

Forages d'eau

25-26 novembre 2025



- 1. Introduction**
- 2. Les techniques de forage**
 - 2.1. Principes
 - 2.2. Battage, havage
 - 2.3. Rotary
 - 2.4. Marteau fond de trou
 - 2.5. Autres méthodes moins fréquentes
- 3. Les équipements de forage :**
 - 3.1. Equipements tubulaires
 - 3.2. Massif de gravier
 - 3.3. Cimentation
- 4. Finalisation :**
 - 4.1. Développement
 - 4.2. Pompages d'essai
 - 4.3. Aménagement de tête
 - 4.4. Contrôle de réception
 - 4.5. Rapport de fin de travaux
- 5. Surveillance, entretien, comblement :**
 - 5.1. Surveillance
 - 5.2. Entretien
 - 5.3. Comblement
- 6. Conception - dimensionnement :**
 - 6.1. Diamètres usuels
 - 6.2. Conception
 - 6.3. Dimensionnement
 - 6.4. Cahier des charges
- 7. Equipements de pompage**
- 8. Réglementation**
- 9. Rôle et posture de l'hydrogéologue – retours d'expérience**

Forages d'eau

1. Introduction

Forage d'eau ?

Objectifs ?

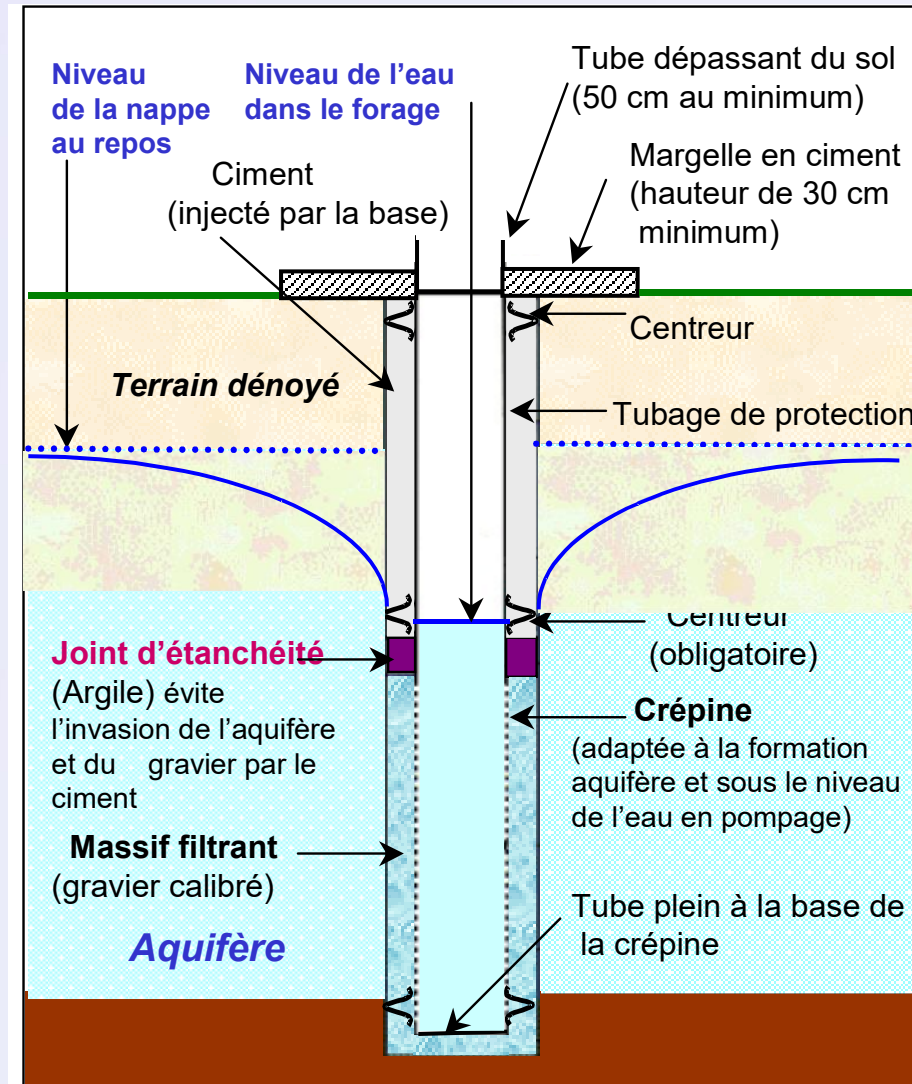
- Reconnaissance / exploration
- Pompage / exploitation
- Injection
- Mesures / essais
- Suivis (quantité / qualité)

- Permanent / temporaire

Les éléments constitutifs du forage d'eau

3 parties majeures

- Tête de forage
- « Morts-terrains »
- Section captante

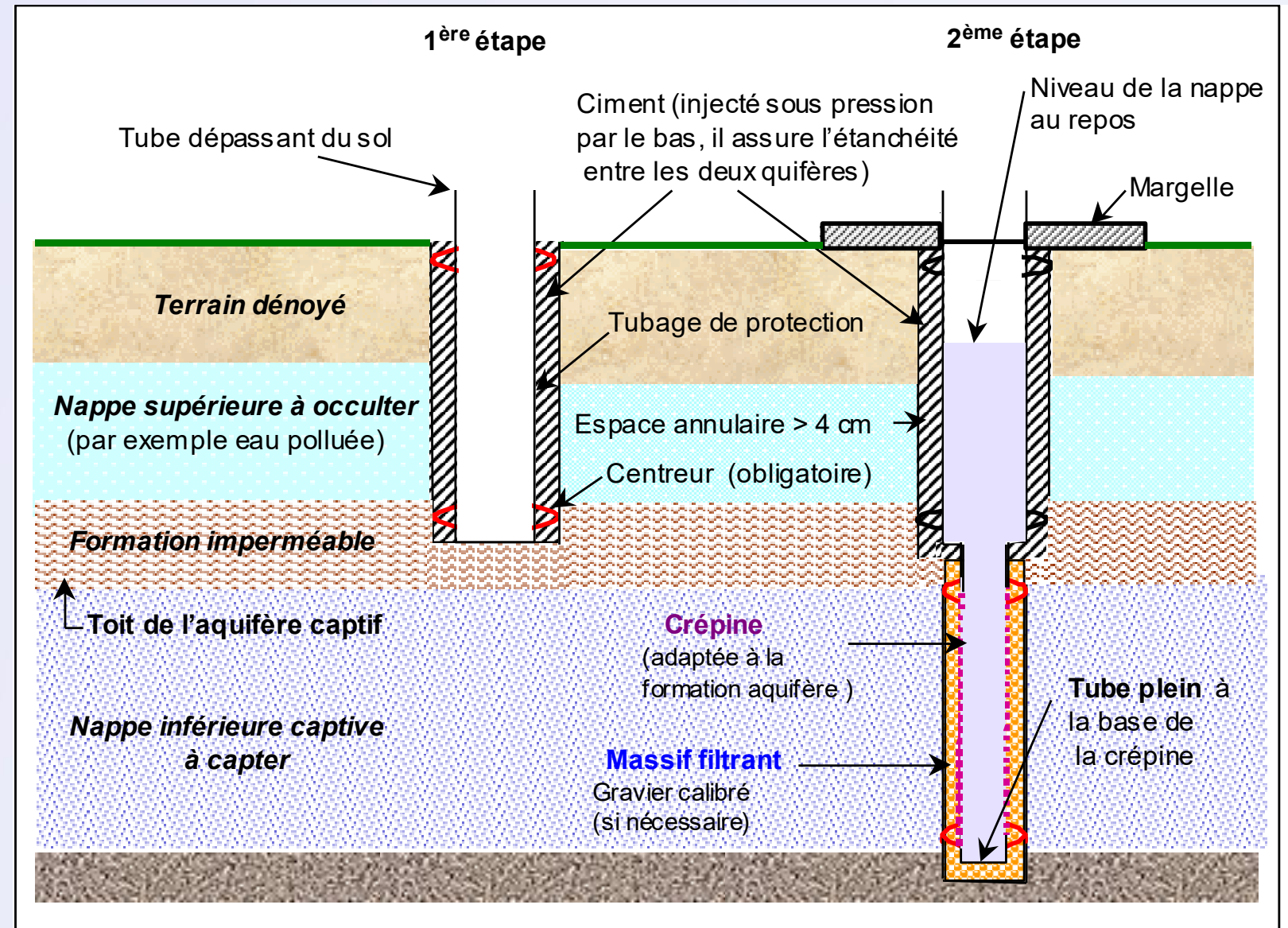


Source (BRGM)=
GUIDE D'APPLICATION DE L'ARRÊTÉ
INTERMINISTÉRIEL
DU 11 SEPTEMBRE 2003
RELATIF À LA RUBRIQUE 1.1.0 DE LA
NOMENCLATURE EAU

Les éléments constitutifs du forage d'eau

3 parties majeures

- Tête de forage
- « Morts-terrains »
- Section captante

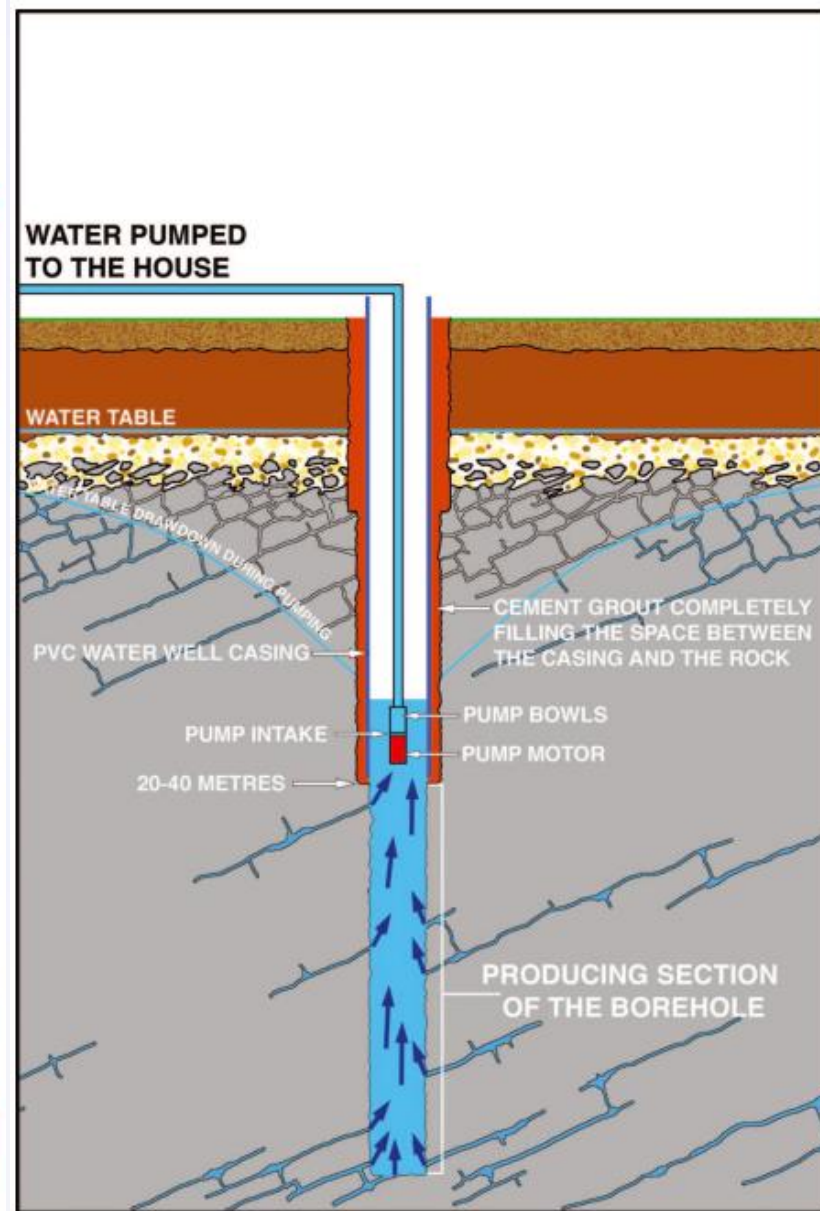
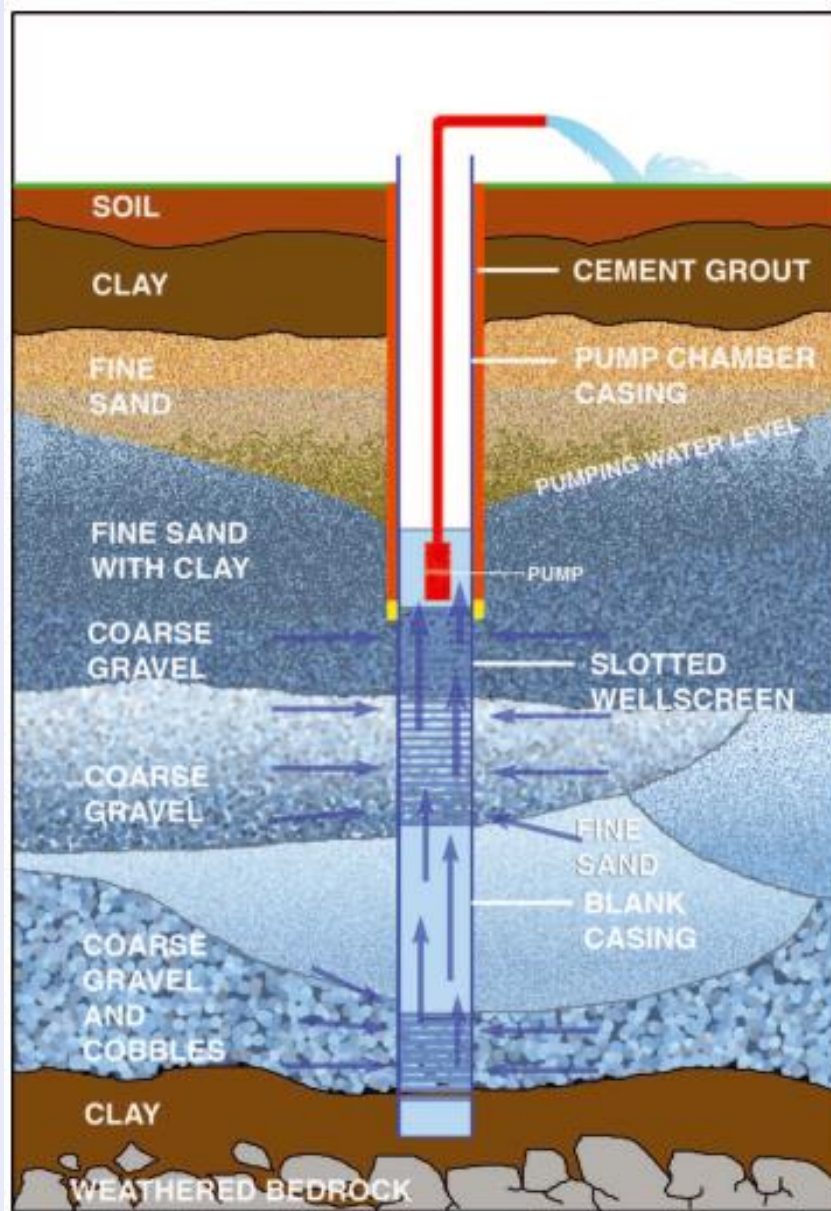


In English...

- Borehole, drilling
- Sounding
- Well
- Casing
- Screen
- Shoe
- Gravel pack
- Cement
- Packer
- Static / Dynamic level

Source :

Institute of Geologists of Ireland



Unités usuelles

Les unités anglo-saxonnes...



<i>distances</i>	m
foot (ft)	0.3048
inch (")	0.0254
Yard	0.914

<i>Masses</i>	kg
pound	0.453

<i>Volume</i>	litres
barrel (bl)	159
US gallon	3.785
Imp gallon	4.546
ft ³	28.27

<i>Vitesse</i>	m/s
ft/s	0.305
Usgalpd/ft ²	4.72E-07
darcy	8.58E-06

Unités usuelles

Pression, densité, viscosité

○ Pression

MASSE VOL	kg/m ³	g/l	1 kg/m ³	1	g/l
DENSITE	sans unité	masse vol solide/m.vol.eau			
PRESSION	Pascal (Pa)	Bar (bar)	1 Pa =	1.00E-05	bar
		PSI (pound per Square inch)	100 PSI =	6.89	bar
		m d'eau	1 mH ₂ O =	0.0981	bar
FORCE	Newton (N)	Kilogramme force (kgf)	1 N =	0.102	kgf

$$1 \text{ bar} = 10.19 \text{ m d'eau}$$

A retenir : Pression = Force par unité de surface (1 Pa=1 kgf/m²)

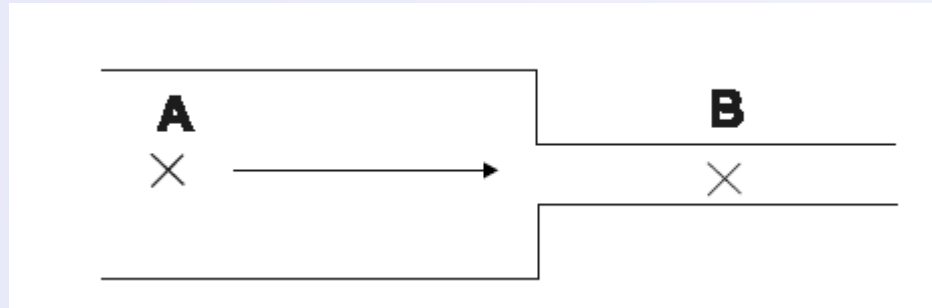
○ Densité, viscosité (boues de forage)

VISCOSITE dynamique	Pascal-seconde (Pa.s)	Poiseuille (Pl)	1 Pl =	1	Pa.s
			1 Pl =	1	kg/m.s
		Poise (P ou Po)	1 Po =	0.1	Pa.s
VISCOSITE cinématique	= viscosité dyn. / masse vol. ; en mètre carré par seconde (m ² /s)	Stokes (St)	1 St	1.00E-04	m ² /s

Quelques principes à garder en tête (ou sous le coude)

Conservation de la matière

Débit = volume/temps



Le débit d'un liquide est identique en tous points d'une canalisation où le liquide circule

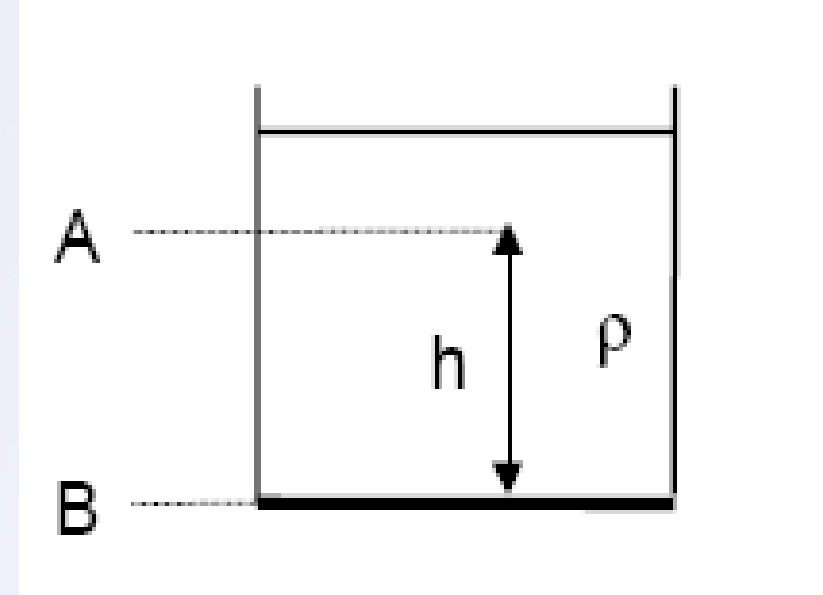
Quelques principes à garder en tête (ou sous le coude)

Principe fondamental de l'hydrostatisme

Les points A et B étant sur une verticale, le principe s'écrit:

$$P_B - P_A = \rho \cdot g \cdot h$$

- P_B, P_A : pressions en B et A en Pa (pascal)
- ρ : masse volumique du liquide en kg/m^3
- g : accélération de la pesanteur en m/s^2
- h : distance verticale entre A et B en m



En forage, on a coutume d'exprimer la pression en bar ou en m.H2O

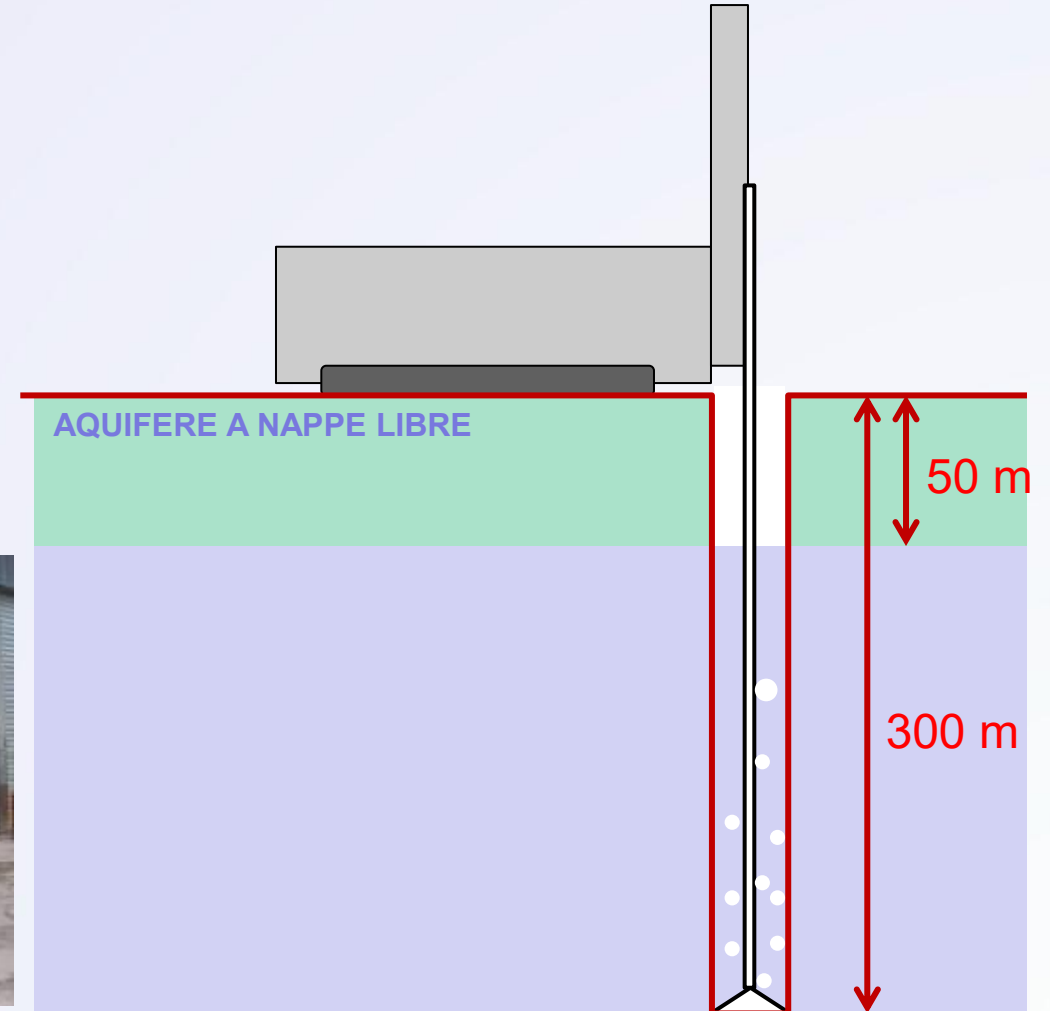
Exercice 1...

Mieux vaut le faire une première fois dans une salle au chaud...

Avant de le faire les pieds dans la boue et les mains dans le froid (ou l'inverse)

Un forage de diamètre 10 pouces et profond de 300 m a son niveau piézométrique au repos à 50 m du sol.

Un compresseur de 290 PSI (puissance maximale effective) sera-t-il suffisant pour réaliser un soufflage en fond de forage?



Forages d'eau

2. Techniques de forage

Forages d'eau

2. Techniques de forage

2.1. Principes

Principes

Les phases de forage sont aussi des phases d'acquisition

- Des techniques multiples
- Le choix peut dépendre de :
 - La nature des terrains à traverser
 - Le débit recherché
 - La profondeur à atteindre
 - Le (les) objectif(s) du forage
- Il n'y a pas systématiquement un choix unique
- Chantier en deux phases :
 - Reconnaissance = confrontation des hypothèses à la réalité
 - Equipement en ouvrage d'exploitation = adaptation de la configuration du forage à cette réalité



© BRGM

Principe – phase de reconnaissance

Validation de la coupe géologique

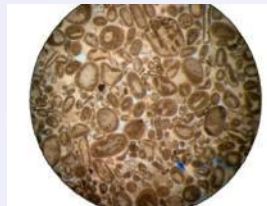
- Recueil des données / observations du foreur
- Recueil des cuttings, observations / analyses
- Analyses granulométriques
- Diagraphies différées (gamma-ray, résistivité, diamètreur, etc)



© J. BARRIERE



© BRGM - Jean-Michel Eberlé

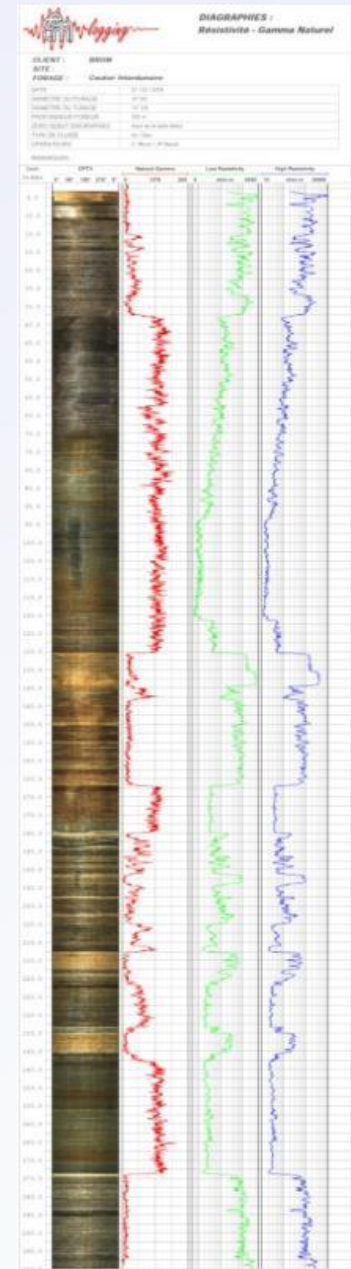


© BRGM - Christophe Rigollet

© BRGM



© HYDRO INVEST - J. BARRIERE

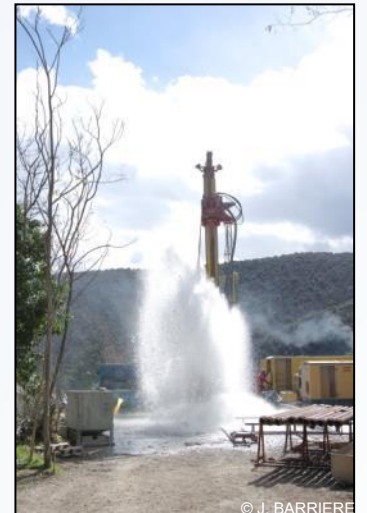


© BRGM

Principe – phase de reconnaissance

Reconnaissance hydrogéologique

- Recueil des données / observations du forer
- Observations in situ : débits, mesures physico-chimiques (température, conductivité, pH, Eh, O₂ dissous)
- Pompages d'essai
- Prélèvements et analyses
- Diagraphies de production (flux, paramètres physico-chimiques)



Techniques de forage

Certaines plus fréquentes en forage d'eau

Havage

Battage

Fonçage

Tarière

Turboforage

Rotary

Marteau fond de trou

Carottage

Forageonique



© J. BARRIERE

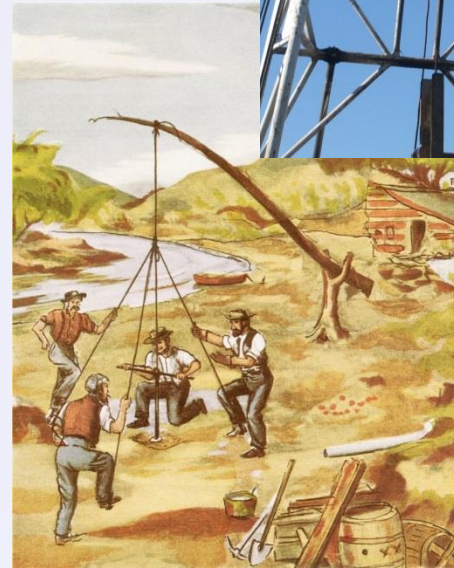
Forages d'eau

2. Techniques de forage

2.1. Battage, havage

Battage

- Principe :
 - 1 outil suspendu (trépan)
 - Percussion seule
 - Nettoyage : descente de soupape
- Avantages :
 - Simplicité logistique / robustesse
 - Absence de fluide de forage
→ Moindres risques de pollution / pertes
 - Coût faible
- Inconvénients
 - Vitesse d'avancement assez faible
 - Peu adaptée dans les terrains plastiques ou bouillants
 - Difficultés pour équilibrer des venues d'eau artésiennes jaillissantes
 - Absence d'information sur les niveaux producteurs (qualité - production)



Havage

« Benoto »

○ Principe :

- Benne preneuse
- Soupape en présence d'eau
- Descente conjointe de tubage (sous son propre poids ou par verrins)

○ Avantages :

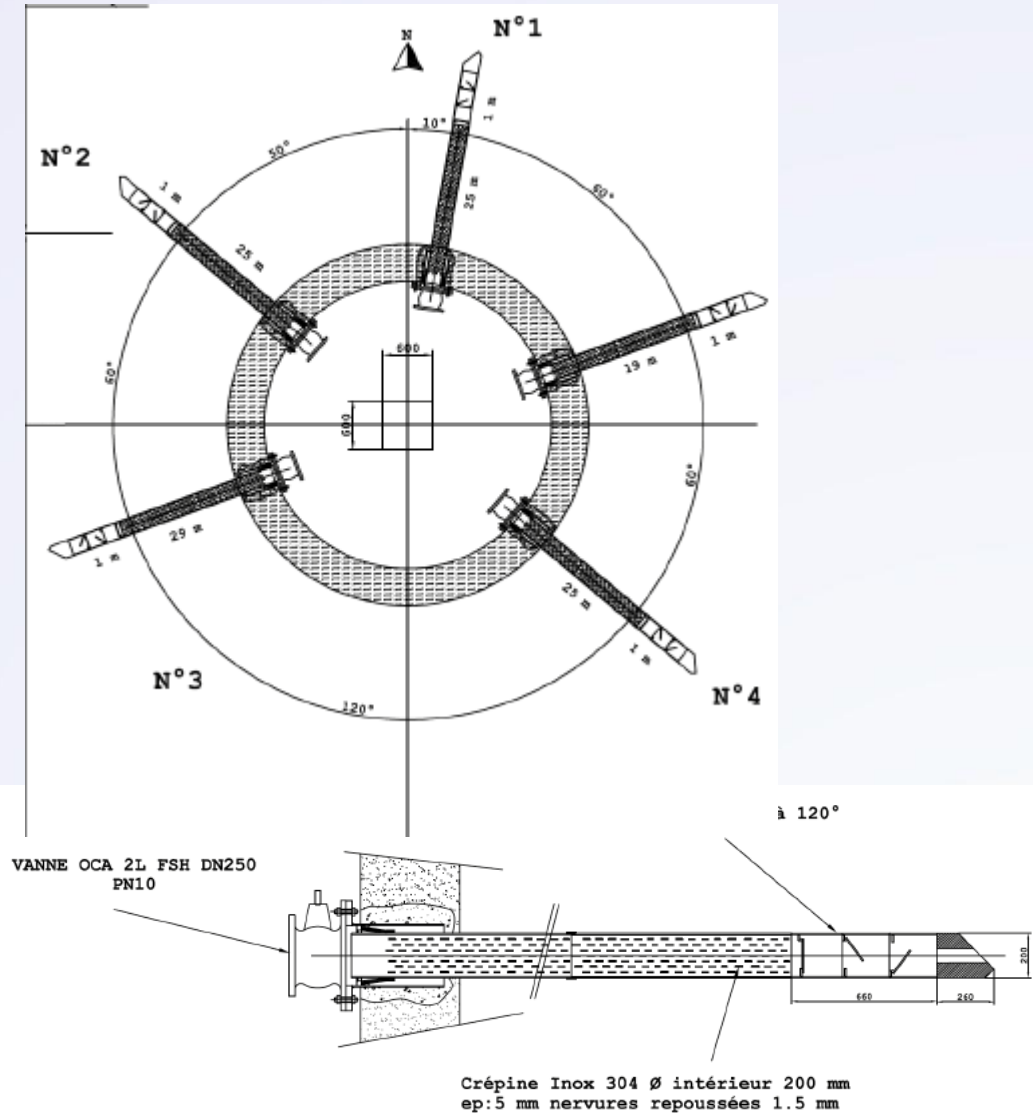
- Avancement rapide
- Réalisation d'ouvrages en gros diamètre (champs captants en nappe alluviale)
- Absence de fluide de forage

○ Inconvénients :

- Inadapté aux terrains durs
- Profondeur réduite (frottement du tubage mis en place à l'avancement)
- Difficulté de retrait des tubages de soutènement après équipement du forage.



- Débits très élevés avec faible rabatement
- Havage + fonçage



22

Puits à drains rayonnants

- Quelques étapes

Réalisation du tambour



Descente du cuvelage par havage



Fonçage des drains



Clichés : Résurgence Forage



Forages d'eau

2. Techniques de forage

2.2. Rotary

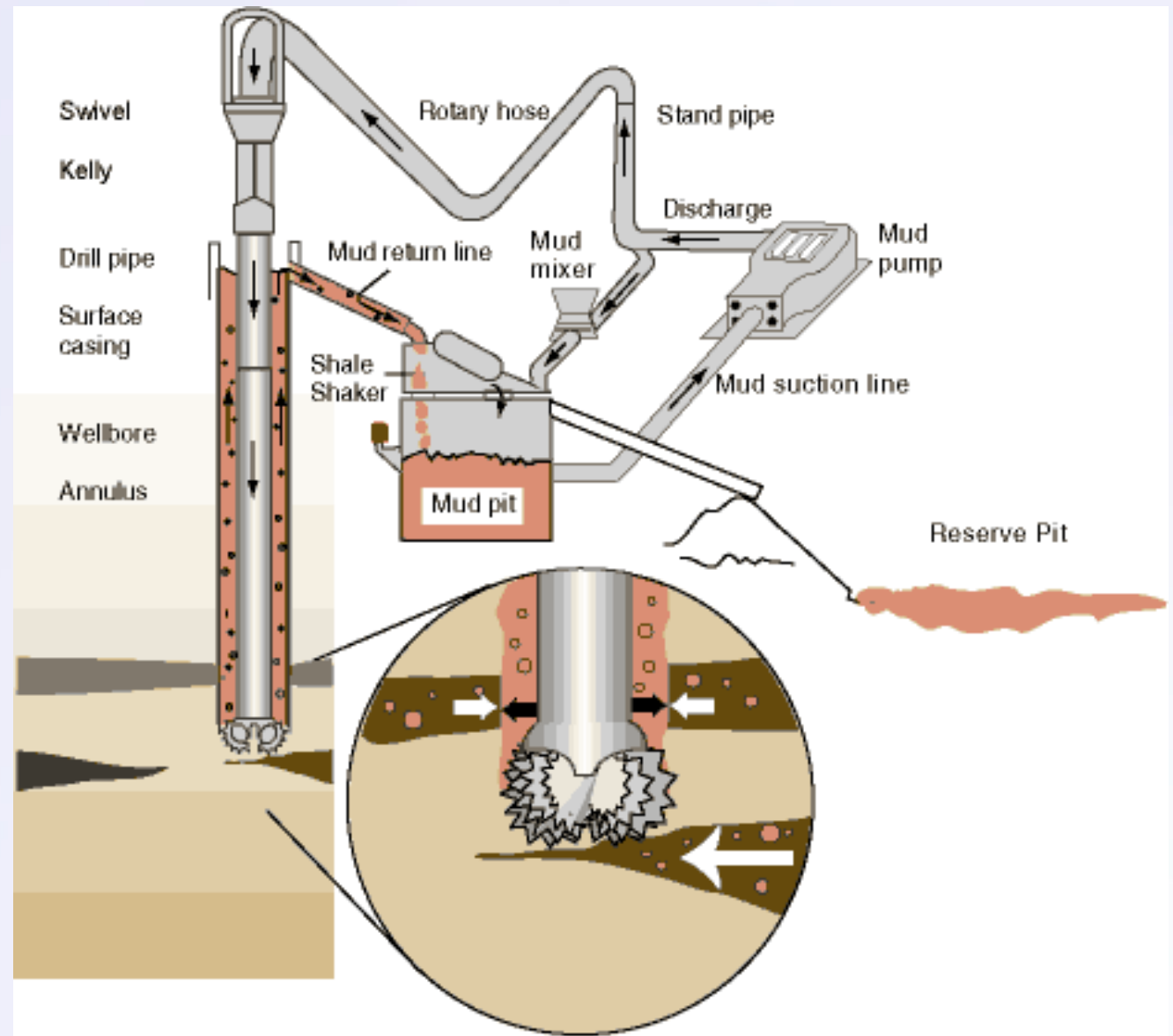
Rotary

○ Principe :

- Outil + tiges creuses (poids)
- Rotation
- Fluide (boue, eau, air)



© J. BARRIERE



© FORALOC

Rotary

- Avantages
 - Toutes formations
 - Unique technique pour forages très profonds
- Inconvénients
 - Mise en œuvre lourde
 - Risque de colmatage (cake)
 - Absence d'information hydrogéologique
 - Invasion de boue



Outils du forage rotary

○ Outils :

- Trépan à lames : rabote
- Trépan à molettes : déchiquette
- PDC
*Polycrystalline
Diamond
Compact*



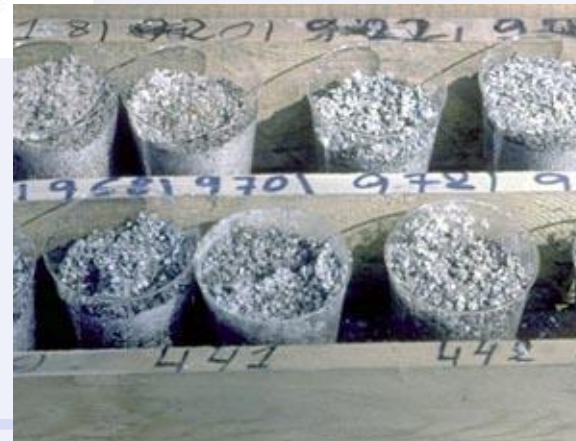
Outils du forage rotary

- Configuration adaptable selon les terrains

- Dents / pastilles

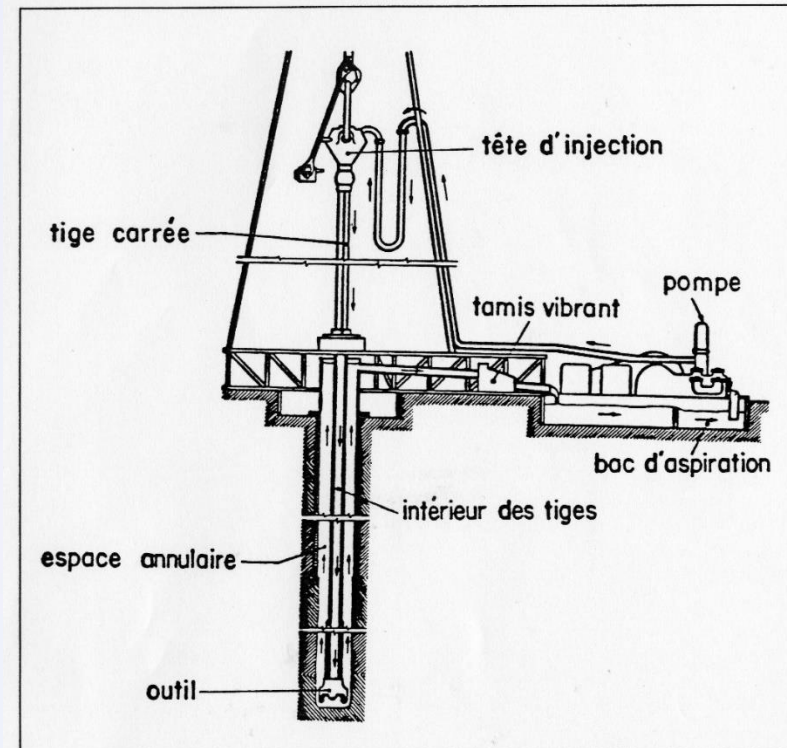
- Duses

- Fluide
(déblais = cuttings)



Fluides du forage rotary

- Fonctions
 - Refroidissement de l'outil
 - Réduction des frictions
 - Evacuation des déblais
- Boue, eau, air



Fluides du forage rotary

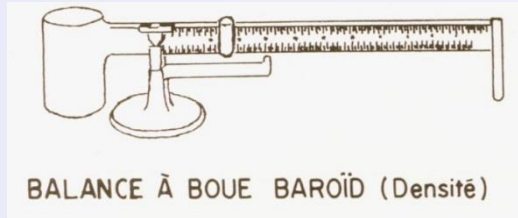
○ Boue

- Évacuation des cuttings (viscosité)
- Maintien des parois
- Contrôle de la pression (densité)
- Refroidir l'outil, réduire les frictions (cuttings/outil), réduire la corrosion ($\text{pH} > 8$)
- Colmater les parois du trou (cake) (densité et filtrat)
- Transmettre des informations (mud-logging), permettre la réalisation de diagraphies

Fluides du forage rotary

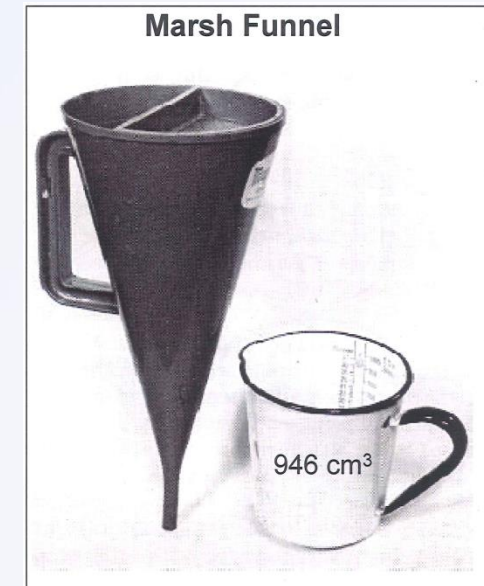
○ Boue

- Nécessite un suivi de
 - ✓ sa densité



- ✓ sa viscosité

- Impose un nettoyage/développement
- Nature : bentonite / polymère / mixte



Gestion de la boue

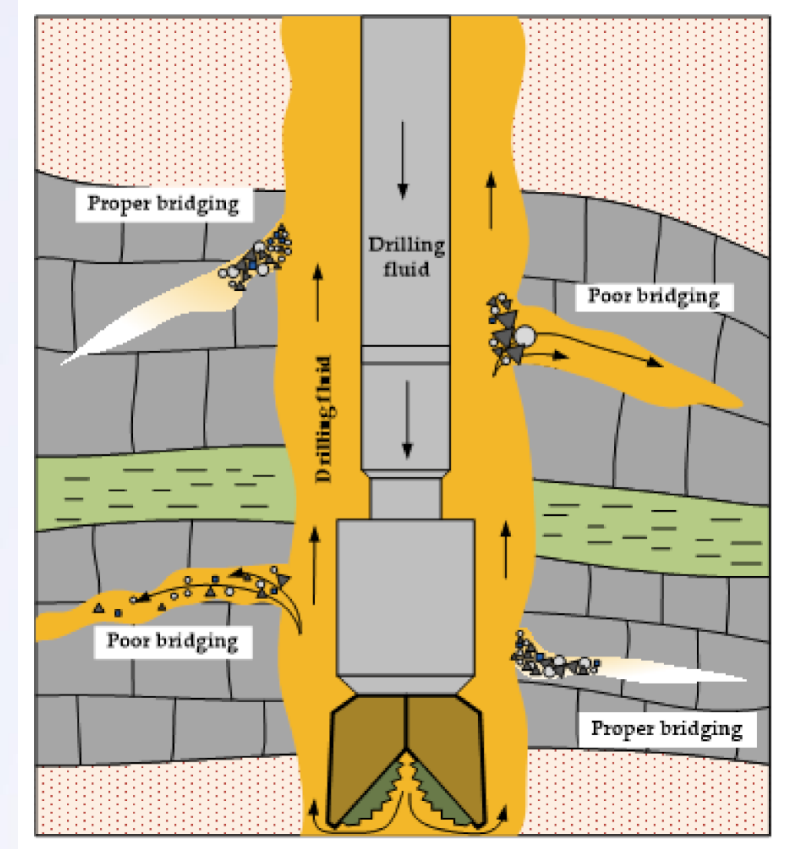
- Canalisation en tête
- Bacs à boue :
 - Creusés sur site
 - Transportés
- Circuit de surface :
 - Pompes de circulation
 - Tamis vibrant
 - Mélangeur



Additifs aux boues de forages

Augmenter les performances ou résoudre une difficulté

- Principales fonctions possibles :
 - anti gonflant ou dispersant d'argile,
 - gélifiant,
 - alourdissant,
 - colmatant
 - réducteur de couple



Gaurina-Medimurec et al., 2021
(<https://doi.org/10.3390/app11020767>)

Paramètres du forage rotary

Les éléments essentiels à suivre

- Paramètres de la boue

Observer les pertes de boue (ou chutes de pressions d'air)

Contrôler les paramètres de la boue (densité, viscosité)

Estimer la vitesse de remontée de la boue ($V_{boue} \gg V_{sédimentation}$)

Débit, pression



Paramètres du forage rotary

Les éléments essentiels à suivre

- Le poids sur l'outil (Tricône)

Terrain tendre : 500 à 900 kg /pouce

Terrain dur : 1400 à 1800 kg /pouce
(moitié moins pour les trilames)

- La vitesse de rotation

Terrain tendre : 60 à 150 tr/min

Terrain dur : 40 à 70 tr/min

- La vitesse d'avancement (découle des précédents)

- Evènements ponctuels : chutes d'outils, coincements

Les paramètres sont très variables selon les types d'outils et les applications : il est impératif de conserver, consigner et appliquer les préconisations des fabricants

Ces paramètres doivent être consignés dans un carnet de chantier.

Paramètres du forage rotary

Les éléments essentiels à suivre

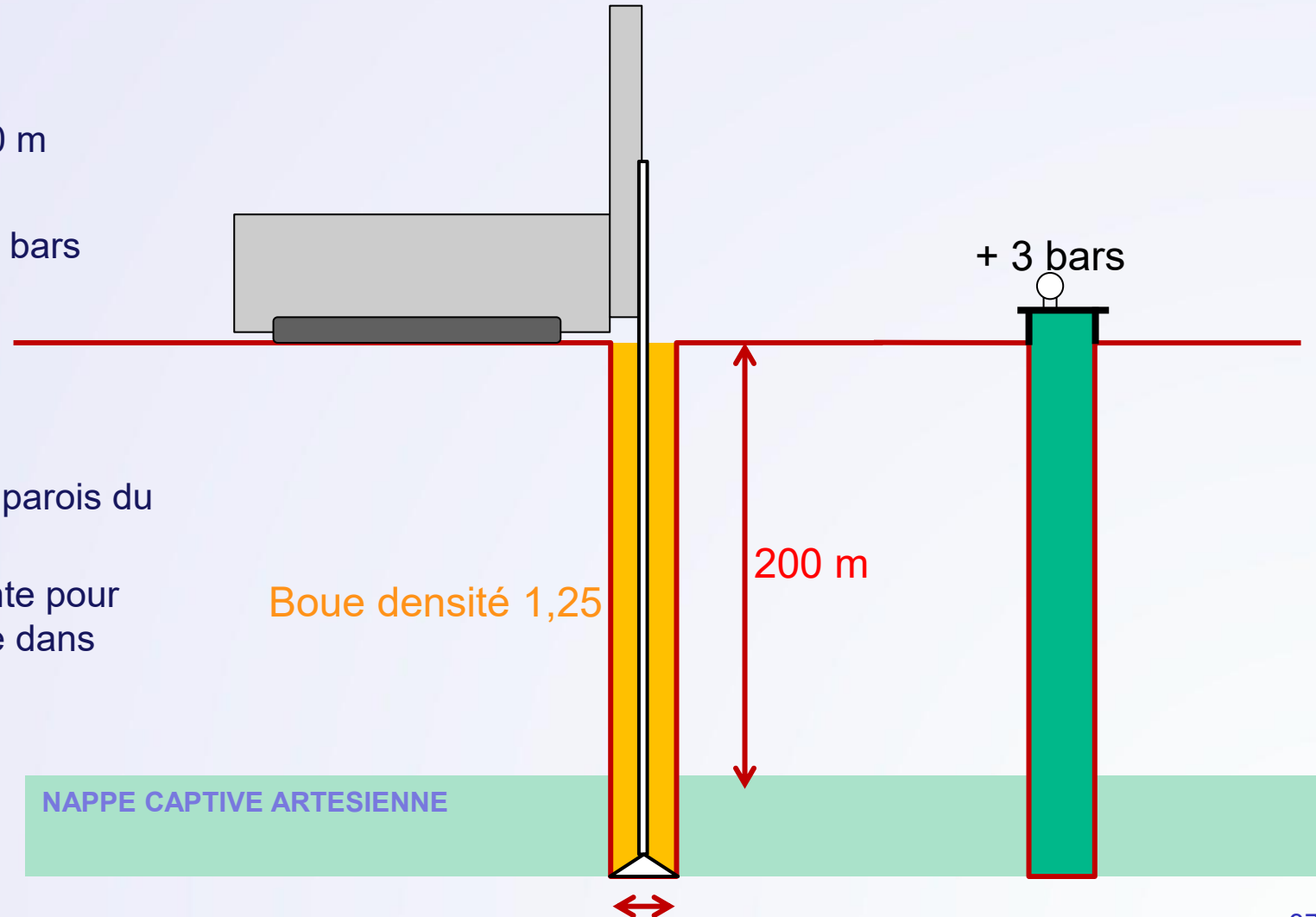
- Composition de la garniture de forage – *drill string*
 - Tiges
(*drill pipe*)
 - Masse-tiges
(*drill collar*)
 - Stabilisateurs
(*stabilizer*)
 - Autres
- Chaque élément a une fonction : importance de la répartition des forces / contraintes
- Importance de la connaissance des longueurs des éléments...



Exercice 2

Densité de boue et artésianisme

- Projet de forage à la boue
 - Objectif : nappe captive artésienne
 - Profondeur prévisionnelle du toit : 200 m
 - Densité de la boue : 1,25
 - Forages voisins : pression en tête = 3 bars
- Questions :
 - Quelle pression hydrostatique sur les parois du trou au fond du forage ?
 - La densité de la boue est-elle suffisante pour compenser l'artésianisme de la nappe dans l'ouvrage?





Forages d'eau

2. Techniques de forage

2.3. Marteau fond de trou

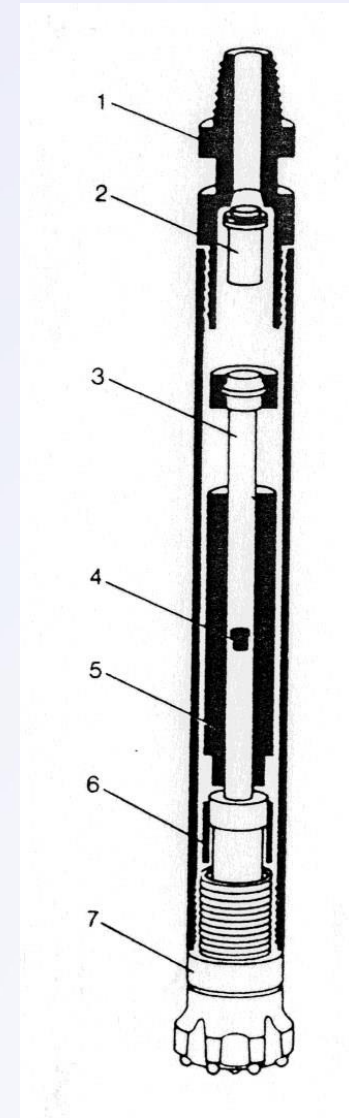
Marteau fond de trou

○ Principe

- Percussion + rotation
- Outil + tiges creuses
- Fluide = air (+ adjuvants)



Photo A. Gutierrez



Marteau fond de trou

○ *Avantages*

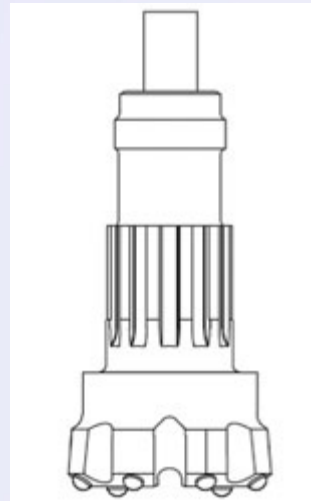
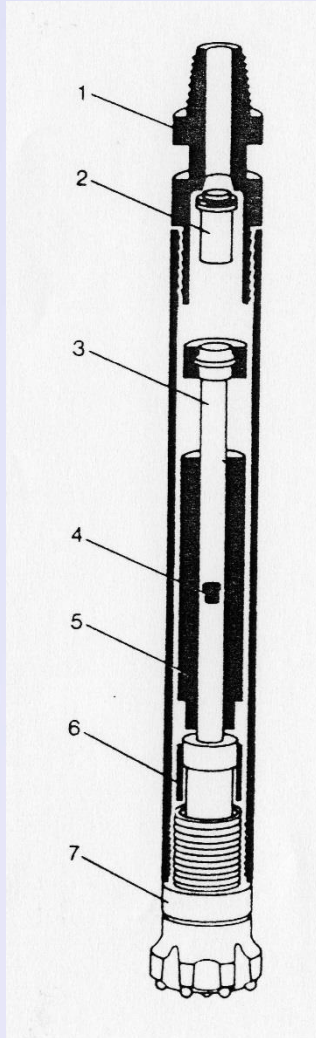
- Avancement rapide en terrains durs
- Mise en œuvre
- Informations à caractère hydrogéologique à l'avancement

○ *Inconvénients*

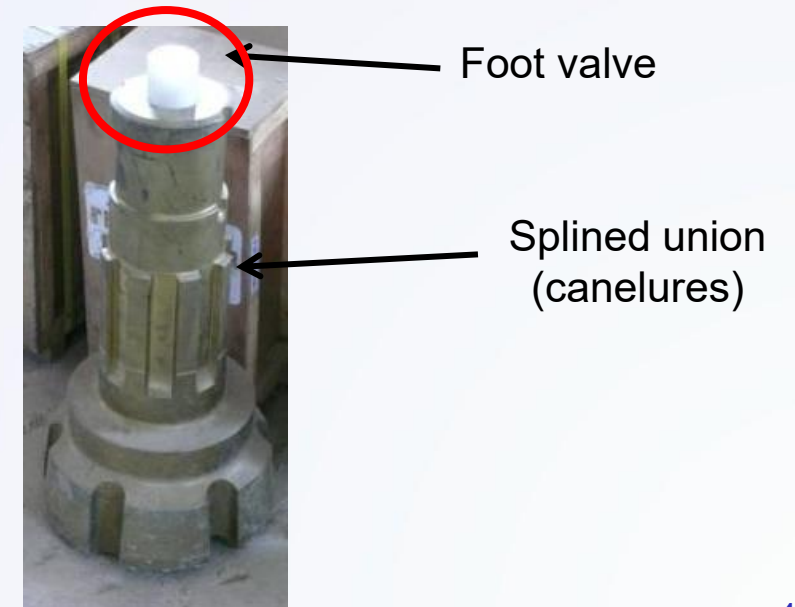
- Risques (haute pression)
- Tenue des parois
- Limité en profondeur



Éléments du marteau



1	Embout supérieur	Back head	
2	Clapet anti-retour	Air check valve	Evite les entrées d'eau / cuttings
3	Tube central	Air distributor / control tube	
4	Bouchon d'étranglement	Regulating duct	
5	Piston	Piston	Impact
6	Douille	Guided sleeve	
7	Douille d'entraînement	Drive sub / chuck	



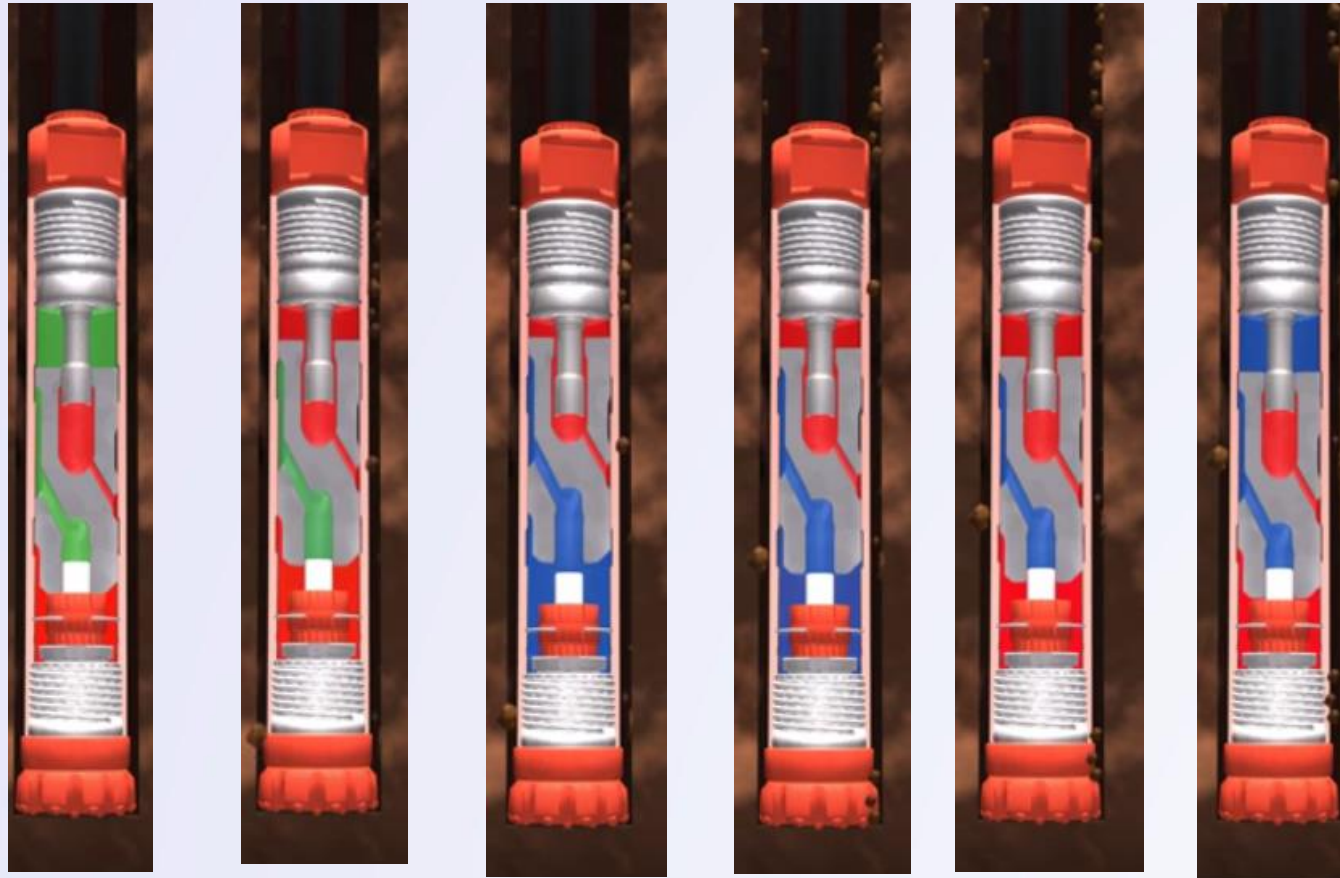
Éléments du marteau

Aperçu du fonctionnement



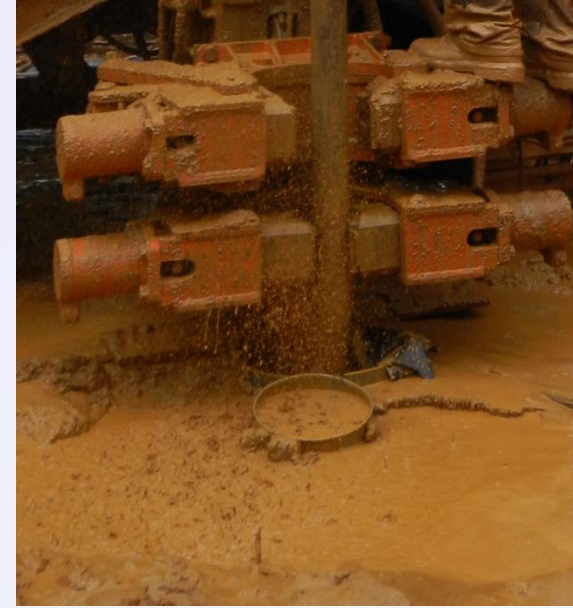
Eléments du marteau

Aperçu du fonctionnement



Vidéo Halco : <https://www.youtube.com/watch?v=bmp9HUQrJLM>

Cuttings



Récupération
des cuttings

Choix de l'outil

DESIGNS DE TAILLANTS DE MARTEAUX



CONCAVE

La face concave a un design notamment adapté aux taillants de gros diamètres et/ou aux forages profonds dans les formations à roches dures à très dures. Sa forme conique inversée permet d'avoir une meilleure rectitude du forage, et moins de vibration dans le train de tiges.



CONVEXE

La face convexe a un design adapté à toutes les conditions et spécialement pour les roches très dures et abrasives grâce à sa rangée de gros carbures de protection en périphérie. Le design permet une vitesse de pénétration plus importante et une durée de vie plus longue.



PLAT

La face plate a un design multi-usage pour tout type de formation de moyen à dur. Particulièrement adapté aux terrains fracturés et mixtes.

PROFILS DES BOUTONS



SPHÉRIQUE (ROND)

Bouton très résistant, pour terrain dur et abrasif, particulièrement adapté aux forages profonds.



BALISTIQUE

Bouton généralement utilisé dans les formations les plus tendres. Profil agressif permettant une vitesse de forage plus rapide.

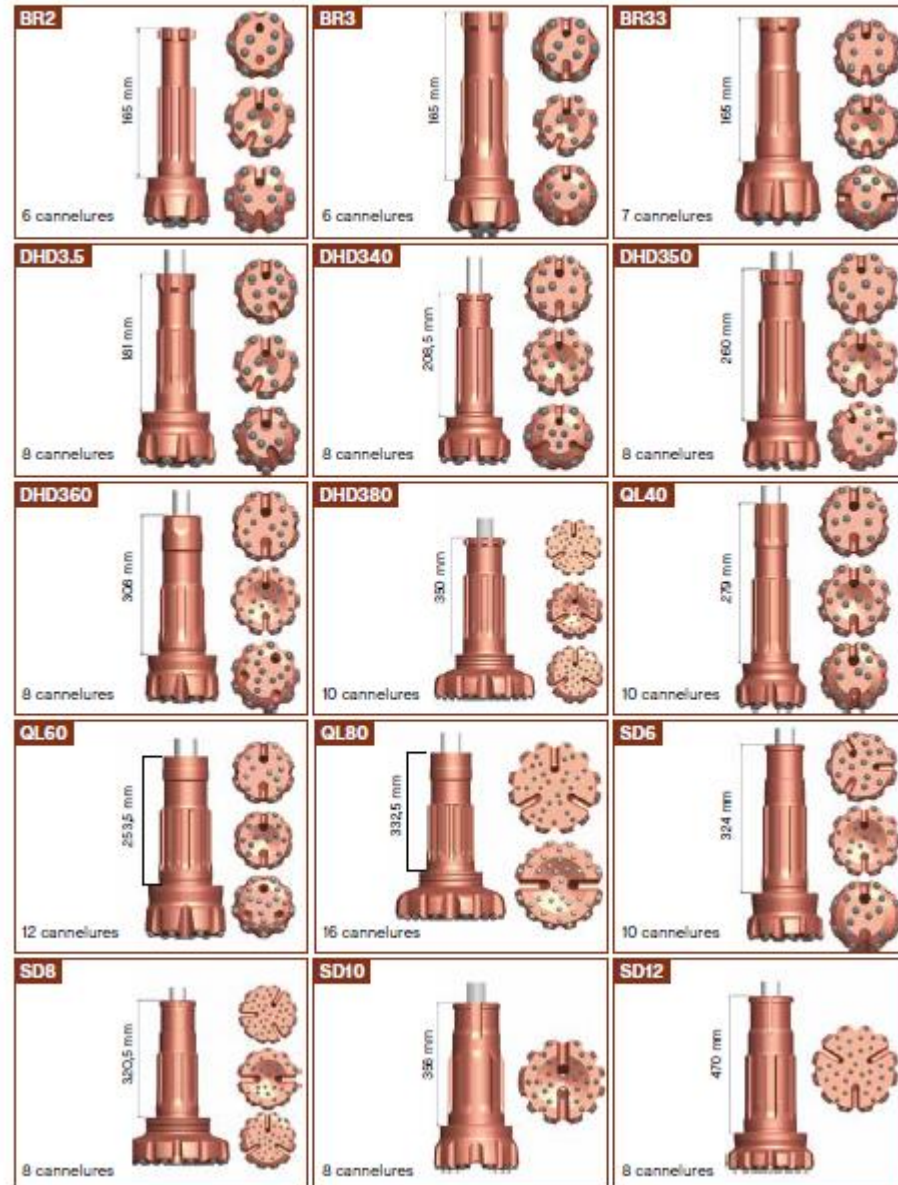


PARABOLIQUE (SEMI-BALISTIQUE)

Bouton apportant un compromis entre le bouton rond pour sa résistance à l'abrasion, et le balistique pour sa vitesse de pénétration.

Source:Agao.com

EMMANCHEMENTS



Paramètres du MFT

- La pression d'air :
Doit être capable d'actionner le marteau (6 ou 7 bars), soulever la colonne d'eau+cuttings jusqu'à la surface, vaincre les pertes de charge dans les flexibles et équipements tubulaires.
- Le débit d'air (en m³/min)
Doit être capable de faire remonter les déblais avec une vitesse annulaire de 915 m/min (3000 ' /h)

Exemples

Pour un forage
<100 m,
P=17b

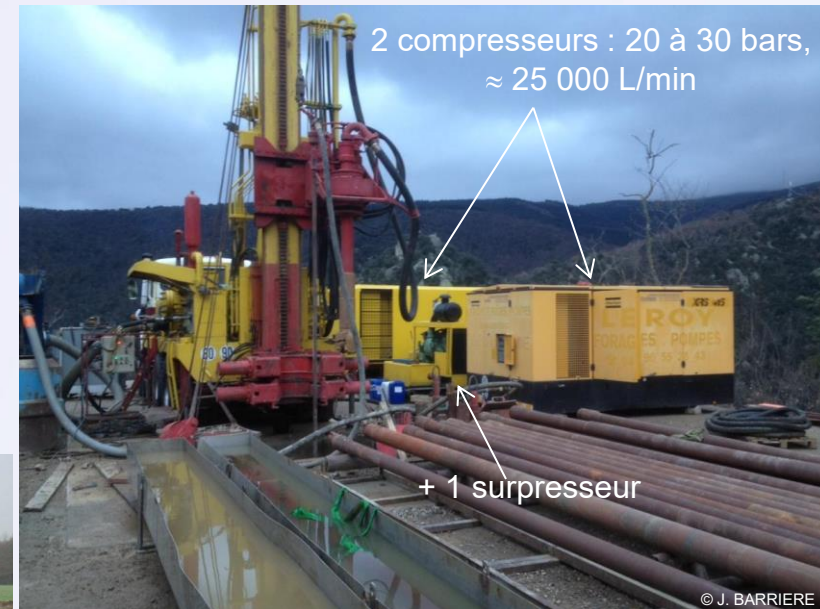
Pour un forage
Ø 219mm,
Q=21 m³/min

Ø des particules sphériques (mm)	Vitesses d'air (m/min)
0,1	60
0,5	300
1,0	480
5,0	1 080
10,0	1 440

(adapté de Plotte H, 1986)

Paramètres du MFT

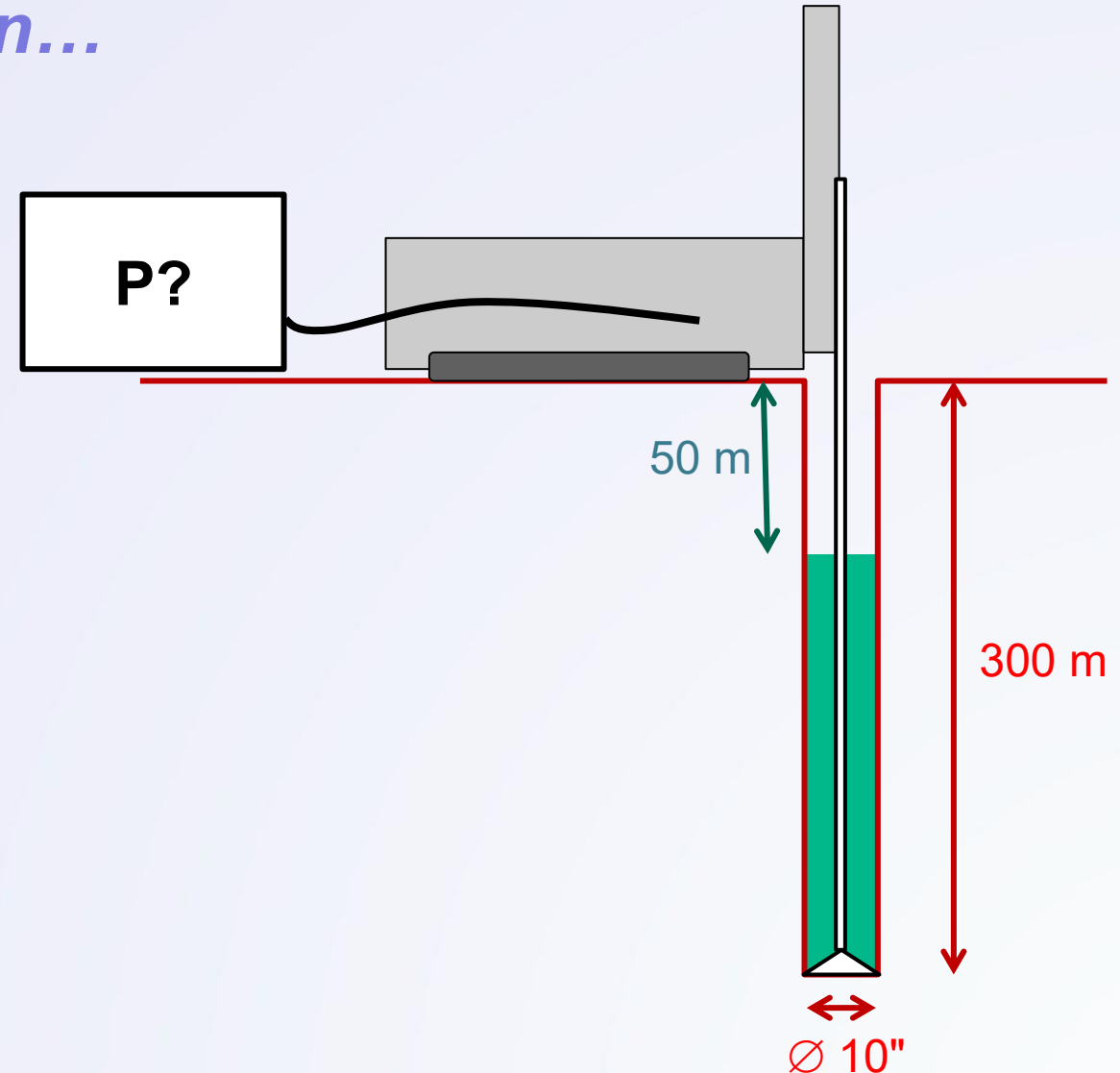
- Compresseurs
Importance du dimensionnement



Exercice 3

Encore une histoire de pression...

- Conditions :
 - Forage MFT à 300 m de profondeur
 - Niveau piézométrique au repos à 50 m de profondeur
- Quelle pression minimale doit avoir le compresseur à acheminer pour forer dans de bonnes conditions ?



Paramètres du MFT

- Le poids sur l'outil

500 à 1000 kg

- La vitesse de rotation

20 à 60 tr/min

- Adjuvants :

- Remontée des cuttings sans augmentation des paramètres liés à l'air (débit – pression)
- Refroidissement de l'outil (expansion de la mousse consommatrice d'énergie en sortie d'outil)
- Stabilisation des parois
- Fixation des poussières

Les paramètres sont très variables selon les types d'outils et les applications : il est impératif de conserver, consigner et appliquer les préconisations des fabricants

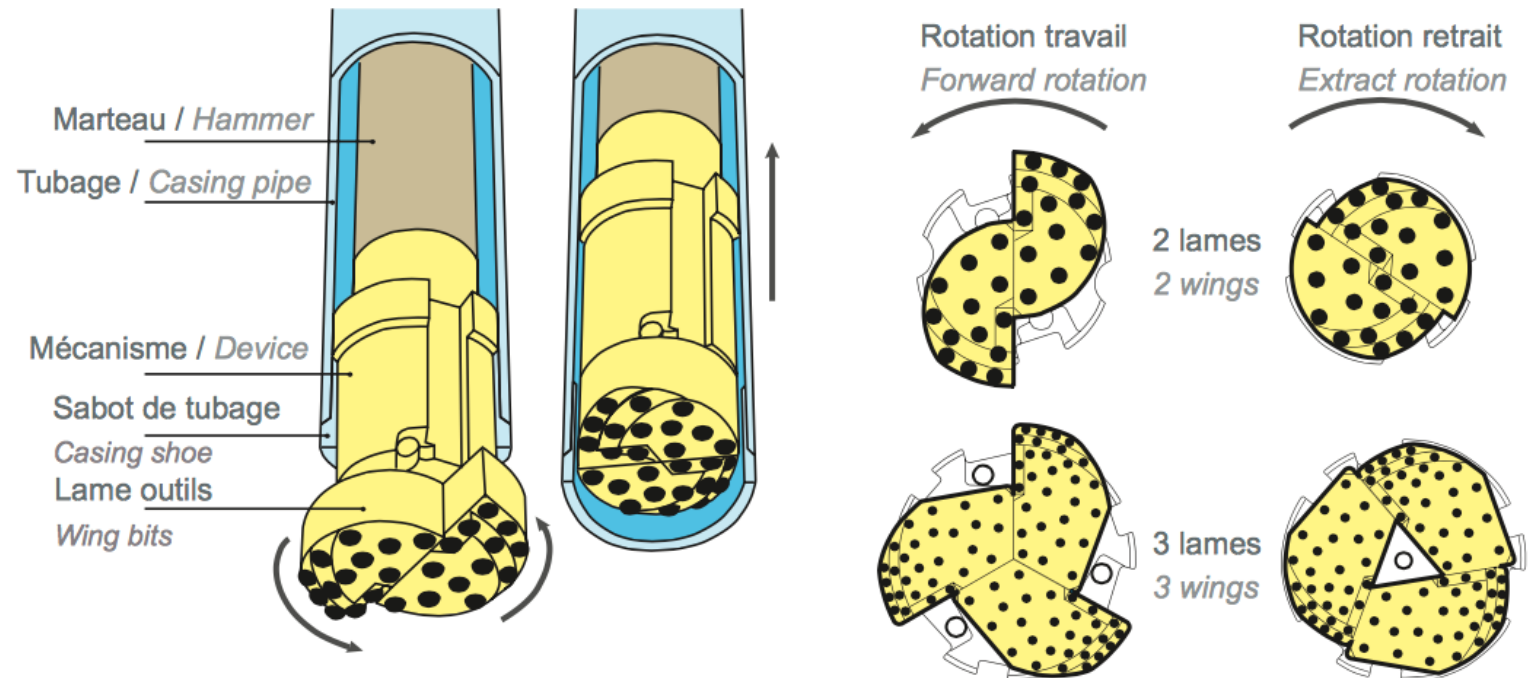
Marteau fond de trou avec tubage à l'avancement

Multiples méthodes à disposition (non exhaustif)

○ ODEX

- Entraînement du tubage par l'outil
- Quelques dizaines de mètres

> SCHÉMA DE PRINCIPE / PRINCIPLE SCHEME



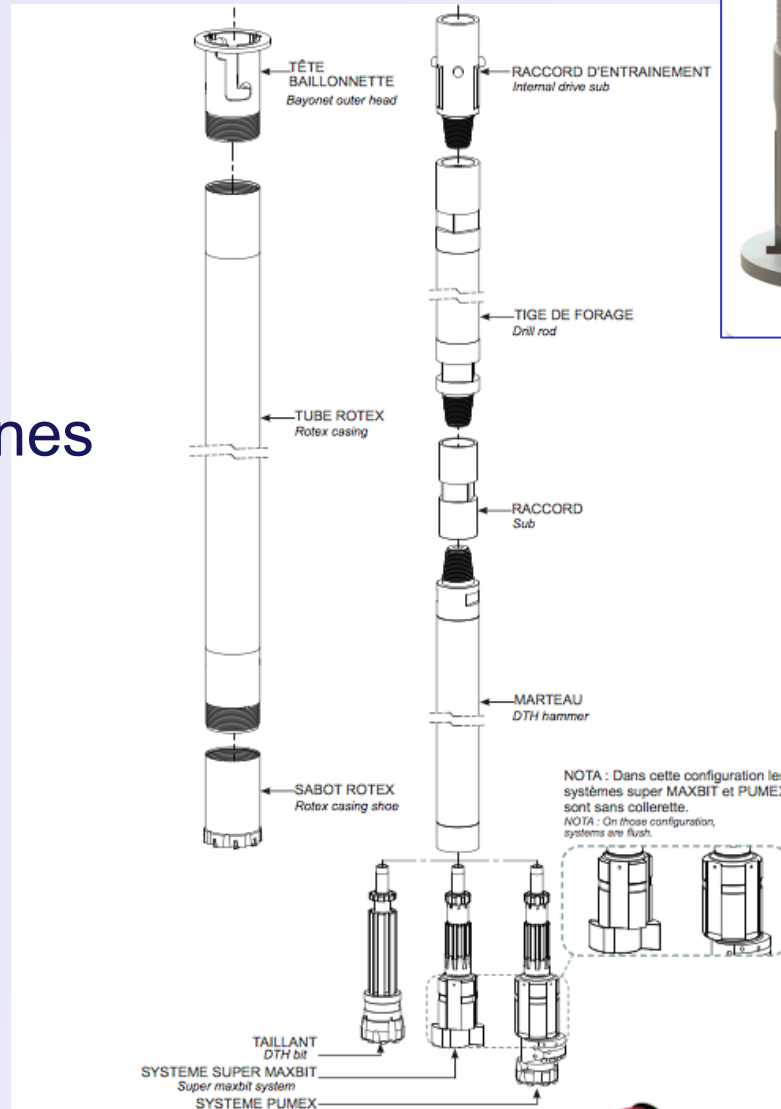
Source : FORALOC

Marteau fond de trou avec tubage à l'avancement

Multiples méthodes à disposition

○ ROTAODEX

- Entraînement du tubage par la tête
- Quelques dizaines de mètres



Source : FORALOC

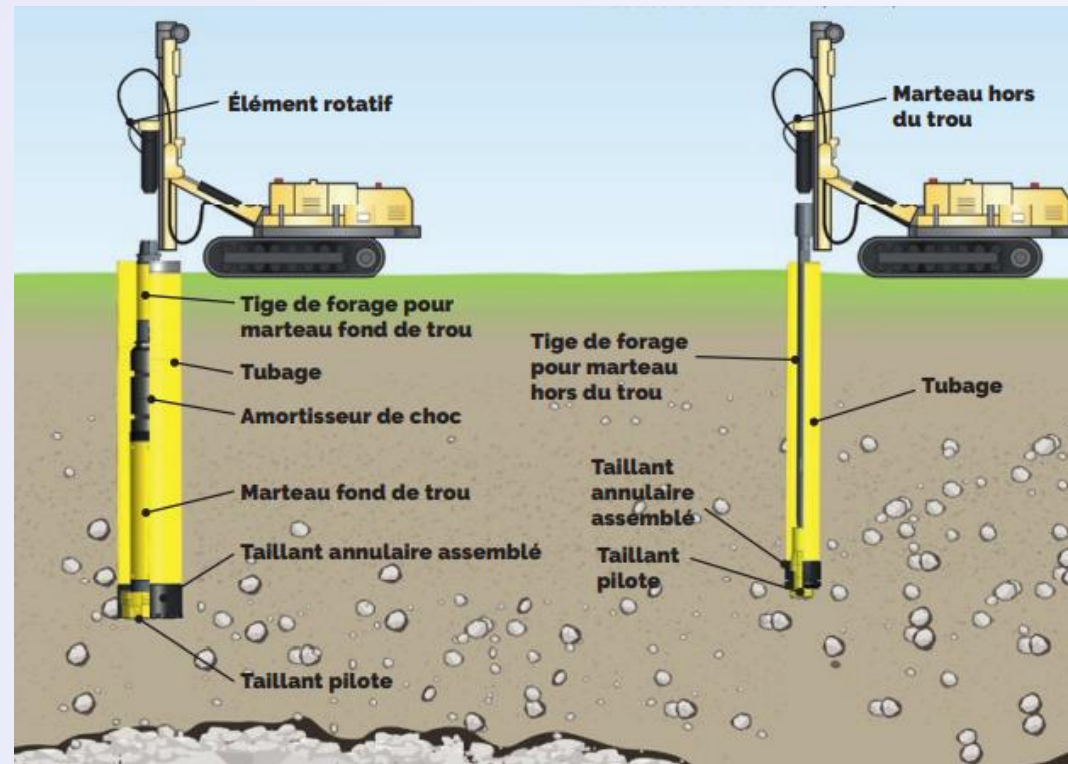
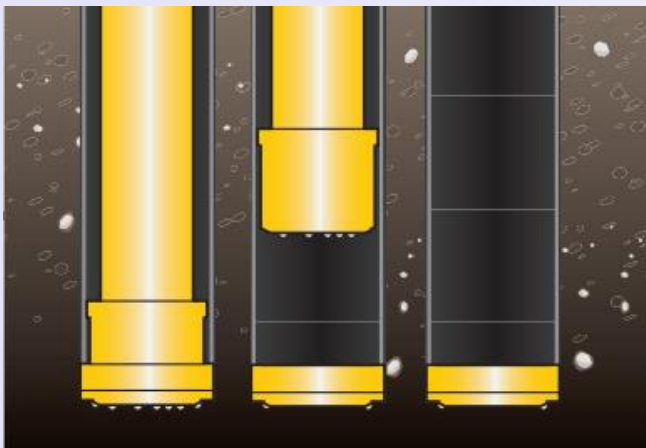


Marteau fond de trou avec tubage à l'avancement

Multiples méthodes à disposition (non exhaustif)

○ SYMMETRIX / ELEMEX

- Entraînement du tubage par l'outil
- Quelques dizaines de mètres



Documentation Terraroc

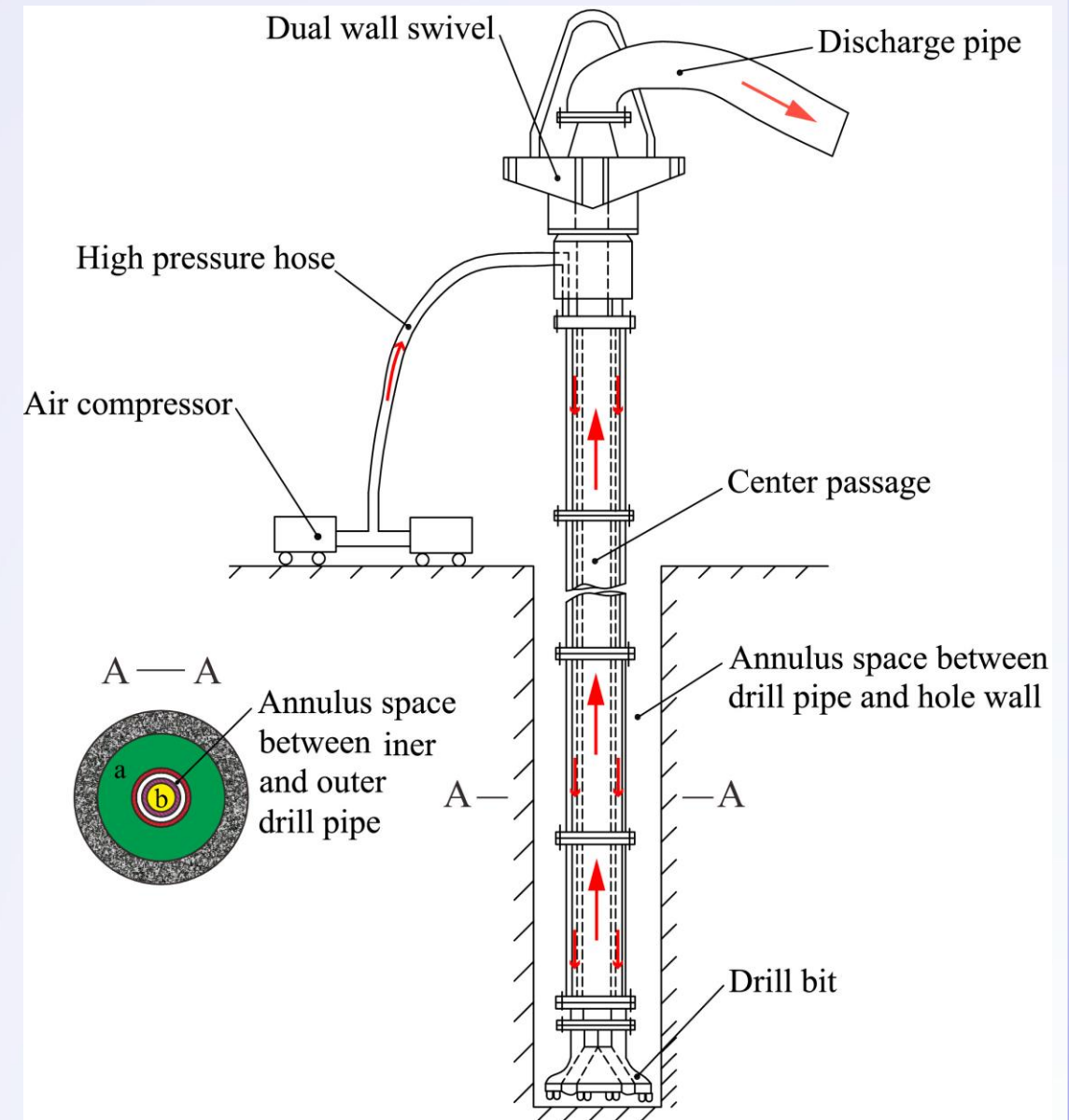
Marteau fond de trou avec tubage à l'avancement

Multiples méthodes à disposition (non exhaustif)

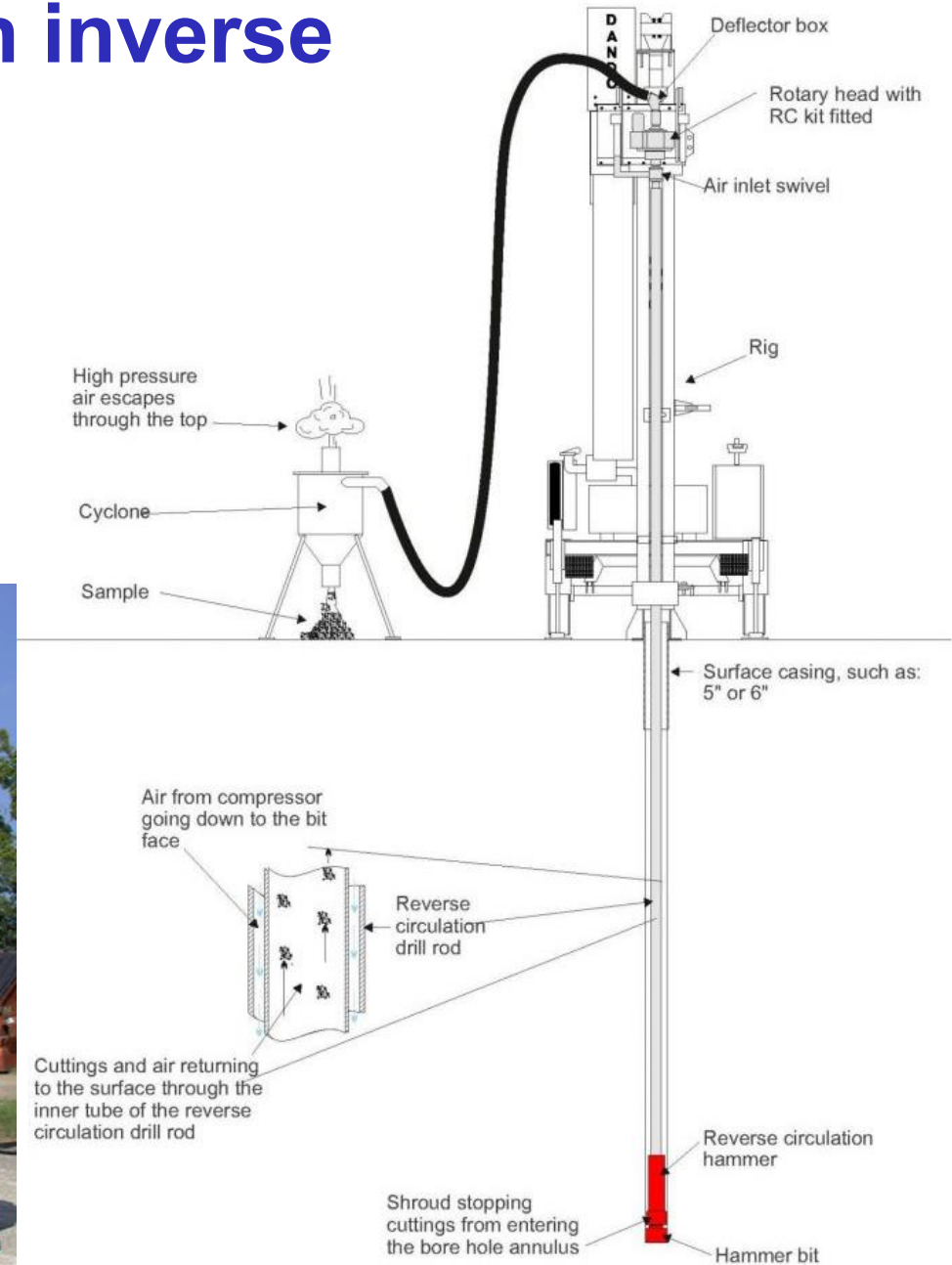
- Pour des forages plus profonds...
 - Entraînement du tube par la rotative
 - Mais fortes contraintes limitant la profondeur



Marteau fond de trou en circulation inverse



Marteau fond de trou en circulation inverse



Stabilisateurs

- Assurer la verticalité / rectitude du trou
- A lames droites pour le MFT
- Hélicoïdale pour le Rotary

MFT



Rotary



© J. BARRIERE

Alésage / élargissage

Outils pilotés



Rotary

MFT



Forages d'eau

2. Techniques de forage

2.5. Autres méthodes moins fréquentes

Tarière

○ Principe

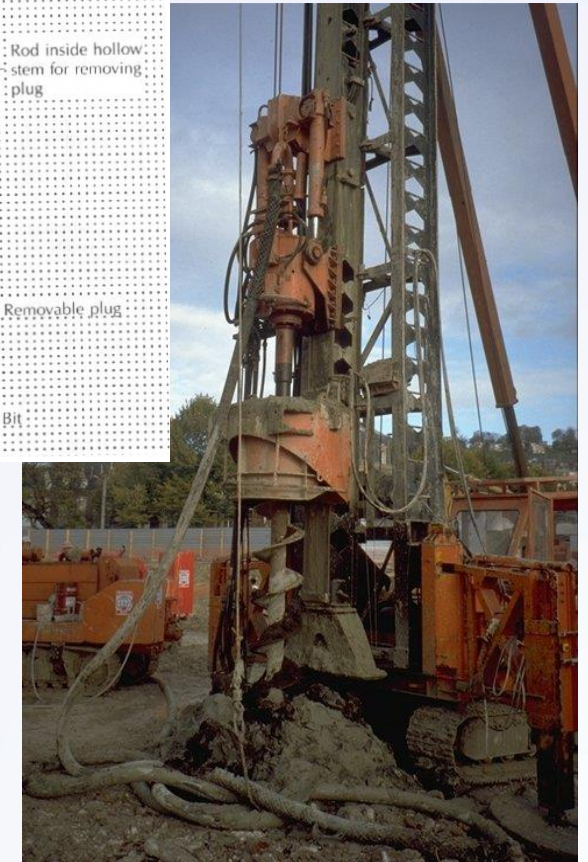
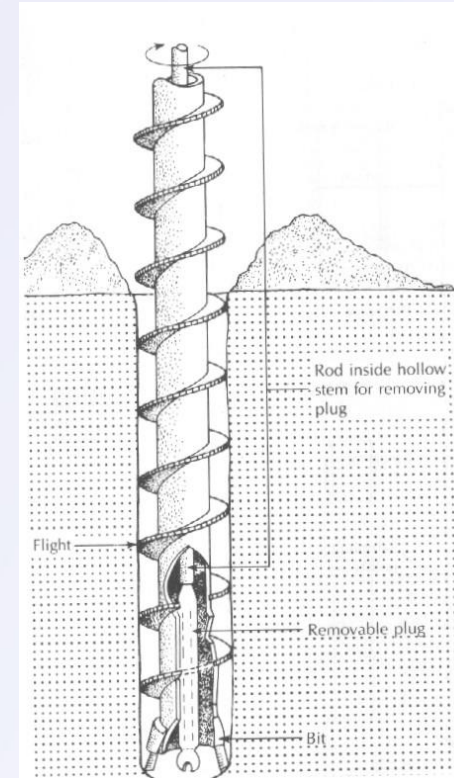
- Rotation
- Foret « vis sans fin »

○ Avantages

- Avancement rapide
- Réalisation de prélèvements dans les mèches creuses
- Absence de fluide de forage

○ Inconvénients

- Inadaptée aux terrains durs ;
- Profondeur réduite (frottements) et incertaine (refus)
- Information géologique décalée et mélangée.



Carottage

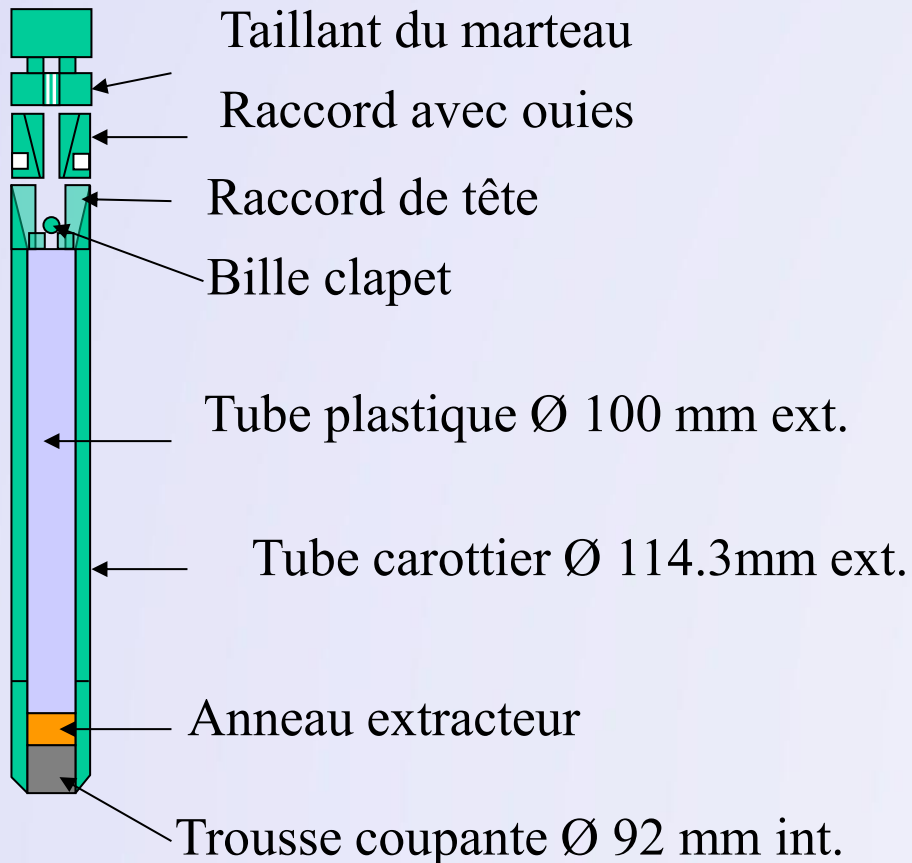
- Acquisition d'informations géologiques



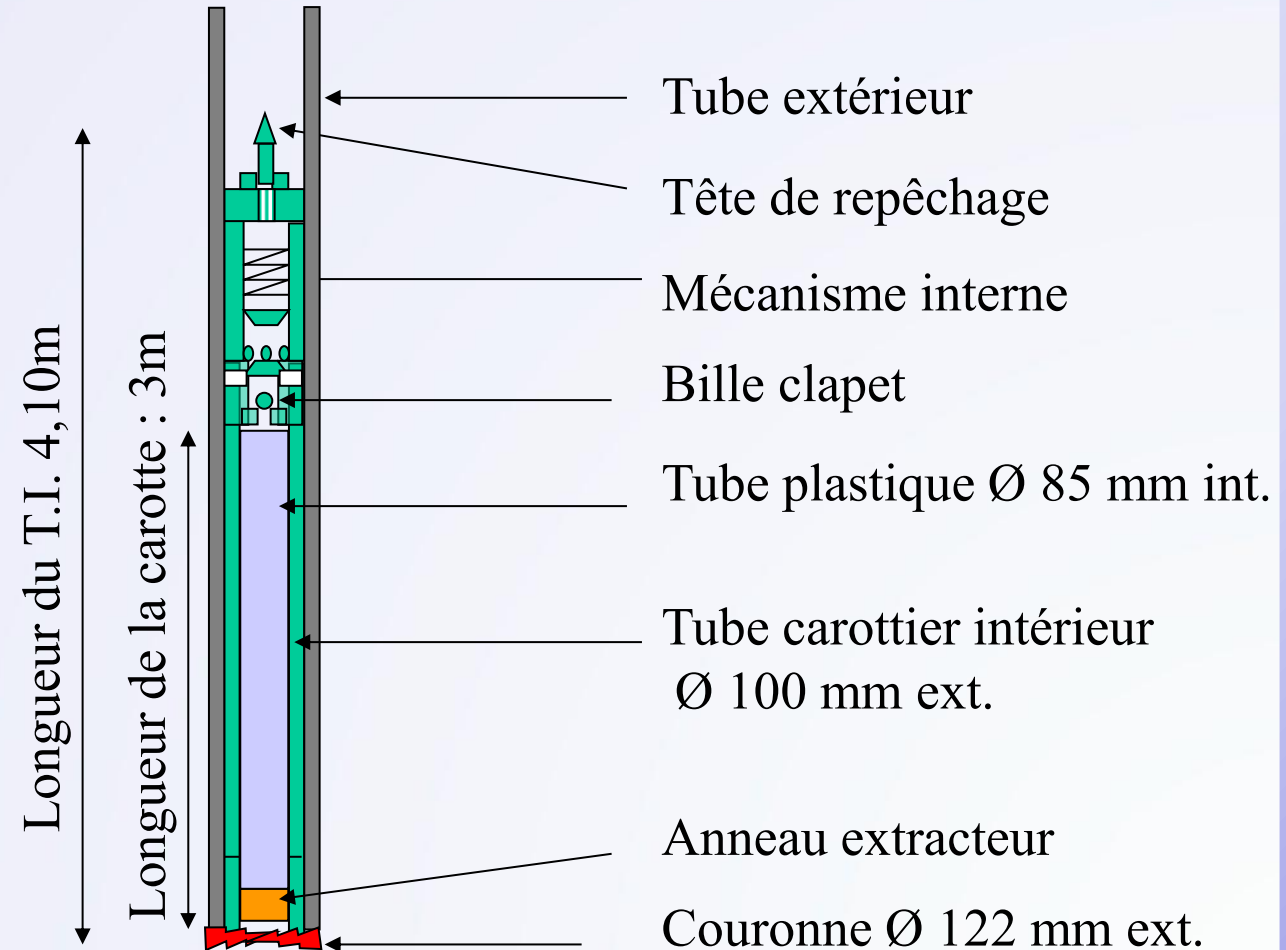
Carottier

Plusieurs méthodes selon contexte / objectifs

○ Carottier simple à percussion



○ Carottier à câble



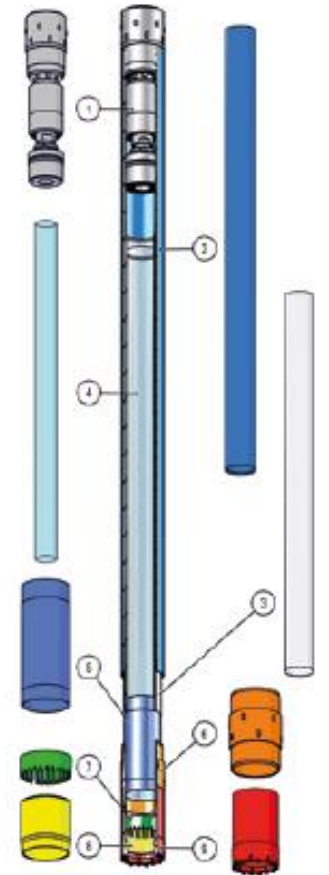
Carottier

Plusieurs méthodes selon contexte / objectifs

○ Carottage triple



Photo A.Gutierrez



REPÈRE

- 1 Tête complète
- 2 Tube extérieur
- 3 Tube intérieur
- 4 Gaine translucide
- 5 Petit tube (tube d'extension)
- 6 Manchon carbure
- 7 Extracteur TRIPLEX
- 8 Porte extracteur TRIPLEX
- 9 Couronne TRIPLEX

Forage sonore

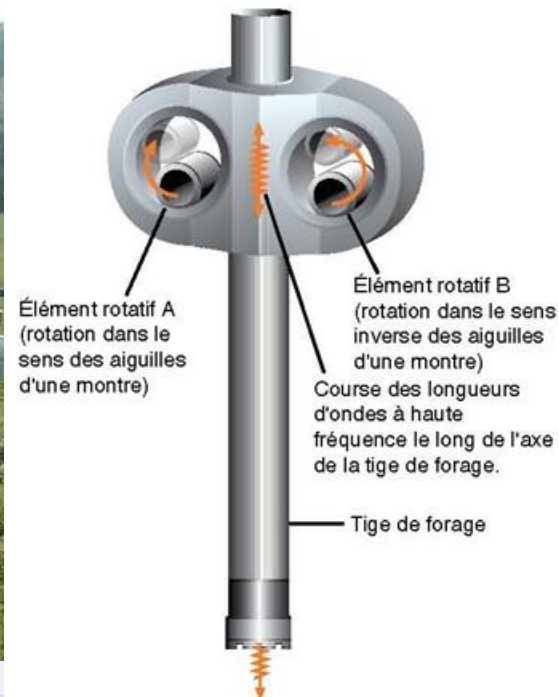
La vibration haute fréquence (100-200 Hz) générée par 2 moteurs est transmise au train de tiges. Ces vibrations rendent meuble (fluide) le sol environnant.

Carottage de sols sableux ou sablo-argileux. Utilisation en géotechnique et SSP



Forage Sonic CEForges

SCHEMA DE L'OSCILLATEUR SONIQUE



Doc Boart longyear, 2012

Forage sonique

Étapes

ÉTAPE 1 - AVANCEMENT DU TRÉPAN CAROTTIER

La rame de forage avance au moyen de fréquences soniques. Lorsque cela est nécessaire, cette étape peut s'effectuer sans fluide, ni air ni boue.



ÉTAPE 2 - MISE HORS SERVICE DU CUVELAGE

Une fois le trépan carottier en place, le cuvelage est avancé par moyen sonique sur le trépan, protégeant ainsi l'intégrité du trou sur des terrains non consolidés et meubles.



ÉTAPE 3 - EXTRACTION PAR CAROTTES

L'extraction du trépan carottier produit un échantillon relativement non remanié avec une extraction des carottes proche des 100 %.



ÉTAPE 4 - AVANCEMENT DU TRÉPAN CAROTTIER

Les étapes 1 à 3 sont répétées en profondeur pour produire un carottage continu sur des formations non consolidées avec moins de 1 % de déviation.



Forage sonique



PRINCIPAUX BÉNÉFICES DU FORAGE SONIQUE

:

- **Vitesse inégalée en destructif** : de 3 à 4 fois plus rapide que toutes les techniques conventionnelles
- Forage tubé à l'avancement pour **mise en place rapide d'ancrages**, micro pieux, etc.
- **Sans compresseur** pour des **coûts de production réduits**.
- **Un même outil même en formations mixtes**, de très meubles à très durs.
- Déviation des forages inférieure à 2 % en moyenne et **strict respect de la profondeur**
- **Moins bruyant** que les méthodes conventionnelles, idéal pour les chantiers urbains.
- **Sans altération des terrains avoisinants** (150 Hz),
un atout pour les travaux sur barrage, bâtiments historiques, etc...

Avancements / applications des techniques

Un bilan

	Battage	Havage	Tarière	Rotary	Rotary avec circulation inverse	Marteau-fond-de-trou	MFT avec tubage à l'avancement
Sable non consolidé	1-3	1-3	1	5	5	-	6
Alluvions - galets	3	3	1	2	2	-	5
Silts, argiles	3	3	5	5	5	-	5
Grès	3	-	-	3-4	3-4	1-5	Selon méthode
Calcaires	5	-	-	3-5	1-3	5-6	Selon méthode
Basaltes	3	-	-	3-5	4-5	3-6	Selon méthode
Granites et gneiss	3	-	-	3	3	5	Selon méthode

Adapté de Driscoll et al., *Groundwater and wells* (1986)

1=impossible / 2=difficile / 3=lent / 4=médian / 5= rapide / 6=très rapide

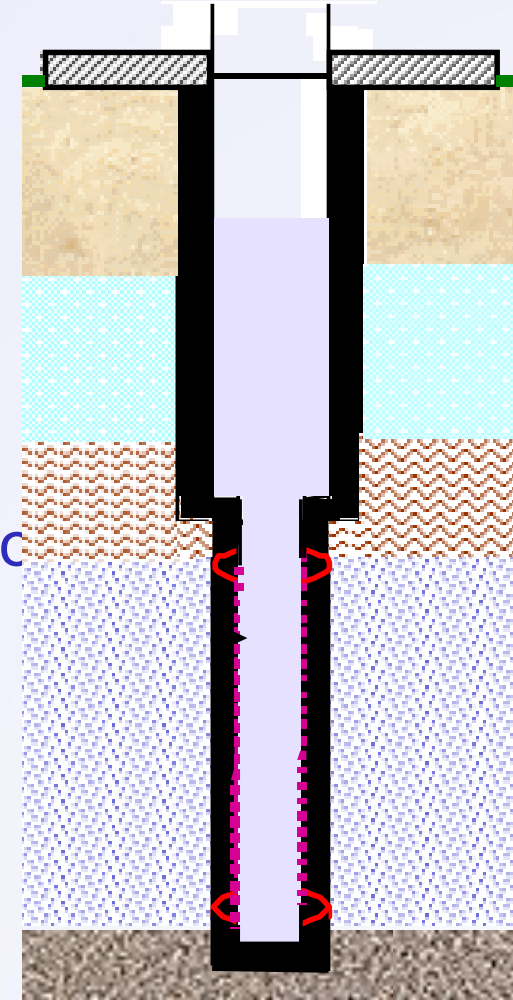
(Très !!!) indicatif, à adapter à la réalité de chaque site

Forages d'eau

3. Equipements

Fonctions des équipements

- Maintien des terrains
- Isolation des nappes traversées
- Isolation de la surface
- Préservation des modalités d'exploitation
- Pérennité de l'ouvrage
- Préservation des propriétés hydrauliques du réservoir
- Préservation de la qualité de l'eau captée



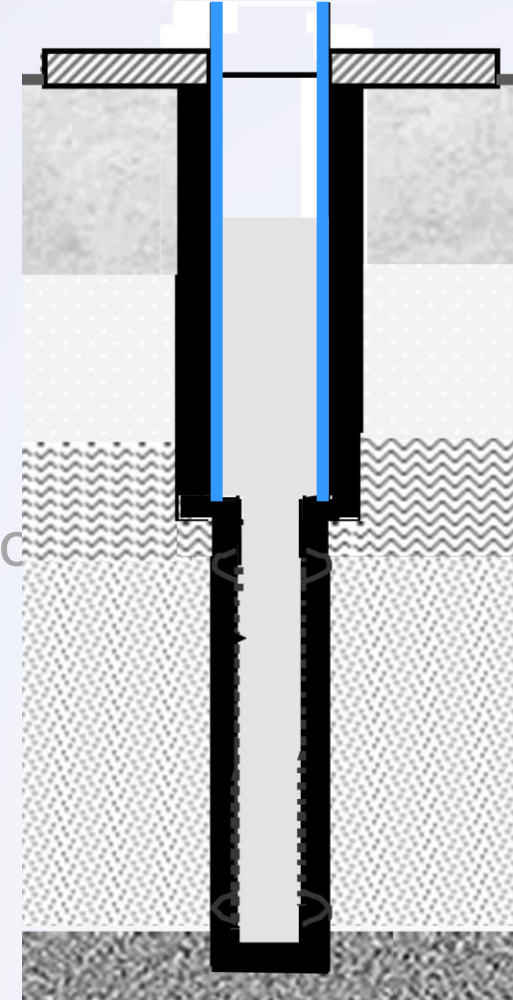
Forages d'eau

3. Equipements

3.1. Equipements tubulaires

Tubes pleins

- Maintien des terrains
- Isolation des nappes traversées
- Isolation de la surface
- Préservation des modalités d'exploitation
- Pérennité de l'ouvrage
- Préservation des propriétés hydrauliques du réservoir
- Préservation de la qualité de l'eau captée



Tubes pleins

○ Tubages casing

Standardisé par A.P.I.

Tubes étirés sans soudure, filetés et manchonnés

Aciers enrichis en carbone, + résistants

Défini par :

- Diamètre extérieur (in)
- Poids (lbs/ft)
- Epaisseur (mm)
- filetage (API, VAM, Buttress)
- Longueur ("range")

Nuances d'acier

J55, K55 ... correspondent à des caractéristiques mécaniques spécifiques (cf form.foreur ou Lauga V.9)



Tubes pleins

- Tubes en tôles roulées et soudées

Pas de Ø standardisé. Le diamètre nominal est le Ø intérieur.

Acier ordinaire, acier noir, acier galvanisé, semi-inoxydable, inox .

- Tubes PVC alimentaire (PVC sans métaux lourds)

Résistance mécanique moindre (risque de collapse).

Lisses, rainurés ou tulipés (attention au Ø ext. du manchon!)

Pas de Ø standardisé, le diamètre nominal est intérieur ou extérieur



Choix du matériau

Critères multiples, à coordonner

- Critères mécaniques: (Résistance au collapse, fonction de l'épaisseur du tube pour un diamètre choisi). Prendre un coef de sécurité de 0,7 par rapport aux caractéristiques constructeur.
- Critères chimiques (qualité de l'eau)
- Coût (tubage inox= 30 à 50% du coût du forage)
- Durée de vie
- Utilisation finale de l'eau

Choix du matériau

Critères multiples, à coordonner

- Exemple de critère mécanique : norme italienne forages - résistance à l'écrasement

Fig. J.1

Graph of resistance to external pressure in relation to the D/s ratio

Key

Y P_e = resistance to external pressure in [daN/cm²]

X Ratio D/s = Ratio Diameter/casing thickness

----- = S235JR steel

— = S355JR steel

— = AISI 304/316 stainless steel

— = PVC MAX

— = PVC min

----- = PPHM

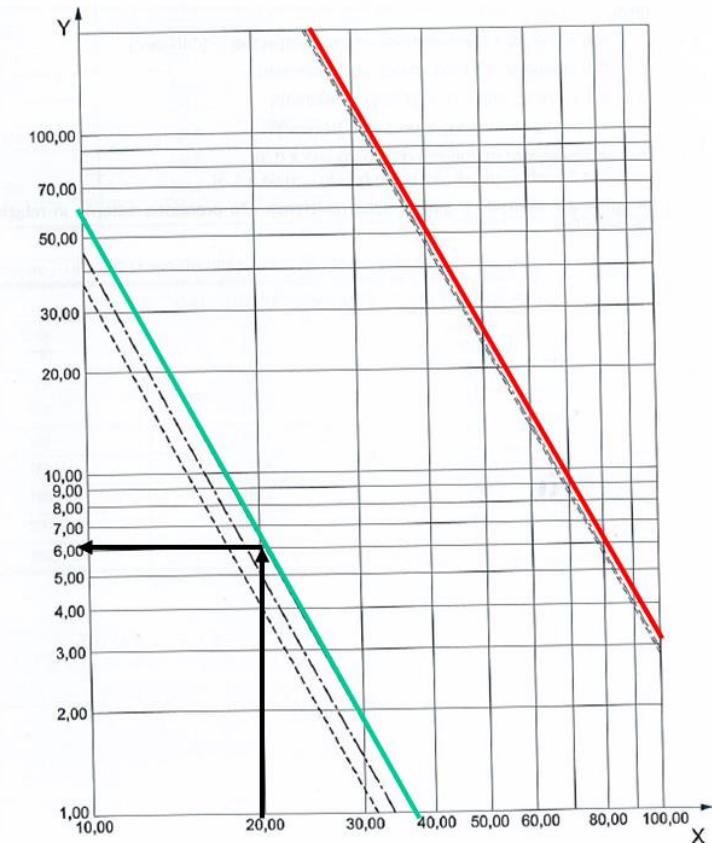


Fig. J.1

Choix du matériau

Critères multiples, à coordonner

- Exemple de critères chimiques

Paramètres	Risques de corrosion	Risques d'entartrage
pH	<7	>7
[O ₂]	>2mg/l	
[CO ₂]	> 50 mg/l	
[H ₂ S]	>1mg/l	
TDS	>1000 mg/l	
[Cl ⁻]	>500 mg/l	
Dureté calcique		>300 mg/l
[Fe ²⁺]		>2mg/l
[Mn ²⁺]		>1 mg/l
>T	augmentation	augmentation

Documentation Johnson Screen

Choix du matériau

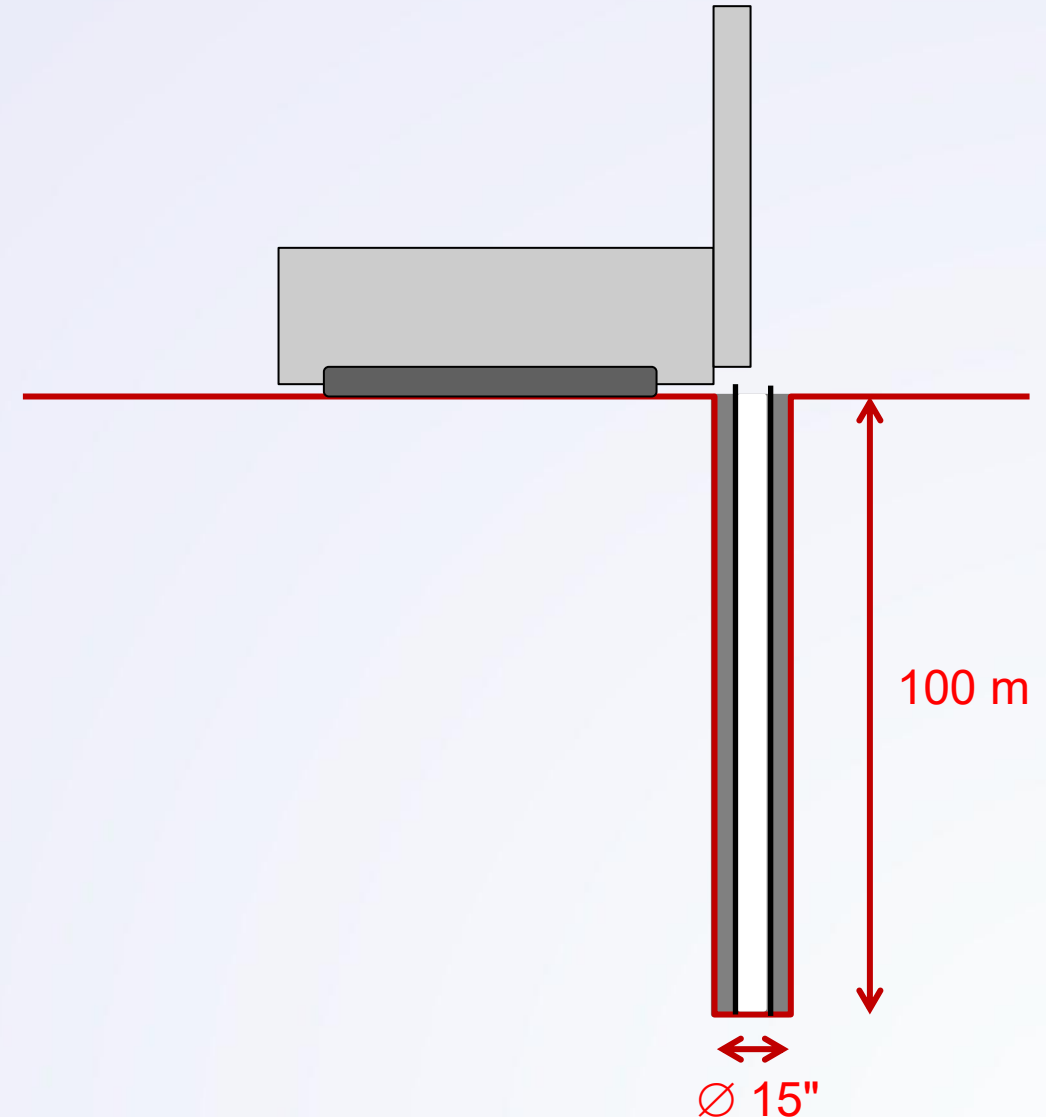
Principaux éléments à retenir

Matériaux		Résistance mécanique	Corrosion		Milieu
PVC alimentaire		Faible résistance mécanique → risque d'écrasement et/ou d'éclatement. Si dénoisement : écrasement facilité.	Insensible		Adapté aux forages peu profonds (< 200m)
PEHD		Modérée. Sensible aux altérations de surface (rayures)	insensible		Tout milieu
Acier		Excellente	très sensible		Inadapté aux eaux très minéralisées
Fibre de verre		Modérée. Sensible aux altérations de surface (rayures)	Insensible		Adapté à tous milieux
Acier inoxydable	austénitiques	Bonne résistance	Sensible à la fissuration par corrosion sous contrainte en présence de chlore		Inadapté si présence de chlore Si chlore, ajouter Mo à l'alliage
	ferritiques	Moins résistant que les autres nuances.	Très peu sensible à la fissuration par corrosion sous contrainte en présence de chlorures		
	duplex	Bonne	Très peu sensible		Adaptés aux environnements marins
	martensitiques	Grande dureté et résistance mécanique,	Résistance limitée (la plus faible des aciers inoxydables) Bonne résistance à la fissuration par corrosion sous contrainte en présence de chlore		Utilisable en présence de chlore
	durcissement par précipitation	Excellente résistance mécanique et grande dureté	Résistance < duplex		
Acier revêtu (galvanisé)		Dans une eau modérément dure à pH neutre, bonne résistance au chlorure, sulfates et nitrates.	Bonne résistance au chlorure, sulfates et nitrates dans une eau modérément dure à pH neutre Corrosion rapide du Zn dans une eau de faible dureté, pH élevé, alcalinité élevée		Adapté à eau modérément dure

(Bézégues-Courtade & Durst, 2012)

Exercice 4

- **Projet :**
 - Tubage + cimentation
 - Hauteur : 100 m
 - Diamètre : 15 pouces
 - Forage vide (pessimiste)
 - Densité ciment : 1,8
- **Tubages possibles et résistance à l'écrasement :**
 - PVC : 7,5 bars
 - API : 77 bars
- **Quel tubage approprié ?**
(avec coef de sécurité de 0,7)
- **Solutions de mise en œuvre ?**

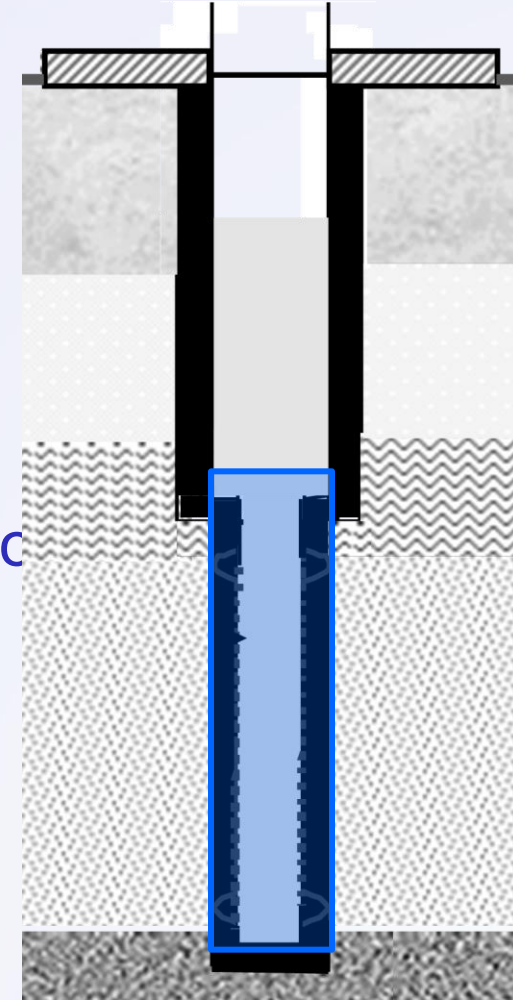


Choix du diamètre

- Contraint par le débit : Vitesse ascendante $< 1,5 \text{ m/s}$
- Dépend de la coupe du forage (cf. chapitre « conception »): autres diamètres, autres métaux...
- Contrainte d'épaisseur (résistance mécanique)

Tubes crépinés

- Maintien des terrains
- Isolation des nappes traversées
- Isolation de la surface
- Préservation des modalités d'exploitation
- Pérennité de l'ouvrage
- Préservation des propriétés hydrauliques du réservoir
- Préservation de la qualité de l'eau captée



Tubes crépinés

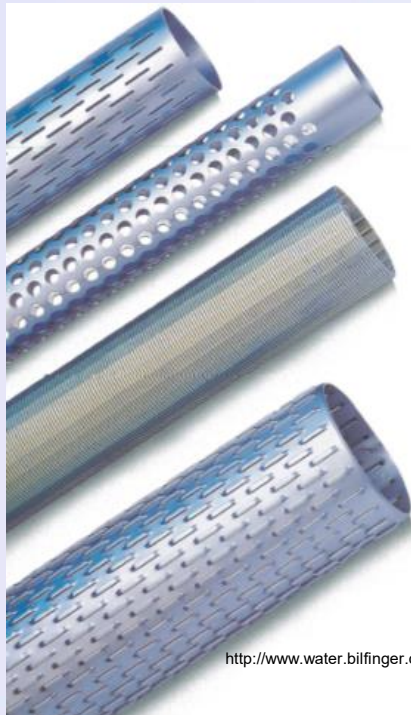
Les principes

- Toute l'eau du forage passe par la crépine : zone sensible
- Rôle de filtre (contenir le sable et s'opposer à sa pénétration)
→ minimiser les ouvertures
- Equipement de captage (optimiser la production)
→ maximiser les ouvertures
- Doit résister à la corrosion, à la pression des terrains
- Dimensionnée en fonction de la granulométrie du gravier additionnel (le cas échéant).

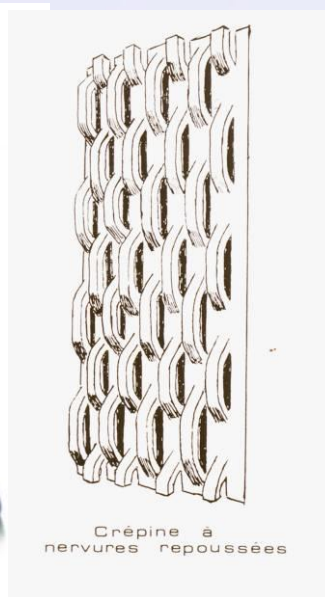
Tubes crépinés

Types de crépines

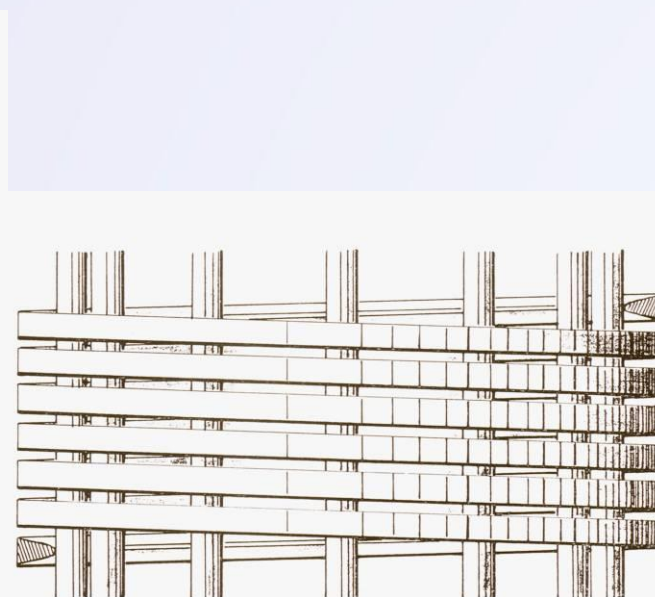
- à trous ronds : faible % d'ouverture (~10%)
- à trous oblongs (fentes verticales de 3 cm : 10 – 20 % d'ouv.)
- à persiennes (bonne résistance mécanique)
- à nervures repoussées (bonne résist., 3 à 27 % d'ouv.)
- À fil enroulé (type Johnson) (>30 % d'ouv.)



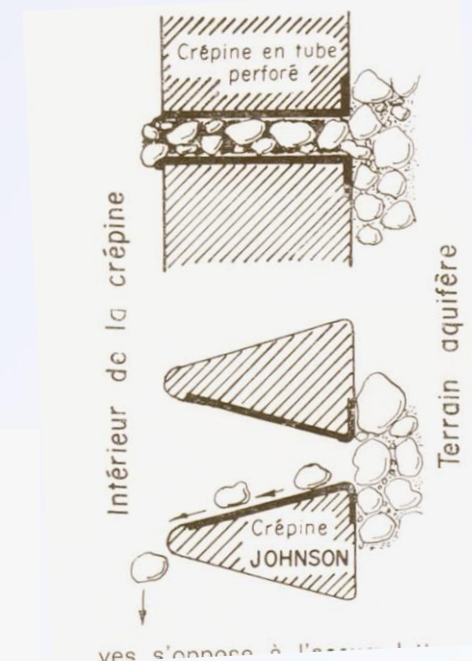
<http://www.water.bilfinger.com>



Crépine à nervures repoussées

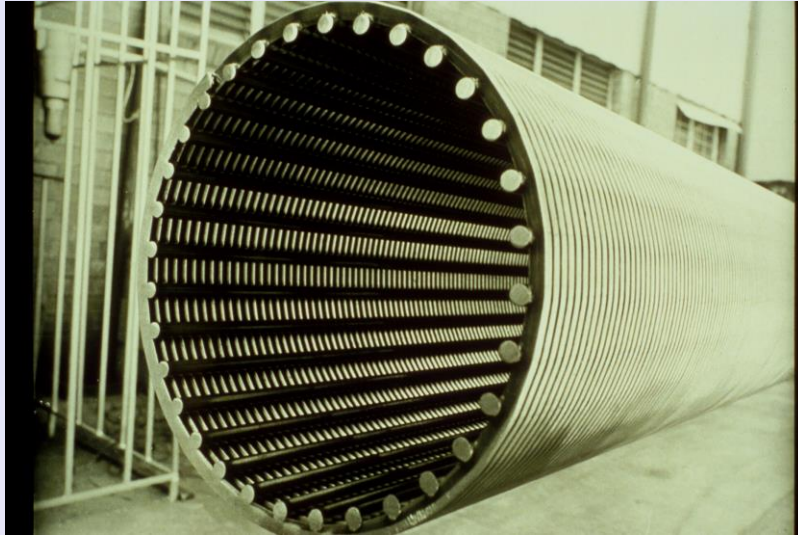


Un tronçon de crépine JOHNSON



Tubes crépinés

Crépines en acier inoxydable



Fil enroulé

*Différentes typologies selon
résistance mécanique et
nuances d'inox*



Mixte (pipe based)

Tubes crépinés

Crépines avec filtre

- Gravier collé
- Double crépine (Munipack)



Tubes crépinés

Principes de dimensionnement

- Granulométrie :
 - massif filtrant : l'ouverture ("slot") retient plus de 90% du massif additionnel
 - autodéveloppement : au minimum 40 à 50% de la formation
- Vitesse ascensionnelle : $< 1,5 \text{ m/s}$ (régime laminaire)
- Vitesse d'entrée : $< 3 \text{ cm/s}$

Exercice 5

Eviter les survitesses à l'entrée des crépines

- Crépine fil enroulé 8 pouces :

Size (in.)	Max Depth (ft.)	OD (in.)	ID (in.)	Weight ¹ (lbs./ft.)	Recom. Hang Weight ² (lbs.)	Collapse Strength ¹ (PSI)	Intake Area ³ - sq in./ft. of Screen							
							Screen Slot Size (thousandths of an in.)							
							10	20	30	40	50	60	80	100
6P	100	6.6	6.1	4.5	4,315	83	36	62	83	100	113	124	142	156
	250	6.7	6.1	6.4	4,315	244	25	46	63	78	90	101	119	133
	600	6.7	5.9	7.5	8,813	242	25	46	64	78	91	102	119	133
	1,000	6.8	5.9	9.1	8,813	500	31	56	76	92	105	117	135	149
	1,600	6.8	5.9	12.8	16,498	564	20	38	53	66	77	87	105	119
8T	100	7.5	6.8	6.6	11,016	58	40	70	94	113	128	141	161	176
	600	7.5	6.8	8.8	11,016	169	29	52	72	88	102	114	135	150
	1,000	7.5	6.7	12.7	13,734	415	23	42	58	73	86	97	116	132
	1,600	7.6	6.7	15.1	20,622	402	23	42	59	74	87	98	117	133
	250	8.7	7.9	10.0	12,118	112	33	60	82	101	117	131	155	173
8P	600	8.7	7.9	11.9	12,118	233	41	72	98	119	136	151	174	192
	1,000	8.8	7.9	19.0	15,107	636	24	44	62	78	93	105	127	145
	1,600	8.9	7.9	21.6	22,684	619	24	45	63	79	93	106	128	146
	250	9.5	8.7	11.2	14,321	85	36	66	90	111	129	144	169	189
10T	600	9.5	8.7	13.3	14,321	179	44	79	107	130	149	165	191	211
	1,000	9.6	8.6	21.1	17,854	496	26	48	68	85	101	114	138	158
	1,600	9.7	8.6	24.2	26,809	484	26	49	68	86	101	115	139	159



(document Johnson Screens)



- Débit prévisionnel : 100 m³/h
- Quelle hauteur minimale théorique de crépines est nécessaire ?

Tubes crépines

Exemple de document fournisseur

- Crépines PVC : ouvertures

Caractéristiques des crépines

Pourcentage de vide* des crépines suivant les fentes

Diam. ext.	Fente 0,3 mm	Fente 0,5 mm	Fente 0,75 mm	Fente 1 mm	Fente 1,5 mm	Fente 2 mm	Fente 3 mm
33	3,5 %	4,5 %	6,5 %	7 %			
40	4 %	5 %	7 %	8 %			
50	4,5 %	5 %	8,0 %	9 %			
60	4,5 %	5,5 %	8 %	9,5 %			
63	4,5 %	5,5 %	8 %	9 %			
75	4,5 %	5,5 %	8,5 %	9,5 %			
90	4,5 %	6 %	9 %	10 %	10 %		
110	4,5 %	6 %	9 %	10 %	10 %	14 %	
113	4,5 %	6 %	9 %	10 %	10 %	13,5 %	
114	4,5 %	6 %	9 %	10 %	10 %	13,5 %	
125	4,5 %	5,5 %	8,5 %	9,5 %	9,5 %	13 %	13,5 %
140	4 %	5 %	8 %	9 %	9 %	12 %	15 %
160	4 %	5 %	8 %	9 %	9 %	12 %	15 %
165	4 %	5 %	8 %	9 %	9 %	12 %	15 %
167	4 %	5 %	8 %	9 %	9 %	12 %	15 %
175		5,5 %	8 %	9,5 %	9,5 %	12,5 %	15 %
180		5,5 %	8 %	9 %	9 %	12,5 %	13,5 %
195		5,5 %	8 %	9 %	9 %	12,5 %	15 %
200		5 %	8 %	9 %	9 %	12 %	15 %
225		5 %	8 %	9 %	9 %	11 %	13 %
250			7 %	8 %	8 %	10 %	12 %
280			7 %	8 %	8 %	10,5 %	12 %
315			6,5 %	7,5 %	7,5 %	9,5 %	11 %
330			6,5 %	7,5 %	7,5 %	9,5 %	11 %
400				6 %	6 %	7,5 %	9 %

Tubes crépines

Exemple de document fournisseur

- Crépines PVC :
débit unitaires
(m³/h par m de crépine)

Diam. ext.	Fente 0,3 mm	Fente 0,5 mm	Fente 0,75 mm	Fente 1 mm	Fente 1,5 mm	Fente 2 mm	Fente 3 mm
33	0,3	0,4	0,5	0,6			
40	0,5	0,6	0,9	1			
50	0,7	0,8	1,2	1,3			
60	0,8	1	1,5	1,7			
63	0,8	1	1,5	1,8			
75	1	1,2	1,9	2			
90	1,2	1,6	2,4	2,7	2,7		
110	1,6	2	3	3,5	3,5	4,7	
113	1,6	2	3	3,5	3,5	4,7	
114	1,6	2	3	3,5	3,5	4,7	
125	1,8	2,2	3,2	3,7	3,7	5,1	
140	1,9	2,3	3,4	3,9	3,9	5,2	6,4
160	2	2,5	3,8	4,3	4,3	5,7	7
165	2,1	2,7	4,1	4,7	4,7	6,3	7,5
167	2,1	2,7	4,1	4,7	4,7	6,3	7,5
175		3	4,5	5,2	5,2	6,9	8,3
180		3,1	4,6	5,2	5,2	6,9	8,3
195		3,3	4,9	5,6	5,6	7,5	9
200		3,4	5	5,7	5,7	7,6	9,1
225		3,8	5,6	6,3	6,3	7,8	9,1
250			5,9	6,5	6,5	8,3	9,8
280			6,3	7,0	7,0	8,9	10,5
315			6,9	7,7	7,6	9,8	11,5
330			6,9	7,7	7,6	9,8	11,5
400				7,7	7,6	9,8	11,5

Tubes crépines

Exemple de document fournisseur

- Crépines fil enroulé
(m³/h par m de crépine)

DÉBIT OPTIMUM DES CRÉPINES JOHNSON CONSTRUCTION STANDARD (M3/H/ML)
PORTATA OTTIMALE DEI FILTRI JOHNSON - COSTRUZIONE STANDARD
OPTIMALE FÖRDERMENGE DER JOHNSON STANDARD SPALTSIEBE

SLOT		Ø 4" PS		Ø 6" PS		Ø 8" PS		Ø 10" PS		Ø 12" PS		Ø 14" PS		Ø 16" PS		Ø 18" PS	
		114 mm		168 mm		219 mm		273 mm		324 mm		356 mm		412 mm		455 mm	
0,000"	mm	REF 250	REF 275	REF 275	REF 300	REF 300	REF 325	REF 325	REF 350	REF 350	REF 375	REF 375	REF 400	REF 375	REF 400	REF 375	REF 400
20	0,50	6,4	6	8,8	8,1	10,6	9,9	12,3	11,6	12,9	12,1	14,2	13,4	16,2	15,3	18,2	17,2
40	1,00	11	10,3	15,2	14,2	18,6	17,5	21,8	20,6	22,9	21,7	25,4	24,2	29	27,5	32,6	31
60	1,50	14,5	13,6	20,1	19	24,8	23,5	29,2	27,8	30,9	29,5	34,5	32,9	39,3	37,6	44,3	42,3
80	2,00	17,2	16,3	24	22,8	29,8	28,3	35,3	33,7	37,5	35,9	42	40,2	47,9	45,9	53,9	51,7

• Vitesse d'entrée optimale • Velocità ottimale d'ingresso • Einfließgeschwindigkeit = 3 cm/sec.

Pose des éléments tubulaires

Les principes

- Tubes propres
- Tubes en suspension
- Centreurs



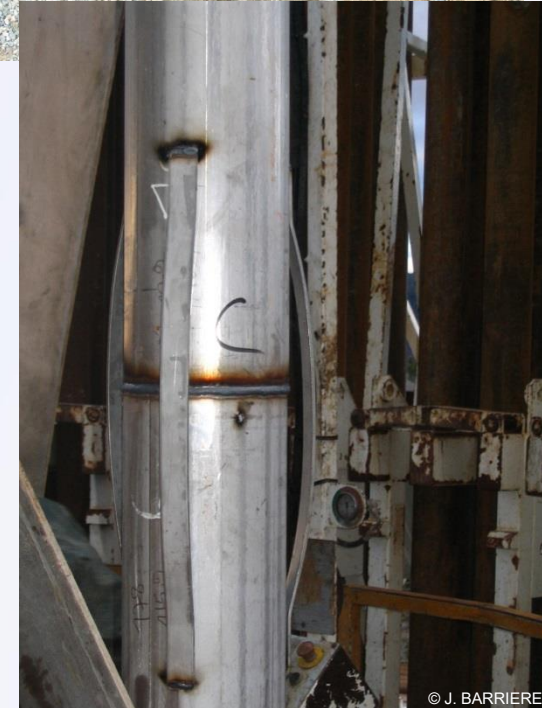
© J. BARRIERE



Pose des éléments tubulaires

Les principes

- Utiliser des centreurs !
- Ne pas percer le tube pour mettre les centreurs...
- Tubes propres
- Attention à la résistance mécanique :
 - Suspendre les tubes et les crépines (ne pas les poser).
 - Traction liée au poids des éléments



Pose des éléments tubulaires

Assemblage

- Soudure :
 - qualif du soudeur?
 - soudure spéciale pour inox - inertage
- Raccords filetés (manchons Buttress, VAM, Extreme line)
Attention : diamètre > tube
- Raccords rapides spéciaux (ZSM, etc)
- Collage PVC : diamètre > 125 mm / selon usage



Pose des éléments tubulaires

Ces précautions sont-elles vraiment importantes ?

- Un exemple de tube posé, sans maintien en traction...



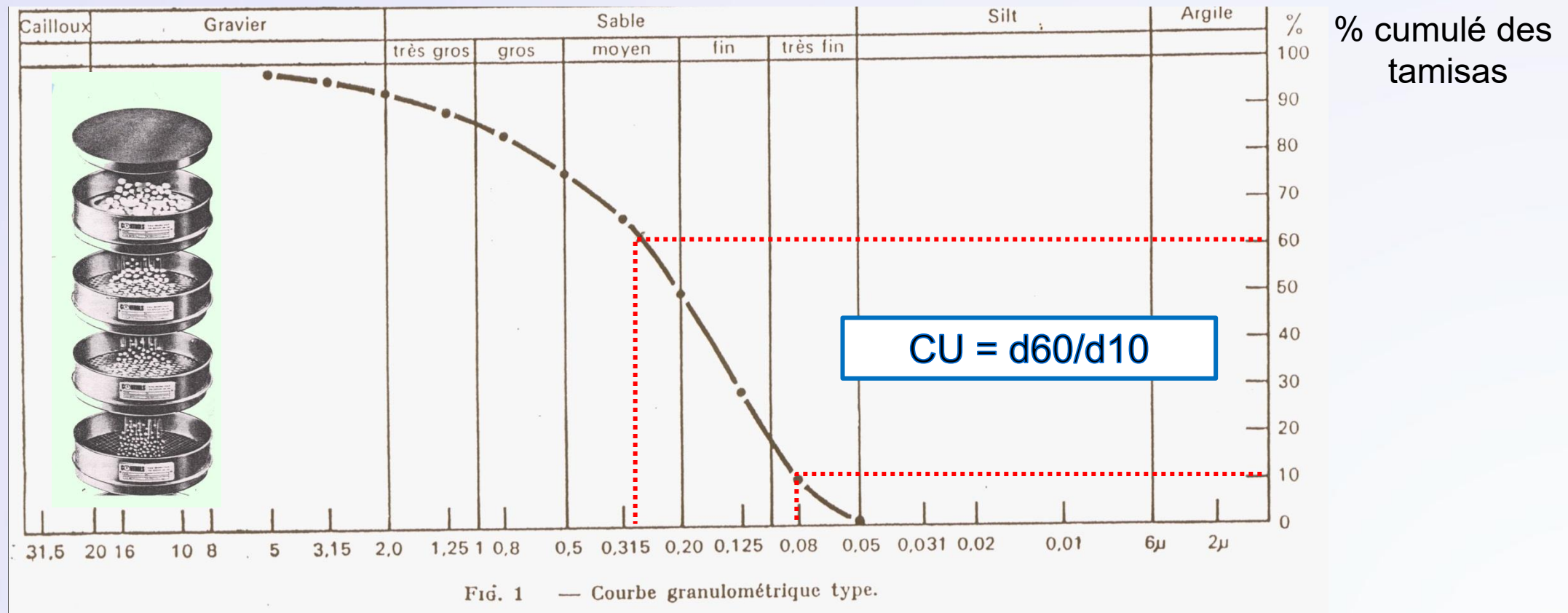
Forages d'eau

3. Equipements

3.2. Massif de gravier

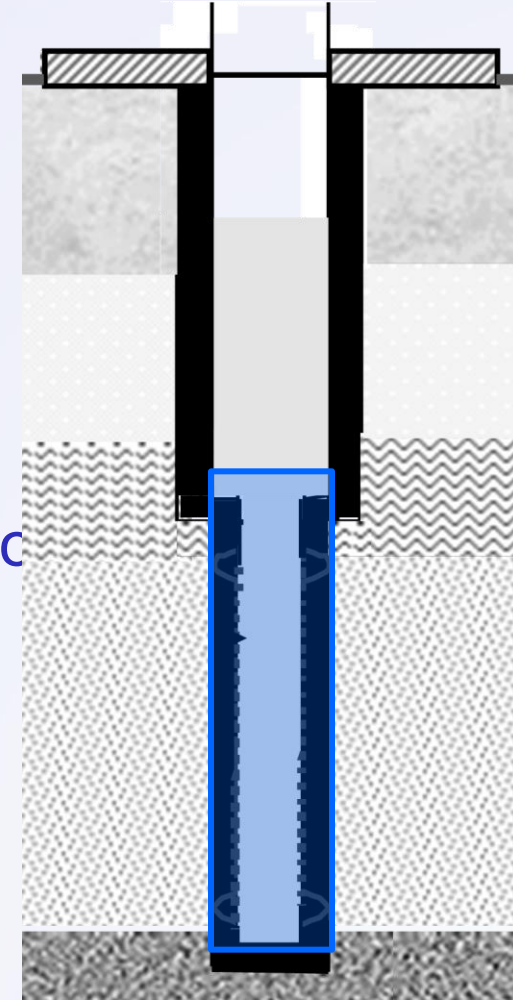
Rappel : caractérisation granulométrique

- Détermination de la **courbe granulométrique** de la formation à capter



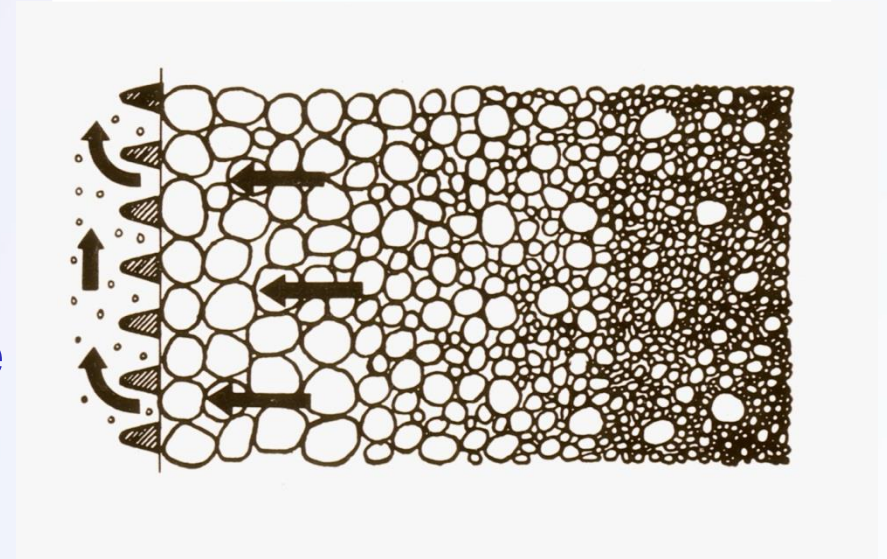
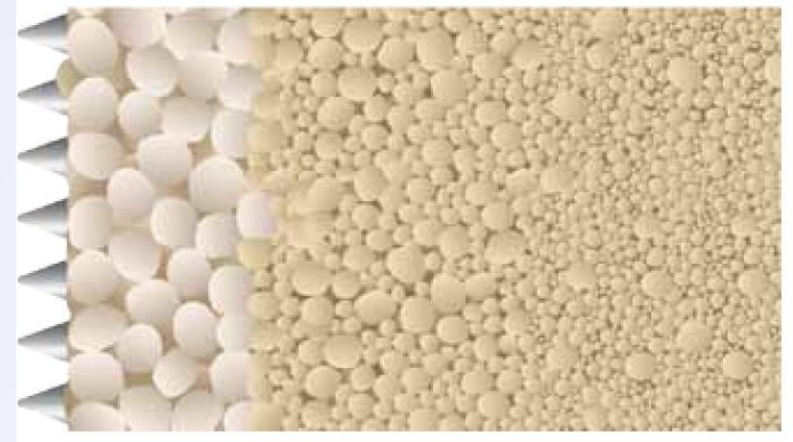
Fonctions du massif filtrant

- Maintien des terrains
- Isolation des nappes traversées
- Isolation de la surface
- Préservation des modalités d'exploitation
- **Pérennité de l'ouvrage**
- **Préservation des propriétés hydrauliques du réservoir**
- **Préservation de la qualité de l'eau captée**



Rôles du massif filtrant

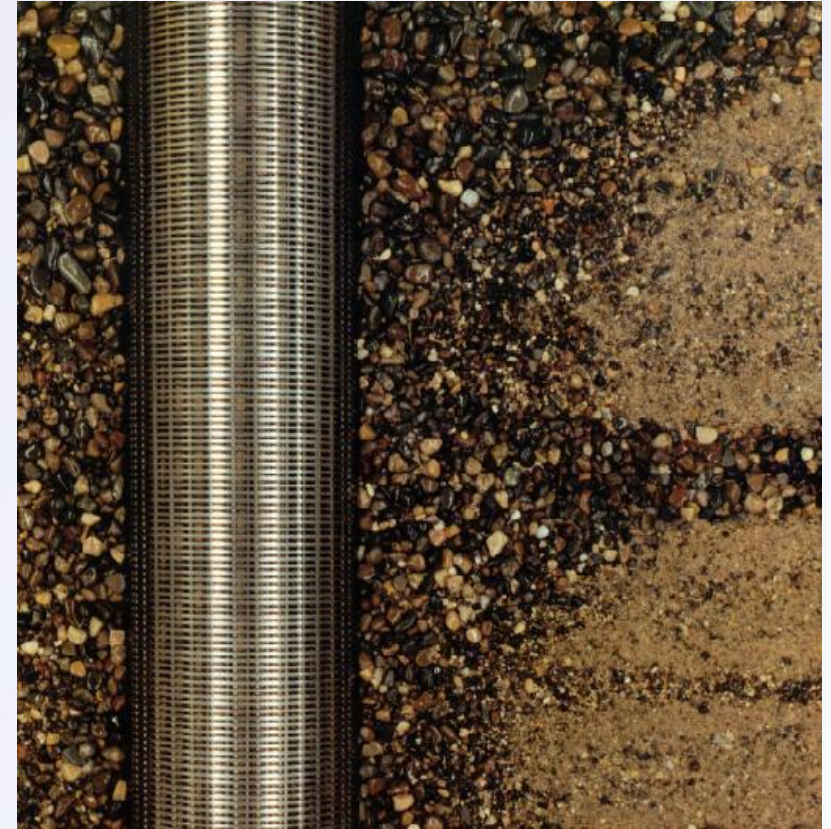
- Stabiliser la formation
 - Améliorer la perméabilité dans l'environnement immédiat du forage par (reduction des pertes de charge)
 - Permettre un choix de slot + élevé (réduit la vitesse d'entrée dans la crépine)
- => Augmenter productivité et longévité du forage



Massif de gravier ?

Pas systématique !

- Pas nécessaire si l'encaissant est consolidé et stable (milieu fissuré / karst)
- Forage autodéveloppé si granulométrie
 - Moyenne à grossière ($d_{10} > 0,25 \text{ mm}$) et
 - Hétérogène ($CU > 5$)
- Massif additionnel si :
 - Granulométrie fine et/ou uniforme
 - Ouvrage mono-diamètre
 - Granulométrie inconnue



Autodéveloppement :
Slot retient 40 à 50 % de la formation

Massif filtrant additionnel

Principe

- Le slot retient $\geq 90\%$ du massif filtrant ou plus
- Le gravier doit être :
 - Propre
 - Rond et uniforme pour réduire les pertes de charge
 - Siliceux ($>90\%$) pour limiter les risques de dissolution

EXEMPLE

Sables du Plio-Quaternaire, secteur Bassin d'Arcachon.

Sables roulés, lavés, séchés, calibrés.

Granulométries disponibles :

0,3-0,6 mm

0,8-1,4 mm

1,0-2,5 mm

2,0-4,0 mm

4,0-8,0 mm

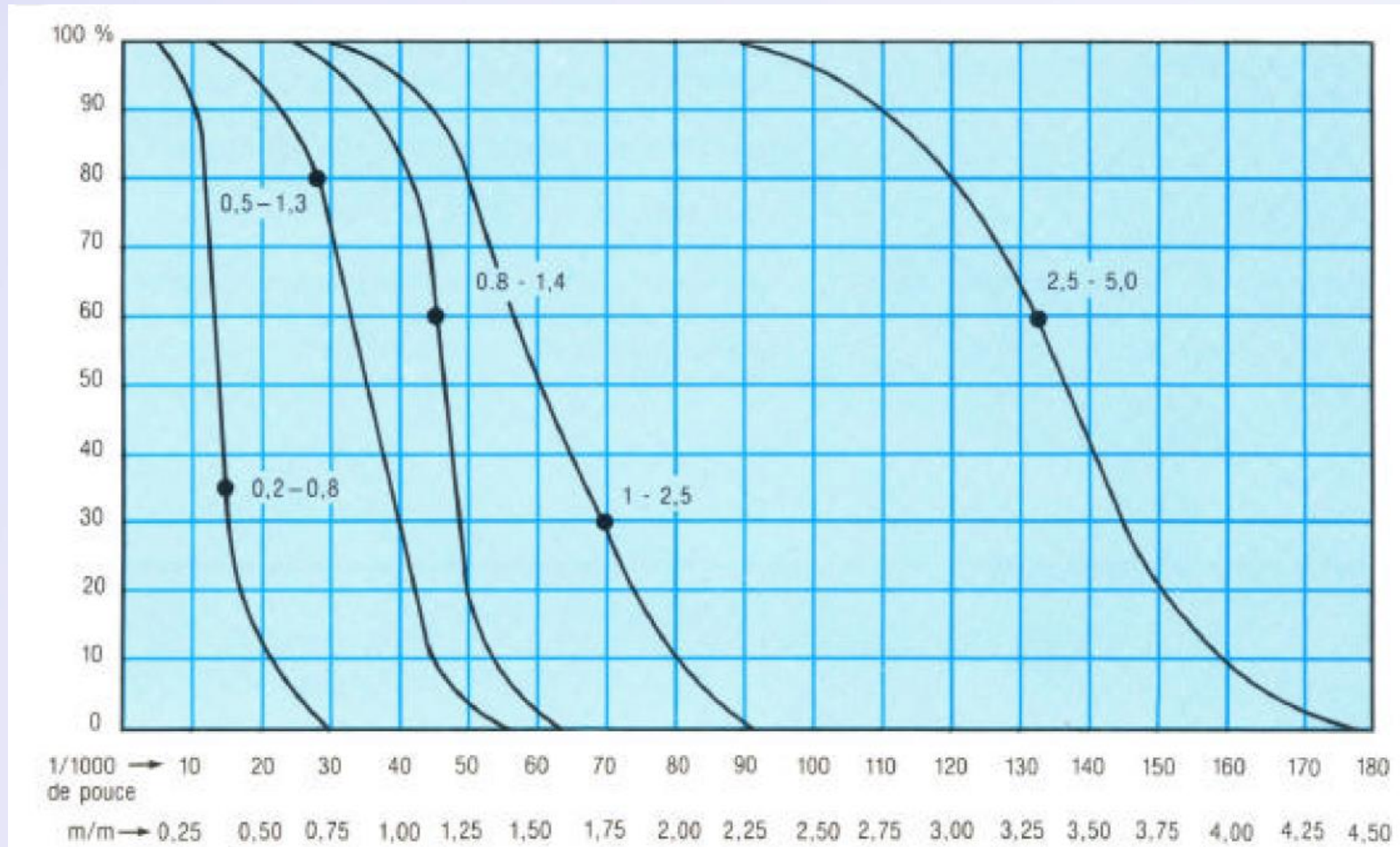
Conditionnements : sac 25kg et bigbag de 1500kg



Source : GWE France

Source : Promafor-Sovema

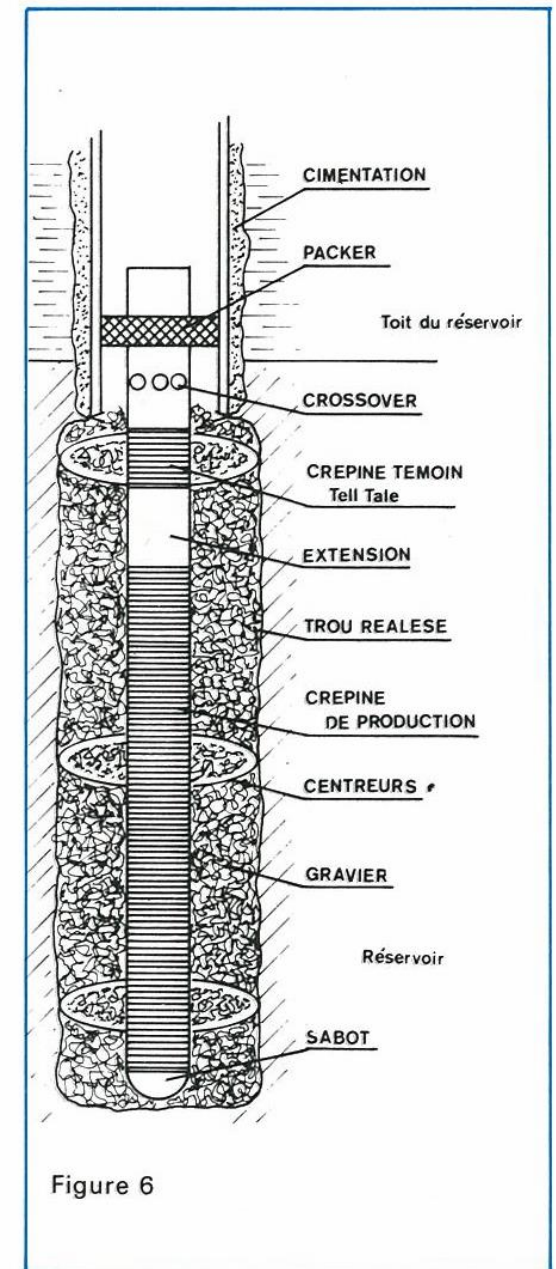
Exemple de granulométries courantes



Mise en place du massif additionnel

Les principes

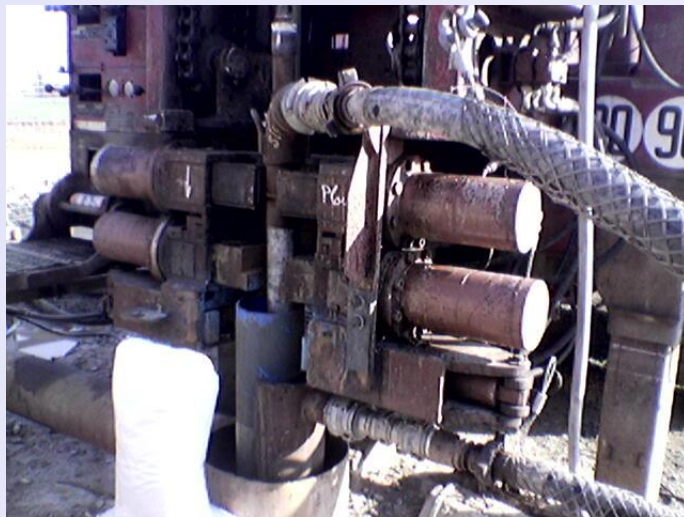
- Pas obligatoire
- Conditions initiales :
 - Crépines descendues librement (éviter les contacts avec la formation)
 - Crépines suspendues et centrées
 - Espace annulaire compris entre 2'' et 4'' pour forages de production
- Contrôles durant la mise en oeuvre :
 - Pression
 - Volume
 - Position
- Eviter la formation des ponts
 - Circulation durant la mise en oeuvre
 - Développement impératif
- Prévoir une reserve : 10-20% au-dessus du sommet crépine



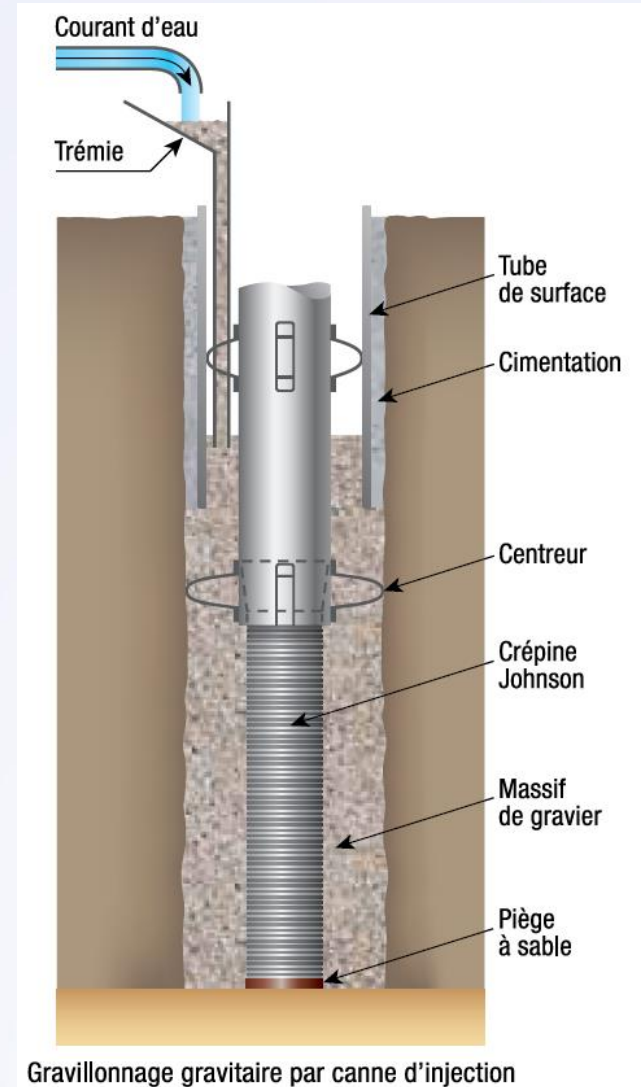
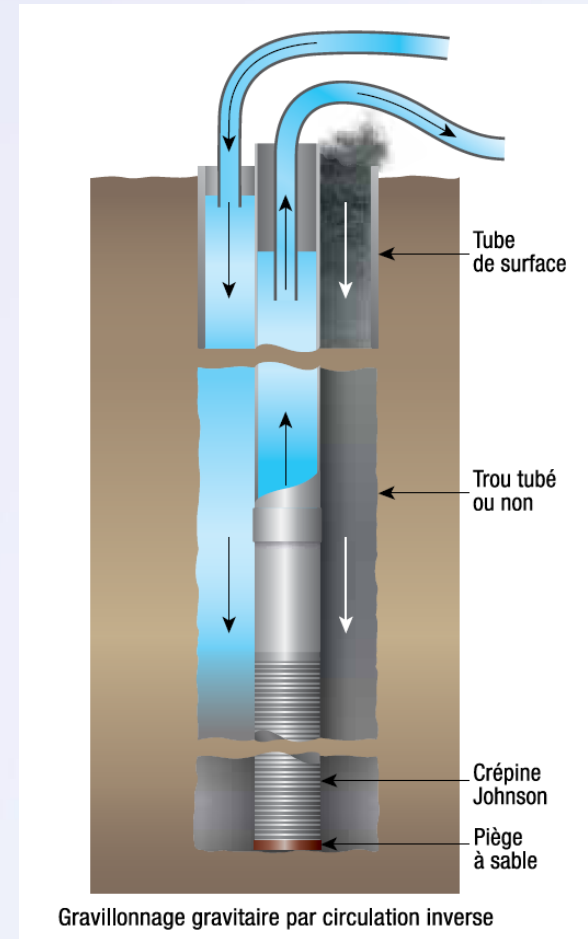
Mise en place du massif additionnel

Pour des profondeurs de quelques dizaines de mètres

- Injection directe par l'annulaire
 - Trou ouvert
 - Versement gravitaire progressif
 - Circulation inverse continue
 - Surveillance top gravier continue
- Mise en œuvre la plus facile... mais prendre son temps !!!!



© J. BARRIERE

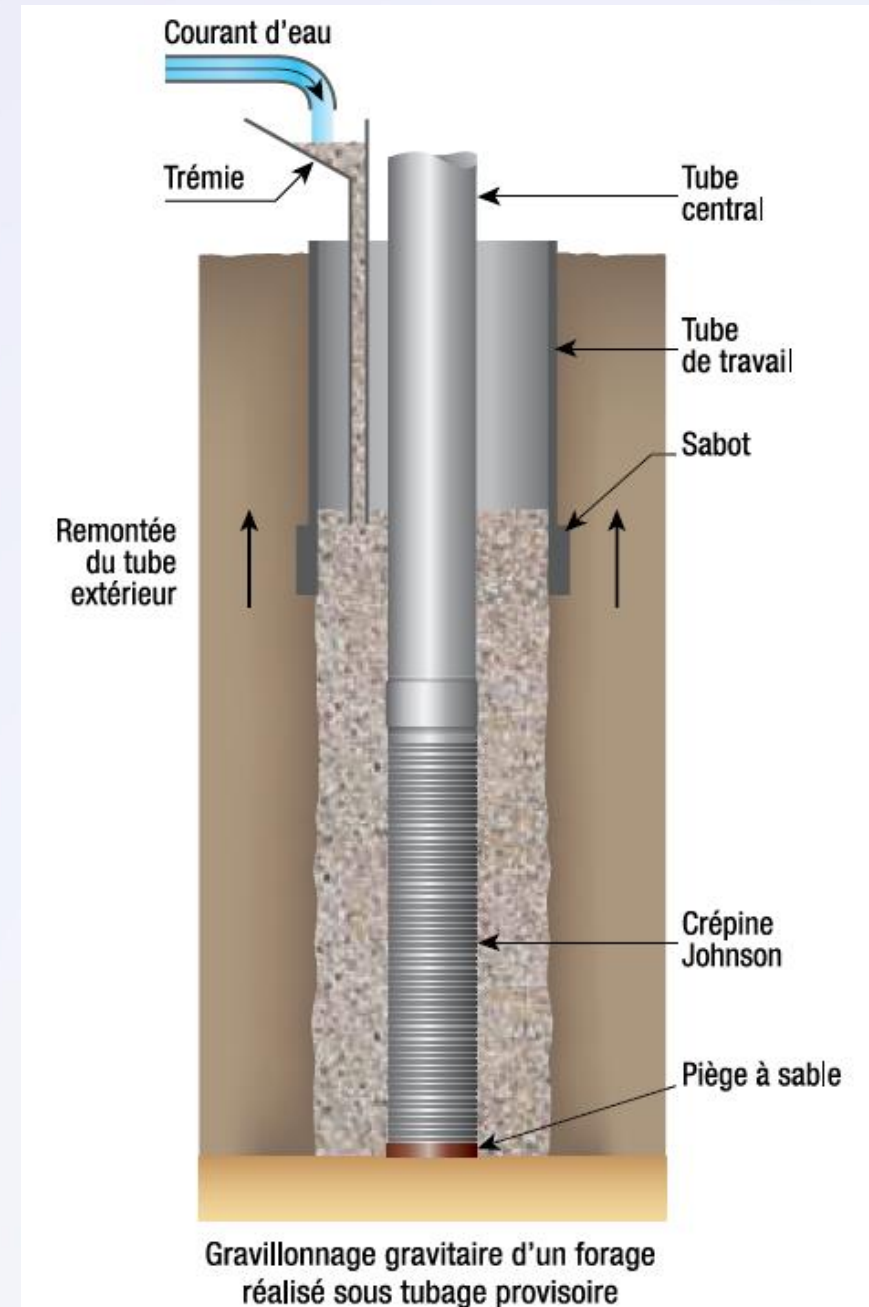


Mise en place du massif additionnel

Cas de forages tubés à l'avancement

Gravillonnage + retrait des tubes synchrone

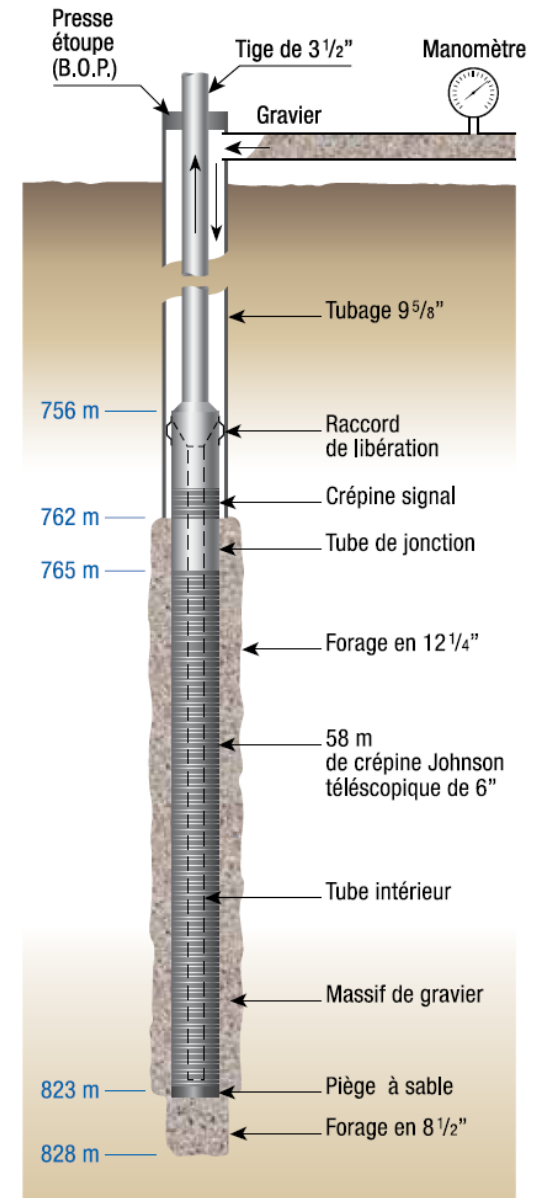
Vigilance sur le frottement appliqué sur le tube de travail (difficultés de remontée)



Mise en place du massif additionnel

Gravillonnage sous pression – plusieurs méthodes

- Forage sous pression :
 - Tête fermée étanche autour des tiges
 - Injection gravier + boue par l'annulaire
- Vigilance :
 - Surpression lorsque le gravier atteint le sommet des crépines
 - Risque d'écrasement
 - Importance de l'insertion d'une « crépine signal » au-dessus, et de suivre la pression en continu durant l'injection
 - Atteinte de la crépine-signal visible sur le suivi (2^e augmentation de pression) = Arrêt d'injection

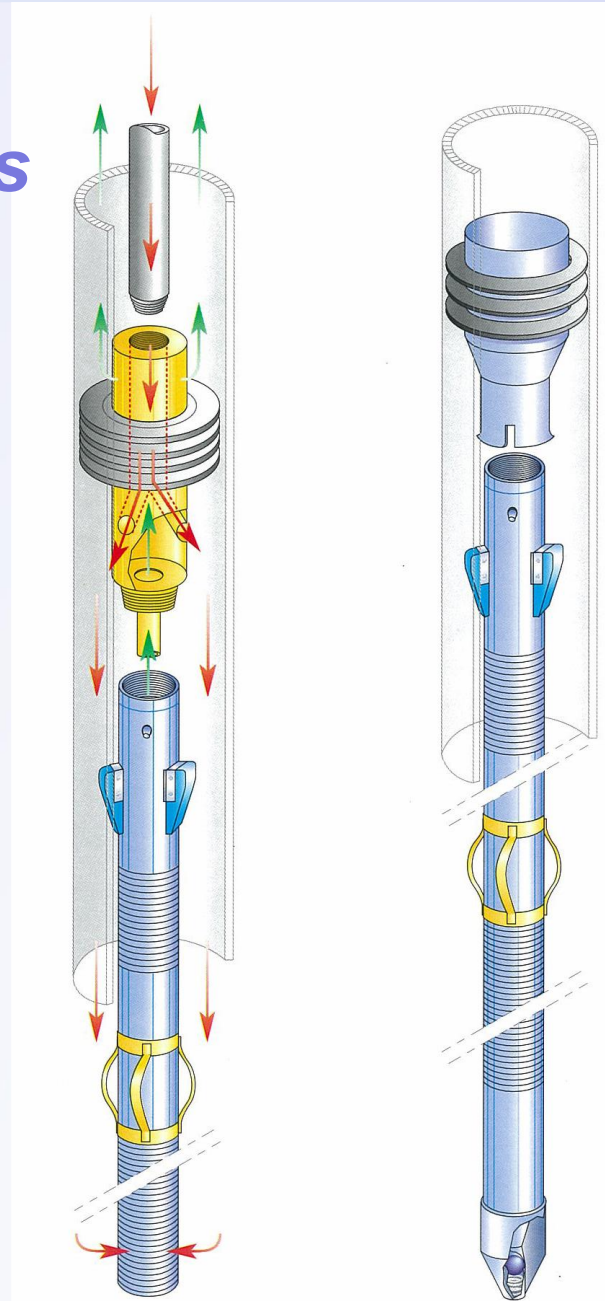
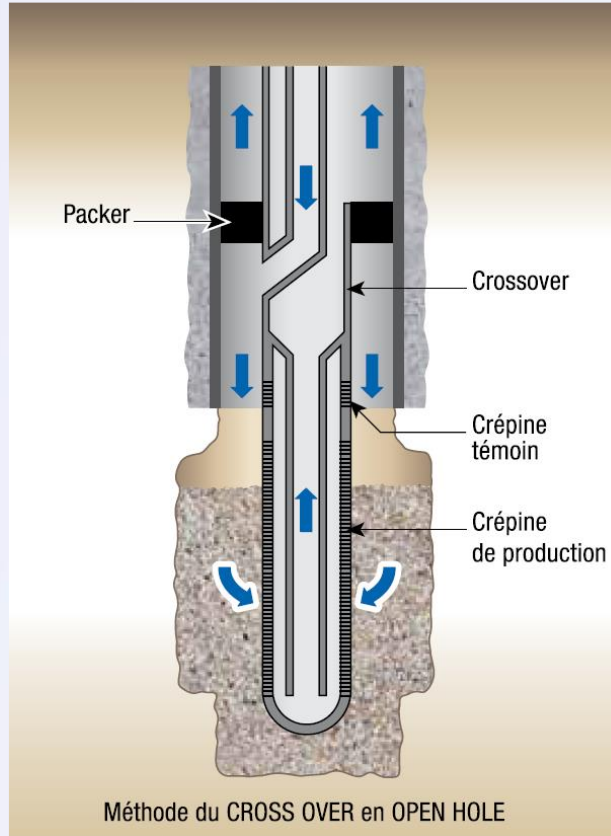


Exemple d'un forage profond avec colonne de captage suspendue aux tiges

Mise en place du massif additionnel

Gravillonnage sous pression – plusieurs méthodes

- Cross-over tool
 - Gravier injecté par les tiges
 - Outil de distribution connecté au sommet de la colonne captante
 - Vigilance sur le suivi de pression (idem cas précédent)
- Mise en place d'un cône + obturateur au sommet des crépines après opération



Source : Johnson Screens

Dimensionnement du massif additionnel

Multiples formules / méthodes disponibles

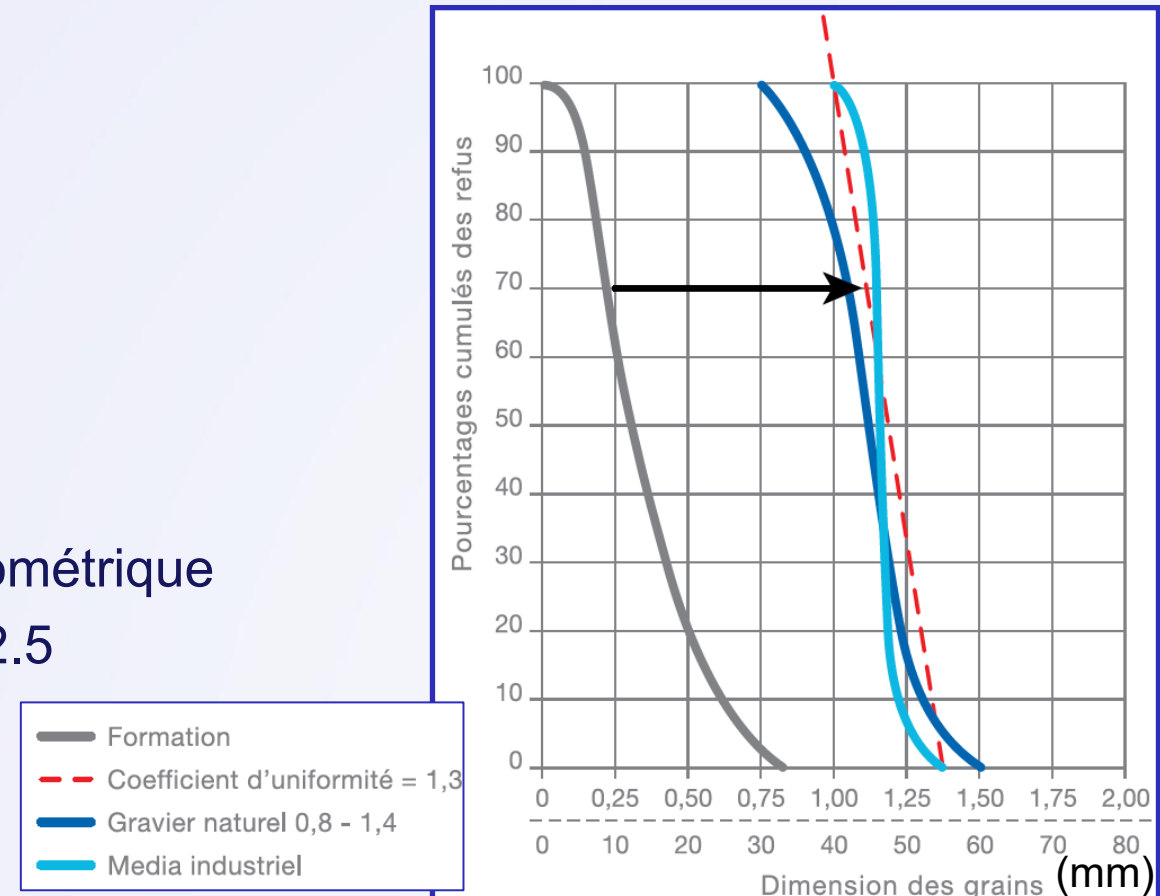
- Formule de Allen Hazen : granulométrie du gravier comprise entre :

- $D_0 = 7 d_{10}$
- $D_{100} = 2 D_0$

- Méthodes graphiques
Ex : procédé Johnson

- $D_{30} \text{ gravier} = K \times (d_{30} \text{ formation})$
(ou $D_{70} = K d_{70}$ sur les refus; cf fig)
- $K = 4$ (minimum) pour sable fin et uniforme.
 $K = 6$ (maximum) pour sable grossier et hétérométrique
- Coef d'uniformité du massif de gravier : $2 < U < 2.5$

(+ autres méthodes dans la littérature)



Dimensionnement du massif additionnel

Proposition de norme européenne (en cours...)

- $d_g = d_x \cdot F_x \pm C$

avec

- d_g = diamètre minimum et maximum du massif de gravier
- d_x = diamètre effectif caractérisant l'aquifère (d_{30})
- F_x = Coefficient de filtre (min et max)
- C = Correction pour des sables très hétérogènes ($C = f(Cu)$)

Massifs filtrants pour autres ouvrages

Autres méthodes / documents-guides

Pour les ouvrages destinés à tester les sols dans les études géotechniques par essai de pompage, la norme NFP94-130 préconise:

Dans les « sols granulaires »

$$5d_{15} \text{ sol} \leq d_{15} \text{ filtre} \leq 5d_{85} \text{ sol}$$

(d_n sur le tamisat)

Pour les autres types de matériau, le massif de gravier (d, D) est choisi de sorte que

$$2 \text{ mm} \leq d \leq 3 \text{ mm} \text{ et } 5 \text{ mm} \leq D \leq 8 \text{ mm}$$

L'ouverture de la crépine doit être comprise entre

$$0,5d_{85} \text{ filtre et } d_{85} \text{ filtre}$$

Forages d'eau

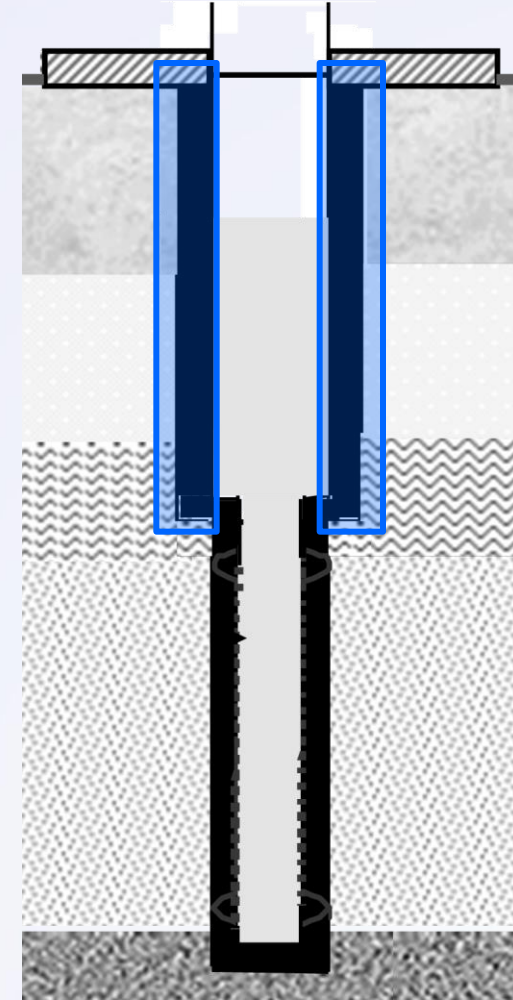
3. Equipements

3.3. Cimentation

Fonctions de la cimentation

- Maintien des terrains
- Isolation des nappes traversées
- Isolation de la surface
- Préservation des modalités d'exploitation
- **Pérennité des matériaux**
- Préservation des propriétés hydrauliques du réservoir
- Préservation de la qualité de l'eau captée

Photo A. Gutierrez



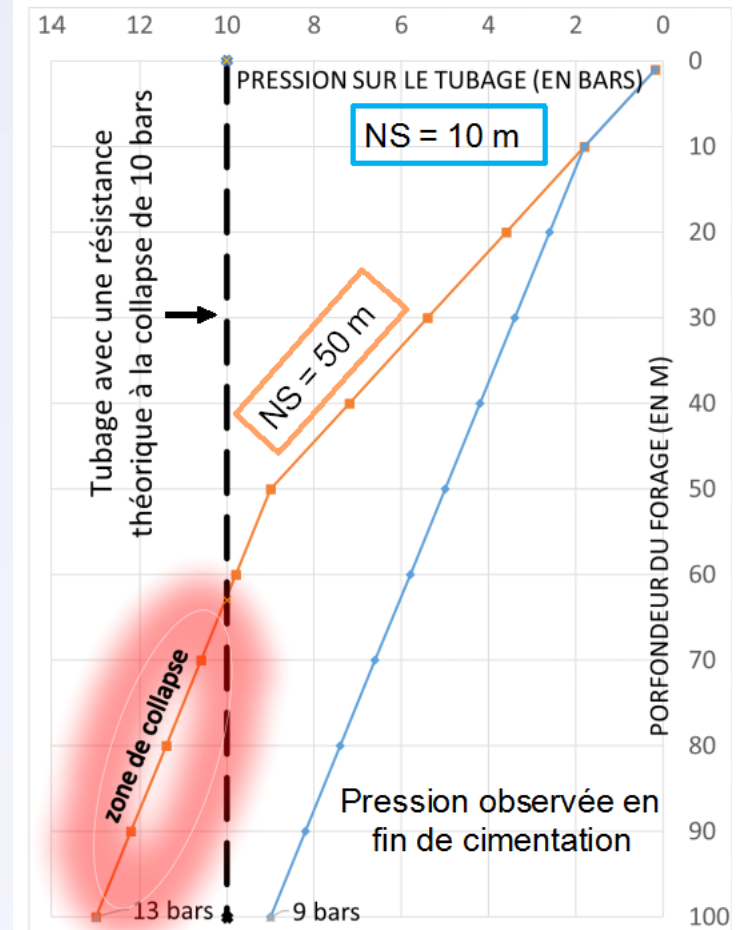
Cimentation

Les principes

- Condition initiale : trou vertical et rectiligne
 - contrôle du poids sur l'outil
 - forer avec stabilisateurs
 - rectifier avec aléueur
- Choix du tube (résistance au collapse).
 - PVC déconseillé en forage profond (collapse faible et cimentation chauffe => diminue la résistance)
 - Cimentation en plusieurs passes (éviter si possible)
 - Tube stocké correctement / protégé
- Cimentation sous pression (injection par le bas)



Tube PVC déformé par la cimentation



Cimentation

Le choix du laitier

- Principe usuel en France pour les forages de production :
 - Eau + ciment, pas de mortier
 - Ciment prise mer si eaux sulfatées / salées
 - Additifs possibles (avec précautions !...)
 - ✓ Argile / bentonite pour alléger (3% de bentonite → $d=1.5$)
 - ✓ Accélérateur de prise – non recommandé
- Densité usuelle : autour de 1,8
(proportion: 2/3 de ciment; 1/3 d'eau)
- Pratiques non homogènes :
 - Fortes proportions d'argile pour piézos (cf géotechnique) : moindre résistance mécanique mais soumis à moins de contraintes
 - A échelle internationale (cf Norme européenne en cours) : le scellement avec des argiles est considéré suffisant / satisfaisant dans certains pays (meilleure plasticité)

Fabrication du laitier

Modalités selon quantités

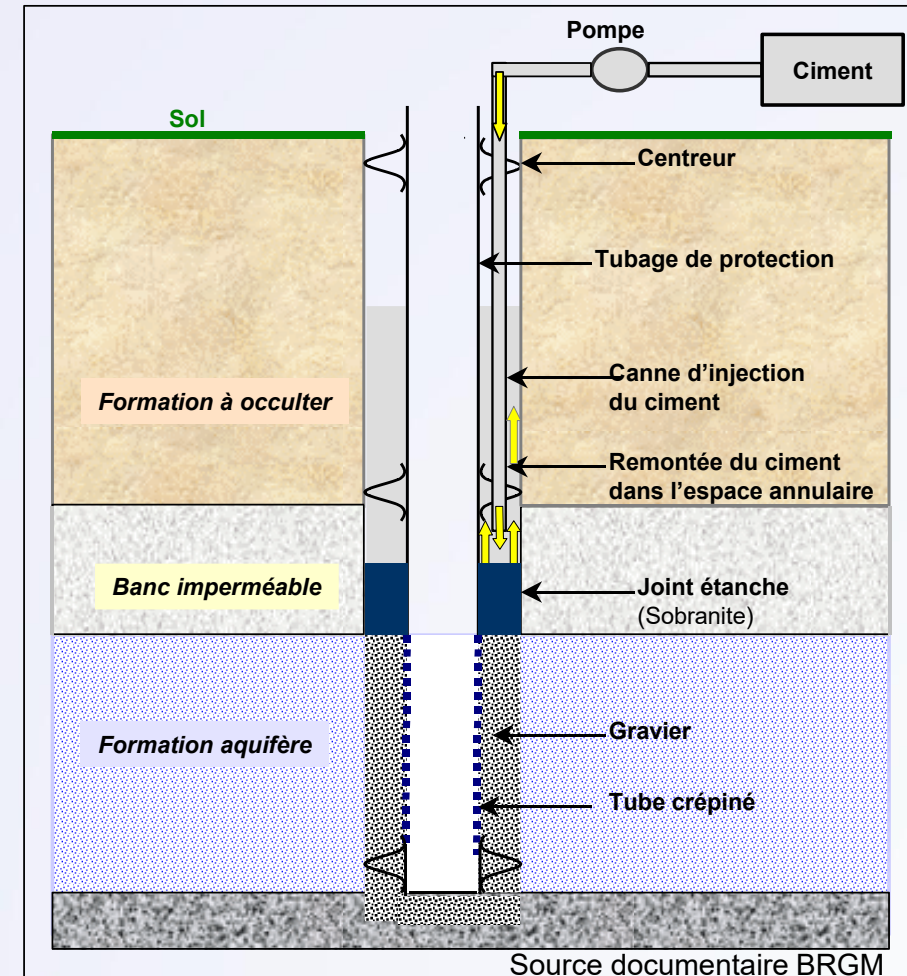
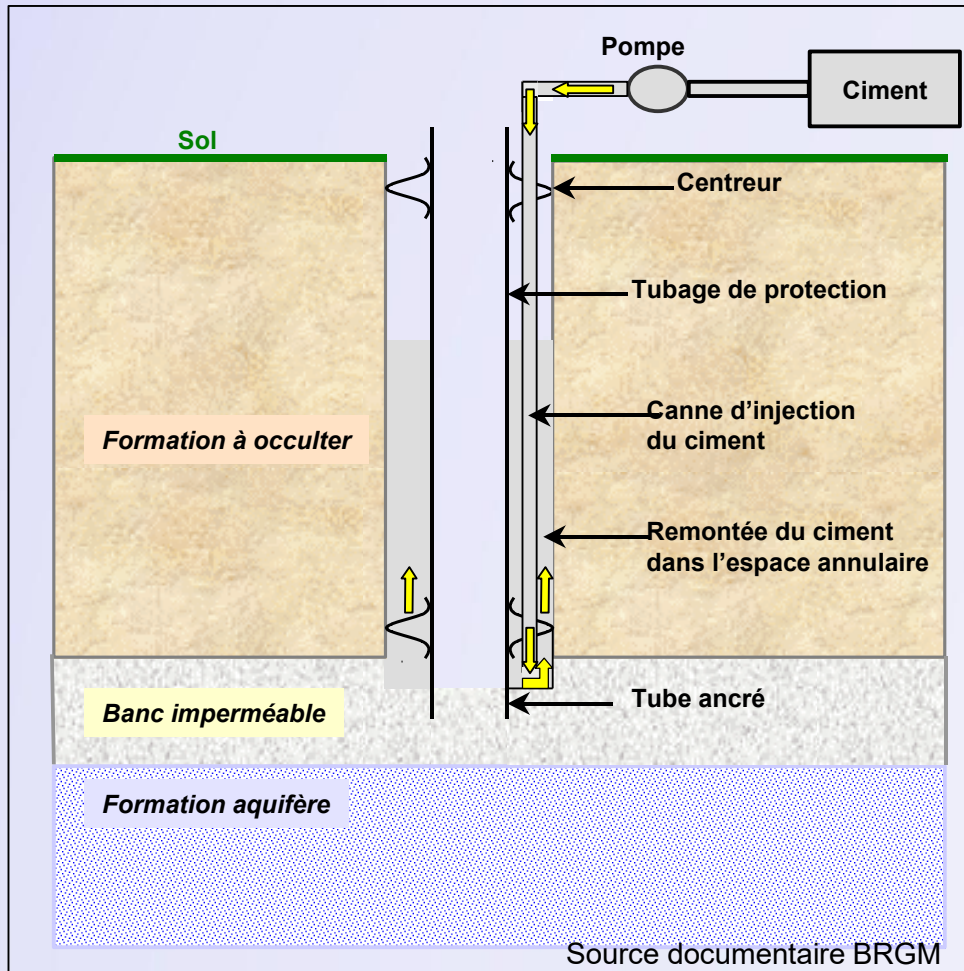
- Par unité de cimentation :
petits volumes 2-3 m³
- Par toupie (8-10 m³) :
facile à trouver, prix attractif
mais risque de prise avant la fin de l'injection (trajet), qualité
moyenne, risque de résidus de gravier, adjuvants limités
- Par société de services (rare) :
coûteux mais fiable



Méthodes de cimentation

Cimentation par cannes dans l'annulaire

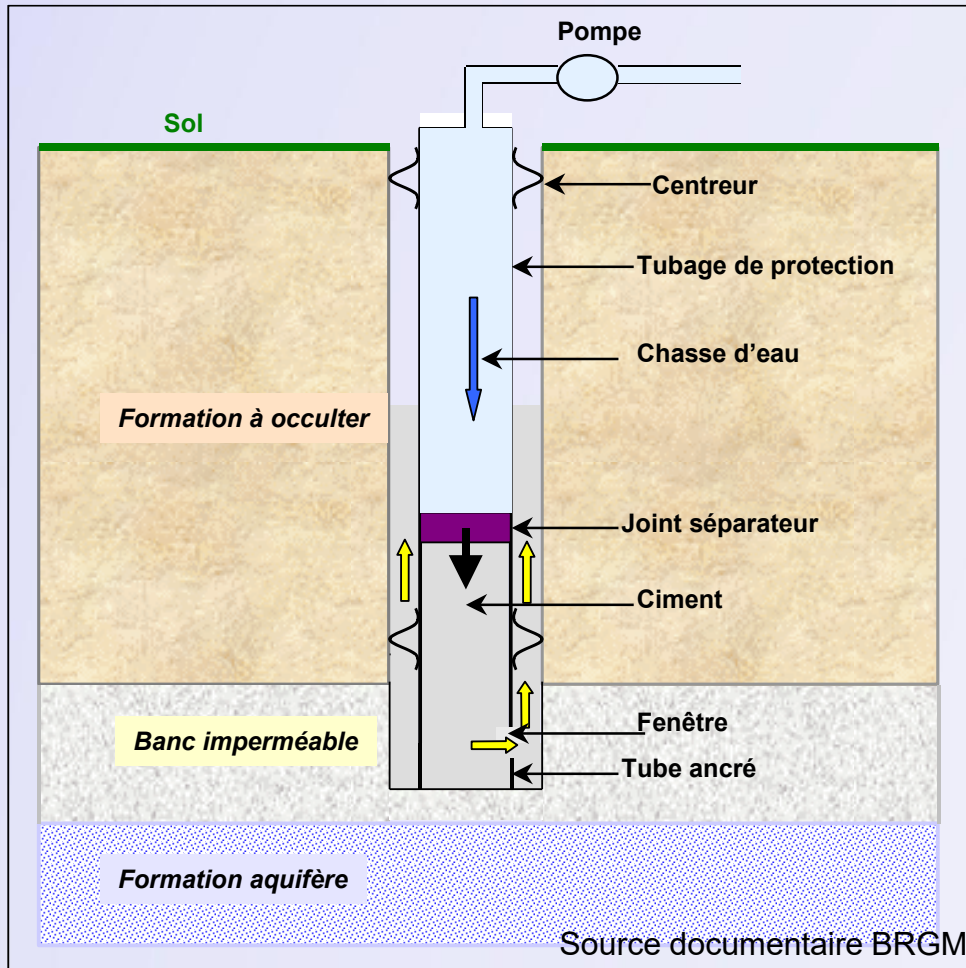
- Injection par des cannes descendues à la base de l'annulaire



Méthodes de cimentation

Cimentation par tube ancré

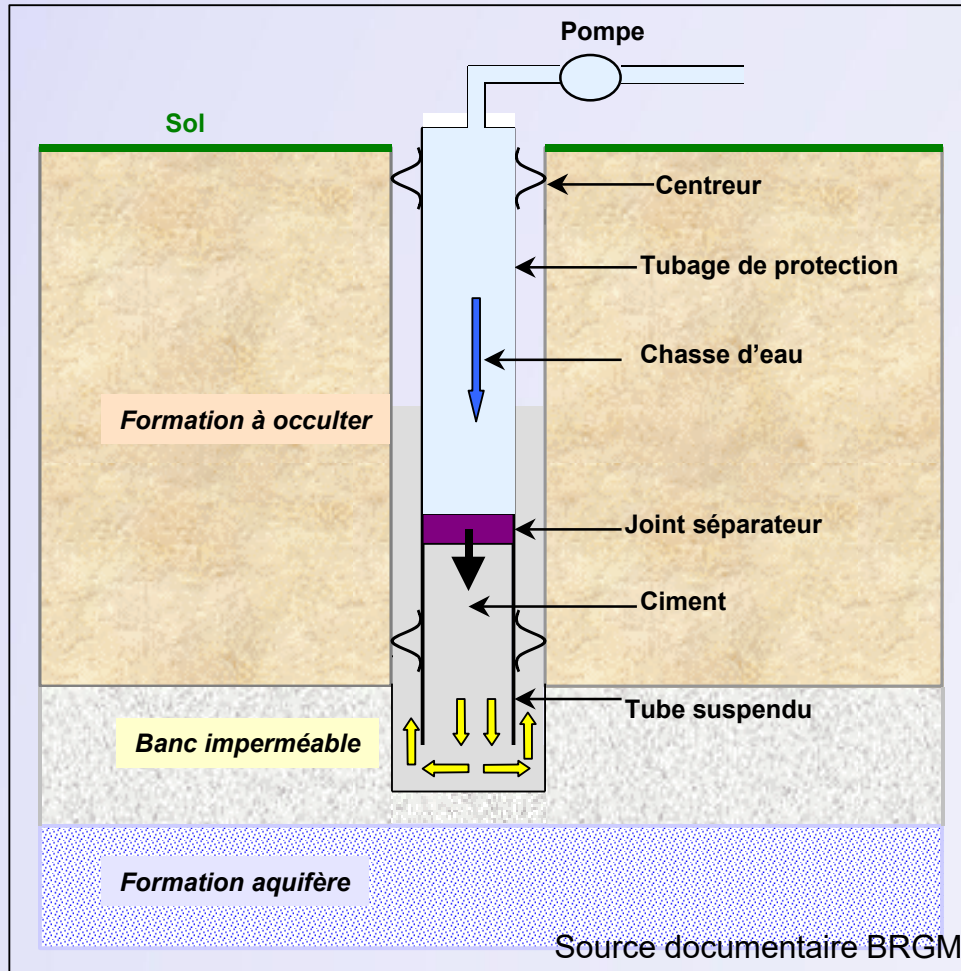
- Injection dans le tube, poussé par un joint



Méthodes de cimentation

Cimentation par tube suspendu

- Injection dans le tube, poussé par un joint

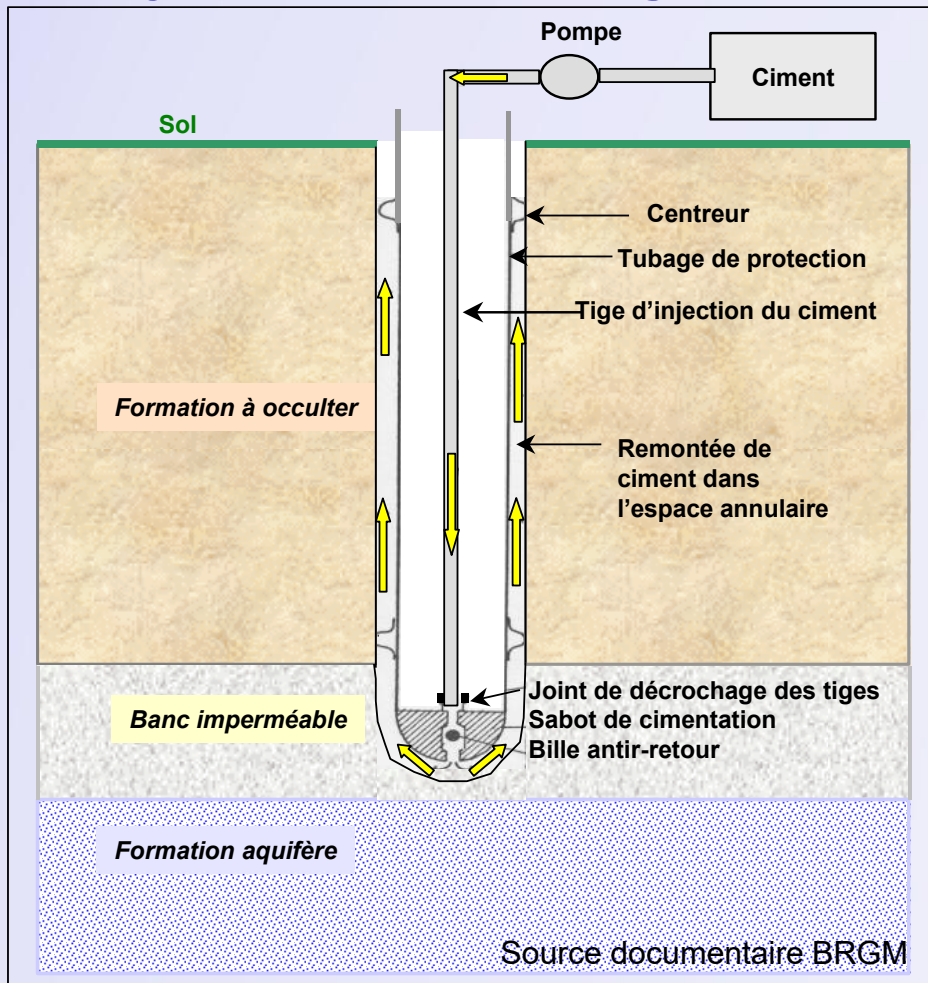


Joint
"Plug"

Méthodes de cimentation

Cimentation par les tiges

- Injection par stinger à travers le sabot (base du tube)



Sabot

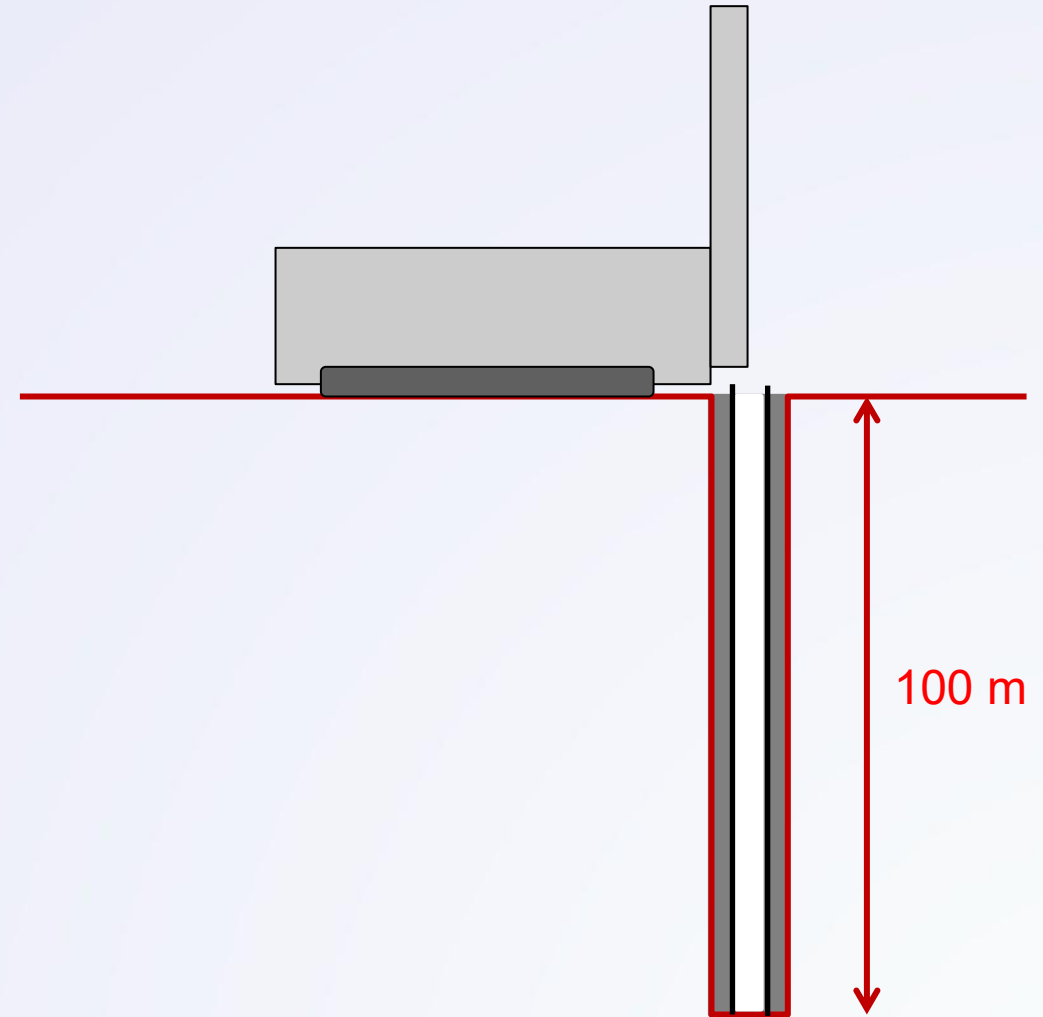
Précautions de mise en œuvre

La cimentation est une phase critique

- Chasse :
 - A l'eau claire ou à la boue (nettoyer les tiges et/ou pousser le bouchon)
 - Calcul du volume précis (pas d'injection d'eau derrière le tubage)
- Temps de prise: 48h minimum
- Complément (par canne dans l'annulaire) nécessaire quand le coulis n'est pas remonté au jour (pertes, tassement)
- Contrôles préconisés :
 - Mise en pression du tube (ex : 10 bars pendant 1 heure) sans chute
 - Profil de température
 - Diagraphies (cf chapitres suivants)

Exercice 6

- **Projet :**
 - Tubage + cimentation
 - Cimentation par tube ancré
 - Hauteur : 100 m
 - Diamètre forage : 12"1/4 pouces
 - Diamètre tubage : 204-225 mm (8" int)
- **Quels volumes ?**
 - Ciment
 - Chasse



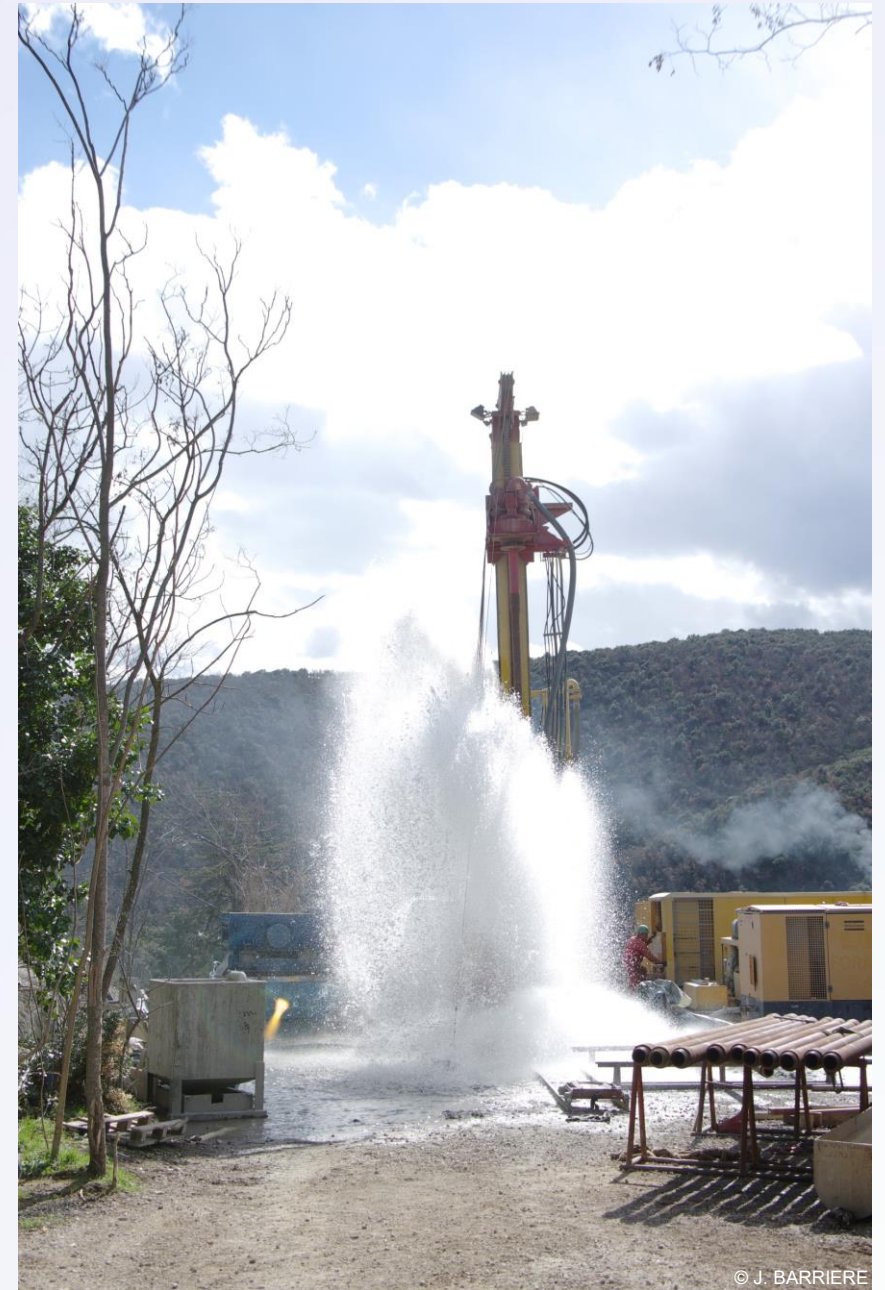
Forages d'eau

4. Finalisation

4.1. Développement

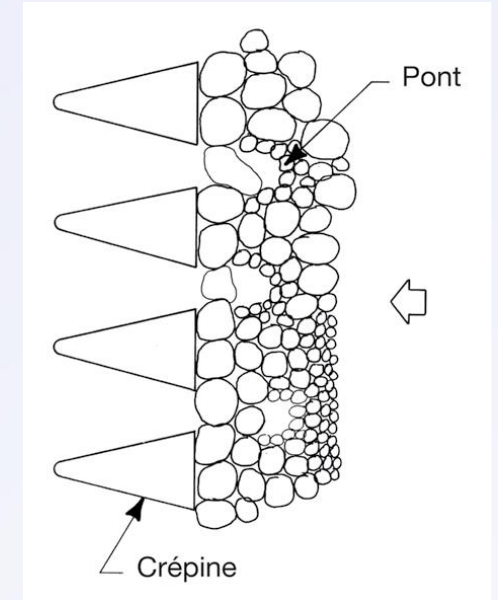
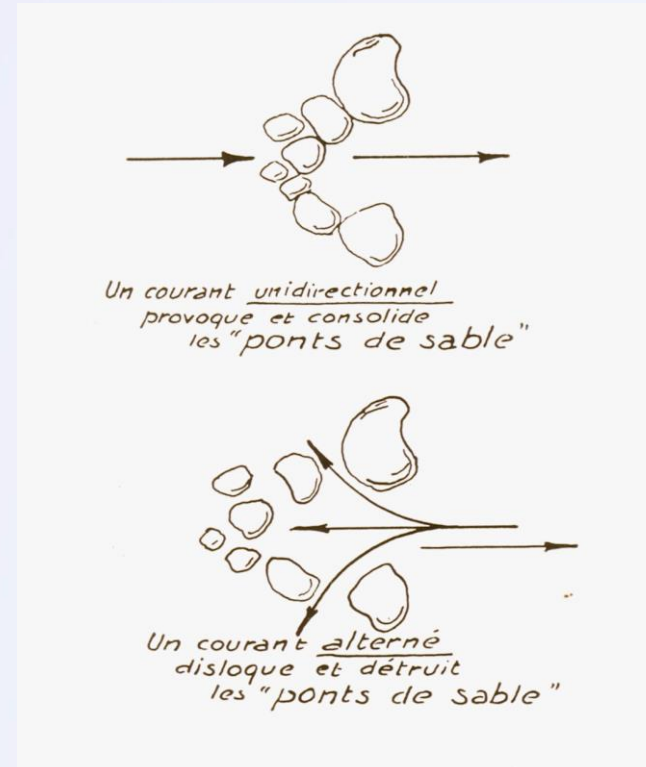
Principe du développement

- Compenser le dommage aux formations lié au forage
- Restaurer (voire améliorer) les propriétés hydrauliques de la formation
- Mécanique et/ou chimique
- Impératif, mais trop souvent négligé (coût, temps)
- A adapter à la finalité du forage : prélèvement ou surveillance



Surpompage et pompage alterné

- Surpompage : $Q_{\text{développement}} > Q_{\text{exploitation prévisionnel}}$
- Pompage alterné : idem + arrêts / redémarrages
- Approche progressive nécessaire
- Risque d'endommagement :
 - matériel de pompage
 - massif filtrant si écoulements turbulents
- Limites :
 - Rabattement dans l'ouvrage
 - Surpompage seul ne détruit pas les ponts
 - Vigilance dans sables fins



Air-lift (« émulseur »)

○ Principe :

- Double tube (ligne d'air et ligne d'eau)
- Plusieurs configurations possibles (ligne d'air intérieure / extérieure)
- Injection d'air au-dessus de la base de la ligne d'eau
- /!\ différent du soufflage (à proscrire)

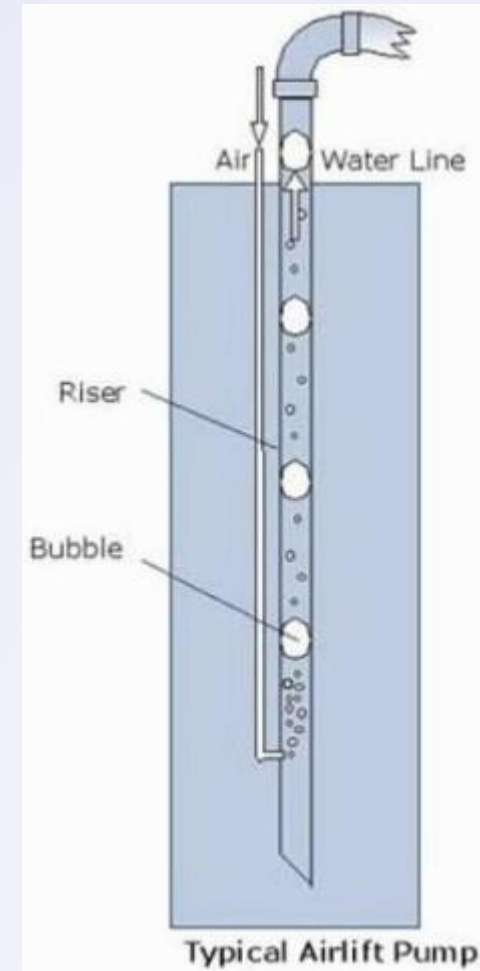
○ Avantages:

- Pas d'usure du matériel
- Possibilité de curage du fond d'ouvrage

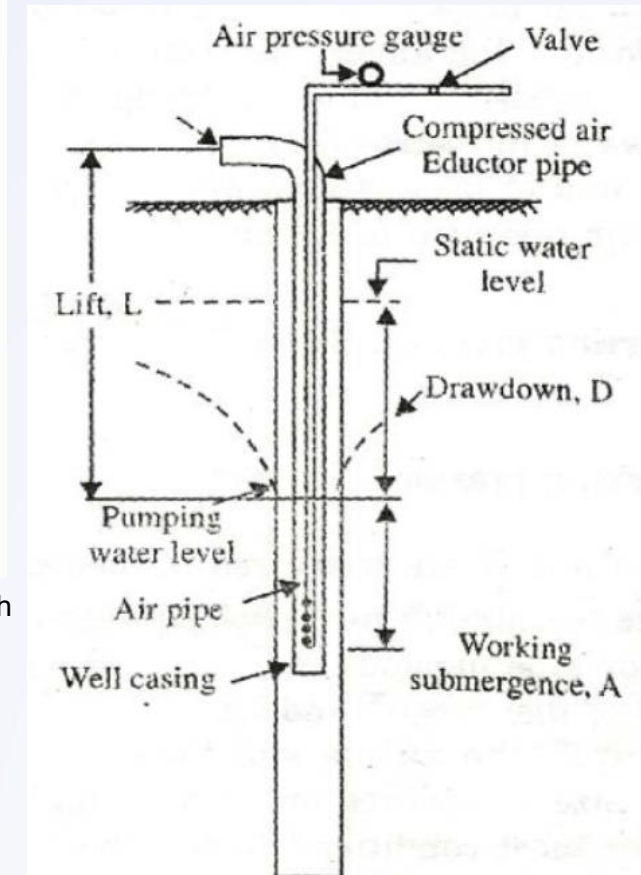
○ Limite :

- Profondeur d'immersion (abaques)
- Débit d'air du compresseur

○ Vigilance : débit observé pas nécessairement représentatif



Source : Balai Air Tanah



Air-lift (« émulseur »)

- Risques :
 - piégeage d'air (injection d'air trop basse)
 - oxydation des crépines (injection d'air trop basse)
 - risque d'écrasement des tubes / crépines (démarrage trop violent)

Tous ces risques sont associés à une mauvaise mise en œuvre



Pistonnage (swabbing)

- Action mécanique :
translation → variations hydrauliques
- Possibilité d'action conjointe :
 - Traitement chimique
 - Air-lift
 - Injection sous pression



Source : Water Well Aid



Jetting

- Jet horizontal sous pression
- Conjoint avec :
 - Traitement chimique (défloculants)
 - Air-lift
- Vigilance : verticalité du trou



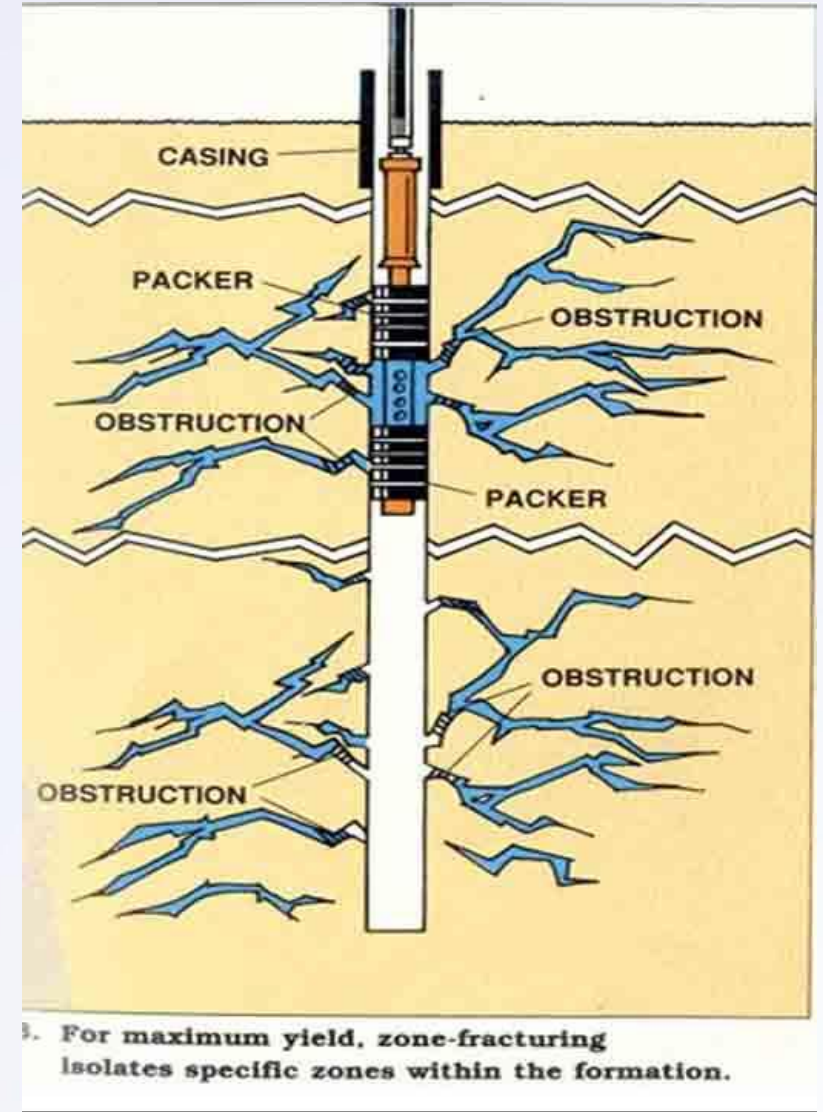
Source : Etschel Brunnenservices



Source : Hydro Resources

Cracking / fracturation

- Spécifique environnements fissurés / fracturés
- Nécessite :
 - Compétences / expérience
 - Précautions de sécurité
 - Cimentation fiable
 - Tête de forage fiable
- Modalités possibles :
 - Fracturation hydraulique : mise en pression sous packer (+ manomètre) > 140 bars.
 - Fracturation à l'explosif : charges au droit de zones ciblées



Source : TamilNadu Water Supply and Drainage Board

Acidification

- Aquifère carbonaté fissuré / fracturé / karstifié
- Impératifs techniques :
 - Acide chlorhydrique dilué à 15%, éventuellement 32%
 - Validation préalable de l'intégrité du forage
 - Injection en profondeur sur les zones cibles
 - Chasse à l'eau pure (+ pistonnage)
 - Temps de contact limité à quelques heures
- Vigilance :
 - 1 t. HCl à 15% dissout $\approx$ 500 kg de carbonates
→ Approche progressive souhaitable
 - Protection des personnes, du milieu naturel
 - Dégazages / éruptions
 - Attaque métaux + ciment
 - Rejets : neutralisation, décantation



Autres développements chimiques

- Polyphosphates :
 - Elimination de la boue de forage ou colmatage argileux.
 - Injection par jetting après 24h de contact.
- Chaque fournisseur a ses produits...



Phasage du développement

Adapter le prévisionnel à la réalité des observations...

- Difficile à anticiper :
 - Recherche préalable de similitudes / expérience locale
 - Approche progressive (commencer par méthodes « douces »)
- Nécessaire de combiner plusieurs méthodes
 - Exemple : forage à la boue dans des sables :

Objectif	Méthode
Evacuer la boue sans écraser la crépine	Circulation à l'eau et air-lift léger
Détruire la boue	Traitement chimique, scarification avant pose des crépines
Tasser le massif de gravier	pistonnage lent
Eliminer les fines	Pompage ou air lift alterné
Retirer le remblai en fond de forage	curage, soufflage si tube de décantation suffisant.

- Contrôle / évaluation du développement :
 - Incontournable à chaque phase
 - 2 critères majeurs : Débit spécifique + Turbidité / matières en suspension

Forages d'eau

4. Finalisation

4.2. Pompages d'essai

Pompages d'essai

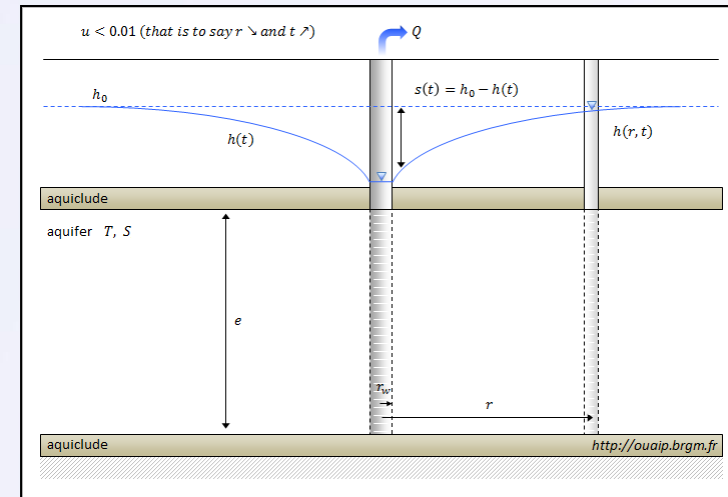
Partie intégrante des travaux

© BRGM

- Plusieurs objectifs :
 - Vérifier les capacités de production / réinjection des forages
 - Evaluer l'influence du prélèvement sur la ressource et les ouvrages voisins
 - Valider la qualité de la ressource



© BRGM



Pompages d'essai

Vigilance sur les exigences de mise en œuvre

© BRGM

- Paramètres à mesurer :
 - Niveaux piézométriques : où ?
 - Débit
 - Qualité :
 - ✓ turbidité,
 - ✓ température
 - ✓ conductivité
 - ✓ autre ? suivi géochimique, indicateurs anthropiques...
- Modalités de mesure :
 - Manuelle, automatique
 - Fréquence de mesure
 - Avant et après pompage : durée à fixer
 - Ne pas négliger les observations visuelles

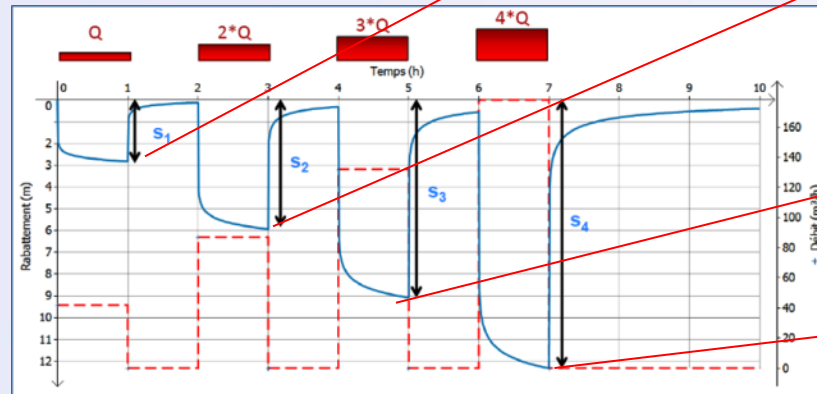


© J. BARRIERE

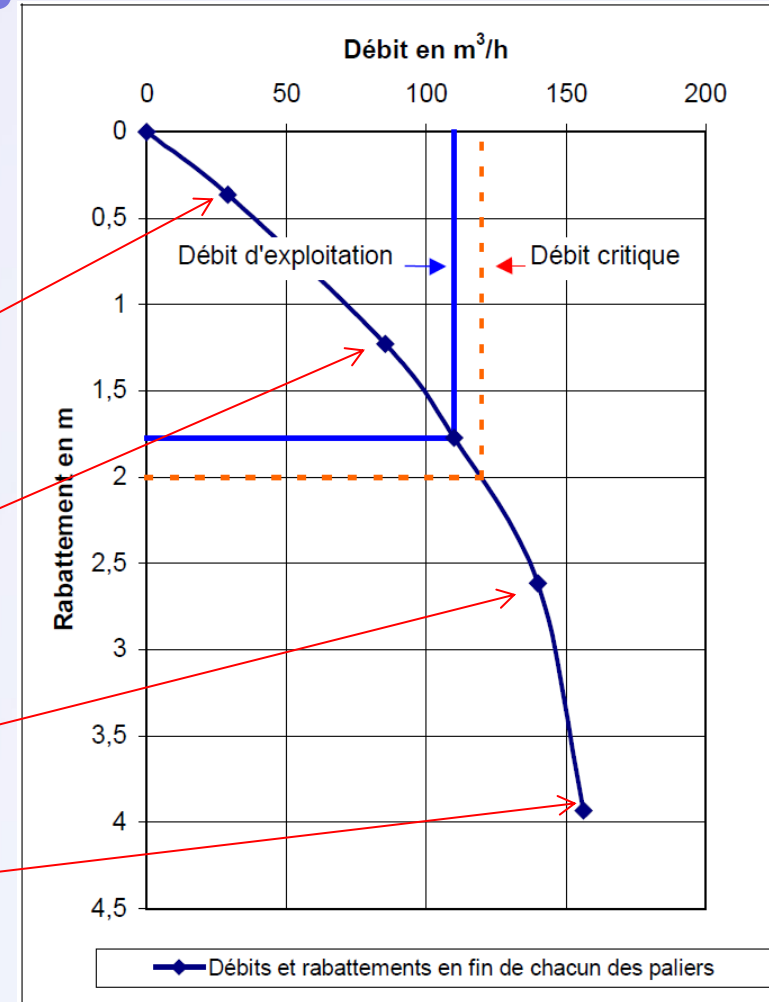
Pompage par paliers de débit (essai de puits)

Caractériser le fonctionnement du forage

- Productivité du forage
- Pertes de charges
- Débit d'exploitation, pompe



© J. BARRIERE



→ ETAT INITIAL DU FORAGE

Essais longue durée (essais de nappe)

Caractériser l'aquifère

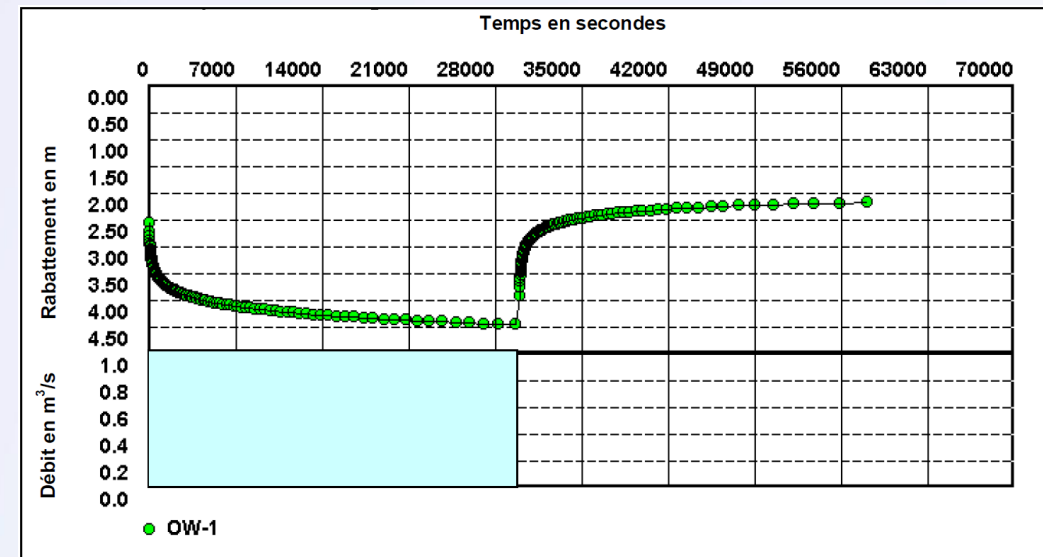
© BRGM

- Comportement de la nappe lors d'une sollicitation à débit constant
- Paramètres hydrauliques : transmissivité, coefficient d'emmagasinement
- Caractérisation physico-chimique / microbiologique
- Limites



BARRIERE

© J. BARRIERE



→ SIMULATION D'EXPLOITATION

Forages d'eau

4. Finalisation

4.3. Aménagement de tête

Aménagement de surface

A anticiper à l'amont du projet...

- Plusieurs fonctions :
 - Protection contre les incivilités : verrouillage (+ alarme ?)
 - Protection de la ressource : dalle bétonnée, étanchéité
 - Accessibilité pour la maintenance / entretien lourd : pas de bâtiment pour forage de production
 - Intégration visuelle



Aménagement de surface

A anticiper à l'amont du projet...

- Se référer aux réglementations / normes
 - Arrêté 11 septembre 2003 (vigilance : évolutions en cours...)
 - NF X10-999 : Forages d'eau et géothermie
 - NF X31-614 : Piézomètres SSP
 - NF 94-157 : Piézomètres géotechnique



Solum Hydrogéologie

Source : Solum Hydrogéologie

Forages d'eau

4. Finalisation

4.4. Contrôle de réception

Objectifs multiples du contrôle de réception

Carte d'identité initiale du forage : indispensable

- Acquisition de données géologiques (validation coupe)
Le plus souvent réalisé en cours de forage
- Valider la bonne réalisation :
 - Conformité vis-à-vis de la coupe technique théorique
 - Etat structurel général
 - Cimentation
 - Défauts d'étanchéité
- Caractériser le fonctionnement hydrogéologique
 - Position des venues d'eau
 - Qualité

Diagraphies différées

Pour la caractérisation géologique

- Gamma Ray (radioactivité naturelle)
- Résistivité
- Neutron
- Imagerie de paroi
- Diamètre 3-4 bras

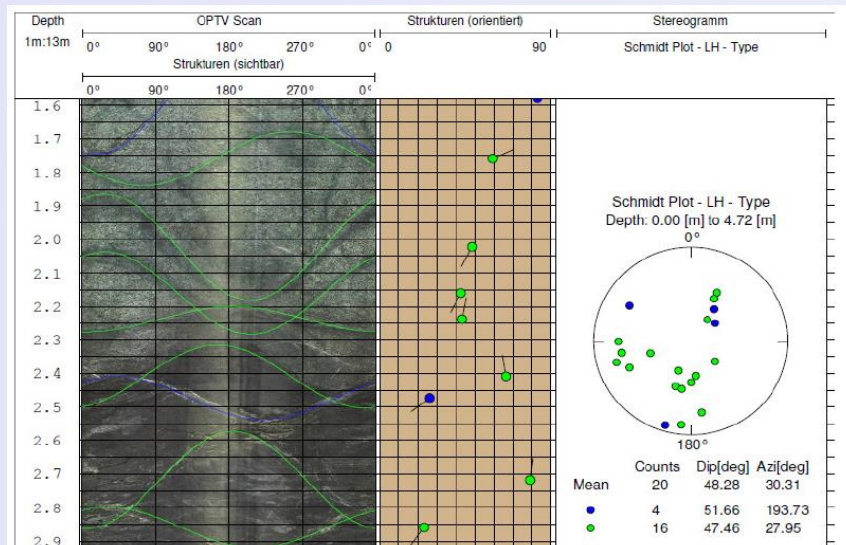
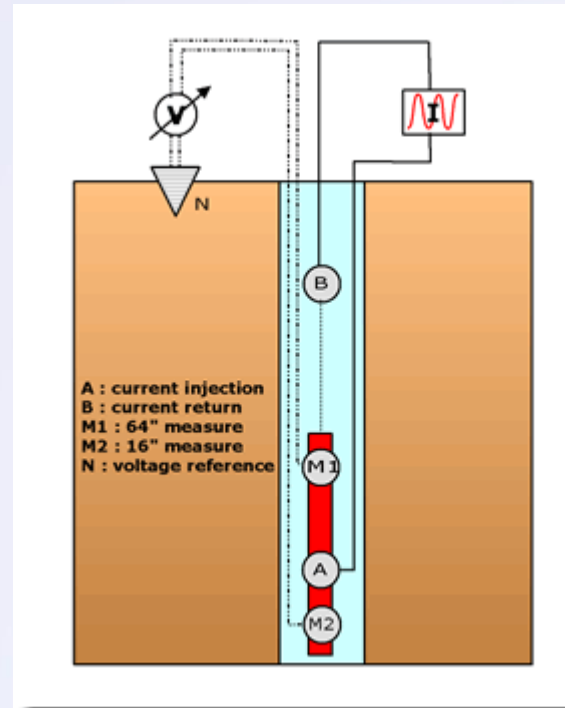
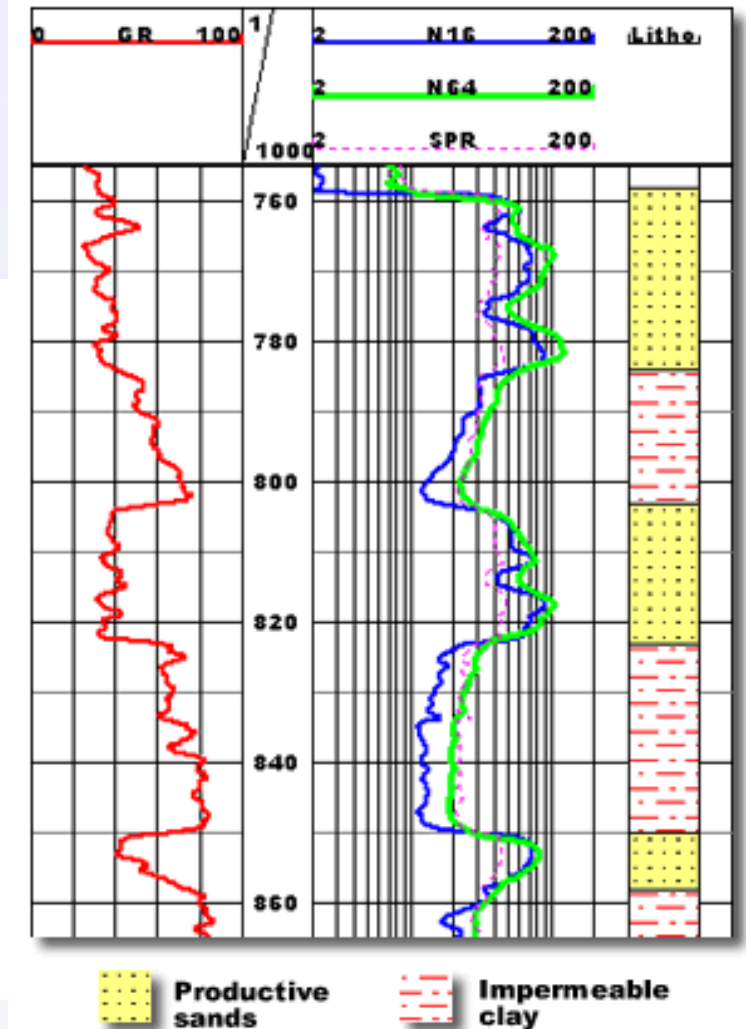


Illustration 1: Analyse d'une mesure en forage par OPTV



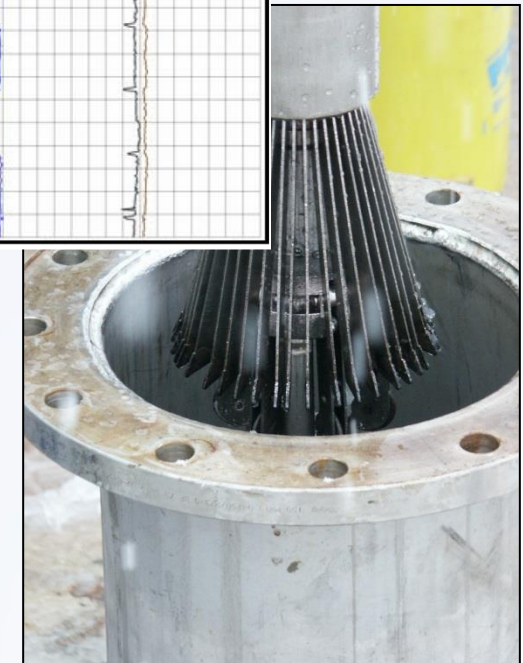
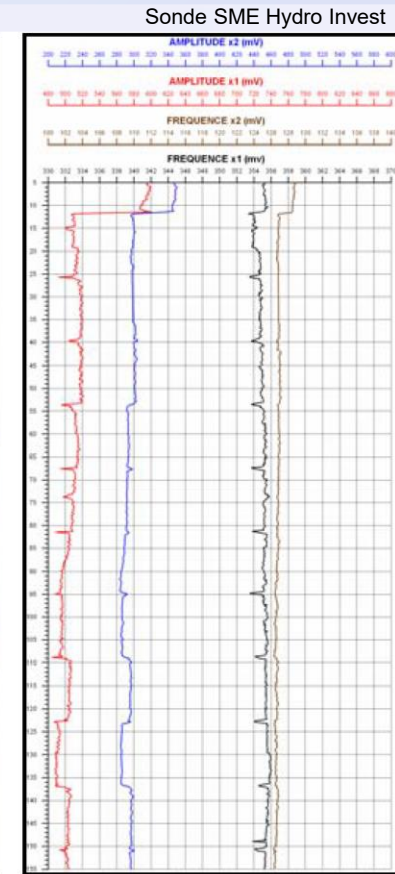
Source : EGS



Diagraphies différées

Pour le contrôle de bonne réalisation

- Tubage :
 - Diamètreur (caliper) :
 - ✓ Mécanique : multibras
 - ✓ sonique
 - Corrosion :
 - ✓ électromagnétique,
 - ✓ sonique (si tubage propre...)
 - Repérage des joints (CCL - casing log locator)



Multi-caliper S.D.P.

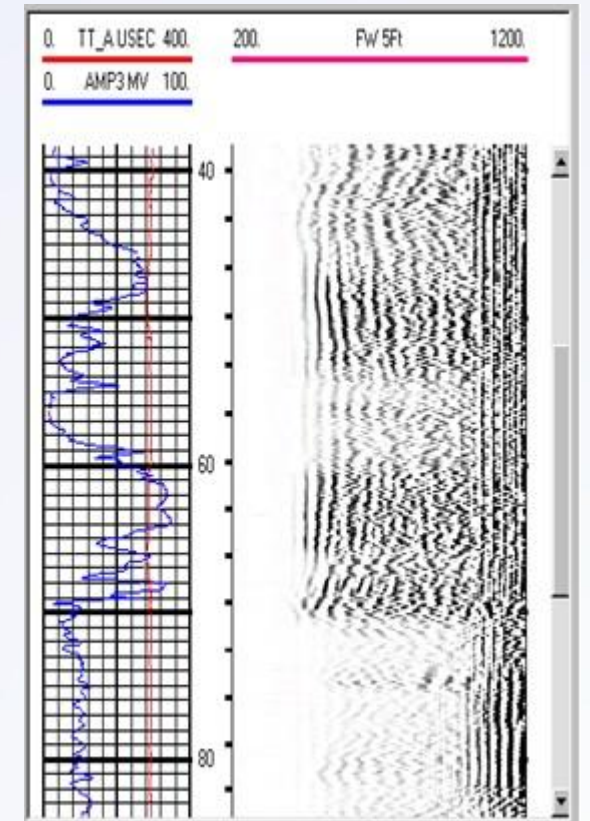
Diagraphies différées

Pour le contrôle de bonne réalisation

- Cimentation :
 - Thermométrie
 - CBL-VDL (Cement Bond Log) : sonique
 - Gamma-Gamma : densité
- Trajectoire :
 - Verticalité / inclinaison
 - Trajectométrie



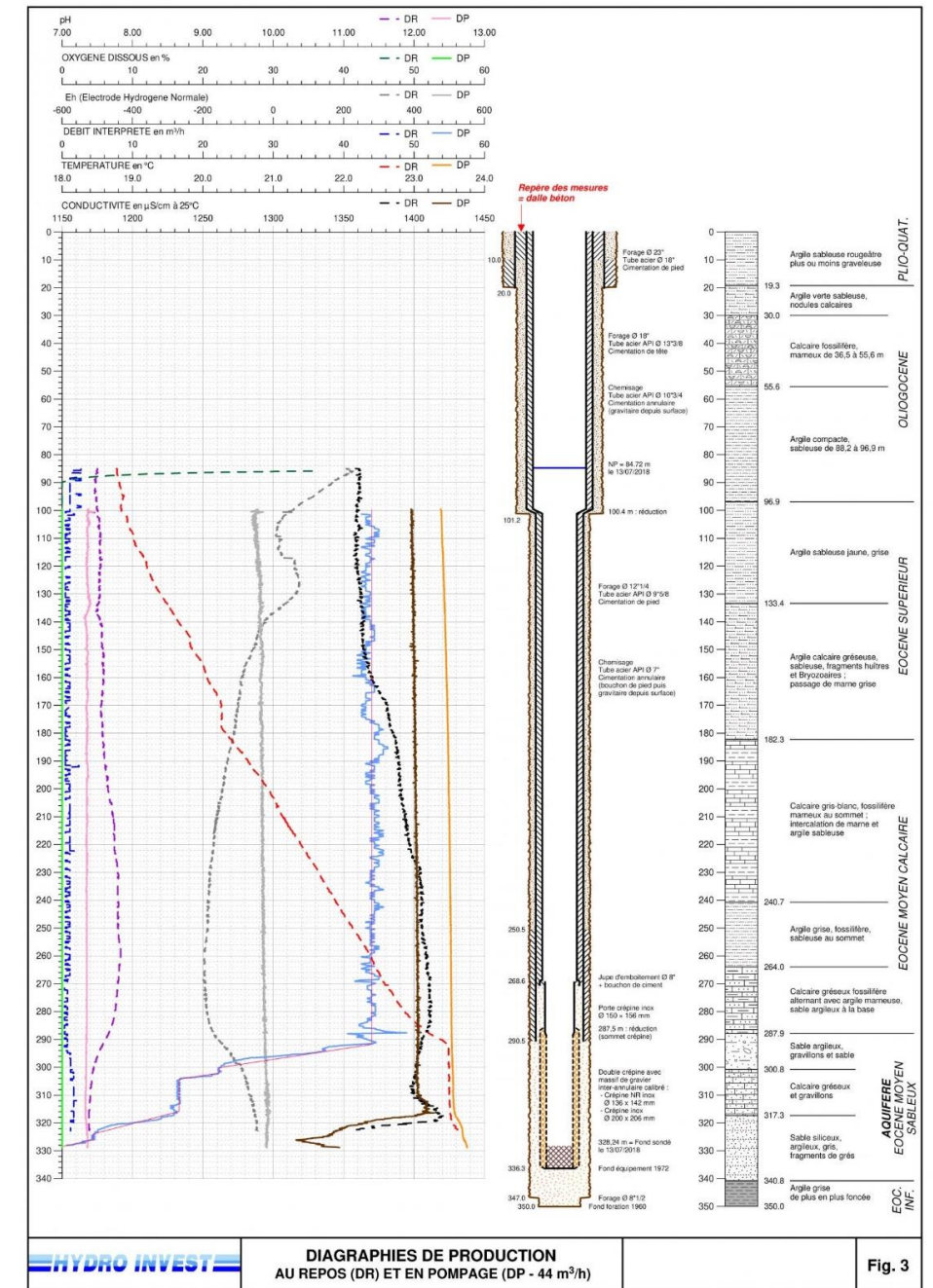
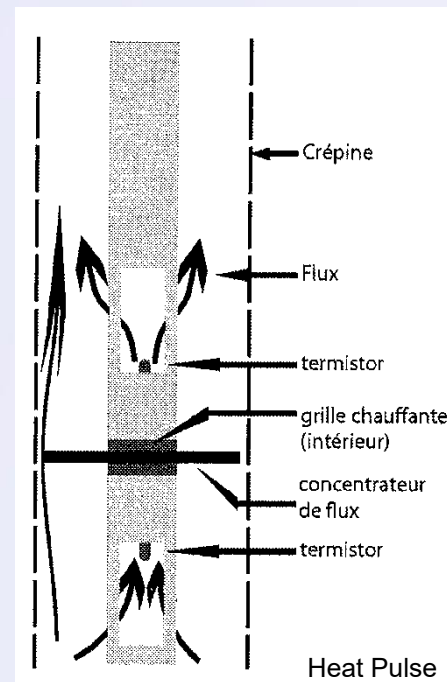
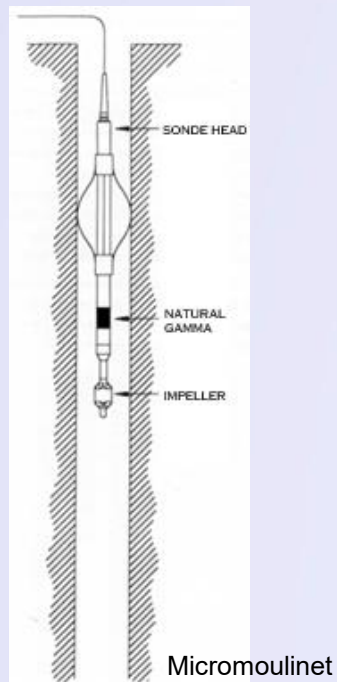
Sonde CBL-VDL
Geovista



Diagraphies de production

Caractérisation hydrogéologique

- Flux
- Micromoulinet
- Imagerie de particules en suspension
- Heat pulse (faibles vitesses)



Diagraphies de production

Caractérisation hydrogéologique

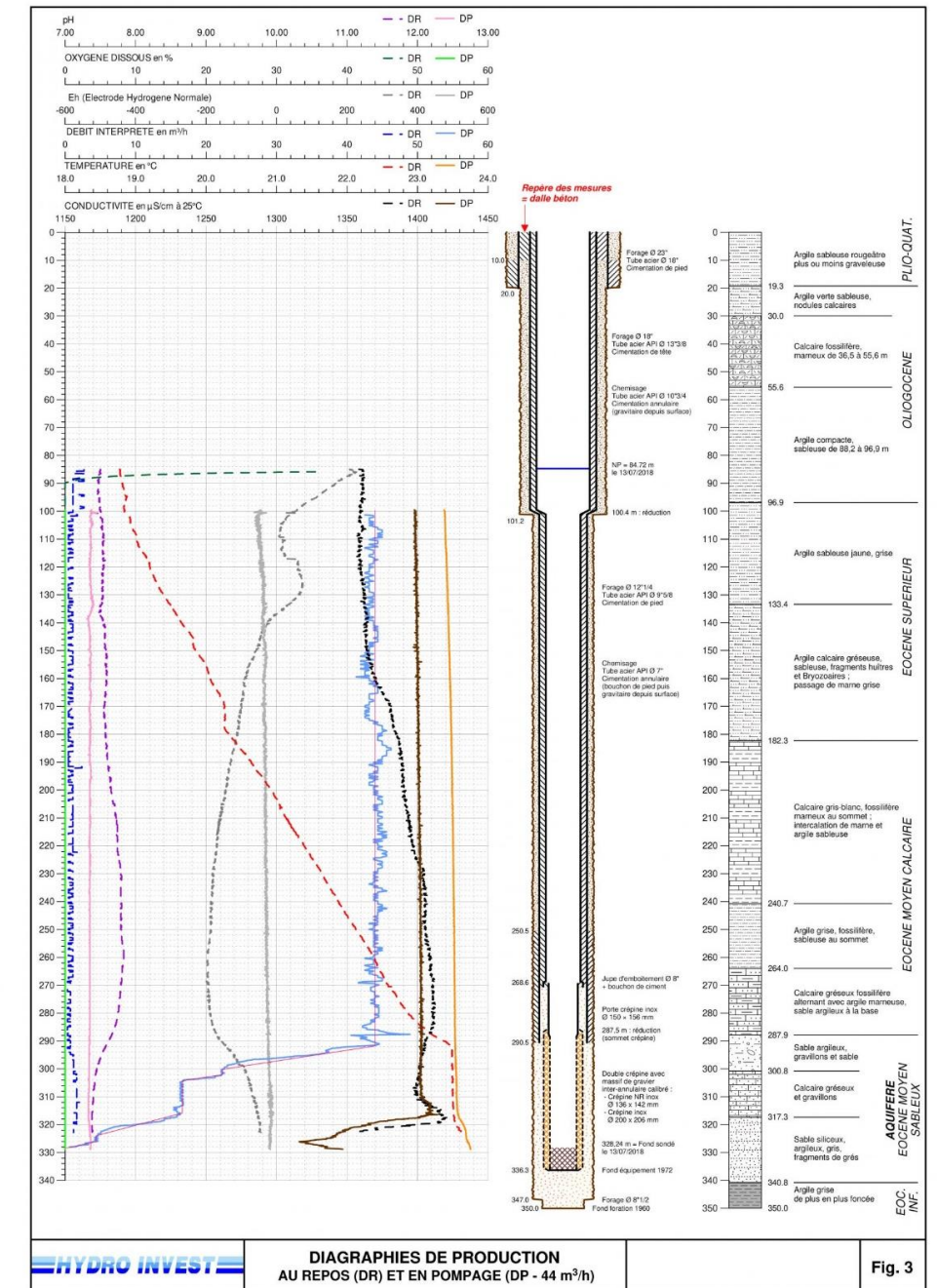
○ Paramètres physico-chimiques

- Température
- Conductivité
- Eh, pH, O₂ dissous
- Nitrates



Source : Geovista

Source : Hydro Invest



Inspection endoscopique (vidéo)

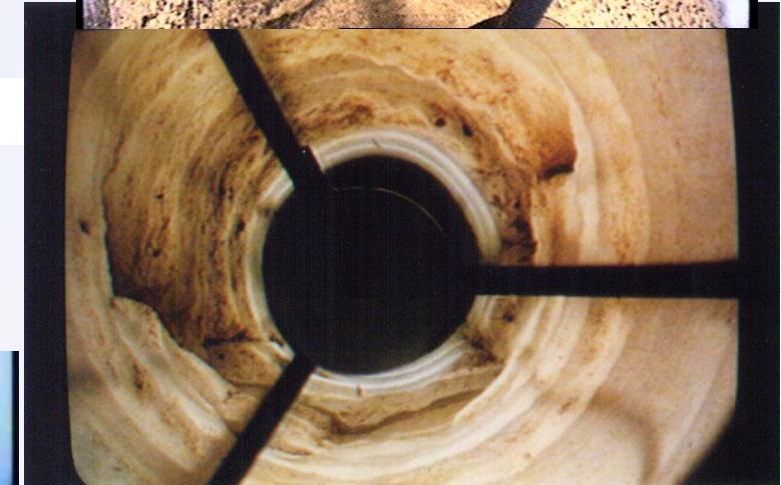
Incontournable mais subjectif

- Vigilance :
 - Types de caméra : rotative (idéal) ou axiale
 - Visibilité limitée (forage au repos, éclairage insuffisant)
 - Expérience de l'opérateur
 - Précipitation (le temps c'est de l'argent)



Inspection en trou nu

Crépines à fil enroulé et massif additionnel



Inspection endoscopique (vidéo)

Mise en garde importante

- C'est l'outil le plus utilisé, et pourtant le seul qui ne fournit pas une mesure objective !
- Attention aux sur/sous-interprétations...
- Une inspection endoscopique seule :
 - ne valide pas une étanchéité
 - ne certifie pas l'absence d'échanges dans le forage
 - n'évalue pas un état de corrosion
 - ne caractérise pas les positions des venues d'eau
 - ne diagnostique pas le colmatage de crépines



Forages d'eau

4. Finalisation

4.5. Rapport de fin de travaux

Achèvement - Rapport de fin de travaux

Document essentiel

© BRGM

- Rapports journaliers
- Techniques de forage
- Description géologique des terrains traversés
- Nature des tubages : matériaux, dimensions (longueur, diamètre, épaisseur), raccords, ouvertures pour les crépines
- Nature des matériaux mis en place dans les espaces annulaires
- Données et résultats des pompages / essais
- Mesures physico-chimiques et résultats d'analyses
- Mesures en forage : diagraphies, inspections endoscopiques
- Coupes géologiques et techniques complètes

Forages d'eau

5. Surveillance – entretien – comblement

Vétusté des forages

Durée de vie : quelques années à > 50 ans

- Différents phénomènes :
 - Obstruction
 - Colmatage
 - Incrustation
 - Différentes sortes de corrosion
- Processus de diverses origines :
 - Chimiques : précipitations (carbonates, sulfates, oxydes et hydroxydes de fer ou de manganèse)
 - Biologiques : boues bactériennes
 - Mécaniques : silts, argiles



Forages d'eau

5. Surveillance – entretien – comblement

5.1. Suivi - métrologie

Suivi, métrologie

Impératif pour anticiper

- Suivi ponctuel
 - Contrôle visuel de la tête de forage / du regard
 - Contrôle de la pompe : isolement électrique, clapet anti-retour
 - Contrôle du fond du forage
 - Contrôle du sommet du massif de gravier
 - Contrôles hydrauliques (pompage par paliers)
 - Contrôle de l'état du forage : inspection endoscopique, diagraphies de production, contrôle de corrosion

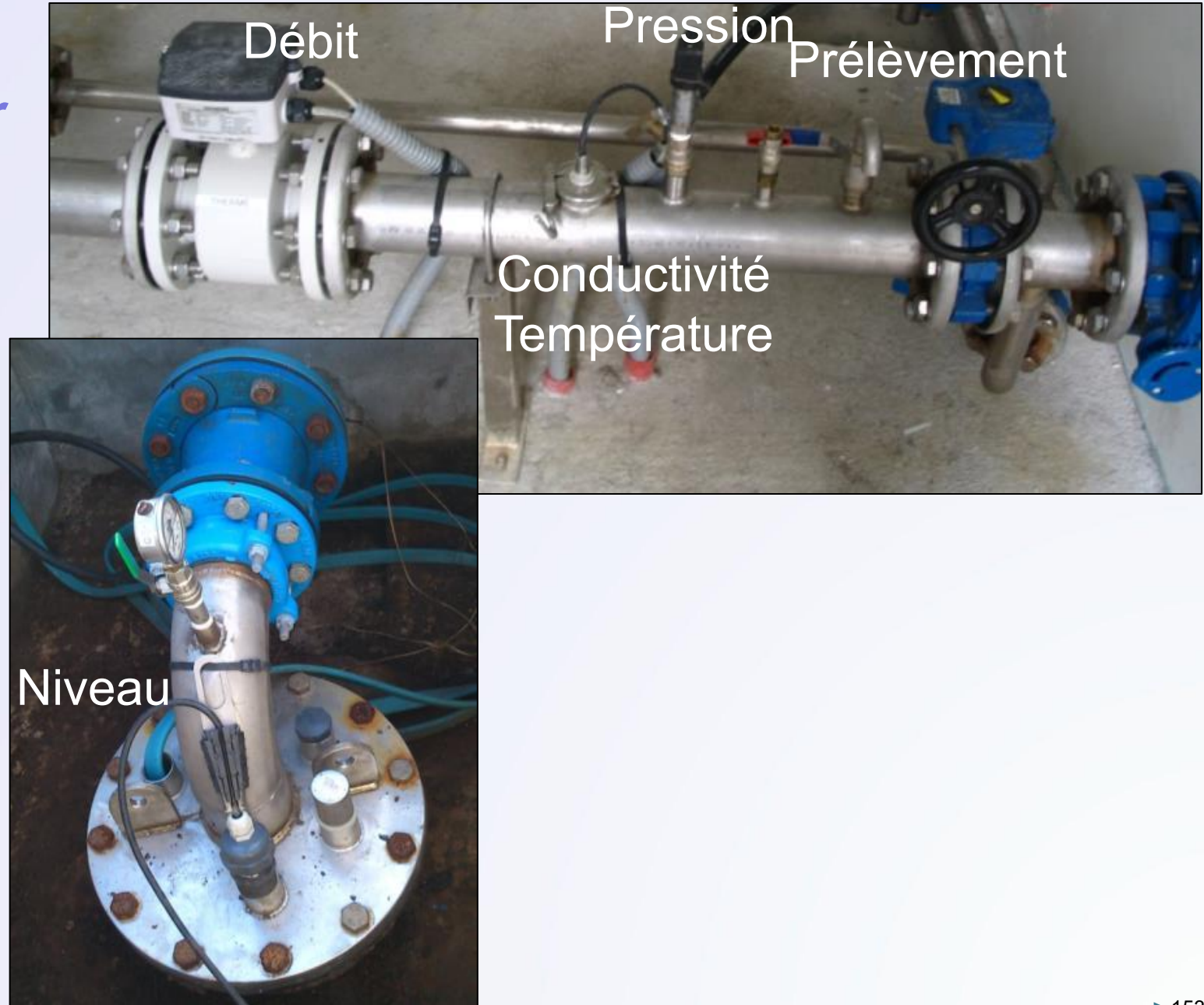


Suivi, métrologie

Impératif pour anticiper

- Suivi en continu
 - Débits
 - Niveaux, pressions
 - Température, conductivité
 - Installation électrique
 - Incidents

Données enregistrées et interprétées



Forages d'eau

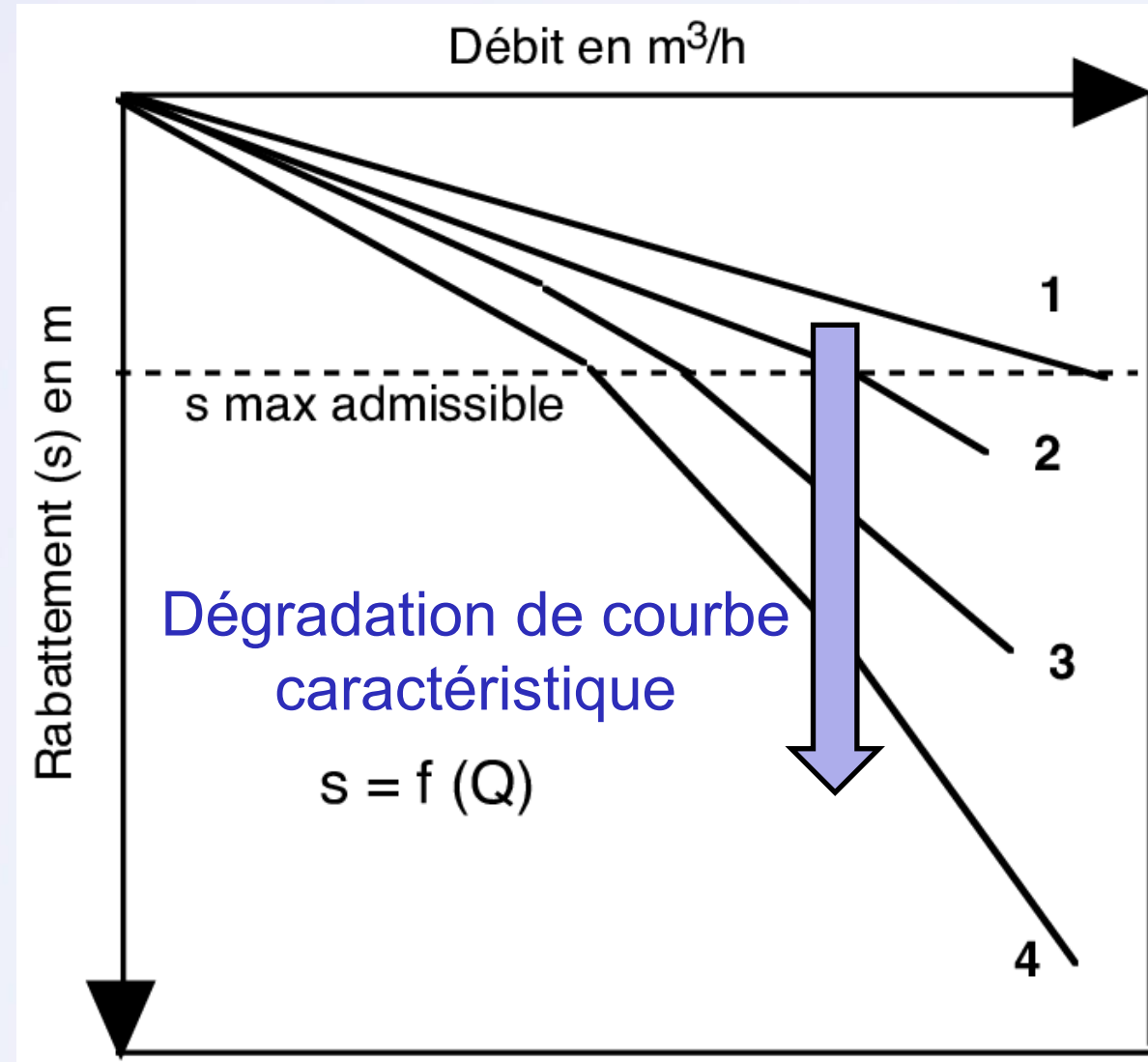
5. Surveillance – entretien – comblement

5.2. Maintenance – entretien – réhabilitation

Le point de départ : diagnostic (sur la base du suivi)

Le plus tôt est le mieux...

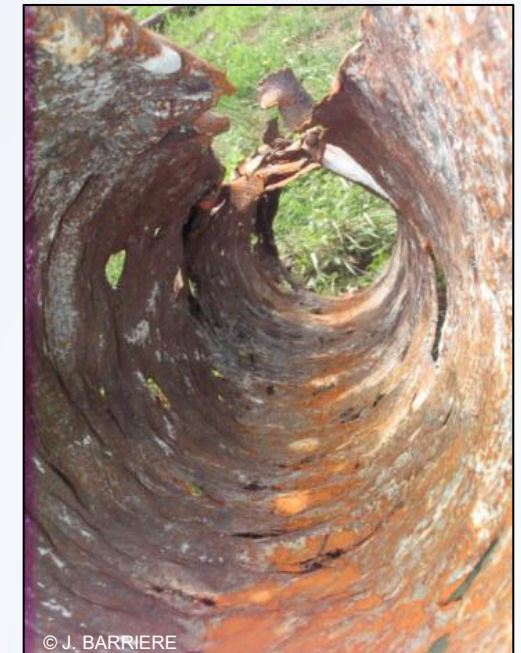
- Défaut d'isolement de la pompe
- Augmentation des pertes de charge
- Mesures physico chimiques (pH, MES)
- Prélèvements d'incrustations
- Inspection vidéo, diagraphies
- Recherches de bactéries
- Analyses chimiques (Sulfures, Fe), Indice de Langelier, Indice de Ryznar



Maintenance, entretien, réhabilitation

Selon la gravité...

- Maintenance :
 - Planifiée, hors intervention sur la structure de l'ouvrage
 - Ex : remplacement pompe immergée / colonne
- Entretien
 - Planifiée, sur la structure de l'ouvrage
 - Ex : nettoyage du forage : chimique, mécanique
- Réhabilitation
 - Intervention exceptionnelle, lourde
 - Ex :
 - ✓ traitement lourd du forage
 - ✓ chemisage



Exemples de symptômes

Tubage
corrodé
+ perforé



© J. BARRIERE

Précipitations de gypse
sur tube d'exhaure



© J. BARRIERE



Précipitation et
corrosion sur un tube
d'exhaure à brides

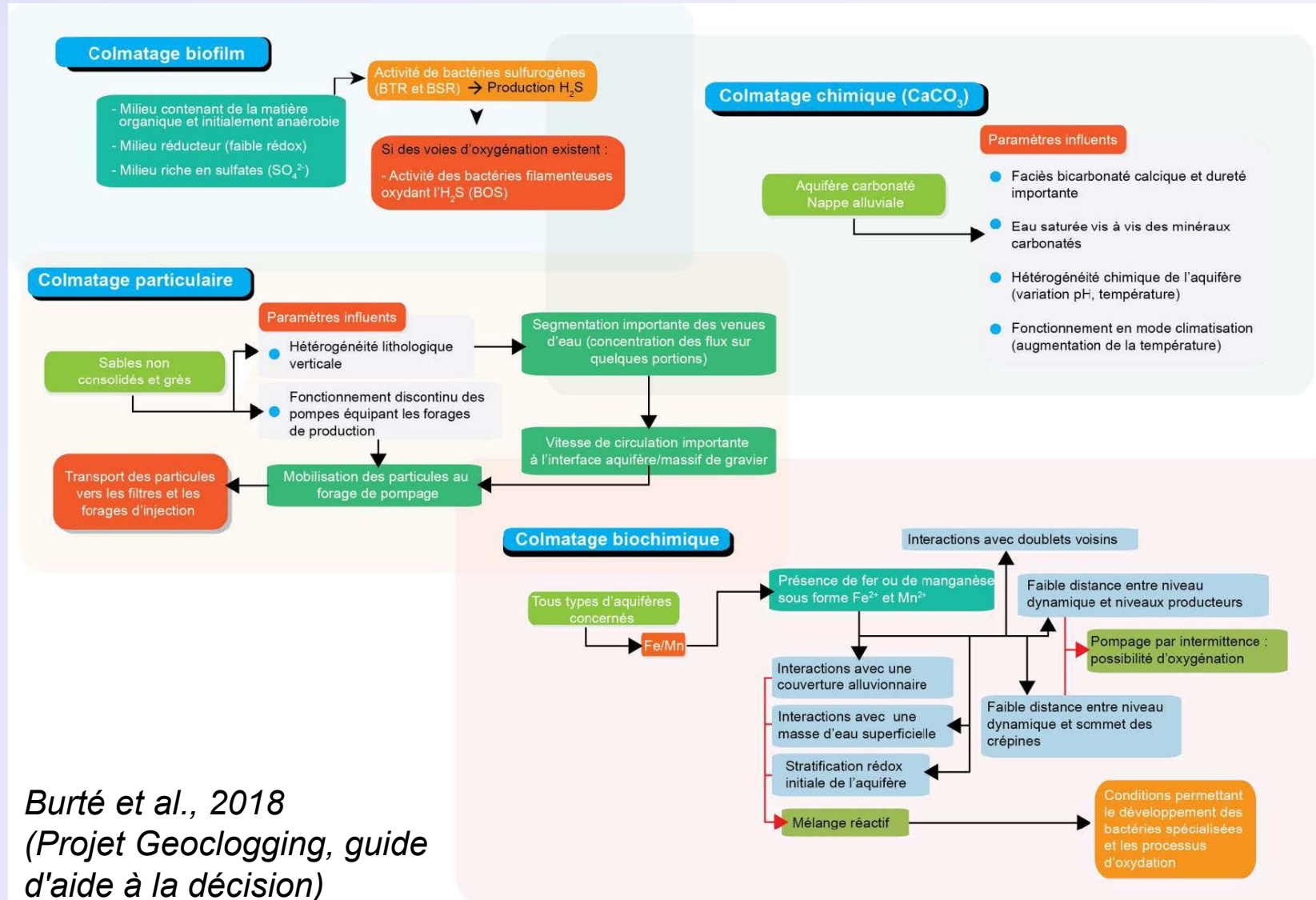
Dépôt magnésien sur
pompe immergée



© BRGM – A. GUTIERREZ

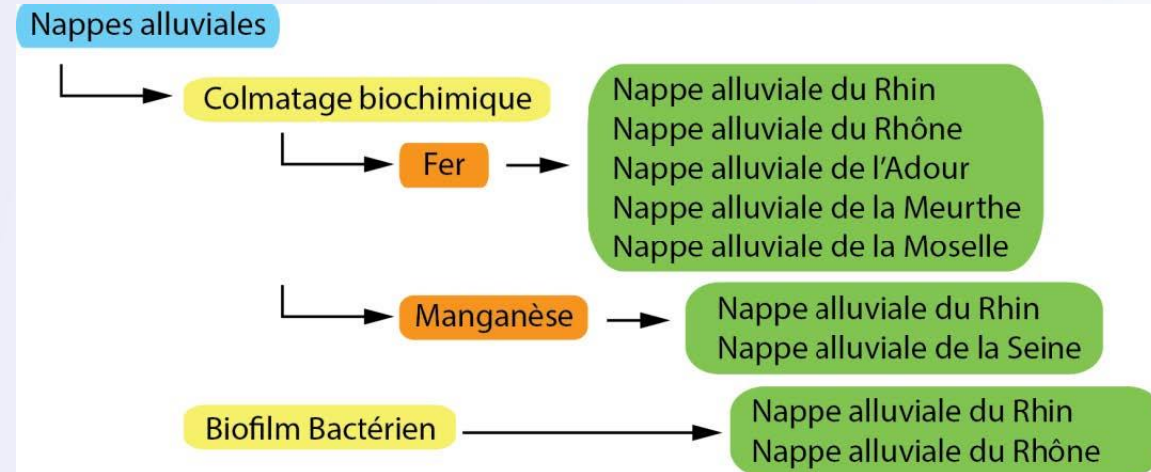
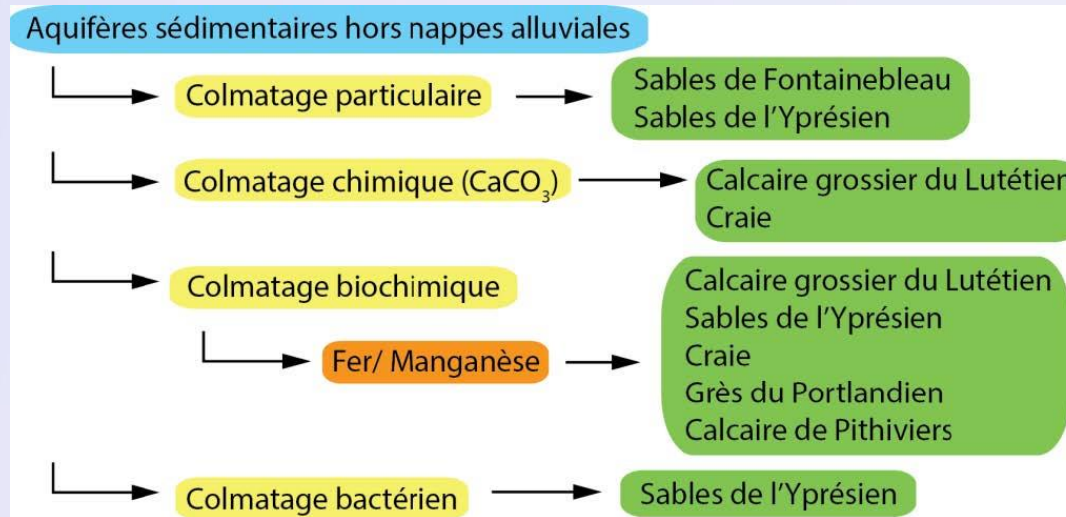
Colmatages de forages

Travaux récents synthétisant les symptômes - origines



Colmatages

Travaux récents synthétisant les symptômes - origines



Burté, 2018

Etude des risques de colmatage et optimisation des procédés de traitement des doublets géothermiques superficiels

Traitements chimiques

- Incrustations par carbonates (entartrage)
 - Acidification (Hcl ou Sulfamique) + inhibiteur de corrosion
- Oxydes de fer et Manganèse
 - Polyphosphates, acidification
- Bactéries
 - Hypochlorite (javel), peroxyde (eau oxygénée), acides + traitement mécanique impératif
- Colmatage argileux
 - Polyphosphates, acide fluorhydrique

Entretien - Traitements mécaniques

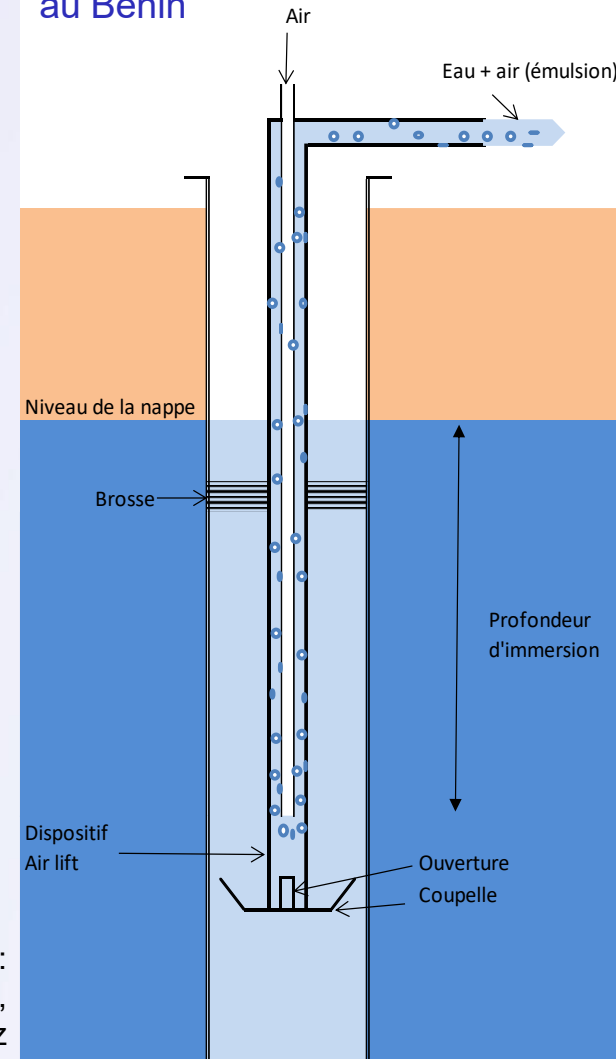
Nombreuses techniques communes avec le développement

- Jetting
- Pistonnage / swabbing
- Air-lift
- Pompage (effet limité)
- Brossage, grattage.
- Explosifs (petites charges)



Source :
Aquaforage

Exemple : opération de brossage
au Bénin



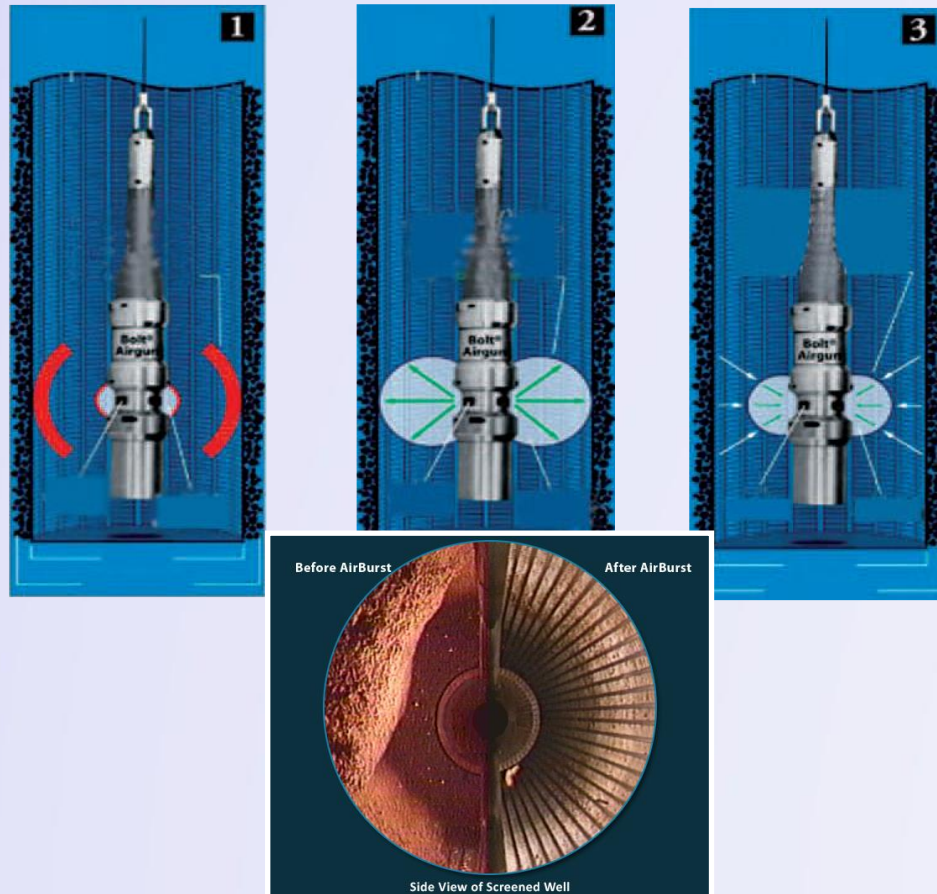
Source :
BRGM,
A. Gutierrez



Entretien / réhabilitation : multiples procédés

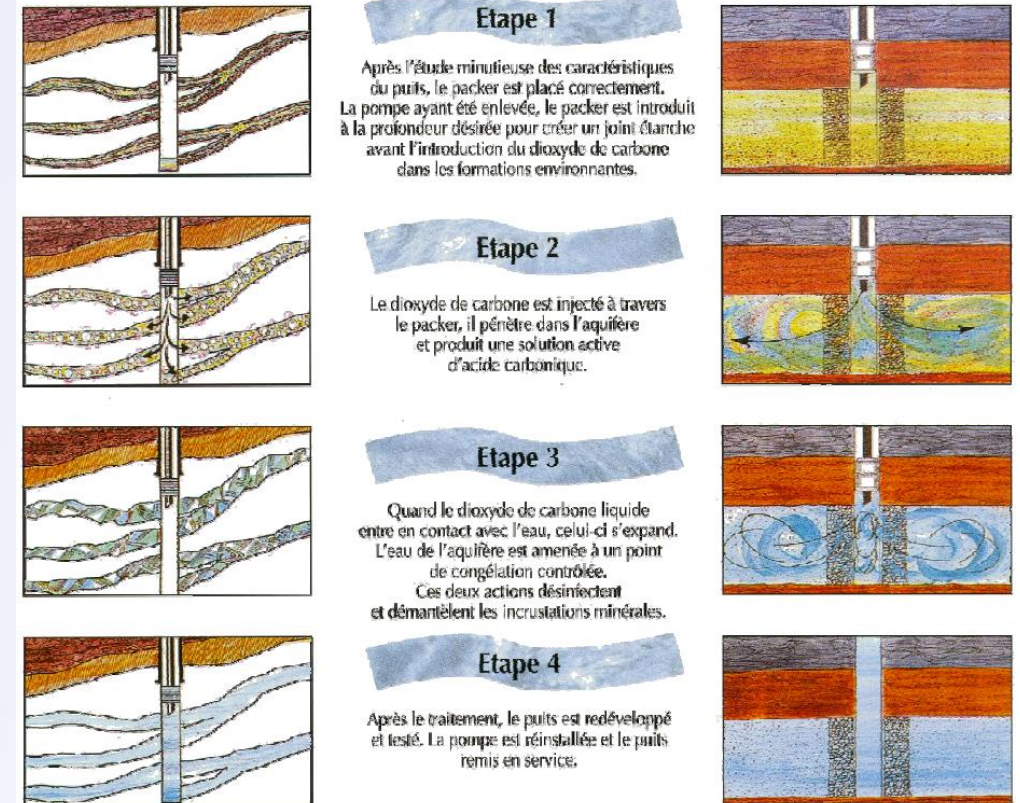
Propriétés des entreprises d'entretien / réhabilitation

Procédé "Airburst®" ou "Airshock (SADE)



Congélation par injection de CO2 (AQUAM)

PRINCIPE DU PROCEDE

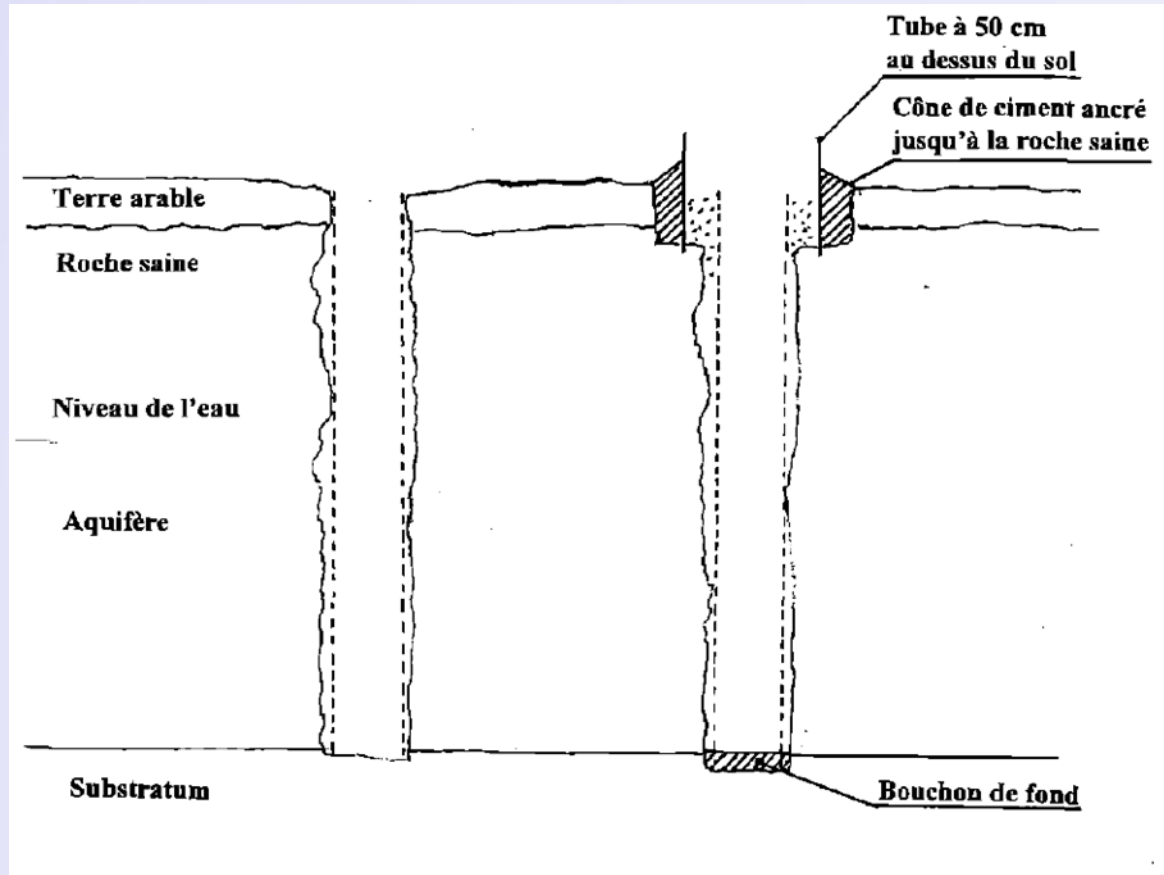


Etc, etc.

Une difficulté majeure : obtenir des retours d'expérience exhaustifs

Réhabilitation

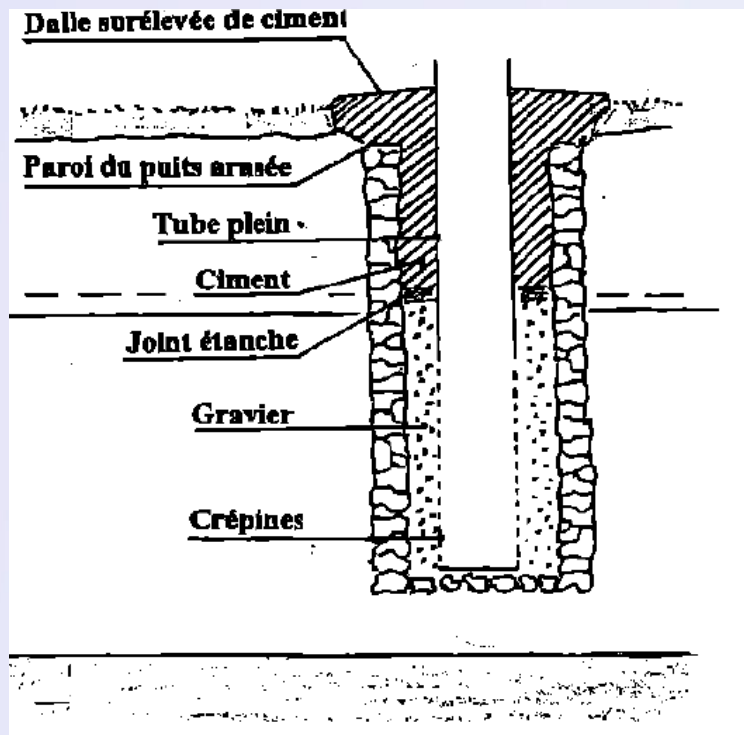
○ Reprise de la tête de forage



Tête de forage
"enfouie" :
une pratique encore
courante...

Réhabilitation

○ Rechemisage



Réhabilitation

- Scraping
= recalibrage des tubes



© J. BARRIERE



© J. BARRIERE

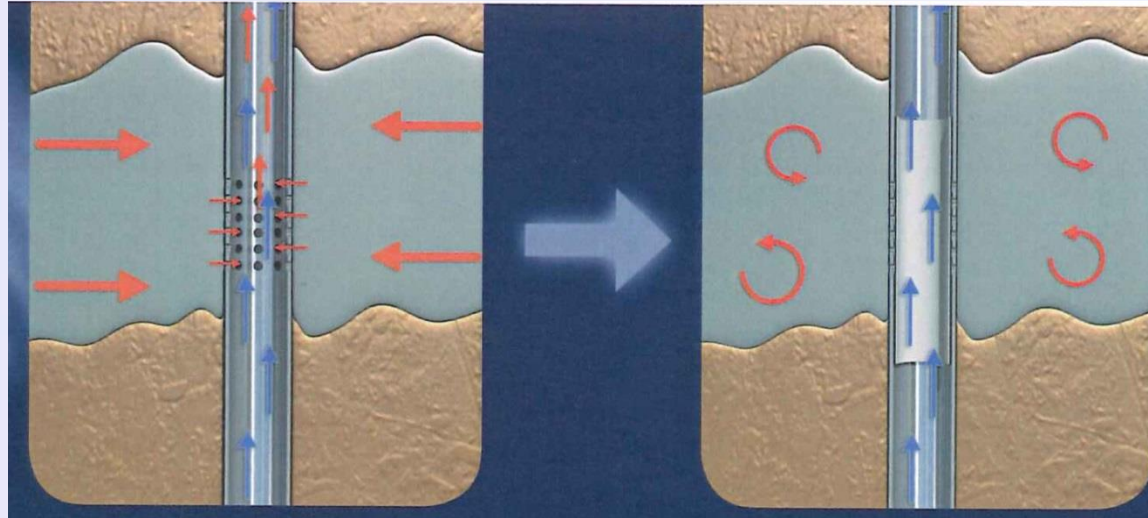
Réhabilitation

- Fraisage
- Découpe
- Surforage



Réhabilitation

- Isolation locale (« rustine »)
IPES: Inflatable Packer Expandable system
- Vigilance : contrôle de cimentation préalable



Forages d'eau

5. Surveillance – entretien – comblement

5.3. Comblement

Comblement - abandon

Les impératifs

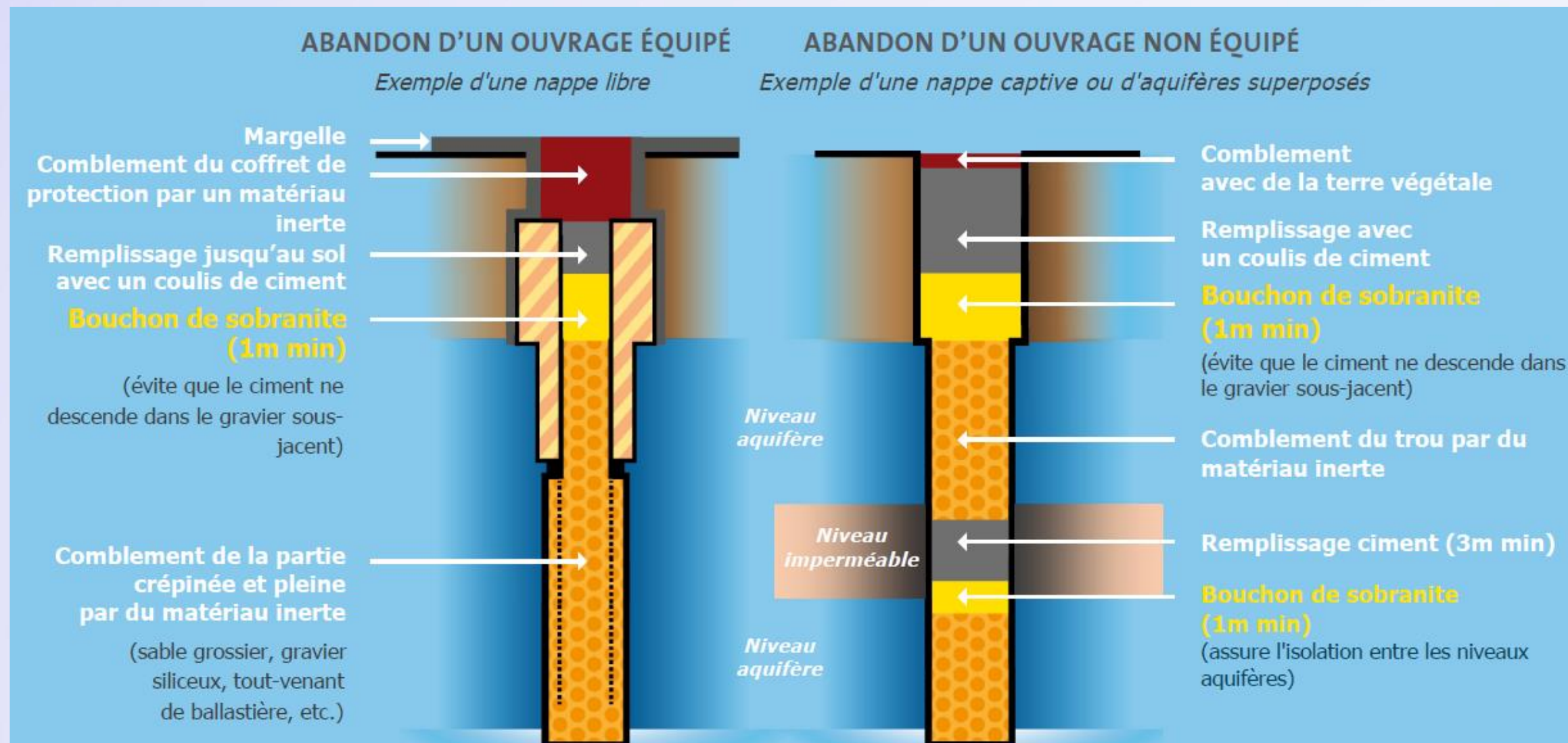
- Préservation de la ressource :
 - Protection vis-à-vis de la surface
 - Protection vis-à-vis des nappes traversées
 - Préservation des propriétés hydrauliques du réservoir

- la norme prévoit un comblement par du sable / gravier (désinfectés) au droit de l'aquifère, puis cimentation

- Préservation des usages du sol

Comblement - abandon

Le principe



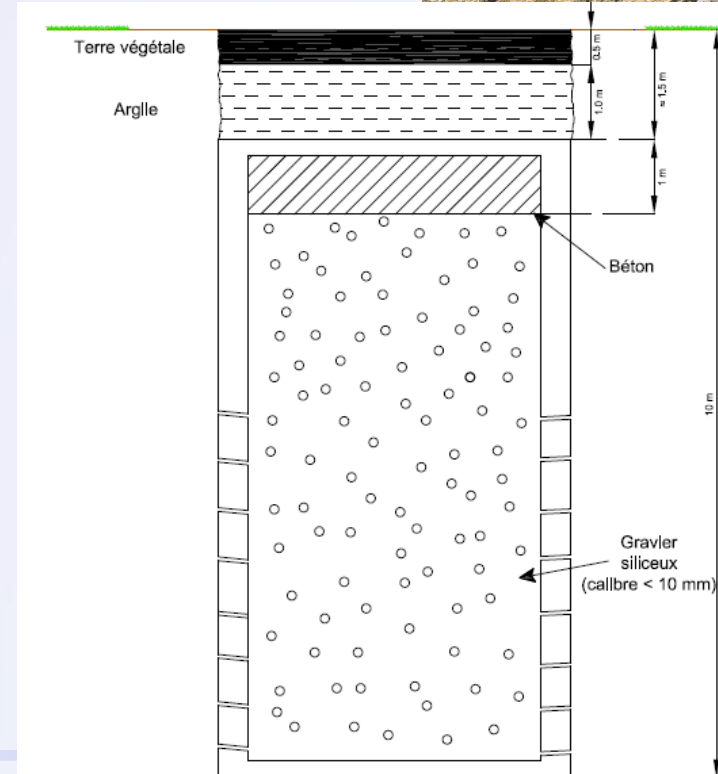
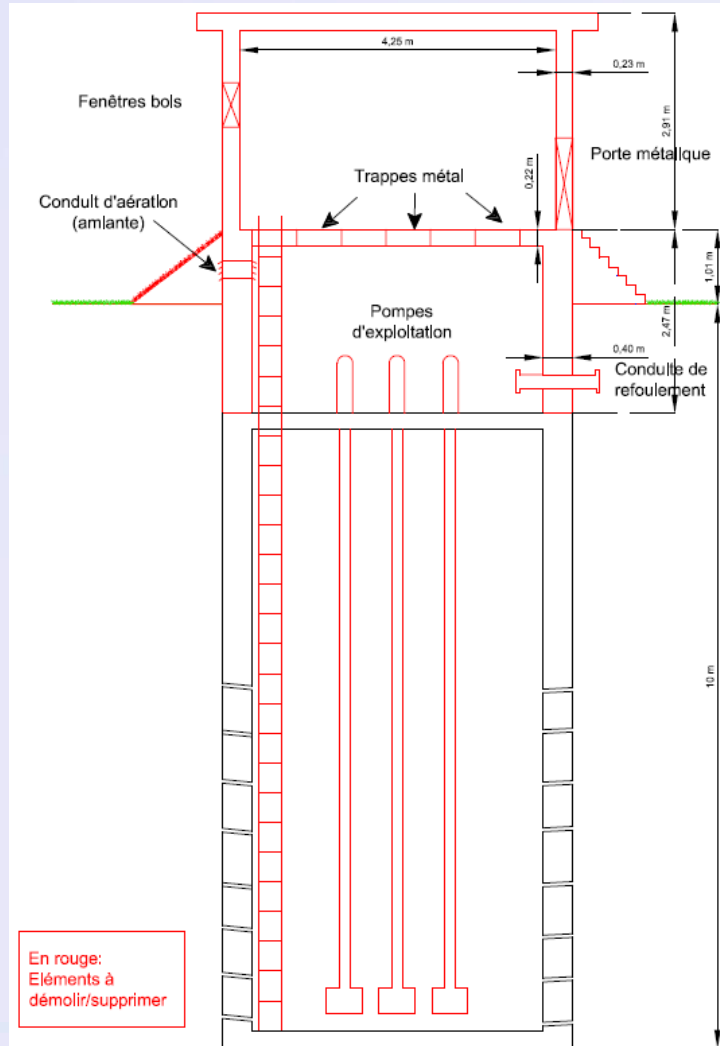
Comblement - abandon

Exemple : piézomètre



Comblement - abandon

Exemple : puits à grand diamètre



Comblement - abandon

Rapport de fin de travaux de comblement

- date des travaux
- aquifère précédemment surveillé ou exploité
- coupe géologique représentant les différents niveaux géologiques et les formations aquifères présentes au droit du forage
- coupe technique précisant les équipements en place
- informations sur l'état des cuvelages ou tubages
- informations sur la cimentation de l'ouvrage
- informations sur les techniques ou méthodes utilisées

Forages d'eau

6. Conception - dimensionnement

Conception d'un forage

- **Les contraintes à prendre en compte**
 - Usage prévisionnel
 - Nature des terrains + aléa géologique
 - Caractéristiques physicochimiques de l'eau
 - Normes de l'industrie (diamètres des trépan et des tubes)
 - Limites du matériel (compresseur, treuil, pompe à boue etc...)
 - Environnement et réglementation (implantation, rejet, bruit ...)
 - Prix
- **Les caractéristiques de l'ouvrage à fixer**
 - Diamètre de la pompe / Chambre de pompage / Chambre de captage
 - Diamètre des tubages et des trépan (respect des jeux entre outil et tubage)
 - Profondeur, nombre de colonnes
 - Volume à cimenter, réserve à gravier (respect des épaisseurs)
 - Choix des matériaux

Forages d'eau

6. Conception – dimensionnement

6.1. Diamètres usuels

Diamètres usuels

Outils

	Inches	Ø (mm)	Vol (l)/m
ROTARY	6	152	18.2
	6"3/4	171	23.1
	7"7/8	200	31.4
	8"1/2	216	36.6
	9"7/8	251	49.4
	12"1/4	311	76.0
	15	381	114.0
	17"1/2	445	155.2
	Inches	Ø (mm)	Vol (l)/m
MFT	3	76	4.5
	3"1/2	90	6.4
	4"1/2	115	10.4
	5	127	12.7
	5"1/2	140	15.4
	6"1/2	165	21.4
	8"1/2	215	36.3
	12"1/4	311	76.0
	17"1/2	445	155.2

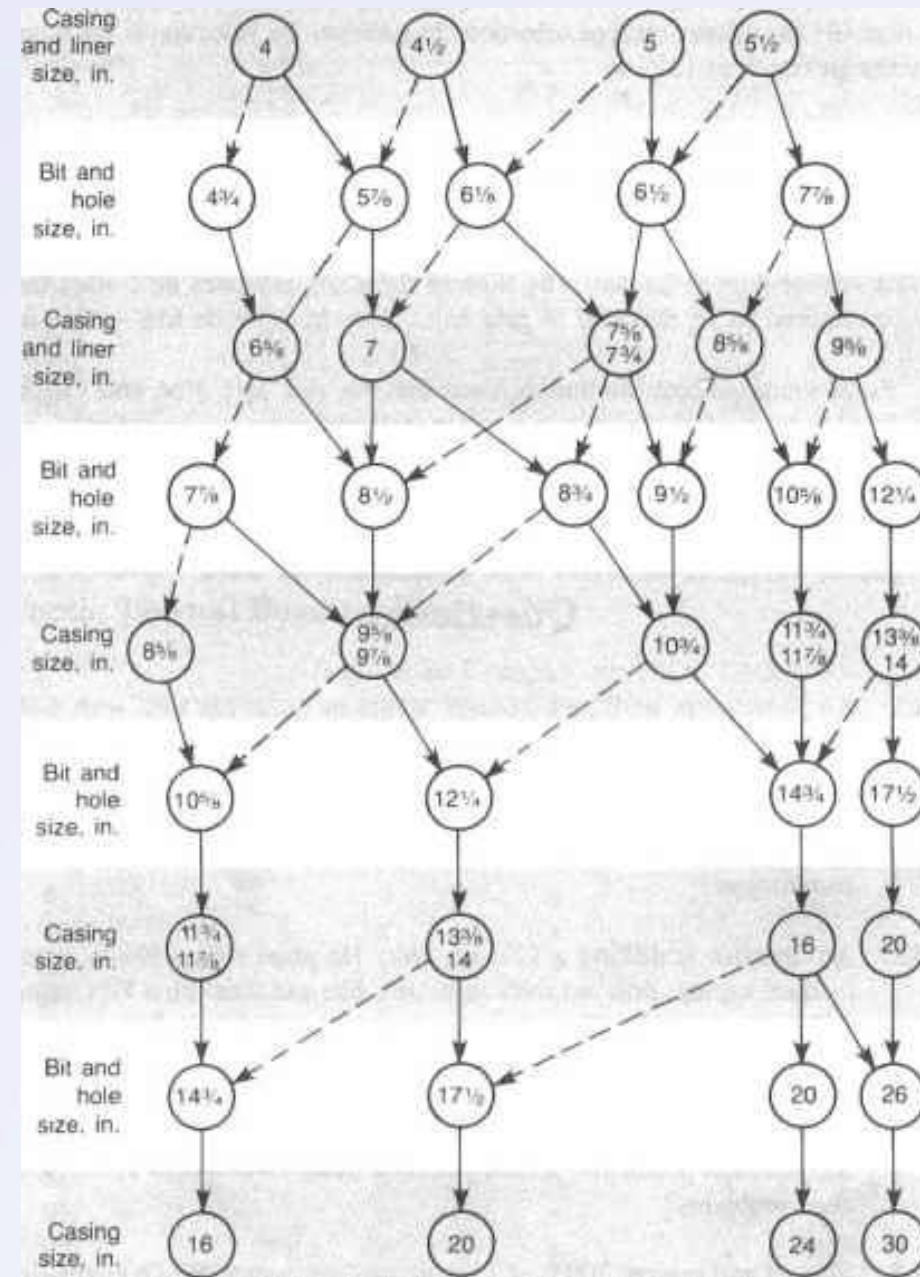
ODEX	Diamètre du pilote	Diamètre du trou alésé
	90 mm	123 mm
	115 mm	152 mm
	140 mm	181 mm
	165 mm	209 mm
	190 mm	237 mm
	240 mm	306.5 mm

	Inches	Ø (mm)	Vol (l)/m	Ø carotte
CAROTTAGE au câble	AQ	48	1.8	27
	BQ	60	2.8	36.5
	NQ	75.8	4.5	47.6
	HQ	96	7.2	63.5
	PQ	122.6	11.8	85

Diamètres usuels

Tubages

	Inches	Ø ext (mm)	Vol (l)/m
TUBAGES A.P.I.	4"1/2	114	10.3
	5	127	12.7
	5"1/2	140	15.3
	6"5/8	168	22.2
	7	178	24.8
	7"5/8	194	29.5
	8"5/8	219	37.7
	9"5/8	244	46.9
	10"3/4	273	58.6
	11"3/4	298	70.0
	13"3/8	340	90.6
	16	406	129.7
	20	508	202.7



Normes pétrolières API (pour indication)

→ attention au respect des espaces annulaires (cimentation)

Diamètres usuels

Tubages

Filetage dans la 1/2 épaisseur (tubes droits)

Filetage trapézoïdal mâle-femelle. Voir p.10 les types de raccordement

Dimensions							Résistance à l'écrasement en bar	Nbre de tubes par cadre	Tubes pleins	
DN Pouches	Ø ext. mm	Ø int. mm	Ø ext. manch mm	Ep. moy mm	Long. standard en m	Autres Long. disponibles			Code	Prix au ml en € HT
2"	60	51		4,5	3	1 ; 2	32	70	34845	4,52
2 1/2"	75	64		5,5	3	1 ; 2	30	56	33972	8,13
3"	90	80		5	3	1 ; 2	13	58	34389	10,20
4"	113	100*		6,5	4		15	54	33128	13,86
	114	104		5	3	1 ; 2 ; 4	6	54	34640	10,57
4 1/2"	125	112		6,5	4	1 ; 2 ; 3	11	48	32928	13,90
	125	112		6,5	3	1 ; 2 ; 4	11	48	33001	14,60
	125	110*		7,5	4		17	48	36310	16,85
5"	140	126		7	4	1 ; 2 ; 3	9	56	32959	16,83
	140	124		8	4	1 ; 2 ; 3	14	56	30649	21,15
6"	165	150		7,5	4	1 ; 2 ; 3	7	36	30679	23,78
6 1/2"	180	163		8,5	4	1 ; 2 ; 3	8	28	30739	26,45
7"	195	178		8,5	4	1 ; 2 ; 3	6	25	30635	28,65
	195	172*		11,5	4		16	25	36206	42,43
	200	180		10	4	1 ; 2 ; 3 ; 5	9	25	33618	37,97
8"	225	204		10,5	4	1 ; 2 ; 3	8	12	32899	45,32
	225	199*		13	4		15	12	36061	55,19
9"	250	225		12,5	4	1 ; 2 ; 3 ; 5	9	16	32634	59,52
10"	280	255		12,5	4	1 ; 2 ; 3	7	12	31300	67,07
12"	315	285		15	4	1 ; 2 ; 3	8	8	32964	90,17
	330	301*		14,5	4	2 ; 3	6	6	30951	124,66
14"	400	365		17,5	4,10	2 ; 3,10	6	5	32389	139,33

Doc SOTRA

Diamètres usuels

Configurations pour des forages télescopés

diamètre de foration 1	diamètre extérieur du tubage cimenté	Epaisseur de cimentation minimale en mm	diamètre de foration 2	diametre de la colonne captante acier	diametre de la colonne captante PVC
32" (812mm)	710mm	50	26" (660mm)	508/473 mm	-
26" (660mm)	540/560mm	50	20" (508mm)	355/406 mm	315/400 mm
24" (610mm)	508mm	50	17"1/2 (445mm)	273/323 mm	280/315 mm
22" (559mm)	473mm	50	17"1/2 (445mm)	273/323 mm	280/315 mm
20" (508mm)	406mm	50	14" 3/4(375mm)	219/244 mm	225/250mm
17"1/2 (445mm)	323/340mm	50	12"1/4 (311mm)	168/178/193/203 mm	180/200 mm
14" 3/4(375mm)	273mm	50	9"7/8 (254mm)	101/114/127/152 mm	140/170 mm
12"1/4 (311mm)	219mm	45	8"(203mm)	89/101/139 mm	90/125 mm
9"7/8 (254mm)	140 à 170mm	40	4"1/2-6"(114-152mm)	60/90/102 mm	60/90 mm
8"1/2 (216mm)	114/140mm	40	4"-4"1/2(102-114mm)	-	50/60 mm

Diamètres usuels

Configurations pour des ouvrages mono-diamètres

FORAGE MONO DIAMETRES			
diametre de foration	diametre de la colonne captante acier	diametre de la colonne captante PVC	Epaisseur de cimentation minimale en mm
32" (812mm)	610/660 mm	-	50
26" (660mm)	508mm	-	50
24" (610mm)	508/473 mm	-	50
22" (559mm)	406 mm	400 mm	50
20" (508mm)	355/406 mm	315/400 mm	50
17"1/2 (445mm)	323 mm	280/315 mm	50
14" 3/4(375mm)	244/273 mm	225/250/280 mm	50
12"1/4 (311mm)	168/178/193/219 mm	180/200 mm	40
9"7/8 (254mm)	101/114/127/140 mm	125/140/160/170 mm	40
8"1/2 (216mm)	102/114/125 mm	90/110/125 mm	40
6" (152mm)	90/102 mm	50/60 mm	40

Diamètres usuels

Contraintes des pompes immergées

Débit prévu (m ³ /h)	Diamètre nominal pompe	Diamètre casing optimal	Plus petit diamètre casing
< 25	4" – 102 mm	6" - 152 mm	5" – 127 mm
20 - 40	5" – 127	8" – 203	6" - 152
35 – 80	6" - 152	10" – 254	8" – 203
70 – 160	8" – 203	12" – 305	10" – 254
110 – 220	10" – 254	14" – 356	12" – 305
180 – 400	12" – 305	16" – 406	14" – 356
270 – 680	14" – 356	20" - 508	16" – 406
450 – 860	16" – 406	24" – 610	20" - 508
680 – 1300	20" - 508	30" - 762	24" - 610

Tableau élaboré avec S.Bart – Johnson Screen

Forages d'eau

6. Conception – dimensionnement

6.2. Conception

Quel programme de forage ?

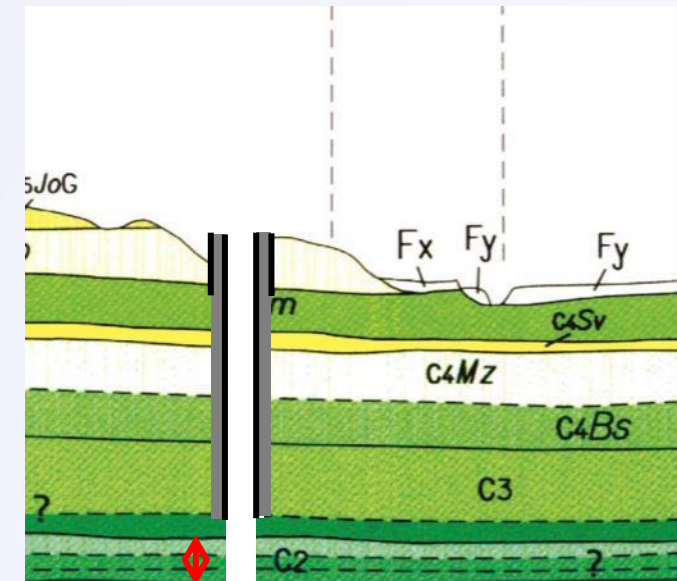
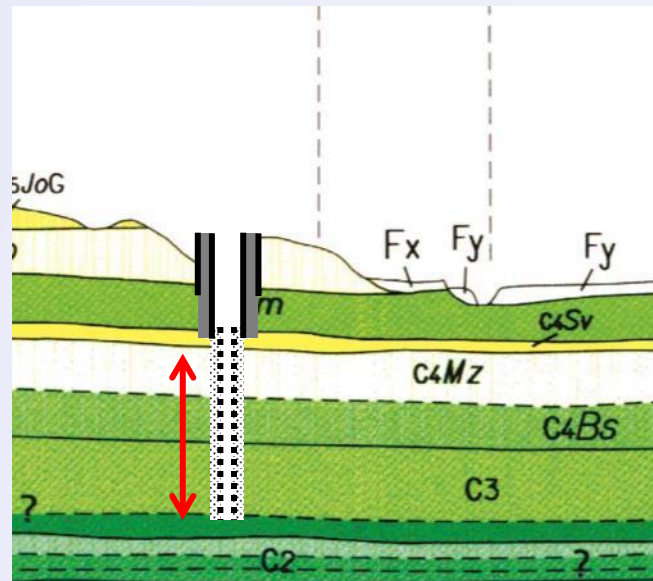
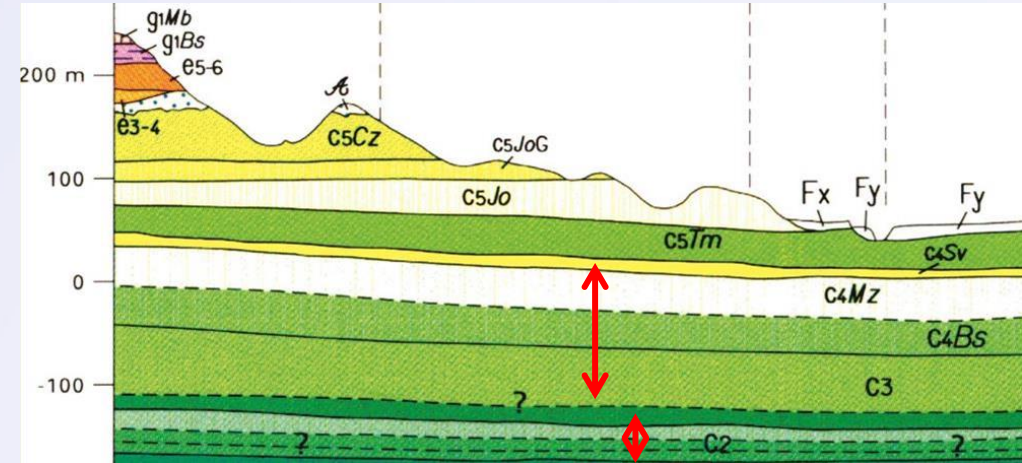
La première question à se poser... Selon les connaissances

- Forage unique avec chantier en 2 phases ?
 - Reconnaissance = confrontation des hypothèses à la réalité
Les incertitudes seront restreintes si on dispose déjà d'un forage de reconnaissance
 - Equipement en ouvrage d'exploitation = adaptation de la configuration du forage à cette réalité
- Forage de reconnaissance dissocié du forage d'exploitation ?

Quel programme de forage ?

Exemple de questionnement

- Plusieurs options possibles



Forages d'eau

6. Conception – dimensionnement

6.3. Dimensionnement

Paramètres dimensionnants

Les critères à respecter...

Le dimensionnement d'un forage peut résulter de multiples itérations pour fixer le compromis optimal entre l'ensemble des critères techniques (+ coût !) :

- Impératif d'isolation des nappes traversées
- Résistance mécanique des tubages
- Résistance des ciments
- Vitesse ascensionnelle dans les tubages $< 1,5$ m/s
- Diamètre de la pompe d'exploitation
- Vitesse d'entrée dans les crépines (< 3 cm/s)
- Profondeur de la pompe immergée
- Résistance des tubages à la corrosion
- Granulométrie optimale du massif filtrant
- Double pompe en sécurité ?
- Fonction du forage : pompage, réinjection / réversibilité ?
- Nécessité de surpression en tête (réinjection) ?

Etablissement de la coupe technique

Démarche préconisée

- Coupe géologique prévisionnelle
- Sur la base du débit prévisionnel
 - encombrement de la pompe
 - diamètre de la chambre de pompage (en gal $\varnothing_{\text{pompe}} + 2''$)
 - diamètre des crépines ($v_{\text{ascendante}}$)
 - % d'ouverture et longueur crépinée ($v_{\text{entrée}} < 3 \text{ cm/s}$)
- Dimensionnement des éléments tubulaires en remontant vers la surface
 - Cotes
 - Diamètres (+ épaisseurs)
- Choix des modalités de forage
 - Diamètres : prises en compte des annulaires minimum (massif filtrant, cimentation)
 - Techniques adaptées à la lithologie / aux objectifs
- Estimation des volumes de matériaux

Conséquences d'une conception défectueuse

ETAPE DE LA CONCEPTION	TYPE DE RISQUE
CONCEPT D'ENSEMBLE DU CAPTAGE ERRONE	- Toutes possibilités d'incidents en cours de réalisation comme en cours d'exploitation, - Résultats aléatoires.
CHOIX DES MATERIAUX INADAPTES	- Vieillesse prématuré, - Corrosion, - Résistance mécanique insuffisante - Risques de déformations.
CONCEPTION DE LA PARTIE CAPTANTE INADAPTEE A LA FORMATION	- Pertes de charge trop élevées - Réduction de débit, - Corrosion, - Ensalement, - Colmatage, - Ecrasement, - Durée de vie de l'ouvrage aléatoire.
CHOIX DES MOYENS D'EXECUTION DE L'OUVRAGE MAL APPREHENDED	- Risque d'incidents en cours de forage, - Difficultés de stimulation et de développement, - Résultats aléatoires.
ABSENCE DE CONTROLE D'EXECUTION OU CONTROLE INSUFFISANT	- Exécution non conforme au programme, - Etanchéité défectueuse, - Crépine mal placée, - Verticalité douteuse, - Incidents d'exécution non rapportés ou décelés, - Coupe géologique erronée, - Matériaux non conformes.
PROCEDURE D'ESSAIS INSUFFISANTE	- Interprétation incomplète, - Absence de consignes d'exploitation.

Forages d'eau

6. Conception – dimensionnement

6.4. Contraintes opérationnelles

Contraintes opérationnelles

A ne surtout pas négliger...

- Propriété
- Emprise disponible, projets autres
- Voisinage, milieu urbain
- Accessibilité
- Travaux en sous-sol
- Coactivité
- Rejets
- Adduction d'eau
- Contraintes environnementales



Contraintes opérationnelles

Quelle emprise de chantier ?

- Foreuse en place :
 - MFT / Rotary sur porteur : 12 x 2,5 m
 - MFT / Rotary sur chenilles : 6-8 x 2,5 m
- Compresseur >20 bars : 6 x 2,5 m
- Tiges
- Bacs (circulation, décantation) / pompes / tamis
- Aire de manœuvre
- Aire de stockage (cimentation, matériaux, outils, pompage)
- Module atelier / vestiaire / bureau
- Stationnement véhicule (léger + porteur)

(indicatif évidemment...)

Contraintes opérationnelles

Quelle emprise de chantier ?

- Exemple : rotary à 100 m



400 m² environ



Contraintes opérationnelles

Quelle emprise de chantier ?

- Exemple : piézomètres à 15 m

Bord de route

= autorisations voirie / signalétique...

+ aires de stationnement



Contraintes opérationnelles

Quelle emprise de chantier ?

- Exemple : reconnaissance à 10 m (tarière – fonçage)

250 m² environ



© J. BARRIERE



© J. BARRIERE

Contraintes opérationnelles

Quelle emprise de chantier ?

- Exemple : rotary / carottage à 200 m

500 m² environ



Contraintes opérationnelles

Quelle emprise de chantier ?

- Exemple : MFT à 300 m

*400 m² environ
+ aire de stockage extérieure*



Contraintes opérationnelles

Quelle emprise de chantier ?

- Exemple : rotary à 1 200 m



2 000 m² environ

Forages d'eau

6. Conception – dimensionnement

6.5. Le cahier des charges

Le cahier des charges

6 chapitres préconisés :

(cf. Cahier des Clauses Techniques Générales – Fascicule 76, pour les travaux de forage pour la recherche et l'exploitation d'eau potable)

- 1- Indications générales
- 2- Spécifications des matériaux et des matériels
- 3- Mode d'exécution des travaux
- 4- Opérations préalables à la mise en service du forage d'exploitation
- 5- Contrôles en cours d'exécution et opérations préalables à la réception des travaux
- 6- Documents à établir.

C'est une proposition... D'autres plans sont possibles évidemment...

Le cahier des charges

Contenu préconisé

1- Indications générales (localisation, maîtrise d'ouvrage, objectif des travaux, maîtrise d'œuvre, etc...), **y compris contraintes d'accès / implantation**

2 – Spécification des matériaux et des matériels

Colonne de captation, colonne de protection (soutènement), tête de puits, espaces annulaires, équipements spécifiques.

Toute spécification implique d'en assumer la responsabilité
(par exemple pour l'épaisseur des tubages et leur adéquation avec la résistance mécanique)

Le cahier des charges

Contenu préconisé

3 – Mode d'exécution des travaux

- Organisation du chantier
 - ✓ Implantation de l'ouvrage
 - ✓ Installation du chantier
 - ✓ Lutte contre les nuisances
 - ✓ Déclaration des travaux de forage (qui fait quoi ?)
- Réalisation des travaux
 - ✓ Plan d'exécution : coupe prévisionnelle, chronogramme si contrainte spécifique
 - ✓ Méthode de forage, outils, fluides (si imposé, ce qui n'est généralement pas nécessaire),
 - ✓ Echantillonnage (cuttings, carottage, eau),
 - ✓ Mentionner les contrôles (verticalité, diagraphies, cimentation) qui sont décrits au chapitre 5.

Identifier clairement
toute contrainte
singulière liée au site

Distinguer clairement
ce qui est imposé de
ce qui est suggéré,
voir laissé à la
proposition de
l'entreprise de forage

Le cahier des charges

Contenu préconisé

3 – Mode d'exécution des travaux (suite)

- Soutènement des terrains :
 - ✓ Mise en place des tubes pleins **avec centreurs**
 - ✓ Eventuellement position des raccords et joints (diélectriques)
- Cimentation
 - ✓ Spécifier qu'elle **doit** se faire par le bas (sous pression).
 - ✓ Alerter l'entrepreneur s'il y a risque de pertes.
- Colonne captante
 - ✓ Centreurs, raccordements, contrainte sur la verticalité.
- Tête de puits
 - ✓ Spécifier l'aménagement souhaité
 - ✓ Exigences particulières pour monitoring (crochet, tube guide-sonde...)
- Remise en état des lieux

Le cahier des charges

Contenu préconisé

4 – Opérations préalables à la mise en production

- Nettoyage (eau, défloculant, air)
- Développement : si nécessaire décrire les méthodes à employer en fixant des durées minimales, et les modalités de contrôle (teneur en sable ou en MES).
- Essai de puits (pompage par paliers) : 3 ou 4 paliers de débits croissants séparés par une durée équivalente de repos.
- Essai de nappe (pompage longue durée ≥ 72 h) : désinfection du matériel de pompage, durée.
- Insister si nécessaire sur les contraintes logistiques de rejet : éloignement du point de rejet, autorisations, contraintes environnementales.
- Fixer les modalités de mise en œuvre : capacité de la pompe, modalités de suivi (paramètres, points, fréquence)
- Prélèvement d'eau pour analyse: fixer les modalités (généralement mentionner qu'un opérateur passera prélever, et éventuellement doit avoir un robinet à disposition).

Le cahier des charges

Contenu préconisé

5 - Contrôles en cours d'exécution et opérations préalables à la réception des travaux.

- Contrôles (par le superviseur ou sur son ordre) : nature des terrains traversés, profondeurs, conformité des équipements
- Diagraphies, contrôles de cimentation, inspection endoscopique (par une société sous-traitante)
- Paramètres de forage (poids sur l'outil, vitesse d'avancement, pression d'injection du fluide, densité, viscosité, volumes et densité de ciment, gravillonnage, heures de soufflages, etc...) à consigner par le foreur dans un carnet de chantier à disposition du maître d'œuvre / maître d'ouvrage

6 – Documents à établir

- Le cahier de chantier avec compte rendu journalier
- Le rapport de forage avec plan et coupe de l'ouvrage exécuté.

Détail Quantitatif Estimatif

Exemple (1/3)

Items	Désignation des opérations	Unité	Prix unitaire (€ HT)	Qtté	Total (€ HT)
	Installation				
1.1	DICT - Réalisation de pré-fouilles	forfait		1	
1.2	Réalisation d'un plan d'alerte	forfait		1	
1.3	Terrassement / Confection d'une plateforme de travail	forfait		1	
1.4	Mise en place d'une signalisation de chantier	forfait		1	
1.5	Amené/Repli du matériel	forfait		1	
1.6	Plus-value citernage	forfait		1	
1.7	Déplacement de l'atelier du forage profond au piézomètre	forfait		1	
1.8	Nettoyage et remise en état du site après travaux	forfait		1	
	Forage de reconnaissance				
2.1	Foration à un diamètre nominal Ø24", y compris échantillonnage géologique	m		10	
3.1	Fourniture et installation tubage plein acier Ø20", dans trou Ø24"	m		10	
5.1	Cimentation sous pression de l'avant-trou - mise en oeuvre	forfait		1	
5.2	Cimentation sous pression de l'avant-trou - fourniture	m3		0,8	
5.6	Stand-by - attente de prise de ciment (48 h)	forfait		1	
2.3	Foration à un diamètre nominal Ø8"3/4, y compris échantillonnage géologique	m		230	
8.1	Developpement / nettoyage par Air-lift - mise en oeuvre	forfait		1	
8.2	Developpement / nettoyage par Air-lift - fonctionnement	h		10	
	Caractérisation et essais hydrauliques				
6.2	Diagraphies résistivité gamma-ray, résistivité et diamétreur - mise en oeuvre, fourniture du rapport et données	forfait		1	
6.3	Diagraphies résistivité gamma-ray, résistivité et diamétreur - réalisation	ml		240	
6.4	Diagraphie de flux au repos - mise en oeuvre, fourniture du rapport et données	forfait		1	
6.5	Diagraphies de flux au repos - réalisation	ml		240	
3.3	Fourniture et installation tubage provisoire Ø180mm, puis retrait après les caractérisations	m		100	
6.6	Diagraphie de flux en pompage - mise en oeuvre (y compris pompe immergée), fourniture du rapport et données	forfait		1	
6.7	Diagraphies de flux en pompage - réalisation	ml		240	
6.8	Installation d'une pompe d'essai 6" et équipements de suivi, mise en oeuvre du pompage, démontage en fin de pompage	forfait		1	
6.9	Pompage par paliers - fonctionnement et suivi	h		4,5	
6.10	Pompage longue durée - fonctionnement et suivi	h		24	

Détail Quantitatif Estimatif

Exemple (2/3)

		Développement par acidification				
	8.4	Acidification - mise en œuvre : préparation, descente et ancrage tiges et packer, injection, attente, purge, gestion des	forfait		1	
	8.5	Acidification - fourniture d'acide chlrohydrique	m3		3	
	8.1	Developpement / nettoyage par Air-lift - mise en œuvre	forfait		1	
	8.2	Developpement / nettoyage par Air-lift - fonctionnement	h		20	
	6.8	Installation d'une pompe d'essai et équipements de suivi, mise en œuvre du pompage, démontage en fin de pompage	forfait		1	
	6.9	Pompage par paliers - fonctionnement et suivi	h		4,5	
	6.10	Pompage longue durée - fonctionnement et suivi	h		24	
		Option 1. Equipement en forage d'exploitation				
	2.4	Alésage de diamètre Ø8"3/4 à Ø17"1/2, avec pilote	m		90	
	3.2	Fourniture et installation tubage plein acier Ø13"3/8, dans trou Ø 17"1/2	m		100	
	5.7	Obturation préalable de la partie inférieure du forage	forfait		1	
	5.3	Cimentation sous pression par sabot et stinger - mise en oeuvre	forfait		1	
	5.4	Cimentation sous pression par sabot et stinger - fourniture	m3		6	
	5.6	Stand-by - attente de prise de ciment (48 h)	forfait		1	
	5.8	Réouverture du forage et contrôle jusqu'au fond	forfait		1	
	8.1	Developpement / nettoyage par Air-lift - mise en œuvre	forfait		1	
	8.2	Developpement / nettoyage par Air-lift - fonctionnement	h		10	
	8.3	Désinfection du forage par solution d'hypochlorite de sodium	forfait		1	
		Option 1.2. Equipement crépines fil enroulé et massif additionnel				
	7.4	Fourniture et pose tube inox plein 316L Ø 219mm	m		12	
	7.5	Fourniture et pose tube inox crépiné (fil enroulé) 316L Ø 219mm	m		138	
	7.6	Fourniture et pose bouchon de fond Ø 219mm	unité		1	
	7.7	Mise en place de gravier calibré siliceux roulé 2,5 / 5 mm	forfait		1	
	7.8	Fourniture de gravier calibré siliceux roulé 2,5 / 5 mm	m3		3,5	
	8.1	Developpement / nettoyage par Air-lift - mise en œuvre	forfait		1	
	8.2	Developpement / nettoyage par Air-lift - fonctionnement	h		10	
		Margelle, protection tête de forage et fermeture				
	9.1	Fabrication margelle de béton	forfait		1	
	9.2	Fourniture et installation tête de forage et fermeture cadenas forestier	forfait		1	

Example (3/3)

J. BARRIERE / A. GUTIERREZ – Cours Forage d'eau - Unilasalle

Choix du mode de contractualisation

Chantier au forfait et chantier en régie

○ Chantier au forfait (le plus fréquent)

- L'entreprise de forage gère les opérations de forage (décisions techniques)
- Elle a une obligation de résultat (+ conditions de performance)
- Le maître d'ouvrage est dégagé d'une partie du risque opérationnel
- Facturation sans notion de temps passé :
 - ✓ Forage et tubages au mètre linéaire
 - ✓ Matériaux à la quantité mise en œuvre
 - ✓ Forfait par opération

○ Chantier en régie

- Le maître d'œuvre pilote les travaux : supervision permanente (il doit donc avoir les compétences nécessaires...)
- L'entreprise de forage a une obligation de moyens
- Le maître d'ouvrage supporte le risque opérationnel
- Facturation : au moyens mis en œuvre + temps

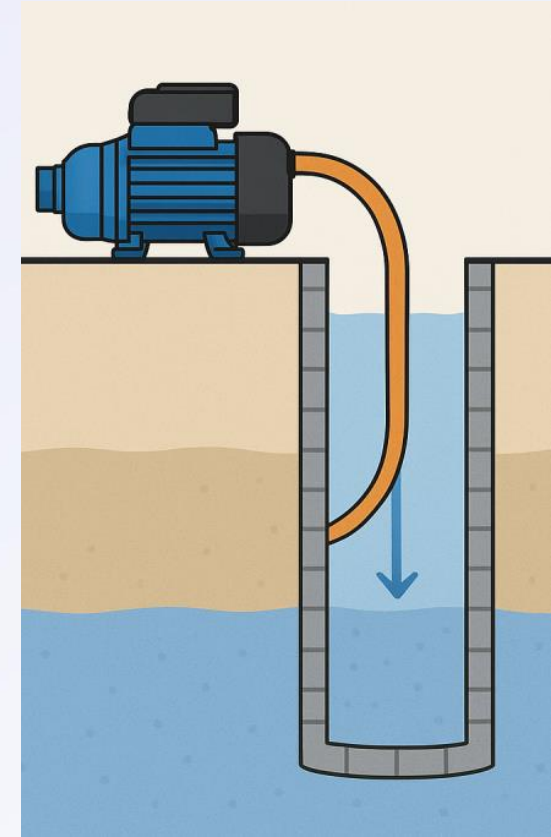
Forages d'eau

7. Equipements de pompage

Principaux types de pompes

Pompe de surface

- Hauteur d'aspiration
 - En théorie : 10,33 m à la pression atmosphérique, au niveau de la mer, pour une eau à 0°C
 - En pratique : 7-8 m maxi, du fait des pertes de charge (canalisations et pompe), et selon l'altitude, la température et la viscosité
- Principaux atouts
 - Logistique : installation, maintenance
 - Budget
- Principaux inconvénients
 - Restreinte aux captages peu profonds
 - Bruit
 - Vigilance sur le refroidissement

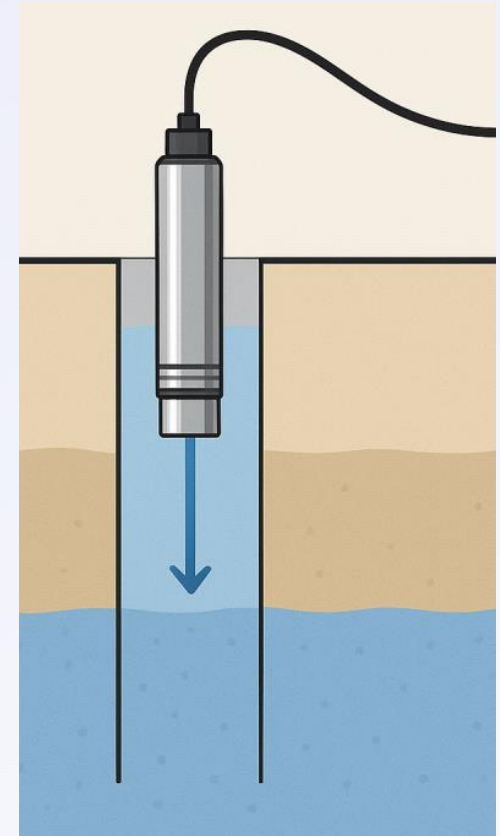


Source : www.rs-pompes.com

Principaux types de pompes

Pompe immergée

- Principe
 - Installée en profondeur
 - Refoulement ("pousse" l'eau au lieu de l'aspirer)
- Principaux atouts
 - Adaptée à toute profondeur
 - Efficacité énergétique
 - Refroidissement naturel
 - Protection contre intempéries
- Principaux inconvénients
 - Logistique : installation, maintenance
 - Budget

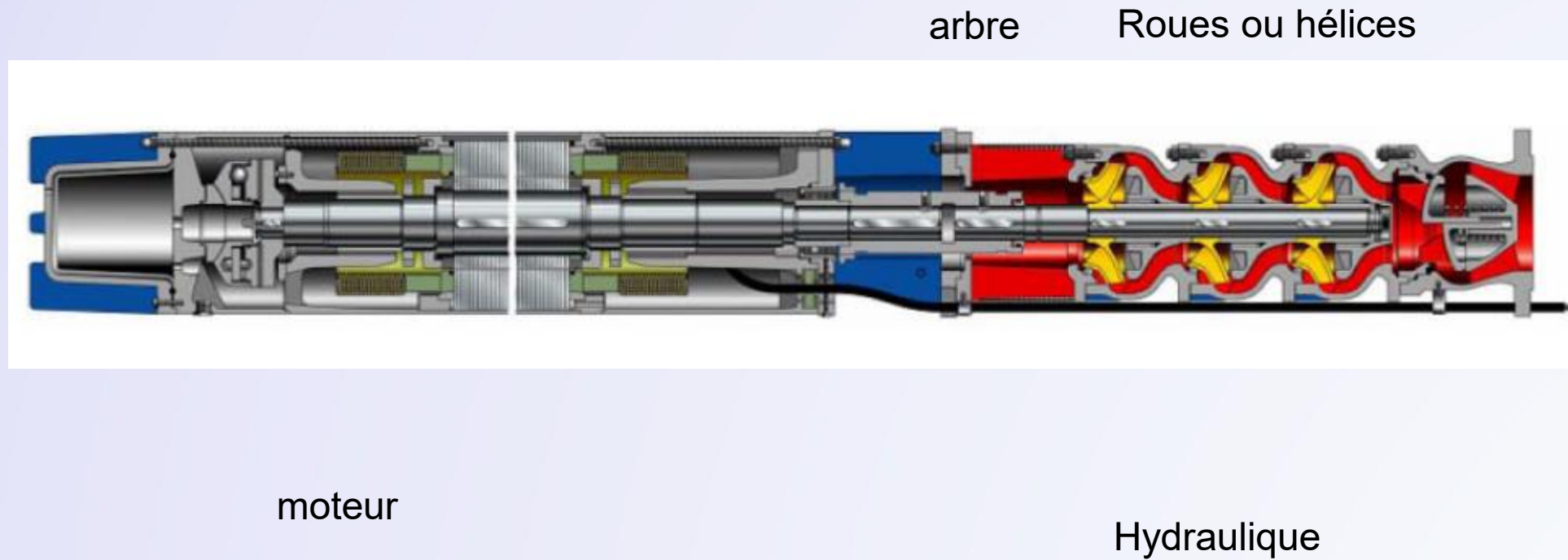


Source : www.rs-pompes.com

Pompes immergées

Constitution

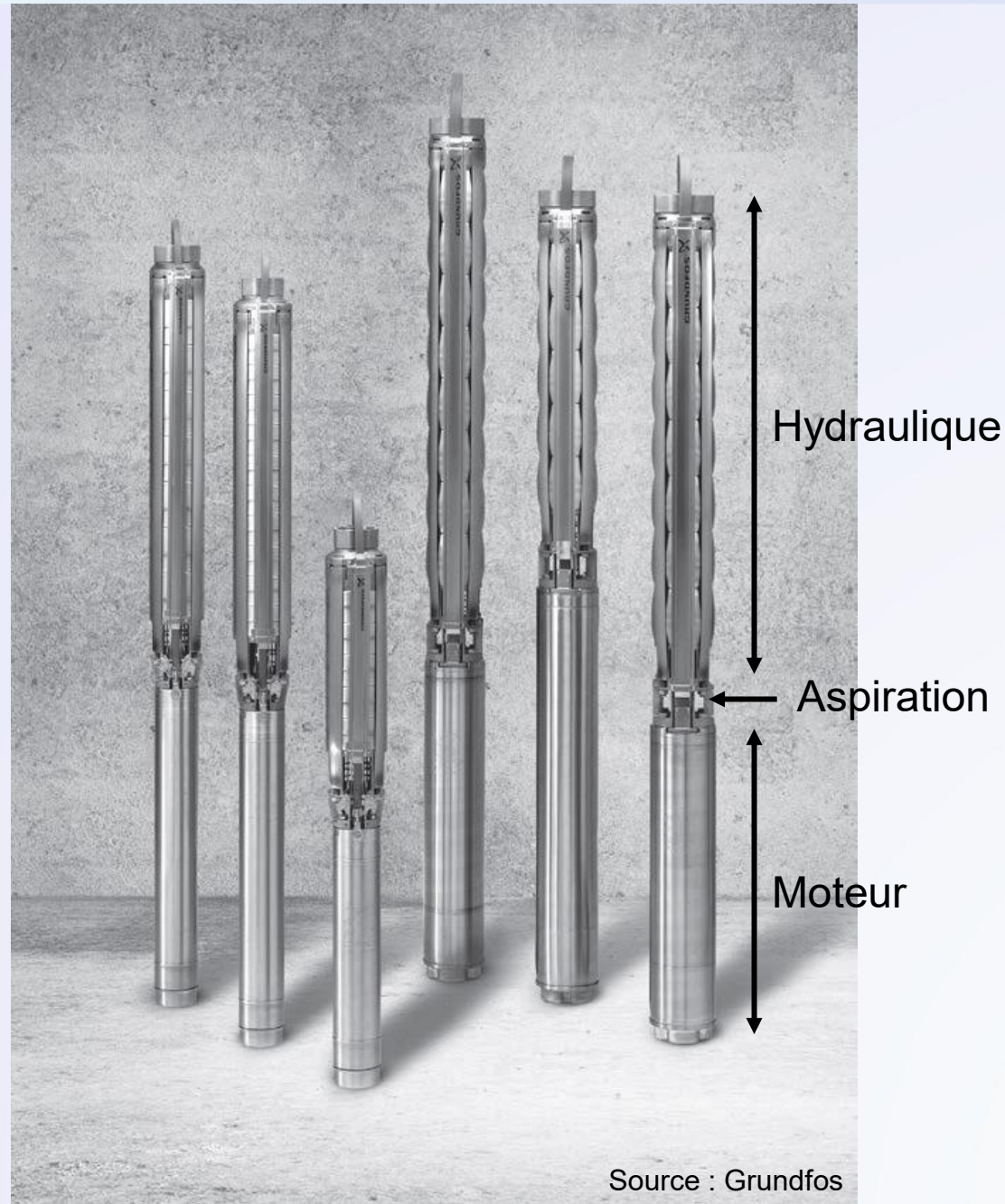
- Schéma



KSB UPA 150

Pompes immergées

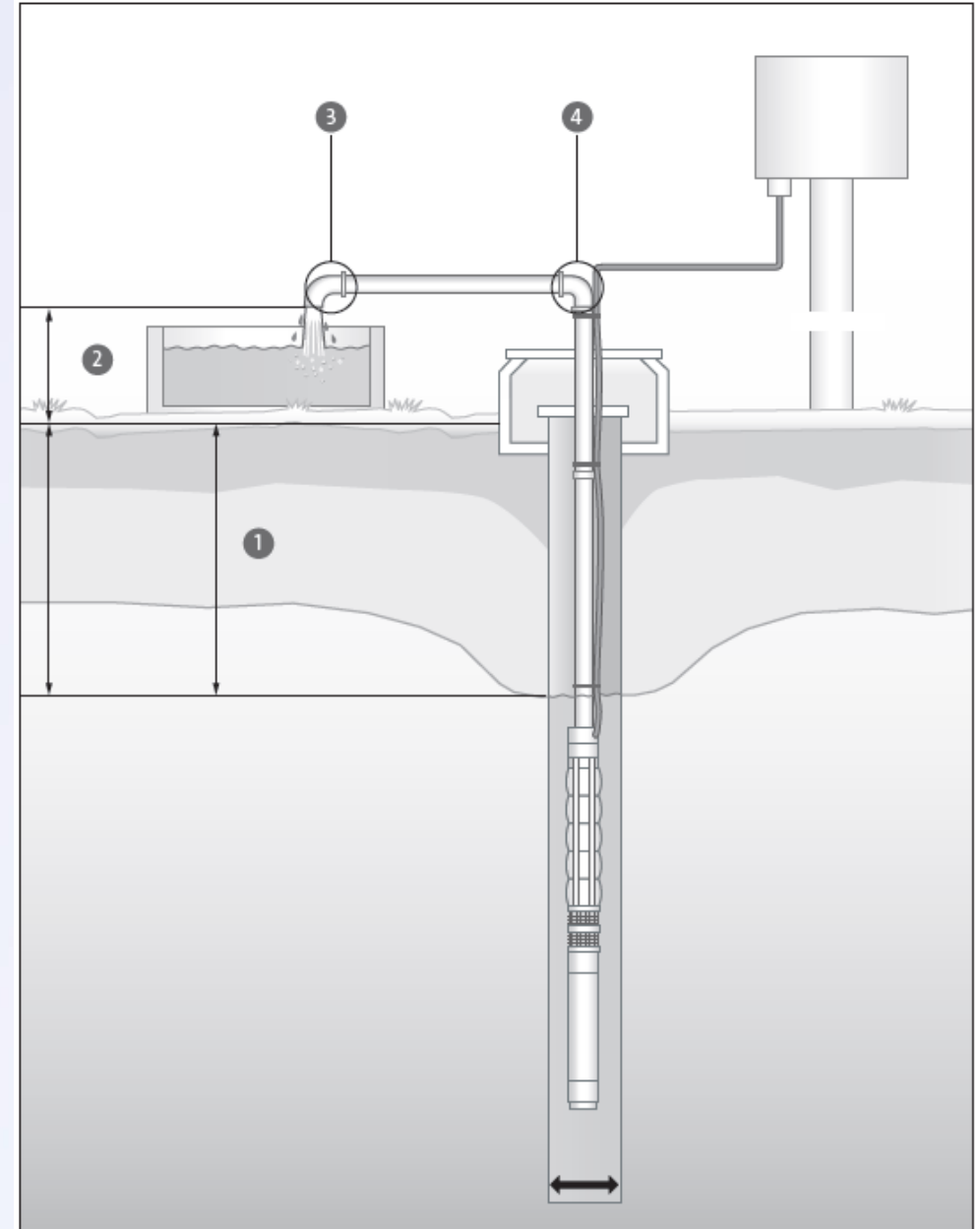
Constitution



Pompes immergées

Dimensionnement

- Hauteur manométrique totale = somme de :
 - Hauteur géométrique :
 - ✓ Profondeur du niveau dynamique (1)
 - ✓ Hauteur de refoulement (2)
 - Pression de refoulement
 - Pertes de charge dans les canalisations



Source : Grundfos

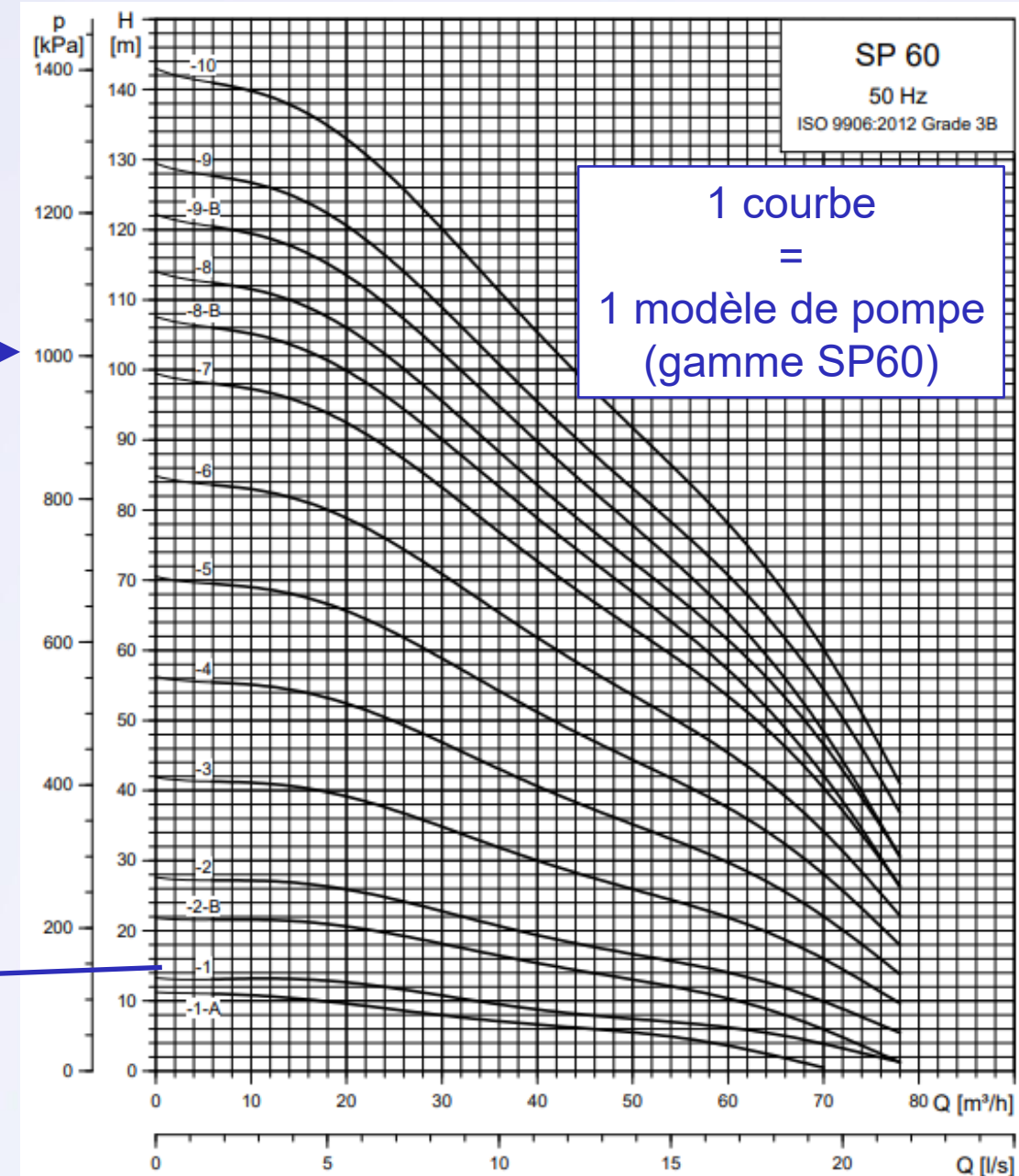
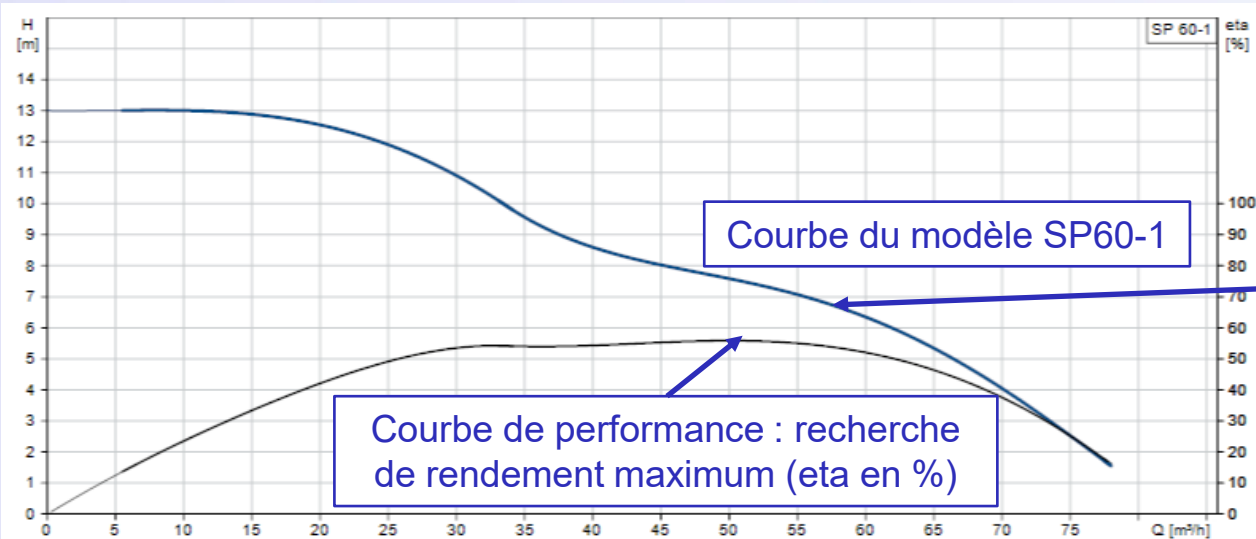
Pompes immergées

Dimensionnement

○ Choix de la pompe

- 1. Couple débit / hauteur manométrique : choix du/des modèle(s) hydrauliquement compatibles
- 2. Courbes de performances / efficacité (eta) : choix du modèle le plus approprié

$$\eta_{\text{total}} = (Q \times H \times 9,81) / (P1 \times 3\,600)$$



Pompes immergées

Profondeur d'installation

- NPSH : Net Positive Suction Head (hauteur d'aspiration positive nette)
 - Hauteur minimale au-dessus de la pompe pour éviter les phénomènes de cavitation
 - Cavitation = dommages potentiels à la pompe et au moteur
 - Fournie par le fabricant, propre à chaque modèle

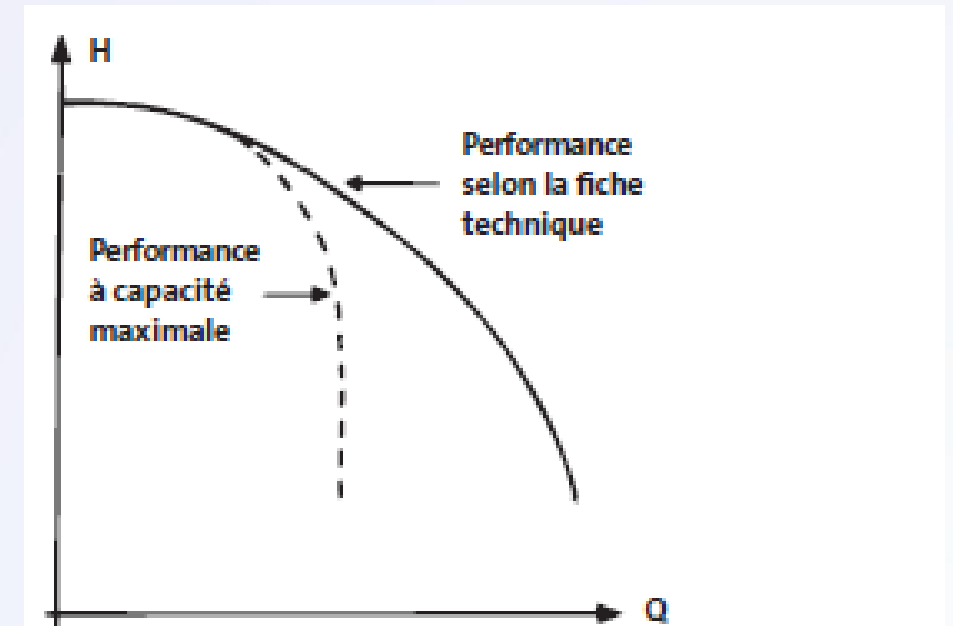


Figure 17 Réduction de performance due à la cavitation

Source : Grundfos

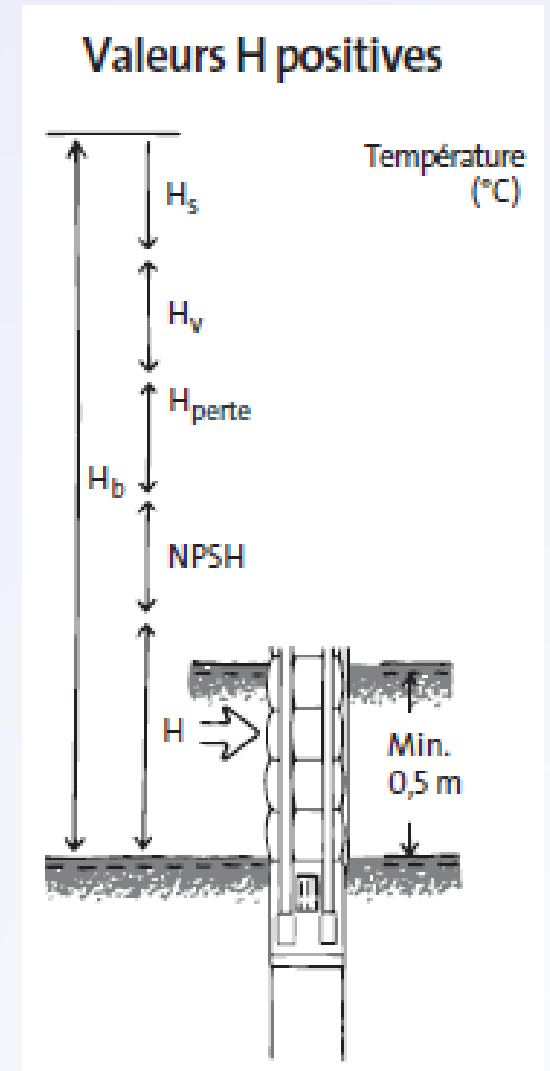
Pompes immergées

Profondeur d'installation

- Profondeur d'installation par rapport au niveau dynamique (m)

$$H = H_b - \text{NPSH} - H_{\text{perte}} - H_v - H_s$$

- H_b : pression barométrique
- H_{perte} : perte de pression dans le tuyau d'aspiration
- H_v : pression de vapeur (fonction de la température)
- H_s : facteur de sécurité



Source : Grundfos

Pompes immergées

Profondeur d'installation

- Profondeur d'installation par rapport au niveau dynamique (m)

$$H = H_b - \text{NPSH} - H_{\text{perte}} - H_v - H_s$$

- H_b : pression barométrique
- H_{perte} : perte de pression dans le tuyau d'aspiration
- H_v : pression de vapeur (fonction de la température)
- H_s : facteur de sécurité

Exemple :

- $H_{\text{perte}} + H_s = 4,5 \text{ m}$
- $\text{NPSH} = 8 \text{ m}$
- $T = 10^\circ\text{C}$

→ Installation au minimum 4 m sous le niveau dynamique

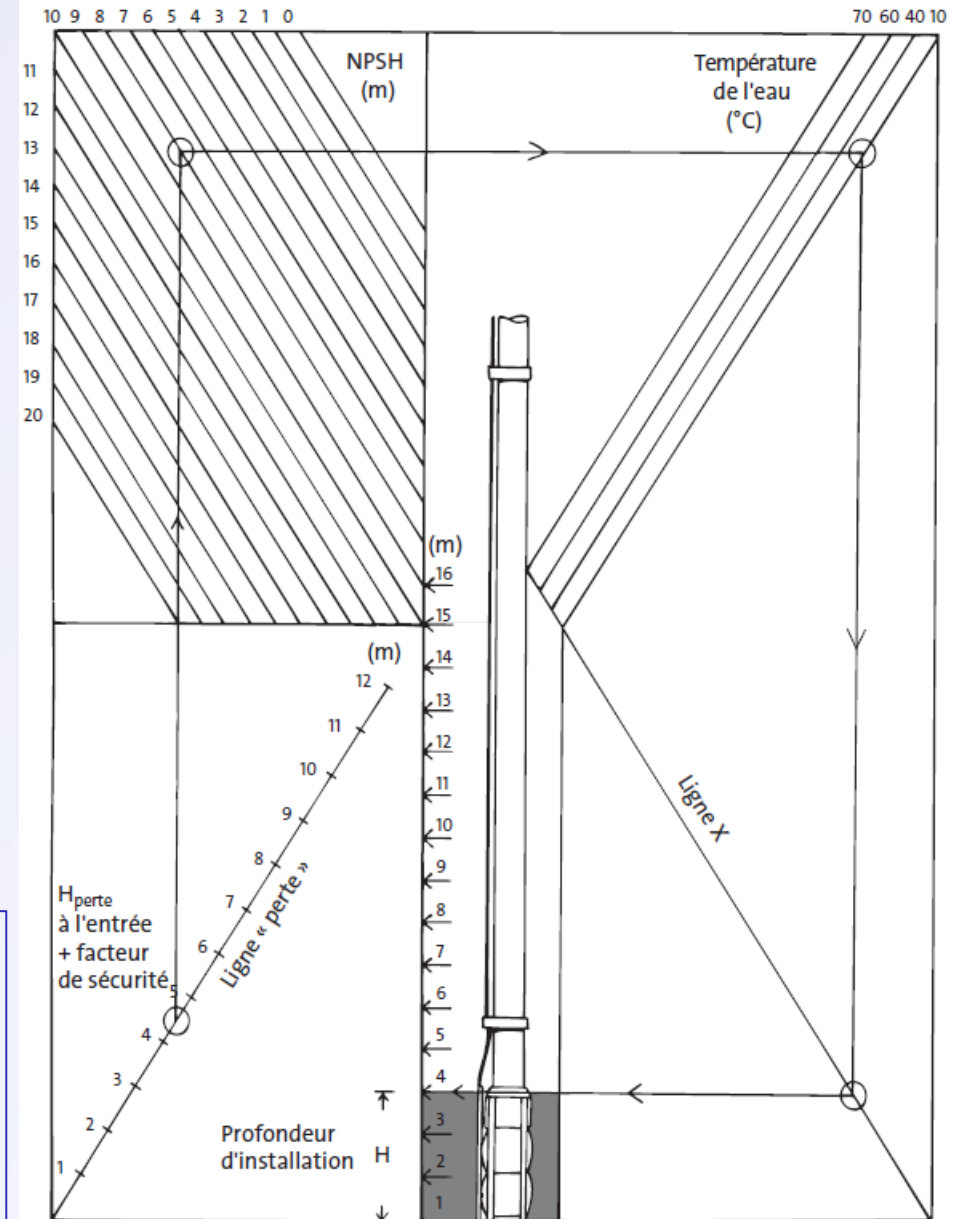


Figure 18 Schéma de calcul rapide de la profondeur d'installation minimale

Source : Grundfos

Forages d'eau

8. Réglementation

Forages d'eau

8. Réglementation

8.1. Etat actuel

Réglementations applicables ?

Elles sont multiples pour les forages d'eau...

- Textes divers :
 - Code minier
 - Code de l'environnement
 - Code de la santé publique
 - Code des collectivités territoriales
 - Arrêtés ministériels
- Textes applicables en fonction de :
 - Profondeur (code minier, géothermie)
 - Statut (ICPE ou non)
 - Quantité d'eau prélevée
 - Usage
 - Localisation (ZRE ou non)
- Attention, la réglementation évolue...

Dans le présent cours,
seule la réglementation
relative à la réalisation
des forages sera traitée

Code Minier

- TOUS les ouvrages souterrains de profondeur > 10m (article 131 / article L411-1 du nouveau Code Minier)
- Pour les ouvrages relevant de la nomenclature 1.1.1.0 "Loi sur l'Eau", le Code Minier précise (Art. L.411-3) :
 - « *Les demandes d'autorisations et les déclarations prévues par l'article L. 214-3 du code de l'environnement valent déclaration au titre de l'article L. 411-1 du présent code.* »
- La responsabilité de la déclaration relève du propriétaire de l'ouvrage et du foreur intervenant pour son compte (responsabilité conjointe pouvant être recherchée en cas de désordres constatés)

Code de l'environnement ("Loi sur l'eau")

- **Code de l'environnement**
- Article L 214-1
- Toutes Installations, Ouvrages, Travaux et Activités (IOTA) susceptibles de présenter des nuisances pour l'eau sont soumises à autorisation ou à déclaration en fonction du degré de dangerosité qu'elles représentent.
- Nuisances :
 - Prélèvements sur les eaux
 - Modifications de niveau ou des écoulements des eaux
 - Déversements, rejets, dépôts directs ou indirects, même non polluants



Code de l'environnement ("Loi sur l'eau")

Régime de déclaration (D) ou autorisation (A)

- **Déclaration** : tous travaux de forage (rubrique 1.1.1.0.) pour la **recherche**, la **surveillance** ou le **prélèvement** d'eau souterraine
- **Autorisation** : forages réalisés
 - dans les périmètres de protection rapprochée des captages destinés à l'alimentation humaine
 - dans les périmètres de protection des sources d'eaux minérales déclarées d'intérêt public (décret 2006-881 du 17 juillet 2006)
- **Déclaration / autorisation** : forages d'exploitation au titre du prélèvement

Code de l'environnement ("Loi sur l'eau")

Rubrique 1.1.1.0

○ Ouvrages concernés :

- Tous les forages **non domestiques** destinés à prélever l'eau (**> 1 000 m³/an**)
- Tous les ouvrages destinés à la mesure ou au suivi des eaux souterraines
- Sondages et forages de reconnaissance effectués dans le cadre de la **recherche d'eau** y compris ceux infructueux
- Forages effectués pour un **rabattement de nappe** dans le cadre d'un chantier de génie civil, d'ouvrage routier en tranchée
- Forages effectués au titre de la **surveillance quantitative ou qualitative** des eaux souterraines

○ Texte d'application majeur : Arrêté "forages" du 11 septembre 2003

Code de l'environnement ("Loi sur l'eau")

Rubrique 1.1.1.0.

○ Ouvrages non concernés :

- forages de **reconnaissance géotechnique**
- forages effectués dans le cadre de l'exploitation de gîtes géothermiques, de la **recherche** ou de l'**exploitation minières**, ceux relatifs au stockage souterrain de gaz, hydrocarbures et produits chimiques
- les **forages géothermiques** pour le chauffage ou la rafraîchissement relèvent désormais (2015) uniquement du code minier.
- les forages destinés à la **réinjection d'eau** dans un aquifère
- les forages destinés aux prélèvements d'eau nécessaires au fonctionnement des **installations classées**, à la surveillance de leurs effets, au traitement des sols contaminés
- les forages effectués dans le cadre de la surveillance et de la dépollution des **sites et sols pollués**

Code de l'environnement ("Loi sur l'eau")

L'arrêté forage du 11 septembre 2003 : implantation



○ Prévenir :

- Surexploitation, perturbation (niveau, écoulement)
- Risque de pollution (depuis la surface ou par mélange entre aquifères)

○ Prendre en compte :

- Restrictions / interdictions : SAGE, PPR, PP-AEP, PP-EM, PP stockages souterrains de gaz, d'hydrocarbures ou de produits chimiques, anciens sites industriels et activités de service
- Canalisations et réseaux enterrés (D.I.C.T.)

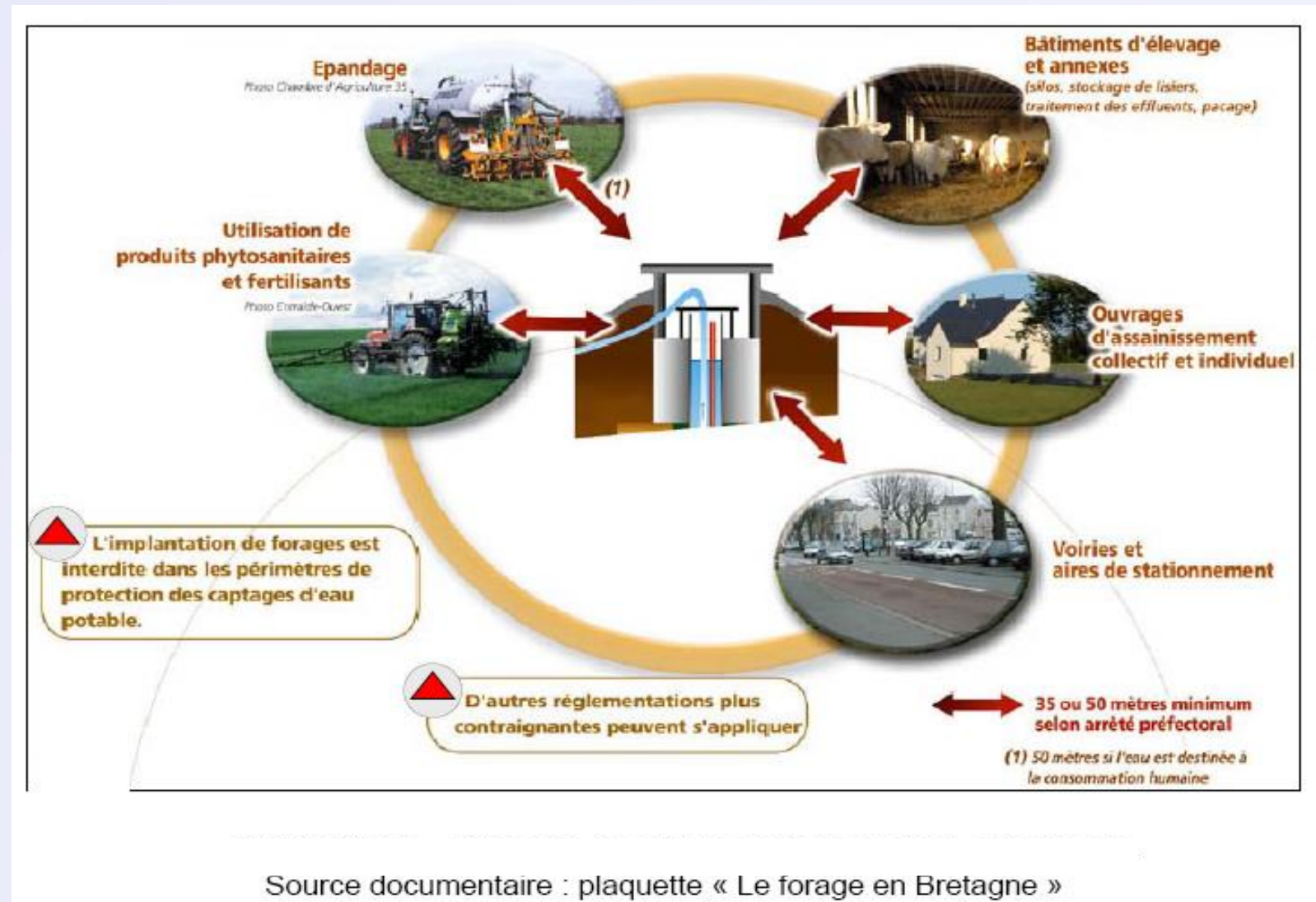
○ Prévoir :

- Maîtrise des eaux de ruissellement
- Prévention de toute accumulation d'eau (35 mètres autour de la tête du forage)

Code de l'environnement ("Loi sur l'eau")

L'arrêté forage du 11 septembre 2003 : implantation

- Conditions d'implantation



Code de l'environnement ("Loi sur l'eau")

L'arrêté forage du 11 septembre 2003 : implantation

- Contraintes de proximité par rapport à des sources de pollutions :
 - 200 m des décharges et stockages de déchets
 - 35 m des ouvrages d'assainissement
 - 35 m des stockages d'hydrocarbures, de produits chimiques, de produits phytosanitaires
- Contraintes particulières dans le cas d'un forage pour l'AEP ou pour l'arrosage des cultures maraîchères :
 - 35 m des bâtiments d'élevage et annexes
 - 50 m des parcelles potentiellement concernées par l'épandage des déjections animales et effluents d'élevage d'IC
 - 35 m si la pente du terrain $< 7 \%$ ou 100 m si elle $> 7 \%$ pour des parcelles concernées par l'épandage de boues issues des STEP ou de déchets issus d'ICPE

Code de l'environnement ("Loi sur l'eau")

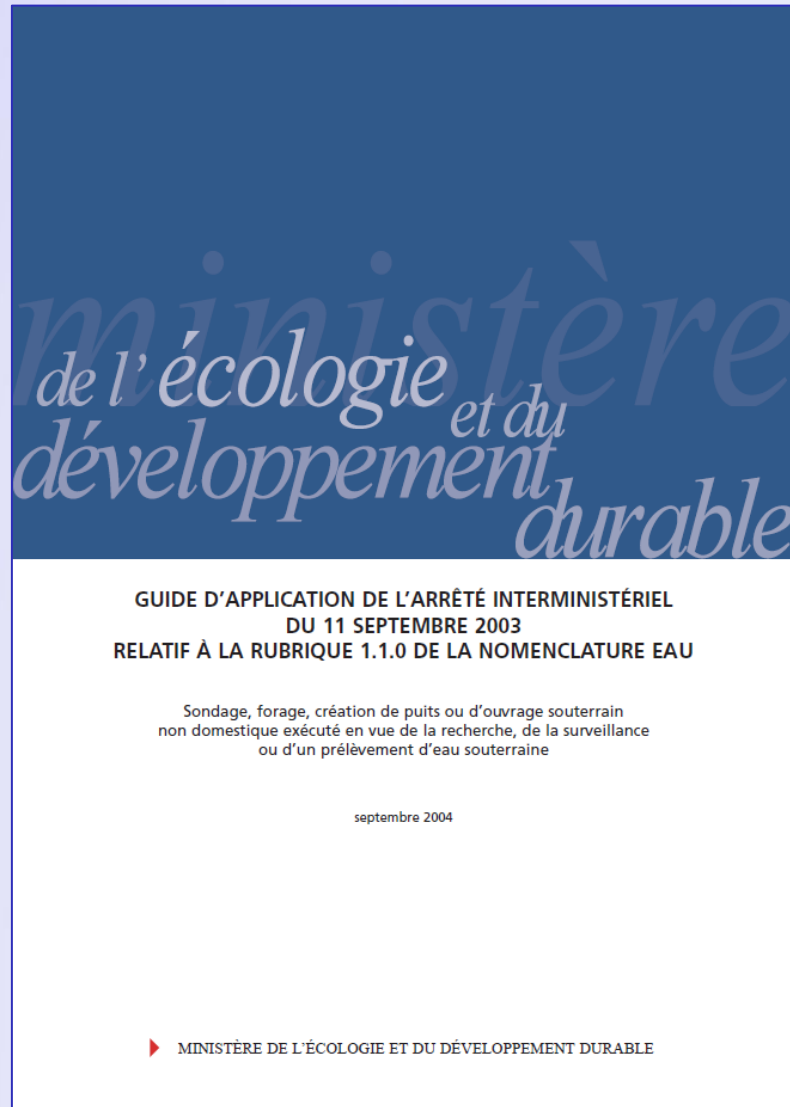
L'arrêté forage du 11 septembre 2003 : inspection périodique

- Pour les forages :
 - Situés dans les périmètres de protection de captages AEP
 - Traversant plusieurs nappes
- Conditions :
 - minimum tous les dix ans
 - vérifier l'état et la corrosion des matériaux tubulaires (cuvelages, tubages...)
 - vérifier l'étanchéité de l'installation concernée
 - vérifier l'absence de communication entre les eaux prélevées ou surveillées et les eaux de surface ou celles d'autres formations aquifères interceptées par l'ouvrage
- Compte rendu au préfet dans un délai de 3 mois



Code de l'environnement ("Loi sur l'eau")

L'arrêté forage du 11 septembre 2003 : guide d'application



Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11/9/2003 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau : sondage, forage, puits, ouvrage souterrain non domestique

Fiche 7 – Equipement de la tête d'un forage

Dispositions techniques spécifiques de l'arrêté « forage » du 11 septembre 2003 (article 8).

Réalisation d'une margelle bétonnée

- Conçue de manière à éloigner les eaux de la tête du forage
- Surface minimale de 3 m²
- Hauteur de 0,30 m au-dessus du niveau du terrain naturel

Réalisation éventuelle d'un local ou d'une chambre de comptage

- La margelle n'est pas dans ce cas nécessaire
- La hauteur du plafond du local est d'au moins de 0,50 m au-dessus du niveau du terrain naturel

Tête du forage

- La tête du forage située à l'extérieur ou dans une chambre de comptage s'élève au moins à 0,50 m au-dessus du terrain naturel ou du fond de la chambre de comptage dans lequel elle débouche
- La tête du forage située dans un local s'élève au moins à 0,20 m au-dessus du fond du local dans lequel elle débouche
- La tête est cimentée sur 1 m de profondeur à partir du sol (niveau du terrain naturel)
- En zone inondable la tête est rendue étanche ou située dans un local lui-même étanche

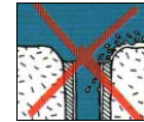
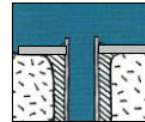


Illustration 13 - La hauteur de la rehausse au-dessus du sol est de 0,50 mètres.
Source documentaire : d'après la plaquette « Des forages de qualité en région Centre »

Capot de fermeture

- Doit permettre un parfait isolement du forage (inondations, pollutions superficielles)
- Dispositif de sécurité interdisant l'accès à l'intérieur du forage

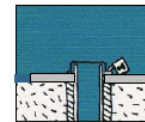
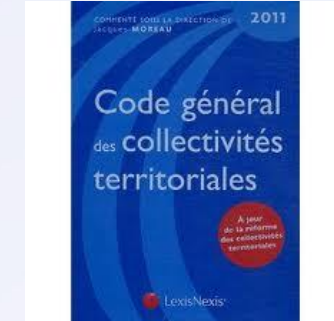


Illustration 14 - Capot de fermeture
Source documentaire : d'après la plaquette « Des forages de qualité en région Centre »

Le Code général des collectivités territoriales

- Déclaration d'ouvrage, prélèvements, puits et forages à usage domestique (article L. 2224-9)
- LEMA (30 déc. 2006) : obligation de **déclarer en mairie** les **ouvrages domestiques** existants ou futurs et à conférer aux services de distribution d'eau potable la possibilité de contrôler l'ouvrage de prélèvement, les réseaux intérieurs de distribution d'eau ainsi que les ouvrages de récupération des eaux de pluie.
- Depuis le 1er janvier 2009, déclaration (ouvrage ou projet) en Mairie.





Déclaration d'ouvrage
Prélèvements, puits et forages à usage domestique
 Au titre de l'article L. 2224-9 du code général des collectivités territoriales
 Pour des travaux prévisionnels ☐ Pour des travaux exécutés ☐

1/2
cerfa
 N° 13837*01

Cette déclaration doit être remplie par le propriétaire de l'ouvrage ou son utilisateur (si différent) et transmise en mairie
 Conformément au décret n°91-1147 du 14 octobre 1991, toute personne désirant réaliser un forage domestique doit se renseigner au préalable auprès de sa mairie sur l'existence et les zones d'implantation éventuelles d'ouvrages souterrains, aériens ou subaquatiques impactés par son projet et envoyer une demande de renseignements (DR) à chacun des exploitants de ces ouvrages afin que les travaux envisagés puissent être exécutés en toute sécurité.

Les
sou
con
la d
qui
Con
vou
sou

Déclaration sur **DUPLOS** depuis le 1^{er} février 2024 :

- Renseignement automatique du CERFA n°13837*02
- Envoi direct en mairie + services de l'Etat

Qualité : Utilisateur ☐ Autre ☐ : _____
 Nom : _____ Prénom : _____
 Raison sociale : _____
 Adresse Numéro : _____ Voie : _____
 Lieu-dit : _____ Localité : _____
 Code postal _____ BP _____ cedex _____
 Téléphone fixe : _____ Portable : _____
 Courriel* : _____ @ _____

3 - Renseignements concernant le maître d'ouvrage (personne ou société qui fait ou a fait réaliser les travaux)

Nom : _____ Prénom : _____
 Raison sociale : _____
 Adresse Numéro : _____ Voie : _____
 Lieu-dit : _____ Localité : _____
 Code postal _____ BP _____ cedex _____
 Téléphone fixe : _____ Portable : _____
 Courriel* : _____ @ _____

4 - Renseignements concernant l'entreprise (personne ou société chargée de l'exécution des travaux)

Nom : _____ Prénom : _____
 Raison sociale : _____
 Adresse Numéro : _____ Voie : _____
 Lieu-dit : _____ Localité : _____
 Code postal _____ BP _____ cedex _____
 Téléphone fixe : _____ Portable : _____
 Courriel* : _____ @ _____

5 - Localisation de l'ouvrage. Veuillez joindre à la déclaration un plan de localisation de l'ouvrage à l'échelle du 1/25000 ou un extrait du cadastre. Les coordonnées GPS de l'ouvrage pourront être également communiquées.

Adresse Numéro : _____ Voie : _____
 Lieu-dit : _____ Localité : _____
 Code postal _____ BP _____ cedex _____
 Cadastre : Section(s) _____ Parcelle(s) n° _____
 Code BSS (Banque du Sous-Sol) pour tout ouvrage existant : _____

pour un usage unifamilial², une analyse de l'eau de type P1, à l'exception du chlore, définie dans l'arrêté du 11 janvier 2007 (relatif au programme de prélèvements et d'analyses du contrôle sanitaire pour les eaux fournies par un réseau de distribution) doit être réalisée et jointe à la déclaration ; pour les ouvrages à réaliser l'analyse est transmise après travaux ;
 pour les autres cas, une autorisation préfectorale doit être demandée au titre de l'article L.1321-7 du code de la santé publique.

Autres usages de l'eau ☐ Oui ☐ Non
 Si oui, préciser : _____
 Existence d'un réseau de distribution d'eau intérieur au bâtiment alimenté par l'ouvrage ☐ Oui ☐ Non
 Après usage, existence d'un rejet des eaux issues du pompage dans le réseau public de collecte des eaux usées ☐ Oui ☐ Non
 Après usage, existence d'un rejet des eaux issues du pompage dans le réseau public de collecte des eaux pluviales ☐ Oui ☐ Non

8 - Caractéristiques de l'ouvrage (veuillez indiquer les caractéristiques réelles pour les ouvrages existants, et les prévisions pour les nouveaux ouvrages à réaliser).

Nom ou type de la nappe dans lequel le prélèvement va être effectué (si connu) : _____
 Profondeur de l'ouvrage : _____ (en m) Diamètre de l'ouvrage : _____ (en mm)
 Débit de prélèvement : _____ (en m³/h) Volume annuel prélevé : _____ (en m³/an)
 Présence d'une margelle béton autour de la tête du forage ou puits : ☐ Oui ☐ Non
 Ouvrage réalisé en se conformant à la norme NF X 10-999 forages d'eau et de géothermie : ☐ Oui ☐ Non
 Le respect de cette norme permet de garantir que l'ouvrage est réalisé dans les règles de l'art et permet notamment de protéger la ressource souterraine de toute infiltration directe d'eau de ruissellement superficielle potentiellement polluée.

Il est rappelé que tout pompage doit être équipé d'un compteur volumétrique (article L.214-8 du code de l'environnement)

Fait à :

le _____

Nom, Prénom :

Signature

¹ ou date d'achèvement d'un nouvel ouvrage.

² unifamilial : usage restreint aux besoins d'une seule famille.
 Les champs suivis de (*) sont facultatifs

Code minier – forages géothermiques

Code Minier

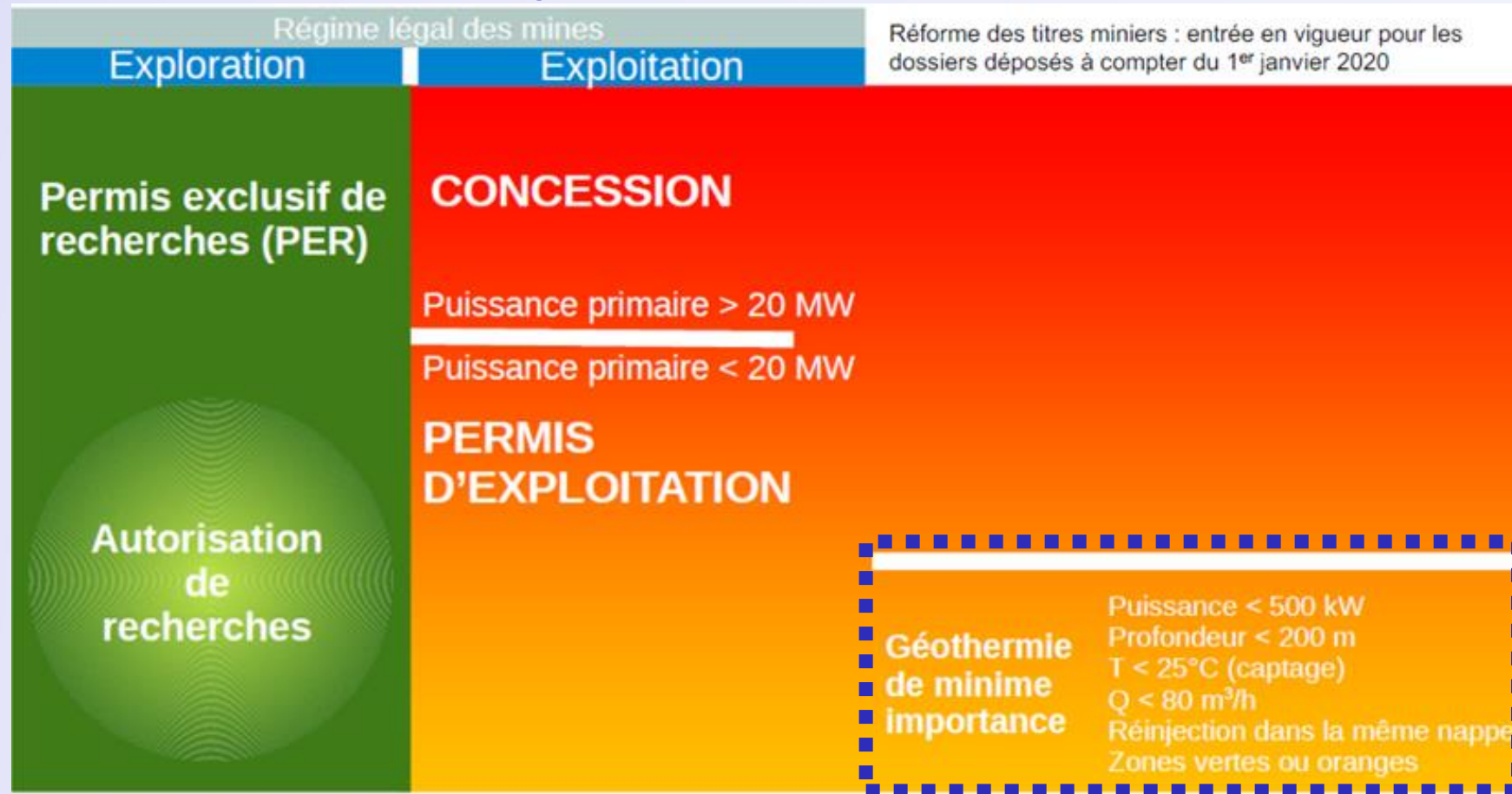
Relèvent du régime légal des mines les gîtes renfermés dans le sein de la terre dont on peut extraire de l'énergie sous forme thermique, notamment par l'intermédiaire des eaux chaudes et des vapeurs souterraines qu'ils contiennent, dits « gîtes géothermiques » (Art. L.112-1)

→ L'exploitation thermique du sous-sol relève de titres miniers : en l'absence de prélèvement effectif d'eau (puisque pompage + réinjection), pas de procédure "Loi sur l'eau"

Code minier – forages géothermiques

Cadre réglementaire réformé en 2015 :

Décret n°2015-15 du 8 janvier 2015



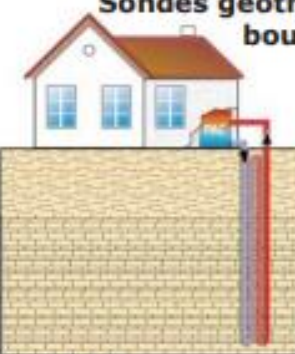
GMI :
télédéclaration

Code minier – forages géothermiques

Les conditions de la GMI

Un ouvrage de GMI doit répondre à toutes les conditions suivantes :

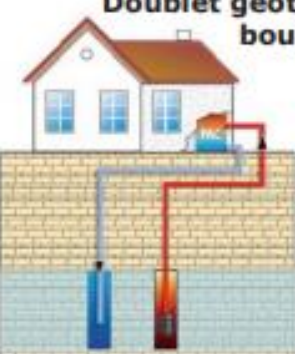
Sondes géothermiques verticales boucle fermée



Source BRGM

- Profondeur de forage < à 200 m ✓
- Puissance maximale extraite < à 500 kW ✓

Doublé géothermique sur nappe boucle ouverte



Source BRGM

- Profondeur de forage < à 200 m ✓
- Puissance maximale extraite < à 500 kW ✓
- Température de l'eau prélevée < à 25 °C ✓
- Débit pompé prélevé < à 80 m³/h & 200 000 m³/an ✓
- Réinjection de la totalité des volumes prélevés dans le même aquifère ✓
- Variation de la t° de la nappe dans un rayon de 200 m < 4° C ✓

- Régies par le décret « Géothermie » n°2015-15 du 8 janvier 2015
- Prescriptions générales (du 25 juin 2015) à respecter pour la réalisation des ouvrages.
- Réalisation des forages par des entreprises qualifiées
- Télédéclaration (Guichet unique) **Elle relève uniquement du code minier même s'il y a prélèvement d'eau** (car il y a rejet dans le même aquifère).
- Pour les cas particuliers où le rejet ne pourrait se faire dans le même aquifère, l'ouvrage ne serait plus considéré de minime importance
- Définitions de zones à risques géologiques avec avis d'experts

Réglementation ICPE

- Installation classée pour la protection de l'environnement
(prévention des pollutions, des risques et des nuisances pour la commodité du voisinage, la santé, la salubrité publique, l'agriculture, la protection de la nature et de l'environnement, la conservation des sites et monuments du patrimoine archéologique)
- Forages nécessaires au fonctionnement des installations classées ou pour la surveillance de leurs effets : intégrés au dossier de l'ICPE
- Donc à mentionner dans l'étude d'impact globale

Code de l'environnement

Evaluation environnementale

- Etude d'impact obligatoire (dite « évaluation environnementale ») pour les forages miniers, géothermiques (sauf GMI), hydrocarbures, stockage... et les forages d'eau prélevant plus de 10 Mm³/an
- Examen « au cas par cas » des forages d'eau >50 m, de mines <100 m et tout autre forage >100 m. S'y ajoutent les forages d'irrigation irrigant une superficie >100 ha, ou inondant ou asséchant + de 1ha. Sont concernés également les forages d'eau captant entre 200 000 m³/an et 10Mm³/an, ou pompant plus de 8m³/h dans les ZRE, ou encore les captages en nappe d'accompagnement >1000 m³/h (ou 5% du débit du cours d'eau) et lorsque le débit du cours d'eau en étiage est artificiellement soutenu à plus de 50%, avec des exceptions pour la Seine, la Loire, la Marne et l'Yonne où le seuil est de 80 m³/h.

Code de l'environnement

Evaluation environnementale

Demande d'examen au cas par cas : formulaire Cerfa

Télédéclaration sur le site
<https://www.service-public.fr/>



**Demande d'examen au cas par cas préalable
à la réalisation éventuelle d'une évaluation environnementale**

Article R. 122-3 du code de l'environnement



N° 14734*03

Ce formulaire sera publié sur le site internet de l'autorité environnementale
 Avant de remplir cette demande, lire attentivement la notice explicative

Date de réception :

Cadre réservé à l'autorité environnementale

Dossier complet le :

N° d'enregistrement :

Demande de cas par cas

1 Avant de commencer

2 Caractéristiques générales

3 Sensibilité environnementale

4 Impact potentiel du projet

5 Annexes

6 Récapitulatif et envoi



Attention, au bout de 30 minutes d'inactivité, la session se fermera automatiquement et les données non enregistrées seront perdues. Pour y remédier, vous pouvez sauvegarder votre dossier en cours de saisie qui expire au bout de 30 jours.

CERFA N° 14734

Demande d'examen au cas par cas préalable à la réalisation éventuelle d'une évaluation environnementale

Article R. 122-3-1 du code de l'environnement

du potable de la commune de VAREN dans le puits de

du du (ou des) pétitionnaire(s)

uercy Rouergue et Gorges de l'Aveyron

me juridique collectivité

obligatoire n°1

Forages d'eau

8. Réglementation

8.2. Evolutions en cours

Les évolutions en cours

- Les principes :
 - Protection de l'environnement
 - Montée en compétence et amélioration des pratiques
 - Regroupement des déclarations sous une même rubrique simplifiée
 - Etablissement de prescriptions communes
- Ce qui change :

Obligation de certification des entreprises de forage d'eau à fin 2027 (Décret n°2025-884 du 2 septembre 2025)
- Ce qui devrait changer prochainement
 - Critères de certification / modalités d'audit définis par un nouvel arrêté
 - Prescriptions (Arrêté 11 septembre 2003) définies par un nouvel arrêté
- Ce qui devrait changer

Toutes déclarations forages d'eau regroupées sous Code minier (L411-1)
- Ce qui pourrait changer

Profondeur mini des forages d'eau soumis à évaluation environnementale portée à 100 m ?

Les évolutions en cours

Clarification des forages concernés

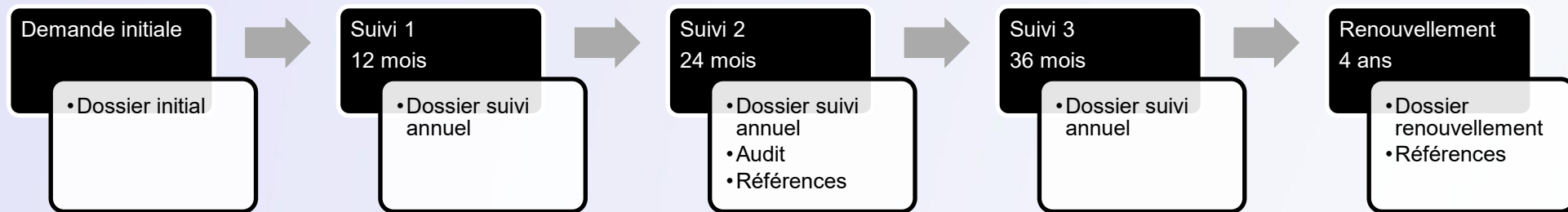
- Les forages de reconnaissance effectués dans le cadre de la recherche d'eau, y compris ceux infructueux ;
- Tous les forages destinés à effectuer des prélèvements d'eau souterraine, temporaires ou permanents, notamment ceux nécessaires au fonctionnement des installations classées et des installations nucléaires de base ;
- Les forages effectués dans le cadre de la dépollution des sites et sols pollués par pompage et traitement des eaux souterraines ;
- Les forages réalisés pour mesurer, même temporairement, le niveau piézométrique ou des paramètres de qualité de la nappe ("piézomètres", "qualitomètres"), ou pour réaliser des essais hydrauliques in situ sur la nappe, notamment ceux réalisés dans le cadre d'investigations géotechniques ou environnementales et ceux destinés à la surveillance des installations classées et installations nucléaires de base ;
- Les forages effectués dans le cadre du diagnostic et de la surveillance des eaux souterraines des sites et sols pollués et potentiellement pollués ;
- Les forages effectués pour un rabattement de nappe.

Les évolutions en cours

Le principe de certification

- Apporter l'assurance qu'un service/processus/produit remplit les exigences spécifiées (≠ qualification : attester de la présomption de la capacité à réaliser une prestation, sans exigence sur la bonne exécution)
- Obligation d'une gestion documentée des réclamations
- Organisme certificateur est tierce partie

Exemple : certification forages GMI



Les évolutions en cours

Evolutions préfigurées par les projets d'arrêtés

- Certification :
 - 3 modules possibles : "Piézomètres temporaires", "Sites et sols pollués" et "Tous forages"
 - Certification initiale de 24 mois, renouvellement tous les 4 ans
 - Fourniture de références
 - Obligations de formation (référent technique, conducteur d'engins)
 - Audits : chantier + documentaire
 - Guide de l'auditeur à venir (2026-2027)
- Prescriptions de réalisation de forages :
 - Plusieurs modifications par rapport à l'arrêté du 11 septembre 2003 : règles d'implantation, aménagement de chantier, modalités d'équipement, aménagements de tête, obligations des parties
 - Guide d'application à venir (2026-2027)

(<https://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/projet-de-decret-relatif-aux-conditions-de-mise-en-a3128.html>)

Les évolutions en cours

Déclarations : état actuel...

Projet de forage de recherche,
surveillance, exploitation des
eaux souterraines :

Profondeur > 10 m ?

Si oui

Déclaration (L411-1)

Et

Contexte d'exploitation
/ exploration minière ?

Si oui

Déclaration /
autorisation
(Décret 2006-649)

Si non

Objectif ?

Usage thermique
avec réinjection intégrale ?

Si oui

Si non

Nécessaire au fonctionnement
ou surveillance d'une ICPE ?

Si oui

Intégré au dossier
ICPE

Si non

Prélèvement pour usage
domestique (< 1000 m³/an) ?

Si oui

Déclaration
(L2224-9)

Si non

Recherche, surveillance ou
prélèvement d'eau

Si oui

Déclaration
(L214-1)

Et

Profondeur > 50 m

Si oui

Evaluation
environn^{ta}le (L122)

Code minier

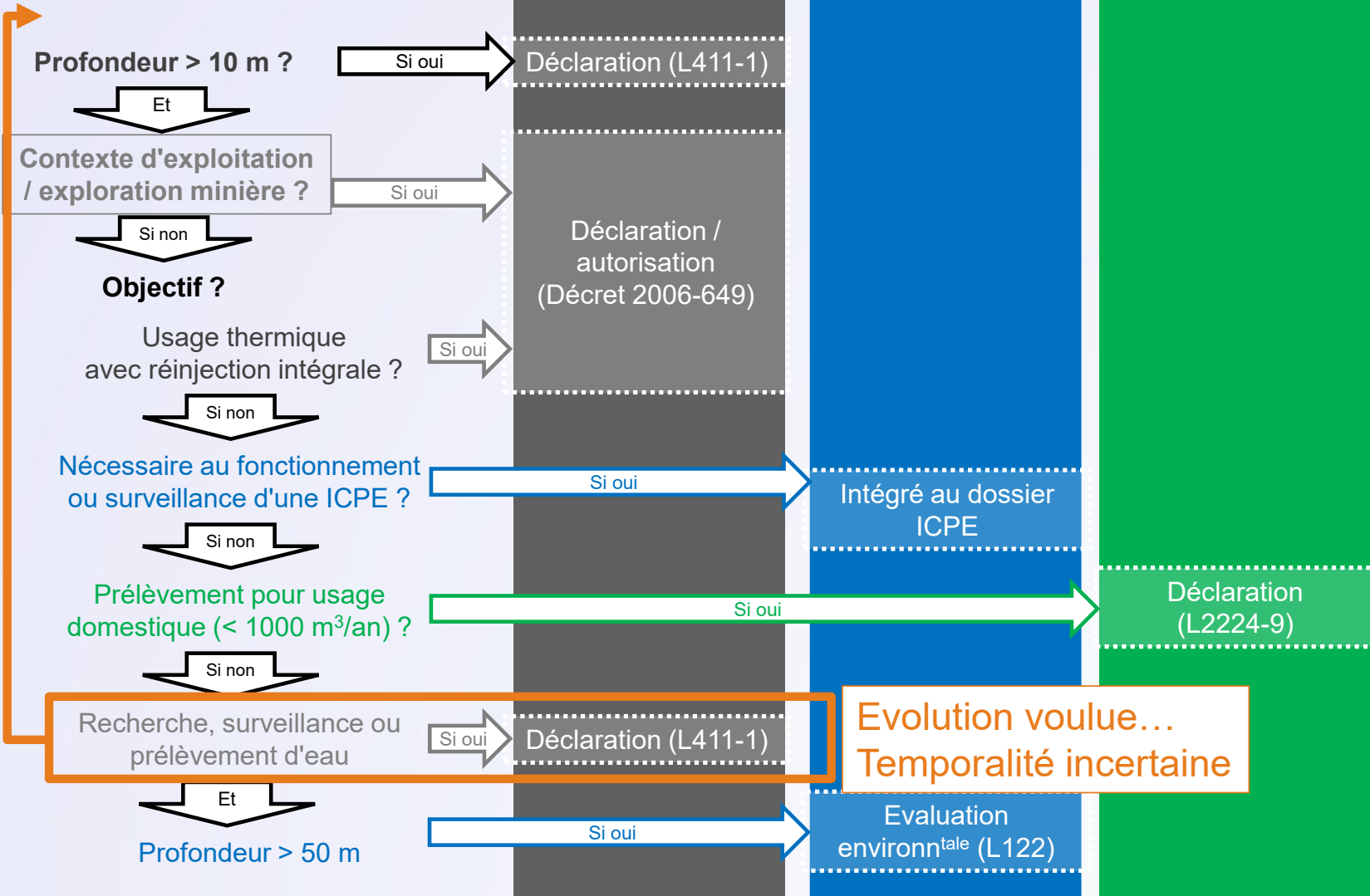
Code de
l'Environnement

Code des
Collectivités
Territoriales

Les évolutions en cours

Déclarations : évolutions ?

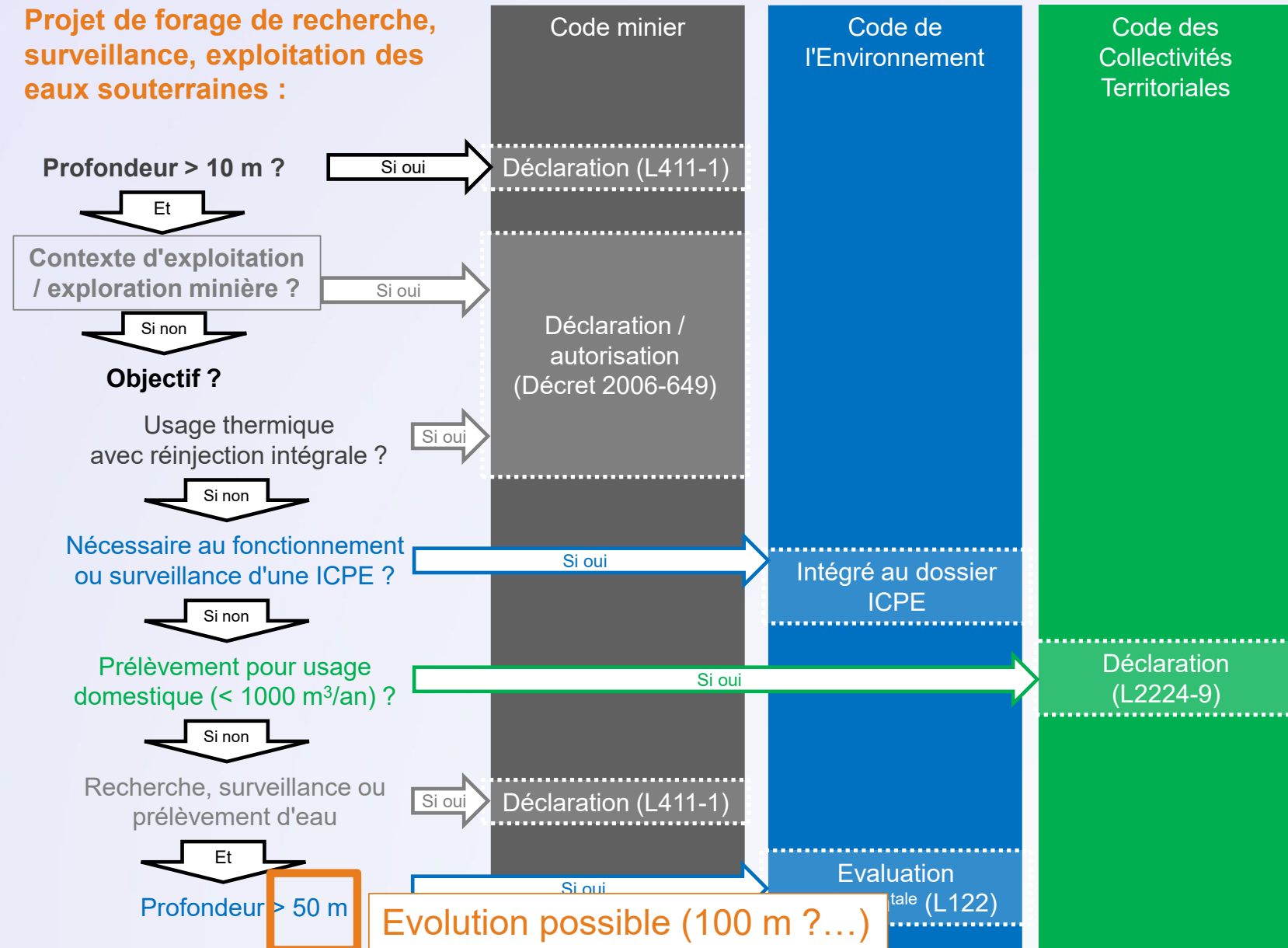
Projet de forage de recherche, surveillance, exploitation des eaux souterraines :



Les évolutions en cours

Déclarations : évolutions ?

Projet de forage de recherche, surveillance, exploitation des eaux souterraines :



Forages d'eau

8. Réglementation

8.3. Autres cadres – non-réglementaires

Les normes et autres préconisations

norme française

ISSN 0335-3931
NF X 10-999

30 Août 2014

Indice de classement : X 10-999

ICS : 13.060.10 ; 93.160

**Forage d'eau et de géothermie —
Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage
de captage ou de surveillance des
eaux souterraines réalisés par forages**

E : Water wells and geothermal drilling — Construction, monitoring and dismantling
of catchworks and wells to tap into underground water
D : Wasser- und Geothermiebohrungen — Durchführung, Überwachung
und Aufgabe von Grundwasserentnahme oder -überwachungsbohranlagen

Norme française homologuée

par décision du Directeur Général d'AFNOR.

Remplace la norme homologuée NF X 10-999, d'avril 2007.

AFNOR X31SOLS : Qualité des sols

Normalisation française

Norme française homologuée et publiée par Afnor

ISSN 0335-3931
NF X31-614

Qualité du sol - Méthode de détection et de caractérisation des
pollutions - Réalisation d'un forage de surveillance des eaux
souterraines au droit et autour d'un site potentiellement pollué

Date de publication : janvier 2024

norme française

ISSN 0335-3931
NF P 94-157-1

Mars 1996

Indice de classement : P 94-157-1

ICS : 93.020

Sols : reconnaissance et essais

Mesures piézométriques

Partie 1 : Tube ouvert

E : Soils : Investigation and testing — In situ pore pressure measurement —
Part 1 : Piezometric tube
D : Boden : Erkundung und Prüfungen — Piezometer Messung —
Teil 1 : Offenes Rohr

Norme française homologuée

par décision du Directeur Général de l'AFNOR le 20 février 1996 pour prendre
effet le 20 mars 1996.

Forages d'eau

9. Rôle et posture de l'hydrogéologue : retours d'expérience et discussions

Rôle et posture de l'hydrogéologue

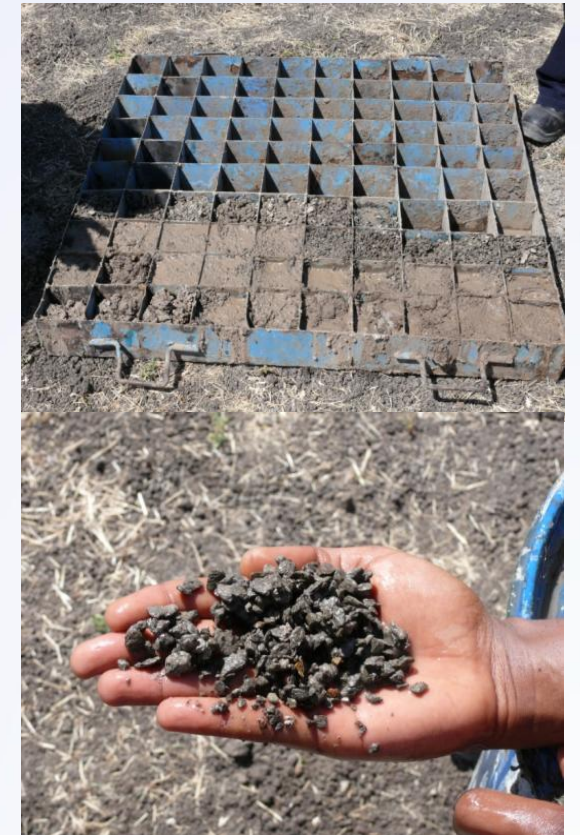
A l'amont du projet

- Anticiper les points logistiques
 - Accès (poids lourds)
 - Nuisances inhérentes au chantier : bruit, poussière, projections
 - Approvisionnement : eau, énergie
 - Gestion des fluides produits :
 - ✓ Si rejet : Où ? Autorisations ? Décantation / filtration ?
 - ✓ Stockage ?
- Être clair sur les risques / incertitudes auprès du maître d'ouvrage
 - La ressource n'est confirmée qu'après réalisation du forage et des essais
 - Connaissance des aquifères visés / retours d'expérience
 - Nécessité de suivi des travaux :
 - ✓ Suivi continu ?
 - ✓ Suivi sur étapes-clé ?

Rôle et posture de l'hydrogéologue

Durant le chantier

- Suivi de mise en œuvre
 - Se faire son fichier de suivi (avant arrivée) :
 - ✓ Dimensions de tous les équipements
 - ✓ Volumes unitaires prévisionnels
 - Mesurer tout ce qui doit entrer dans le forage
 - Relation de confiance nécessaire avec le foreur
 - ✓ Recueillir son ressenti / ses informations sur les terrains traversés
 - ✓ Valider toutes les mesures / quantités avec lui avant opération
 - ✓ Prise de décision conjointe
 - ✓ Informer des observations géologiques / hydrogéologiques
 - ✓ Alerter de toute difficulté identifiée
 - Être là au moins sur les phases critiques
- Suivi géologique / hydrogéologique
 - Recueillir les cuttings, interpréter, confronter
 - Suivre tout indice de venue d'eau, qualité



Forages d'eau

10. Exercice d'application

Contexte - demande

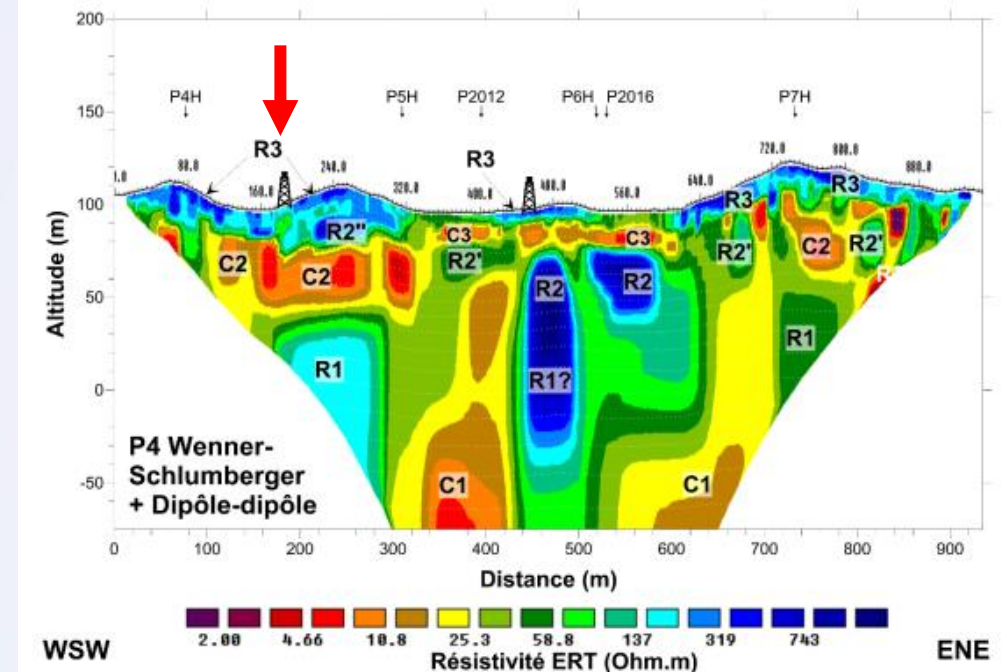
- Le département de Mayotte fait face à une augmentation des besoins en eau potable la demande de consommation qui est en partie due à la croissance démographique, l'évolution de l'équipement des ménages mahorais et les performances du réseau d'adduction d'eau potable.
- Pour pallier en partie cette demande, le Syndicat des Eaux de Mayotte (LEMA) souhaite engager la réalisation de la 6^e campagne de forages comprenant la réalisation de 10 forages, implantés d'après les études et prospection du BRGM menées de 2013 à 2017 (rapports BRGM/RP-63837-FR et BRGM/RP-67169-FR).
- Le premier forage envisagé se situe sur le secteur de Coconi, avec les données d'entrée ci-après. Proposez un pgm de réalisation + éléments essentiels du cahier des charges.

Données d'entrée

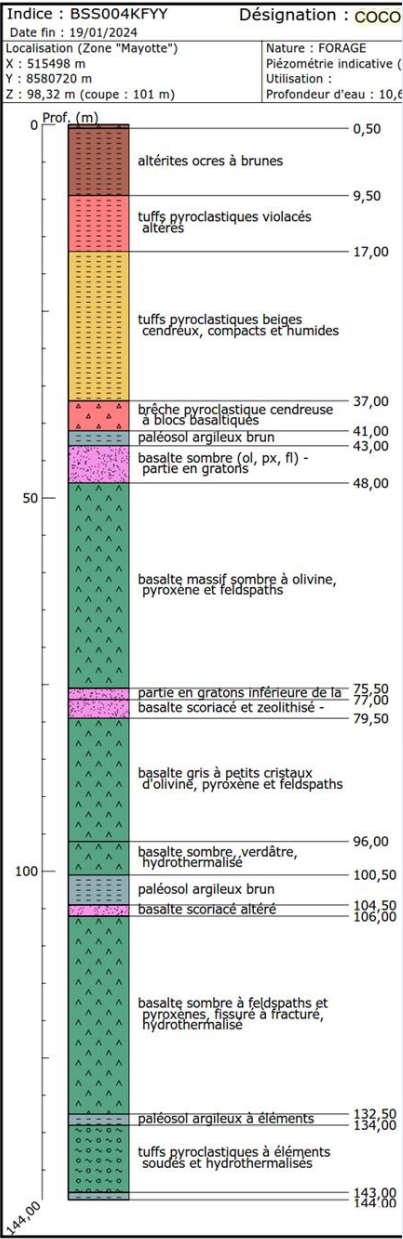
- Implantation : parcelle agricole, de cultures maraichères et d'agroforesterie ; accessible par une piste forestière.



- Connaissances du sous-sol :
 - Domaine volcanique. Secteur potentiellement aquifère d'après les campagnes de prospection électromagnétique aéroporté. Pas d'aquifère reconnu et testé par forage dans le secteur
 - Cible : unité R1 (prof. du mur estimée 150 m maxi, profondeur du toit autour de 50 m) – probablement formations basaltiques aquifères.
 - Au-dessus : C2 = vraisemblablement zone altérée ?



Données issues de la reconnaissance



Niveau piézométrique au repos autour de 13 m/sol
Pompage d'essai exploratoire : 8h, 20 m³/h, rabattement 28 m