miniers »
Avec la participation des organismes partenaires du projet

Invitation >>>>>

> Réunion du groupe instrumentation

« Fonctionnement du groupe instrumentation après la fin du projet « petits bassins versants miniers » -

La matinée du vendredi 31 octobre à 9h à l'UNC salle 31 (sous l'amphi 400)

> Séminaire de formation à l'hydrologie minière

lundi 3 novembre de 9h à 17h à l'UNC salle F4

> Séminaire de formation en hydraulique torrentielle

vendredi 28 novembre de 9h à 17h à l'UNC salle E4

Intervenants :

Nicolas MATHYS,

Ingénieur de Recherche – IADE – IRSTEA

Didier RICHARD,

Ingénieur en chef des Ponts, des Eaux et des Forêts et Chef de l'Unité de recherche « érosion torrentielle, neige et avalanches » d'IRSTEA

Prendre date

> **Restitution du projet** « Fonctionnement des petits bassins versants miniers » - Le mardi 2 décembre à l'IRD

> Ateliers post-séminaire

L'après-midi du mardi 2 décembre à l'IRD –
L'équipe du projet répondra à vos questions

Documents à télécharger www.cnrt.nc

- programme du séminaire du 3/11/14
- programme du séminaire du 28/11/14
- présentation de 2 séminaires

Pour s'inscrire ou s'informer :

Tél : 28 68 72 (le CNRT)

cnrt@cnrt.nc ou

nicolle.mathys@irstea.fr

Séminaire de formation sur l'hydrologie des petits bassins versants miniers, Nouméa, UNC, lundi 3 novembre 2014

Programme prévisionnel

Intervenant : Ingénieur de Recherche – IDAE – IRSTEA

Préambule

- contexte et limites
 - o hydrologie des crues
 - o petits bassins versants
- objectifs
 - o redéfinir quelques notions de base
 - o présenter les outils utilisables de manière opérationnelle
 - o présenter méthodes et résultats de suivi hydro-sédimentaire en domaine minier
 - définir un "socle" pour le contrôle et la validation des données de suivi
 - décrire les outils et méthodes pour l'interprétation
 - illustrer à l'aide des premiers résultats Hydromine et CNRT

Notions de base en hydrologie (session 1 : 1/2 journée)

Le cycle de l'eau

La notion de bassin versant

Les mesures hydrométriques

- Précipitations
- Hauteurs d'eau et débit

Les sources de données

- Données de base
- Données élaborées et synthèses

Méthodes statistiques utilisées en hydrologie

Fréquences et périodes de retour

Les principales méthodes de traitement statistique

Etude des précipitations

- Les courbes IDF
- Synthèse cartographique de la Davar

Etude des débits

- Stations de jaugeage et question des tarages
- Estimation des crues en site jaugé
- Estimation des crues en site non jaugé
- Synthèses régionales
- La méthode rationnelle
- La question de l'estimation du temps de concentration

Fonctionnement hydro-sédimentaire des petits bassins versants miniers (session 2 : 1/2 journée)

Objectif des suivis

Paramètres ciblés

- temps de concentration
- coefficient d'écoulements
- débits de pointe
- gamme de concentration
- flux solide
- relations concentration et flux solides/ paramètres hydrologiques simples (modèles)

Méthodes de mesure

Station type

- précipitation
- débit
 - o seuil de mesure
 - o capteurs
 - o jaugeages
 - o établissement des courbes de tarage
- MES

Recueil et critique des données

- Suivi sur le terrain et fiches de suivi
- Quelques exemples de critique des données et traçabilité de la procédure de validation

Matières en suspension

Gammes de concentration

Evolution des concentrations au cours du temps

Relation concentration-débit

Calcul des flux

Stratégie d'échantillonnage en fonction des objectifs

Exemple de variabilité des résultats en fonction de la stratégie d'échantillonnage

Rôle des décanteurs

Présentation de quelques résultats obtenus sur Poro

Relations flux/paramètres explicatifs

Modèles simples d'estimation

Calcul des flux annuels

Organisation matérielle

Lieu : Université de la Nouvelle-Calédonie, salle F4

Horaires : Lundi 3 novembre

08h30 - 09h00 : Accueil des participants

09h00 - 12h00 : Session 1

12h00 – 13h30 : pause déjeuner

13h30 – 17h00 : session 2

CNRT NICKEL & son environnement

irstea **UNIVERSITÉ** NOUVELLE CALÉDONIE

Fonctionnement des petits-bassins versants miniers

Séminaire de formation
 (1) Notions de base en hydrologie
 3 novembre 2014
 Nicole Mathys
 Irstea Grenoble

1

Contexte et objectif (1)

2

- Hydrologie : science qui étudie le cycle de l'eau dans la nature et l'évolution de celle-ci à la surface de la terre et dans le sol... l'une de ses branches principales est consacrée à l'analyse du débit des cours d'eau (Remenieras 1964)
- Ici, domaine particulier : crues des petits bassins versants miniers, généralement à forte pente, de quelques hectares à quelques dizaines de km²

CNRT NICKEL *Fonctionnement des petits bassins versants miniers. Séminaire de formation - novembre 2014 (1)* **irstea** **UNIVERSITÉ** NOUVELLE CALÉDONIE

Contexte et objectifs (2)

3

- Projet CNRT, fonctionnement des petits bassins versants miniers (4 ans, juillet 2010 – juin 2014)
 - Objectifs
 - améliorer la compréhension des mécanismes de fonctionnement des petits bassins versants miniers
 - quantifier les flux liquides et solides dans différents contextes géo-morpho-climatiques de la Nouvelle-Calédonie
 - Implication d'Irstea (ex Cemagref) dans le projet
 - assistance technique pour le choix, l'instrumentation, la maintenance et le suivi des bassins et sites de mesure
 - analyse et interprétation des données produites
 - participation à la formation des partenaires calédoniens, et transfert de compétences dans le domaine de l'hydrologie et du transport solide

CNRT NICKEL *Fonctionnement des petits bassins versants miniers. Séminaire de formation - novembre 2014 (1)* **irstea** **UNIVERSITÉ** NOUVELLE CALÉDONIE

Contexte et objectifs (3)

4

- Objectifs de ce séminaire
 - redéfinir quelques notions de base
 - Bassin versant, période de retour, temps de concentration, ajustements statistiques, etc...
 - présenter certains outils utilisables de manière opérationnelle
 - présenter méthodes et résultats de suivi hydro-sédimentaire en domaine minier
 - définir un "socle" pour le contrôle et la validation des données de suivi
 - décrire les outils et méthodes pour l'interprétation
 - illustrer à l'aide des résultats Hydromine et CNRT

CNRT NICKEL *Fonctionnement des petits bassins versants miniers. Séminaire de formation - novembre 2014 (1)* **irstea** **UNIVERSITÉ** NOUVELLE CALÉDONIE

Le cycle de l'eau

5

Évapotranspiration ↑ (ETP)

Écoulement subsuperficiel

Macroporosité

Effet piston

Soulèvement de nappe

Dépassement de la capacité d'infiltration

Exfiltration

Interception

Pluie brute

Ruissellement de surface

Précipitations directes

Écoulement souterrain

CNRT NICKEL *Fonctionnement des petits bassins versants miniers. Séminaire de formation - novembre 2014 (1)* **irstea** **UNIVERSITÉ** NOUVELLE CALÉDONIE

Le bassin versant (1)

6

- Définition :
 - en un point donné, le bassin versant (BV) est la surface drainée par ce cours d'eau et tous ses affluents d'amont
 - Parfois, le bassin topographique est différent du bassin réel

CNRT NICKEL *Fonctionnement des petits bassins versants miniers. Séminaire de formation - novembre 2014 (1)* **irstea** **UNIVERSITÉ** NOUVELLE CALÉDONIE

Le bassin versant (2)

7

- Cas particuliers en Nouvelle-Calédonie et en domaine minier :
 - Question des écoulements souterrains, "pseudo-karst"
 - BV réel # BV topographique
 - Terrassements, voirie et ouvrages modifient fortement les limites théoriques déduites de la topographie
 - Aménagements routiers, fossés, revers d'eau, cassis
 - Modifications importantes du BV au cours du temps
 - Terrassements et modifications des ouvrages
 - Risques de débordement ou de dérivation en crue
 - Connectivités et effets de seuil
 - Le Plan de Gestion des Eaux, régulièrement actualisé, est un bon outil pour affiner la délimitation du bassin versant
 - Intérêt des données Lidar pour une connaissance fine du relief et des chemins de l'eau



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (1)



Le bassin versant (3)

8

- Méthodes et outils
 - Méthode traditionnelle de délimitation sur un plan en courbes de niveau : nécessité de compléter par un relevé de terrain des ouvrages (fossés, buses, cassis, décanteurs et leurs exutoires, etc...)
 - En milieu "karstique", nécessité de disposer d'informations complémentaires
 - Méthodes automatiques sous SIG
 - Attention, ces outils ne sont souvent pas adaptés à la délimitation des écoulements et des limites en milieu fortement perturbé. La vérification de terrain et l'ajustement des limites sont souvent nécessaires



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (1)

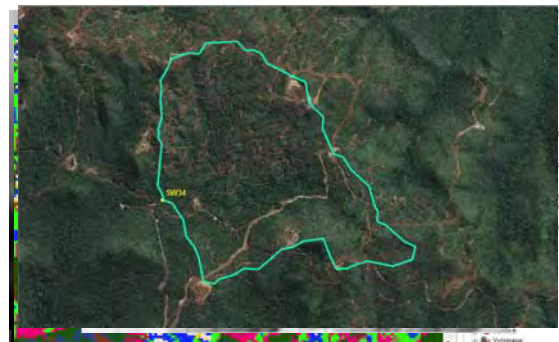


Délimitation manuelle du bassin versant ⁹

- Talwegs
- Limites du bassin versant et des sous-bassins



Méthodes SIG (exemple sous ArcGIS) ¹⁰



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (1)



Le bassin versant, conclusions

11



- Actualiser régulièrement la carte des BV et sous-BV
- Prendre en compte les fossés, ouvrages et pistes
- Tenir compte des risques de débordements
- Importance de l'échelle de travail

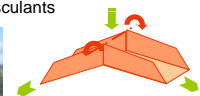


Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (1)



Mesure des précipitations (1) : pluviographe ¹²

- Système le plus répandu : augets basculants



Un dispositif mécanique ou électrique enregistre l'instant du basculement en fonction du temps. Connaissant le poids de l'auget et la surface du cône récepteur on détermine la pluie (en mm) correspondant à chaque basculement (0.1 à 0.5 mm, généralement)

- Autres systèmes
 - Pluviographe à pesée
 - Pluviographe à impacts

Gestion des appareils : cf session 2

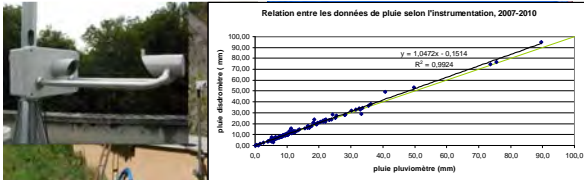


Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (1)



Mesure des précipitations (2): disdromètre 13

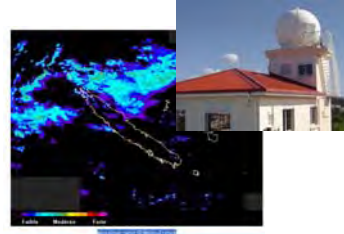
- Ou spectropluviomètre : permet d'obtenir la distribution en taille et vitesse des gouttes de pluie (ou plus généralement des hydrométéores)
- Donne également une bonne estimation du cumul de pluie



- Permet de calculer l'énergie cinétique (et de caractériser le type de temps)

Mesure des précipitations : radars 14

- Radars météorologiques : détection en temps réel des phénomènes pluvieux



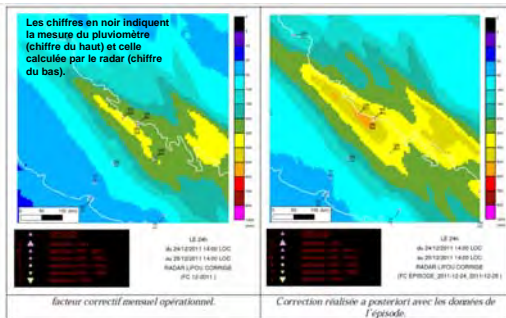
En Nouvelle-Calédonie, 3 radars
Tiebaghi
Nouméa
Lifou

Présentations des 3 images et d'une mosaïque radar sur www.meteo.nc

Attention : mesure indirecte de la réflectivité des gouttes d'eau contenues dans les nuages

- En post-traitement, après calibration par des mesures au sol notamment, permettent d'avoir des lames d'eau spatialisées

Exemple : Projet CNRT, Météo-France NC 15

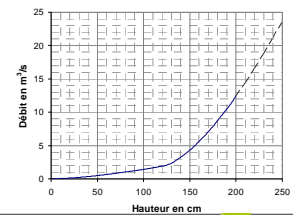


Voir la présentation des résultats par Météo-France à la restitution du 2 décembre

Mesure des débits 16

- En cours d'eau, la plupart du temps, mesure indirecte des débits
 - Mesure de hauteurs : limnigraphes (flotteurs, à pression, ultrasons, échelles ...)
 - Transformation hauteur - débit : courbe de tarage

- Etablissement de la courbe de tarage
- Sections calibrées
- Jaugeages

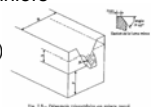


Station limnigraphique (1) 17

- Choix de la section de mesure : section de contrôle
- Critères de choix (cf. Audinet, Hydrométrie pratique des cours d'eau)
 - Mise en vitesse de l'eau (passage en régime torrentiel) pour éviter les influences aval
 - Sensibilité
 - Accessibilité
 - Risque d'envasement réduit
 - Possibilités de jaugeage
 - Facilités des lectures d'échelle
 - Vitesses d'approche modérées (compromis à trouver entre risque de dépôt et limitation de la pente amont)

Stations limnigraphiques 18

- En lit naturel
 - Seuils, chutes, resserrements naturels
 - Stabilité de la section (attention aux dépôts de matériaux charriés)
 - Écoulement à régime hydraulique torrentiel dans la section de contrôle ou immédiatement à l'aval
- En lit aménagé (recommandé pour les BV miniers)
 - Seuils et canaux de jaugeage
 - Seuil à mince paroi (rectangulaire, triangulaire)
 - Canaux bétonnés in situ
 - Canaux jaugeurs normalisés (Flume)
 - Jaugeurs à ressaut (Venturi) : ex : Parshall
 - Canaux calibrés, ex : H ou H flume...

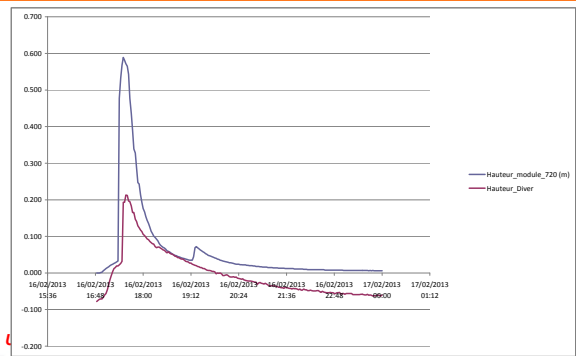


Stations limnigraphiques, quelques exemples⁴⁹



Mesures des hauteurs : capteurs

20



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (1)

Exemples de limnigraphes

21



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (1)

Les sources de données

22

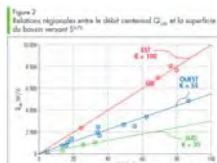
- Données de base en NC
 - Précipitations : Météo-France
 - Débits : DAVAR (accessibles selon un barème pour utilisations hors éducation-recherche)
 - Autres sources de données ?
 - Données produites par les compagnies minières
 - Pas ou peu de données validées
 - Nombreuses lacunes (pas toujours répertoriées)
 - Longueurs de chroniques souvent trop courtes pour des traitements statistiques
 - Néanmoins intéressantes pour analyser des couples averse-crue, comparer avec des stations plus longues proches, etc...
- Données élaborées
 - Courbes intensités-durée-fréquence
 - Synthèses sur les débits
 - Données historiques

Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (1)

Exemple de données élaborées (1)

23

- Données historiques
 - Atlas climatique de la Nouvelle-Calédonie (2007) : liste des cyclones et de leurs principales caractéristiques
 - Attention ! Beaucoup d'épisodes à fort cumul pluviométrique ne sont pas des cyclones
- Résultats d'études statistiques
 - Valeurs moyennes (même document) de PA et PM
 - Synthèse DAVAR des débits centennaux pour les bassins calédoniens : Atlas de la Nouvelle-Calédonie (2012)
 - Attention ! Concerne des bassins de quelques km² au moins



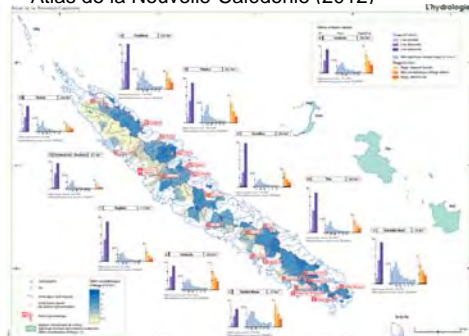
Ne pas s'affranchir de données locales !

Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (1)

Exemple de données élaborées (2)

24

- Synthèse sur les écoulements et les crues **! Grands bassins versants !**
 - Atlas de la Nouvelle-Calédonie (2012)



Etudes de synthèse de la Davar (1)

25

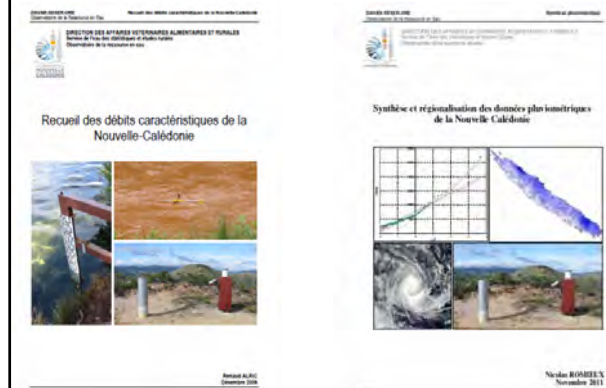
- Téléchargeables sur le site internet
- http://www.davar.gouv.nc/portal/page/portal/davar/ressource_en_eau



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (1)

Etudes de synthèse de la Davar (2)

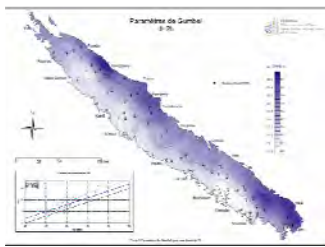
26



Synthèse sur les pluies de Nouvelle-Calédonie

- Principe
- Méthode
- Résultats

Accessible sur
geop



Remarque : ce document contient de précieux renseignements sur les méthodes statistiques et la critique de leurs résultats

Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (1)

SHYPRE et SHYREG

28

- Méthodes développées en métropole depuis les années 80 par Irstea Aix-en-Provence
- SHYPRE
 - générateur stochastique de pluies horaires élaboré à partir de chronique de pluies observées
 - génération de hyétogrammes sur des longues durées permettant ensuite de déterminer des quantiles de pluie pour différentes durées (1 à 72h) et différentes périodes de retour
- SHYREG
 - Version régionalisée de SHYPRE,
 - Détermination des paramètres de SHYPRE à partir de trois paramètres qui peuvent être obtenus à partir des pluies journalières
 - Régionalisation des trois paramètres à partir de données géographiques

Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (1)

Application de SHYPRE en NC

29

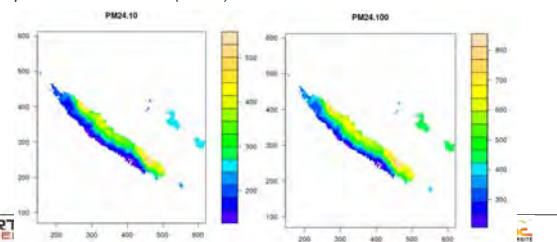
- Exploitation des chroniques horaires des postes Météo-France et Davar (106 postes)
- Découpage en deux saisons (humide, décembre à avril et sèche, mai à novembre)
- Construction du générateur de pluies horaires pour les postes disponibles et les deux saisons
- Détermination des quantiles à partir des chroniques générées et comparaison aux quantiles déduits des séries observées (amélioration de détail de SHYPRE pour assurer la cohérence)
- Recherche de relations entre les paramètres de SHYPRE et des variables journalières
- Validation des quantiles obtenus avec des paramètres journaliers
- Tests de justesse et de stabilité des modèles retenus
- Régionalisation des variables journalières du modèle

Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (1)

Résultats de SHYREG pour la NC

30

- Cartographie des 3 variables journalières du modèle
- Cartographie des résultats en quantiles pour différentes durées de retour et différents pas de temps
- Exemple de carte :
quantile de pluie 24h SHYREG pour la période de retour 10 ans (à gauche) et pour la période de retour 100 ans (à droite)



Notion de période de retour

Définitions :

- Variable aléatoire : débit instantané, pluie journalière, volume de crue, ... maximum annuels
- Évènement : dépassement d'un certain seuil par la variable
- Fréquence d'un événement = rapport du nombre d'occurrences de cet événement sur le nombre total de tirages de la variable

Notion de période de retour (exemples) ³³

- variable aléatoire : débit de pointe maximum annuel
- événement : dépassement d'un certain seuil Q_0
- nombre total d'évènements : N années d'observation
- Fréquence associée $f = (\text{nb d'années où } Q_{\text{max}} > Q_0) / N$
- En hydrologie des crues on parle plutôt de probabilité au non-dépassement, c'est à dire

$$F = \text{prob}(Q \leq Q_0) \quad F = 1 - f$$

Notion de période de retour (illustrations) ³⁴

Le débit Q_{10} dépassé 1 fois en dix ans a une fréquence f de 1/10

Dans cette convention $F = 0.9$ ($= 1 - 1/10$) correspond à la fréquence au non-dépassement décennale.

Le débit Q_{100} associé à la fréquence au non-dépassement $F = 0.99$ ($f = 0.01$) a une chance sur cent d'être dépassé chaque année.

Il est donc susceptible d'être dépassé en moyenne une fois tous les 100 ans

On dit que sa période de retour est de 100 ans $T = 100$.

L'occurrence d'un événement sur une période de plusieurs années soit la $\text{Prob}[Q > Q_p \text{ au moins une fois sur } NA \text{ années}] = 1 - (1 - 1/T)^{NA}$

Par exemple : la crue centennale, qui revient en moyenne une fois par siècle, a une chance sur cent d'être dépassée chaque année, un peu moins d'une chance sur deux en cinquante ans, et un peu de moins de deux chances sur trois en cent ans

Les méthodes statistiques

- Peuvent s'utiliser si on dispose de séries de données suffisamment longues
- Constitution de l'échantillon
 - Choix de la variable à étudier :
 - maximum annuels
 - valeurs supérieures à un seuil
 - Critères de choix
 - type des données disponibles
 - dépouillements à prévoir
 - durée de l'observation
 - nature de la variable à étudier

Les méthodes statistiques

- Constitution d'un échantillon, exemple

année	laval 1max/an	date	débit en m ³ /s
85	4.19	01/07/86	19.30
86	19.30	06/07/87	7.25
87	7.25	20/05/90	9.42
88	3.41	26/08/90	10.31
89	5.34	19/05/92	9.59
90	10.31	02/06/92	9.59
91	1.66	29/08/92	12.21
92	12.21	20/06/94	10.31
93	5.20	26/06/94	8.55
94	20.00	08/09/94	20.00
95	9.77	11/07/95	8.55
96	6.48	12/08/95	9.77

12 ans, valeur la plus forte de chaque année 12 Plus fortes valeurs de la période

Les méthodes statistiques (exemple) 37

- Classement des valeurs de l'échantillon
- Attribution d'une fréquence à chaque valeur (différentes formules existantes)

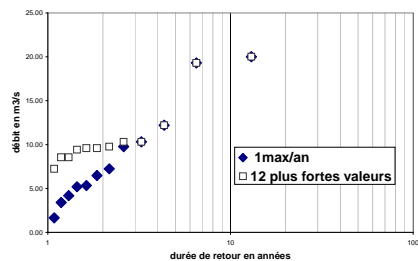
année	laval	1max/an	F=rang/N+1	T
91		1.66	0.08	1.08
88		3.41	0.15	1.18
85		4.19	0.23	1.30
93		5.20	0.31	1.44
89		5.34	0.38	1.63
96		6.48	0.46	1.86
87		7.25	0.54	2.17
95		9.77	0.62	2.60
90		10.31	0.69	3.25
92		12.21	0.77	4.33
86		19.30	0.85	6.50
94		20.00	0.92	13.00

Attention ! Incidence du choix de la formule pour le calcul de la fréquence empirique !

Dans cet exemple, T de la plus forte valeur = 13 à 24 ans selon la formule utilisée...

Les méthodes statistiques (exemple) 38

- Représentation graphique



Comment interpoler et surtout extrapoler ?

Ajustement de « lois » (1) 39

- Toujours représenter points observés et ajustement sur un même graphique pour analyser qualitativement l'ajustement
- Utilisation de l'ajustement manuel dangereuse en extrapolation car trop tributaire des aléas de l'échantillonnage et de certaines valeurs extrêmes, et de plus très subjectif
- Possibilité d'utiliser les tests statistiques pour juger de la qualité des ajustements
- Représenter ou calculer les intervalles de confiance des valeurs estimées.

Ajustement de « lois » 40

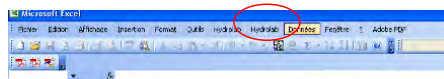
- Utilisation de fonctions de répartition - plus souvent appelées " lois " - dont on a pu constater la cohérence des résultats dans un grand nombre de cas comparables
- exemples de lois utilisées en statistiques de valeurs extrêmes (pluies, crues)
 - Gumbel
 - Exponentielle
 - etc..

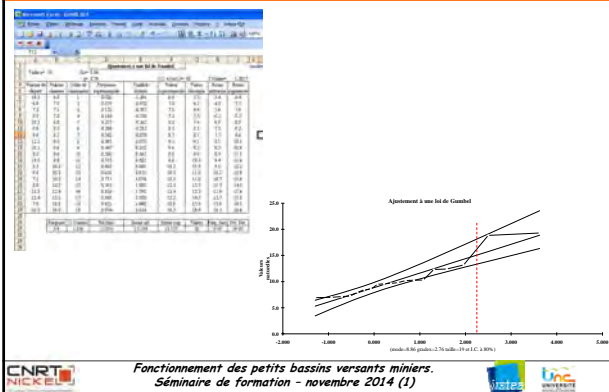
Méthodes statistiques : remarques 41

- Prise en compte des valeurs exceptionnelles :
 - il a pu se produire au cours d'une période d'observation donnée un épisode dont la durée de retour excède largement la durée d'observation : difficulté de choisir une méthode d'ajustement, privilégiant ou non cette forte valeur
- Prise en compte des données historiques :
 - On peut disposer de valeurs de fortes crues, n'appartenant pas à la période d'observation dont on peut estimer la période de retour

Un outil simple pour les ajustements les plus courants : Hydrolab (1) 42

- Jeu de macro-commandes Excel
- Téléchargeable sur internet
- Une fois ouverte la macro-commande Hydrolab.xla, on a un menu supplémentaire dans la barre d'outils d'Excel



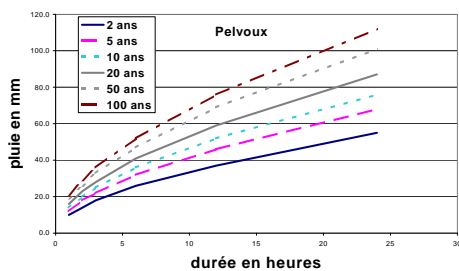


Fonctionnement des petits bassins versants miniers. Séminaire de formation - novembre 2014 (1)

- Donnée utilisée
 - Hauteur de pluie h tombée pendant un pas de temps Dt (année, mois, jour, heure, minute...), exprimée en mm (l/m²)
 - Intensité au cours de ce pas de temps, h/Dt, exprimée en mm/h
 - Attention : une valeur d'intensité doit toujours être associée à la durée sur laquelle elle a été calculée

Fonctionnement des petits bassins versants miniers. Séminaire de formation - novembre 2014 (1)

- Rappel sur les méthodes d'obtention



Fonctionnement des petits bassins versants miniers. Séminaire de formation - novembre 2014 (1)

- Dans le cas général, la relation pluie-durée ou intensité-durée est sensiblement linéaire sur une représentation log-log. On peut alors exprimer la relation par une formule dite "de Montana" :

Attention, "cassure" fréquente pour durées comprises entre quelques minutes et quelques heures

$$P = a \text{ durée}^{1-b}$$

$$I = a \text{ durée}^{-b}$$

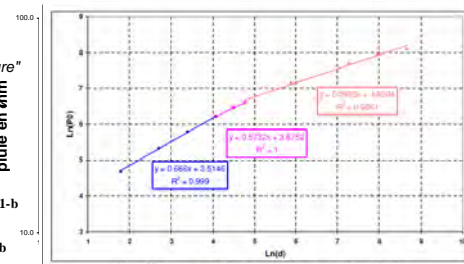


Figure 11 Exemple IDF en fonction de la durée sur la station Tendo. Fonctionnement des petits bassins versants miniers. Séminaire de formation - novembre 2014 (1)

- Rappel : les données que l'on utilise ne sont pas des données de débit mais des données de hauteur d'eau converties en débit par une courbe de tarage
 - Nécessité d'avoir des informations sur la station, son comportement pour les fortes hauteurs d'eau, la stabilité de la section en travers, etc...
 - Nécessité d'avoir des informations sur la courbe de tarage
 - Débit maximum jaugé
 - Stabilité de la courbe de tarage

Méthodes de jaugeage : cf session 2 (cet après-midi)

Fonctionnement des petits bassins versants miniers. Séminaire de formation - novembre 2014 (1)

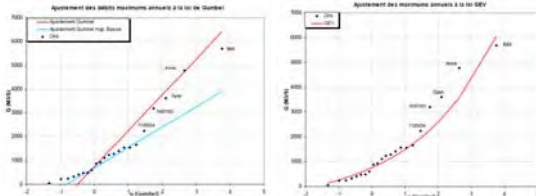
- Méthode
 - Recueillir les données
 - Faire une analyse critique des données disponibles (qualité de la station, durée d'observation, lacunes, courbe de tarage, etc...)
 - Constituer l'échantillon
 - Par exemple pour les crues :
 - 1 (ou plusieurs) maximum(s) par an si durée d'observation courte
 - N valeurs supérieures à un seuil (attention à l'indépendance des événements sélectionnés)
 - Représenter graphiquement la relation Débit/fréquence ou débit/période de retour
 - Ajuster une "loi"

Fonctionnement des petits bassins versants miniers. Séminaire de formation - novembre 2014 (1)

Estimation de crue en site jaugé (2)

49

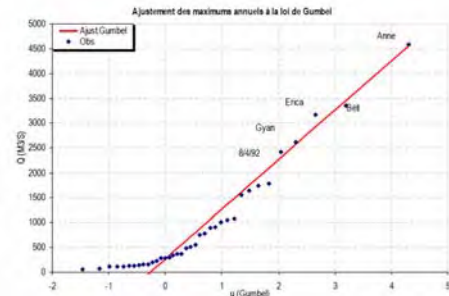
- Méthode (suite)
 - Toujours juger graphiquement de l'échantillon
 - Si N, taille de l'échantillon, > NA, nombre d'années d'observation, corriger la période de retour par N/NA
 - Attention aux extrapolations vers les fréquences rares (au maximum 2 à 3 fois la taille de l'échantillon)



Estimation en site jaugé (3)

50

- Exemple : Tontouta (380 km²)



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (1)

Estimation en site non jaugé

51

- Utilisation de synthèses régionales
 - Cf synthèse Davar
- Utilisation de formules sommaires
 - Méthodes utilisées en métropole : SOCOSE, Crupedix, non calées sur des données calédoniennes
 - Formulations de la Davar

$$Q_{100} = K S^{0.75}$$

K =	
sud	30
ouest	55
est	100
 - Non applicable aux bassins < quelques km²
- Transfert de bassins

Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (1)

Un modèle simple, la méthode rationnelle

52

(Utilise la notion de temps de concentration)

- Fondement de la méthode :
 - la pluie critique sur un bassin de temps de concentration T_c est la pluie de durée égale à T_c
 - le volume total écoulé au cours de la crue est déduit du volume des précipitations affecté d'un coefficient d'écoulement C (fraction des précipitations qui participe au ruissellement)

$$Q = k C I A$$

- Q en m³/s
- C coefficient d'écoulement
- I intensité en mm/h de la pluie de durée T_c
- A superficie du bassin en km²
- k coefficient lié à la forme de l'hydrogramme et aux unités utilisées

k = 1/3.6 avec les unités ci-dessus et un hydrogramme triangulaire symétrique

Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (1)

Utilisation de la méthode rationnelle

53

- Le résultat est directement proportionnel au coefficient d'écoulement choisi
- Nécessité de disposer de données de précipitation sur des pas de temps cohérents avec la taille du bassin
- Le choix du temps de concentration est déterminant pour le résultat

cas 1			cas 2			cas 3		
km ²	surface	5.1	surface	5.1	surface	5.1	surface	5.1
%	pente	24	pente	24	pente	24	pente	24
mn	Tc	75	Tc	75	Tc	44	Tc	44
mm	p10	15.1	p10	15.1	p10	9.2	p10	9.2
mm/h	p100	22.6	p100	22.6	p100	13.8	p100	13.8
mm	I 10	13.1	I 10	13.1	I 10	20.4	I 10	20.4
mm/h	I100	19.6	I100	19.6	I100	30.6	I100	30.6
	C10	0.4	C10	0.4	C10	0.4	C10	0.4
	C100	0.4	C100	0.6	C100	0.6	C100	0.6
m ³ /s	Q10	7.4	Q10	7.4	Q10	11.6	Q10	11.6
m ³ /s	Q100	11.1	Q100	16.7	Q100	26.0	Q100	26.0

Calcul du temps de concentration (1)

54

- Nombreuses formules existantes, basées soit sur des études statistiques, soit sur des schémas de fonctionnement du ruissellement dans le bassin (ruissellement sur les versants puis dans les biefs).
- La plupart ne sont pas adaptées aux petits BV à forte pente. Quelques formules plus adaptées ont été recherchées. Exemples, pour TC en min :

$$\text{Sogreah} \quad T_c = 0.9 \cdot S^{0.35} \cdot C^{-0.35} \left(\frac{\Delta H}{L} \right)^{-0.5}$$

S en km², C coefficient de ruissellement direct, ΔH et L dénivellée et longueur du talweg principal

$$\text{Meunier-Mathys} \quad T_c = \alpha \cdot S^{0.312} \cdot J^{-0.625}$$

α = 145 pour un bassin dénudé à 330 pour un bassin végétalisé
S en km², J pente du bassin en %

Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (1)

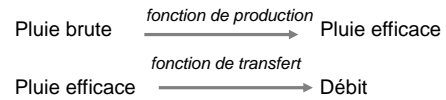
Calcul du temps de concentration (2) 55

- Méthode Davar
 - Identification du chemin hydraulique le plus long
 - Découpage par classes de pente
 - Application de vitesses moyennes de transfert
 - Exemple :
 - Tronçon de pente < 5%, 1 m/s
 - Tronçon de pente comprise entre 5 et 15%, 2 m/s
 - Tronçon de pente supérieure à 15%, 4 m/s

- Application à Poro (cf session 2, cet après-midi)

Les modèles pluie-débit 56

- Modèle = représentation simplifiée du phénomène réel de la transformation de la pluie que reçoit le bassin en débit à l'exutoire
- En général, associe une fonction de production et une fonction de transfert :



Les modèles pluie-débit 57

- En principe 3 phases
1. calage des paramètres à partir de couples averses-crues observés
 2. validation sur des épisodes n'ayant pas servi au calage
 3. utilisation en prédétermination en simulant des épisodes pluvieux et/ou des conditions initiales différents, réels ou reconstitués

Références 58

- Ouvrages
 - Audinet M. (1995) Hydrométrie appliquée aux cours d'eau, Eyrolles, Paris, 480 p.
 - Cosandey C., Robinson M., 2000, Hydrologie Continentale, Armand Colin, 360 p.
 - Hingray B., Picouet V., Musy A., 2009. Hydrologie, Une Science pour l'ingénieur. Polytechniques et Universitaires Romanes, Lausanne. 600 p.
 - Lang M., Lavabre J., 2007. Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondation. Quae Editions, 232 p.
 - Musy A., Higy C., 2004. Hydrologie. Vol 1. Une Science de la nature. Presses Polytechniques et Universitaires Romanes, Lausanne. 314 p
- Sites internet et ouvrages en ligne
 - <http://hydrologie.org/BIB/man.htm>
 - <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/>
 - http://hydrologie.org/BIB/manuels/Laborde_2009.pdf
 - http://www.davar.gouv.nc/portal/page/portal/davar/ressource_en_eau





Fonctionnement des petits-bassins versants miniers




Séminaire de formation
 (2) Fonctionnement hydro-sédimentaire
 des petits bassins versants miniers
 3 novembre 2014
 Nicolle Mathys
 Iristea Grenoble

1

2

Contexte et objectifs (1)



- Mines de nickel à ciel ouvert
 - Forts impacts environnementaux, notamment sur les cours d'eau
 - Modifications du régime des eaux
 - Augmentation du transport solide
 - Charriage de matériaux grossiers lors des fortes crues
 - Creeks engravés à l'aval des sites miniers
 - Augmentation du transport en suspension "eaux rouges"
- Politique de réduction des impacts
 - Arrêt des déversements de stériles et mises en verse
 - Amélioration de la gestion des eaux sur mine (PGE)
- Mais : manque de données permettant de dimensionner les ouvrages de protection








3

Projet Hydromine

- Début du programme: 7 juin 2007
- Acteurs: DAVAR / UNC / CFTMC / DIMENC
- Site d'étude: Mine française de Poro
- Objectif: Comprendre le fonctionnement des petits bassins versants miniers
- Début des mesures en fin 2008







4

Projet CNRT




- Fonctionnement des Petits Bassins versants miniers
 - 4 ans, juillet 2010 à juin 2014
 - Partenaires : UNC, Iristea (ex Cemagref), IRD Nouméa, Université de la Réunion, Météo-France, A2EP
- Objectifs
 - améliorer la compréhension des mécanismes de fonctionnement des petits bassins versants miniers
 - quantifier les flux liquides et solides dans différents contextes géo-morpho-climatiques des sites miniers de Calédonie
- Moyens
 - Poursuite du suivi et interprétation des données du site de Poro
 - Instrumentation et suivi de petits bassins versants de plusieurs compagnies minières (sur la base du volontariat)

5

Projets Hydromine et CNRT




- Questions posées
 - Quels sont les flux d'eau et de sédiments en provenance des bassins miniers ?
 - Quelle est la réponse d'un bassin minier à un épisode pluvieux, notamment cyclonique ?
 - Quels sont les processus en jeu ? Lesquels sont dominants dans les différentes situations hydrométéorologiques ?
 - Quels sont les facteurs qui contrôlent ces réponses ?
 - Peut-on proposer des modèles de prédiction des flux sédimentaires en fonction des conditions climatiques et des états de surface des bassins ?
 -

6

Suivi hydro-sédimentaire des BV miniers

- Paramètres ciblés
 - temps de concentration
 - coefficients d'écoulement
 - débits de pointe
 - gammes de concentration en MES
 - variabilité des concentrations en MES
 - flux solide (échelle de l'épisode et échelle annuelle)
 - relations entre ces paramètres et des paramètres hydrologiques simples (modèles)

Besoins en instrumentation

7

- Connaître les précipitations
 - Disposer d'un ou plusieurs pluviographes représentatifs de la pluie sur le bassin
- Connaître les débits liquides à l'exutoire
 - Section de mesure des hauteurs d'eau (naturelle ou seuil ou canal de mesure)
 - Mesure des hauteurs (limnigraphe)
 - Connaissance de la relation hauteur/débit (jaugeages)
- Connaître les charges en sédiments fins
 - Échantillonnage des concentrations
 - Calcul des flux



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



Mesure des débits liquides

8

- Section de contrôle
 - Section naturelle
 - Attention à la stabilité de la section, sa configuration en plan et en profil en long
 - Section « artificielle »
 - Seuil en V (mais adapté aux petits débits seulement)
 - Seuils rectangulaires ou composites
 - Canaux jaugeurs
- Mesure des hauteurs d'eau
 - Limnigraphes de différents types
 - Capteurs de pression, Ultra-sons, radars, capacitifs, etc
 - Centrales d'acquisition
- Etablissement de la relation hauteur/débit (courbe de tarage)
 - Relation théorique (canaux normalisés)
 - Modèle hydraulique
 - Jaugeages



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



Mesure des concentrations

9

- Échantillonnage automatique en cours de crue
 - Programme pertinent d'échantillonnage
 - Relevé des flacons après crue
 - Détermination de la teneur en MES (pesée-séchage)
- Suivi en continu avec un turbidimètre
 - Problème de la saturation du capteur
 - Relation turbidité/concentration
 - Ne dispense pas de réaliser un échantillonnage
- Calcul des flux
 - Disposer d'une chronique des débits et de valeurs de concentration en nombre suffisant
 - Estimer les concentrations en chaque point de l'hydrogramme



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



Equipement type d'un petit BV minier

10

- Un (ou plusieurs) pluviomètre enregistreur
- Une station de jaugeage
 - Une section de mesure (canal ou seuil de préférence)
 - Un (au moins) limnigraphe avec enregistreur
 - Un préleveur d'échantillon, programmable
- Des outils de jaugeage
 - Moulinet
 - Doppler
 - ADCP
 - Radar de vitesse de surface
 - Flotteurs et chronomètre
 -
- Autres mesures/équipements possibles/souhaitables
 - Turbidimètre en continu
 - Transmission GSM



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



Mesure des précipitations

11

- Un ou plusieurs pluviomètres enregistreurs
- Choix de la répartition spatiale
- Précautions de mise en place
 - sensibilité au vent
 - horizontalité
 - obstacles
- Entretien et gestion des appareils
- Intérêt de données de contrôle
 - Contrôle "au seuil"
 - Pluviomètres totalisateurs
 - Tarage des augets (statique, dynamique)
- Exemple de matériels

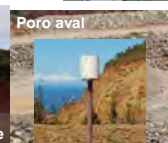


Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



Pluviographes

12



Recommandation Davar : augets de 0.5 mm (meilleur suivi des fortes intensités)






Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



13

Mesure des hauteurs d'eau


- Rappel sur le choix de la section de contrôle
- En BV minier, privilégier les sections aménagées et les canaux calibrés
- Deux objectifs souvent contradictoires
 - Mesure des faibles débits
 - Mesure des débits de crue
- Sections composites ou doublement des sections de mesure
- Aménager l'approche et l'entonnement
- Imaginer les plus hautes eaux et aménager la section pour que les éventuels débordements restent dans une section de géométrie connue





 Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
 Séminaire de formation - novembre 2014 (2)
 


14

Sections de contrôle

- En milieu naturel
- Goro, Kué




 Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
 Séminaire de formation - novembre 2014 (2)
 


15

Sections de contrôle

- Sections "naturelles"
- Koniambo, Coco




 Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
 Séminaire de formation - novembre 2014 (2)
 


16

Sections de contrôle

- Sections naturelles
- Poro ("chez Aubry")




 Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
 Séminaire de formation - novembre 2014 (2)
 


17

Sections de contrôle

- Naturelles
- Koniambo, Coco intermédiaire




 Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
 Séminaire de formation - novembre 2014 (2)
 


18

Sections de Contrôle : Canaux, seuils et flumes

- Poro aval




 Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
 Séminaire de formation - novembre 2014 (2)
 


Sections de Contrôle : Canaux, seuils et flumes 19

- Poro amont

*Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)*

CNRT NICKEL | GISTES | UNIC UNIVERSITÉ DE CÔTE D'IVOIRE

Sections de Contrôle : Canaux, seuils et flumes 20

- Poug

*Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)*

CNRT NICKEL | GISTES | UNIC UNIVERSITÉ DE CÔTE D'IVOIRE

Sections de Contrôle : Canaux, seuils et flumes 21

- Koniambo

*Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)*

CNRT NICKEL | GISTES | UNIC UNIVERSITÉ DE CÔTE D'IVOIRE

Sections de Contrôle : Canaux, seuils et flumes 22

- Goro

*Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)*

CNRT NICKEL | GISTES | UNIC UNIVERSITÉ DE CÔTE D'IVOIRE

Sections de Contrôle : Canaux, seuils et flumes 23

- ORE Draix (France), jaugeurs Parshall

*Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)*

CNRT NICKEL | GISTES | UNIC UNIVERSITÉ DE CÔTE D'IVOIRE

Sections de Contrôle : Canaux, seuils et flumes 24

*Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)*

CNRT NICKEL | GISTES | UNIC UNIVERSITÉ DE CÔTE D'IVOIRE

Capteurs de hauteur d'eau

25

- Flotteur
- Capteur de pression
- US
- radars



Enregistrement des données

26

- Centrales de mesure
 - Indépendantes
 - Intégrées au capteur
- Pas de temps d'acquisition
- Transmissions GSM
- Cas particulier des ISCO 6712
 - Assure le rôle de centrale de mesure



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



"station type" CNRT

27

- Canal de mesure ou seuil
- Echelle à lecture directe
- Prélèveur d'échantillon (ex : Isco 6712)
- Capteur pour mesure des hauteurs et déclenchement des prélèvements (ex : module 720 Isco)
- De préférence, mesure des hauteurs doublée par un autre capteur (actuellement, souvent In-Situ)
- Centrale de mesure (Data Logger)
- Alimentation électrique (en général batterie + panneau solaire)
- Capteur de mesure des vitesses (ex : module 750 d'ISCO)
- En option, turbidimètre (mais attention à la Cmax mesurée) et déclenchement sur la turbidité
 - 1000 NTU ~ 2-3 g/l
 - En test à Poro, turbidimètre WTW



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



Schéma de Station Type

28

- Poro aval



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



Relation hauteur/débit : courbe de tarage

29

- Sections naturelles
 - relevé topographique précis du tronçon de cours d'eau et modélisation de l'écoulement
- Sections artificielles
 - Canaux façonnés sur place : idem
 - Canaux calibrés : veiller au respect des conditions d'implantation, notamment pentes, entonnement, position de la section normalisée pour la mesure des hauteurs
- **Dans tous les cas, nécessité de contrôler la courbe de tarage théorique par des jaugeages**



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



Méthodes de jaugeage

30

- Exploration du champ de vitesses
 - Moulinet
 - Moulinet électromagnétique
 - ADCP
- Jaugeage par dilution (sel ou colorants)
 - Injection unique
 - Injection à débit constant
- Jaugeages en crue
 - Rapidité des crues sur petits BV miniers
 - Privilégier des mesures sommaires mais fréquentes
 - Méthode des flotteurs
 - Mesures radar
 - Prises de vue par caméra
 - Horaires et lectures d'échelle



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



Vidéos

31

- Essais Poro



Aval



Amont

Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)

Mesure des MES

32

- Préleveurs d'échantillons
- Problèmes
 - Nombre limité de flacons
 - Position de la crépine
- Différents types d'asservissement
 - Au débit (à la hauteur d'eau)
 - A la concentration
 - Combinaisons hauteur/temps
- Protocole de prise d'échantillons manuels



Coûts contenant l'ISCO. Préleveur ISCO protégé par un capot. Récupération du filtrat journal.

Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)

Stratégies d'échantillonnage

33

- A choisir en fonction de l'objectif
 - Quantification globale des flux
 - Alertes sur les Cmax
 - Compréhension des phénomènes
- Exemples des programmes 6712 de Poro
 - 24 flacons
 - 18 sont réservés aux hauteurs "normales"
 - Seuils de hauteur en montée ou en descente
 - 6 sont réservés aux hauteurs exceptionnelles
 - Même principe pour les seuils
- Autres possibilités de programmation
 - Draix : seuil initial sur les hauteurs + seuils sur les variations de hauteur ou de temps
- Nécessité de tester sur des chroniques les programmes des préleveurs

PROG	HAUT	SEUIL	DEBUT	DUREE	FIN
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
16	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
18	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
21	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
22	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
23	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)

Recueil et critique des données

34

- Recueil sur le terrain
 - Périodicité (après changement de matériel augmenter la fréquence pendant quelque temps)
 - Davar : Stratégie de doubler les sondes ou transmission GSM
 - Plannings adaptables
 - La fiche de terrain
 - Station limnigraphique : toujours noter la hauteur à l'échelle lors du passage et l'heure
- Entretien in situ
 - Pluviomètres
 - Sections de mesures
 - Capteurs
 - Matériel de secours

cf plan qualité, fiches types, etc...voir contribution A2EP au projet CNRT (A2EP)

Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)

Archivage et critique des données

35

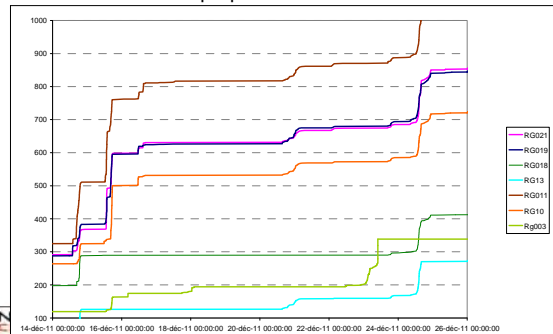
- Archivage de toutes les données brutes et des fiches de terrain
- Traçabilité de la critique
- Quelques exemples de critique des données
 - Pluie
 - Débits
- Repérages des lacunes
 - Périodes (début, fin)
 - Type de lacune (panne d'appareil ou invalidation de la donnée)

Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)

Critique des données de pluie

36

- Si plusieurs pluviographes, toujours visualiser les données en les superposant



Critique des données de débit

37

- Visualisation de la chronique et report des mesures d'échelle
- Selon le pas d'acquisition et le type de capteur, nécessité de traiter le signal pour s'abstraire du bruit
 - Moyennes glissantes (lissage)
 - Seuils de rangements
- Visualiser la chronique des précipitations en face
- Zoom sur les épisodes de crue et repérage des anomalies des variations de niveau (influence aval d'un ouvrage ou d'une embâcle, colmatage de la liaison d'un puits, bouchage d'une prise de pression...)



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



Données de MES

38

- Gamme des concentrations mesurées
 - Poro : < 1 mg/l – 28 g/l
 - Poum : < 1 mg/l – 8 g/l
 - Koniambo : < 1 mg/l – 42 g/l
- Etendue de mesure des turbidimètres classiques
 - 1000 NTU ~ 2 à 4 g/l
- Turbidimètre WTW (50-100g/l),
- OBS (environ 50g/l voire plus)
- Evolution des concentrations au cours du temps
 - Relation débit-concentration non univoque
 - Variabilité d'une crue à l'autre et à l'intérieur d'une même crue

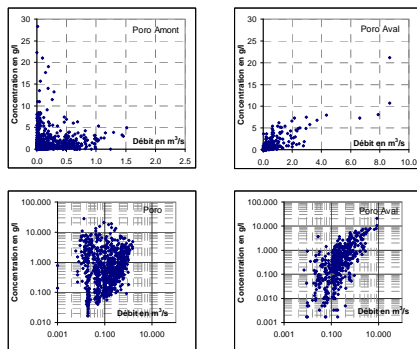


Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



Relations concentration-débit Poro

39



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



Evolution des concentrations

40

- Au cours d'une crue
- Phénomène d'hystérésis très fréquent

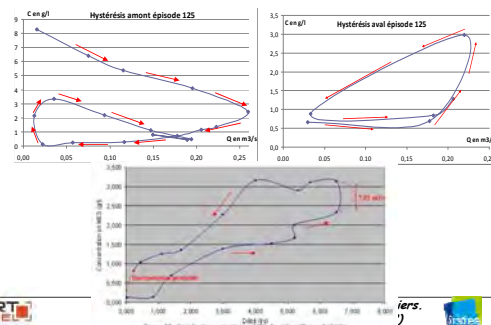


Figure 27 - Graphes C concentration en MES, des hydrogrammes - 1 (d'après...)



Calcul des flux

41

- Calcul du flux à l'échelle de l'épisode de crue
- Problème : nombre limité d'échantillons. Il faut donc estimer la concentration aux différents points de l'hydrogramme qui n'ont pas été échantillonnés
 - Utilisation de la relation Concentration-débit
 - Utilisation de la relation concentration = f(temps)
- Il est parfois nécessaire de tester différentes interpolations pour juger de l'incertitude du calcul



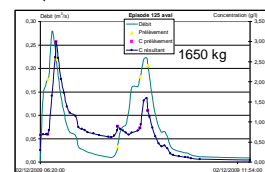
Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



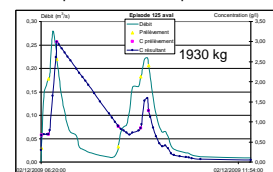
Calcul des flux, interpolations, exemple

42

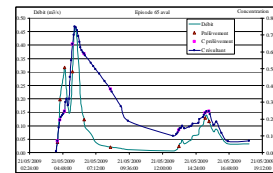
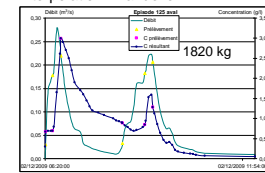
Proportionnel au débit



Proportionnel au temps



Interpolation "manuelle"



Rôle des décanteurs

43

- Rôle principal : permettre la décantation des MES
- Volume
- Temps de séjour
- Surverse et vidange
- Rôle "écrêteur" ?



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



Décanteur de Poro

44

- Volume 3500 m³
- Surface 940 m²
- Volume 2h/2ans : 10800 m³
- Crue du 24 décembre 2011
 - Volume cumulé de la crue : 36 000 à Poro amont
 - Volume cumulé BV décanteur : 52 000 m³
 - Volume de 3500 m³ atteint en 1h
 - Volume de 10800 m³ atteint en 8h, 1h avant le pic de crue

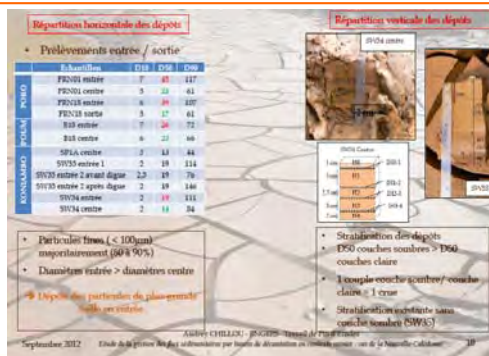


Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



Granulométrie des dépôts

45



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



Décanteurs, quelques éléments de conclusion

46

- Décanteurs efficaces en conditions non déversantes (clarification des eaux en moins de 24h)
- Dans de nombreux cas, volumes insuffisants pour rester en conditions non déversantes
- Manque de données entrée-sortie
- Espace disponible = facteur limitant
- Bassins ne se vidant pas entre les crues, ce qui limite leur efficacité → intérêt de vidange des eaux "claires" entre deux épisodes successifs
- Rétention efficace des volumes liquides des faibles crues
- Pas ou très peu de laminage des crues pour les événements forts

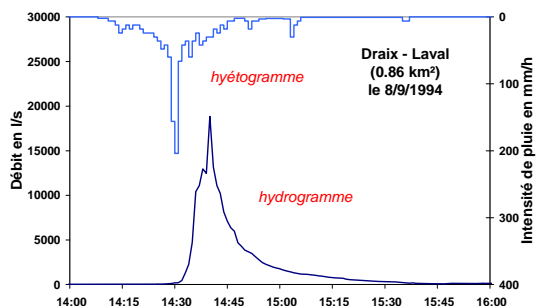


Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



Exemple de graphe pluie-débit

47



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)



Quelques temps caractéristiques

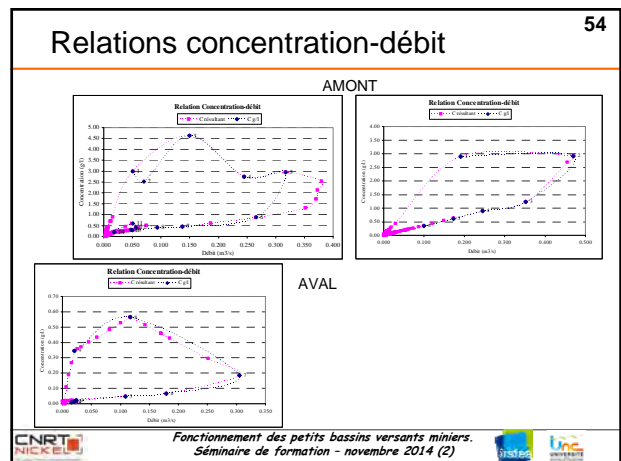
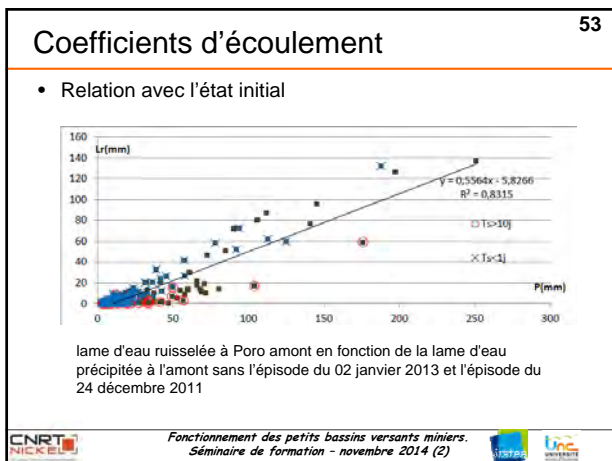
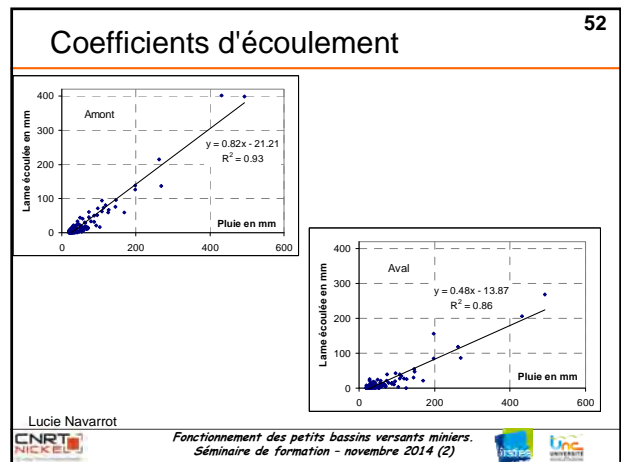
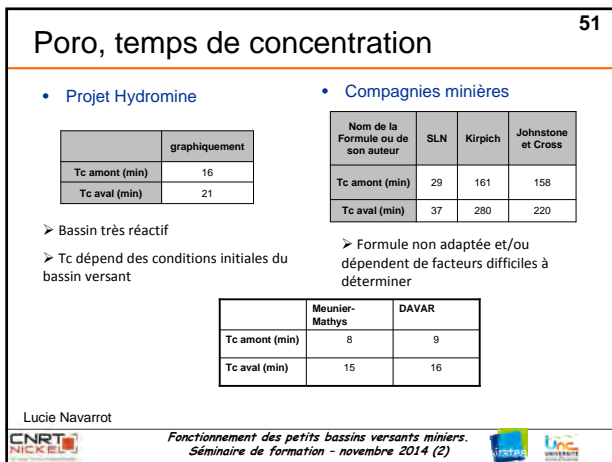
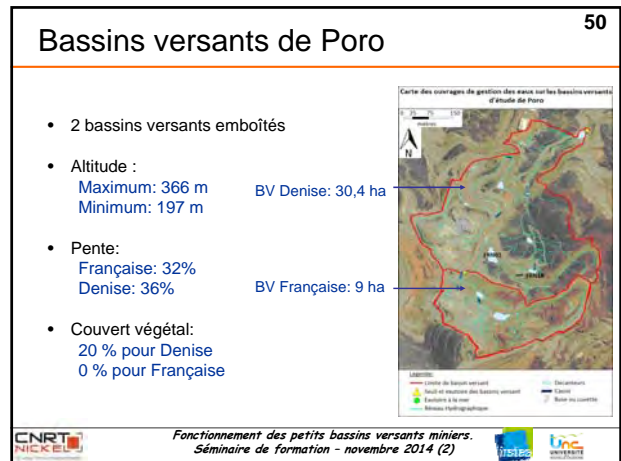
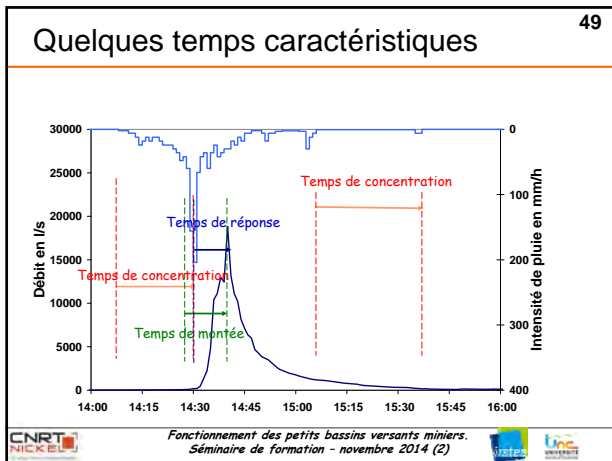
48

- Temps de concentration : temps que met le ruissellement issu du point le plus éloigné du bassin pour parvenir à l'exutoire
- Temps de montée : durée de la branche ascendante de l'hydrogramme
- Temps de réponse : temps écoulé entre le centre de gravité d'une averse et celui de la crue résultante
- Temps de base : durée totale du ruissellement



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)





55 Estimation des flux de MES

- Différentes échelles de temps

Épisode avec valeurs de MES

NON → Modèle non linéaire à une ou plusieurs variables

OUI ↓ Détermination des concentrations au pas de temps non échantillonné

↓ Détermination flux de l'épisode

↓ Détermination flux mensuel, annuel

Lucie Navarrot

Fonctionnement des petits bassins versants miniers. Séminaire de formation - novembre 2014 (2)

56 Détermination des flux pour épisodes prélevés

➤ Effet « first flush »

Débit et concentration en fonction du temps

Lucie Navarrot

Fonctionnement des petits bassins versants miniers. Séminaire de formation - novembre 2014 (2)

57 Estimation des flux : Flux = f(Qmax)

Flux amont = f(Qmax amont)

Flux aval = f(Qmax aval)

Lucie Navarrot

Fonctionnement des petits bassins versants miniers. Séminaire de formation - novembre 2014 (2)

58 Bilan des flux

➤ Flux très variable selon les années

année	Poro Amont			Poro Aval		
	mesuré	Complété modèle	Qmax	mesuré	Complété modèle	Qmax
2009	59	77	76%	47	80	59%
2010	14	19	72%	8	15	53%
2011	42	44	97%	61	76	81%
2012	120	121	99%	537	553	97%
2012 sans 261	30	31	95%	87	103	84%
2013	94	98	97%	149	200	75%
total	329	359	92%	803	924	87%

➤ Flux événements prélevés: 87% à 92% du flux total

➤ Flux par classes de pluie: Épisode forts: 75(amont) à 90% (aval)

➤ Episodes de décembre 2011 : 100 t soit 25% du flux total (amont)

➤ 450 t soit 50 % du flux total (aval)

Lucie Navarrot

Fonctionnement des petits bassins versants miniers. Séminaire de formation - novembre 2014 (2)

59 Granulométrie

Lucie Navarrot

Fonctionnement des petits bassins versants miniers. Séminaire de formation - novembre 2014 (2)

60 Conclusions

- Formation des crues et transport solide en bassin minier
 - Phénomène complexe, soumis à de nombreux facteurs
 - Effets de seuil
 - Incidence des conditions initiales
 - Importance des ouvrages de gestion des eaux et de leur entretien
- Suivi hydrosédimentaire des BV miniers
 - Suivi nécessaire dans la durée (variabilité des réponses)
 - Canaux de mesure souhaitables
 - Rigueur dans l'installation et le suivi
 - Réactivité des équipes sur place
 - Critique rapide des données après leur obtention
 - Archivage des données brutes et validées

Lucie Navarrot

Fonctionnement des petits bassins versants miniers. Séminaire de formation - novembre 2014 (2)

Remerciements

61

- Michel Allenbach, Dominique Cluzel et l'équipe du PPME
- Bernard Robineau, CNRT
- Geoffroy Wotting (Davar)
- Stagiaires Hydromine (Laureen Carpentier, Lucie Navarrot, Perrine Freydier) et CNRT (Pierre-Eric Alloin, Antoine Guyonneau, Alexandre Motto, Audrey Chillou)
- Nordan Bernast, Paul Nguyen, Nicolas Romieux (DAVAR)
- Le personnel du CFTMC de Poro
- Les ingénieurs et techniciens des compagnies minières partenaires du projet CNRT
- Didier Richard, Alain Recking, Sébastien Klotz (Irstea)
- Et bien d'autres...



*Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - novembre 2014 (2)*



Séminaire sur l'hydraulique et le transport solide torrentiels, Nouméa, UNC, vendredi 28 novembre 2014

Programme prévisionnel

Intervenant : Didier RICHARD, Ingénieur en Chef des Ponts, des Eaux et des Forêts, Directeur de l'Unité de Recherche ETNA (érosion torrentielle, neige et avalanches), Irstea Grenoble

Projet de programme :

- Rappels - définitions :
 - notion de risque, risque torrentiel, bassin versant, torrent, rivière torrentielle,...
 - Principales caractéristiques et spécificités des cours d'eau torrentiels
- Conséquences pour les écoulements et l'hydraulique torrentielle
 - Typologie des écoulements et des transports solides torrentiels
- Charriage torrentiel
 - Principales caractéristiques
 - Rappels :
 - Granulométrie : caractérisation, mesure, tri granulométrique
 - Notion de capacité de transport
 - Contrainte de cisaillement
 - Seuil de transport
 - Principe de l'équilibre
 - Formules de transport solide par charriage
 - Présentation des formules principales
 - Influence de divers paramètres
 - Limites
- Laves torrentielles
 - Principales caractéristiques
 - Evaluation des volumes
 - Principes de modélisation
 - Notion de loi de comportement – rhéologie
 - Formules hydrauliques en régime permanent
 - Utilisation en modélisation
 - Essai de typologie
- Principes de correction torrentielle

Organisation matérielle

Lieu : Université de la Nouvelle-Calédonie, salle E4

Horaires : Vendredi 28 novembre 2014

08h30 - 09h00 : Accueil des participants

09h00 - 12h00 : Session 1

12h00 – 13h30 : pause déjeuner

13h30 – 17h00 : session 2

Fonctionnement des petits-bassins versants miniers

Séminaire de formation
Hydraulique torrentielle - Transport solide

28 novembre 2014

Didier RICHARD


Irstea Grenoble

Plan

- Rappels - définitions - terminologie
- Typologie des écoulements et des transports solides à fortes pentes
- Charriage torrentiel
 - Principales caractéristiques
 - Notion de capacité de transport
 - Principe de l'équilibre
 - Formules de transport solide par charriage
- Laves torrentielles
 - Principales caractéristiques
 - Evaluation des volumes
 - Notion de loi de comportement – rhéologie
 - Lois hydrauliques
- Principes de correction torrentielle

Plan

- Rappels - définitions - terminologie
- Typologie des écoulements et des transports solides à fortes pentes

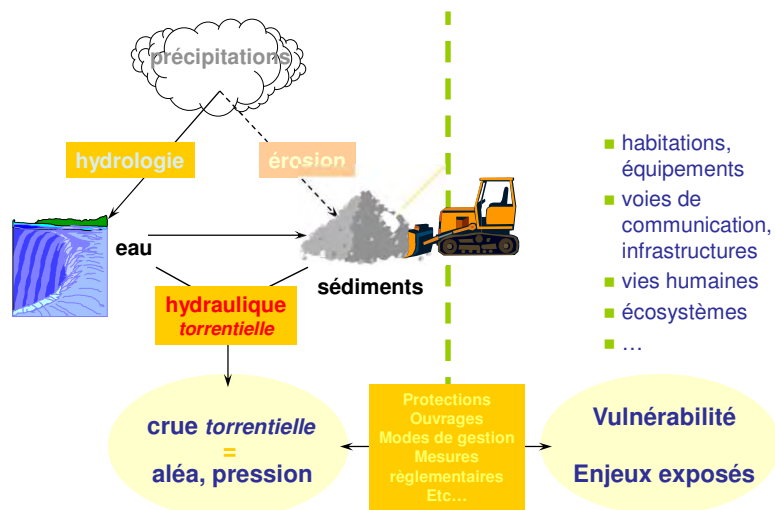

=
à transposer au contexte minier

»

Notion de loi de comportement – rhéologie
Lois hydrauliques

- Principes de correction torrentielle

Le transport solide au cœur du risque

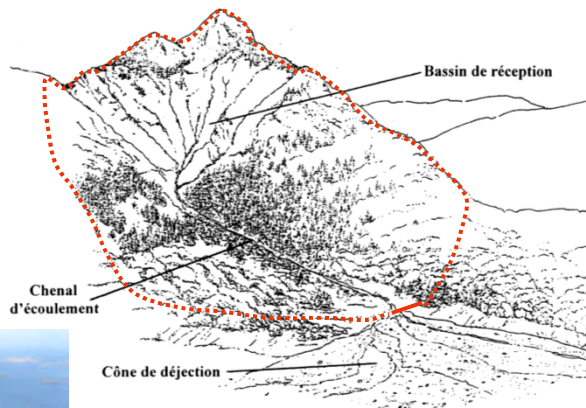


Bassin versant

Définition

En un point donné d'un cours d'eau, le *bassin versant* est la surface drainée par ce cours d'eau et tous ses affluents, en amont de ce point

Parfois, le bassin versant topographique est différent du bassin versant réel.



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



Torrent (creek) - définition

- « cours d'eau de montagne, rapide et irrégulier, de faible longueur, plus ou moins à sec entre des crues violentes et brusques »
source : petit Larousse illustré

Pente : (ordres de grandeurs)	■	→	inférieure à 1 % rivière
	■	→	comprise entre 1 et 6 % rivière torrentielle
	■	→	supérieure à 6 % torrent

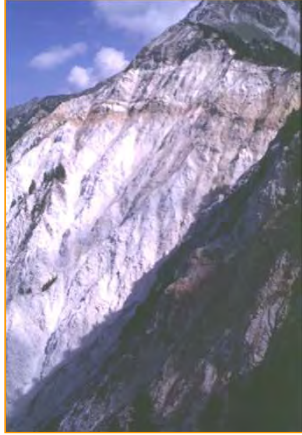
Différents modes de transport solide



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



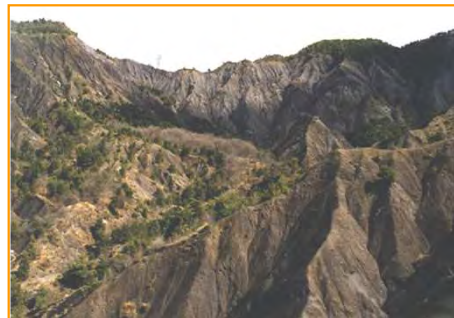
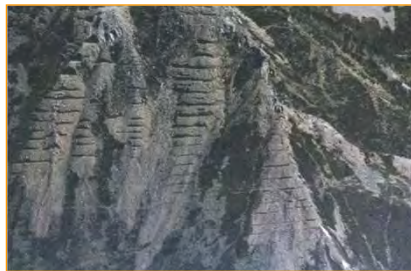
fortes pentes...



*Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014*



... sols fragiles...



*Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014*



... processus nombreux...

Sur les versants

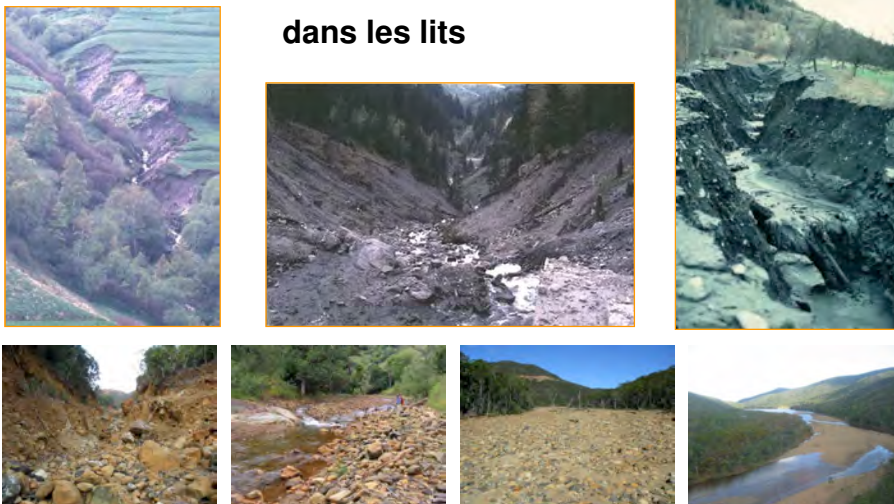


Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



... processus nombreux...

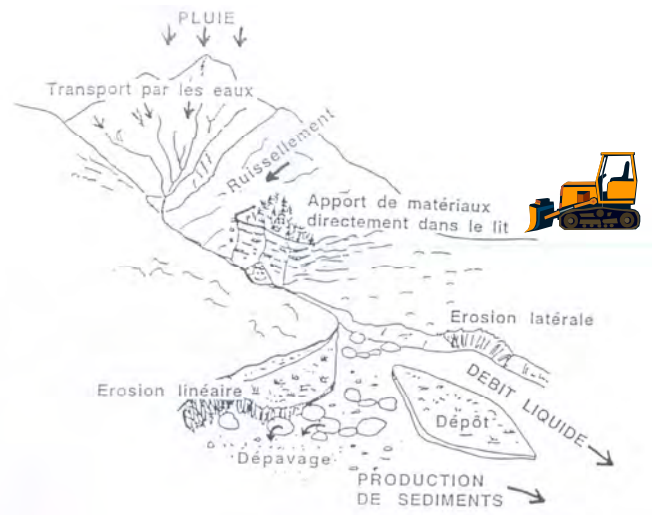
dans les lits



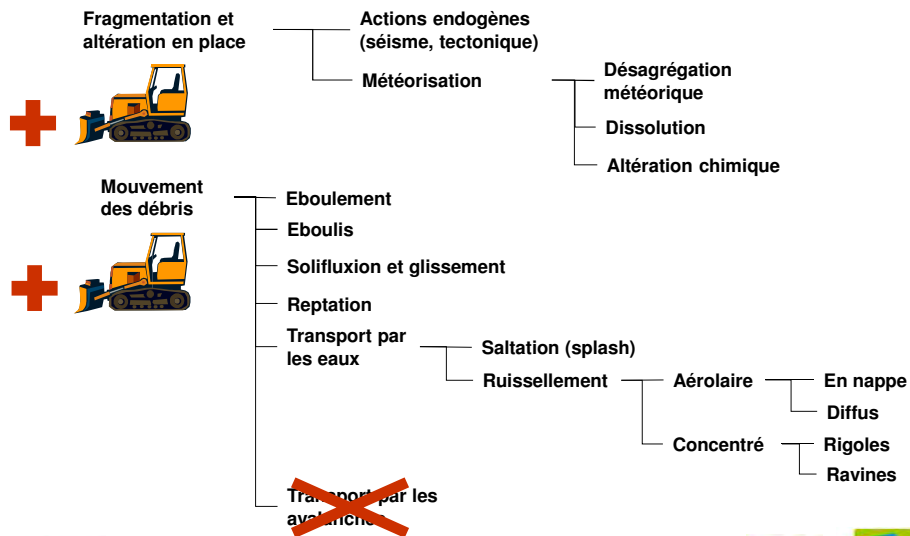
Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



... processus nombreux...



les processus d'érosion sur les versants montagneux



... crues soudaines et violentes



t_0

Source : Analyse des causes des crues de l'année 1987 (Office fédéral de l'économie des eaux ; Service hydrologique et géologique national - Suisse - Mai 1991)
Photos : T. Venzin, Truns

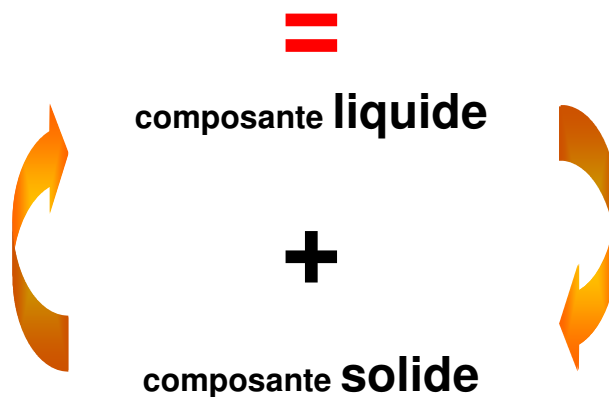
$t_0 + 8'$



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



Ecoulement torrentiel



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



Conséquences sur les écoulements

- Importance des interactions liquide - solide
- Hydraulique classique inopérante
 - ➔ nature du fluide
 - ➔ relations hauteur - débit
 - ➔ lois d'écoulement
- Manifestations transitoires



➔ Changements morphologiques



➡ Dégâts particuliers

urbanisation



tissu socio-économique ...



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



➡ Dégâts particuliers

voies de communication

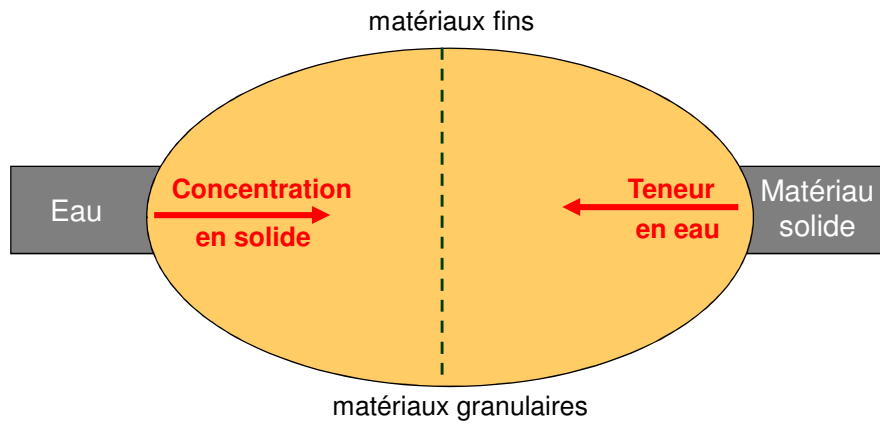
ou pire...



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014

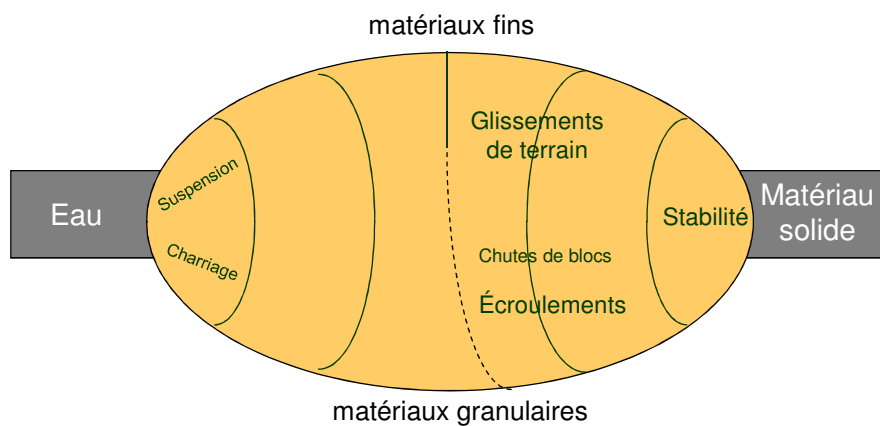


Les écoulements torrentiels



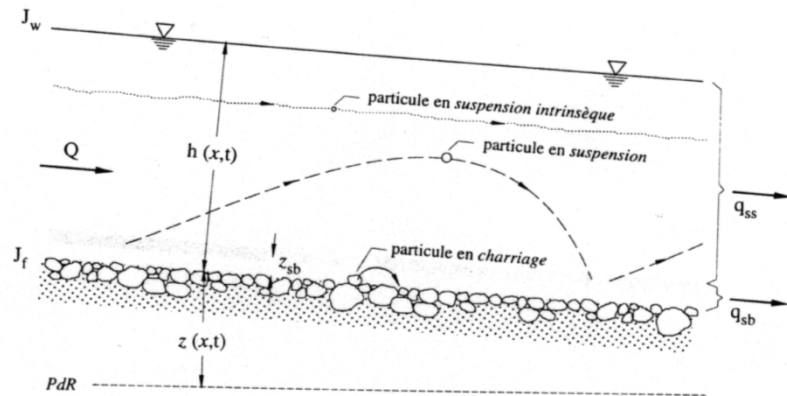
(d'après Meunier, 1991)

Les écoulements torrentiels



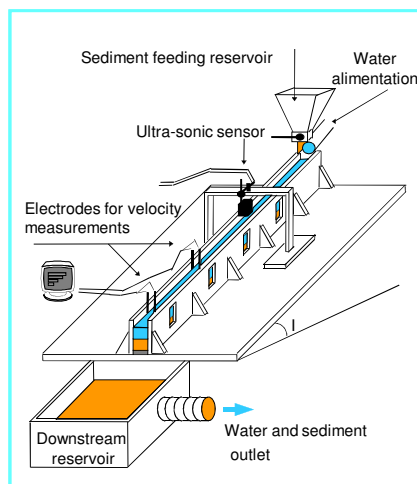
(d'après Meunier, 1991)

Charriage et suspension

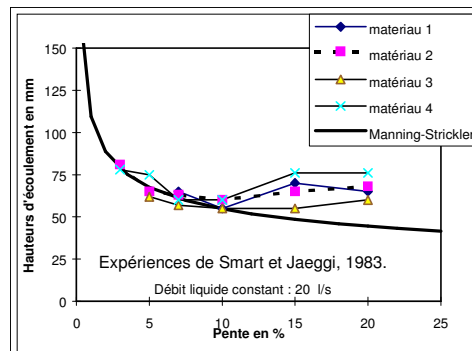


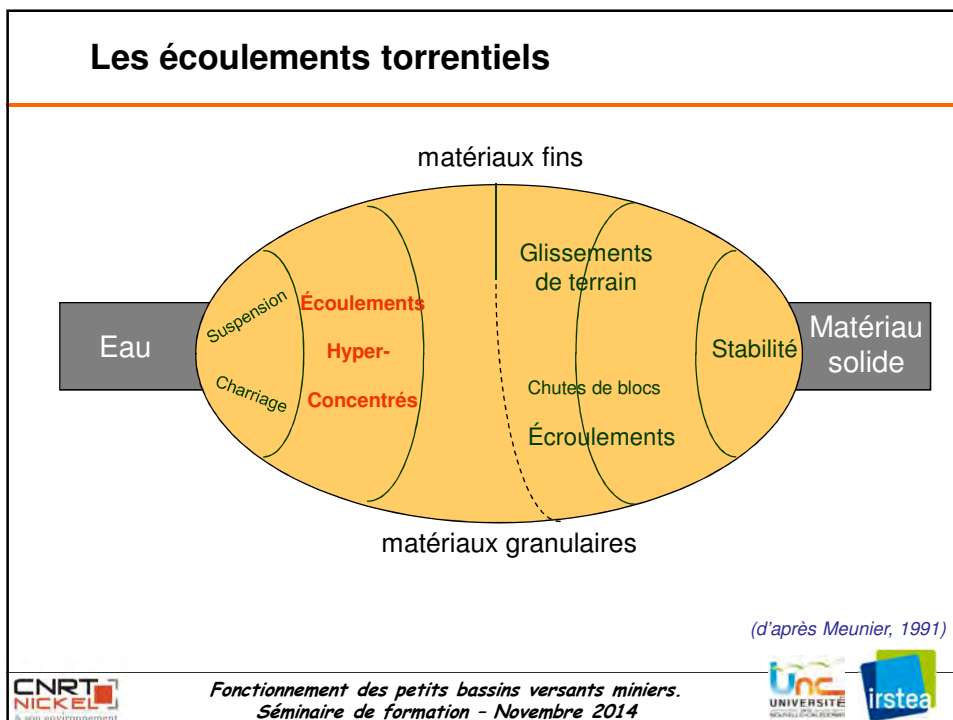
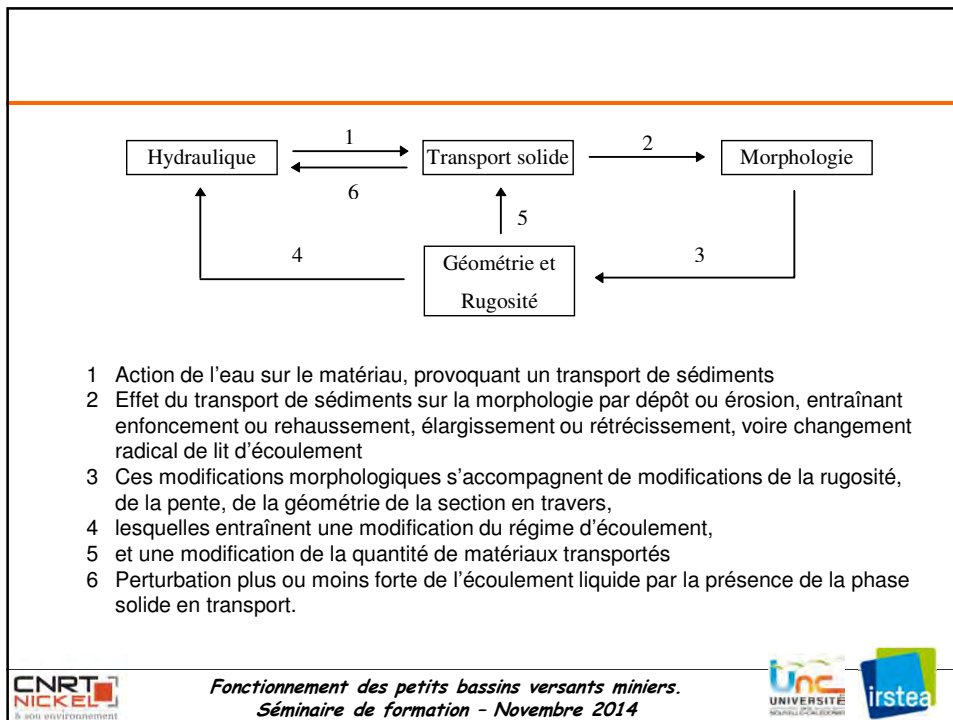
Source : Graf et Altinakar ; 1996

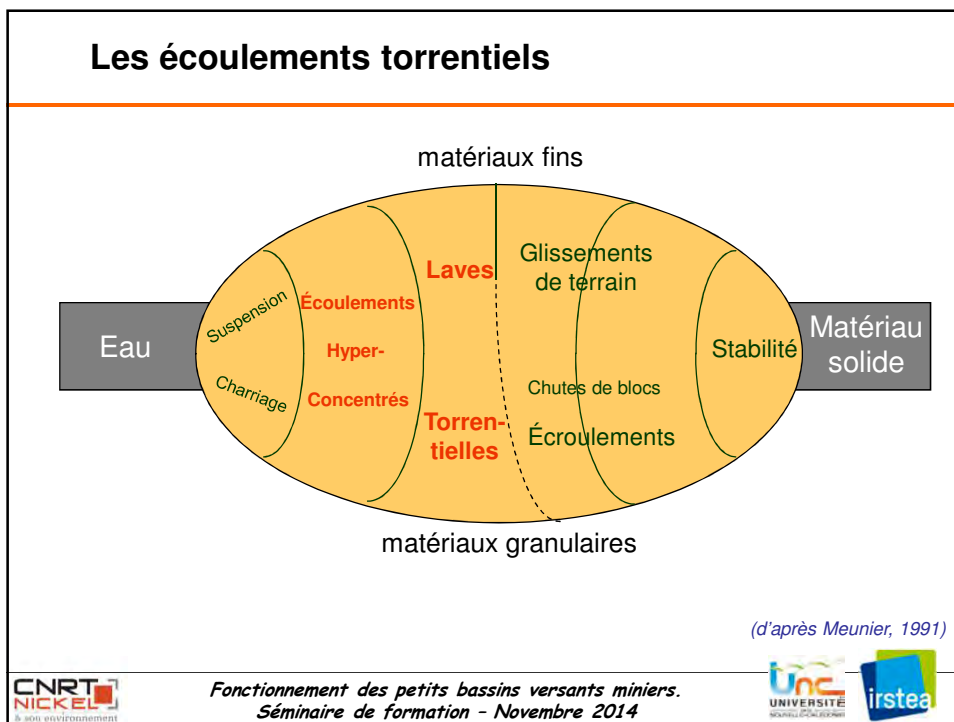
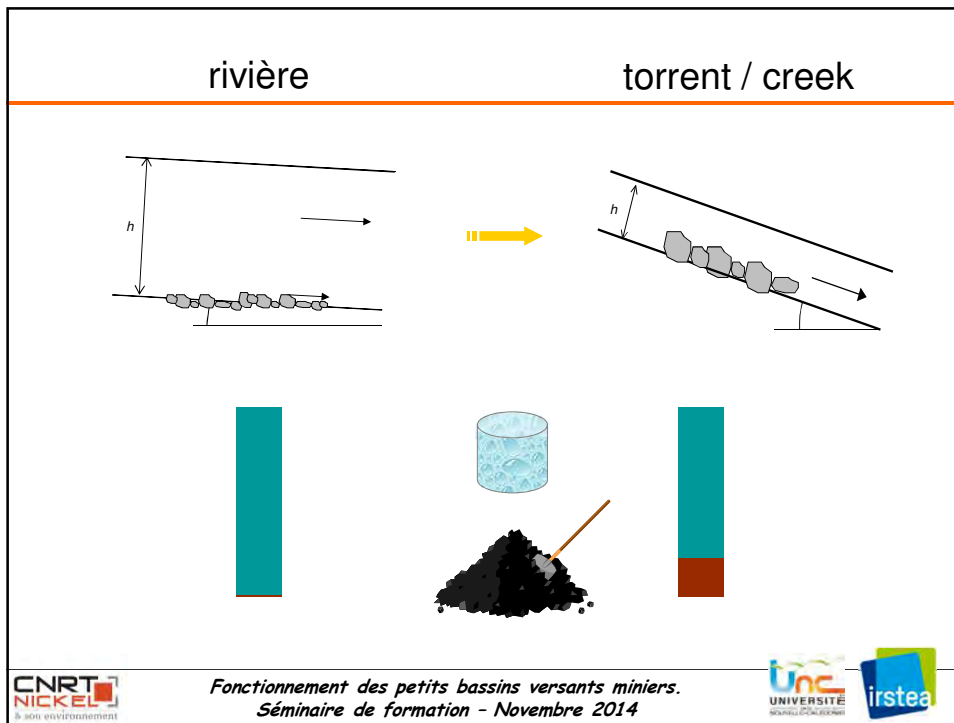
Interactions entre phase liquide et phase solide



illustration







Charriage torrentiel / Charriage en rivière :

- Concentration solide forte / faible
- Granulométrie étendue / resserrée
- Interactions avec le lit fortes / faibles

Charriage torrentiel / Laves torrentielles :

- Concentration solide forte / très forte
- Sédimentation / viscosité
- Comportement biphasique / monophasique



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



En partant du pôle « Eau »

Suspension

- C_{MES} : de 0 à 50-100 g/l
- $C_V < 5\%$
- Pesanteur contre turbulence

Écoulements hyperconcentrés

- C_V varie de 0,01-0,05 à 0,25-0,35
- C_{MES} varie de 150-200 g/l à 700- 900 g/l
- Concentration + ou - constante sur la verticale

Laves torrentielles boueuses

- Comportement collectif
- C_V varie de 0,4-0,45 à 0,7-0,75

Matériaux fins et cohésifs

- Concentration varie sur la verticale
- Fluide reste newtonien

- Atténuation de la turbulence par la suspension
- Écoulement peut devenir laminaire
- Fluide est-il newtonien ?
- Comportement individuel des particules

- Existence d'un seuil de contrainte
- Écoulement laminaire
- Fluide non newtonien



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



En partant du pôle « Eau »

Matériaux granulaires

Charriage

- Contrainte de cisaillement et inertie des particules
- Comportement individuel des grains (ou quasi)
- Morphologie du lit fixe
- Pentes jusqu'à qq %
- C_v jusqu'à qq %

Écoulements hyperconcentrés

- Morphologie du lit rapidement variable
- Hauteur d'écoulement dépend de la phase solide
- $C = Q_s/Q_l$ varie de qq % à 25-30 %
- CV varie de qq % à 20-25 %
- Comportement des grains individuel et collectif
- Débit solide pulsé

Laves torrentielles granulaires

- Existence d'un seuil de contrainte
- Comportement des grains surtout collectif
- C_v varie de 45-50 % à 80-85 %



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



En partant du pôle « matériau solide »

Matériaux cohésifs

Glissement de terrain  lave torrentielle

Vitesse : qq cm/jour  qq m/s

Matériaux granulaires

Falaise  écoulements
avalanches de blocs
chutes de blocs

Problème :

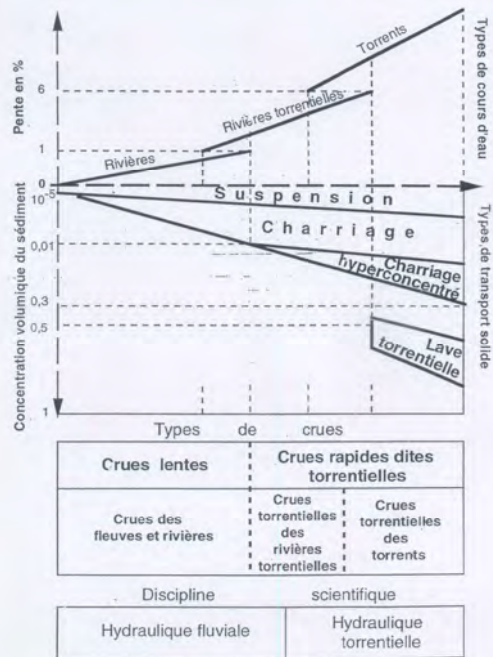
- Similitude des écoulements et des LTG ?
- Lois de propagation ?



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



Synthèse :



Charriage torrentiel



Échanges avec le lit

changements morphologiques importants et très rapides :

- ▣ basculements de pente
- ▣ affouillements locaux
- ▣ engravements massifs
- ▣ respirations
- ▣ divagations



difficulté de définir la position altitudinale du lit, et le tirant d'eau

Signes de reconnaissance

En écoulement

- ▶ Écoulements fortement turbulents
- ▶ Vitesse de l'eau > vitesse des sédiments transportés
Vitesse des sédiments transportés très variable dans le temps et dans l'espace
problème : turbidité → sédiments en général peu visibles
- ▶ « Dune torrentielle »

Dépôts

- ▶ Dépôts triés (terrasses, peu de cohésion)
- ▶ Pavage (marches d'escalier)

Charriage torrentiel

Désordres produits par une crue

- ▶ Engravements
 - débordements
 - coupures de voies
 - divagations
 - apports massifs de sédiments sur le cône
 - obstruction de ponts
 - complication : flottants*
- ▶ Affouillements
locaux ou généralisés
déstabilisation de berges, de versants, d'ouvrages

Granulométrie

Tri granulométrique

particules les + grossières

=

+ difficiles à transporter

transport différentiel (*total*) ou sélectif (*partiel*)

accumulation à la surface du lit

Pavage



Granulométrie

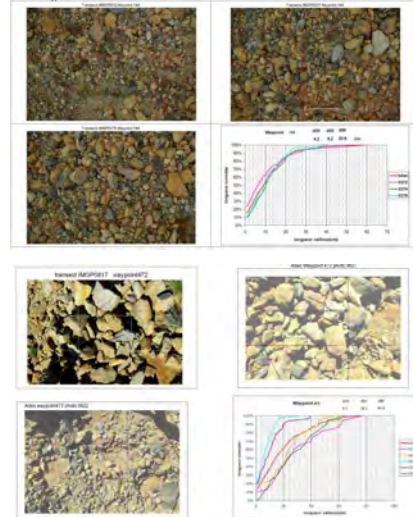
Remarques :

- Choix de la granulométrie caractéristique (zone de mesure) délicat et source de beaucoup d'incertitudes
- Influence plus faible du pavage en 2D
- Granulométrie du transport en général plus fine que celle du lit (surtout en cas de pavage !)
- Tri granulométrique faible en transport intense (du moins en 1D) : phénomène de « masquage »

Mesure granulométrique



Méthode par échantillonnage linéique
(Wolman 1954)



Capacité de transport

Quantité de sédiments (débit solide en général) que peut transporter un tronçon de cours d'eau sous certaines conditions de pente, de géométrie, de débit liquide, de granulométrie...

Capacité **MAXIMALE** de transport

idem... en l'absence de toute limitation dans la fourniture des sédiments : apport amont et/ou stock affouillable suffisant, pas de pavage...

Formules de transport solide

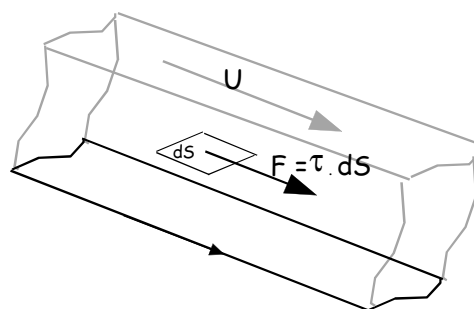
Points communs aux formules détaillées ci-dessous :

- ▣ Ce sont des **formules à seuil** : le transport solide est relié à un excès, soit de contrainte, soit de débit, par rapport à la valeur de ce seuil.
- ▣ Elles expriment la **capacité maximale de transport**, qui peut-être atteinte si aucune limitation, due aux apports amont ou à la fourniture de sédiments par le lit, n'intervient.
- ▣ Elles résultent pour l'essentiel de calages à partir de **résultats expérimentaux** en canal de **laboratoire**, en régime **permanent uniforme**.

Contrainte de cisaillement

Une surface plane quelconque parallèle au fond (notamment le fond lui-même) est exposée à une force dirigée dans le sens de l'écoulement (force tractrice), dont le module par unité de surface est appelé :

contrainte de cisaillement (notée τ)



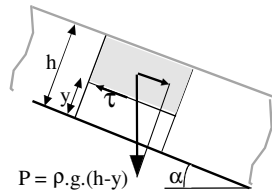
Contrainte de cisaillement

En régime permanent uniforme

En projection sur l'axe d'écoulement :

$$\rho g (h - y) \sin \alpha = \tau(y)$$

$$\text{soit } \tau(y) = \rho g (h - y) I$$



Notamment au fond :

$$\tau_0 = \rho g h I$$

En régime permanent

On montre que :

$$\tau_0 = \rho g R_h J$$

Remarque : il faut connaître h (← loi de perte de charge...)

Valeurs adimensionnelles

▣ Contrainte de cisaillement

$$\tau_* = \frac{h i}{(s - 1) d}$$

▣ Débit solide

$$q_s^* = \frac{q_s}{\sqrt{(s - 1) \cdot g \cdot d^3}}$$

$$q_s^* = \frac{Q_s}{\sqrt{(s - 1) \cdot g \cdot d^5}}$$

▣ Concentration (en débit)

$$C = \frac{q_s}{q_l} = \frac{Q_s}{Q_l}$$

Formules de transport solide

Formule de MEYER-PETER (1948) :

$$\frac{q_s}{\sqrt{(s-1) \cdot g \cdot d^3}} = 8 \cdot (\tau'_* - 0.047)^{3/2}$$

avec $q_s = \frac{Q_s}{L}$ et $\tau'_* = \left(\frac{k_s}{k_r}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{Q_e}{Q}\right) \frac{h \cdot I}{(s-1) \cdot d}$

Q	débit liquide (m ³ /s)
Q _e	débit liquide concourant au charriage (m ³ /s)
q _s	débit solide unitaire par unité de largeur du lit (m ² /s)
s	densité du sédiment : s = ρ _s / ρ
h	hauteur d'eau (m)
k _s	coefficient de rugosité du lit (m ^{1/3} /s)
k _r	coefficient de rugosité du grain (m ^{1/3} /s)
d	diamètre des particules (m)

⚠ 0,04 % < I < 2,2 %



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



Formules de transport solide

Formule de SMART et JAEGGI (1983) :

$$\frac{q_s}{q} = 4 \cdot \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0,2} \cdot \frac{I^{1,6}}{s-1} \cdot \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau}\right)$$

avec $\tau = \frac{h_m \cdot I}{(s-1) \cdot d_m}$ et $\tau_0 = 0,05 \cdot \cos \alpha \cdot \left(1 - \frac{tg \alpha}{tg \beta}\right)$

q	débit liquide unitaire par unité de largeur du lit (m ² /s)
q _s	débit solide unitaire par unité de largeur du lit (m ² /s)
h _m	hauteur d'écoulement (m)
d _m	diamètre moyen des particules (m)
d _x	d ₃₀ , d ₅₀ , d ₉₀ : x % en poids des particules ont un diamètre inférieur à d _x (m)
s	densité du sédiment : s = ρ _s / ρ
β	angle de frottement interne du matériau
α	angle de la pente (I = tan α)

3 % < I < 20 %

⚠ h_m ?



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



Formules de transport solide

Formule de RICKENMANN (1990) :

$$q_s = 12,6 \cdot \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} \cdot \frac{I^2}{(s-1)^{1,6}} \cdot (q - q_{cr})$$

avec $q_{cr} = 0,065 \cdot (s-1)^{1,67} \cdot \sqrt{g} \cdot d_{50}^{1,5} \cdot I^{-1,12}$

q	débit liquide unitaire par unité de largeur du lit (m ² /s)
q _s	débit solide unitaire par unité de largeur du lit (m ² /s)
q _{cr}	débit liquide critique unitaire (m ² /s)
d _x	d ₃₀ , d ₅₀ , d ₉₀ : x % en poids des particules ont un diamètre inférieur à d _x (m)
s	densité du sédiment : s = ρ _s / ρ

$$7\% < I < 20\%$$



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



Formules de transport solide

Formule de LEFORT (1991) :

$$\frac{Q_s}{Q} = 4,45 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} \frac{I^{1,5}}{s-1} \left(1 - \left(\frac{Q_0}{Q} \right)^{0,375} \right)$$

En « volume apparent »

avec $Q_0 = 0,0776 \cdot (s-1)^{\frac{8}{3}} \cdot \sqrt{g} \cdot d_m^{2,5} \cdot I^{-\frac{13}{6}} \cdot (1 - 1,2 \cdot I)^{\frac{8}{3}}$

Q	débit liquide (m ³ /s)
Q _s	débit solide (m ³ /s)
Q ₀	débit liquide critique (m ³ /s)
s	densité du sédiment : s = ρ _s / ρ
d _m	diamètre moyen des particules (m)
d _x	d ₃₀ , d ₅₀ , d ₉₀ : x % en poids des particules ont un diamètre inférieur à d _x (m)



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



Formules de transport solide

Formule de LEFORT (1991) - simplification (s=2,65) :

$$\frac{Q_s}{Q} = 2,7 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} I^{1,5} \left(1 - \left(\frac{Q_0}{Q} \right)^{0,375} \right)$$

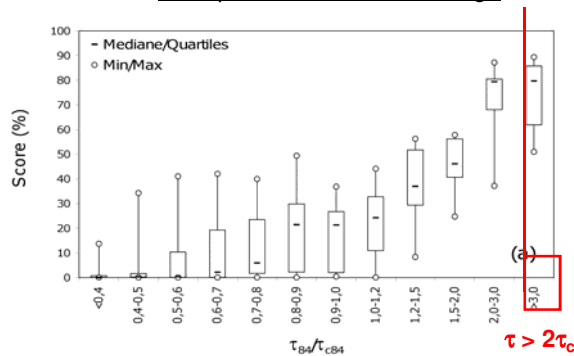
En « volume apparent »

avec $Q_0 = 0,92 \cdot d_m^{2,5} \cdot I^{-13/6} \cdot (1 - 1,2 \cdot I)^{8/3}$

Q	débit liquide (m ³ /s)
Q _s	débit solide (m ³ /s)
Q ₀	débit liquide critique (m ³ /s)
s	densité du sédiment : s = ρ _s / ρ
d _m	diamètre moyen des particules (m)
d _x	d ₃₀ , d ₅₀ , d ₉₀ : x % en poids des particules ont un diamètre inférieur à d _x (m)

Efficacité des modèles

Quelques formules de charriage



Résultats du test de 17 modèles usuels : comparaison avec les mesures de terrain (100 cours d'eau, 8700 mesures)

Formules de transport solide

Formule de RECKING (2013) :

$$q_s^* = 14\tau^{*2.5} [1 + (\tau_m^* / \tau^*)^4]$$

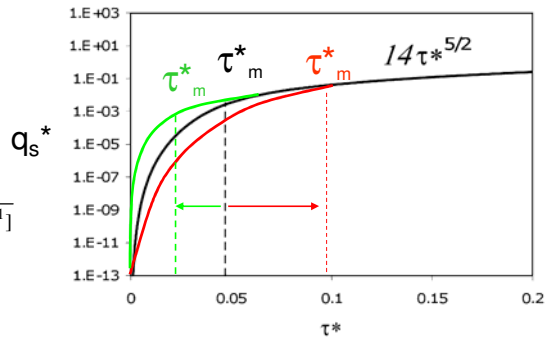
$$q^* = \frac{q}{\sqrt{gID_{84}^3}}$$

$$\tau_m^* = (5I + 0,06)(D_{84} / D_{50})$$

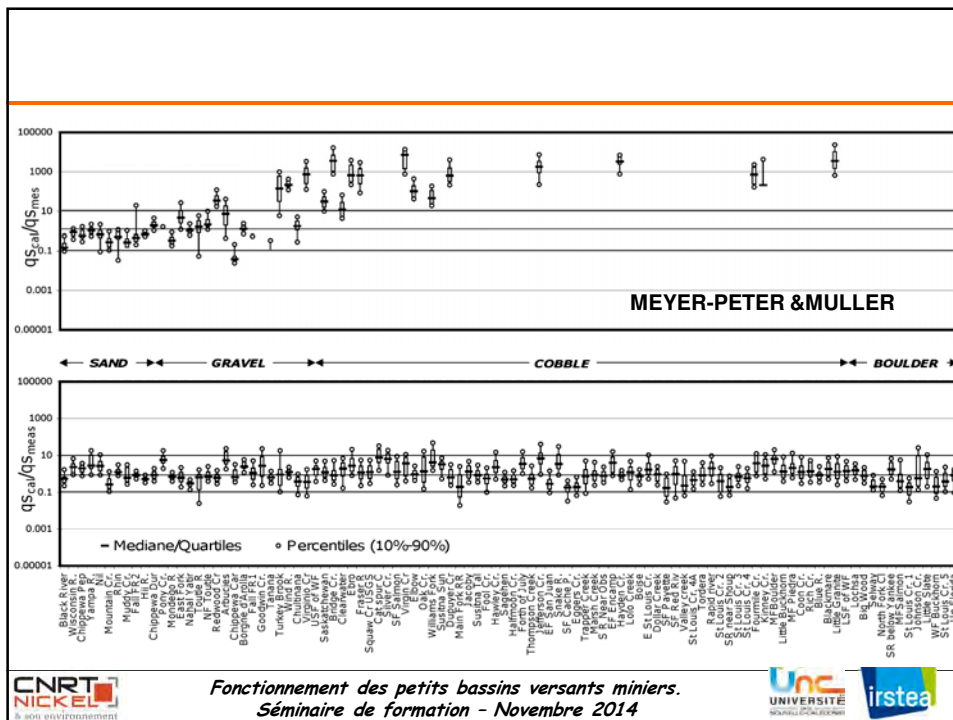
$$\tau^* = \frac{I}{(s-1)D_{84}[2/L + 74p^{2.6}(gI)^p q^{-2p} D_{84}^{3p-1}]}$$

$$p=0.23 \text{ si } q^* < 100$$

$$p=0.30 \text{ si } q^* > 100$$



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



Formules de transport solide

Formules simples : \Rightarrow ordres de grandeur

MEUNIER : $\frac{Q_s}{Q} = 8,2 I^2$

RICKENMANN : $\frac{Q_s}{Q} = 8,3 I^{2,1}$

...

En « volume apparent »

Formules de transport solide

Paramètres nécessaires

Géométriques

penne, profil en long
section en travers, largeur

carte, levé topo
levé terrain (*topo*)

Hydrauliques

débit liquide,
hauteurs d'écoulement

hydrologie
observation, traces
loi de perte de charge

Sédimentologiques

densité
angle de frottement interne
diamètres caractéristiques

échantillon
ou estimation
granulométrie

Seuil de transport

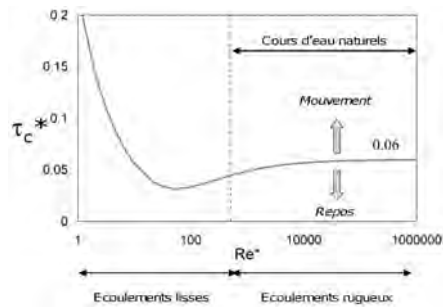
Problème de définition :

- ▶ phénoménologique : selon quel critère ?
- ▶ extrapolation des lois de transport solide pour $Q_s \rightarrow 0$: quel sens physique ?

Critère de Shields (1936)

Résultats expérimentaux :

granulométrie uniforme
faibles pentes
submersion relative importante



Pour $v_* d/n > 500$, $\tau_* = h i / (s-1) d$ est constante (≈ 0.06)

d'où

$$d \approx 10 h i$$

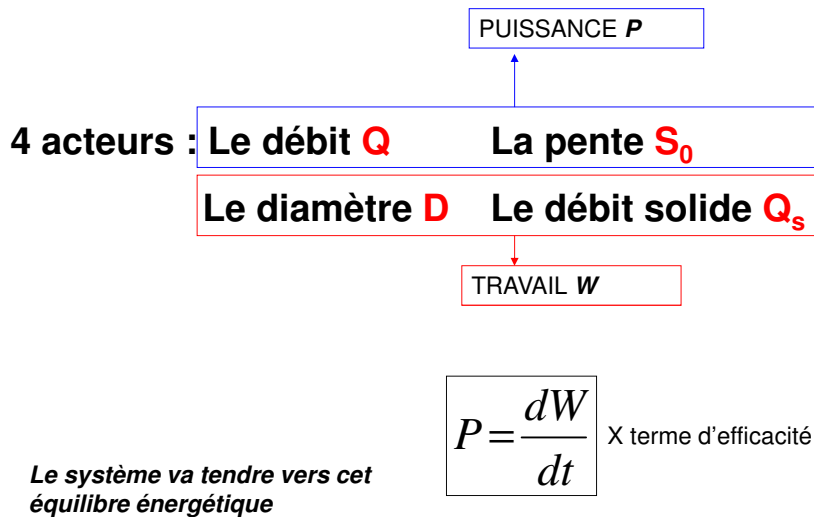
Méthodes

Principe « de l'équilibre »

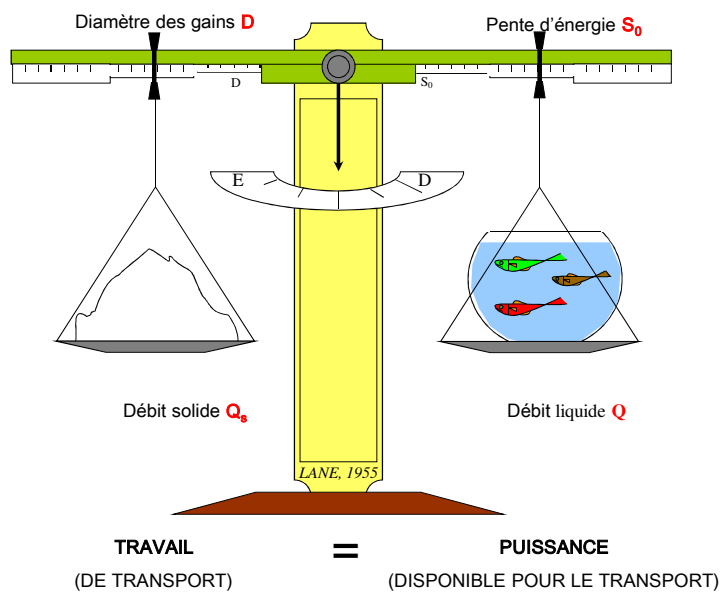
Sur un cours d'eau libre de façonner son lit, un équilibre tend à s'installer entre :

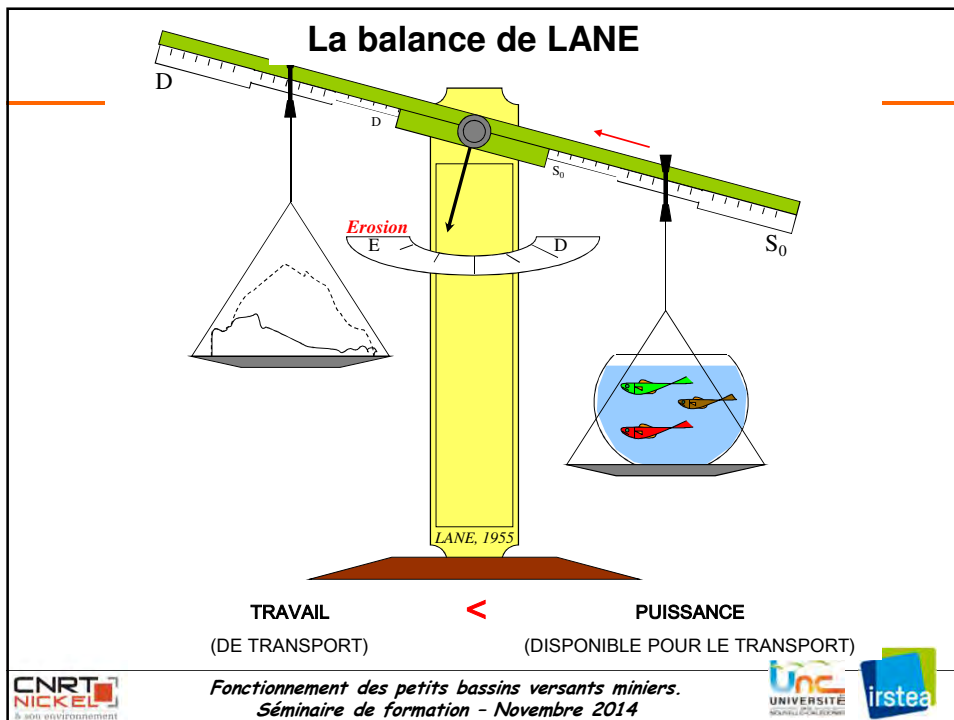
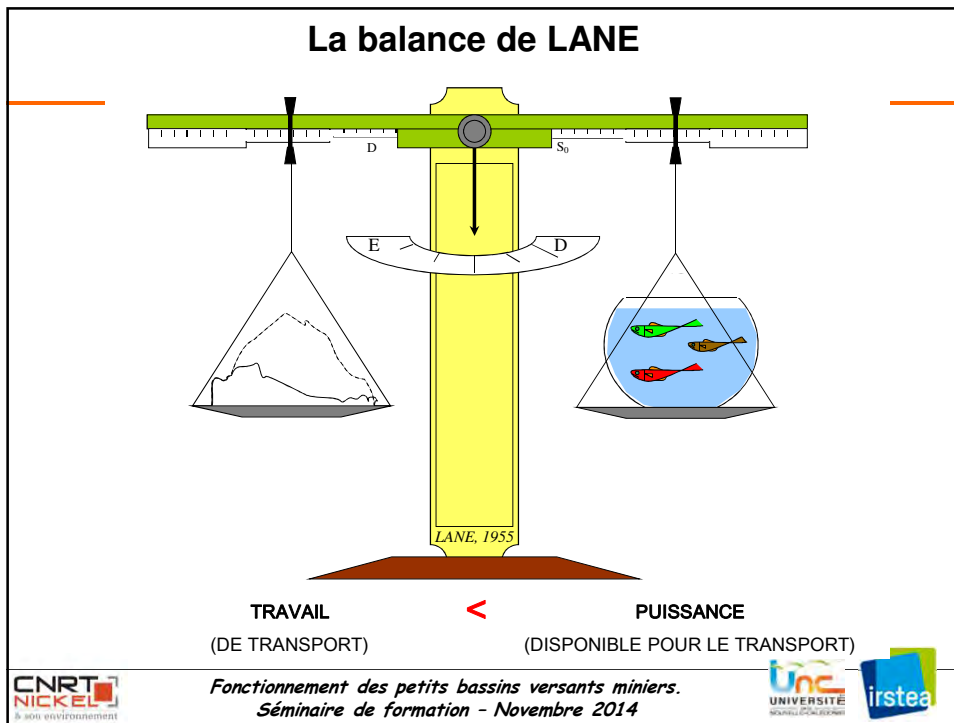
▶ le débit solide	« imposé »
▶ le débit liquide	
▶ la granulométrie des sédiments <i>transport</i>	
▶ la pente <i>lit</i>	« ajustable »

Principe de l'équilibre

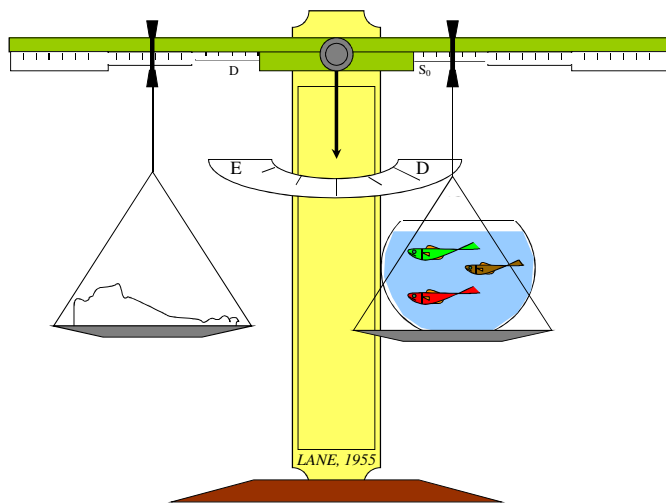


La balance de LANE





La balance de LANE



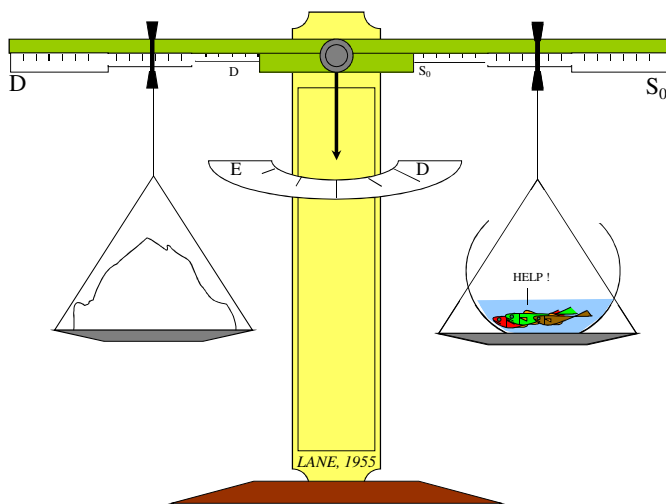
TRAVAIL = PUISSANCE
 (DE TRANSPORT) (DISPONIBLE POUR LE TRANSPORT)



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
 Séminaire de formation - Novembre 2014



La balance de LANE

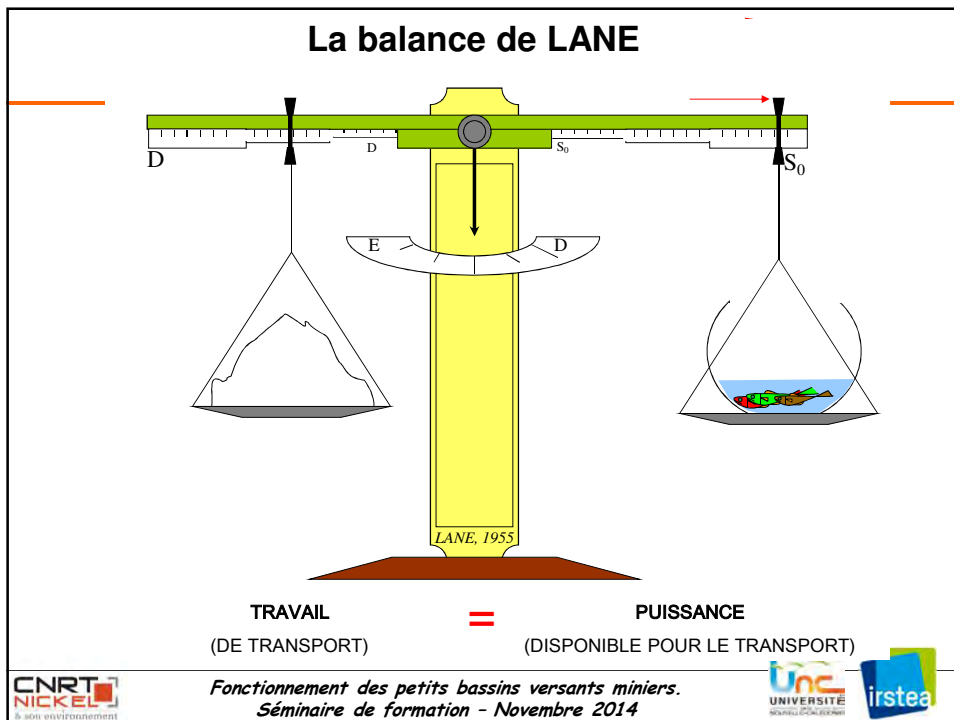
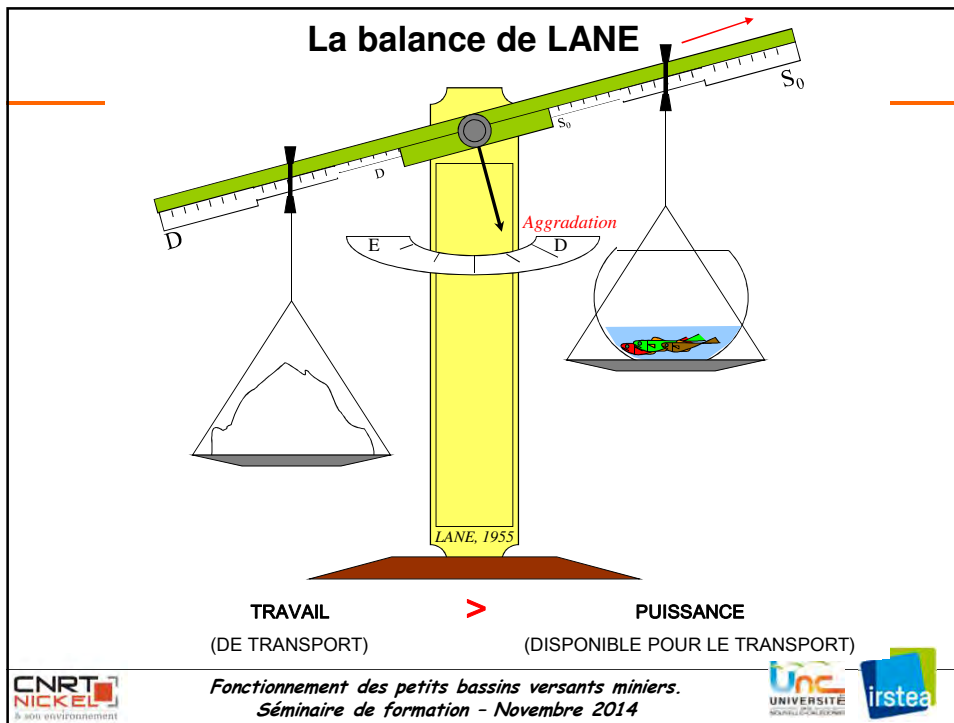


TRAVAIL > PUISSANCE
 (DE TRANSPORT) (DISPONIBLE POUR LE TRANSPORT)

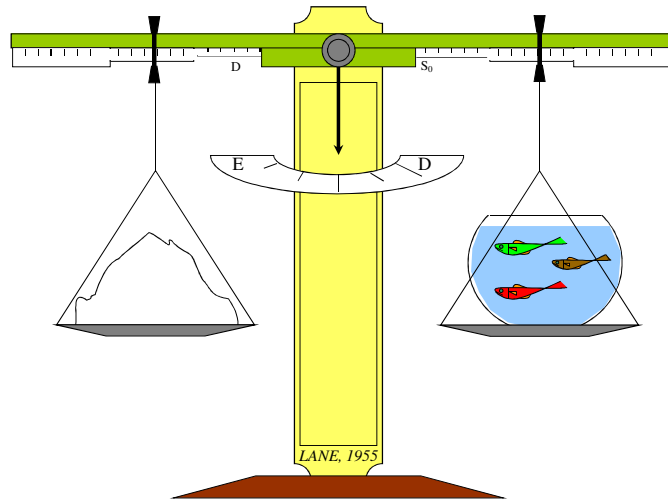


Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
 Séminaire de formation - Novembre 2014





La balance de LANE



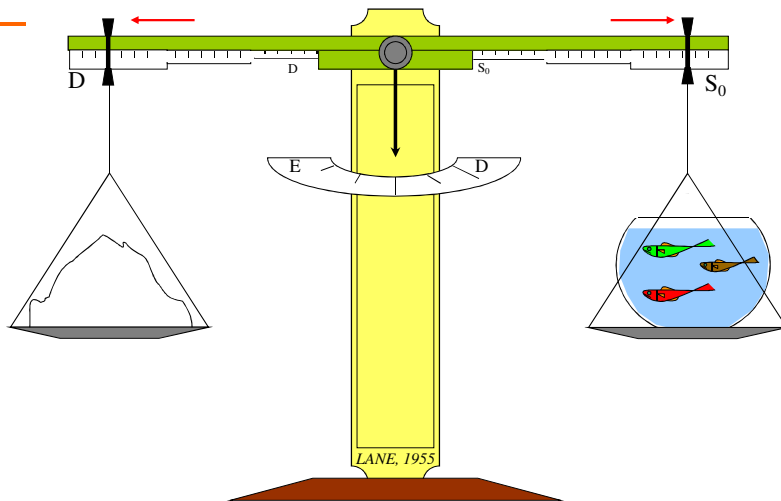
TRAVAIL = PUISSANCE
 (DE TRANSPORT) (DISPONIBLE POUR LE TRANSPORT)



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
 Séminaire de formation - Novembre 2014



La balance de LANE

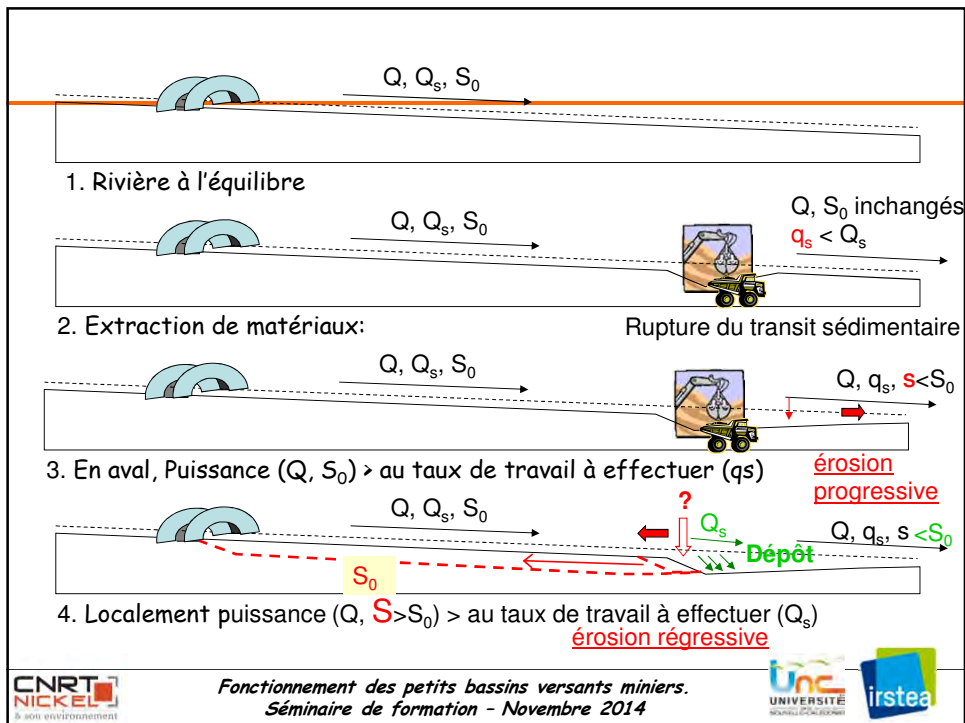


TRAVAIL = PUISSANCE
 (DE TRANSPORT) (DISPONIBLE POUR LE TRANSPORT)



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
 Séminaire de formation - Novembre 2014

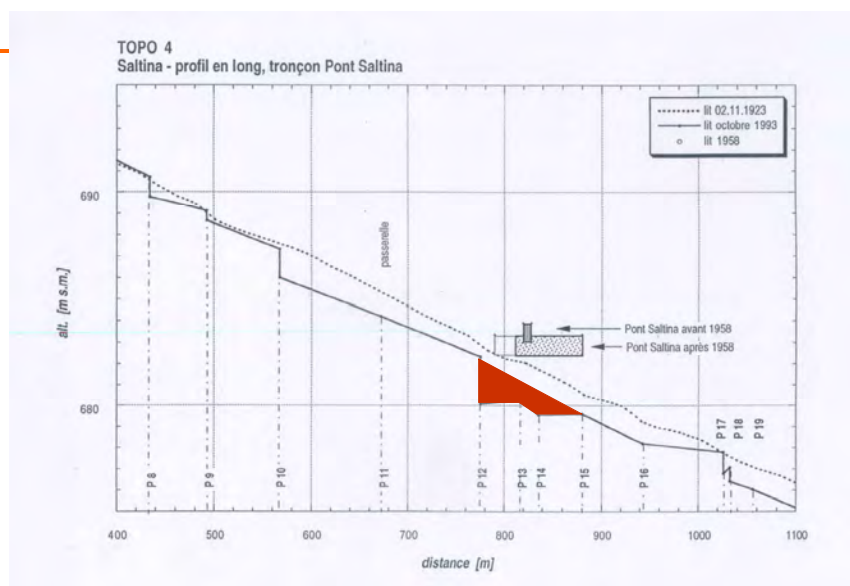
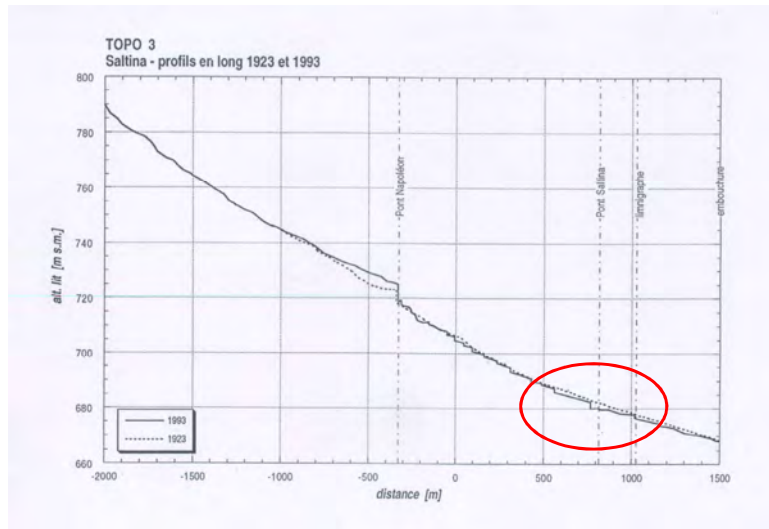


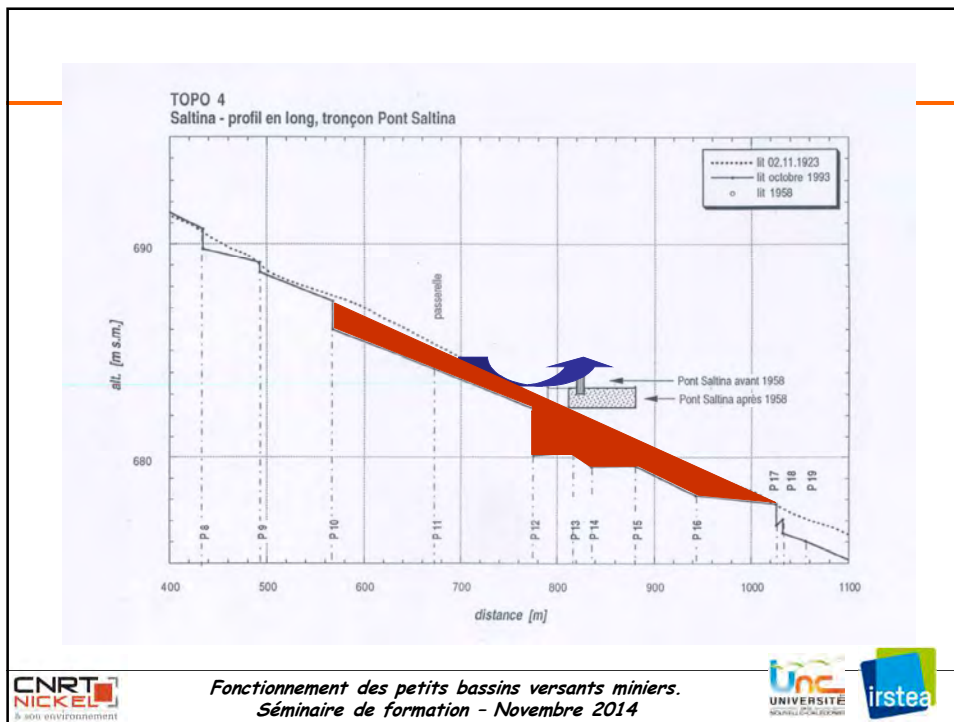
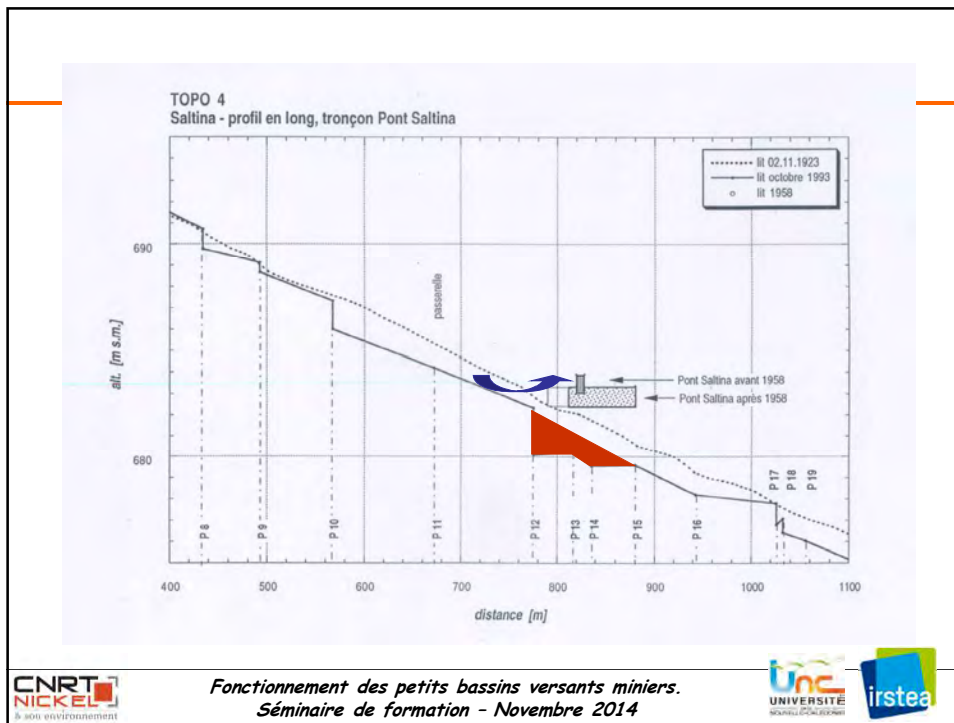


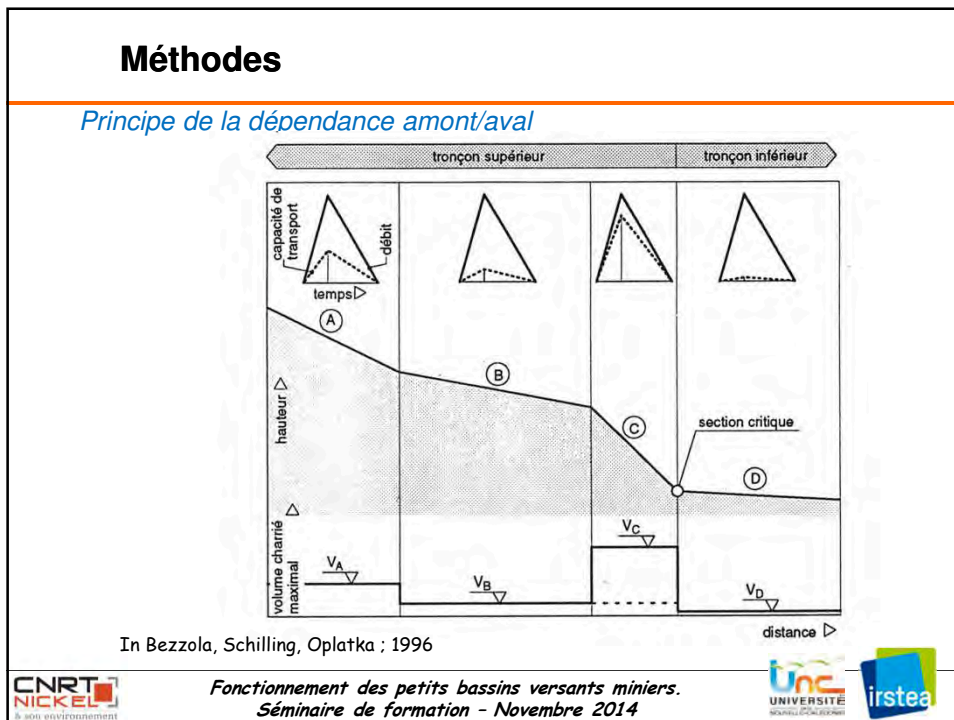
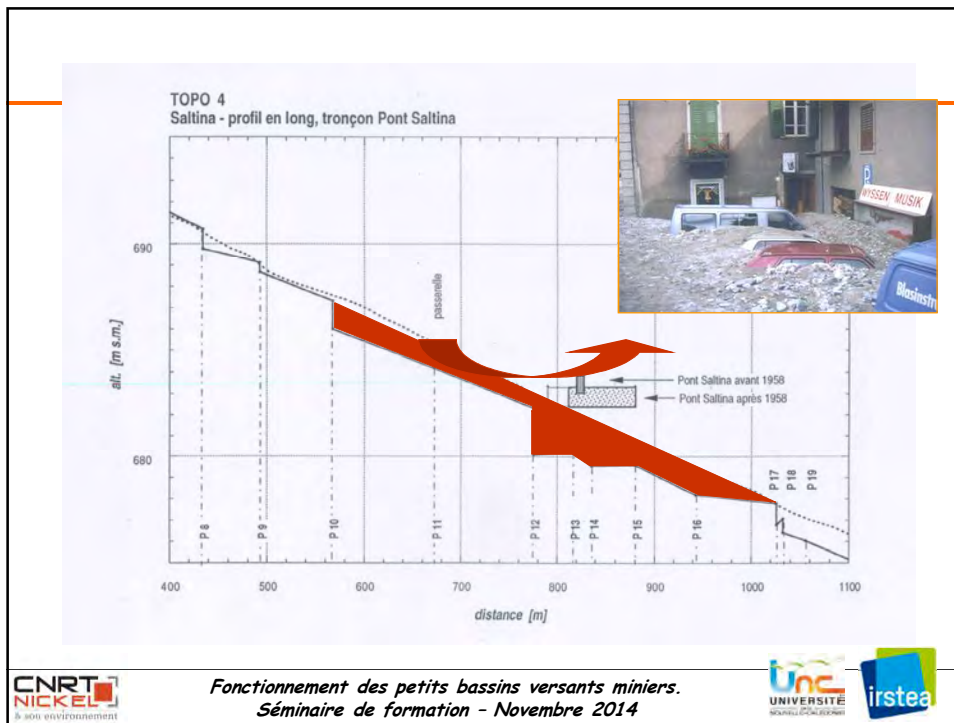
Ajustement du profil en long

- ▶ **Érosion régressive** ← Abaissement du lit
- ▶ **Érosion progressive** ← Ql / Q_s ↗
- ▶ **Engrèvement régressif** ← Exhaussement du lit
- ▶ **Engrèvement progressif** ← Ql / Q_s ↘

Exemple : la Saltina à Brigg (CH)







Méthodes

Évaluation rapide des volumes charriés par une crue

- ▶ Hydrogramme de crue triangulaire
(temps de base t_b , débit de pointe Q_{max})
- ▶ Loi de transport solide supposée linéaire entre Q_0 début d'entraînement ($Q_s=0$) et $Q_{smax} = Q_s(Q_{max})$

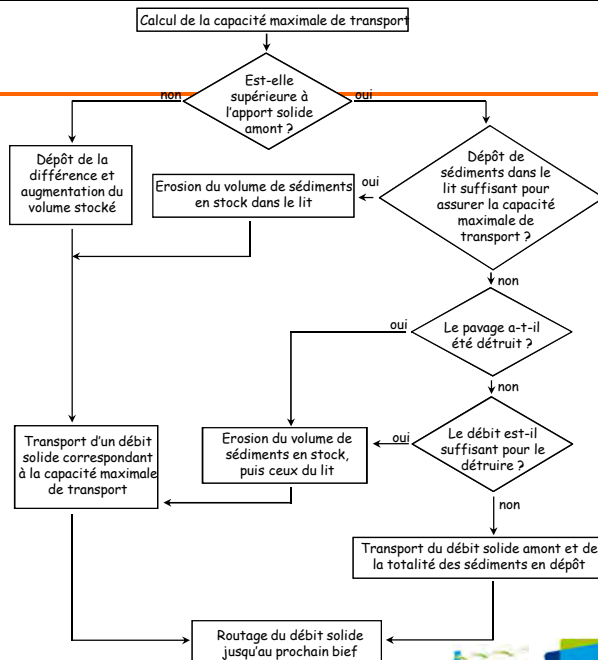
➔ $\text{Volume charrié} \approx (t_b / 2) Q_{smax} (1 - Q_0 / Q_{max})$

(si $Q_{max} \gg Q_0$; $\text{Volume charrié} \approx (t_b / 2) Q_{smax}$)

Méthodes

Dépendance
amont/aval

exemple :
principe du
module
transport
solide
d'ETC



Formules de transport solide

Domaine de validité
(conditions d'obtention) :

Limites
(situations naturelles) :



Formules semi-empiriques :
(essais en canal laboratoire)

Capacité maximale de transport
Régime permanent
Régime uniforme
Ecoulements contraints (1D)



◆ Tri granulométrique / pavage ;
cohésion...



◆ Évolutions dynamiques

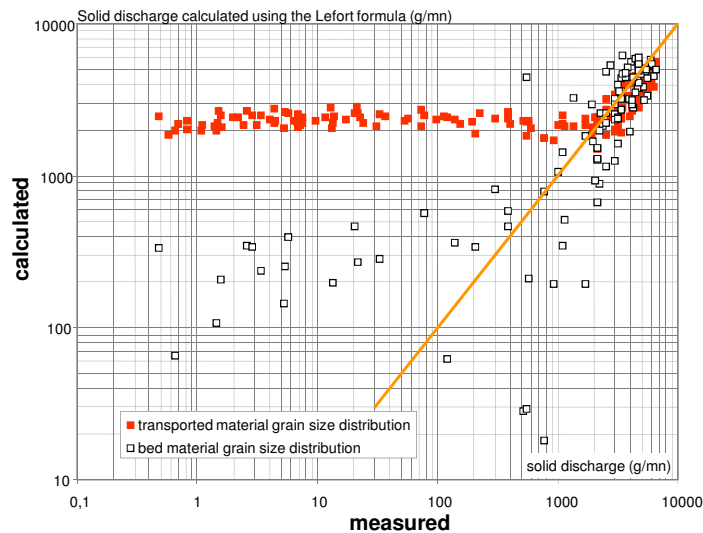


◆ Singularités



◆ Effets 2D (divagations)

Effet du tri granulométrique



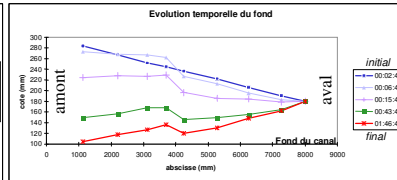
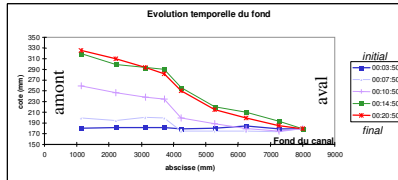
Effet de singularités

Décrochement dans le profil en long

engravement

Rétrécissement :

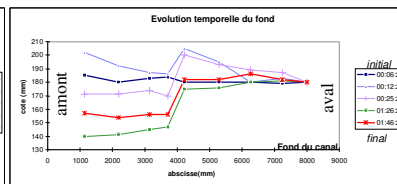
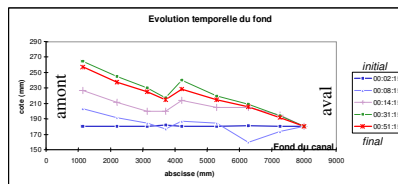
érosion



engravement

Elargissement :

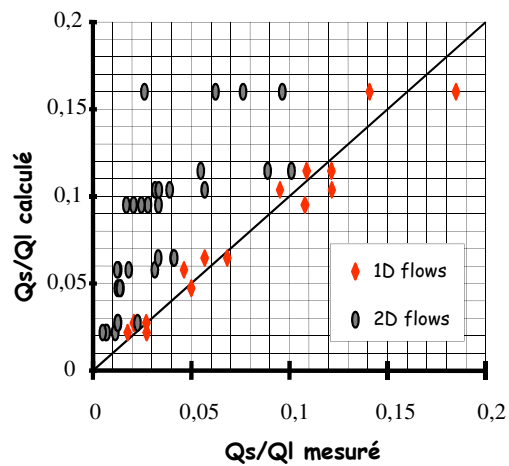
érosion



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



Effet de la largeur



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



Limites à l'application des formules

- ❑ Écarts à l'équilibre : fluctuation des apports (nature et quantité) notamment dans les hauts bassins
- ❑ Écarts à la capacité maximale de transport (déficit d'apports de versants, ou de fourniture du lit - *pavage*)
- ❑ Fourchette d'incertitude « intrinsèque »

N.B. : ne pas oublier l'affouillement local



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



Etude de bassin versant « type »

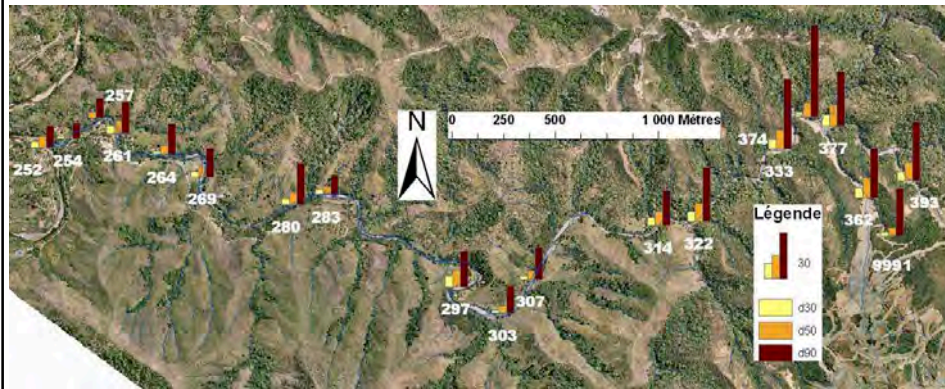
- Analyse du fonctionnement global du système, de sa dynamique sédimentaire et des processus actifs correspondant.
- Description du système hydrographique et du bassin versant, en vue de sa modélisation hydraulique et sédimentaire (quelles sont les entités constitutives du bassin versant (sous-bassins, biefs) ; comment s'organisent spatialement et fonctionnellement ces entités ?) et détermination des caractéristiques physiques nécessaires à la modélisation
- Identification des zones sources de sédiments et quantification des productions sédimentaires correspondantes (d'où peuvent provenir les sédiments susceptibles d'être transportés vers l'aval à l'occasion des crues ; quels sont les stocks mobilisables ; de quels types de sédiments sont-ils constitués ?)
- Définition de scénarios de crues pertinents pour l'étude et la conception de mesures de réduction des flux sédimentaires, à partir d'une étude hydrologique des données pluie – débit disponibles.
- Réalisation de modélisations hydro-sédimentaires pour simuler la réaction du système aux différents scénarios retenus et évaluer l'effet des mesures envisagées de contrôle du transport solide, tests de sensibilité.
- Analyse des résultats de modélisation, propositions d'aménagements.



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



Mesures granulométriques



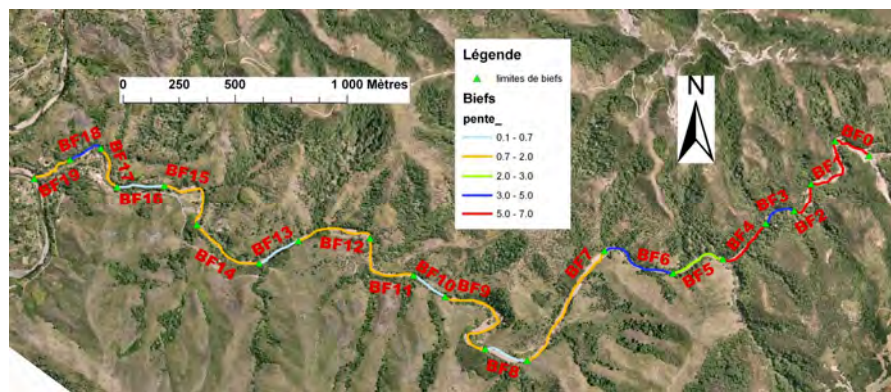
Creek	Kiel																	Piem		Kabar	
Waypoint	374	333	322	314	307	303	297	283	280	269	264	261	257	254	252	362	999	377	393		
Distance à la confluence Piem-Kabar (m)	72	422	1033	1256	2107	2344	2689	3789	3965	4592	4894	5207	5385	5543	5647	442	487	75	635		
Altitude (m)	240	220	188	179	160	155	152	135	135	130	125	125	120	120	116	326	332	251	303		
d30 (cm)	3	6	6	5	2	2	7	4	4	3	3	5	0	2	4	6	3	8	5		
d50 (cm)	9	12	12	9	5	5	11	6	8	7	6	8	3	3	7	13	6	14	12		
d90 (cm)		45	35	23	21	18	23	13	27	18	20	20	12	10	14	32	31	35	37		



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014

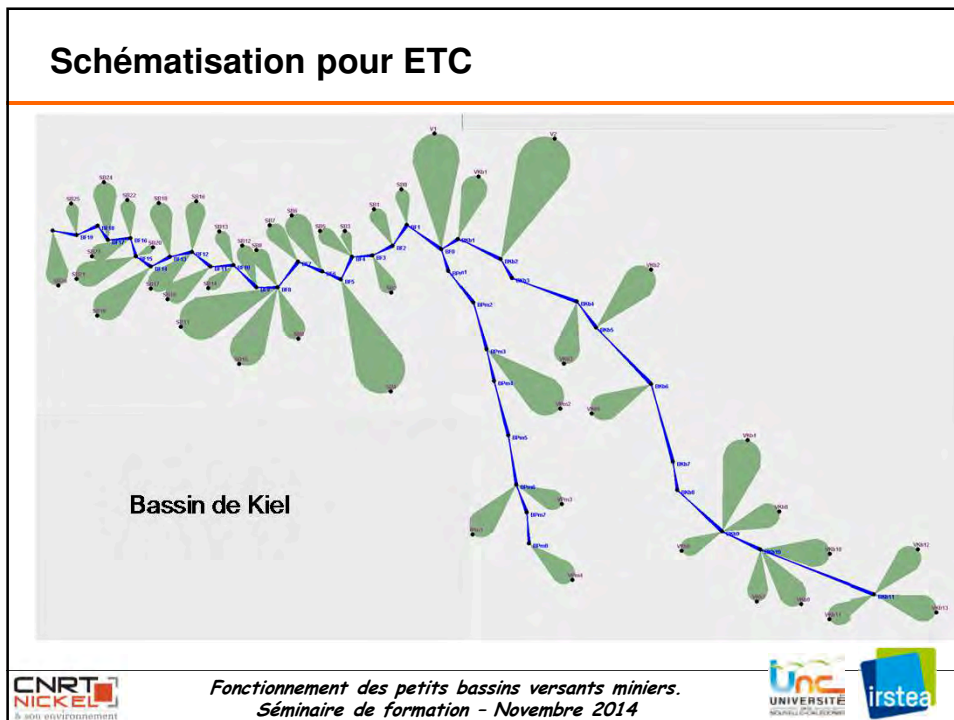
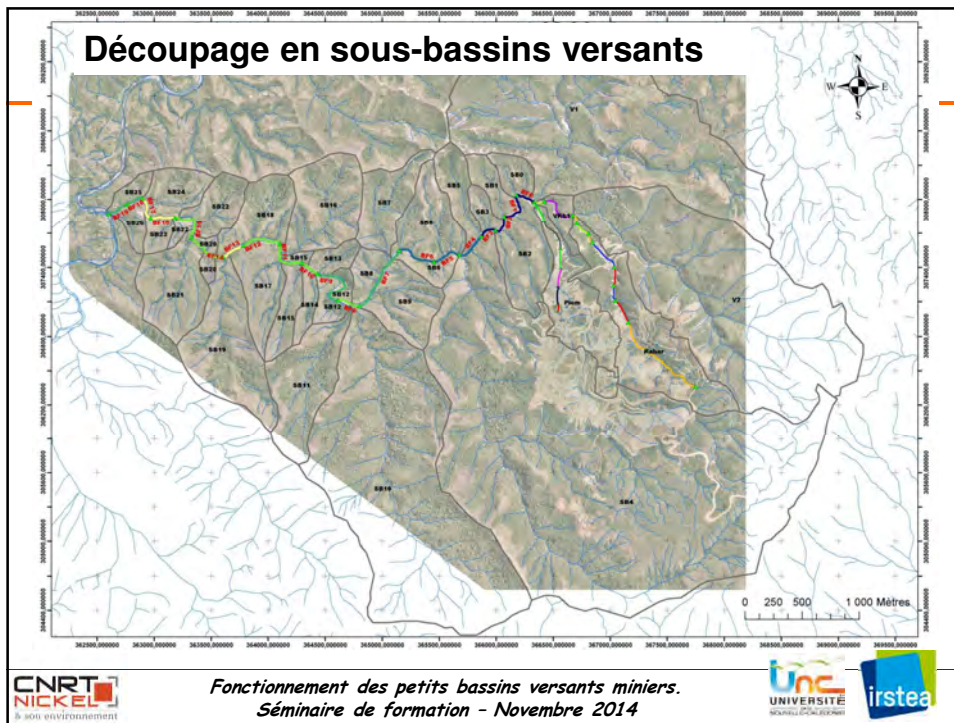


Découpage en biefs homogènes

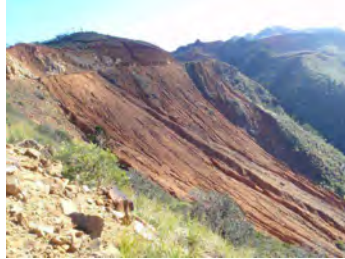
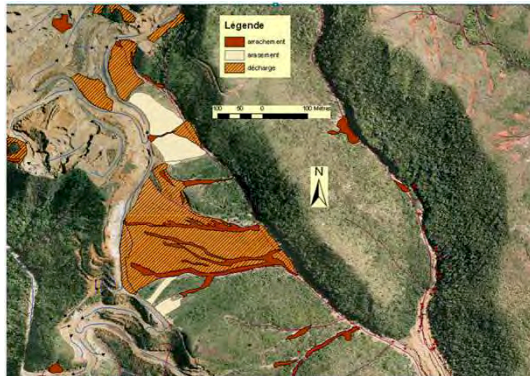


Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014





Estimation des volumes sources

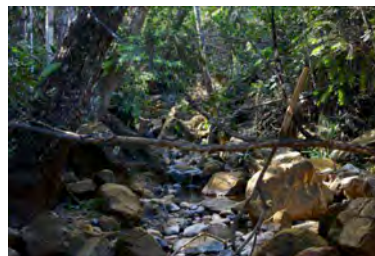
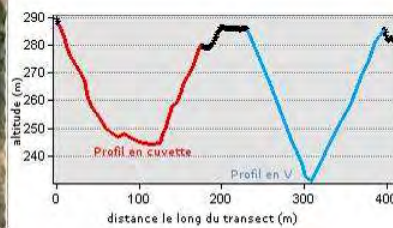


Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
 Séminaire de formation - Novembre 2014



Estimation des stocks du lit

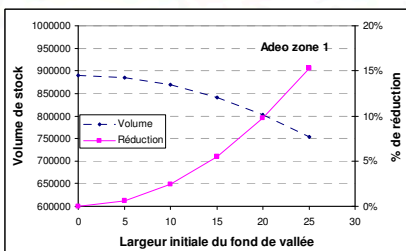
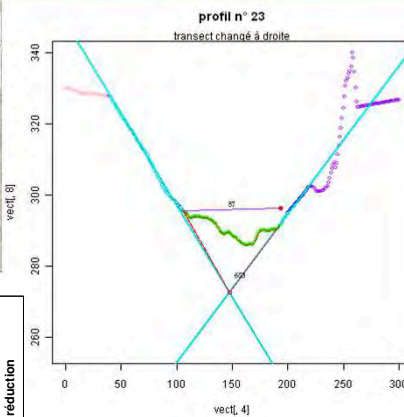
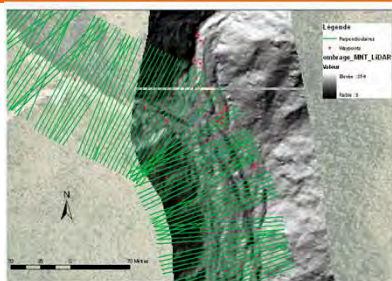
Utilisation des données Lidar



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
 Séminaire de formation - Novembre 2014



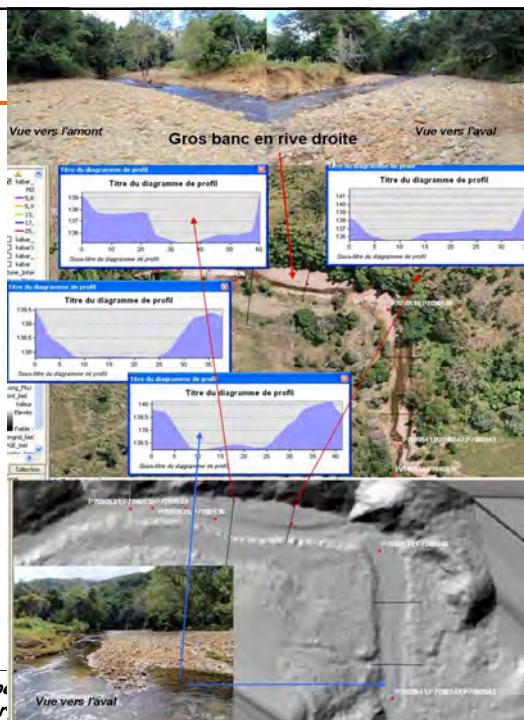
Calcul des volumes



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014

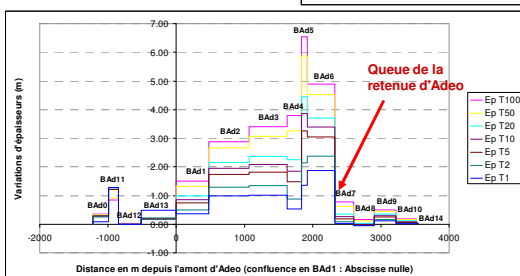
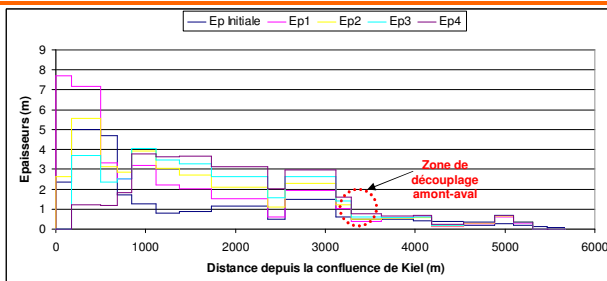


Estimation des stocks dans les lits – terrasses alluviales



Fonctionnement des p...
Séminaire de for...

Modélisation du transport solide



→ Validation ?



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



Quand on a la chance d'avoir des mesures...

Date	Adeo		Date	Manara	
	Stock cumulé en m ³	Moyenne annuelle		Stock cumulé en m ³	Moyenne annuelle
Novembre 1983	0	arrondi à 10 m ³	1977	0	arrondi à 10 m ³
Juillet 1996	91000	7180	1992	400000	26670
Octobre 1998	97000	2660	Juin 1998	686000	47670
Décembre 1999	101000	3430	Juillet 2003	728000	8260
Courant 2003	114000	3630	Septembre 2007	764000	8630

	Volumes Ecoulés en m ³						Volumes Ecoulés (Sans apport de versant)		
	T1	T2	T5	T10	T20	T50	T100	T10	T100
BAd6	1113	2252	4511	6025	7680	11656	14162	3562	7865
BMn4	8610	11480	14890	16520	18080	21530	23270	6360	11260

Comparaison avec les volumes déposés



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014

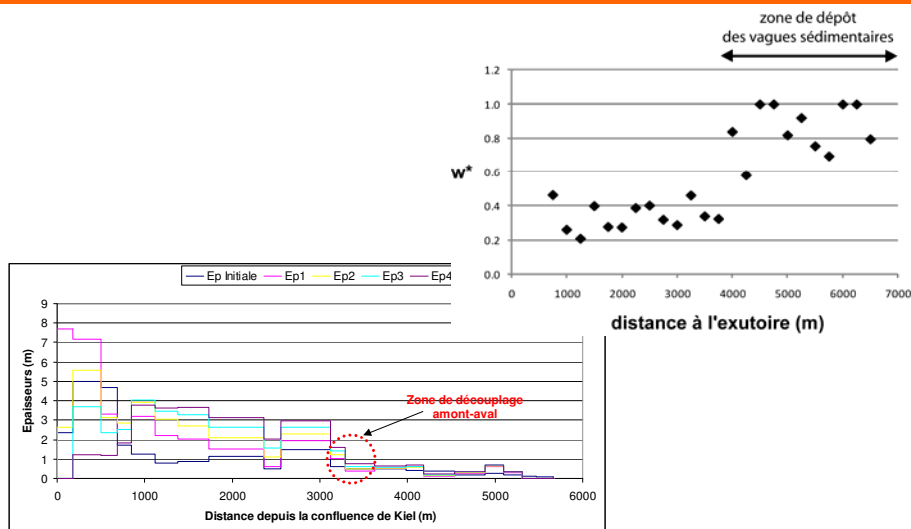


Quand on n'a pas de mesures

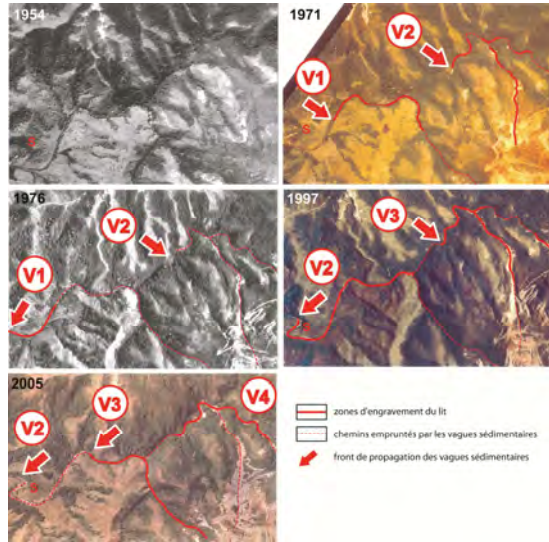
Une piste : l'analyse géomorphologique

- Méthode
 - analyse historique qualitative des changements morphologiques survenus entre 1954 et 2006
 - cartographie manuelle de l'emprise spatiale de la bande active du cours d'eau et du fond de vallée alluvial (MNT LiDAR de 2008 et des orthophotographies de 2006)
 - extraction manuelle du profil en long du lit actif et des terrasses à partir du MNT LiDAR ;
 - mesure manuelle à intervalles de 50 m de la largeur active du lit (w) adimensionnée par la largeur du fond de vallée (w_f) w^* , indicateur de l'impact généré par les apports solides miniers.

Aperçu des résultats



Analyse des photos aériennes



Caractéristiques des laves torrentielles

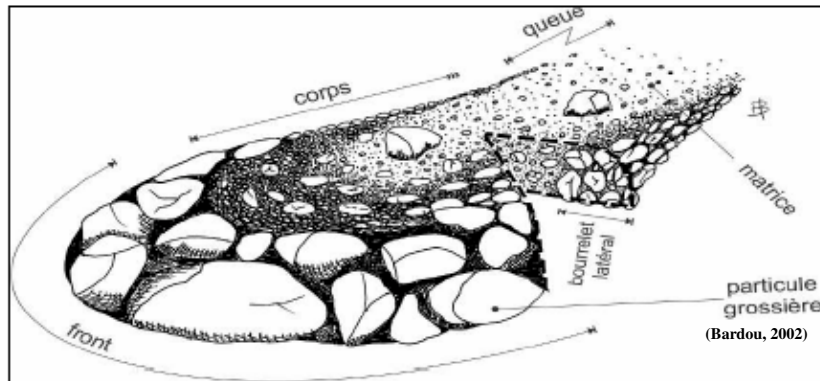


Bourellets latéraux et frontal



Transport de gros blocs

Principales caractéristiques d'une lave torrentielle «typique»



bouffée constituée d'un front, d'un corps et d'une queue

Principales caractéristiques d'une lave torrentielle «typique»

	Valeur typique	Gamme de variation
Hauteur des bouffées au front (m)	3	0,5 – 10
Vitesse des bouffées (m.s ⁻¹)	3	0,5 – 15 (30 m.s ⁻¹ pour certains lahars)
Volume total (m ³)	50 000	1 000 – 1 000 000 (parfois beaucoup plus, notamment pour les lahars)
Masse volumique (kg.m ⁻³)	2300	1900 - 2500
Nombre de bouffées		1 - 10

Différents types de laves torrentielles

laves boueuses / laves granulaires / lahars

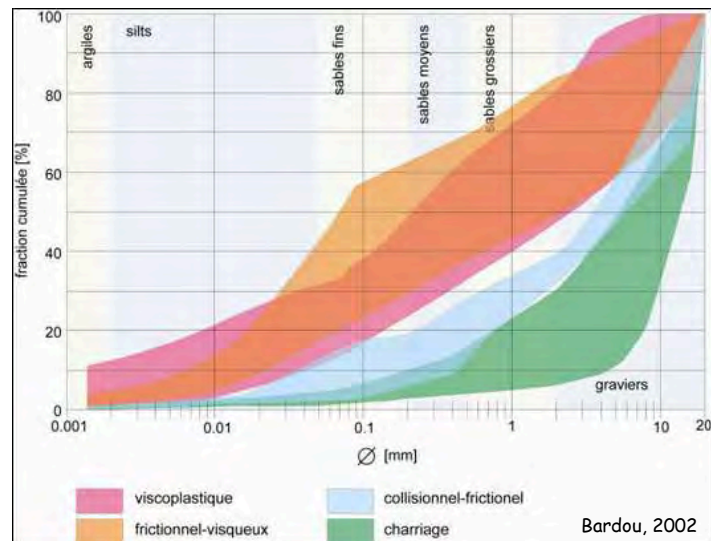


CNRT
NICKEL
& son environnement

Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014

UNC
UNIVERSITÉ
SOUILLIÈRE
irstea

Distinction des laves par la granulométrie



CNRT
NICKEL
& son environnement

Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014

UNC
UNIVERSITÉ
SOUILLIÈRE
irstea

Évaluation des volumes de laves torrentielles

- Donnée d'entrée aux modèles d'écoulements
- Dimensionnement de dispositifs de protection
- **Relation pluie / volume solide pas directe**
- **Peu de données quantitatives**

Formules « régionales »

- ✓ *pas facilement extrapolables*
- ✓ *fréquence de l'événement estimé inconnue*

Exemple : Rickenmann (1997)

Ordres de grandeur, à partir de l'analyse statistiques des laves torrentielles de l'été 1987 en Suisse

Volumes maximaux (m³)

$$M = (6,4 I_c \% - 23) L$$

$$M = (110 - 2,5 I_c \%) L$$

$$7 \% < I_c < 15 \%$$

$$15 \% < I_c < 40 \%$$

Débits max (m³/s)

$$Q_{\max} = 0,135 M^{0,78}$$

Extension (m)

$$L = 75 M^{0,31}$$

$$L_{\max} = 350 M^{0,25}$$

$$L_{\min} = 6,2 M^{0,45}$$

Vitesse moyenne (m/s)

$$V = R_h^{0,67} I^{0,5}$$

Longueur du dépôt sur le cône

$$L_k = 25 M^{0,3}$$

Méthodes globales d'estimation du volume des laves torrentielles

V, volume des laves (m³) ; S, superficie du bassin versant (km²) ; I, pente moyenne du torrent (%) ; L, longueur du torrent ; I_{bv}, dénivelée spécifique du bassin versant ; SNV, superficie non végétalisée du bassin versant (%) ; K, facteur de torrentialité ; IG, indice géologique selon d'Agostino ; IGM, indice géologique selon Marie ; P, pluie sur 24h décennale.

Méthode (référence)	Formule
Takei (1984)	$V = 13600.S^{0,61}$
Kronfellner-Kraus (1985)	$V = K.S.I$
D'Agostino (1996)	$V = 29100.S^{0,67}$
D'Agostino et al. (1996)	$V = 39.S.I^{1,5}.IG$
Bianco et al. (2001)	$V = 0,49.S.I_{bv}^{1,6}.IGM.(SNV+2)^{0,2}$
Brochot et al. (2003)	$V = 8,13e-5.S.I_{bv}^{1,7}.IGM.(SNV+2)^{0,2}.P^2$
Rickenmann (1995)	$V = 17000 - 27000.S^{0,78}$

Méthode d'estimation du volume des laves torrentielles

Pente (degrés)	Matériau du lit	Berges	Conditions de stabilité (avant événement)	Taux d'érodabilité e (m ³ /m)
20 – 35	Roche-mère	Non-érodable	Stable (quasi-absence de matériaux mobilisables)	0 – 5
10 – 20	Fine couche de sédiments ou de sol meuble sur la roche-mère	Non-érodable (roche-mère)	Stable	5 – 10
10 – 20	Couche meuble épaisse ou moraine	Plus de 5m de haut	Stable	10 – 15
10 – 20	Couche meuble épaisse ou moraine	Plus de 5m de haut	Pentes latérales stables	15 – 30
10 – 20	Couche meuble épaisse ou moraine	Plus de 20m de haut	Pentes latérales potentiellement instables (glissements de berge)	Jusqu'à 200 (à considérer comme une source ponctuelle)

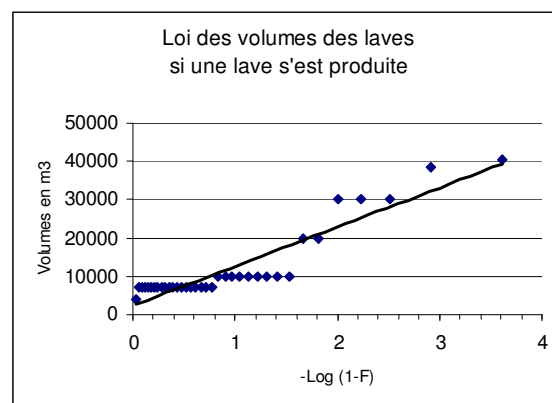
Méthode géomorphologique de Hungr (1984) : $V = \Sigma (L_i \cdot e_i)$

Méthode statistique : exemple

- Exploitation des données historiques (archives RTM, ...) même qualitatives
 - Classes de magnitude (en relation avec les dégâts observés) associées à des fourchettes de volume
 - Ajustement statistique adapté
- Torrent du Pousset :**
- Maurienne (RD)
 - 5,8 km² – 36 % dénudés
 - 2945 m – 810 m (CD 980 m)
 - Lit principal : 2,5 km ; 47,6 %
 - 36 laves en 120 ans (1877-1996)
 - 28 années ont connu des laves

Application

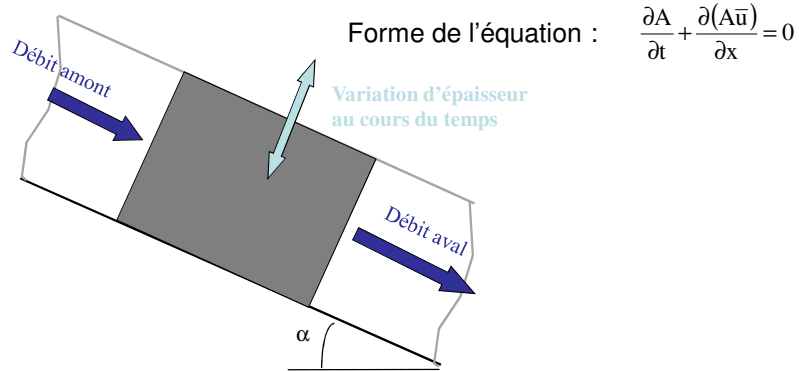
Ajustement d'une loi exponentielle :



- T = 100 ans
V = 33 000 m³
- T = 10 ans
V = 15 000 m³

Écoulement transitoire, généralités

conservation de la masse

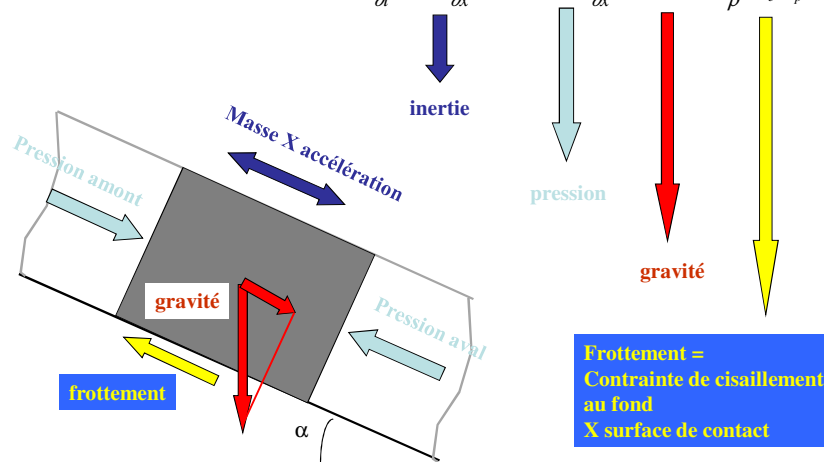


Si débit amont \neq débit aval, l'épaisseur d'écoulement varie

Écoulement transitoire, généralités

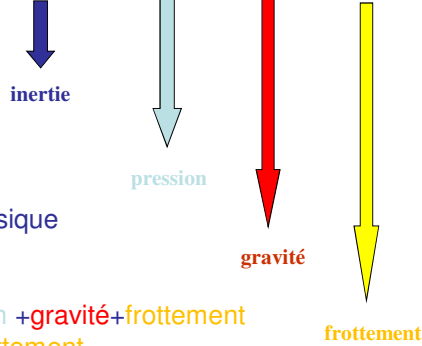
somme des forces = masse X accélération

Forme de l'équation : $\frac{\partial(A\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(A\bar{u}^2)}{\partial x} + gA \cos(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} = g \sin(\theta)A - \frac{1}{\rho} P_e \tau_p$



Ecoulement transitoire / permanent uniforme / non uniforme

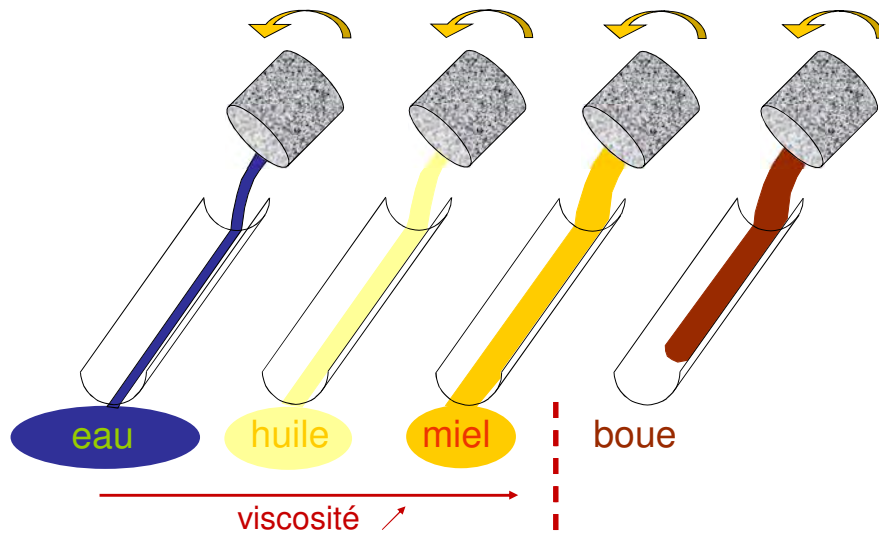
Forme de l'équation :
$$\frac{\partial(A\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(A\bar{u}^2)}{\partial x} + gA \cos(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} = g \sin(\theta)A - \frac{1}{\rho} P_c \tau_p$$



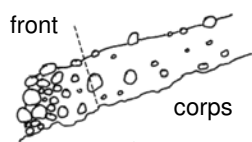
Transitoire : on doit tout résoudre
Modèle numérique ou modèle physique

Permanent :
 - non-uniforme : on résout pression + gravité + frottement
 - uniforme : on résout gravité + frottement
 Résolution analytique possible (feuille Excel par exemple)

Lois de comportement

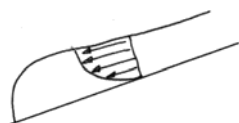


Étude au laboratoire

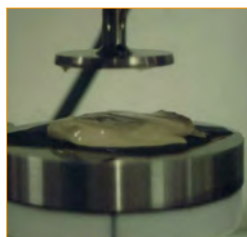


Lave torrentielle

représentée par

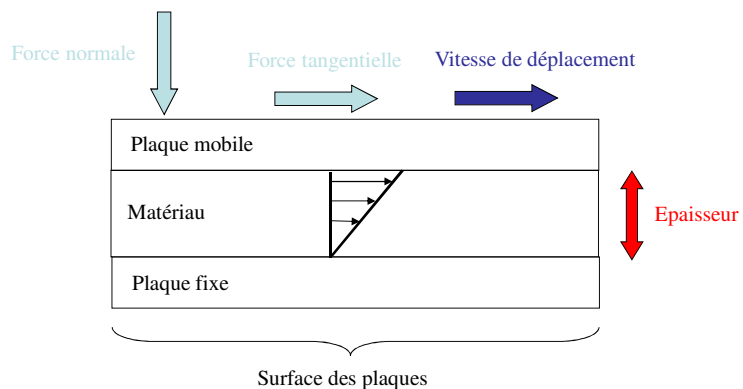


Écoulement laminaire
d'un fluide visqueux



Recherche des
« lois de comportement »
(rhéologie)
et des lois d'écoulement

Contrainte et taux de cisaillement



Contrainte de cisaillement (Pa) = force tangentielle / surface

Taux de cisaillement (s⁻¹) = vitesse / épaisseur

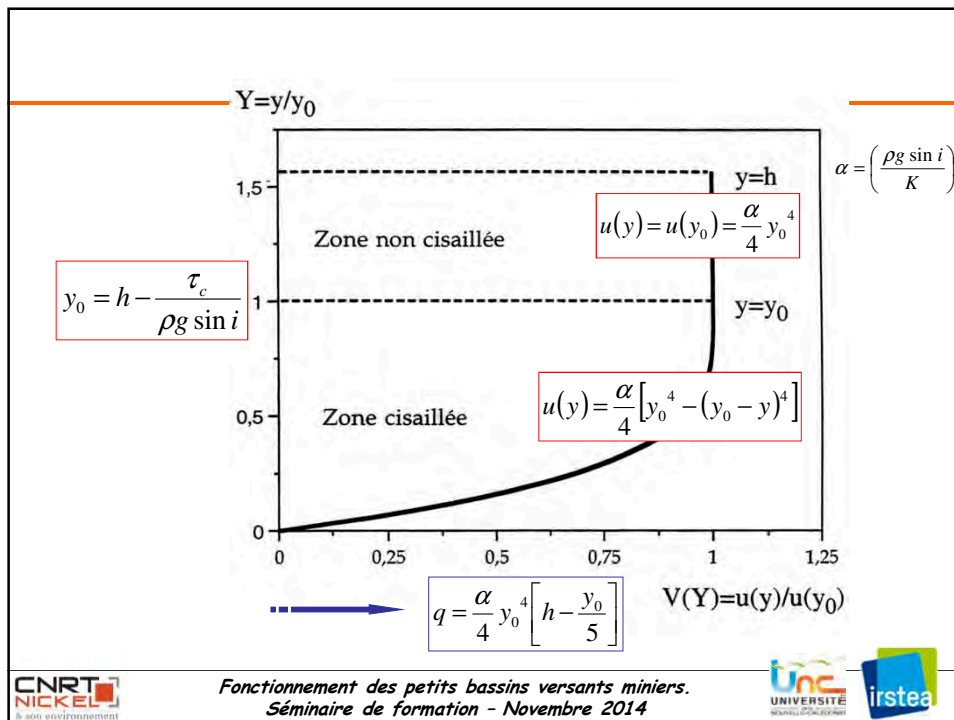
Lois de comportement des laves torrentielles « boueuses »

Mélange boueux naturel (fraction fine > 10%) : les grains sont en suspension au milieu d'un mélange eau-fraction fine qui, au cours de l'écoulement, lubrifie leurs mouvements relatifs et impose son type de comportement.

→ loi de comportement (*Herschel-Bulkley*):

$$\begin{aligned} \text{si } \tau < \tau_c, & \quad du/dy = 0 \\ \text{si } \tau > \tau_c, & \quad \tau = \tau_c + K(du/dy)^{1/3} \end{aligned}$$

Rappel : $\tau = \rho g y \sin i$; τ_c seuil de contrainte



Formules en régime permanent

- Contrainte à la paroi :

$$\tau_p = \tau_c \left[1 + A \left(\frac{K}{\tau_c} \left(\frac{U}{h} \right)^{1/3} \right)^{0,9} \right]$$

- Vitesse moyenne :

$$U = \left(\frac{\tau_c}{K} \right)^3 h \left[\frac{1}{A} \left(\frac{\rho g R_H \sin i}{\tau_c} - 1 \right) \right]^{10/3}$$

- Coefficients géométriques

- chenal rectangulaire
- avec $h/L < 1$

$$A = 1,93 - 0,43 \arctg \left[\left(\frac{10h}{L} \right)^{20} \right]$$

- chenal trapézoïdal
- avec $h/B < 4$

$$A = 1,93 - 0,6 \arctg \left[\left(\frac{0,4h}{B} \right)^{20} \right]$$

Notations :

τ_c : seuil de contrainte

τ_p : contrainte à la paroi

ρ : masse volumique du matériau

K : coefficient du modèle de Herschel-Bulkley

h : hauteur d'écoulement

U : vitesse moyenne d'écoulement dans une section

i : angle de la pente par rapport à l'horizontale

R_H : rayon hydraulique calculé selon la méthode classique en hydraulique, rapport de la section mouillée au périmètre mouillé

A : coefficient géométrique

$A=1,93$ dans le cas théorique d'un chenal infiniment large

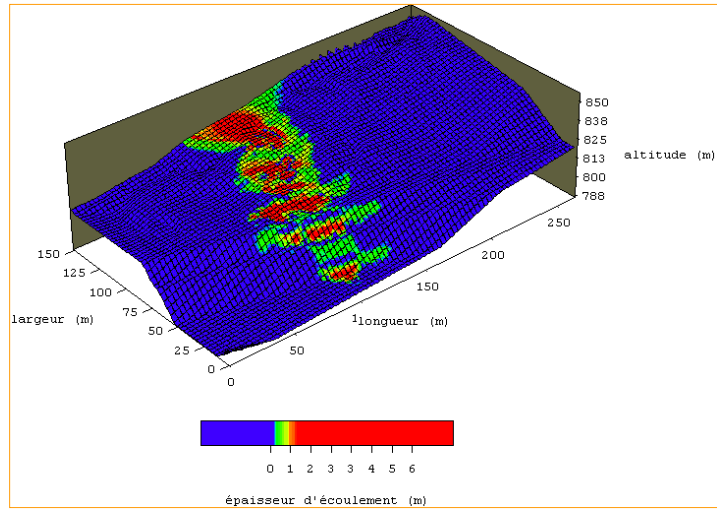
\arctg : fonction arc-tangente

Dans le calcul des coefficients géométriques, les angles sont exprimés en radians

L : largeur d'un chenal rectangulaire

B : base d'un chenal trapézoïdal à berges inclinées à 45°

Utilisation en modélisation



Modélisation : exemple

WARTSCHENBACH (Autriche)



16/08/1997

20 - 25000 m³



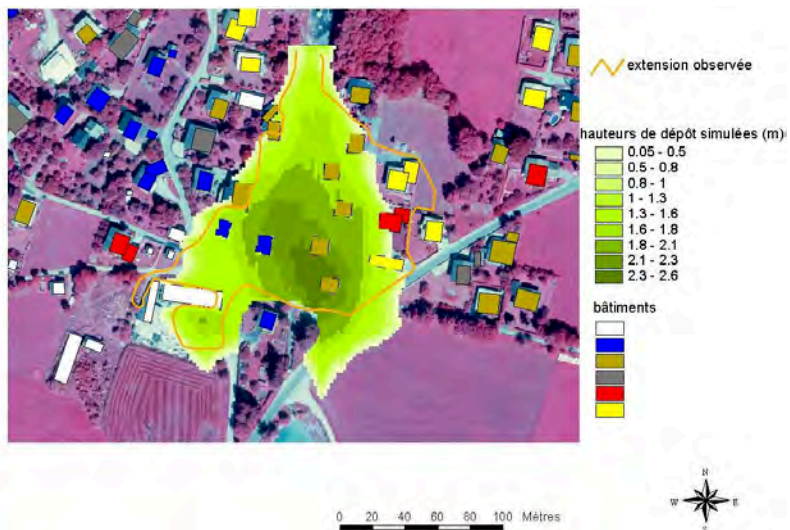
Modélisation : exemple

détermination des paramètres rhéologiques

à partir de la forme des dépôts






Résultat






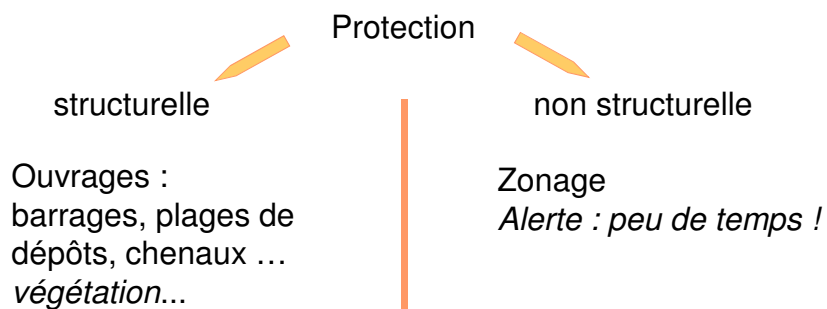
Essai de typologie des laves torrentielles (C. Ancey)

Nom scientifique proposé		Lave torrentielle à comportement viscoplastique	Lave torrentielle à comportement frictionnel-collisionnel	Lave torrentielle à comportement frictionnel-visqueux
Nom commun		Lave torrentielle à matrice boueuse	Lave torrentielle granulaire	de type Lahar
Caractéristiques de terrain	Forme et nature des dépôts	Régulier, avec des limites assez bien définies, encore fluide quand saturé d'eau, très cohésif quand sec	Chaotique avec des limites pas nécessairement franches, pas de cohésion des dépôts	En forme de terrasse alluvionnaire, cohésion suffisante pour supporter le poids d'un homme
	Forme des bourrelets et des lobes	Forme arrondie 	Faces planes 	Pas de bourrelet 
	Pente de la zone d'arrêt	> 5%	> 15 %	> 0,1 %
Témoignages	Vitesse observée (m/s)	1-30	?	1-30

Principes de protection

	Correction active	Défense passive
Implantation des ouvrages	Haut du bassin –versant (bassin de réception, chenal...)	Partie aval du torrent (sommets du cône de déjection)
Objectifs	Supprimer les causes des phénomènes	Limiter ou supprimer les conséquences des phénomènes
Moyens	Barrages / seuils Traitement de l'érosion révégétalisation	Canalisation (transit) Plages de dépôts (stockage)
Stratégie	Moyen et long terme	Court terme
		

Principes de protection



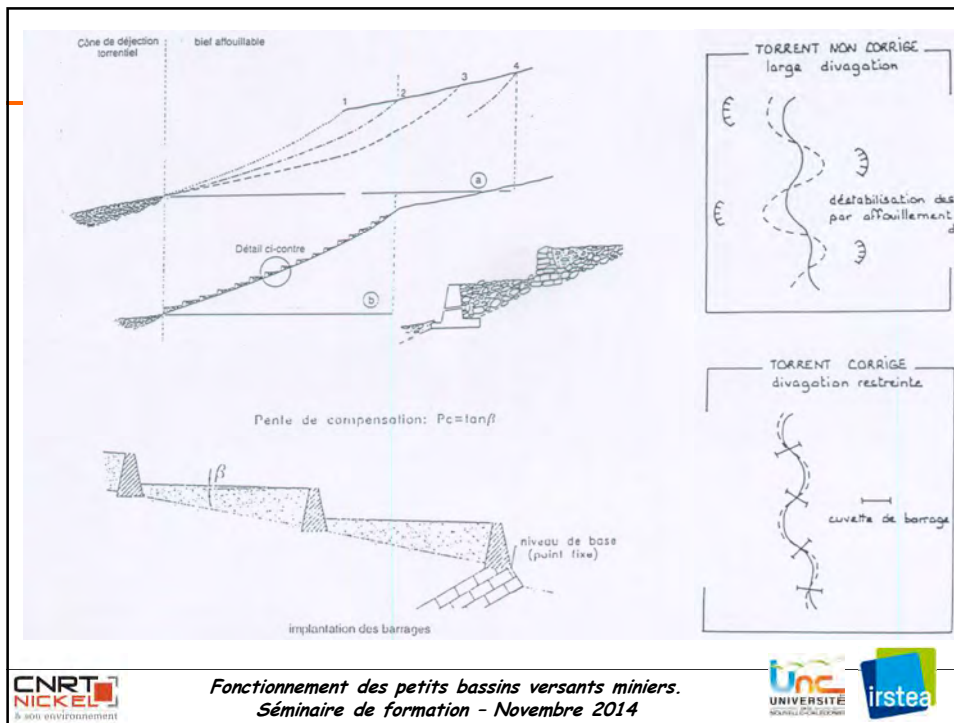
Protection active

- objectif : supprimer les processus érosifs
- génie civil + génie biologique
- effets à long terme



Barrages de correction torrentielle





Exemples de pathologies



Fruit excessif

Absence d'ancrage aval et de parafouille au pied des seuils



Dégradation avec mise à nu de la nappe de géotextile sur le parement supérieur d'un seuil

Exemples de pathologies



Arrangement des blocs



ancrage en
berge et
cuvettes
déversoir



Absence de parafouille et
début d'affouillement en
pied



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



Protection passive

- protection rapprochée
- effets immédiats
- zonage, digues, plages de dépôts...



Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014



Plages de dépôt



CNRT
NICKEL
& son environnement

Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014

UNC
UNIVERSITÉ
SUD-ALPES
irstea

Ouvrages de protection passive



Endiguements / canalisations

CNRT
NICKEL
& son environnement

Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014

UNC
UNIVERSITÉ
SUD-ALPES
irstea



*Fonctionnement des petits bassins versants miniers.
Séminaire de formation - Novembre 2014*

