



COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE DES SOLS

Journée « HYDRAULIQUE » du 23-01-2002

MESURES DE FAIBLES PERMÉABILITÉS

(in-situ et en laboratoire)

liées aux projets de décharges:

Principales techniques de mesure, normalisation

Lucien BERTRAND- ANTEA / Direction STockages





Photo D. CAZAUX



RAPPEL DU CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

1. Commission européenne: directive 1999/31/CE du Conseil du 26/04/99

Spécifications pour la base et les flancs de la décharge

Déchets dangereux	Épaisseur 5m	$K \leq 1. 10^{-9} \text{ m/s}$
Déchets ménagers	Épaisseur 1m	$K \leq 1. 10^{-9} \text{ m/s}$
Déchets inertes	Épaisseur 1m	$K \leq 1. 10^{-7} \text{ m/s}$

2. Législation française: loi du 18/12/1992 et arrêté du 9/09/1997

- Notion de barrière passive comme étanchéité naturelle géologique

Déchets dangereux (Classe 1)	Épaisseur 5m	$K \leq 1. 10^{-9} \text{ m/s}$
Déchets ménagers (Classe 2)	Épaisseur 1m	$K \leq 1. 10^{-9} \text{ m/s}$
	Épaisseur 5m	$K \leq 1. 10^{-6} \text{ m/s}$

- Impose des mesures in-situ, en surface et en profondeur (1 pt / ha en moyenne, tous les mètres sur une verticale). Essais de laboratoire en complément

- Déchets inertes (Classe 3) : Guide en 2001

ESSAIS HYDRAULIQUES POUR LA DÉTERMINATION DE LA PERMÉABILITÉ

- **GROUPES D'ESSAIS :**

Dans le cadre de la mesure des faibles perméabilités pour les centres de stockage de déchets, on distingue :

- Les essais en surface
- Les essais en forage, applicables parfois en subsurface,
- Les essais en laboratoire sur prélèvements.

- **DIFFÉRENTES MÉTHODOLOGIES ET PRINCIPES D'ESSAIS :**

- Surface : infiltromètres à anneaux. Infiltration verticale $\Rightarrow k_v$
- Forage : chambre cylindrique. Infiltration horizontale $\Rightarrow k_h$
- Labo : différentes conditions aux limites en contraintes ou déformations.

On pratique des essais hydrauliques en régime **permanent** ou en régime **transitoire**.

On fait l'hypothèse d'un milieu **poreux saturé** .

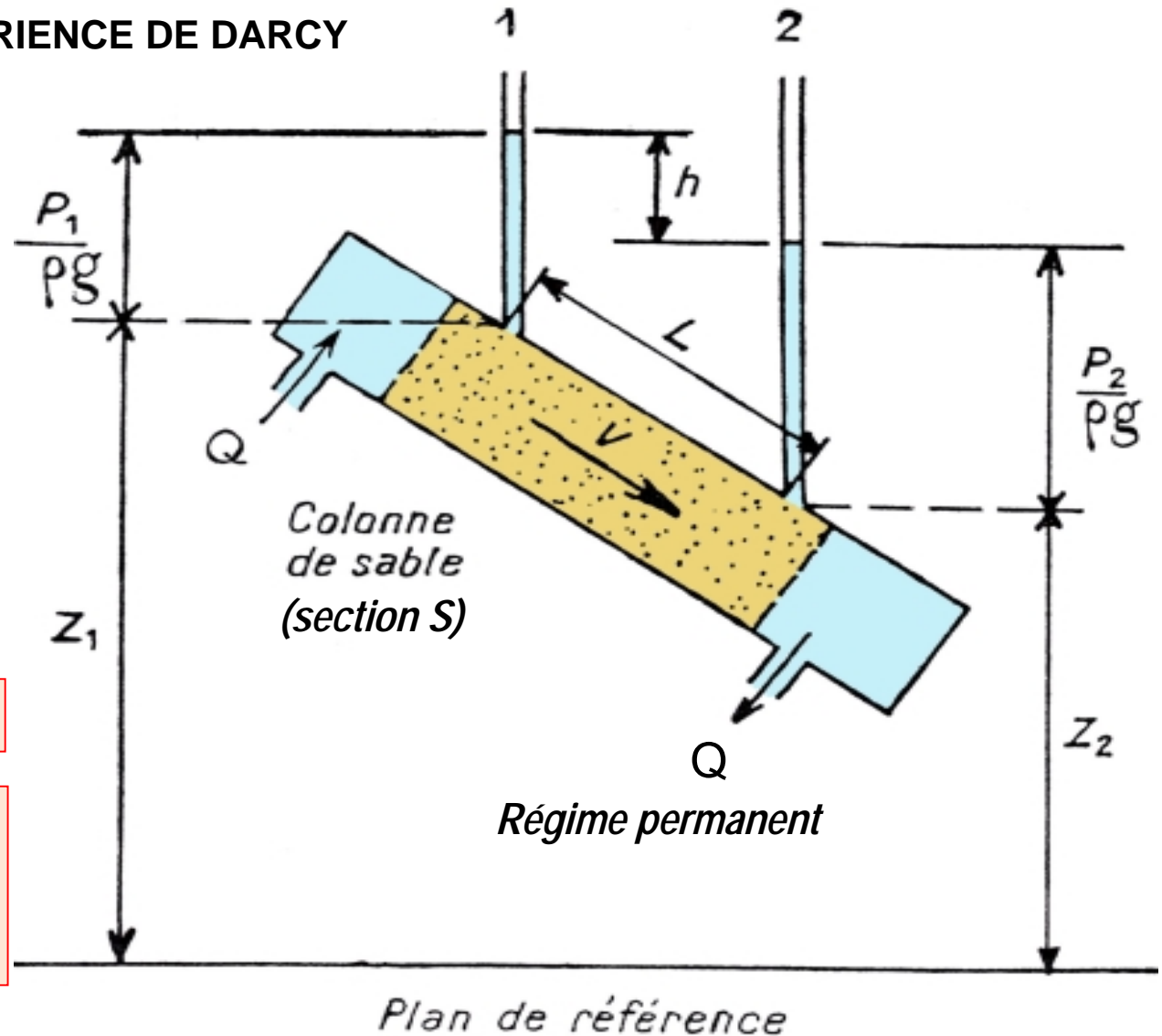
COMMISSION DE NORMALISATION AFNOR X-30 P

NORMES EN COURS (début 2002)

	Indice	Titre de la norme	Mise en route	Achèvement
Surface	NF X 30-418	Détermination de la perméabilité d'une formation géologique en place, de matériaux rapportés, ou artificiellement reconstitués : infiltromètre à double anneau, de type ouvert.	1996	Oct.1998
	NF X 30-420	Détermination de la perméabilité d'une formation géologique en place, de matériaux rapportés, ou artificiellement reconstitués : infiltromètre à double ou simple anneau, de type fermé.	1996	Juin 1999
Forage	NF X 30-423	Détermination du coefficient de perméabilité d'un terrain par essai à charge variable, en chambre ouverte (« slug test »).	1997	2001
	NF X 30-424	Détermination du coefficient de perméabilité d'un terrain par essai d'infiltration à charge constante en forage fermé.	1997	2002
	NF X 30-425	Détermination du coefficient de perméabilité d'un terrain par essai à charge variable, en chambre fermée (« pulse test »).	1997	2001
Laboratoire	NF X 30-441	Détermination au laboratoire du coefficient de perméabilité à saturation d'un matériau : essais au perméamètre à paroi rigide , à gradient hydraulique constant.	1998	2002
	NF X 30-442	Détermination au laboratoire du coefficient de perméabilité à saturation d'un matériau : essais de perméabilité à l' oedomètre , à charge hydraulique constante ou variable.	1998	2002
	NF X 30-443	Détermination au laboratoire du coefficient de perméabilité à saturation d'un matériau : essais au perméamètre à paroi flexible , à gradient hydraulique constant.	1998	2002

Rappel de la définition du coefficient de perméabilité

EXPÉRIENCE DE DARCY



Perte de charge: $h = H_1 - H_2$

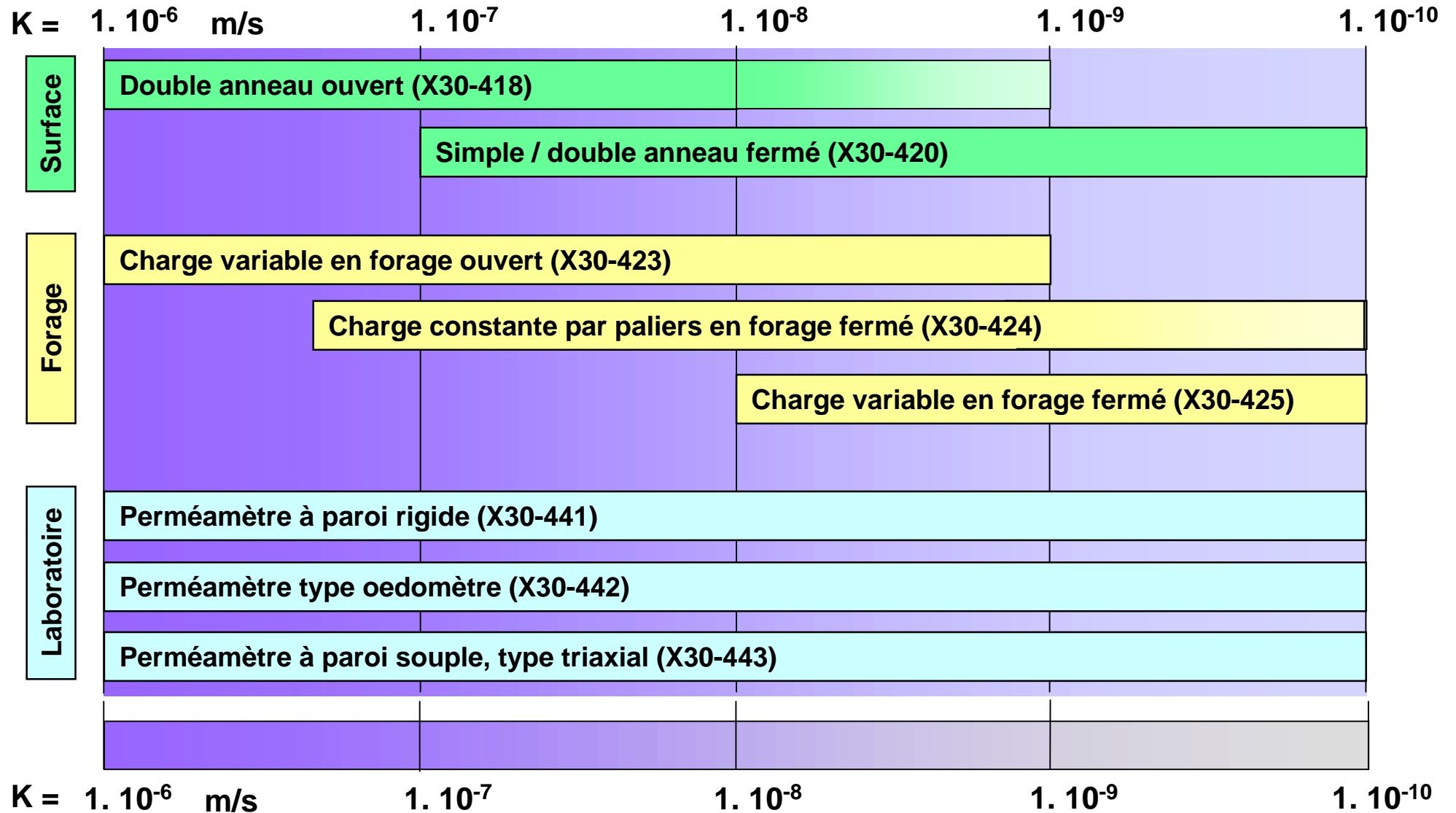
$$h = \left(\frac{p_1}{\rho g} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + z_2 \right)$$

Gradient hydraulique $i = h / L$

Coefficient de perméabilité k
(au sens de Darcy)

$$V = k.i \text{ ou } Q = k.S.i$$

Domaines de validité des différents essais en cours de normalisation



ESSAIS EN SURFACE

(1)

-  • Double anneau ouvert (X 30-418)

Domaine d'application: $\geq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s ($\geq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s)*

- Double ou simple anneau fermé (X 30-420)



Photo D. CAZAUX

PRINCIPE DE L'INFILTROMETRE A DOUBLE ANNEAU OUVERT (X 30-418)

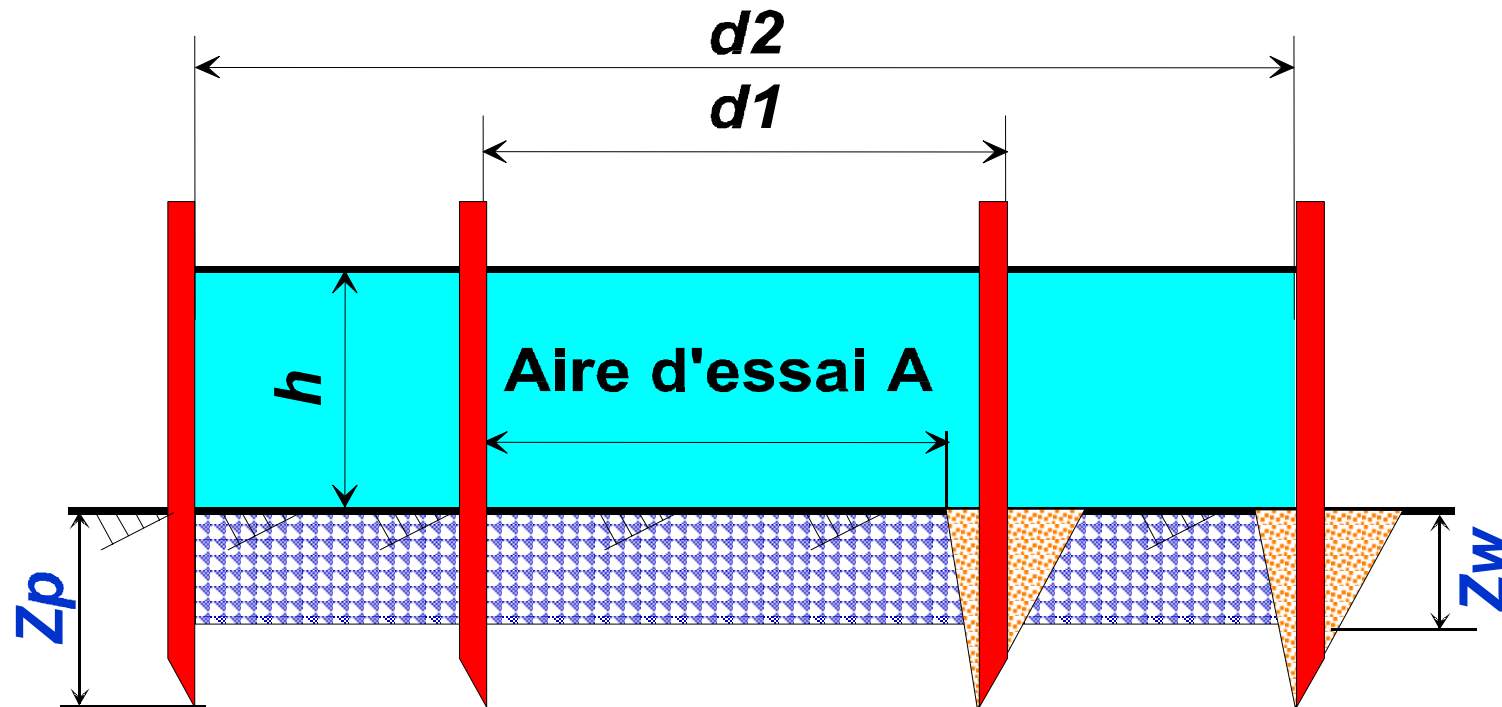
Reprend le principe du double anneau type " MUNTZ " :

- Développé initialement pour des terrains « moyennement » perméables ($k = 10^{-5}$ à 10^{-7} ou 10^{-8} m/s)
- Hypothèse du terrain proche de la saturation
- Écoulement en régime permanent
- Écoulement unidirectionnel vertical, sous une charge hydraulique modérée (10 à 30 cm eau)

⇒ **Un anneau interne** (mesure de l'infiltration)

⇒ **Un anneau " de garde " :**

- Même charge hydraulique que dans l'anneau interne
- Maintient l'écoulement vertical dans l'anneau interne
- Limite les risques de fuite sous l'anneau interne



Pour les terrains faiblement perméables, adaptations nécessaires, notamment de la mise en place des anneaux et du dispositif de contrôle du débit infiltré dans l'anneau interne.

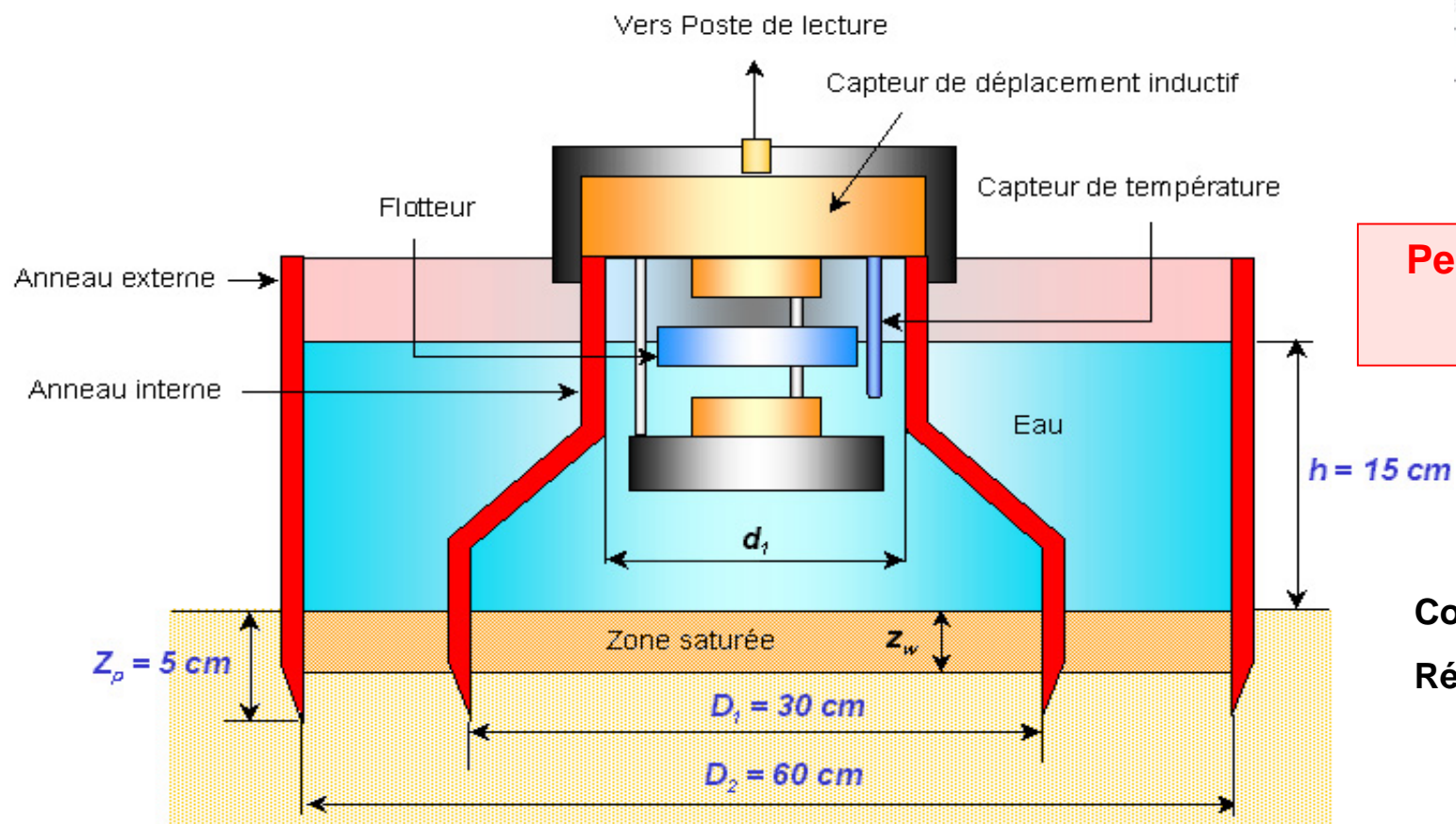
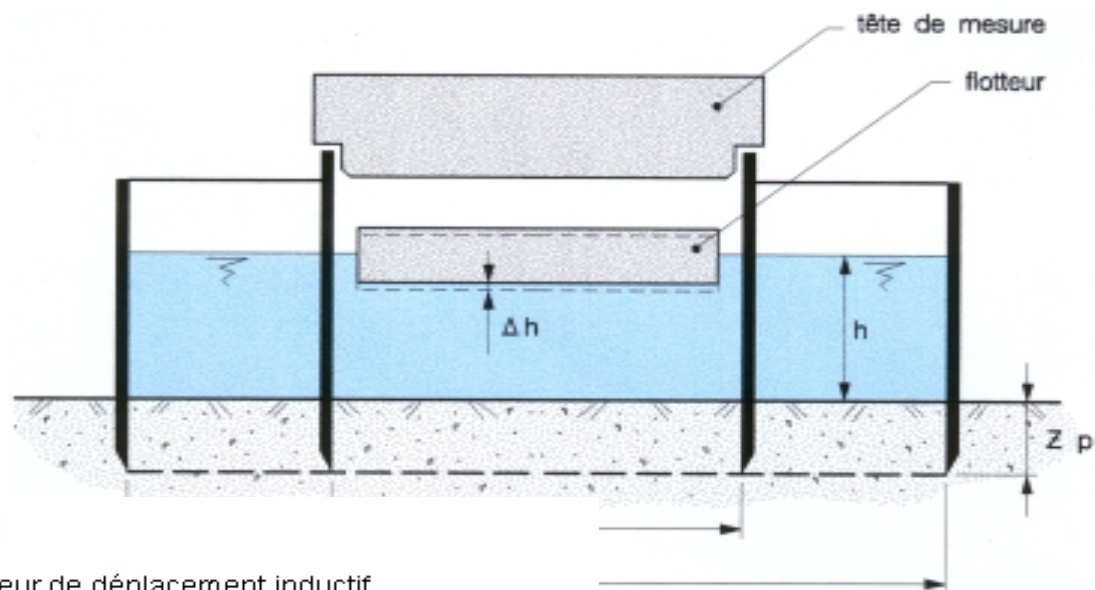
Calcul du gradient hydraulique sous l'anneau (épaisseur z_w) nécessaire pour le calcul de la perméabilité



Perméamètre à double anneau ouvert
(CERAS)

Modèle avant normalisation

Diamètre de l'anneau externe: 30 cm

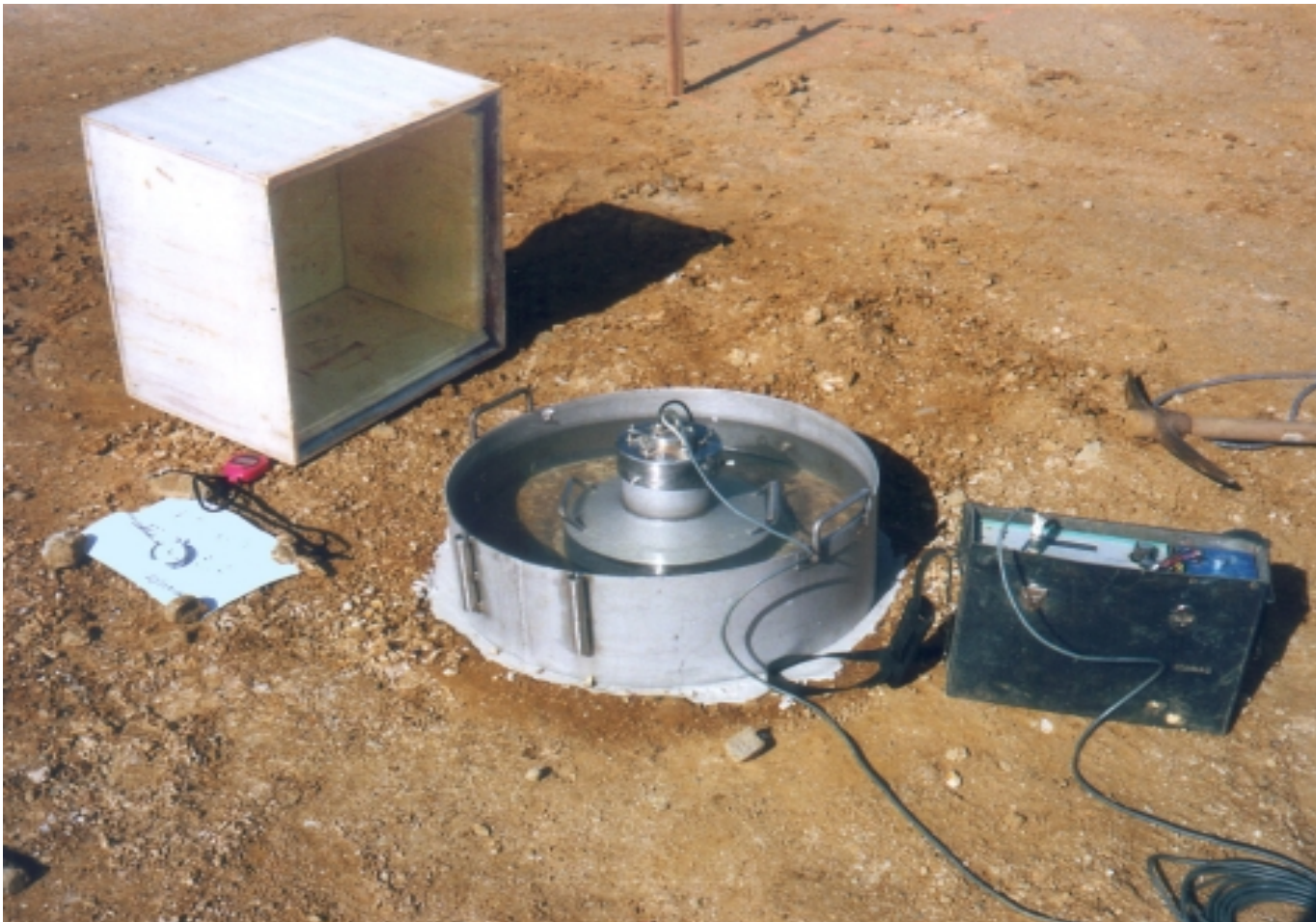


Perméamètre PANDA® II
(ANTEA)

Course capteur: 2 mm
Résolution Δh : 0,5 μ m

Perméamètres PANDA® à double anneau ouvert (ANTEA)

Nouveau modèle PANDA® II
Diamètre de l'anneau interne: 30 cm

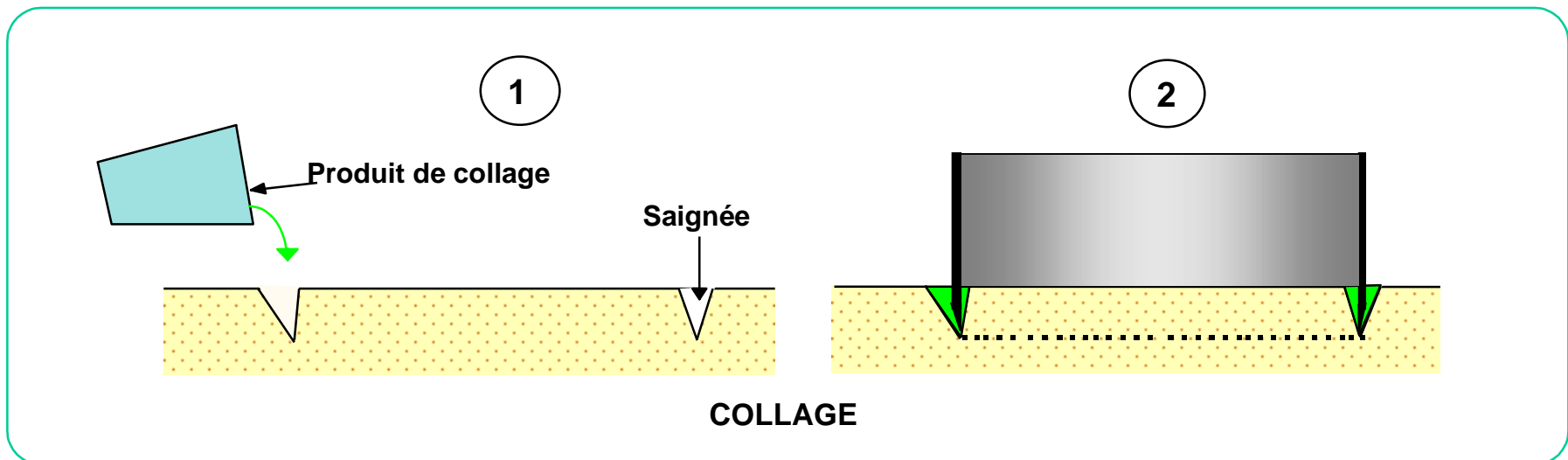
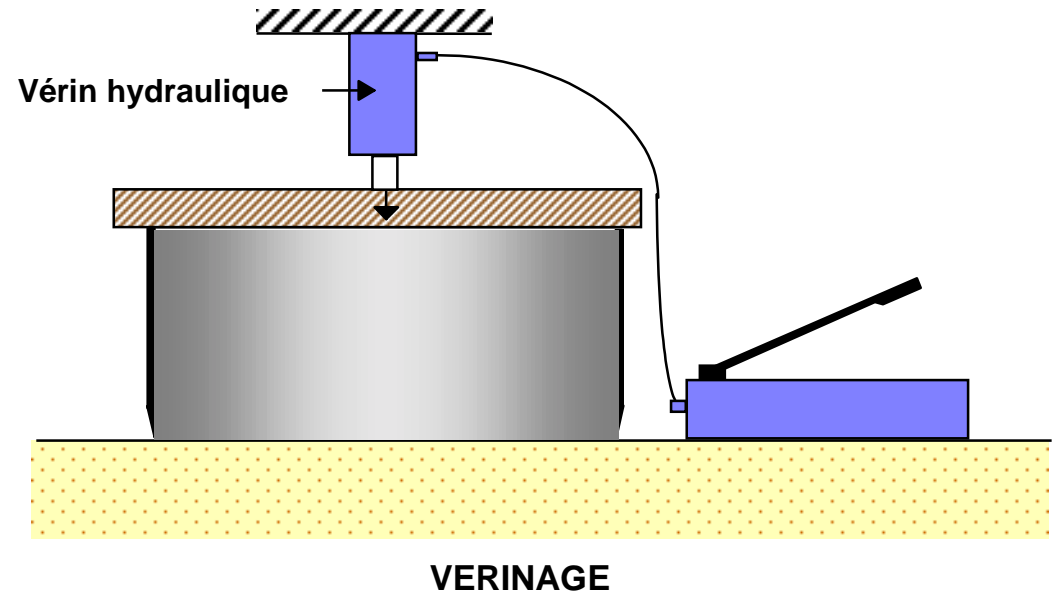
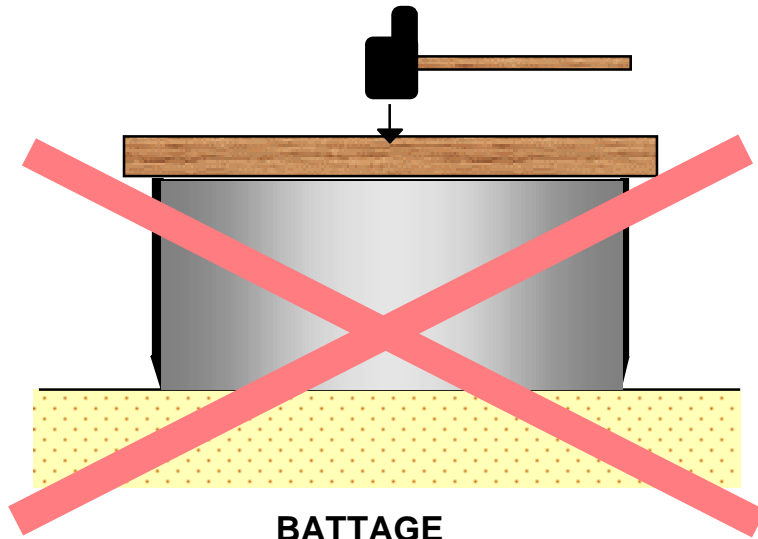


Ancien PANDA®
Diamètre de l'anneau interne: 12 cm

Les étapes de l'essai (d'après X30-418)

- Préparation de l'aire d'essai
- Mise en place des anneaux (collage de préférence)
- Mise en eau et phase de « saturation »
- Phase d'essai: obtention d'un écoulement proche du régime permanent
- Démontage de l'appareillage
- Prélèvements pour détermination de l'épaisseur de la zone saturée (en général mesures en laboratoire)
- Calcul du coefficient de perméabilité
- Rédaction du rapport d'essai

MISE EN PLACE DES ANNEAUX



Exemple de mise en place des anneaux par collage



**Perméamètre PANDA® II
à double anneau ouvert (ANTEA)**

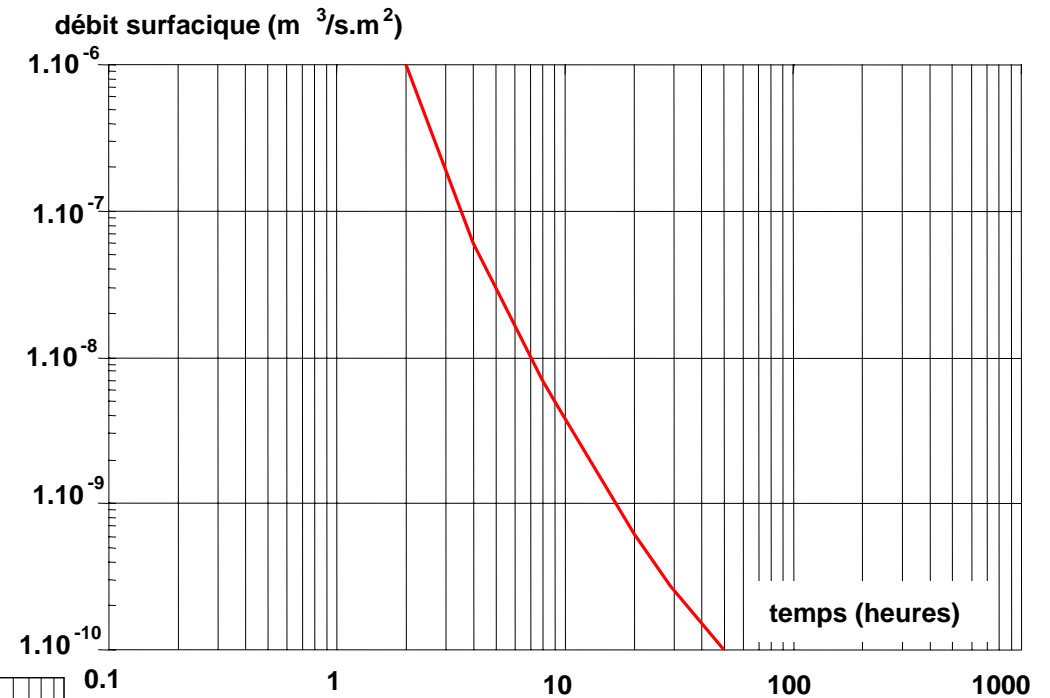
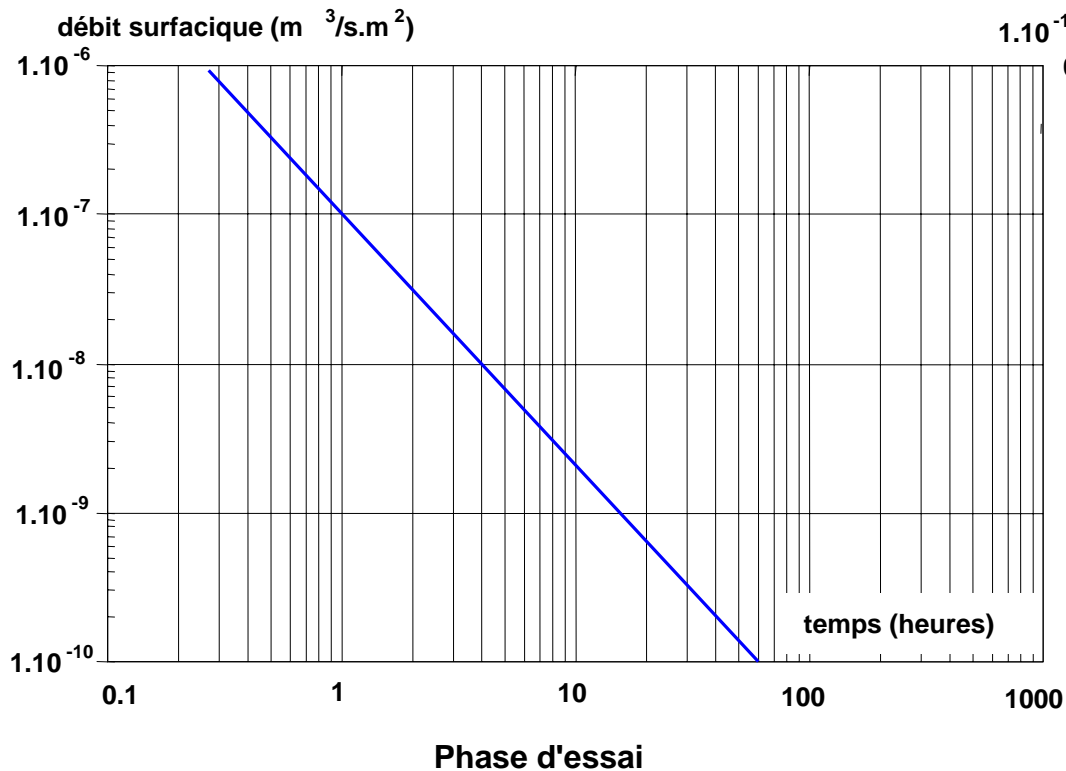


Perméamètre simple anneau grande taille (2m x 2m)



DUREE DE L'ESSAI

Dépend de la perméabilité !



Durée indicative des phases de « saturation » et d'essai (d'après X30-418)

Double anneau ouvert: PRINCIPE DU CALCUL DE LA PERMÉABILITÉ

□ **1. Infiltration en régime permanent**

⇒ Détermination du débit Q en régime permanent

□ **2. Calcul du débit surfacique**

v :

$$Q = K.A.i \quad (\text{Loi de DARCY})$$

avec : Q débit infiltré en m^3/s , mesuré pendant l'essai (régime permanent).

K perméabilité en m/s .

A surface d'infiltration en m^2 (section de l'anneau interne).

i gradient hydraulique en m/m .

$v = Q/A$ est appelé débit surfacique

v est relié à la perméabilité k :

$$v = k.i$$

□ **3. Calcul de k à partir du gradient i**

Hypothèse d'un écoulement « piston » (front de saturation)

Le gradient hydraulique i est toujours supérieur à 1

Il doit être déterminé lors de l'essai, à partir de z_w et h .

$$i = \frac{h + z_w}{z_w}$$

$$k = \frac{v}{i}$$

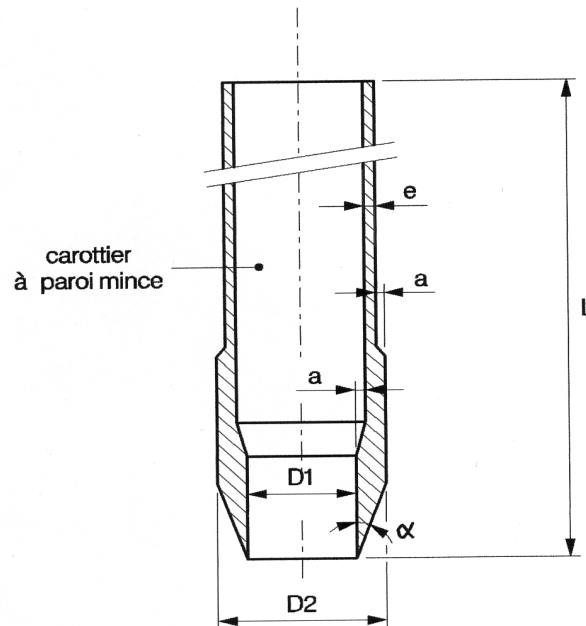
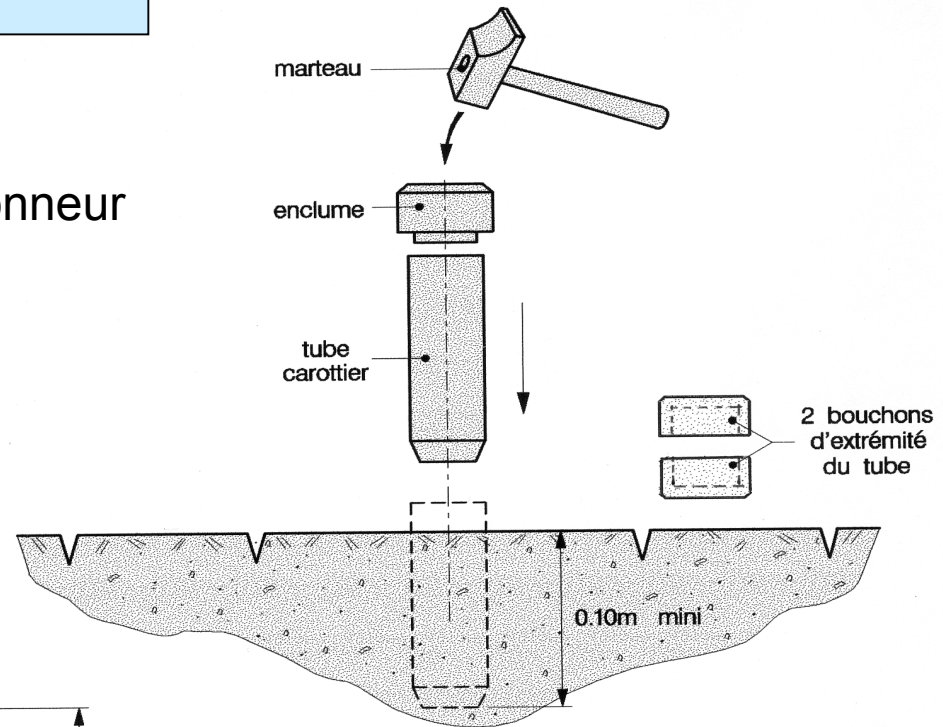
La détermination du gradient hydraulique à partir de z_w nécessite un examen après l'essai (« autopsie »)

Détermination de z_w

Exemple: prélèvements au carottier poinçonneur

Deux prélèvements:

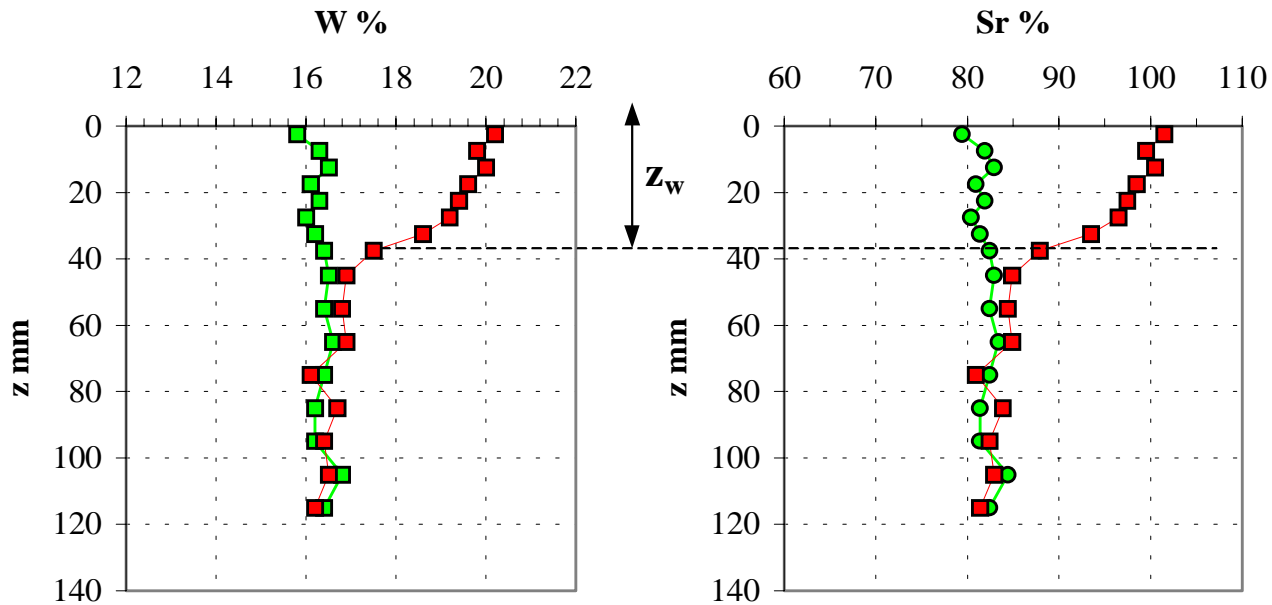
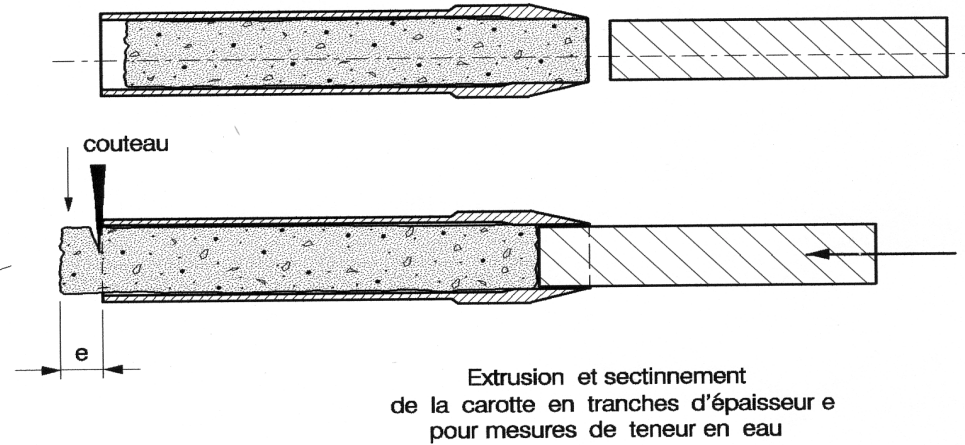
- Un au centre de l'anneau central
- Un à l'extérieur de l'anneau externe



$e = 0.8 \text{ à } 1.0\text{mm}$
 $a = 0.25\text{mm mini}$
 $D1 = 30 \text{ à } 40\text{mm}$
 $L = 150 \text{ à } 200\text{mm}$
 $\alpha = 20^\circ$

Exemple de tube de carottier

Mesure de teneur en eau



● et ■ profil sur échantillon témoin, prélevé hors perméamètre.
 ● et ■ profil sur échantillon, prélevé dans l'anneau central.

Détermination de z_w

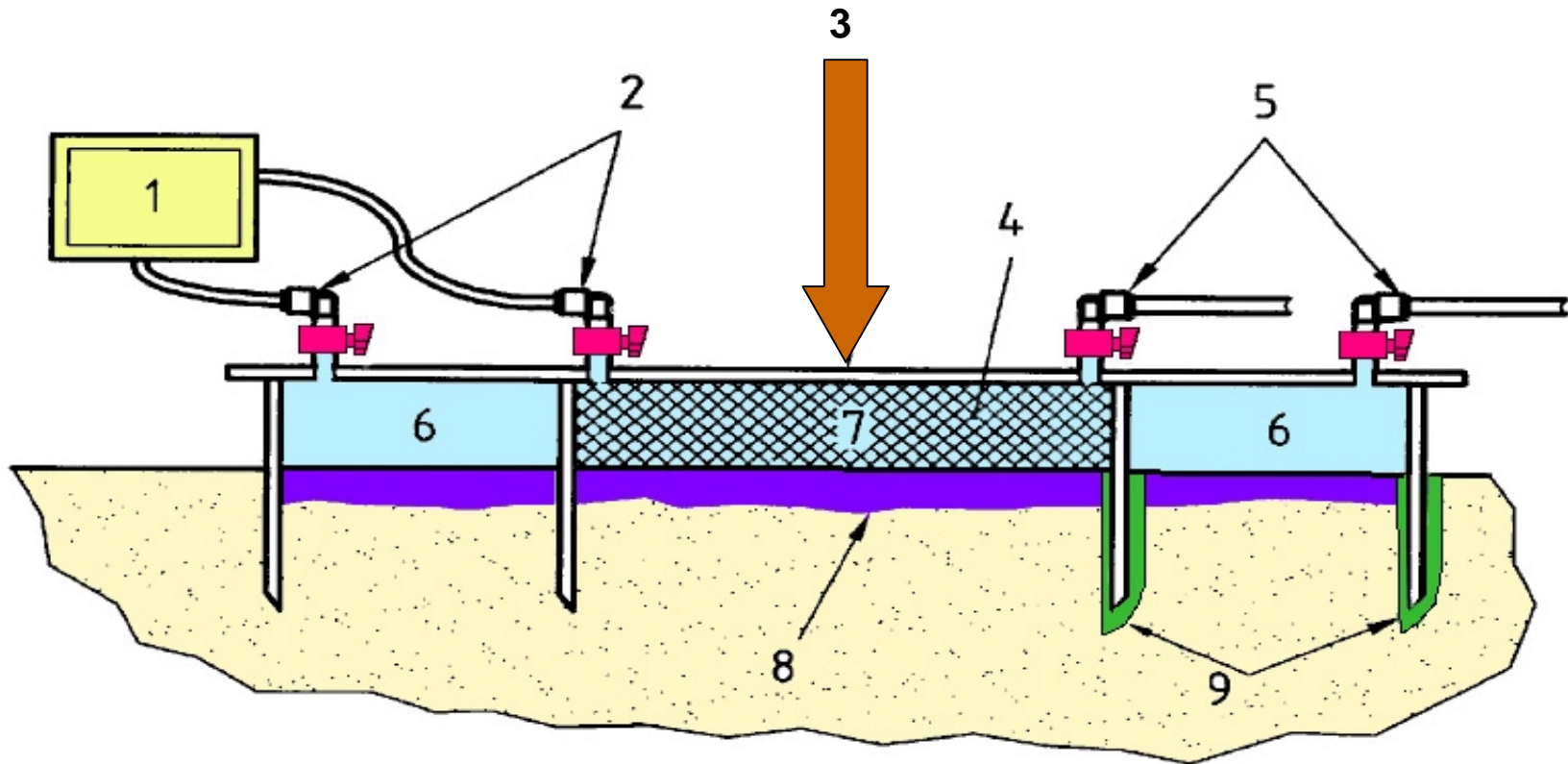
ESSAIS EN SURFACE

(2)

- Double anneau ouvert (X 30-418)

- • Double ou simple anneau fermé (X 30-420)

Domaine d'application: $1 \cdot 10^{-7}$ à $1 \cdot 10^{-10}$ m/s



1 Contrôleurs Pression Volume

2 Vannes d'alimentation

3 Dispositif de réaction

4 Dispositif éventuel de confinement

5 Vannes de purge

6 Anneau externe

7 Anneau interne

8 Front d'infiltration

9 Gorges de scellement

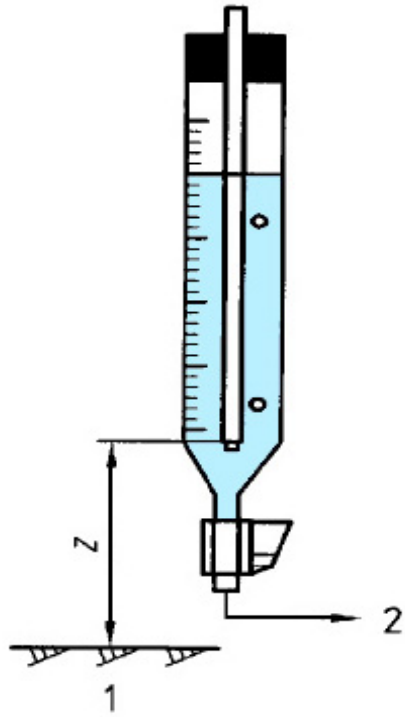
Schéma du perméamètre à double anneau, de type fermé
 (d'après AFNOR X30-420)

Exemple de dispositif sur site



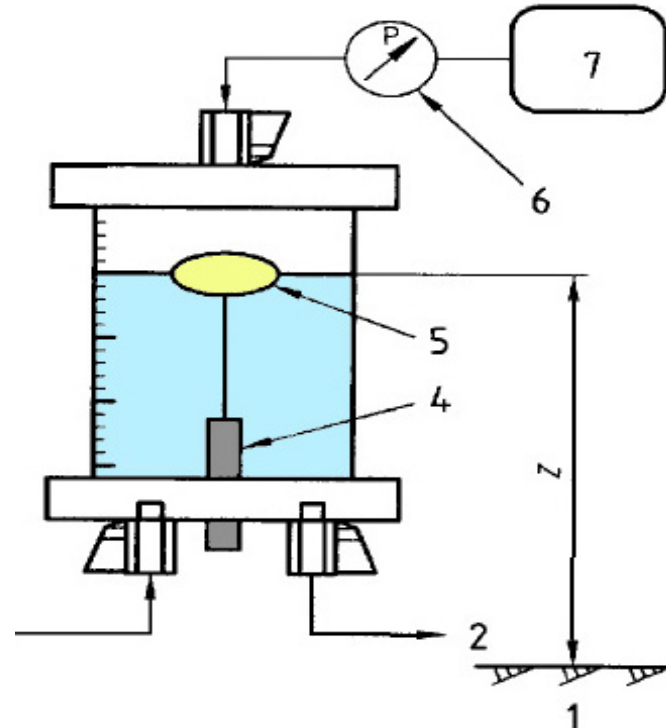
Pressio perméamètre
HORIZONS





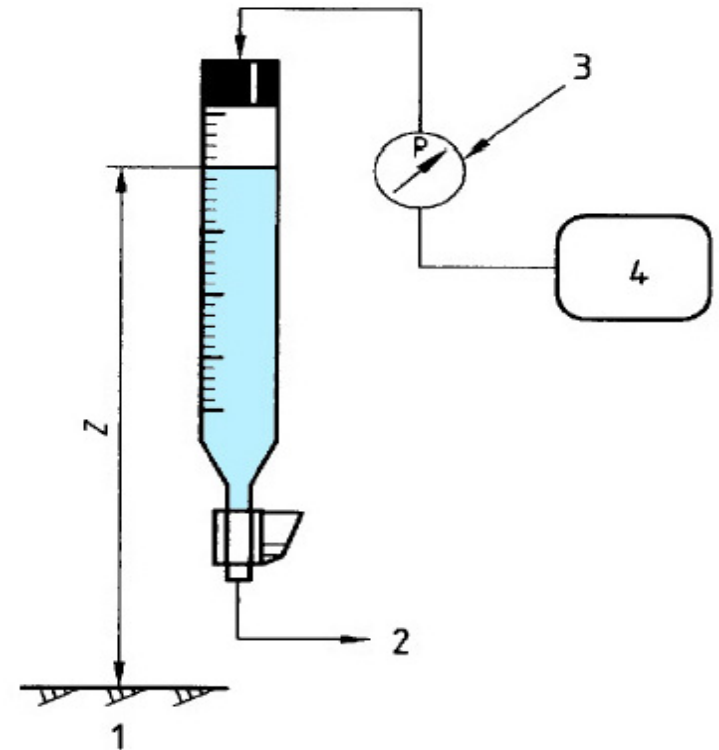
1 Surface du sol
 2 Vers l'infiltromètre

Tube de Mariotte
 $(h = z)$



1 Surface du sol
 2 Vers l'infiltromètre
 3 Vanne de remplissage
 4 Capteur de déplacement
 5 Flotteur
 6 Manomètre
 7 Générateur de pression d'azote

Réservoir pressurisé
 $(h = z + P/\rho g)$



1 Surface du sol
 2 Vers l'infiltromètre
 3 Manomètre
 4 Générateur de pression d'azote

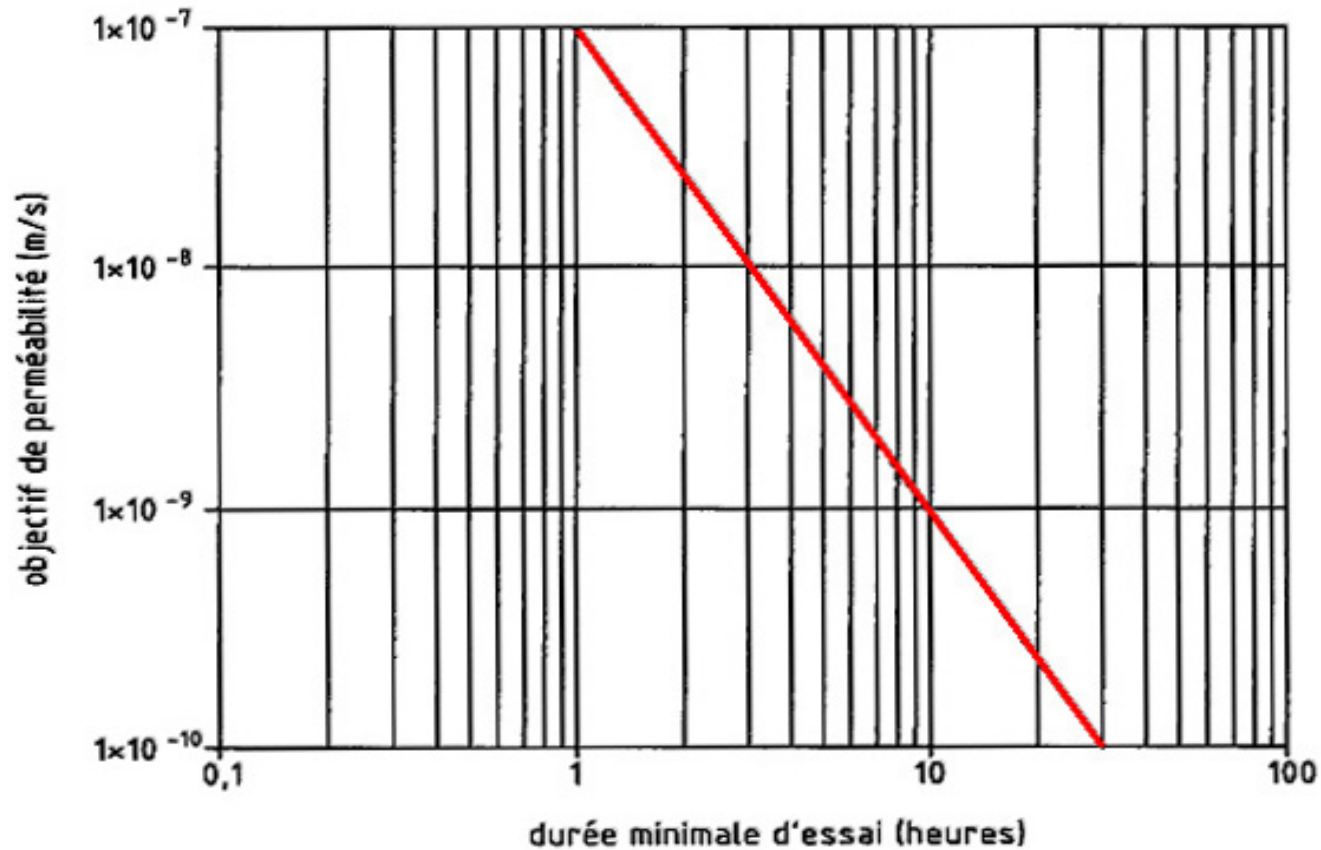
CPV type «Ménard» ($h = z + P/\rho g$)
 (Tube gradué pressurisé)

Exemples de contrôleurs pression-volume (d'après X30-420)

Les étapes de l'essai (d'après X30-420)

- Préparation de l'aire d'essai
- Mise en place des anneaux (vérinage ou collage) et du massif de réaction
- Mise en eau et phase d'essai n° 1: 1^{er} palier de charge (obtention d'un régime proche du permanent) → $\Delta V_1, \Delta t_1$
- Phase d'essai n° 2: 2^{ème} palier de charge (obtention d'un régime proche du permanent) → $\Delta V_2, \Delta t_2$
- Phase d'essai n° 3: 3^{ème} palier de charge (idem) → $\Delta V_3, \Delta t_3$
- Démontage de l'appareillage
- Prélèvements pour caractérisation du matériau et détermination de l'épaisseur de la zone saturée finale
- Calcul du coefficient de perméabilité
- Rédaction du rapport d'essai

Durée des phases d'essai (d'après X30-420)



Durée indicative minimale pour la phase de mise en eau (1^{er} palier)
(charge hydraulique h_1 , inférieure à 1m)

Critère d'arrêt pour les phases suivantes (paliers de charge croissants h_2 et h_3)

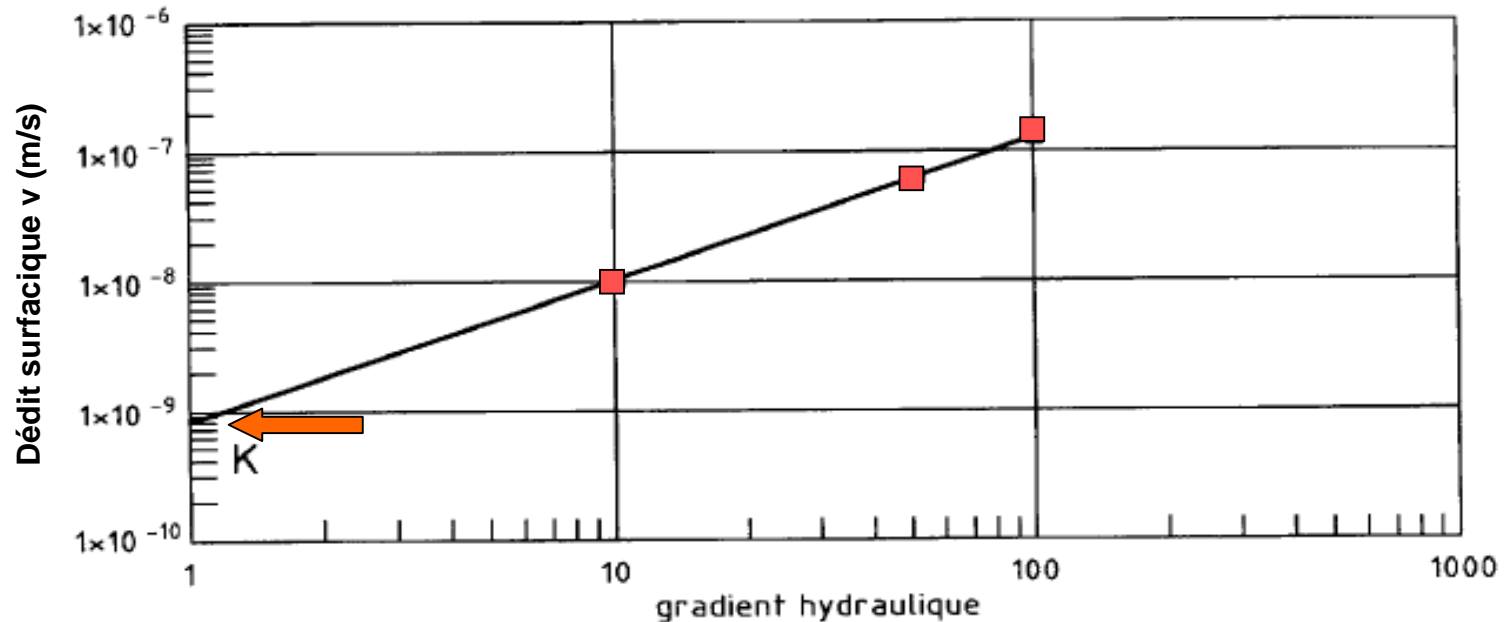
Calcul du coefficient k (d'après X30-420)

1. Pour chaque palier j de charge :

Calcul du débit surfacique v_j :

Calcul du gradient i_j

2. Détermination graphique de l'équation de la droite $v = k \cdot i^b$,
passant par les points expérimentaux



La valeur du coefficient de perméabilité k est l'ordonnée correspondant à la valeur 1 du gradient hydraulique.

Le coefficient b représente la pente de la droite dans le diagramme bilogarithmique (entre 0,8 et 1,5 en général)

ESSAIS EN FORAGE

Éléments communs

aux 3 normes d'essais en forage:

- Réalisation des forages
- Dispositifs d'obturation et soutènement de la cavité de mesure
- Corrections thermiques

(Annexes aux normes)

Tableau A1: méthodes usuelles de réalisation des forages pour essais de perméabilité

	ROTATION SEULE						ROTATION ET PERCUSSION		BATTAGE PERCUSSION SEULE		FONÇAGE SEUL SANS VIBRATION		
	A sec			A l'eau			A l'air		RTP en tête	MFT dans trou	Vibrofoncé	battu	
	TM à main	THC à sec		RBT	RDL	Carottier rotatif	FT sur tiges						
	Queue carpe	Outil à doigts	Tricône Bicône à molettes	désagrégateur à lames taillant									
Vases et argiles molles	3	3	2		2						3	1	
Argiles moyennement compactes	2	1 à 2*	1	3	1	3	2	3		3	3	3	
Argiles compactes, marnes raides		1 à 2*	1	2	1	1 à 2*	1	2		2			
Limons au dessus de nappe	1	1	1	2 à 3*	3		1	2 à 3*		1 à 2*	1 à 2*	3	
Limons sous nappe	3	3	2	2	1					3	3	2	
Sables argileux peu compacts	2	1 à 2*	1 à 2*	2 à 3*	2 à 3*	3	1 à 2*	2 à 3*		2	2	1 à 2*	
Sables argileux moyennement compacts et hétérogènes		1	1	2	2	2 à 3*	1	2		2	2		
Sols grossiers argileux (ex: argiles à silex)		2	2	1	2	2 à 3*	2	1		1	1		
Roches altérées		2	1	1	1	1 à 2*	2	1 à 2*		2	2		
Roches saines ou dures				1	1	1		1	1				

Légende:

TM: Tarière à main à cuillère
 THC: Tarière hélicoïdale continue
 RBT: Rotation bicône ou tricône
 FT: "Fish Tail"

RDL: Rotation outil désagrégateur à lame
 RTP: Rotopercussion en tête de trou
 MFT: Rotopercussion, marteau fond de trou

Code d'utilisation:


1 = adapté  = non applicable
 2 = accepté
 3 = non adapté
 * = à apprécier en fonction des conditions réelles du site

Tableau A2: Dispositifs d'obturation et de soutènement des forages pour essais de perméabilité

Terrains \ Dispositifs	1	2	3	4	5 / 6
Vases et argiles molles	1 à 2*	1 à 2*	1 à 2*		1 à 2*
Argiles moyennement compactes	1	1	1 à 2*	3	1
Argiles compactes, marnes raides	1	1	1	1 à 2*	1
Limons au dessus de nappe	1		1 à 2*	2 à 3*	1
Limons sous nappe.	1	1 à 2*	2 à 3*	3	1
Sables argileux peu compacts	1	1 à 2*	2 à 3*		1
Sables argileux moyennement compacts et hétérogènes	1	2 à 3*	2 à 3*	3	1
Sols grossiers argileux (ex: argiles à silex)	1	2 à 3*	3	2 à 3*	1 à 2*
Roches altérées	2	2 à 3*		1	1 à 2*
Roches saines ou dures	3	3		1	2 à 3*

Légende

- 1** Soutènement par un massif filtrant et isolement de la cavité par bouchon étanche
- 2** Tubage scellé avec obturateur amovible
- 3** Tube foncé avec obturateur amovible
- 4** Obturateur amovible mis en place contre la paroi du forage
- 5/6** Cavité réalisée à faible profondeur

Code d'utilisation:

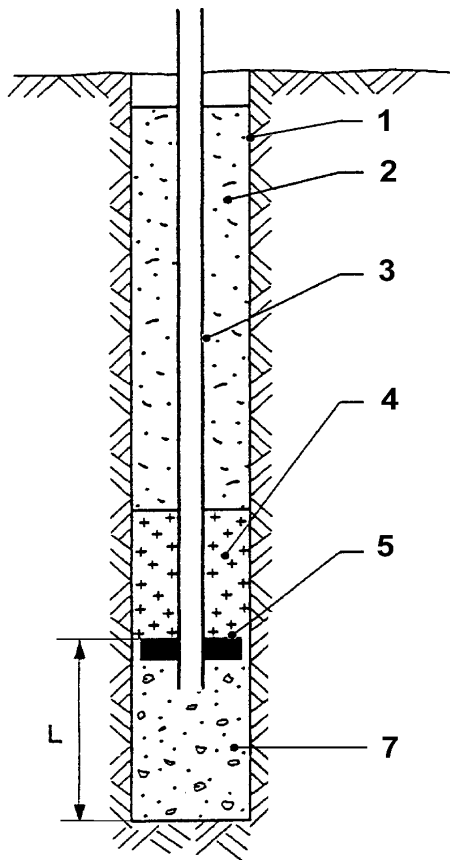
1 = adapté = non applicable

2 = accepté

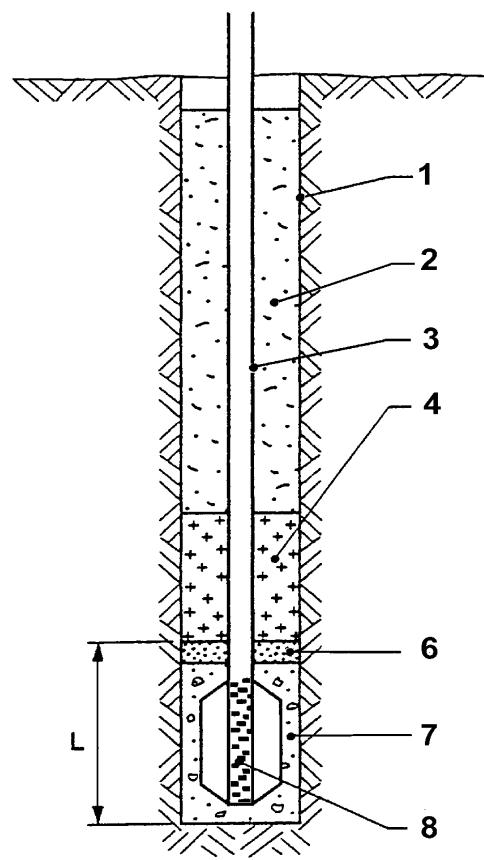
3 = non adapté

* = à apprécier en fonction des conditions réelles du site

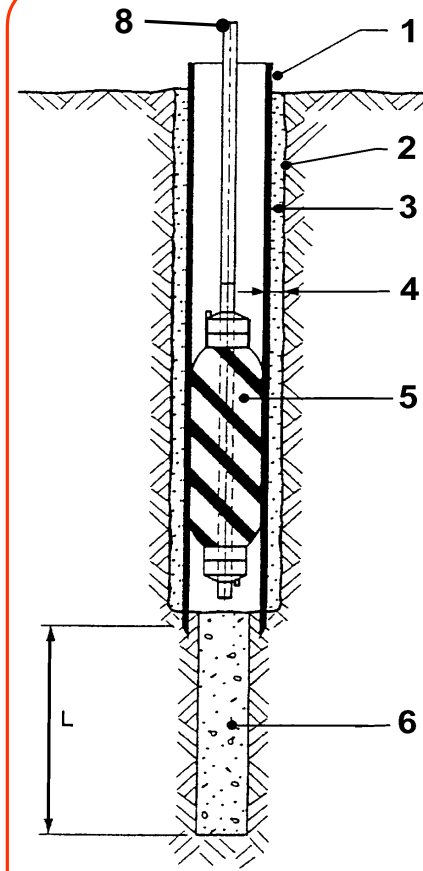
EXEMPLES DE DISPOSITIFS D'OBTURATION ET DE SOUTÈNEMENT DE FORAGE



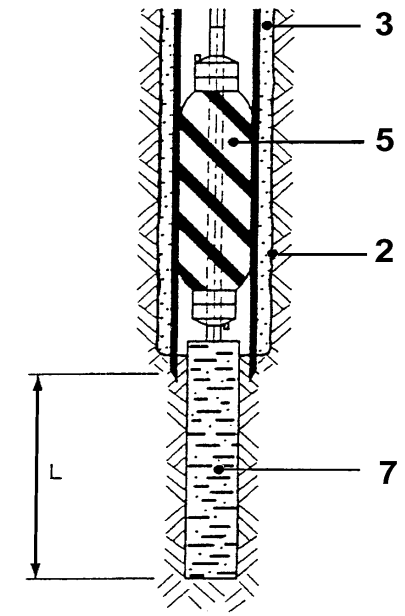
Dispositif 1a



Dispositif 1b



Dispositif 2a



Dispositif 2b

- | | |
|---------------------------|-------------------------------|
| 1. Forage | 5. Disque centreur-séparateur |
| 2. Matériau de scellement | 6. Sable fin |
| 3. Tube de liaison | 7. Matériau filtrant |
| 4. Bouchon étanche | 8. Tube crépiné |

- | | |
|-----------------------------|------------------------|
| 1. Tube scellé | 5. Obturateur amovible |
| 2. Forage | 6. Matériau filtrant |
| 3. Scellement d'étanchéité | 7. Tube filtrant |
| 4. Annulaire (≥ 2 mm) | 8. Tube de liaison |

ESSAIS EN FORAGE

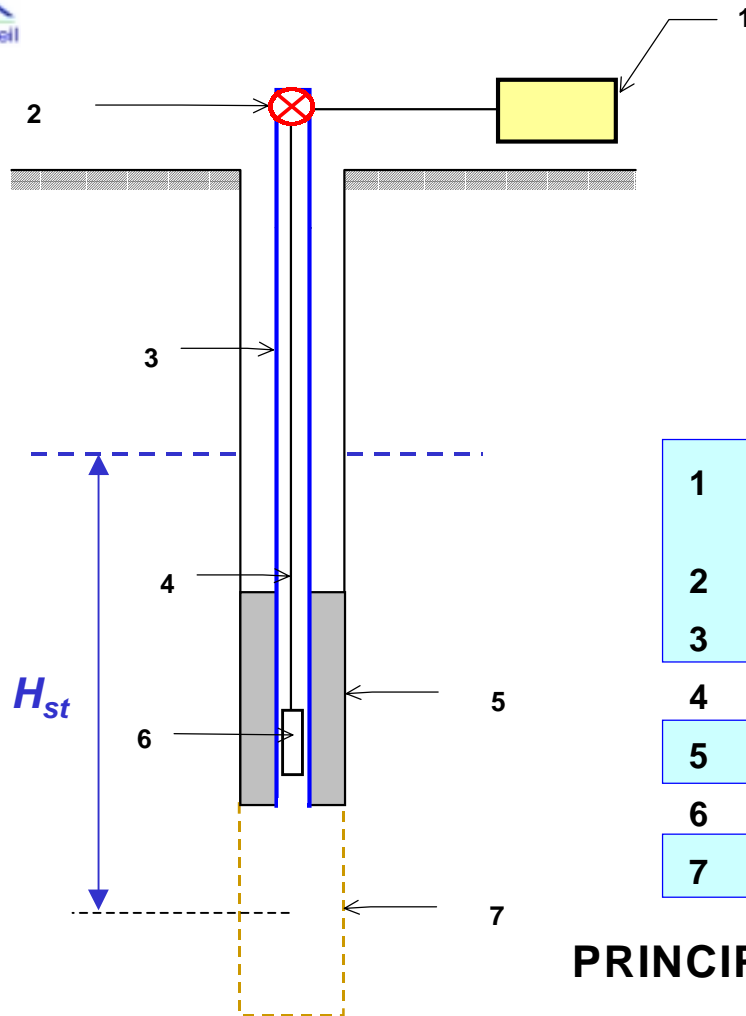
(1)

- • Essai à charge variable en forage ouvert (X 30-423)

Domaine d'application: $1 \cdot 10^{-6}$ à $1 \cdot 10^{-9}$ m/s

- Essai à charge variable en forage fermé (X 30-425)
- Essai d'infiltration à charge constante (X 30-424)

Essai à charge variable en forage ouvert (X 30-423)



- 1 Dispositif d'enregistrement de la pression et de la température de l'eau
- 2 Vanne d'isolement
- 3 Tube de liaison
- 4 Câble du capteur de pression
- 5 Dispositif d'isolement de la cavité
- 6 Capteur de pression
- 7 Cavité d'essai (avec ou sans soutènement)

PRINCIPE DU DISPOSITIF D'ESSAI

(Exemple de détermination de H_{st} par capteur de pression immergé)



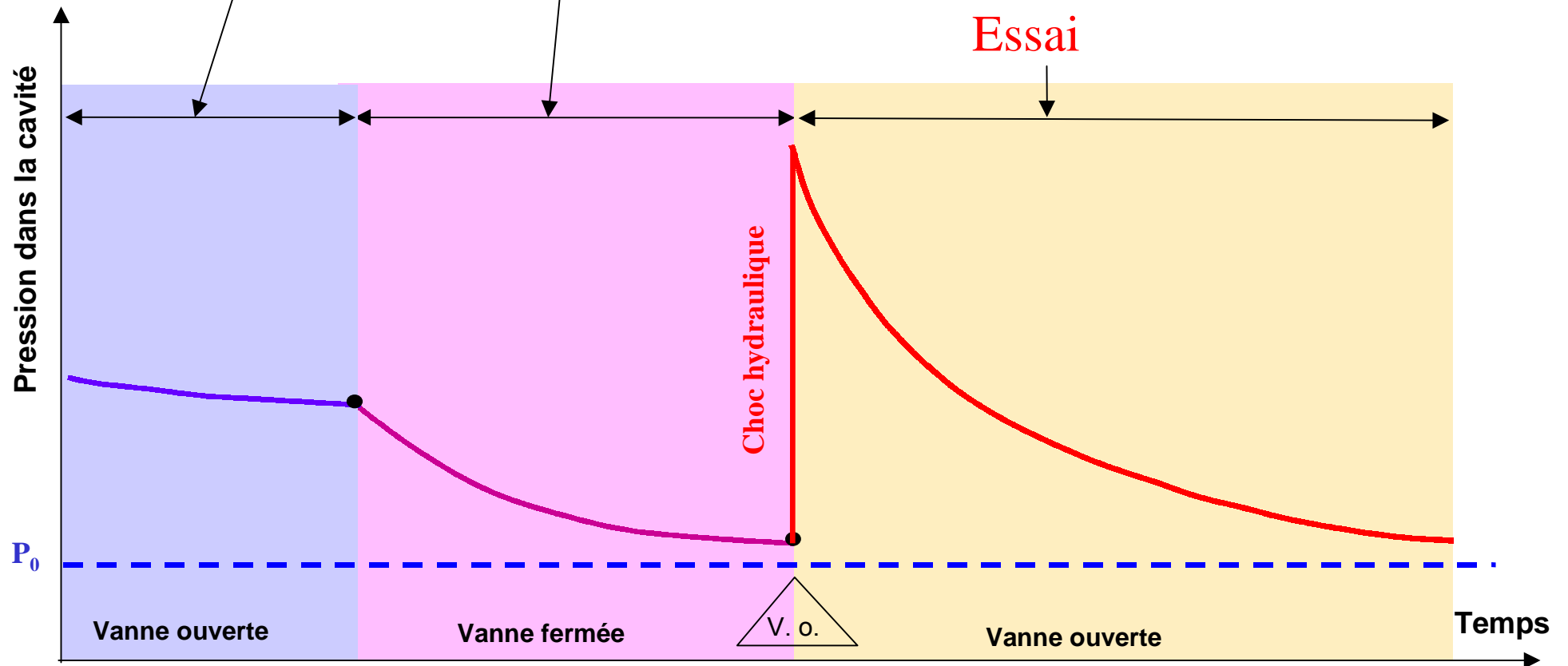
Nécessité de déterminer H_{st} lors de l'essai

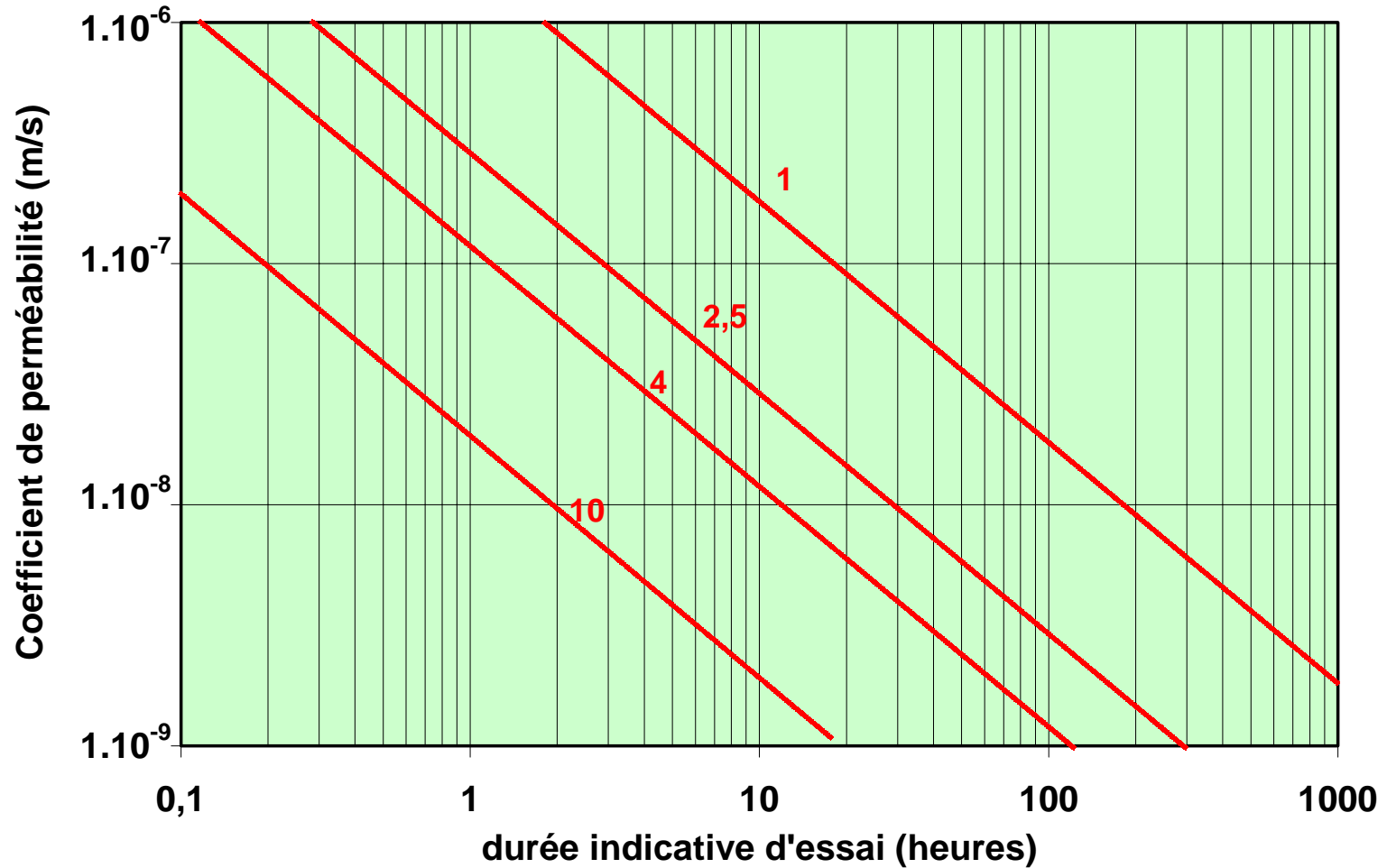
DIFFÉRENTES PHASES DE L'ESSAI

Saturation du terrain autour de la cavité

Approche de la pression d'équilibre

Essai





En fonction de la perméabilité et du **rapport de section du dispositif (d/D)**

INTERPRETATION DE L'ESSAI

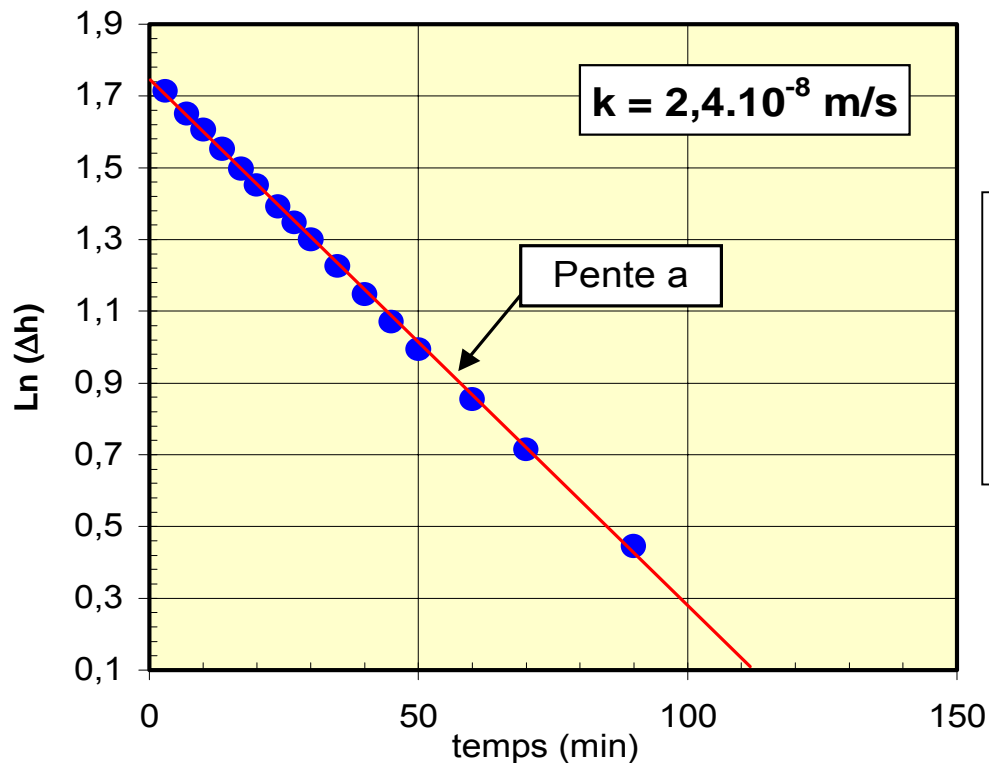
Représentation semi-logarithmique - $\text{Ln}(\Delta h)$ en fonction de t

L'équation conventionnelle des essais à charge variable en tube ouvert est:

$$\text{Ln} \left[\frac{\Delta h_0}{\Delta h(t)} \right] = \frac{m.k.B.(t-t_0)}{A_i}$$

Δh_0 et $\Delta h(t)$ sont les variations de charges hydrauliques mesurées respectivement aux instants t_0 et t , B est le diamètre de cavité de mesure, A_i est la section intérieure effective du tube de liaison dans lequel est effectuée la mesure ;

m est le facteur de forme de la cavité. Les valeurs de m sont calculées en fonction de la géométrie de la cavité.



$$\text{Pente } a = m.k.B / A_i$$

Difficulté de connaître le niveau statique initial et donc les variations de charge au cours de l'essai par rapport à ce niveau statique !

ESSAIS EN FORAGE

(2)

- Essai à charge variable en forage ouvert (X 30-423)

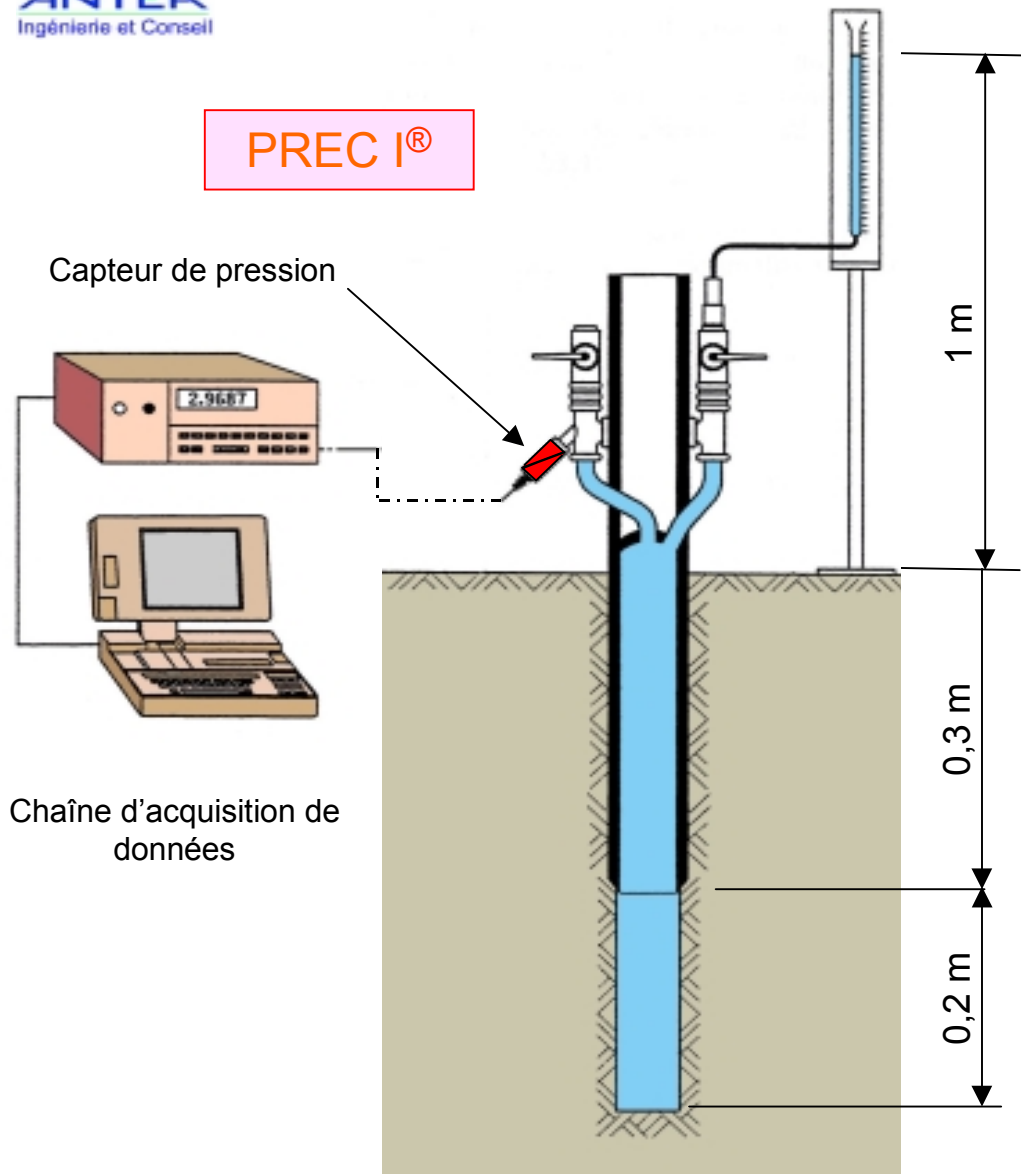


- Essai à charge variable en forage fermé (X 30-425)

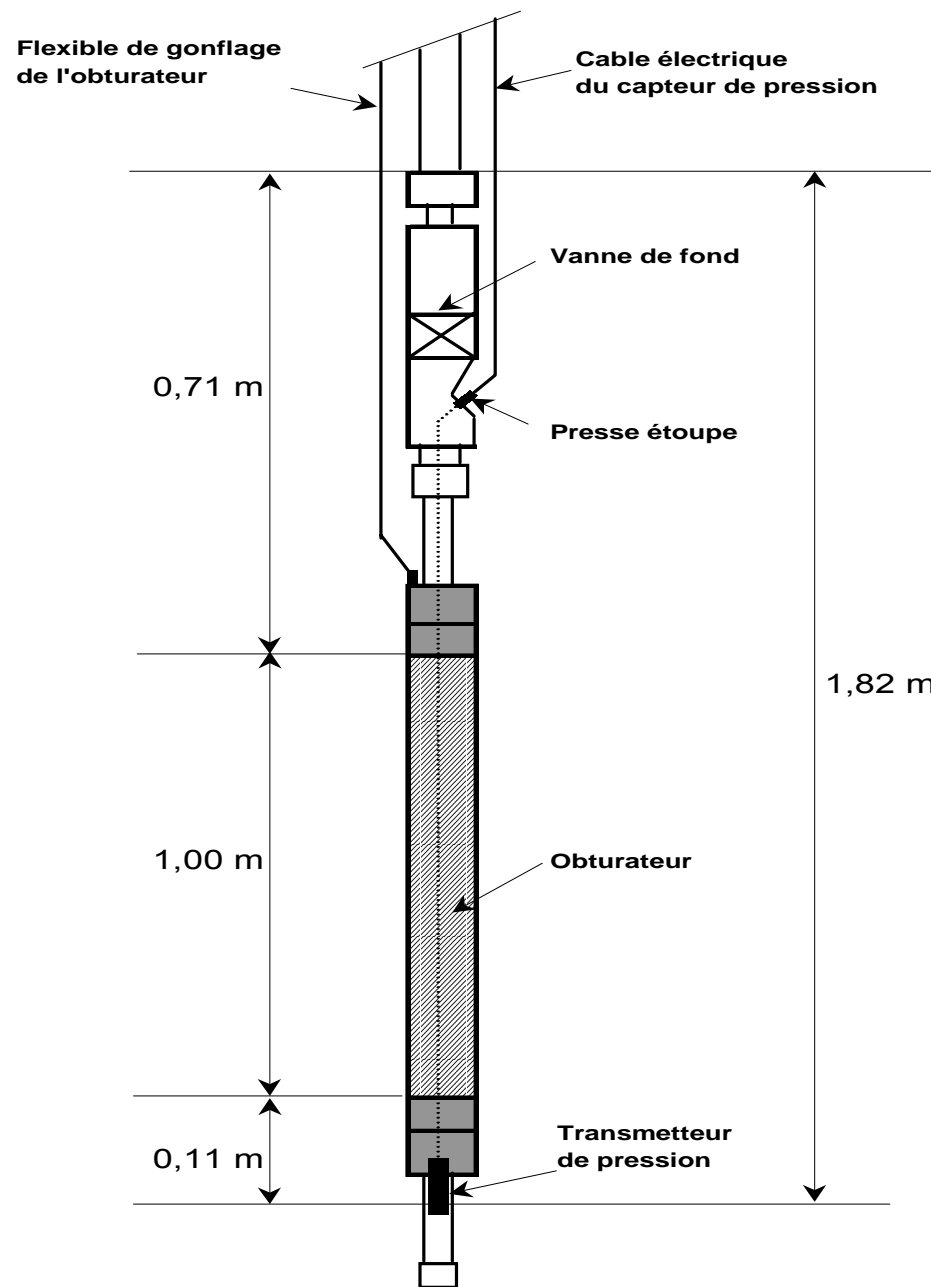
Domaine d'application: $< 1. 10^{-8} \text{ m/s}$

- Essai d'infiltration à charge constante (X 30-424)

PREC I®



Dispositif ANTEA pour essais proches de la surface



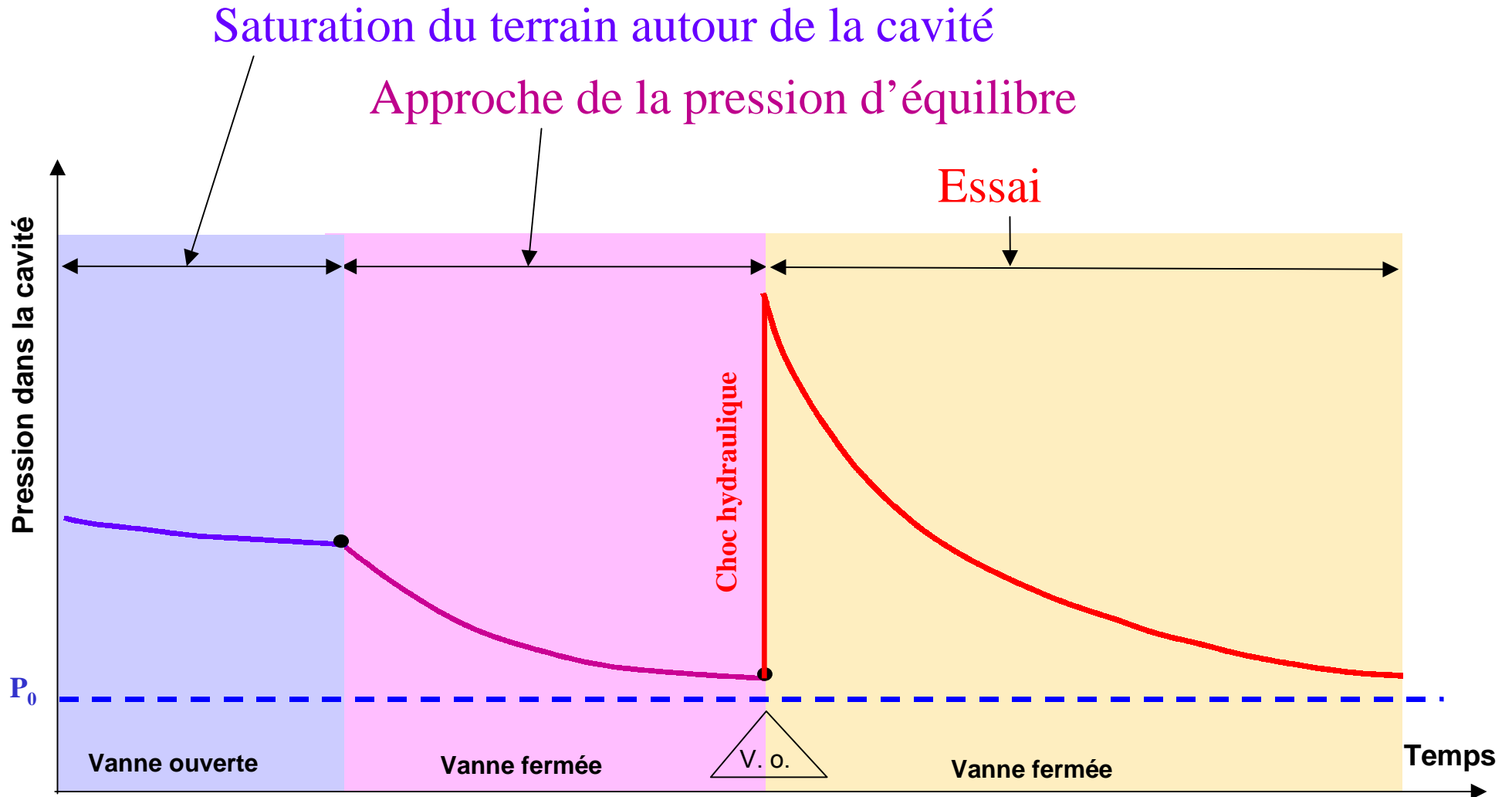
Dispositif ANTEA pour essais en forage

Exemple de dispositif pour essais en subsurface

Dispositif PRECI® (ANTEA)



DIFFÉRENTES PHASES DE L'ESSAI



Durée de la phase d'essai sensiblement plus courte que pour l'essai en forage ouvert

INTERPRETATION DE L'ESSAI

Solution analytique de BREDEHOEFT, PAPADOPULOS et COOPER

La charge au forage $H(t) = H_{ini} + (H_0 - H_{ini}) \cdot F(\alpha, \beta)$, avec

$$F(\alpha, \beta) = \frac{8\alpha}{\pi^2} \int_0^\infty \exp^{-\beta u^2 / \alpha} \cdot du / (u \cdot \Delta(u))$$

$$\text{et } \Delta(u) = [uJ_0(u) - 2\alpha J_1(u)]^2 + [uY_0(u) - 2\alpha Y_1(u)]^2$$

J_0, J_1, Y_0, Y_1 , fonctions de Bessel d'ordre 0 et 1 et respectivement du 1^{er} et second type, et deux variables adimensionnelles :

$$\alpha = S \frac{\pi \cdot r^2}{V_w C^* \rho \cdot g} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{\pi T \cdot t}{V_w C^* \rho \cdot g}$$

C^* : coefficient de compressibilité de la chambre

V_w : Volume d'eau de la chambre

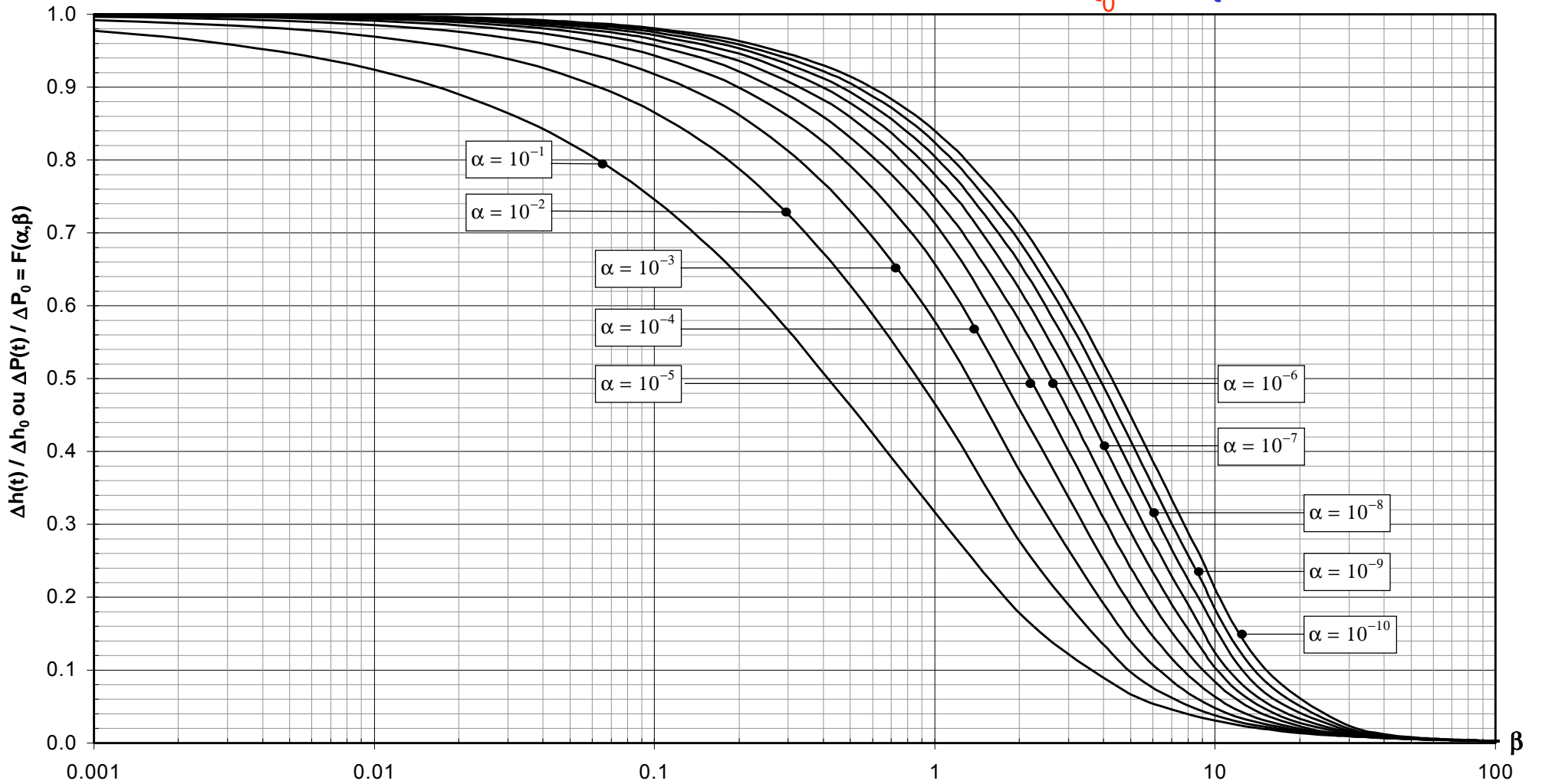
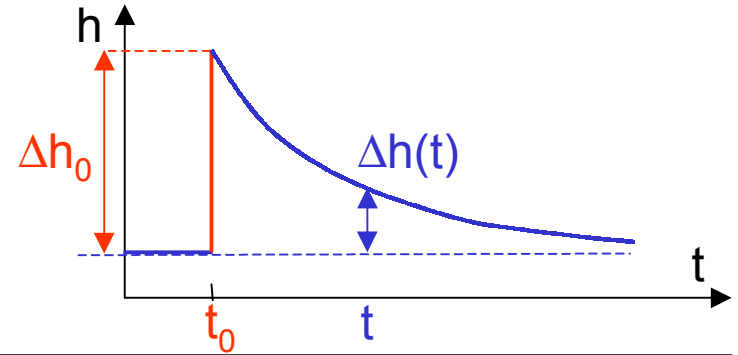
r_w : rayon du forage

ρ : masse volumique de l'eau

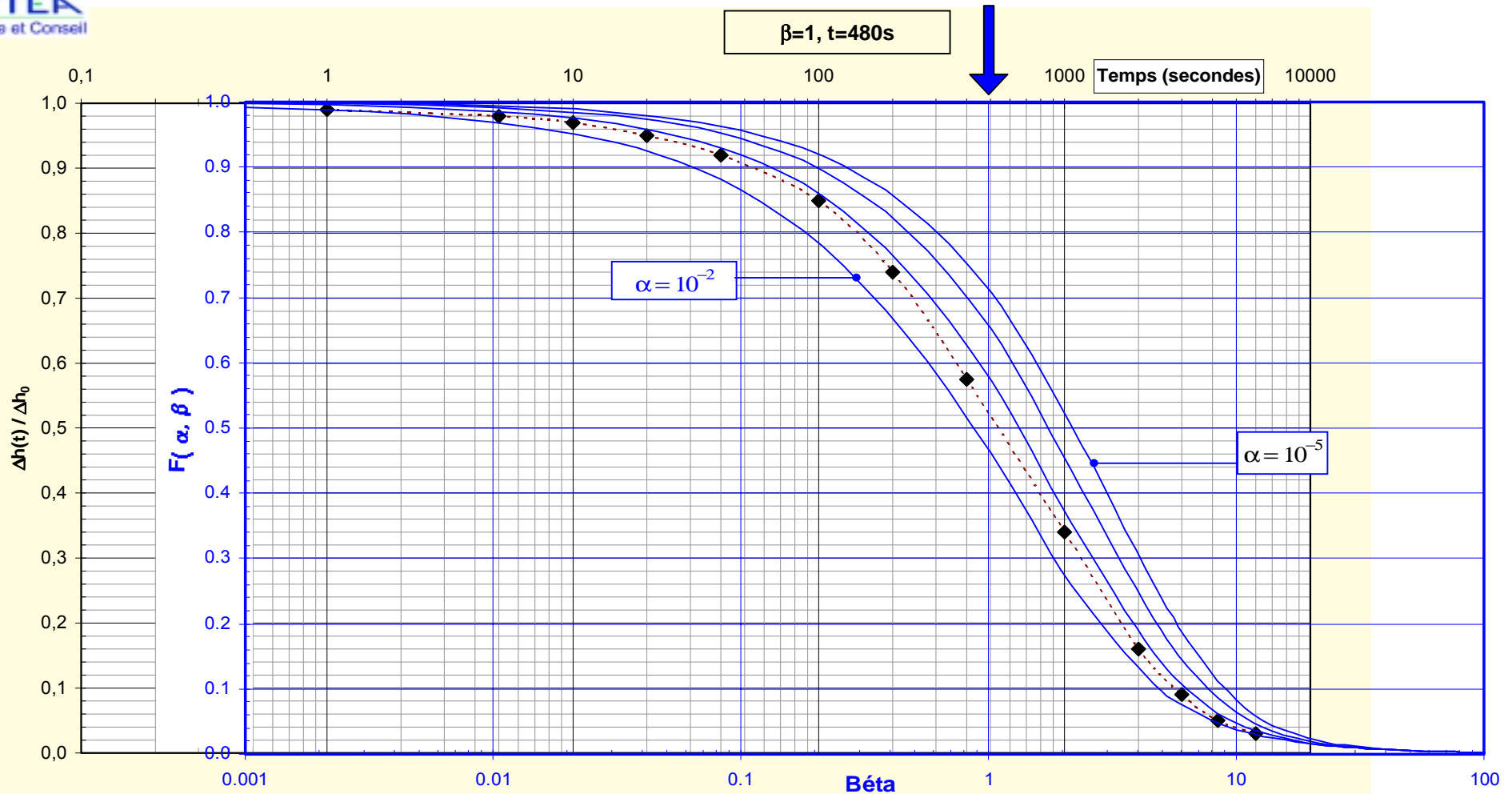
t : temps écoulé depuis le choc hydraulique

Courbes types $F(\alpha, \beta)$

$$F(\alpha, \beta) = \frac{\Delta h(t)}{\Delta h_0}$$



Interprétation manuelle



Forage :

rayon $r_c = 0,048$ m

Longueur cavité : $L = 1$ m

Essai :

$\Delta P_0 = 1.10^4$ Pa. (choc initial)

$\Delta V = 10$ cm³, d'où $C^* \cdot V_w = 1.10^{-9}$

$\rho_w = 1\ 000$ kg/m³

On déduit de cette superposition que $\alpha = 3.10^{-3}$, et $t = 480$ s pour $\beta = 1$

$$\text{d'où : } s = \frac{3.10^{-3} \cdot 10^{-9} \cdot 1000 \cdot 9,81}{\pi (0,048^2)} = 5.10^{-6}$$

$$\text{et } T = \frac{1}{480} \frac{10^{-9} \cdot 1000 \cdot 9,81}{\pi} = 6,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}, \quad \text{soit } \mathbf{k = T/L = 6,5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}}$$

L'essai à charge variable en chambre fermée:

- met en œuvre un équipement similaire à celui pour les essais en forage ouvert (vanne d'isolement),
 - comporte les mêmes phases que l'essai en forage ouvert
- *nécessite impérativement la détermination de la pression stabilisée dans la chambre avant le choc hydraulique.*

Cependant,


- la durée de la phase d'essai est nettement plus courte
- l'interprétation est plus complexe, et nécessite de déterminer la compressibilité du système

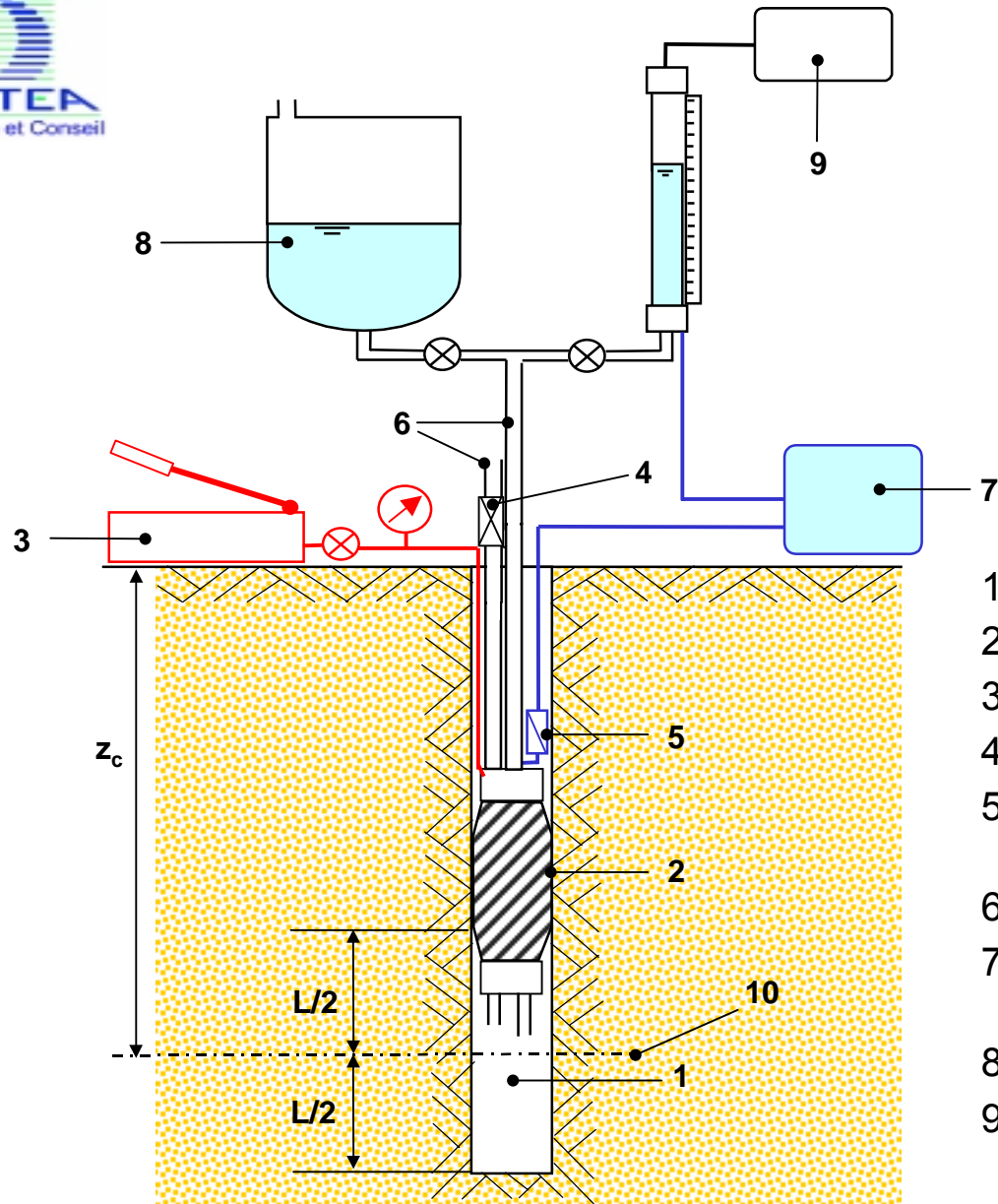
ESSAIS EN FORAGE

(3)

- Essai à charge variable en forage ouvert (X 30-423)
- Essai à charge variable en forage fermé (X 30-425)
- • Essai d'infiltration à charge constante (X 30-424)

Domaine d'application: $5 \cdot 10^{-7}$ à $1 \cdot 10^{-10}$ m/s

 Projet non encore soumis à enquête publique AFNOR



(d'après X30-424)

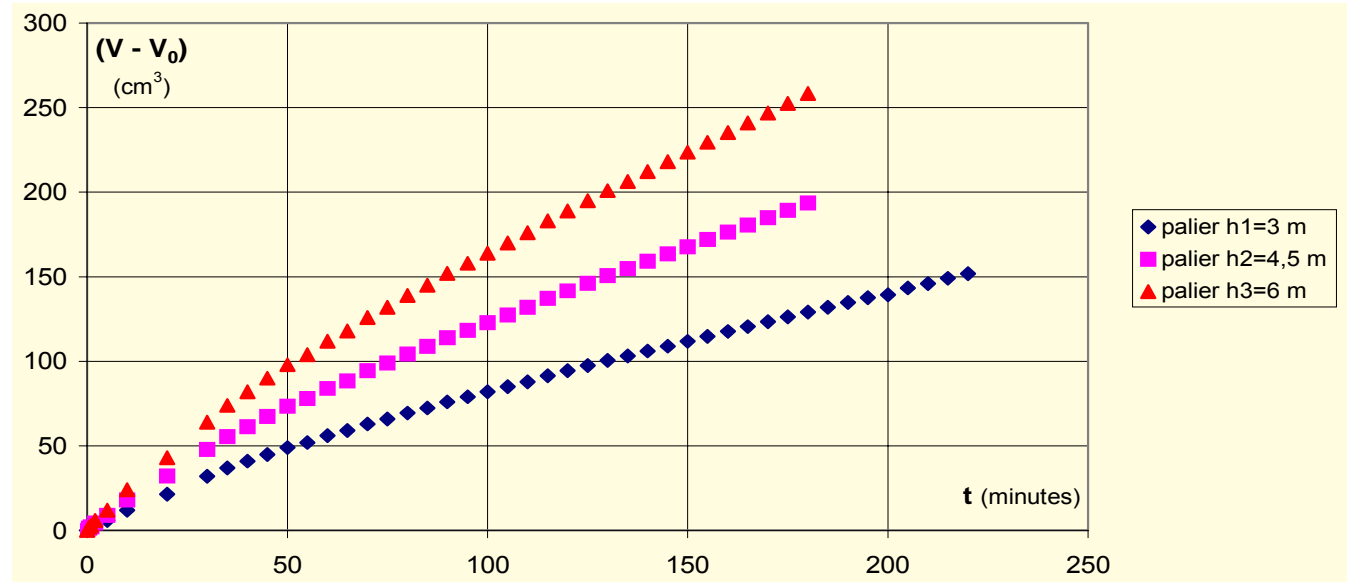
- 1 Cavité de mesure
- 2 Obturateur dilatable
- 3 Dispositif de dilatation de l'obturateur
- 4 Vanne d'isolement
- 5 Capteur de pression et de température de l'eau
- 6 Tube de liaison
- 7 Dispositif de mesure de la pression, du volume infiltré et de la température de l'eau
- 8 Réserve d'eau claire
- 9 Dispositif de génération et de régulation de la pression

Dispositif d'infiltration à charge constante par application d'une pression pneumatique.
Cavité isolée par obturateur et vanne de fond.-- (Exemple)

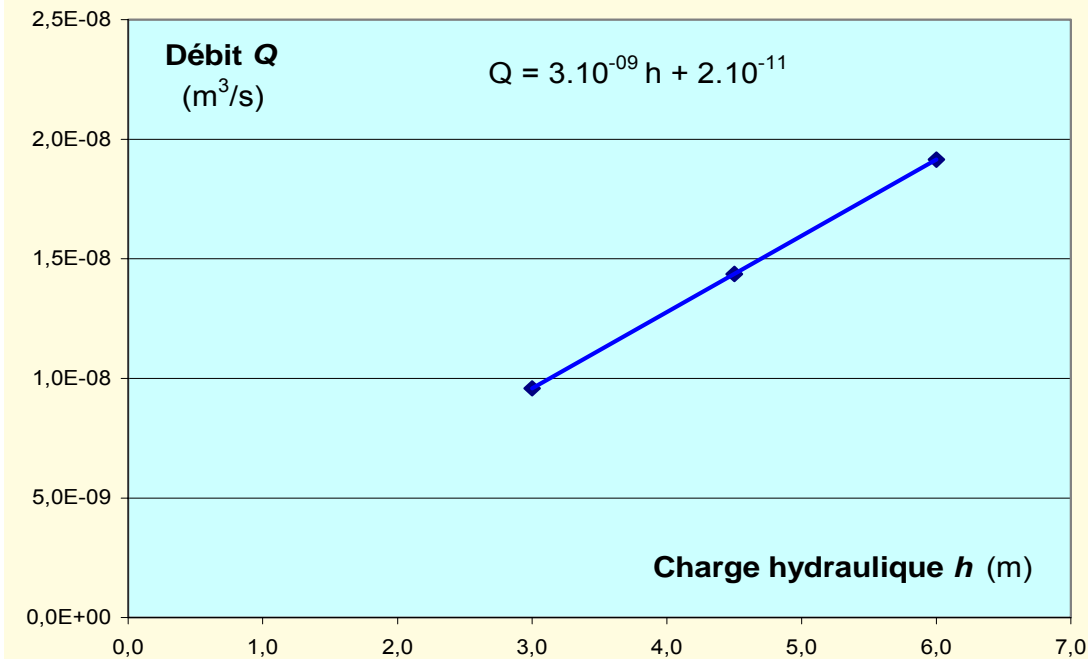
Les étapes de l'essai (d'après X30-424)

- Réalisation de la cavité d'essai
- Mise en place du dispositif d'isolement et du matériel de mesure
- Mise en eau et phase d'infiltration initiale
- Phase d'essai n° 1: 1^{er} palier de charge (obtention d'un régime proche du permanent. Critère d'arrêt) → Q_1, h_1
- Phase d'essai n° 2: 2^{ème} palier de charge (obtention d'un régime proche du permanent . Critère d'arrêt) → Q_2, h_2
- Phase d'essai n° 3: 3^{ème} palier de charge (idem) → Q_3, h_3
- Démontage de l'appareillage
- Calcul du coefficient de perméabilité
- Rédaction du rapport d'essai

INTERPRETATION DE L'ESSAI



courbes d'évolution de volume infiltré $V(t)_i$ à chaque palier i



$$Q_{\infty} = k.h.m.2r_c$$

k Coefficient de perméabilité

h Charge appliquée

m Coefficient de forme de la cavité

r_c Rayon de la cavité

ESSAIS EN LABORATOIRE

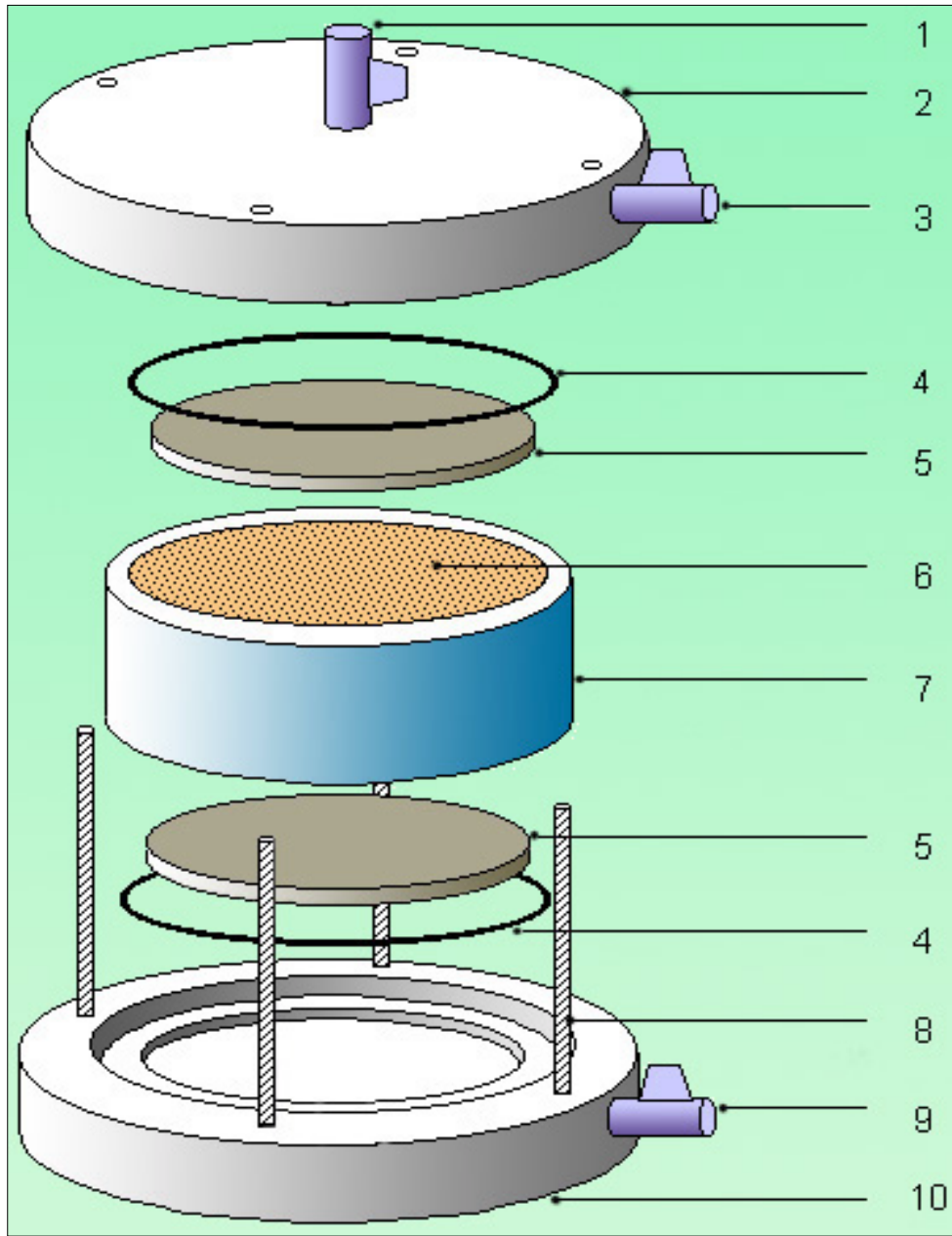
(1)

- • Perméamètre à paroi rigide (X 30-441)

Domaine d'application: $1. 10^{-5}$ à $1. 10^{-11}$ m/s

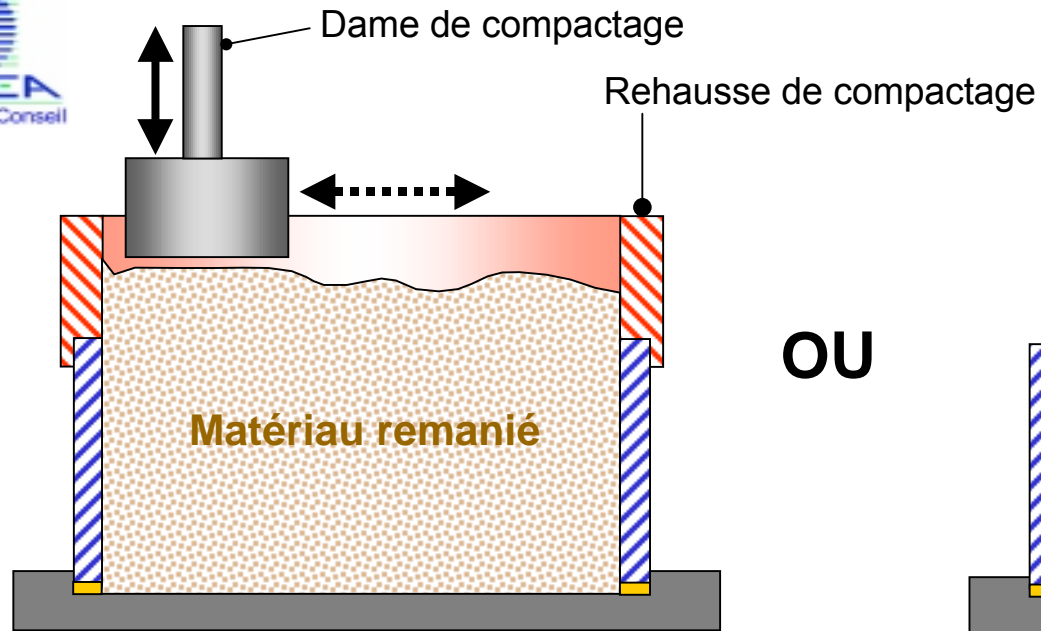
- Oedomètre, charge variable, constante (X 30-442)
- Perméamètre à paroi souple (X 30-443)

⚠ Projet non encore soumis à enquête publique AFNOR



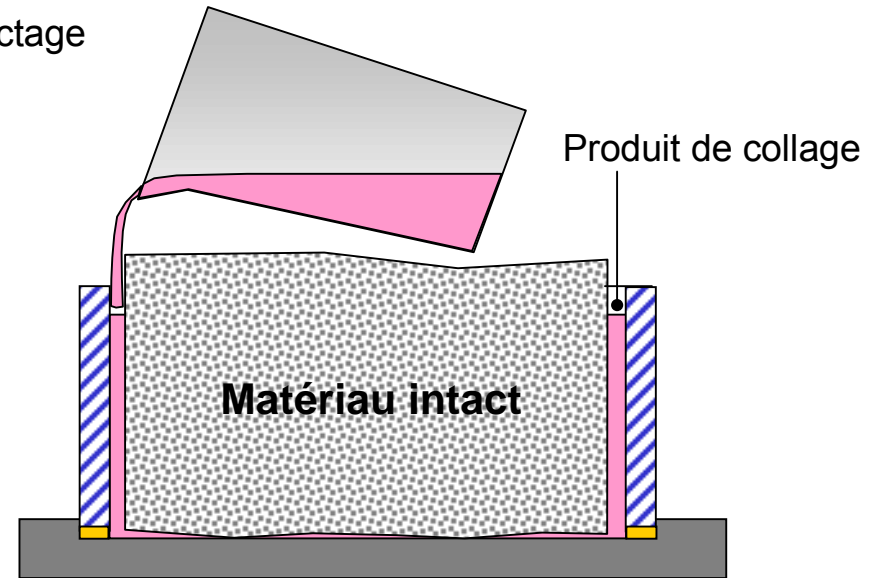
- 1 Vanne de purge
- 2 Embase supérieure
- 3 Vanne d'alimentation
- 4 Joint torique
- 5 Disque poreux
- 6 Éprouvette
- 7 Porte - échantillon
- 8 Goujon de fixation
- 9 Vanne de sortie
- 10 Embase inférieure

Vue éclatée d'un Perméamètre à paroi rigide (d'après NF X30-441)

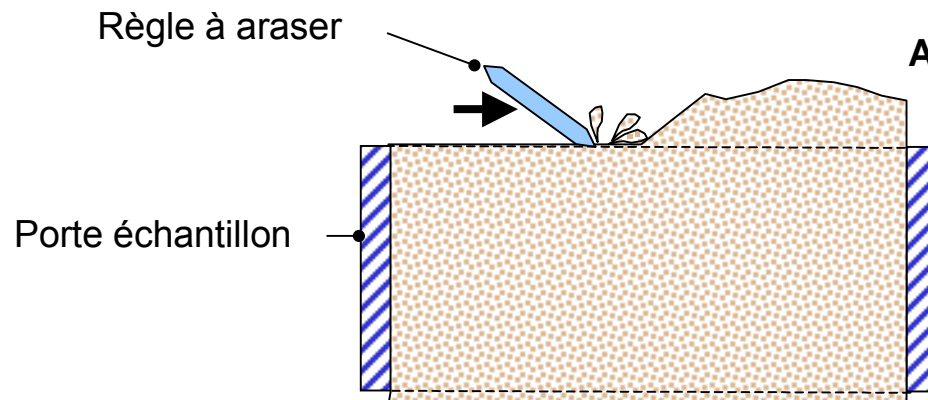


Compactage

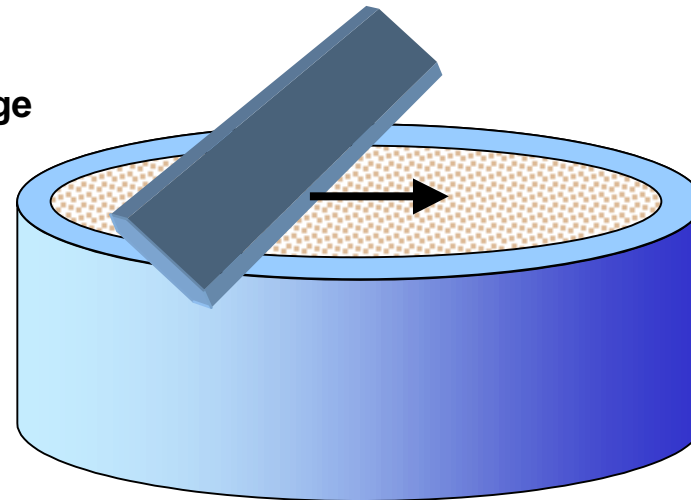
OU



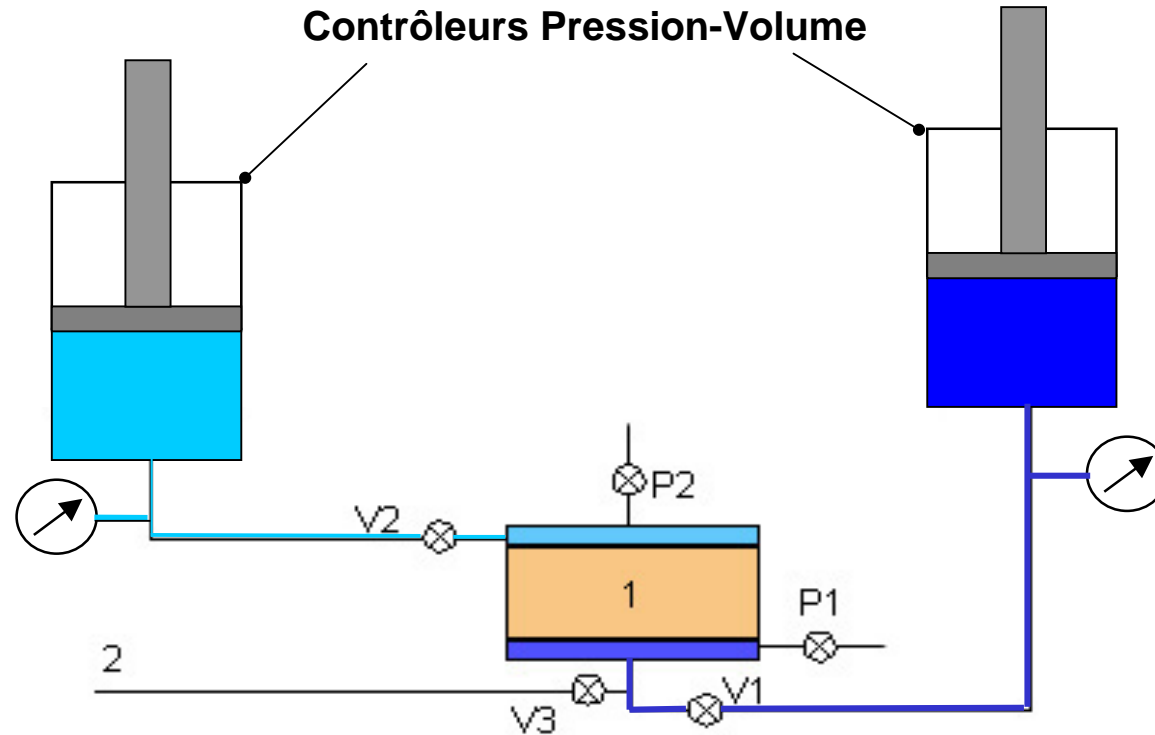
Collage



Arasage



Préparation de l'éprouvette pour le perméamètre à paroi rigide



Dispositif expérimental pour mesures au moyen du PPR (d'après X30-441)

Coefficient de perméabilité (m/s)	Gradient hydraulique recommandé
10^{-5} à 10^{-7}	5
10^{-7} à 10^{-9}	20
$< 10^{-9}$	50

ESSAIS EN LABORATOIRE

(2)

- Perméamètre à paroi rigide (X 30-441)

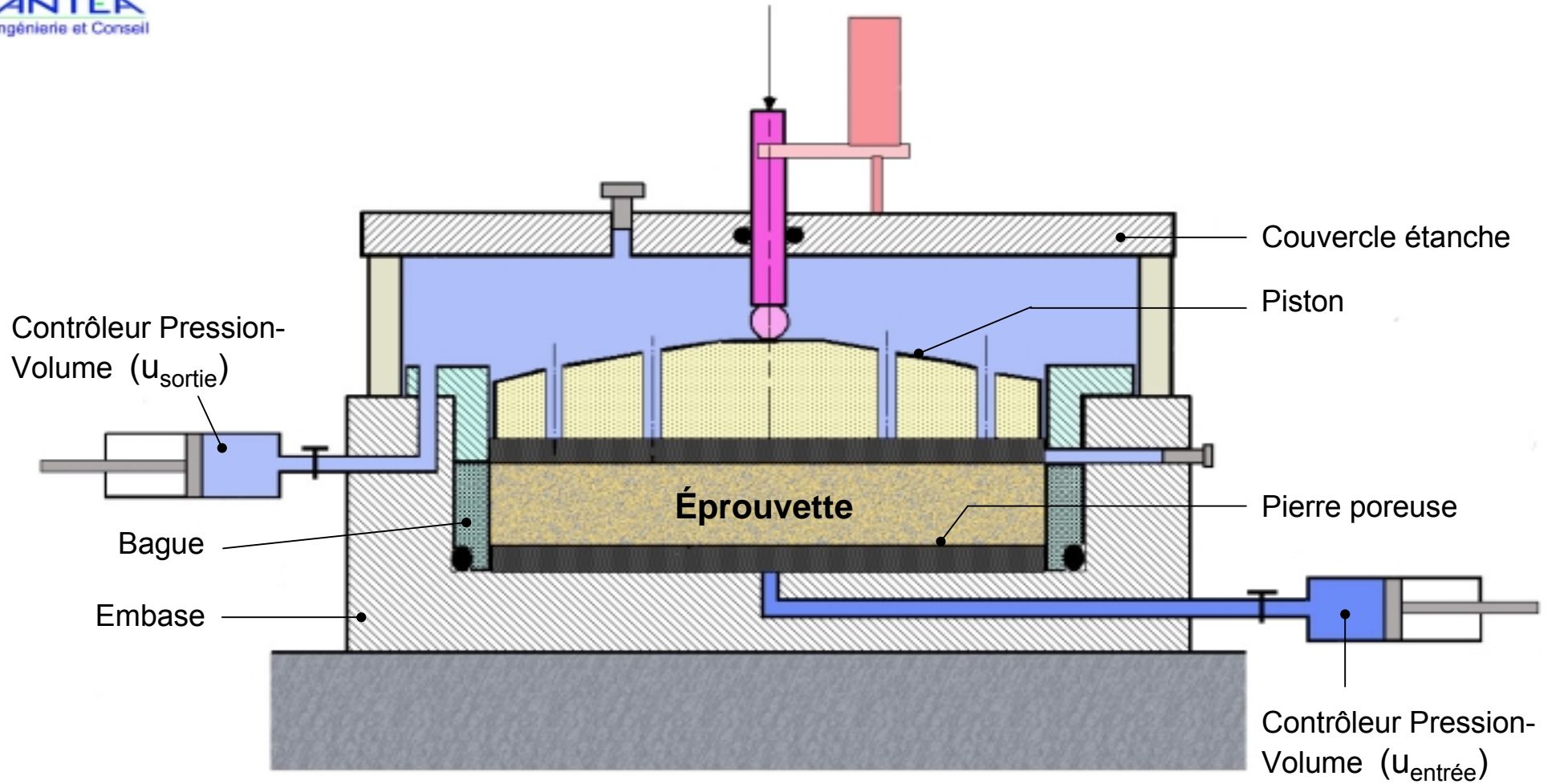
- • Oedomètre, charge variable, constante (X 30-442)

Domaine d'application: $1. 10^{-5}$ à $1. 10^{-11}$ m/s

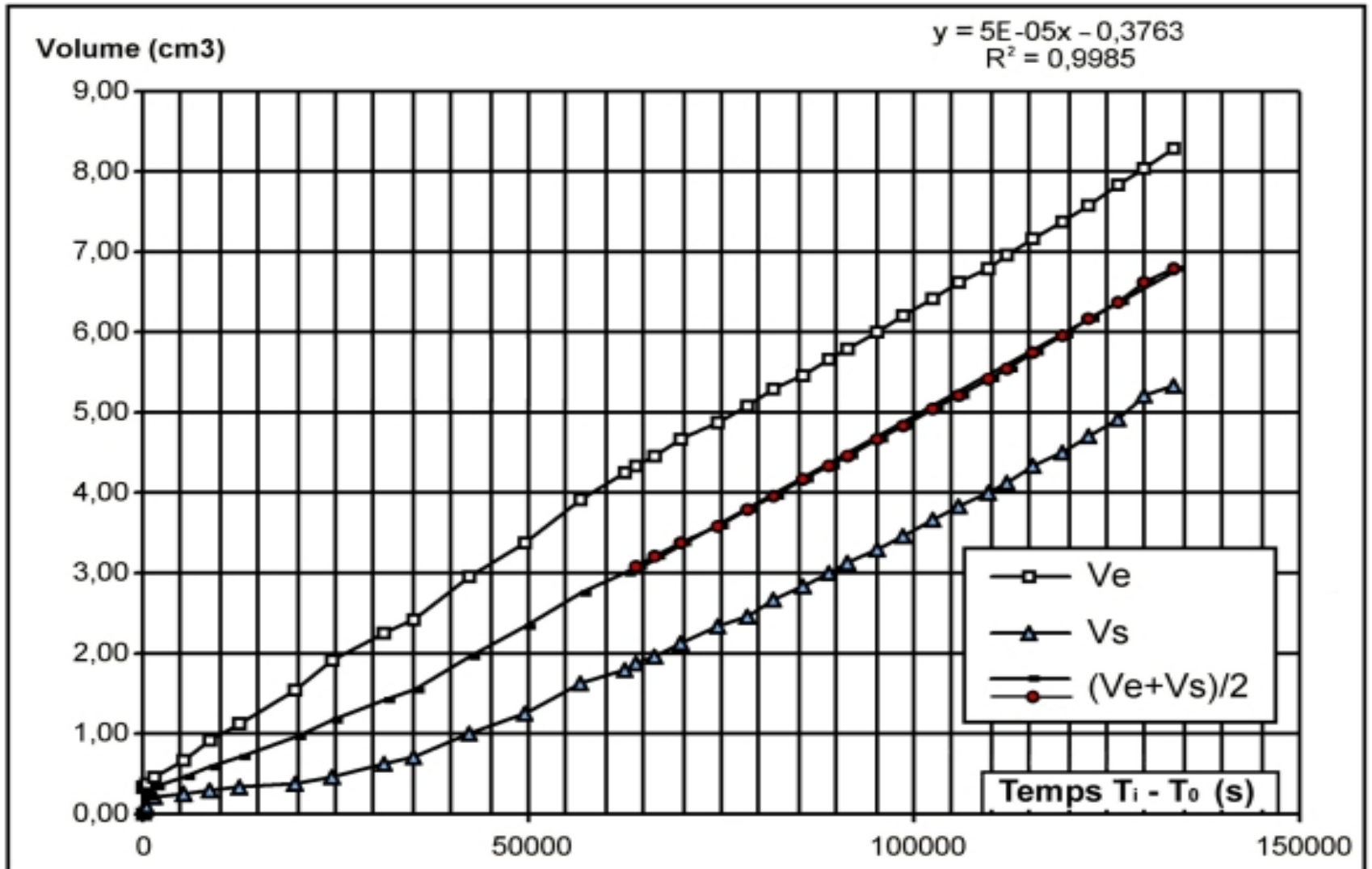
- Perméamètre à paroi souple (X 30-424)



Projet non encore soumis à enquête publique AFNOR



Cellule oedométrique spécifique pour mesures de perméabilité à gradient de charge constant



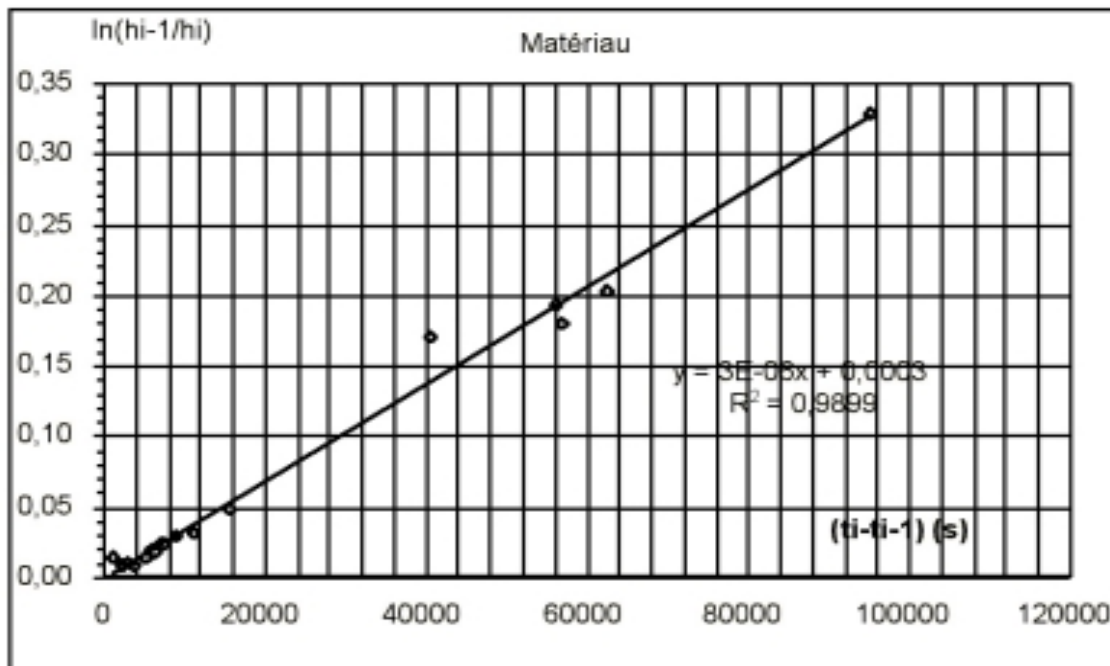
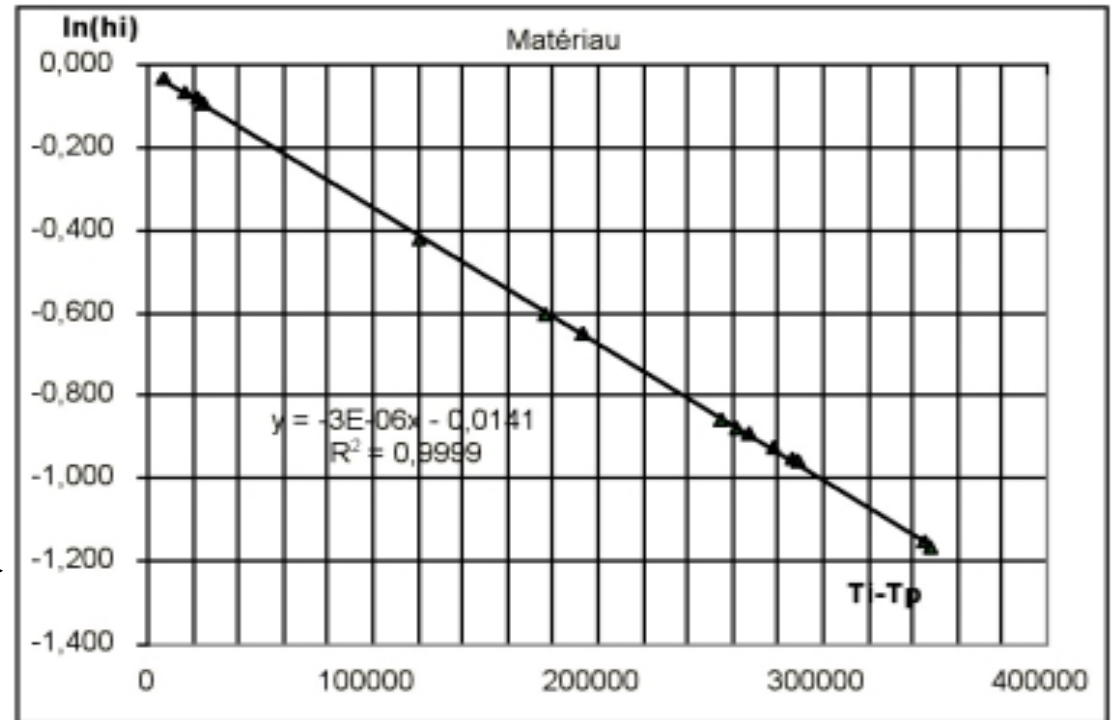
$K = 2,9 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$

Exemple de résultat d'essai à charge constante (d'après projet X30-442)

Essai à l'oedomètre à charge variable

2 types de graphique proposés
(Projet X30-424)

$$\ln(h_i) = f(T_i - T_p)$$



Gradient: 95 à 27 (élevé !)

$$K_1 = 6,9 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$$

$$K_2 = 6,1 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$$

$$\ln(h_{hi-1} / h_i) = f(T_i - T_{i-1})$$

ESSAIS EN LABORATOIRE

(3)

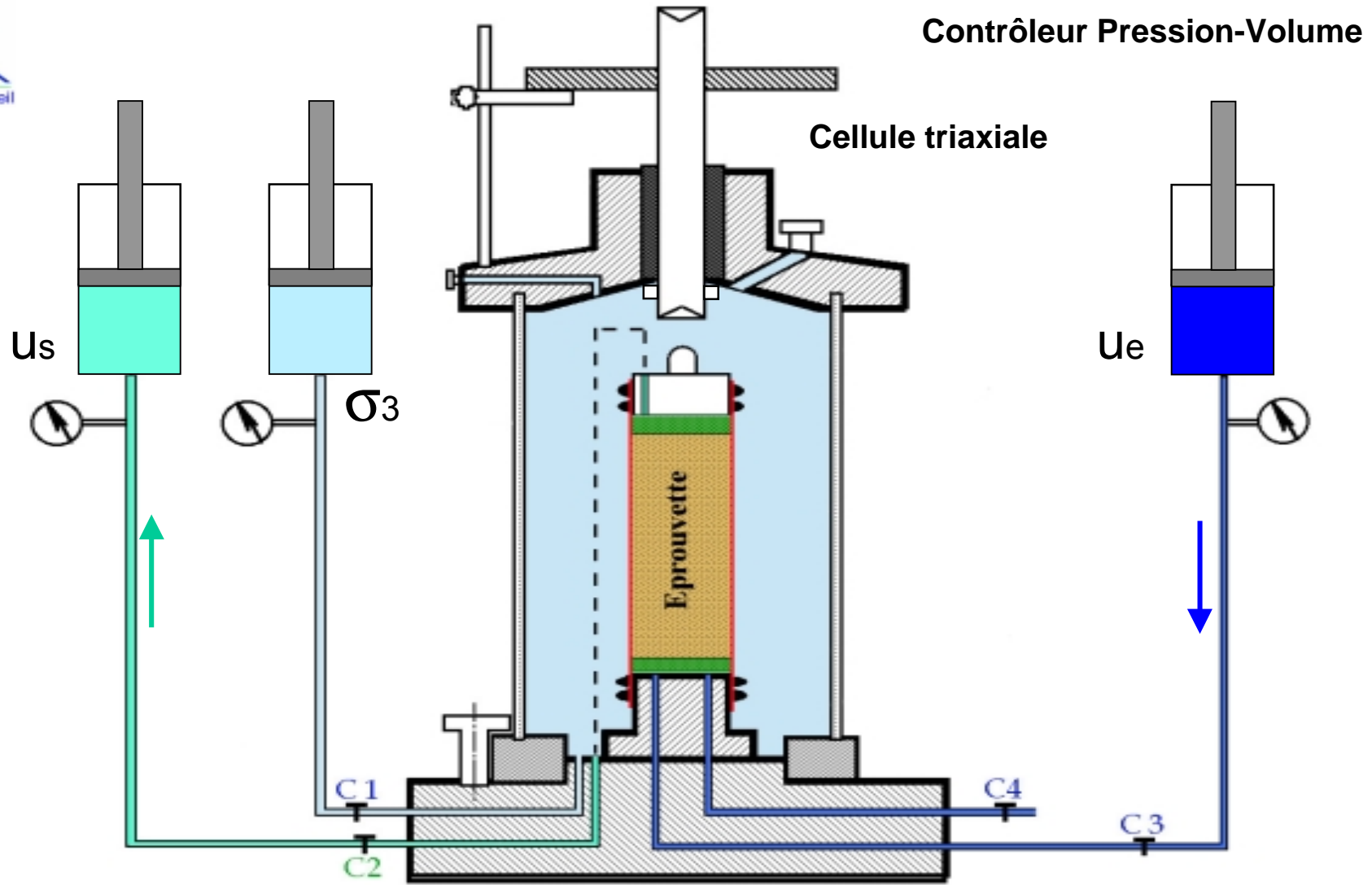
- Perméamètre à paroi rigide (X 30-441)
- Oedomètre, charge variable, constante (X 30-442)

 • Perméamètre à paroi souple (X 30-443)

Domaine d'application: $1 \cdot 10^{-5}$ à $1 \cdot 10^{-11}$ m/s



Projet non encore soumis à enquête publique AFNOR



C1: circuit de pression de confinement

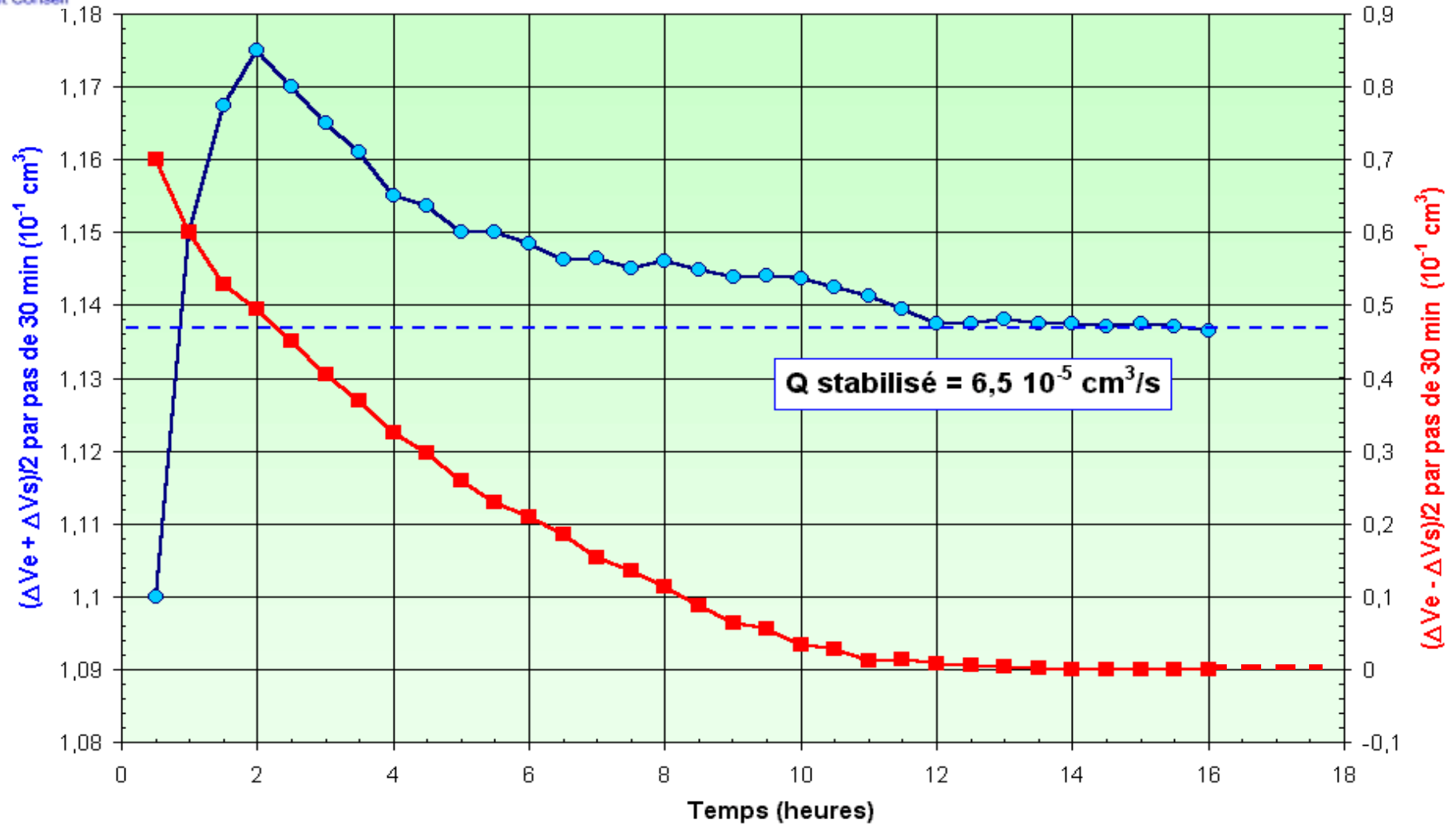
C2: Circuit de contre-pression u_s (en sortie)

C3: Circuit de pression d'entrée u_e

C4: Circuit de purge ou mesure de u_e

Dispositif triaxial spécifique pour mesures de perméabilité

Exemple de résultat de mesure de perméabilité au perméamètre triaxial



Éprouvette Ø 40 mm

Gradient $i = 15$

$$k = \frac{6,5 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot 2^2} \times \frac{1}{15} = 3,4 \cdot 10^{-7} \text{ cm/s} = 3,4 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$$

CONCLUSION

- Difficultés pratiques pour mesurer les faibles perméabilités in situ
 - durée de l'essai limitée,
 - saturation du milieu,
 - application de faibles gradients hydrauliques
 - conditions climatiques difficiles.....
- Faibles dimensions de la zone testée \Rightarrow représentativité d'un essai?
- Comparaison in situ / labo: $k_{\text{labo}} < k_{\text{site}}$ (au moins 1 puissance de 10)

Apports de la normalisation

- Rapprochement et discussions entre opérateurs
- Élimination des méthodes mal adaptées
- Uniformisation des pratiques (durées, interprétations ...)
- Amélioration de la qualité et la fiabilité des résultats à poursuivre ...!

