



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Section Sciences et Ingénierie de l'Environnement

Cours: « Gestion du régime hydrique des
sols »

Assainissement du sol

Prof. A. Mermoud

Décembre 2007

ASSAINISSEMENT DU SOL

L'assainissement englobe diverses techniques qui assurent l'élimination des eaux excédentaires du sol, ce qui permet de le cultiver et d'obtenir une production suffisante et de qualité

L'assainissement comporte 3 phases:

- **captage** ou collecte des eaux excédentaires (drainage à la parcelle)
- **acheminement** par un réseau de collecteurs ou de fossés
- **restitution** au réseau hydrographique naturel (exutoire)



Causes de l'excès d'humidité du sol

3 causes essentielles

1. Apports externes et/ou parasites d'eau

- ✓ apports de l'extérieur de la zone
- ✓ apports en provenance d'un cours d'eau
- ✓ apports internes parasites ("mouillères")

2. Présence prolongée d'une nappe peu profonde

3. Stagnation temporaire des eaux de précipitation

- ✓ défaut d'infiltrabilité
- ✓ défaut de drainage interne

Apports externes et/ou apports parasites d'eau

- Apports d'eau en provenance de l'extérieur de la zone à assainir

Remède: collecteur de ceinture (fossé ou drain placé au fond d'une tranchée très perméable)

- Apports d'eau provenant d'un cours d'eau

- ✓ alimentation excessive de la nappe

Remède: contre-canal

- ✓ débordement occasionnel

Remède: ouvrages de maîtrise des crues*

- Apports internes parasites localisés ("mouillères")

- ✓ dans les dépressions ou au droit de ruptures de pente

Remède: captages ou adaptation locale du drainage de détail

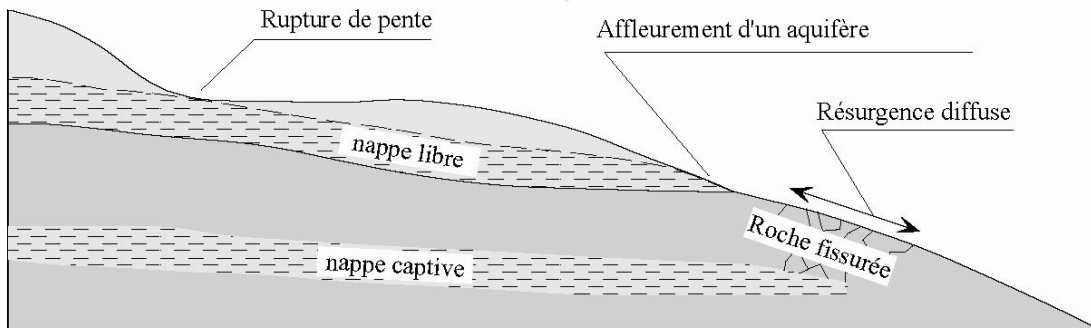
- ✓ affleurements d'aquifères

Remède: tranchée drainante

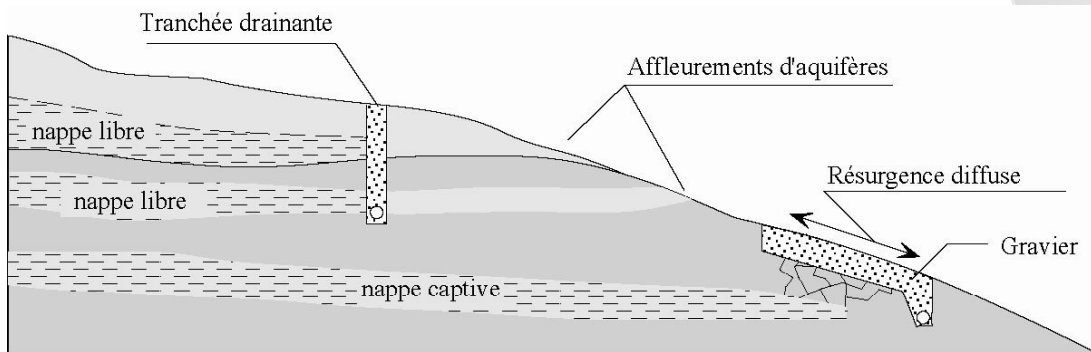
- ✓ résurgences plus ou moins diffuses d'eau profonde

Remède: installation d'un matériau perméable sur l'ensemble de la zone de résurgence et tranchée drainante

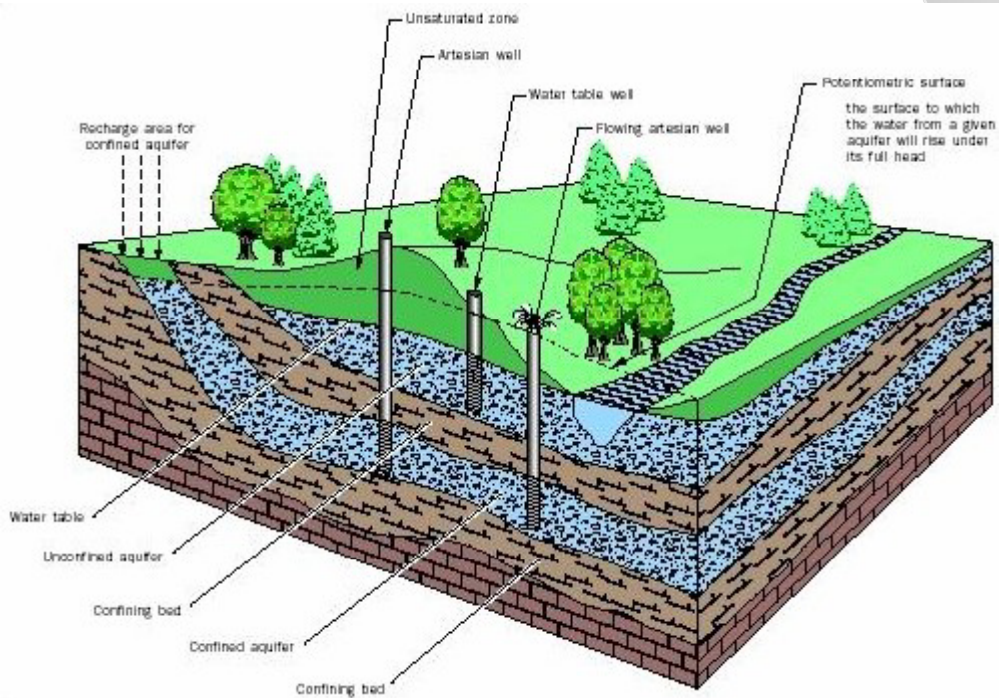
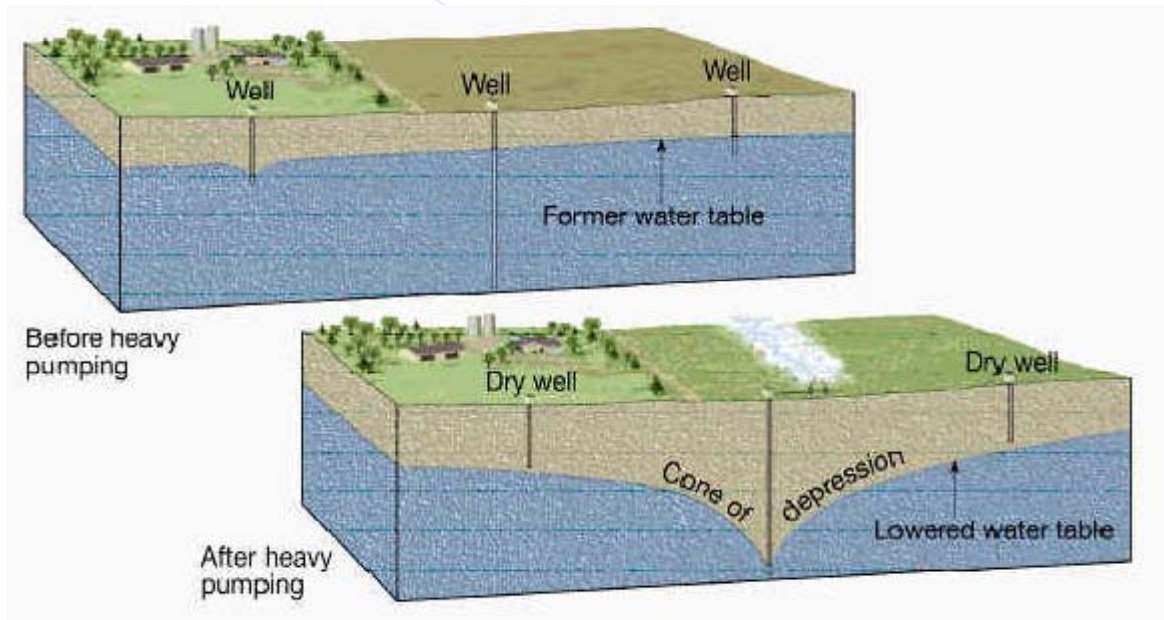
* correction, endiguement, systèmes de rétention; aménagements de surface



Causes de formation de "mouillères"



Exemples d'assainissement de "mouillères"



Présence prolongée d'une nappe peu profonde

Présence prolongée d'une nappe peu profonde

- **drainage par tuyaux enterrés**
- **éventuellement, drainage par fossés**
- **dans certains cas, drainage par puits**
- **en présence d'apports latéraux importants: interception préalable**

Stagnation temporaire des eaux de pluie

- **Défaut d'infiltrabilité :**

dû à la présence d'une strate peu perméable en surface (croûte de battance, tassement superficiel, etc.) qui empêche l'infiltration

→ en terrain plat, les eaux de pluie stagnent en surface

- **Défaut de drainage interne :**

infiltration profonde empêchée par la faible conductivité hydraulique du sol ou par la présence d'une couche peu perméable à faible profondeur (y c. semelle de labour) qui bloque l'infiltration et provoque l'apparition d'une nappe perchée.

Stagnation temporaire des eaux de pluie : remèdes

- **Défaut d'infiltrabilité :**
 - ✓ si les horizons sous-jacents présentent une bonne conductivité hydraulique: **amélioration de la structure** de la strate superficielle
 - ✓ dans le cas contraire: **drainage de surface**

- **Défaut de drainage interne :**
 - ✓ en présence d'une semelle de labour: **sous-solage profond**
 - ✓ sols peu perméables ou nappe perchée peu profonde: **drainage de surface** et/ou **drainage souterrain**; si nécessaire, **techniques associées**

Principales méthodes de drainage

Drainage de surface

Drainage de subsurface

- par fossés à ciel ouvert
- par drains enterrés
 - *classique*
 - *techniques associées*
 - ✓ drainage taupe
 - ✓ drainage par galeries drainantes

Autres techniques d'abaissement de la nappe (marginales)

- drainage par puits
- biodrainage

Systemes de drainage

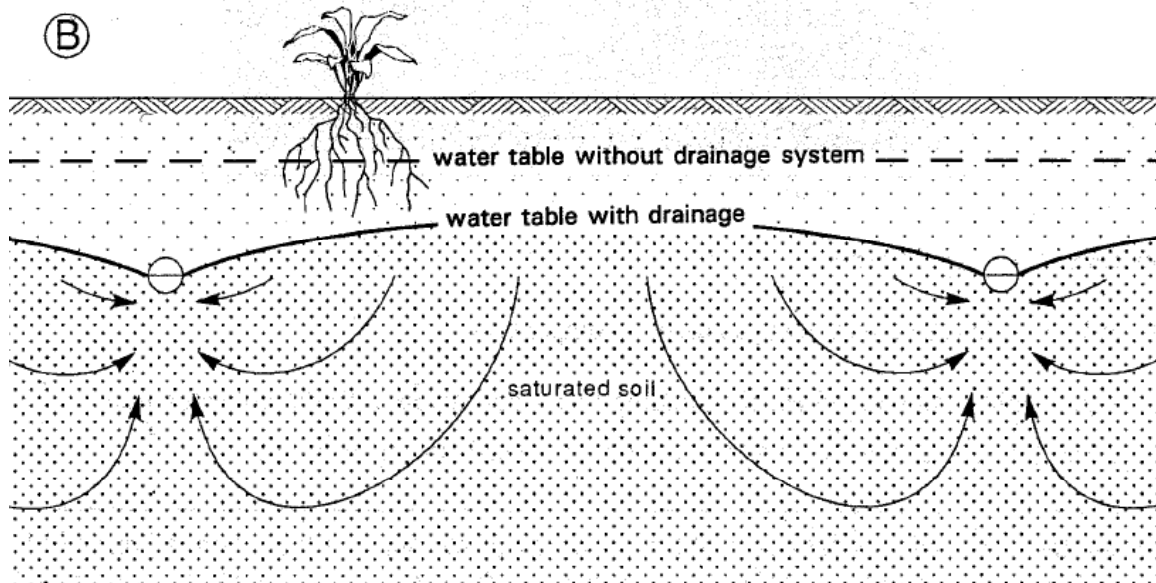
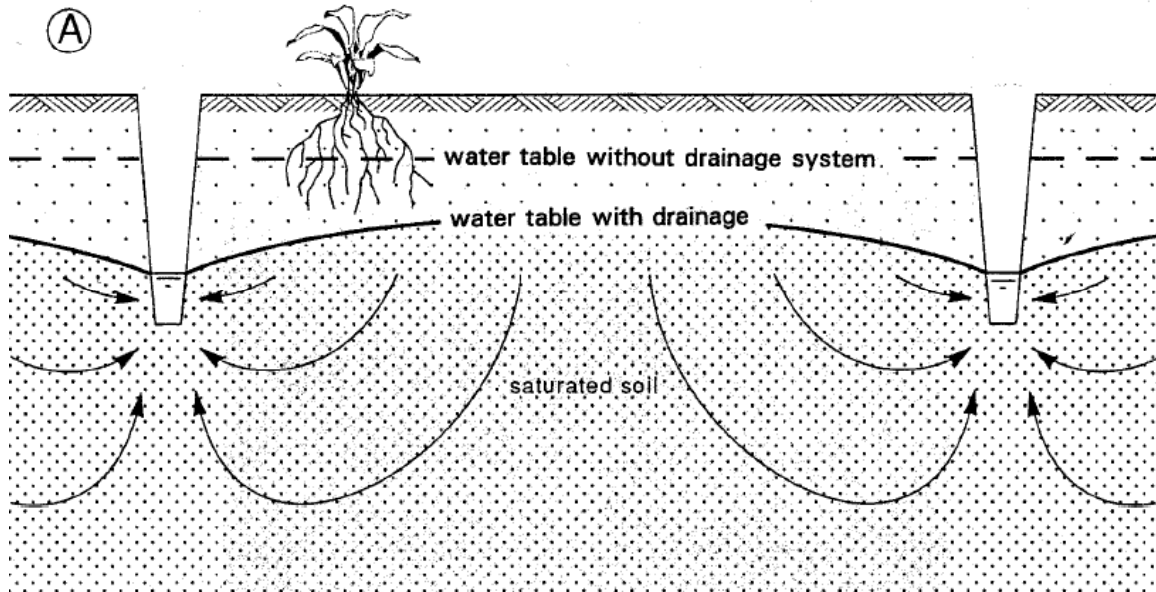
A. Drainage de surface

B. Drainage de subsurface

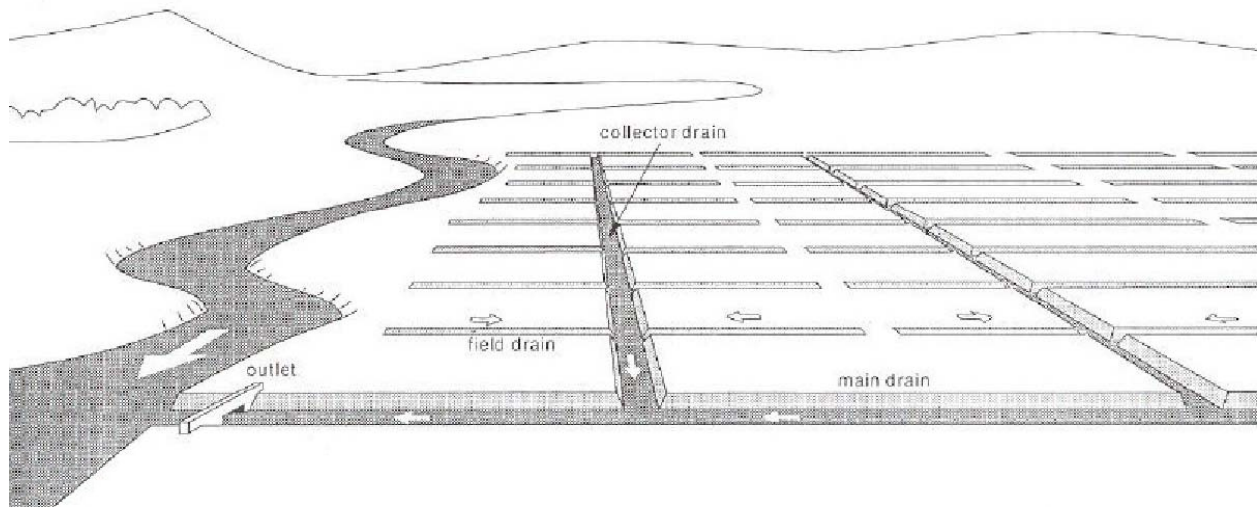
- par fossés à ciel ouvert
- par drains enterrés
 - *classique*
 - *techniques associées*
 - ✓ drainage taupe
 - ✓ drainage par galeries drainantes

C. Autres techniques de contrôle de la nappe

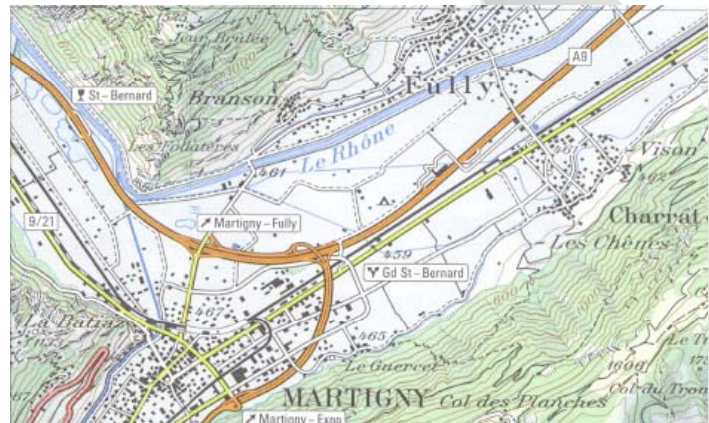
- drainage par puits
- biodrainage



Drainage de subsurface par fossés (A) et par tuyaux enterrés (B)



Drainage par fossés



Canal de drainage



Station de pompage

Drainage par fossés

Inconvénients:

- **perte de surface cultivable**
- **difficulté d'accès**
- **entretien onéreux**
- **maladies hydriques**



Envisageable dans certains cas:

- **drainage de surface et souterrain simultanés**
- **risques élevés de colmatage chimique**
- **raisons financières**
- **sols tourbeux**

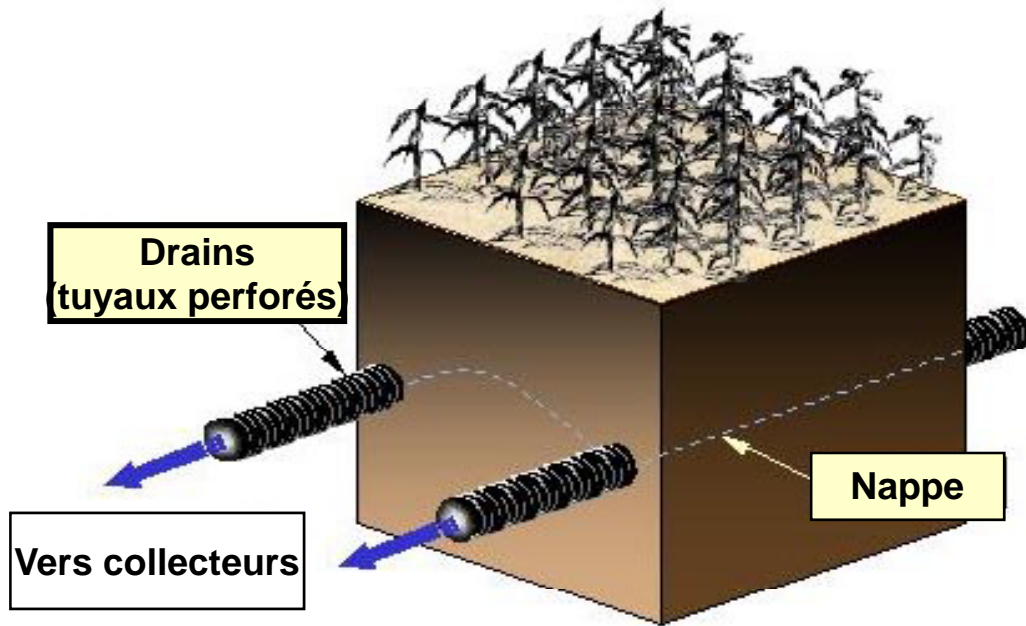


Drainage par drains enterrés

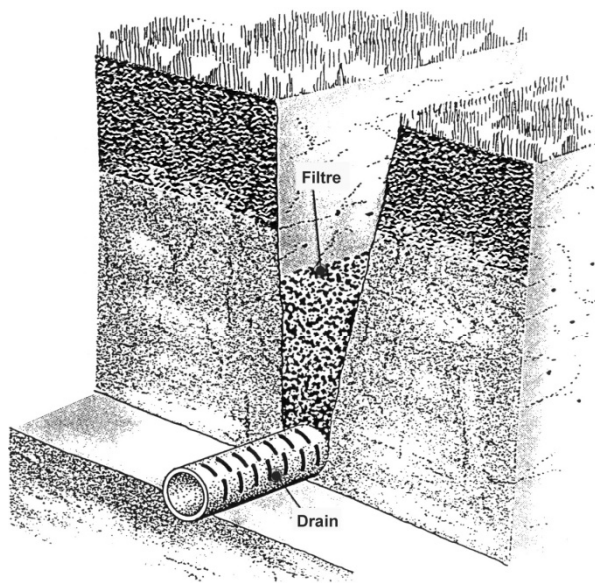
- installation dans le sol de drains: tuyaux perforés de 4 à 10 cm de diamètre
- les drains se jettent dans un réseau de collecteurs qui évacuent l'eau vers un émissaire (rivière, lac, etc.)
- les collecteurs recueillent également souvent les eaux de ruissellement de surface par l'intermédiaire de sacs (regards couverts d'une grille)
- en cas de pente insuffisante pour évacuer les eaux par gravité, les eaux sont relevées par une station de pompage
- aux points névralgiques (jonctions entre collecteurs, changements de direction et de pente, etc.), on place des chambres de visite*.



* regards en ciment servant au contrôle, à l'aération et au rinçage des conduites et collecteurs



Drainage par drains enterrés



Techniques associées

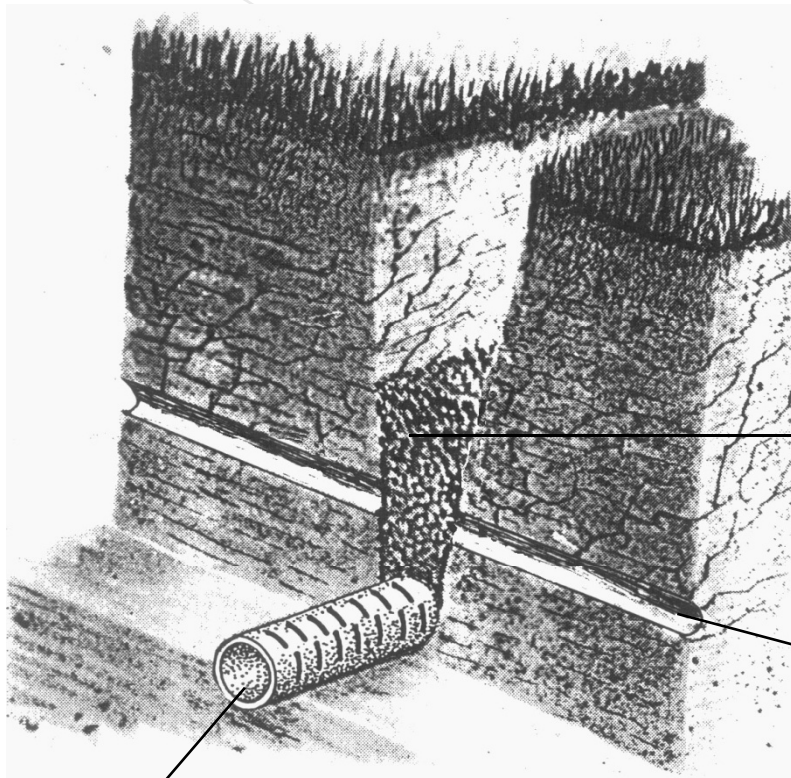
Drainage - taupe

Associe un réseau de drains conventionnel à grand écartement (30 à 60 m et plus) surmontés d'un remblai poreux, à un réseau dense de galeries taupes*.

Aspects pratiques

- galeries perpendiculaires aux files de drains
- diamètre: env. 4 cm
- profondeur: 40 à 70 cm
- écartement: 2 à 4 m
- durée de vie: variable (quelques années)

* Les galeries taupes sont réalisées à l'aide d'un tracteur solidaire d'une charrue-taupe munie d'un boulet expanseur. Ce dernier provoque un lissage et un compactage des parois de la galerie qui conserve sa forme. Les sols doivent donc être plastiques (teneur en argile élevée et humidité suffisante).

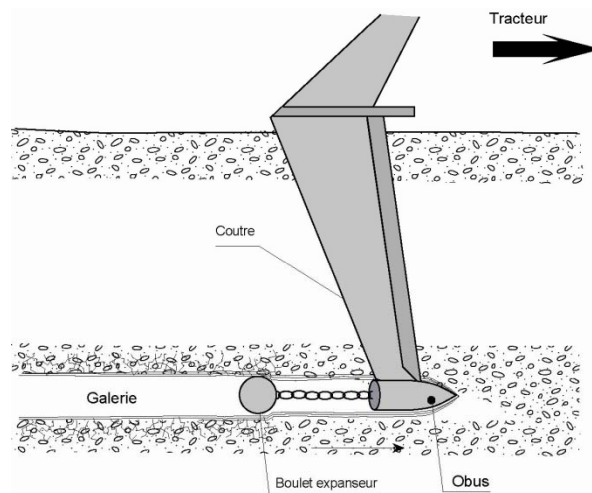


drain conventionnel

remblai poreux

galerie taupe

Schéma de principe du drainage taupe



Réalisation des galeries taupe

Techniques associées

Galeries drainantes

Associe un réseau de drains conventionnel à grand écartement (30 à 60 m) à un réseau dense de galeries drainantes perpendiculaires. Drains et galeries sont surmontés d'une chemise en gravier.

Aspects pratiques

- **galeries** (Φ : 10 - 12 cm) surmontées d'une chemise étroite (env. 5 cm de large), le tout rempli de gravier; prof.: 70 à 80 cm; écartement: 10 à 15 m
- **drains**: prof.: env. 1.2 m; pente > 0.3 %; chemise drainante: 10 à 20 cm de large
- **collecteurs**: prof.: env. 1.5 m; pente > 0.1 %
- **chambres de nettoyage** aux jonctions drains/collecteurs et **chambres de visites** aux jonctions collecteurs secondaire/col. principal

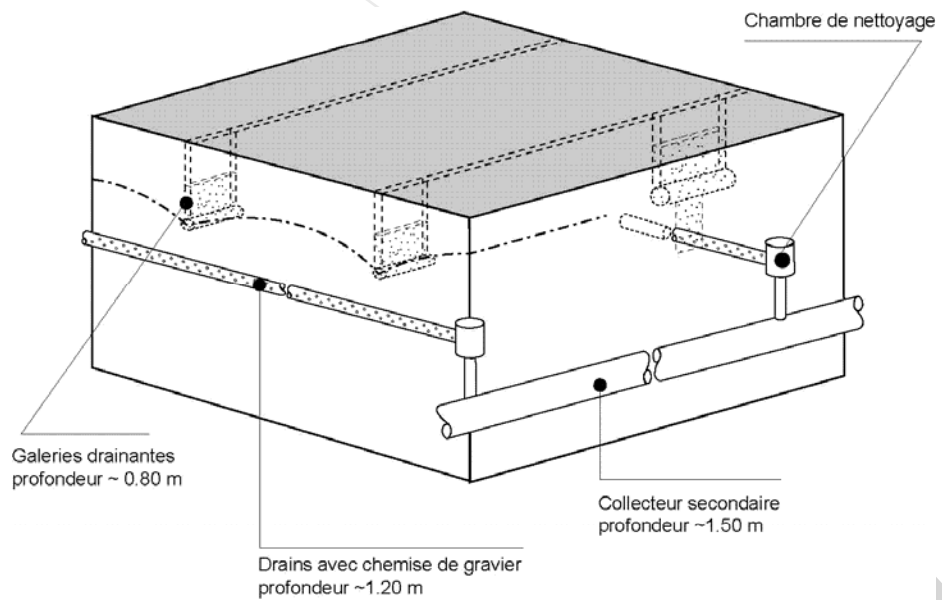
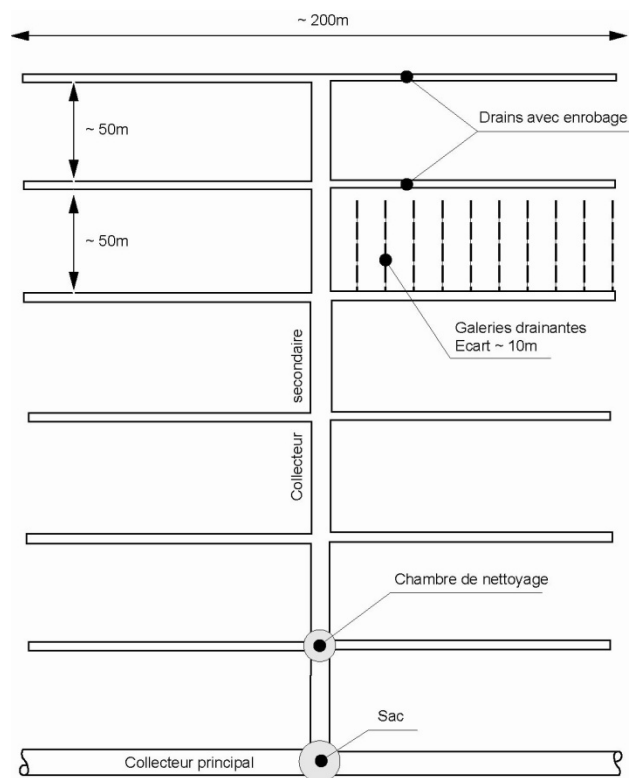


Schéma de principe du drainage par galeries drainantes



Autres techniques de contrôle de la nappe

Drainage par puits

Consiste à provoquer un abaissement de la nappe par pompage dans un réseau de puits régulièrement distribués dans l'espace, de sorte à ce que leurs cônes de dépression se recoupent.

Méthode utilisée principalement lorsque la nappe doit être abaissée fortement, en particulier pour prévenir une salinisation du sol par remontées capillaires (salinisation capillaire).

Bio drainage et bio-élimination des eaux d'infiltration

Plantation de rangées d'arbres (eucalyptus, acacias, etc.) ou d'autres plantes halophytes autour des champs agricoles afin d'éliminer l'eau excédentaire du sol et d'abaisser le niveau de la nappe.

Plantation d'arbres le long de canaux affectés de pertes importantes pour assécher le sol et limiter la percolation profonde.

Avantages:

- faible investissement supportable par les bénéficiaires
- pas de recours à des installations et matériels externes
- procédé naturel, facile à associer à une approche de développement rural intégré

Inconvénients:

- emprise
- contrôle peu précis de la nappe
- peu actif dans l'élimination des sels accumulés dans la zone racinaire

Paramètres de dimensionnement des réseaux d'assainissement de subsurface



Paramètres de dimensionnement des réseaux d'assainissement de subsurface

Les **caractéristiques** des réseaux:

- écartement des drains ou fossés
- profondeur
- débits à évacuer
- dimension des drains, fossés et collecteurs
- etc.

se définissent sur la base de différents **paramètres**, en particulier:

- durée admissible de submersion
- débit caractéristique de drainage
- profondeur souhaitable de la nappe
- caractéristiques du sol

Durée admissible de submersion des cultures

Dépend:

- du moment de la submersion
- du type de végétal

Valeurs fréquemment retenues:

- | | |
|----------------------------|----------------|
| ✓ Cult. maraîchères | 1 jour |
| ✓ Céréales | 3 jours |
| ✓ Prairies | 7 jours |

Débit caractéristique de drainage

Le réseau de drainage est dimensionné pour pouvoir évacuer la **pluie critique i_c** de durée égale à la durée de submersion admissible (DAS) et de période de retour donnée (en général, 5 ans).

Le **débit caractéristique q_c** que les drains doivent pouvoir évacuer se calcule à partir de l'intensité i_c de la pluie critique:

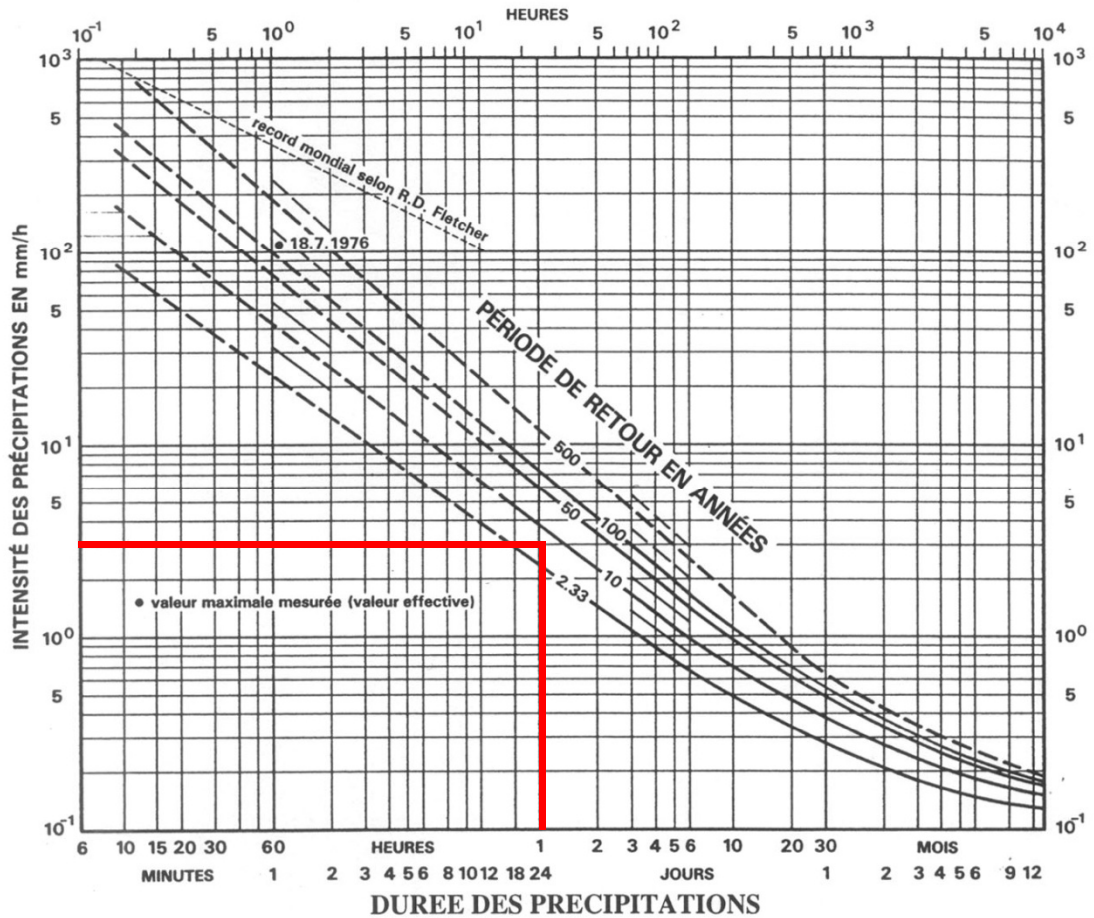
$$q_c = (1 - e) i_c$$

e : coefficient de ruissellement

$1 - e$: coefficient de restitution

Exemple de courbes intensité-durée-fréquence

Station de Marcelin sur Morges (1926 – 1977)



Si DAS = 1 jour $\rightarrow i_c \cong 3 \text{ mm/h} = 8.3 \text{ l/s ha}$

Pour $1 - e = 0.6 \rightarrow q_c = 5 \text{ l/s ha}$

("Précipitations extrêmes dans les Alpes suisses et leurs régions limitrophes"; FNP Birmensdorf)

Profondeur critique de la nappe

En général, les drains sont placés de telle sorte que pendant la pluie critique (cas du régime permanent) ou après une durée déterminée (cas du régime variable), la nappe se trouve aux profondeurs minimales suivantes:

- 0.2 à 0.3 m pour les prairies**
- 0.5 m pour les terres cultivées**
- 0.8 m pour les vergers**

Profondeur des drains

Critères de choix:

- efficacité hydraulique: à priori, intérêt à accroître la profondeur
- considérations économiques

Conditions locales:

- cote de l'eau à l'exutoire
- conditions pédologiques
- risques d'assèchement excessif du sol
- machines disponibles
- risques de colmatage racinaire et de gel

Profondeurs courantes: 0.8 à 1.2 m

**Systemes de drainage pour contrôler la salinité:
profondeur fréquemment beaucoup plus importante**

Caractéristiques du sol

- **conductivité hydraulique à saturation**
- **porosité de drainage**
- **zonation du profil de sol**
- **granulométrie des différents horizons**
- **caractéristiques chimiques (pH, teneur en Fer, etc.).**

**Calcul de l'écartement des drains,
des débits à évacuer et équation
de la nappe**



Approches de conception d'un réseau d'assainissement

La conception du réseau diffère selon les caractéristiques pluviométriques de la région:

- pluies longues et fréquentes durant la période critique (le sol n'a pas le temps de se ressuyer complètement entre deux épisodes pluvieux) : hypothèse du **régime permanent** plausible.

Dans ce cas, on cherche à maintenir la nappe en dessous d'un niveau maximum à ne pas dépasser.

- pluies intenses et de courte durée, relativement espacées dans le temps: approche en **régime variable**.

Dans ce cas, on cherche à obtenir un abaissement suffisant de la nappe dans un délai donné après la fin de la pluie.

Calcul de l'écartement des drains

Cas de figures étudiés

- **Régime permanent:**
 - drains posés sur une couche imperméable
 - drains situés au-dessus d'une couche imperméable
- **Régime variable:**
 - drains posés sur une couche imperméable
 - drains situés au-dessus d'une couche imperméable

Hypothèses de Dupuit-Forchheimer

- milieu homogène et isotrope
- drains posés sur le substratum imperméable
- composante verticale des vitesses négligeable
- vitesses identiques en tous points d'une même verticale

→ équipotentiels théoriques verticales

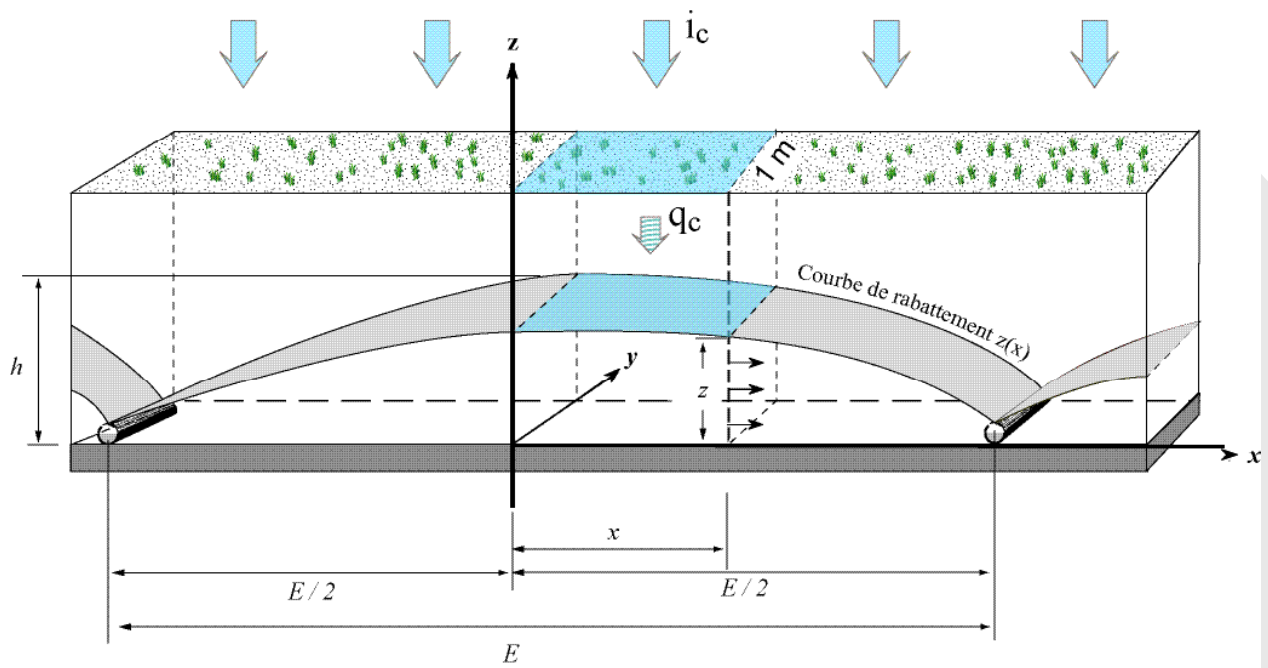
→ écoulement unidimensionnel horizontal (1D – H) pour lequel le flux vaut (Darcy):

$$q = -K \frac{dH}{dx} = -K \frac{dz}{dx}$$

- q : flux ou débit par unité de surface
K : conductivité hydraulique à saturation
H : charge hydraulique
z(x) : courbe de dépression (équation) de la nappe

Sous les hypothèses retenues, le flux en chaque point est donc proportionnel à la pente de la nappe.

**Rabattement par drains reposant sur une couche
imperméable, en régime d'alimentation permanent**



Rabatement par drains reposant sur une couche imperméable, en régime d'alimentation permanent

$$Q_x = q_c x \quad \text{et:} \quad Q_x = -K \frac{dz}{dx} z$$
$$q_c \int_0^x x dx = -K \int_h^z z dz \quad q_c \frac{x^2}{2} = -\frac{K}{2} (z^2 - h^2)$$

soit: $q_c x^2 = Kh^2 - Kz^2$

Calcul de l'écartement E

$$x = E/2 \quad z = 0 \quad \text{soit:} \quad q_c \frac{E^2}{4} = Kh^2$$

et donc: $E = 2h \sqrt{\frac{K}{q_c}}$

Equation de la courbe de rabattement

$$q_c x^2 = Kh^2 - Kz^2$$
$$\frac{q_c x^2}{Kh^2} = 1 - \frac{z^2}{h^2} \quad \text{soit:} \quad \frac{q_c x^2}{q_c \frac{E^2}{4}} + \frac{z^2}{h^2} = 1$$

et donc*: $\frac{4x^2}{E^2} + \frac{z^2}{h^2} = 1$

* Equation d'une ellipse de demi-grand-axe E/2 et demi-petit axe h

Rabattement par drains reposant sur une couche imperméable, en régime permanent

Ecartement E des drains

$$E = 2h \sqrt{\frac{K}{q_c}}$$

- h : hauteur de la nappe à l'inter-drains
h = p - n (p : profondeur des drains;
n : profondeur minimale de la nappe)
q_c : débit caractéristique de drainage
K : cond. hydraulique à saturation du sol

Equation de la courbe de rabattement

$$\frac{4x^2}{E^2} + \frac{z^2}{h^2} = 1$$

Nappe cylindrique
de forme elliptique

Débit q_y évacué par m de longueur de drain

$$q_y = E q_c$$

Rabattement par drains posés sur une couche imperméable

Régime permanent

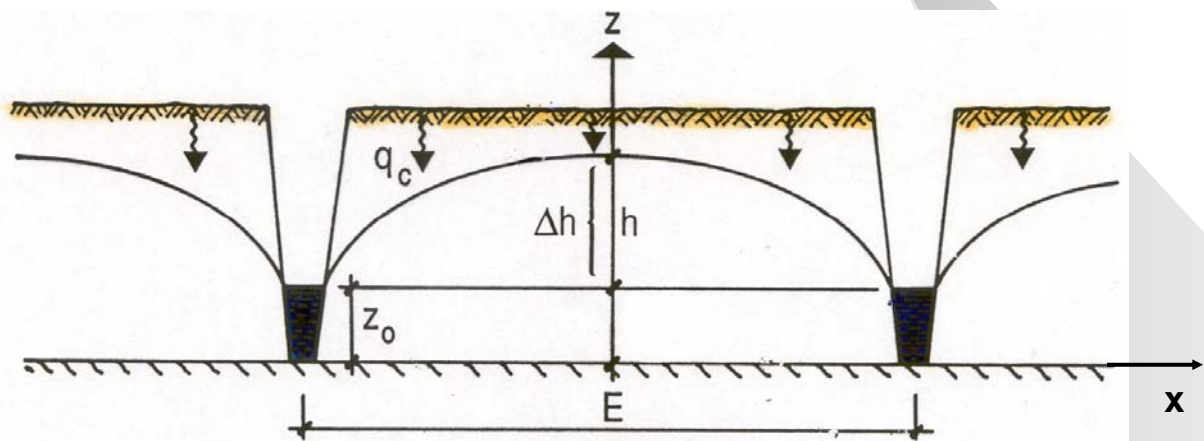
Cas où la zone voisine des drains n'est pas suffisamment filtrante; la condition au droit des drains devient:

$$x = E/2 \qquad z = h_e$$

Ecartement E des drains:

$$E = 2 \sqrt{\frac{K}{q_c} (h^2 - h_e^2)}$$

Rabatement par fossés reposant sur une couche imperméable, en régime permanent



Rabattement par fossés reposant sur une couche imperméable, en régime d'alimentation permanent

$$Q_x = q_c x \quad \text{et:} \quad Q_x = -K \frac{dz}{dx} z$$
$$q_c \int_0^x x \, dx = -K \int_h^z z \, dz \quad q_c \frac{x^2}{2} = -\frac{K}{2} (z^2 - h^2)$$

soit:

$$q_c x^2 = Kh^2 - Kz^2$$

Calcul de l'écartement E

$$x = E/2 \quad z = z_0 \quad \text{soit:} \quad q_c \frac{E^2}{4} = Kh^2 - Kz_0^2$$

et donc:

$$E = 2 \sqrt{\frac{K}{q_c} (h^2 - z_0^2)}$$

Calcul de la courbe de rabattement

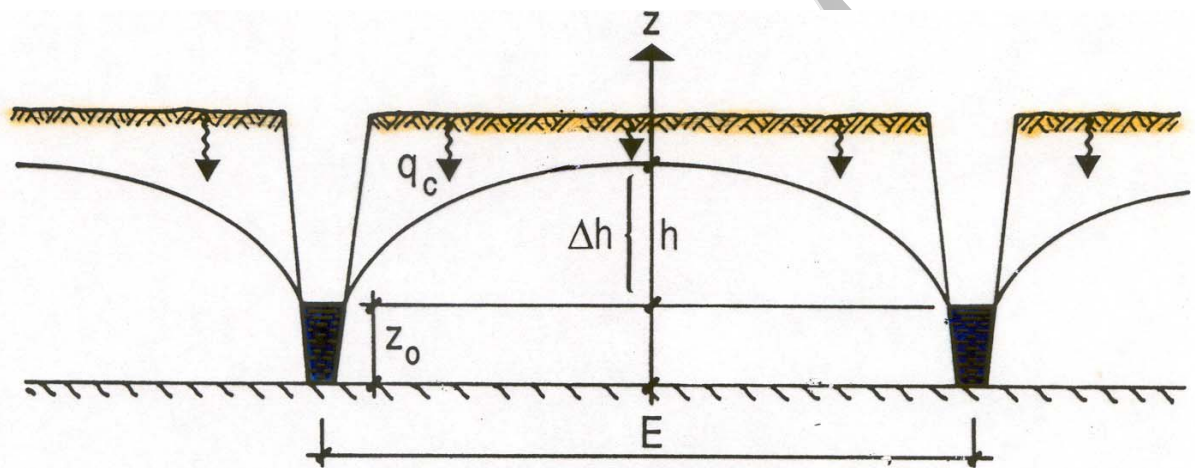
$$q_c x^2 = Kh^2 - Kz^2$$

$$\frac{q_c x^2}{Kh^2} = 1 - \frac{z^2}{h^2}$$

soit:

$$\frac{q_c x^2}{Kh^2} + \frac{z^2}{h^2} = 1$$

Rabatement par fossés reposant sur une couche imperméable en régime permanent

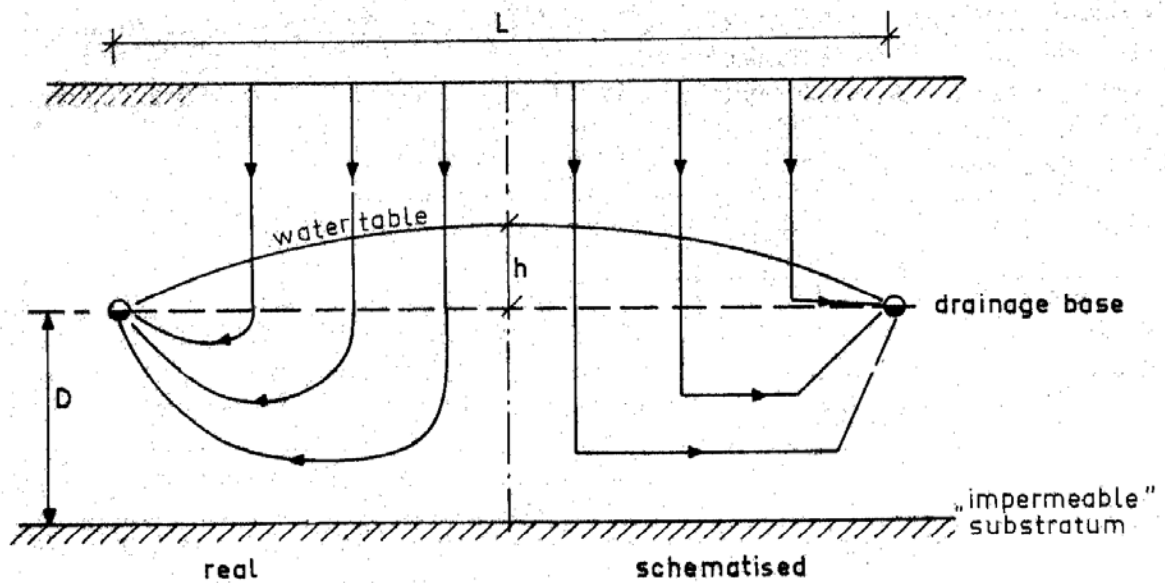


$$E = 2 \sqrt{\frac{K}{q_c} (h^2 - z_0^2)}$$

soit aussi:

$$E^2 = \frac{8 K z_0 \Delta h}{q_c} + \frac{4 K \Delta h^2}{q_c}$$

Cas de drains ne reposant pas sur une couche imperméable



Écoulement effectif et schématisé vers des drains ne reposant pas sur un substratum étanche

Rabattement par drains ne reposant pas sur une couche imperméable, en régime permanent

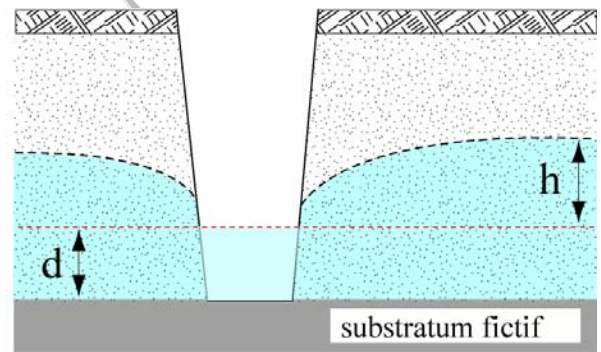
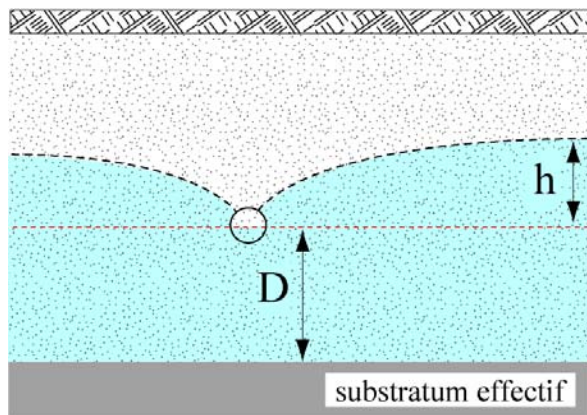
Analogie de Hooghoudt

Pour éviter d'avoir à prendre en compte la composante radiale de l'écoulement vers un drain ne reposant pas sur le substratum étanche, Hooghoudt (1940) a proposé de remplacer le réseau de drains par un réseau supposé équivalent de fossés reposant sur un **substratum étanche fictif** tel que, dans les 2 cas:

- le débit évacué soit le même
- la charge maximale h soit identique
- l'écartement E entre les ouvrages soit le même

Le substratum fictif se trouve à une profondeur d en-dessous du plan des drains, dénommée **profondeur équivalente**.

L'intérêt de l'analogie de Hooghoudt est de remplacer le cas réel complexe par un cas équivalent dont la solution est connue puisqu'il s'agit d'un fossé reposant directement sur le substratum imperméable.



$d < D$: profondeur équivalente

Situation effective

(écoulement vers un drain
ne reposant pas sur le
substratum)

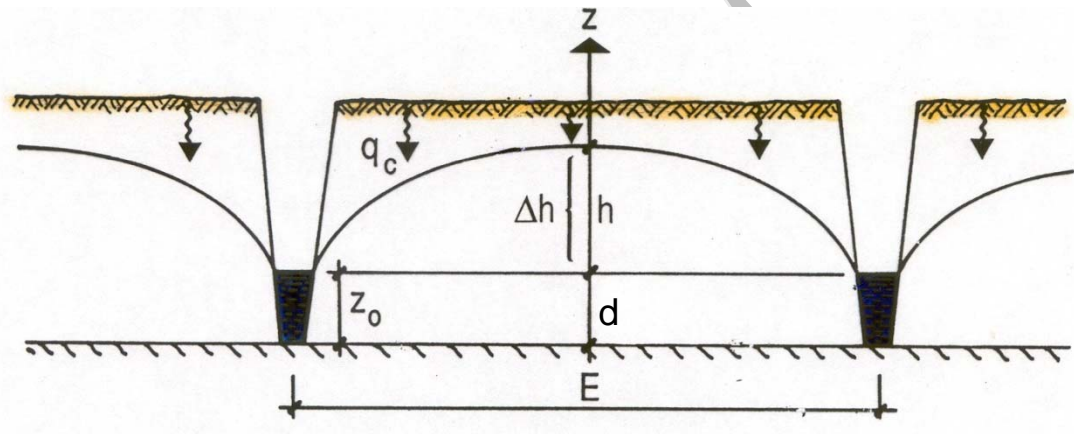
Equivalence de Hooghoudt

(écoulement vers un fossé
atteignant une couche
imperméable fictive)

Fossés parallèles *sur couche imperméable*

Régime permanent

Analogie de Hooghoudt



$$E^2 = \frac{8 K z_0 \Delta h}{q_c} + \frac{4 K \Delta h^2}{q_c}$$

Analogie de Hooghoudt: $\Delta h = h$
 $z_0 = d$

$$E^2 = \frac{8 K h d}{q_c} + \frac{4 K h^2}{q_c}$$

Analogie de Hooghoudt

Commentaires

1. Possibilité de tenir compte d'une hétérogénéité liée à la présence d'horizons différents situés de part et d'autre du plan des drains*:

$$q_c = \frac{8 K_i h d}{E^2} + \frac{4 K_s h^2}{E^2}$$

2. Lorsque la contribution de l'écoulement situé au-dessus du plan des drains peut être négligée, l'équation de Hooghoudt se réduit à:

$$q = \frac{8 K h d}{E^2} \quad (\text{formule de Hooghoudt simplifiée})$$

3. Pour un même écartement E et une même charge h à l'inter-drains, le débit des drains est toujours plus faible lorsqu'ils reposent sur une couche imperméable

* K_i : conductivité hydraulique à saturation de la couche située sous le plan des drains
 K_s : conductivité hydraulique à saturation de la couche située sur le plan des drains

Formule de Hooghoudt

Calcul de la profondeur équivalente d

$$d = \frac{D}{\frac{8D}{\pi E} \ln \frac{D}{u} + 1}$$

pour $D < E/4$

$$d = \frac{\pi E}{8 \ln \frac{E}{u}}$$

pour $D > E/4$

D : profondeur réelle, en dessous des drains, de l'horizon imperméable

E : écartement des drains

u : périmètre mouillé des drains (de rayon r); en général, on admet: $u = \pi r$

Rabatement par drains parallèles sur substratum étanche

Régime permanent

$$E = 2h \sqrt{\frac{K}{q_c}}$$

$$q_c = \frac{4 K h^2}{E^2}$$

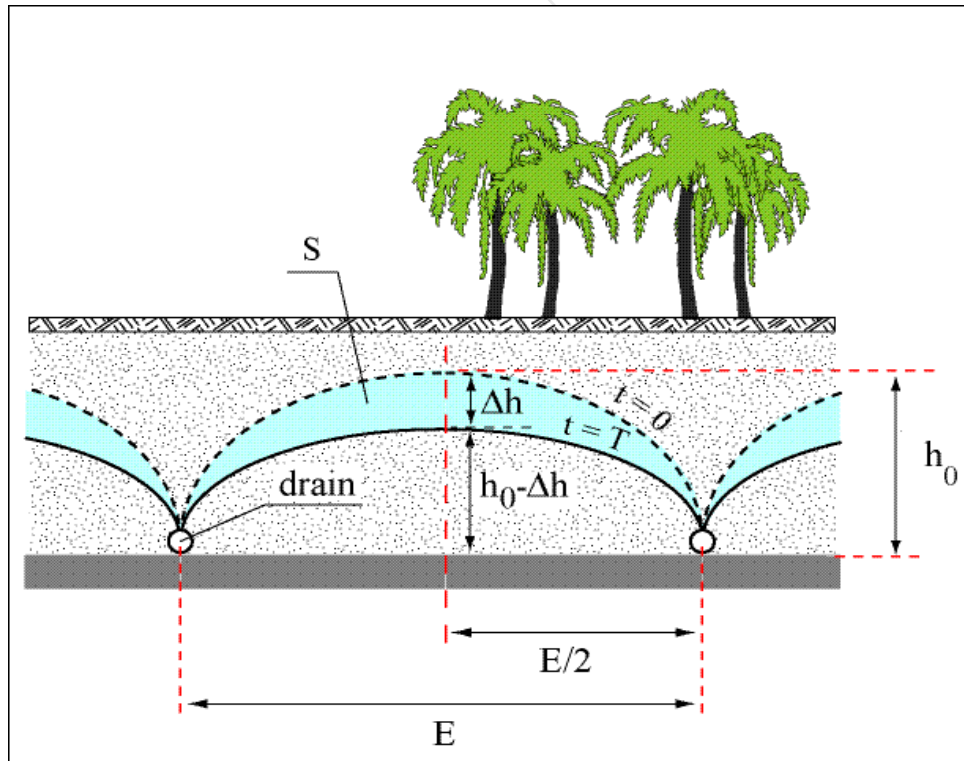
$$q_y = E q_c$$

$$q_y = \frac{4 K h^2}{E}$$

Régime variable

$$q_y(t) = \frac{4 K h(t)^2}{E}$$

Régime variable en phase de tarissement Drains posés sur une couche imperméable



$$q_y(t) = \frac{4 K h(t)^2}{E}$$

$$q_y(t) = -\frac{dV}{dt}$$

V : volume d'eau susceptible d'alimenter les drains

$$V = \mu S (1m) = \mu \pi E h/4$$

Après introduction dans les équ. précédentes et intégration:

$$E^2 = \frac{16 K t}{\mu \pi} \frac{h h_0}{(h_0 - h)}$$

Régime variable en phase de tarissement

Obj.: abaisser la nappe d'une hauteur Δ dans un délai T

Cas de drains posés sur une couche imperméable

$$E^2 = \frac{16Kt}{\mu\pi} \frac{h h_0}{(h_0 - h)}$$

h_0 : charge initiale à l'inter-drains

Dans l'hypothèse où la variation temporelle du rabattement peut être considérée comme linéaire:

$$\Delta = h_0 - h(T), \quad \text{soit: } h(T) = h_0 - \Delta$$

$$E^2 = \frac{16KT}{\mu\pi} \frac{(h_0 - \Delta) h_0}{\Delta}$$

Si rabattement non linéaire, on adopte fréquemment:

$$h(t) = h_0 e^{-\alpha t}, \quad \text{soit, pour } t = T: h(T) = h_0 e^{-\alpha T}$$

α : coefficient de réaction de la nappe

Régime variable en phase de tarissement

Obj.: abaisser la nappe d'une hauteur Δ dans un délai T

Cas de drains situés au-dessus de la couche imperméable - Formule de Glover-Dumm

$$E^2 = \frac{\pi^2 K t d}{\mu} \left[\ln \left(1.16 \frac{h_0}{h(t)} \right) \right]^{-1}$$

d : profondeur équivalente

Hyp.: Variation temporelle du rabattement linéaire:
 $\Delta = h_0 - h(T)$, soit: $h(T) = h_0 - \Delta$

$$E^2 = \frac{\pi^2 K T d}{\mu} \left[\ln \left(1.16 \frac{h_0}{h_0 - \Delta} \right) \right]^{-1}$$

Si rabattement non linéaire:

$h(t) = h_0 e^{-\alpha t}$, soit, pour $t = T$: $h(T) = h_0 e^{-\alpha T}$

α : coefficient de réaction de la nappe

Ecartements courants des drains

Sols lourds ou compacts 10 - 15 m

Sols fins 15 - 20 m

Sols silto-sableux 15 - 25 m

Sols sableux 20 - 35 m

Caractéristiques géométriques des drainages

- **Profondeur des drains**

- ✓ minimum: 80 cm
- ✓ maximum: 1.5 à 2 m

Profondeur fréquemment imposée: horizon peu perméable, cote de l'exutoire, etc.

- **Profondeur des collecteurs**

- ✓ éviter les profondeurs > 3 m
- ✓ généralement entourés d'un filtre d'enrobage en gravier pour accroître leur résistance aux contraintes externes*

- **Longueur maximale des files de drains**

- ✓ fréquemment imposée (topographie, emplacement des collecteurs, surface à drainer, etc.)
- ✓ écoulement à surface libre → $L = f$ (débit collecté, pente, diamètre, type de drains, etc.).

Longueur max. entre 200 et 300 m.

- **Pente des drains**

- ✓ souvent conditionnée par la topographie
- ✓ $v > 0.4 - 0.5$ m/s, sinon filtres
- ✓ pente minimale: 1 à 2 ‰

* pour les diamètres supérieurs à 60 cm et si la couverture de terre est inférieure à 1 m ou supérieure à 2.5 m on réalise un enrobage de béton

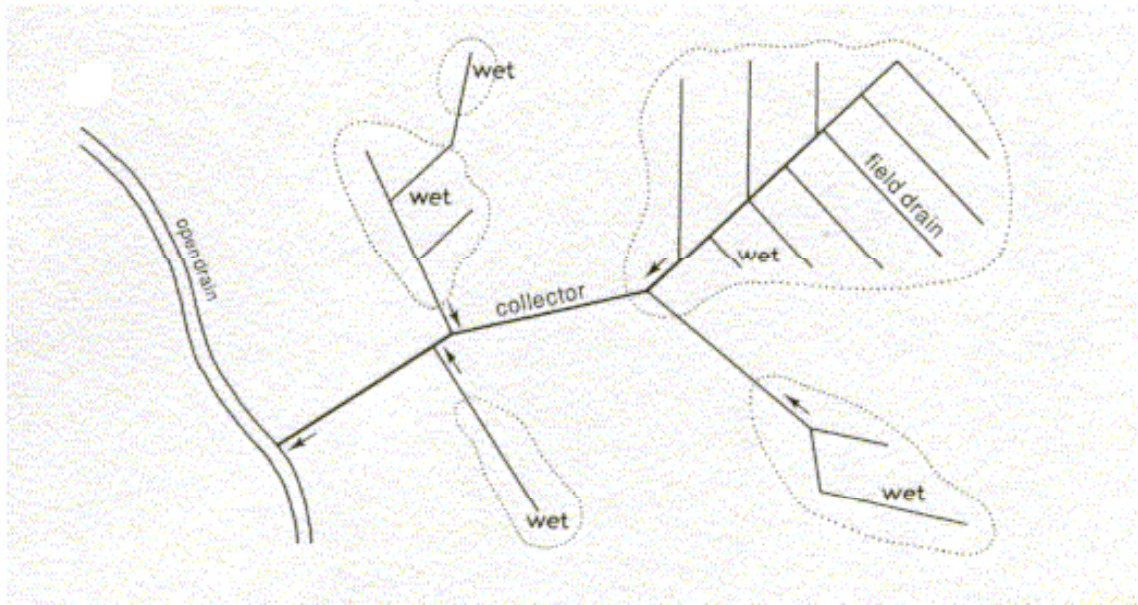
Tracé d'un réseau de drainage

Disposition spatiale des drains et collecteurs fonction de:

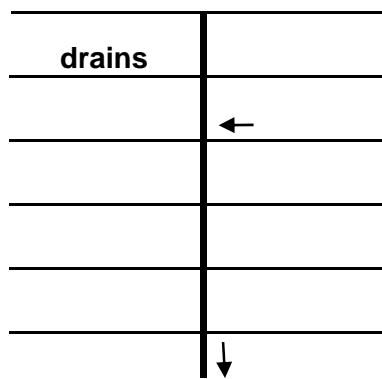
- topographie
- position de l'émissaire

- **Zones à drainer séparées dans l'espace: système naturel**

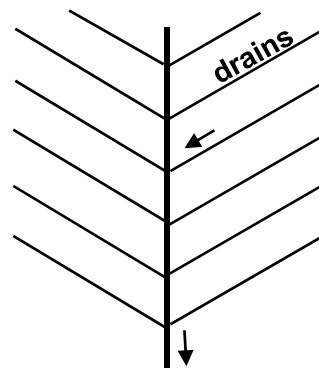
- **Zones à drainer continues: systèmes réguliers à drains parallèles**
 - système longitudinal
 - système transversal
 - système oblique



Système naturel



Système transversal



Système oblique (en arêtes de hareng)

Différents schémas d'implantation des drains

Conception d'un réseau de drainage

1. Relevé topographique précis (1/1000)
2. Détermination des caractéristiques du sol
3. Conception du réseau
 - ✓ étude de l'environnement hydrologique
 - ✓ définition de la DAS
 - ✓ recherche du débit caractéristique de drainage
 - ✓ choix de la profondeur des drains et de la profondeur minimale de la nappe

→ **Calcul de l'écartement des drains**

 - **Élaboration du réseau**
 - ✓ étude du modelé du terrain, reconnaissance des thalwegs et des lignes de crête
 - ✓ esquisse préliminaire : disposition des collecteurs, tracé des profils en long, implantation des chambres de visite (changements de pente et de direction, raccordements à d'autres collecteurs) (tous les 100 à 150 m)
 - ✓ tracé du drainage de détail
 - ✓ détermination des longueurs, pentes et profondeurs
 - **Calcul des débits à évacuer**
 - **Dimensionnement des drains et collecteurs**

Dimensionnement des drains et collecteurs

$$Q = V S$$

$$V = K R^{2/3} I^{1/2} S \quad (\text{Manning-Strickler})$$

$$Q = K R^{2/3} I^{1/2} S$$

- Q** : débit
- S** : section mouillée
- V** : vitesse moyenne de l'eau
- K** : coefficient de rugosité
- R** : rayon hydraulique; $R = S/P$
- P** : périmètre mouillé
- I** : pente de la ligne de charge
pente du tuyau en régime d'écoulement uniforme

Drains:

En régime permanent: $Q_{\max} = q_c E L$

Section mouillée < section du drain (éc. à surface libre)

Matériaux de drainage

- Drains en terre cuite (quasiment plus utilisés)



Drains annelés avec filtre

- Drains en matières plastiques (PVC ou PE)

- ✓ Drains lisses et rigides
- ✓ Drains annelés

- Autres



Drains annelés avec filtre et drains lisses rigides

Critères de choix des drains

- **coût; disponibilité locale**
- **facilité de pose**
- **résistance à l'écrasement**
- **efficacité hydraulique**
- **caractéristiques chimiques du sol**
- **durabilité**

Les drains en plastique répondent à la plupart de ces exigences

Autres matériaux utilisés localement:

- **décharge des drains**
- **tronçons à faible profondeur**
- **passages sous obstacles**
- **zone à risques de colmatage racinaire**

Colmatage des drains

Typologie

Type de colmatage

- colmatage externe
- colmatage interne

Moment d'apparition

- colmatage primaire
- colmatage secondaire

Causes

- colmatage minéral
- colmatage physico-chimique
- colmatage racinaire

Cas le plus fréquent: colmatage secondaire, d'origine minérale ou physico-chimique

Prévention

- évaluation des risques
- si nécessaire, choix d'un filtre efficace

Colmatage minéral primaire

Causes: pose des drains en conditions extrêmes d'humidité

- **Humidité très élevée et faible stabilité structurale : projection de boue ou enrobage par de la boue**
- **Pose en conditions très sèches en sols très silteux : enrobage de silt susceptible de se prendre en masse lors d'humidification**

Colmatage minéral secondaire

Manifestation progressive dans les années suivant la mise en place

Typologie des **FILTRES** *

- Fonction **hydraulique** (filtre d'**écoulement**); généralement filtre épais
- Fonction d'**arrêt** pour empêcher les particules fines des sols fins et instables (sols sableux, sablo-silteux, etc.) d'entrer dans le drain ou d'obstruer les orifices**. Le filtre d'arrêt peut être peu épais ou épais.

Filtre d'arrêt peu épais placé autour du drain: filtre d'**enrobage** (paille, fibre de coco, bande de feutre, fibre de verre, laine de verre, etc.)

- Filtre **épais** (> 10cm) utilisé pour combler la tranchée à la place du matériel d'excavation: filtre de **remblai** (tranchée drainante ou chemise drainante si le filtre est très épais); fonction hydraulique et/ou d'arrêt

* Matériau placé autour du drain

** Un bon filtre d'arrêt doit retenir les particules dangereuses (> 50 mm) et laisser passer les fines susceptibles de le colmater

Types de FILTRES

Filtres de remblai

- gravier non calibré (filtres d'écoulement) ou à granulométrie choisie (filtres d'arrêt)
- matériaux synthétiques expansés (polystyrène, PE, etc.) ou matelas de fibres synthétiques
- matériaux organiques (paille, tourbe, copeaux de bois, sciure, etc.)

Filtres d'enrobage

Matériaux organiques ou synthétiques mis en place lors de la pose ou prédisposés autour du drains.

Fibres de coco, laine de verre, bandes de feutre, nylon, feuilles de polyester, paille, etc.

Filtres spéciaux

Filtres Antoc pour la prévention de dépôts d'hydroxydes ferriques: fragments d'écorces de substances riches en phénol (chêne, mimosa, etc.) enrobés dans des fibres de coco ou de la paille. Le phénol se combine avec le fer pour former des complexes solubles et empêcher la précipitation.

Filtres sablo-graveleux

- **Sols à bonne cohésion et bien structurés**

Rôle du filtre: faciliter l'écoulement de l'eau vers le drain

→ tout matériel poreux suffisamment perméable peut être utilisé

- **Sols à cohésion médiocre, pulvérulents**

La granulométrie du filtre doit être étudiée scientifiquement (normes SNV, SCS, etc.)

Le filtre doit être:

- suffisamment grossier (conductivité élevée)
- suffisamment fin pour retenir les particules colmatantes

Épaisseur minimale du filtre: 10 cm

Granulométrie des filtres d'arrêt sablo-graveleux

Basée sur celle du sol en place autour du drain.

Critères de choix du filtre proposés par l'Association suisse de normalisation (SNV) et le US Bureau of Reclamation (USBR):

SNV*		USBR
$\frac{D_{15} \text{ filtre}}{D_{15} \text{ sol}}$	> 5	entre 10 et 40
$\frac{D_{50} \text{ filtre}}{D_{50} \text{ sol}}$	< 25	entre 10 et 60
$\frac{D_{15} \text{ filtre}}{D_{85} \text{ sol}}$	< 5	< 5
$\frac{D_{85} \text{ filtre}}{\text{Diam. orif.}}$	> 1	100% < 4 cm 90% < 2 cm

* Norme SNV 670 125

D₁₅: diamètre équivalent des particules correspondant à un % pondéral de 15 %

Evaluation du risque de colmatage minéral secondaire

Niveau qualitatif

Sols fins ($A^* > 20$ à 30%) : bonne stabilité structurale

➔ *filtre d'écoulement* éventuellement nécessaire

Sols à risques: sols peu cohérents à faible stabilité structurale et à faible teneur en argile (sols sableux et/ou silteux)

➔ *filtre d'arrêt* nécessaire

Niveau quantitatif

Ex. de critères retenus pour caractériser les risques:

Sols à risques élevés:

- sols sableux: $S^* > 50\%$ et $A < 15\%$
- sols sablo-limoneux: $A < 20\%$ et $2A + Sf^* > 50\%$
- $U < 5$ ($U = D_{60} / D_{10}$)

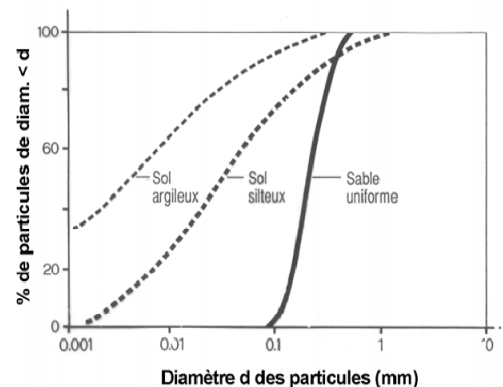
Sols à faibles risques:

- sols argileux: $A > 20\%$
- $U > 15$

* A : argile; S : sable; Sf : Silt fin (0.002 à 0.02 mm);

U : coefficient d'uniformité

- Argile : < 0.002 mm
- Silt : $0.002 - 0.05$ mm
- Sable : $0.05 - 2$ mm
- Gravier : > 2 mm



Quand utiliser un filtre?

Filtre **d'arrêt** (ou d'enrobage)

- lorsque le % d'argile est inférieur à 20 %
- d'une façon générale, lorsque la majorité des particules se situent entre 0.05 et 1.0 mm
- le risque est très grand lorsque plus de la moitié des particules se situent entre 0.05 et 0.12 mm (sable fin)

Filtre **d'écoulement** (de remblai)

- lorsque la conductivité hydraulique du sol est mauvaise

Colmatage physico-chimique

Représenté essentiellement par les dépôts ferriques qui peuvent résulter:

- **d'une réaction chimique (oxydation du fer ferreux en fer ferrique)**
- **de processus biologiques (oxydation par des bactéries)**

Très fréquemment, les 2 processus agissent simultanément



Colmatage ferrique des orifices d'un drain

Colmatage physico-chimique d'origine chimique

Causes

Modifications des conditions physico-chimiques au voisinage des drains

- ➔ précipitation de substances préalablement dissoutes:
 - ✓ précipitation de bicarbonate de calcium (rare)
 - ✓ précipitation de fer sous forme de ions ferriques Fe^{+++} peu solubles (oxydes, hydroxydes, gels d'hydroxydes) par oxygénation du fer ferreux Fe^{++}

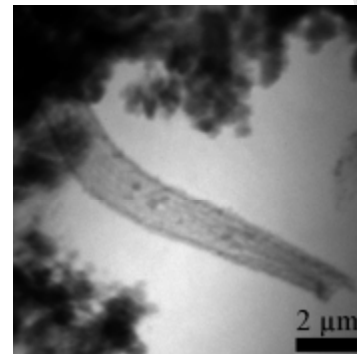
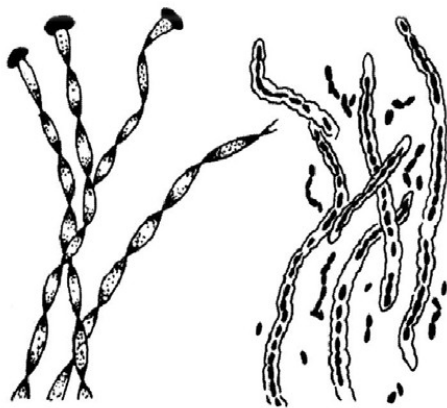


Colmatage physico-chimique lié à des réactions biochimiques

Dépôts ferriques résultant de l'action de bactéries faisant partie de la microflore des eaux souterraines (Gallionella, Leptothrix).

Elles se reproduisent rapidement en colonies lorsque les conditions sont favorables et se développent à l'intérieur du drain.

Le dépôt de fer ferrique durcit au contact de l'air.



Bactéries ferrugineuses



Dépôts à l'intérieur du drain



Concentration en Fe ⁺⁺ dans la solution de sol (mg/l)		Risque de colmatage
pH < 7	pH > 7	
< 0.5	< 1	Faible
0.5 - 1.0	1.0 - 3.0	Faible à moyen
1.0 - 3.0	3.0 - 6.0	Moyen à élevé
3.0 - 6.0	6.0 - 9.0	Elevé à très élevé
> 6.0	> 9.0	Très élevé

Critères d'évaluation du risque de colmatage ferrique



Sols à risques de colmatage ferrique

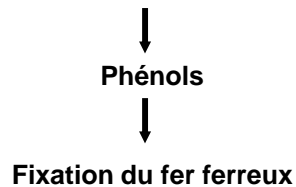
Argile silteuse

- **sols minéraux, riches en fer**
- **sols organiques et tourbeux (marais)**
- **milieux dont la concentration en fer ferreux de la solution de sol est $>$ à 3 mg/l à pH acide et 6 mg/l à pH basique**

Prévention du colmatage ferrique

- emploi de **filtres spéciaux (ANTOC)**

Substances riches en tanins : écorces de chêne, mimosa ou acacia



- création d'un **milieu oxydant autour du drain** favorisant la précipitation du fer (installation d'un remblai volumineux à forte macroporosité)
- **modification chimique du pH** du sol (chaulage)



Enrobage de gravier

Actions préalables:

- procéder à des analyses chimiques du sol (pH, concentration en fer)
- prévoir des facilités pour le nettoyage des drains, déjà au stade de la conception

Colmatage racinaire

Végétaux à risques

Plantes à enracinement développé et profond (colza, betterave, luzerne, blé, maïs, etc.), certaines plantes adventices (chardon, ortie, prêle, etc.) et certains arbres (peuplier, saule, frêne, etc.).

Lutte :

- **préventive**

- ✓ drains profonds
- ✓ vitesse de l'eau suffisante (> 0.5 m/s)
- ✓ éviter les zones à risques; si nécessaire, franchir ces zones en tuyaux non perforés avec joints étanches

- **curative**

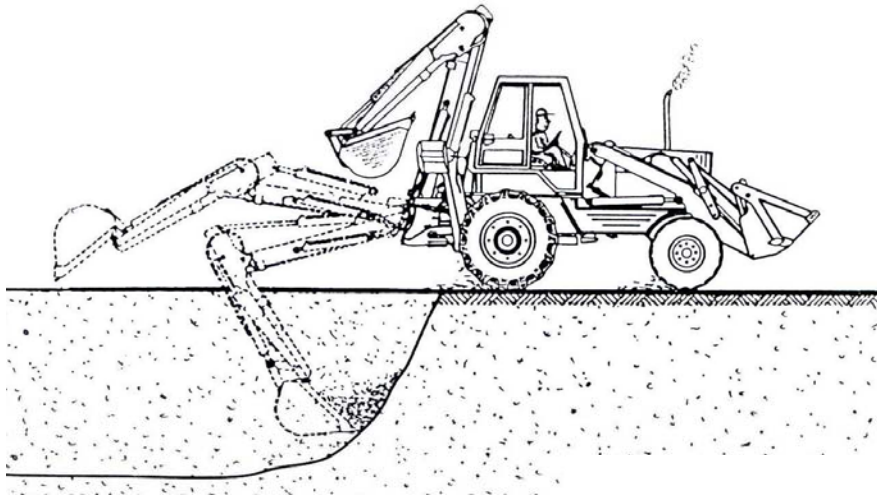
- ✓ injection de substances chimiques (sulfate de cuivre, etc.)
- ✓ purge à haute pression

Exécution des drainages

- **Rétrocaveuse**
- **Excavatrices à roue
ou à chaîne**
- **Draineuse-taupe**



Rétrocaveuse



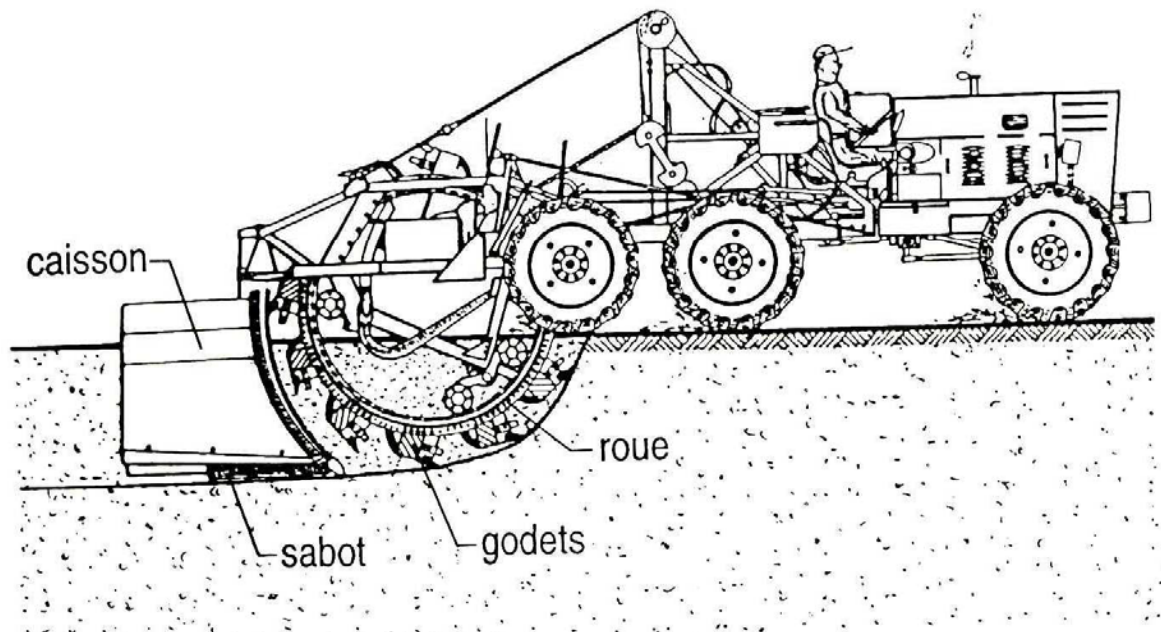
Avantages:

- machine polyvalente
- adaptée à tous les types de sol

Désavantages:

- lente
- fond de tranchée à régler manuellement
- importants volumes excavés

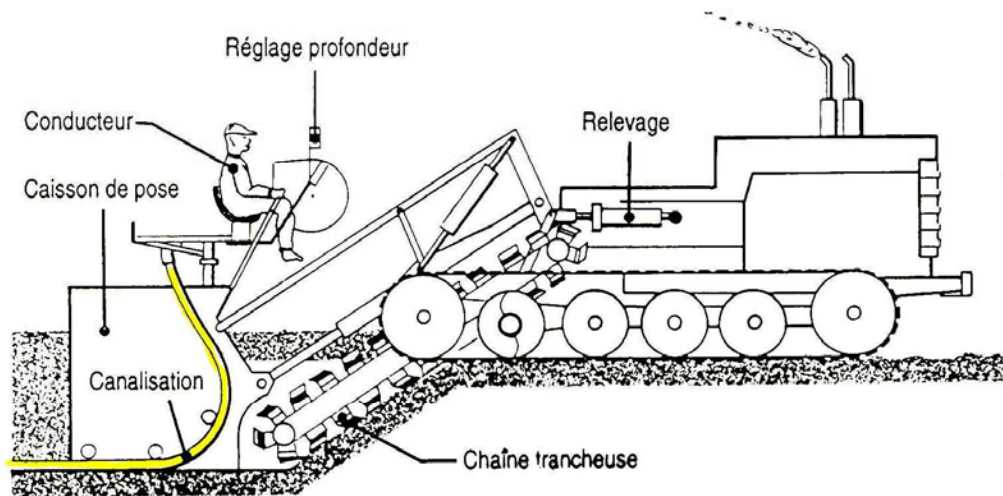
Excavatrice à roue



- Avantages:**
- avance rapide (1500 à 3000 m/h)
 - contrôle de la pente et de la pose du drain
 - tranchée accessible (30 - 60 cm)

- Désavantages:**
- volume excavé important
 - difficultés en terrain rocailleux

Excavatrice à chaîne



Avantages:

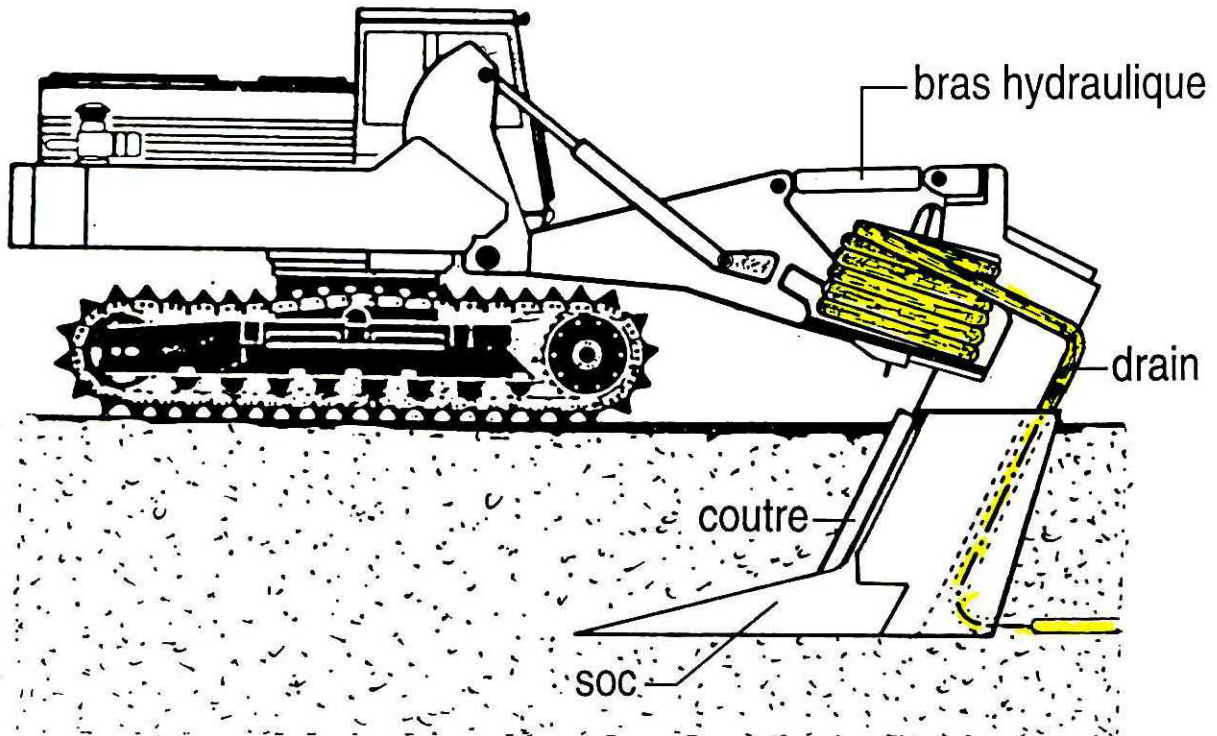
- avance rapide (1500 à 3000 m/h)
- contrôle de la pente et de la pose du drain

Désavantages:

- *difficulté pour descendre dans la tranchée (25 - 40 cm)*
- *difficultés en terrain rocailleux*



Draineuse - taupe



Avantages:

- travail rapide (3000 à 4000 m/h)
- pas de remblayage
- supporte les sols légèrement rocailleux

Désavantages:

- *limité aux tuyaux souples*
- *difficultés de poser des filtres*
- *corrections sur le tuyau difficiles*
- *excavatrice nécessaire pour les collecteurs*

Guidage au laser des machines de pose

Laser ligne

Faisceau laser (portée max.: env. 300m)

Direction et **pente** des drains contrôlés par un écran de réception équipé de cellules photo-électriques monté sur la machine à drainer

Déplacements nécessaires:

- à chaque changement de pente
- à chaque nouvelle file de drains

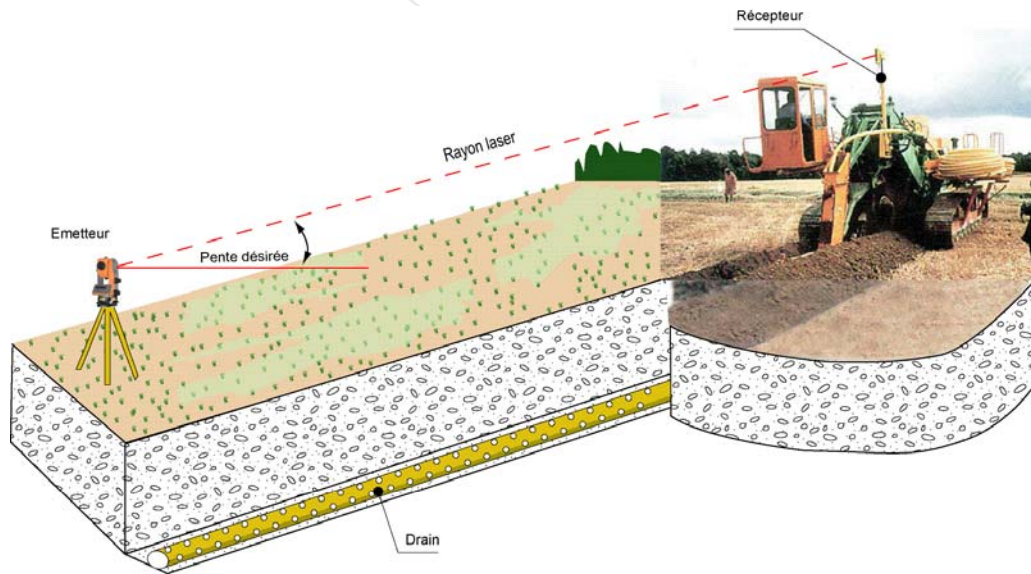
Guidage au laser des machines de pose

Laser en guidage automatique

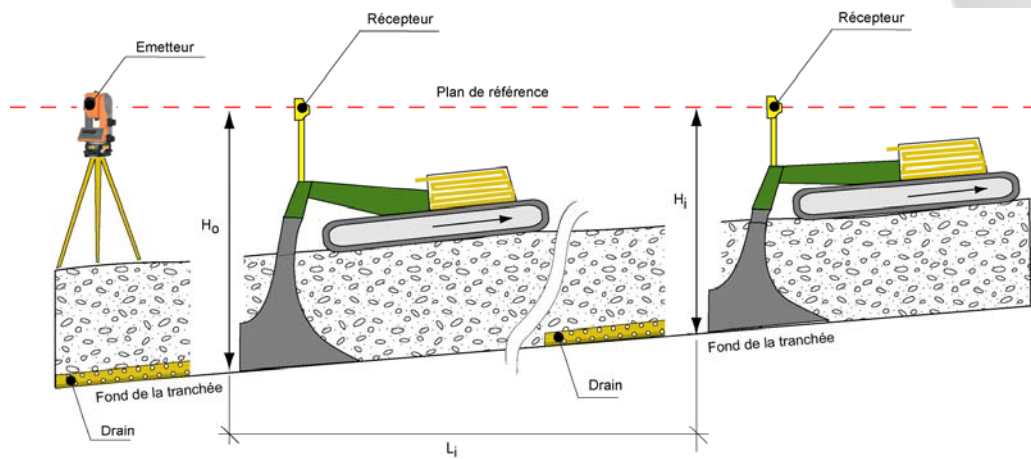
- émetteur
- récepteur monté sur un mât télescopique
- compteur métrique qui enregistre la distance depuis le début de la tranchée
- boîtier de contrôle et de réglage; permet d'afficher la pente souhaitée par rapport à l'axe ou au plan de référence. Le système calcule et ajuste constamment la hauteur du récepteur sur le fond de la tranchée.

Laser **fixe** : définit un **axe** de référence et ne nécessite pas de déplacement de l'appareil en cas de changement de pente.

Laser **rotatif** : définit un **plan** de référence et ne nécessite que de rares déplacements lorsque la zone couverte est terminée.



Laser ligne



- H : hauteur du récepteur sur le fond de tranchée
- H_0 : hauteur initiale du récepteur
- P : pente de la tranchée
- L : distance parcourue

$$H_i = H_0 - p L_i$$

Laser en guidage automatique

Entretien des réseaux de drainage

Phénomènes justifiant un entretien :

- **ensablement et envasement**
- **dépôts d'hydroxydes ferriques**
- **pénétration de racines**
- **prolifération d'algues et champignons**
- **construction défectueuse (affaissement des drains, contre-pente, vices de fabrication, rupture de tuyaux, etc.)**
- **colmatage du filtre**

Entretien des réseaux de drainage

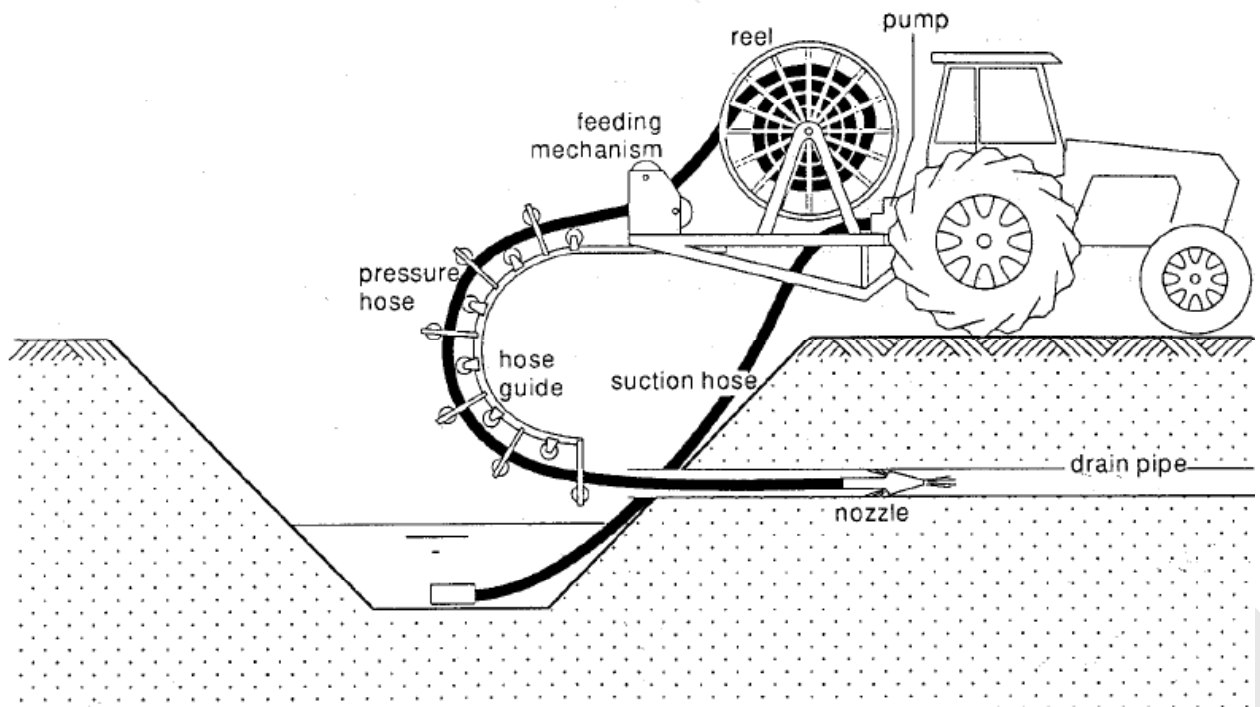
Phénomènes localisés: racines, animaux, dépôts, affaissement et rupture des drains, raccordements défectueux, etc.

- **excaver une fouille, à l'aval de l'endroit où l'on constate des remontées d'eau**
- **découper ou démonter le tronçon de drains**
- **dégager l'obstruction**
- **rétablir le drain**
- **purger la file de drains à l'aide d'un appareil à haute pression pour éliminer les dépôts à l'amont de l'obstruction**

Entretien des réseaux de drainage

Phénomènes systématiques : ensablement, envasement, dépôts ferriques et biologiques, etc.

- **purge à haute pression**
- **en cas de faible envasement et de dépôts ferriques récents : purge à basse pression**
- **colmatage des filtres, dépôts ferriques importants, affaissement des drains : reconstruction totale ou partielle du réseau**



Machine à purger les drains

Impacts du drainage sur l'environnement

Impacts directs

- Sur le sol
- Sur les eaux de surface (quantitatifs et qualitatifs)
- Sur les eaux souterraines (y c sur le régime hydrique de zones humides méritant d'être sauvegardées)

Impacts indirects

- Évolution du mode d'exploitation du sol
- Sanitaires



Impacts positifs du drainage sur les sols

Forte amélioration du potentiel agricole:

- **évolution des caractéristiques fonctionnelles du sol (aération, régime thermique, activité biologique, potentiel redox, etc.)**
- **à moyen et long terme : amélioration de la structure du sol, de la capacité d'infiltration et de la circulation de l'eau; nouvel équilibre biologique**
- **réduction des contraintes d'exploitation (accès aux parcelles, diversification des cultures, etc.)**
- **diminution des risques de salinisation**

Impacts négatifs possibles

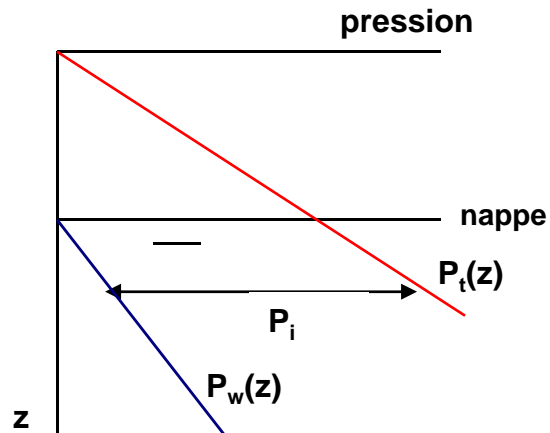
- **augmentation de la pression intergranulaire et tassement**
- **affaissement des sols tourbeux**

Augmentation de la pression intergranulaire

La pression intergranulaire P_i caractérise la pression qui agit aux points de contact entre les particules de sol. Plus P_i est élevée, plus le matériel se compacte.

$$P_i = P_t - P_w$$

P_t : pression totale causée par le poids du sol* au point considéré = Poids/Surface
 P_w : pression hydraulique



Si on abaisse la nappe, $P_w(z)$ subit une translation vers le bas et P_i augmente.

→ **tassement du sol**

L'importance du tassement dépend du type de sol: plus le sol est fin, plus il est sensible; les sols riches en MO sont les plus affectés.

* et, le cas échéant, autres charges appliquées en surface

Affaissement des sols tourbeux

Trois causes majeures:

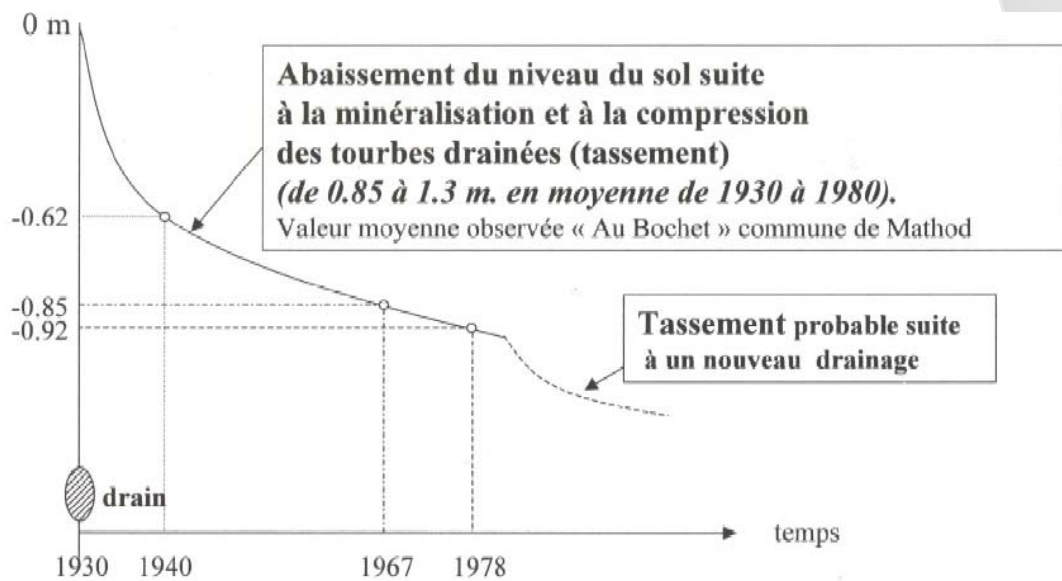
- **oxydation** de la matière organique: transformation du carbone organique en CO₂
→ minéralisation accélérée
- **rétraction** : accroissement de la pression intergranulaire; en plus, accroissement de la succion, et donc des contraintes capillaires
→ rétraction irréversible de la matrice solide
- sensibilité accrue à l'**érosion éolienne**.

Tassement = f (type de tourbe, stade de décomposition, conditions climatiques, cultures pratiquées et profondeur de la nappe)

Entre quelques cm par an (0.5 à 2 cm) en climat tempéré à plusieurs cm par an (jusqu'à 10 cm) en climat tropical.



Tassement de milieux tourbeux dans la Plaine de l'Orbe





L'altération rapide des tourbes peut être ralentie par:

- **une gestion adéquate de la nappe**
- **le recours à des méthodes d'exploitation appropriées (non labour par ex.)**
- **le choix de cultures résistantes à la submersion**
- **la restitution du milieu à l'état naturel**



Impacts **quantitatifs** des drainages sur les eaux de surface

Influence du rejet des eaux de drainage fonction de:

- caractéristiques hydrologiques du BV
- rapport surface assainie/surface totale du BV
- nature des matériaux surmontant les drains

Deux effets possibles:

- augmentation de la capacité d'infiltration du sol et réduction du ruissellement
 - **diminution des débits de crue**
- accélération du transfert des eaux souterraines vers l'émissaire
 - **renforcement des débits de crue**

Le plus souvent, en particulier dans les BV de grande taille et de faible pente, on observe un **effet modérateur** pour les crues de fréquence élevée ou **négligeable** dans le cas de crues extrêmes.

Dans certains petits BV relativement pentus, assainis par des drains surmontés de tranchées drainantes, on note parfois un **renforcement des débits de crue**.

Impacts **qualitatifs** sur les eaux

Composition des eaux de drainage

- Éléments **fortement exportés**: nitrates, chlorures, etc.
- Éléments **faiblement exportés**: ammonium, nitrites, phosphore, pesticides, etc.
- Éléments **intermédiaires**: sodium, potassium, soufre, etc. dans certains types de sols (salins)

La qualité des eaux de drainage est très variable, selon les conditions climatiques, le milieu et les pratiques culturales

La composition varie fortement dans le temps durant un épisode de crue, en cours de saison et d'une année à l'autre (selon le climat et les pratiques culturales).

Effets du drainage sur les exportations de substances solubles

Tendances fréquemment observées:

- **Réduction des exportations de phosphates et de pesticides**, suite à la diminution du ruissellement et du transport solide à la surface du sol
- **Augmentation des exportations de nitrates**, suite à l'accroissement des volumes d'eau infiltrée; parfois toutefois, l'activité biologique plus intense stimule la minéralisation et l'absorption par les cultures.

Diminution des impacts sur les zones humides à sauvegarder

Création de zones de transition (zones tampon)

Zones intermédiaires permettant d'assurer une transition progressive entre milieux naturels et zones exploitées (zones agricoles, zones industrielles, zones de loisir, etc.).

Le dimensionnement des zones tampon fait intervenir des aspects:

- biologiques (sauvegarde de la diversité d'espèces)
- écologiques (préservation de biotopes)
- trophiques (prévention de contaminations par des produits phytosanitaires)
- **hydrologiques** (prévention de risques d'assèchement)

⇒ Approche pluridisciplinaire

Zones de transition

Contacts agriculture - milieux naturels

Principales sources de perturbation :

- *Exportation de fertilisants et de substances phytosanitaires*
- ***Modifications du régime hydrique***

Dimensionnement d'une zone tampon pour prévenir une modification néfaste du régime hydrique:

- démarche empirique
- approches semi-empiriques
- approches à base physique

Dimensionnement d'une zone tampon

- valeurs **empiriques** : $30 < L < 300$ m et plus
- approches **semi-empiriques** :

$$L = 200 H K$$

L : largeur de la zone tampon (m)

H : profondeur des drains (m)

K : conductivité hydraulique à saturation du sol (m/j)

- Modélisation à **base physique** :

- *Drains posés sur une couche peu perméable*

$$L = 2.2 \sqrt{\frac{KH t}{\mu}}$$

t : durée de la période de tarissement (j)

μ : porosité de drainage

- *Drains situés au-dessus d'une couche peu perméable*

$$L = \sqrt{\frac{8K(2d + H) t}{\mu(4 - \pi)}}$$

d : profondeur équivalente de Hooghoudt