

PARTIE 2

Captages et pompages

Bruno Arfib
Université Aix-Marseille
Laboratoire CEREGE

Master Sciences de l'Eau

Cours d'Hydrogéologie générale

www.karsteau.fr

7- Etablissement des périmètres de protection autour des forages AEP

7.1. Réglementation générale : procédure AEP, Périmètres de protection, forages

7.2- Les périmètres de protection

7.3- Objectif des « études préalable » + notions de vulnérabilité des eaux souterraines

7.4. Méthode de Grubb (Wyssling)

7.5. Cas particulier du karst (suivi des sources, traçages, PAPRIKA)

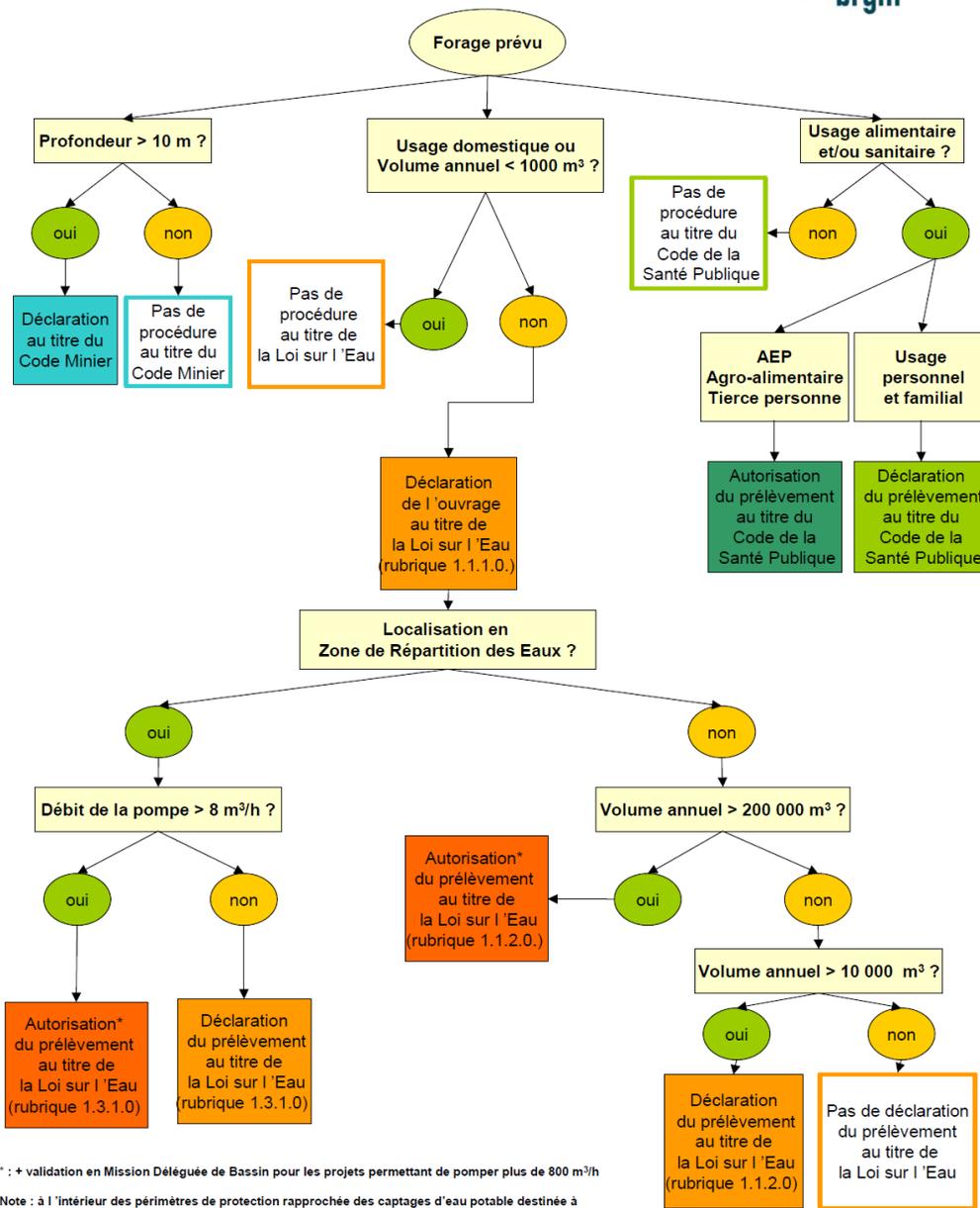
Objectif de cette partie :

- Qu'est ce qu'une zone de répartition des eaux (ZRE), un périmètre de protection Immédiate, Rapprochée ou éloignée (PPI, PPR, PPE)?
- Qu'est ce qu'un captage à usage domestique ?
- Comment obtient-on l'autorisation de faire un forage?
- Peut-on faire un forage n'importe comment?
- Comment définit-on la vulnérabilité des eaux souterraines et d'un captage?
- Comment protège t-on un captage pour l'AEP?

Schéma des différentes procédures applicables aux forages et aux prélèvements en dehors des périmètres de protection rapprochée des captages d'eau potable



Code Minier
Code de la Santé Publique
Code de l'Environnement
(Loi sur l'Eau)



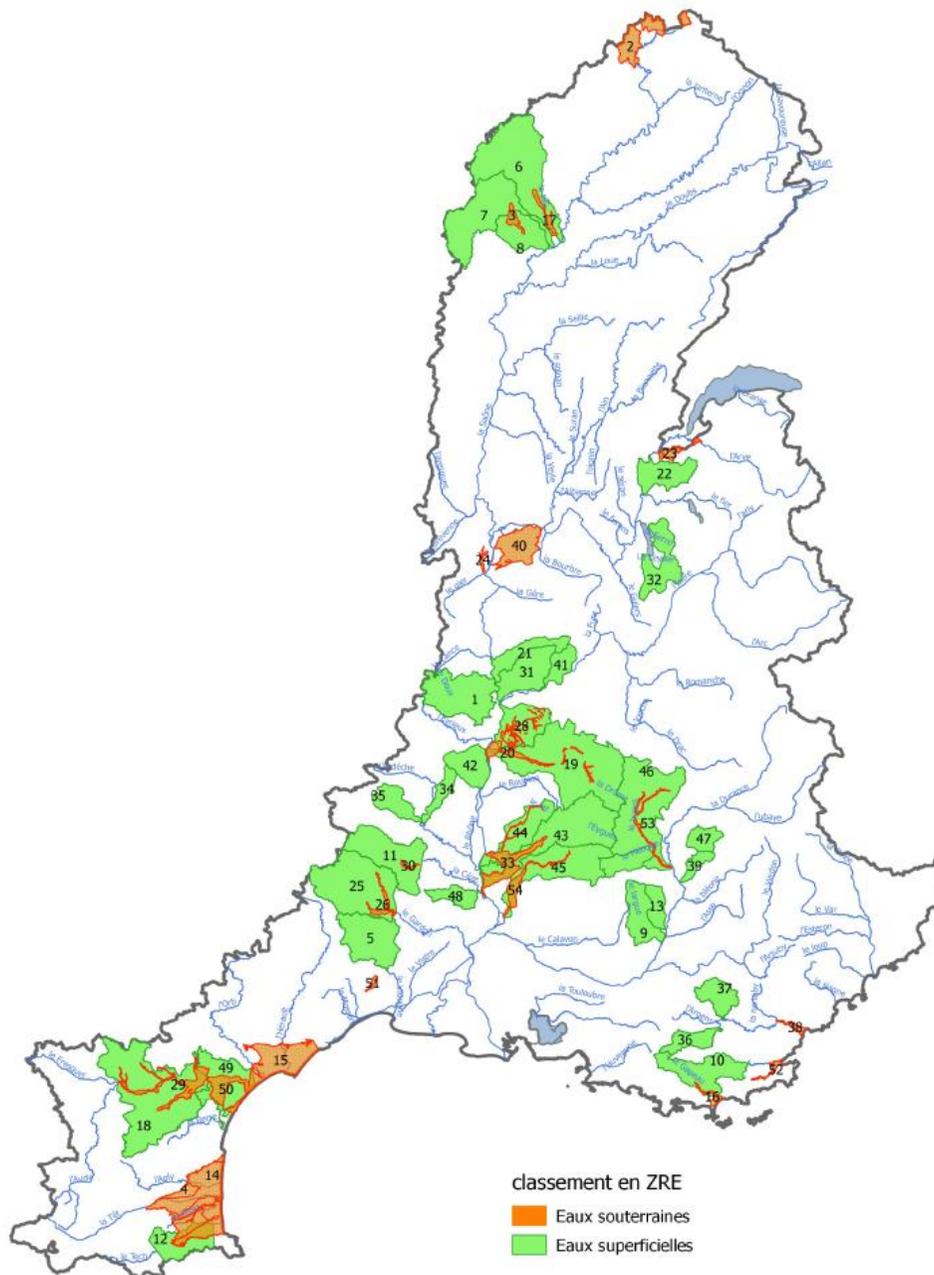
* : + validation en Mission Déléguée de Bassin pour les projets permettant de pomper plus de 800 m³/h

Note : à l'intérieur des périmètres de protection rapprochée des captages d'eau potable destinée à l'alimentation des collectivités humaines, les installations, ouvrages, travaux et activités soumis à Déclaration au titre de la Loi sur l'Eau relèvent du régime de l'Autorisation

Bassin Rhône Méditerranée

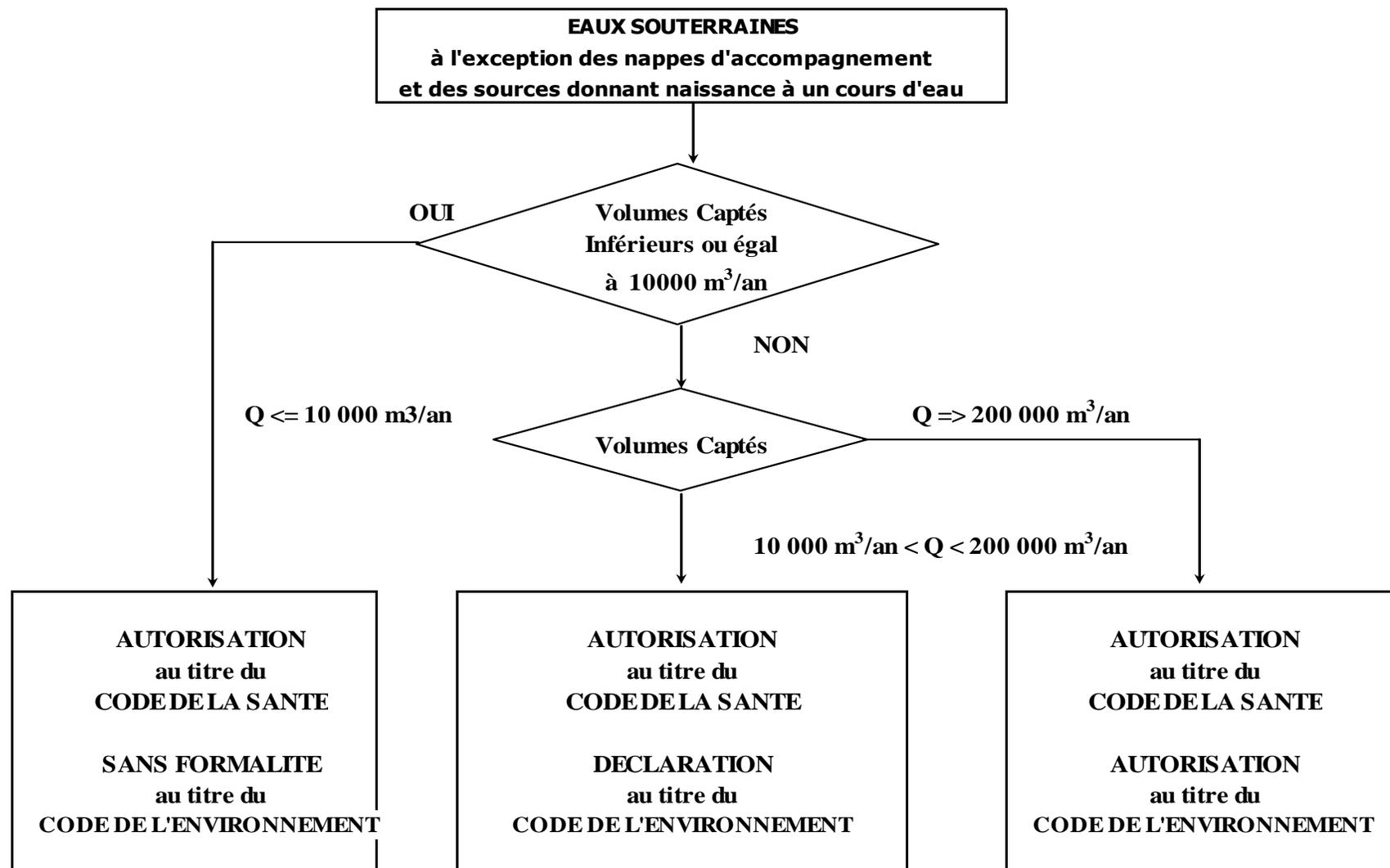
Classement en zone de répartition des eaux (ZRE) 2015

Exemple des ZRE du bassin
Rhône Méditerranée
(2015)

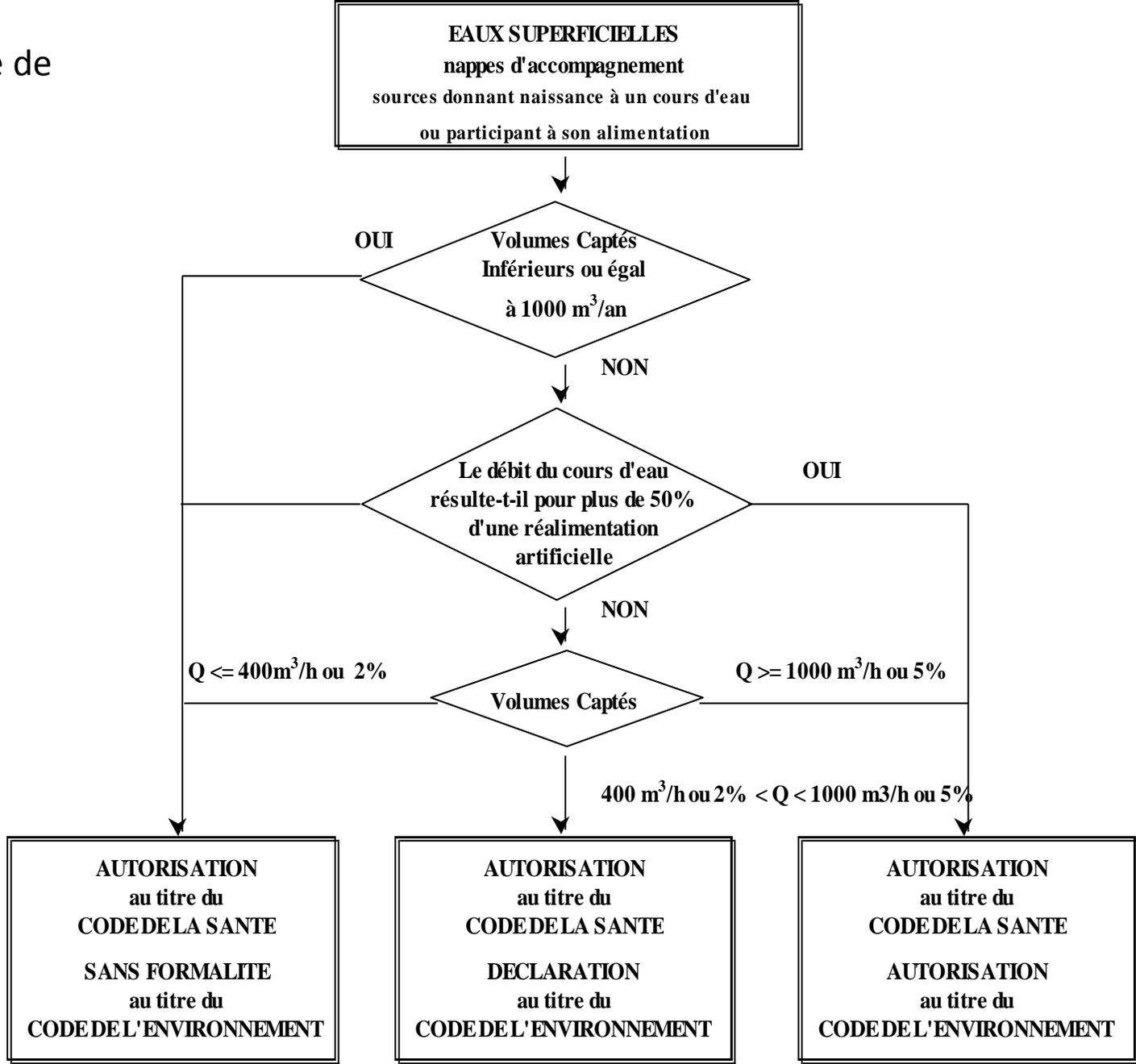


<http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/docs/ZRE/20150205-PUB-ClassementZRE-VF.pdf>

Article R214-1 du code de l'Environnement



Article R214-1 du code de l'Environnement



1- Démarrage de la procédure

Nouvelle ressource : Pré-analyse qualitative et estimation du débit pour contrôle de la viabilité de la ressource



Délibération du conseil municipal ou syndical



Envoi de la délibération à l'ARS
Choix du bureau d'étude

ARS + Maître d'ouvrage

Maître d'ouvrage

Maître d'ouvrage

2- Constitution du dossier technique préliminaire

Etude technique
Envoi pour validation à l'ARS



Bureau d'étude + Maître d'ouvrage

3- Désignation de l'hydrogéologue agréé

Visite de terrain de l'hydrogéologue agréé
Demande d'études complémentaires



4- Rapport de l'hydrogéologue agréé à l'ARS et au Maître d'ouvrage

1- Démarrage de la procédure

2- Constitution du dossier technique préliminaire Bureau d'étude + Maître d'ouvrage

3- Désignation de l'hydrogéologue agréé

4- Rapport de l'hydrogéologue agréé

5- Constitution du dossier d'enquête publique Bureau d'étude + Maître d'ouvrage



ARS + DDTM

6- Enquête administrative ARS, MISE, CODERST, DDTM

7- Enquête publique

8- Conseil départemental de l'environnement, des risques sanitaires et technologiques (CODERST)

9- Publicité des servitudes d'utilité publique

10- Contrôle sur le terrain

Décrets, arrêtés, circulaires

TEXTES GÉNÉRAUX

MINISTÈRE DE LA SANTÉ ET DES SOLIDARITÉS

Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique

LIMITES ET RÉFÉRENCES DE QUALITÉ DES EAUX DESTINÉES À LA CONSOMMATION HUMAINE, À L'EXCLUSION DES EAUX CONDITIONNÉES

I. – Limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine

A. – Paramètres microbiologiques

PARAMÈTRES	LIMITES DE QUALITÉ	UNITÉ
<i>Escherichia coli</i> (<i>E. coli</i>).....	0	/100 mL
Entérocoques.....	0	/100 mL

B. – Paramètres chimiques

PARAMÈTRES	LIMITES DE QUALITÉ	UNITÉS	NOTES
Acrylamide.	0,10	µg/L	La limite de qualité se réfère à la concentration résiduelle en monomères dans l'eau, calculée conformément aux spécifications de la migration maximale du polymère correspondant en contact avec l'eau.
Antimoine.	5,0	µg/L	
Arsenic.	10	µg/L	
Baryum.	0,70	mg/L	
Benzène.	1,0	µg/L	
Benzo[<i>a</i>]pyrène.	0,010	µg/L	
Bore.	1,0	mg/L	
Bromates.	10	µg/L	La valeur la plus faible possible inférieure à cette limite doit être visée sans pour autant compromettre la désinfection. La limite de qualité est fixée à 25 µg/L jusqu'au 25 décembre 2008. Toutes les mesures appropriées doivent être prises pour réduire le plus possible la concentration de bromates dans les eaux destinées à la consommation humaine, au cours de la période nécessaire pour se conformer à la limite de qualité de 10 µg/L.
Cadmium.	5,0	µg/L	
Chlorure de vinyle.	0,50	µg/L	La limite de qualité se réfère également à la concentration résiduelle en monomères dans l'eau, calculée conformément aux spécifications de la migration maximale du polymère correspondant en contact avec l'eau.
Chrome.	50	µg/L	
Cuivre.	2,0	mg/L	
Cyanures totaux.	50	µg/L	
1,2-dichloroéthane.	3,0	µg/L	
Epichlorhydrine.	0,10	µg/L	La limite de qualité se réfère à la concentration résiduelle en monomères dans l'eau, calculée conformément aux spécifications de la migration maximale du polymère correspondant en contact avec l'eau.

PARAMÈTRES	LIMITES DE QUALITÉ	UNITÉS	NOTES
Fluorures.	1,50	mg/L	
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).	0,10	µg/L	Pour la somme des composés suivants: benzo[b]fluoranthène, benzo[k]fluoranthène, benzo[ghi]pérylène, indénof[1,2,3-cd]pyrène.
Mercure.	1,0	µg/L	
Total microcystines.	1,0	µg/L	Par « total microcystines », on entend la somme de toutes les microcystines détectées et quantifiées.
Nickel.	20	µg/L	
Nitrates (NO ₃).	50	mg/L	La somme de la concentration en nitrates divisée par 50 et de celle en nitrites divisée par 3 doit rester inférieure à 1.
Nitrites (NO ₂).	0,50	mg/L	En sortie des installations de traitement, la concentration en nitrites doit être inférieure ou égale à 0,10 mg/L.
Pesticides (par substance individuelle).	0,10	µg/L	Par « pesticides », on entend : - les insecticides organiques ; - les herbicides organiques ; - les fongicides organiques ; - les nématocides organiques ; - les acaricides organiques ; - les algicides organiques ; - les rodenticides organiques ; - les produits antimoissures organiques ; - les produits apparentés (notamment les régulateurs de croissance)
Aldrine, dieldrine, heptachlore, heptachlorépoxyde (par substance individuelle).	0,03	µg/L	et leurs métabolites, produits de dégradation et de réaction pertinents.
Total pesticides.	0,50	µg/L	Par « total pesticides », on entend la somme de tous les pesticides individualisés détectés et quantifiés.

Plomb.	10	µg/L	La limite de qualité est fixée à 25 µg/L jusqu'au 25 décembre 2013. Les mesures appropriées pour réduire progressivement la concentration en plomb dans les eaux destinées à la consommation humaine au cours de la période nécessaire pour se conformer à la limite de qualité de 10 µg/L sont précisées aux articles R. 1321-55 et R. 1321-49 (arrêté d'application). Lors de la mise en œuvre des mesures destinées à atteindre cette valeur, la priorité est donnée aux cas où les concentrations en plomb dans les eaux destinées à la consommation humaine sont les plus élevées.
Sélénium.	10	µg/L	
Tétrachloroéthylène et trichloroéthylène.	10	µg/L	Somme des concentrations des paramètres spécifiés.
Total trihalométhanes (THM).	100	µg/L	La valeur la plus faible possible inférieure à cette valeur doit être visée sans pour autant compromettre la désinfection. Par « total trihalométhanes », on entend la somme de : chloroforme, bromoforme, dibromochlorométhane et bromodichlorométhane. La limite de qualité est fixée à 150 µg/L jusqu'au 25 décembre 2008. Toutes les mesures appropriées doivent être prises pour réduire le plus possible la concentration de THM dans les eaux destinées à la consommation humaine, au cours de la période nécessaire pour se conformer à la limite de qualité.
PARAMETRES	LIMITES DE QUALITE	UNITES	NOTES
Turbidité.	1,0	NFU	La limite de qualité est applicable au point de mise en distribution, pour les eaux visées à l'article R. 1321-37 et pour les eaux d'origine souterraine provenant de milieux fissurés présentant une turbidité périodique importante et supérieure à 2,0 NFU. En cas de mise en œuvre d'un traitement de neutralisation ou de reminéralisation, la limite de qualité s'applique hors augmentation éventuelle de turbidité due au traitement. Pour les installations qui sont d'un débit inférieur à 1 000 m ³ /j ou qui desservent des unités de distribution de moins de 5 000 habitants, la limite de qualité est fixée à 2,0 NFU jusqu'au 25 décembre 2008. Toutes les mesures appropriées doivent être prises pour réduire le plus possible la turbidité, au cours de la période nécessaire pour se conformer à la limite de qualité de 1,0 NFU.

II. – Références de qualité des eaux destinées à la consommation humaine

A. – Paramètres microbiologiques

PARAMÈTRES	RÉFÉRENCES DE QUALITÉ	UNITÉ	NOTES
Bactéries coliformes.	0	/100 mL	
Bactéries sulfitoréductrices y compris les spores.	0	/100 mL	Ce paramètre doit être mesuré lorsque l'eau est d'origine superficielle ou influencée par une eau d'origine superficielle. En cas de non-respect de cette valeur, une enquête doit être menée sur la distribution d'eau pour s'assurer qu'il n'y a aucun danger potentiel pour la santé humaine résultant de la présence de micro-organismes pathogènes, par exemple <i>Cryptosporidium</i> .
Numération de germes aérobies revivifiables à 22 °C et à 37 °C.			Variation dans un rapport de 10 par rapport à la valeur habituelle.

B. – Paramètres chimiques et organoleptiques

PARAMÈTRES	RÉFÉRENCES DE QUALITÉ	UNITÉS	NOTES
Aluminium total.	200	µg/L	A l'exception des eaux ayant subi un traitement thermique pour la production d'eau chaude pour lesquelles la valeur de 500 µg/L (Al) ne doit pas être dépassée.
Ammonium (NH ₄ ⁺).	0,10	mg/L	S'il est démontré que l'ammonium a une origine naturelle, la valeur à respecter est de 0,50 mg/L pour les eaux souterraines.
Carbone organique total (COT).	2,0 et aucun changement anormal	mg/L	
Oxydabilité au permanganate de potassium mesurée après 10 minutes en milieu acide.	5,0	mg/L O ₂	
Chlore libre et total.			Absence d'odeur ou de saveur désagréable et pas de changement anormal.
Chlorites.	0,20	mg/L	Sans compromettre la désinfection, la valeur la plus faible possible doit être visée.
Chlorures.	250	mg/L	Les eaux ne doivent pas être corrosives.
Conductivité.	≥ 180 et ≤ 1 000 ou ≥ 200 et ≤ 1 100	µS/cm à 20 °C µS/cm à 25 °C	Les eaux ne doivent pas être corrosives.

PARAMÈTRES	RÉFÉRENCES DE QUALITÉ	UNITÉS	NOTES
Couleur.	Acceptable pour les consommateurs et aucun changement anormal notamment une couleur inférieure ou égale à 15	mg/L (Pt)	
Cuivre.	1,0	mg/L	
Equilibre calcocarbonique.	Les eaux doivent être à l'équilibre calcocarbonique ou légèrement incrustantes		
Fer total.	200	µg/L	
Manganèse.	50	µg/L	
Odeur.	Acceptable pour les consommateurs et aucun changement anormal, notamment pas d'odeur détectée pour un taux de dilution de 3 à 25 °C		
pH (concentration en ions hydrogène).	≥ 6,5 et ≤ 9	unités pH	Les eaux ne doivent pas être agressives.
Saveur.	Acceptable pour les consommateurs et aucun changement anormal, notamment pas de saveur détectée pour un taux de dilution de 3 à 25 °C		
Sodium.	200	mg/L	
Sulfates.	250	mg/L	Les eaux ne doivent pas être corrosives.
Température.	25	°C	A l'exception des eaux ayant subi un traitement thermique pour la production d'eau chaude. Cette valeur ne s'applique pas dans les départements d'outre-mer.
Turbidité.	0,5	NFU	La référence de qualité est applicable au point de mise en distribution, pour les eaux visées à l'article R.1321-37 et pour les eaux d'origine souterraine provenant de milieux fissurés présentant une turbidité périodique importante et supérieure à 2,0 NFU. En cas de mise en œuvre d'un traitement de neutralisation ou de reminéralisation, la référence de qualité s'applique hors augmentation éventuelle de turbidité due au traitement.
	2	NFU	La référence de qualité s'applique aux robinets normalement utilisés pour la consommation humaine.

L'Arrêté Forage de 2003, Modifié par l'arrêté du 7 août 2006 paru le 24 septembre 2006

L'arrêté interministériel « forages » publié le 11 septembre 2003, contient les **règles techniques minimales permettant d'exécuter un ouvrage soumis à déclaration ou autorisation au titre de l'article L. 214-3 du code de l'environnement dans le respect de la protection des eaux souterraines**

Un guide existe pour une lecture plus aisée



**GUIDE D'APPLICATION DE L'ARRÊTÉ INTERMINISTÉRIEL
DU 11 SEPTEMBRE 2003
RELATIF À LA RUBRIQUE 1.1.0 DE LA NOMENCLATURE EAU**

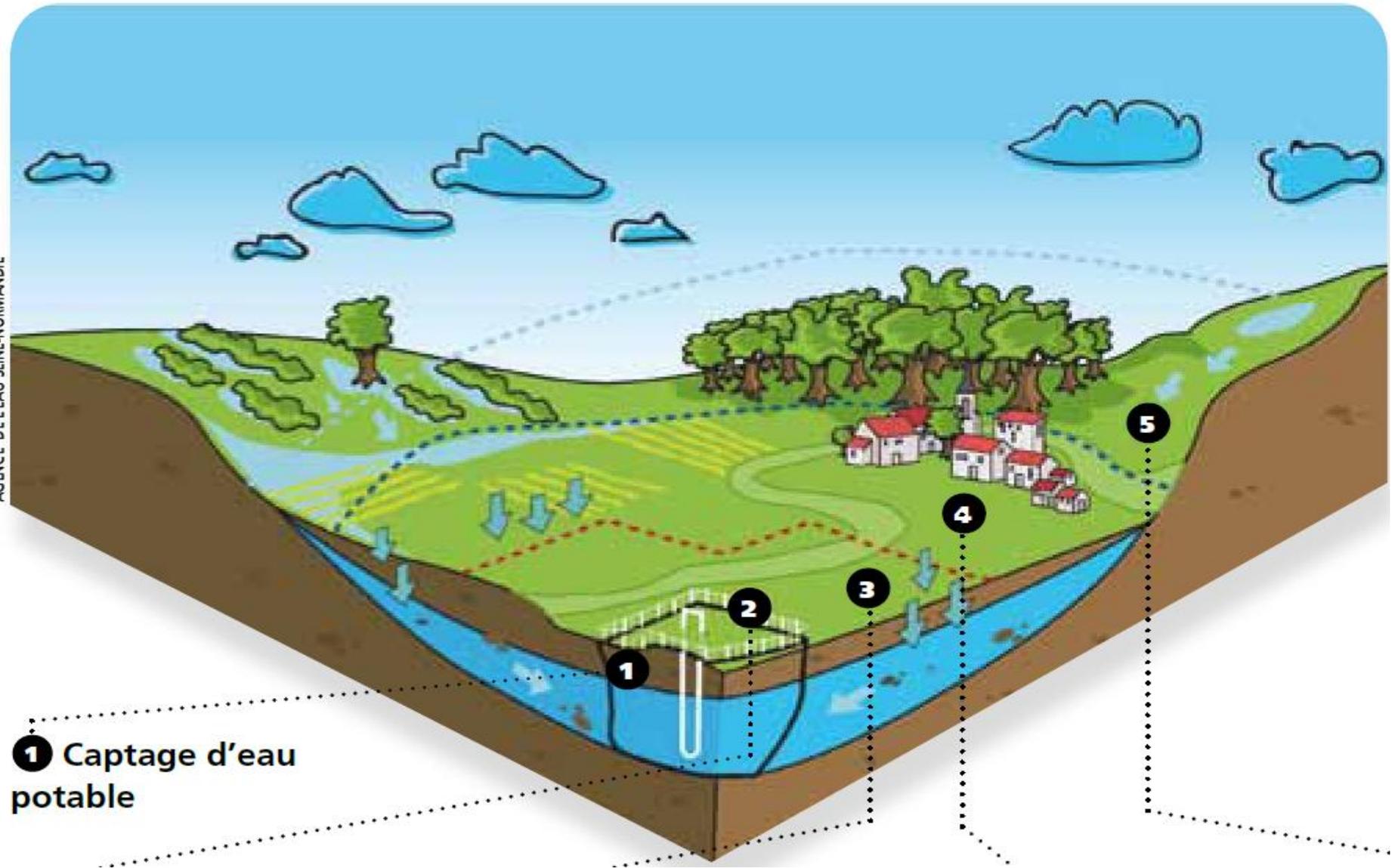
Sondage, forage, création de puits ou d'ouvrage souterrain
non domestique exécuté en vue de la recherche, de la surveillance
ou d'un prélèvement d'eau souterraine

Fiche 12 – Ce qu'il faut retenir de l'arrêté « forages »

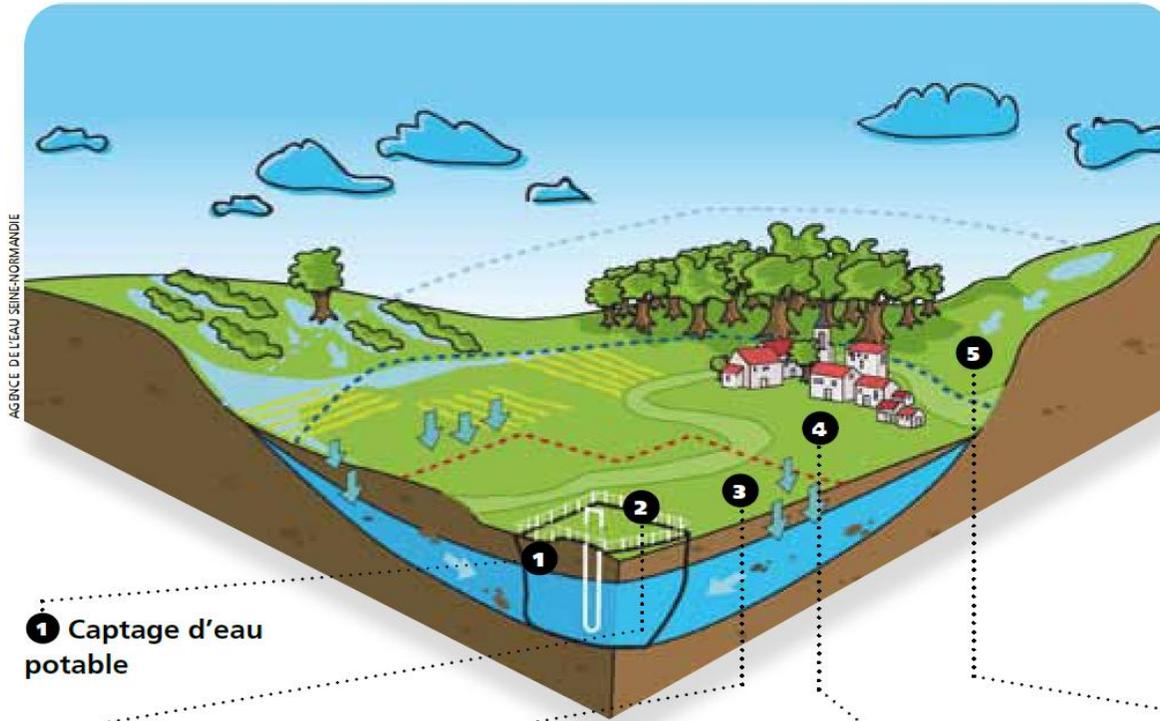
Article	Condition minimales imposées par l'arrêté	A quoi faut-il penser
Art. 4	Distances minimales de sécurité (hors ouvrages de surveillance ICPE ou cas particuliers) par rapport à certaines sources de pollution. Connaissance préalable de la géologie et de l'hydrogéologie du secteur	Respecter les distances, sauf cas particuliers à justifier Faire appel à un hydrogéologue lorsque la ressource en eau souterraine est mal connue ou si sa répartition est hétérogène, préalablement à l'intervention du foreur
Art. 7	Cimentation de l'annulaire par injection sous pression par le bas : - dans la partie supérieure du forage - au droit de chaque formation aquifère non exploitée Vérification du volume de ciment injecté	Réaliser les cimentations au droit de toutes les formations non captées et, le cas échéant, dans l'espace annulaire entre deux tubages, par injection du laitier sous pression de bas en haut. Le volume théorique de laitier doit être majoré pour tenir compte des hors profils
Art. 7	Un même ouvrage ne doit pas capter plusieurs aquifères distincts superposés	Réaliser une éventuelle expertise, en cas de doute, sur le caractère distinct des aquifères
Art. 7	Coupe géologique de l'ouvrage et niveau des nappes	Faire établir une coupe géologique au cours ou à l'issue des travaux (version « foreur » a minima) et noter les venues d'eau
Art. 8	Protection de la tête du forage : - margelle bétonnée - local ou chambre de comptage - tête de forage (notamment en zone inondable) - capot de fermeture	Assurer l'absence de risque d'infiltration des eaux dans un forage débouchant dans un local Suivre les prescriptions techniques détaillées de l'arrêté
Art. 8	Mesure du niveau de l'eau dans le forage	Installer un tube guide sonde dans le forage lorsque cela est possible
Art. 8	Identification de l'ouvrage par une plaque portant les références du récépissé de déclaration	Maintenir la plaque en bon état
Art. 9	Tests de pompage S'assurer des capacités de production Si débit envisagé > 80 m ³ /h : - pompage de 3 paliers de courte durée - pompage de longue durée (minimum 12 heures) à un débit supérieur ou égal au débit définitif de prélèvement envisagé - influence du pompage sur 3 points dans un rayon de 500 m	Obtenir une évaluation du débit critique à ne pas dépasser et du débit optimal d'exploitation (débit / rabattement) Obtenir les résultats des pompages d'essai pour toute demande d'autorisation
Art. 13	Comblement des ouvrages abandonnés par des techniques appropriées	Le marché à conclure avec le foreur doit prévoir le comblement des forages improductifs s'il est prévu la réalisation de plusieurs forages. Devis à prévoir si la productivité est insuffisante

Protection de la ressource en eau : les 3 périmètres de protection d'un captage

AGENCE DE L'EAU SEINE-NORMANDIE



Protection de la ressource en eau



1 Captage d'eau potable

2 Le périmètre de protection immédiate est destiné à protéger les ouvrages du captage. Il doit être clôturé et est généralement enherbé. La collectivité distributrice de l'eau en est propriétaire. Aucune activité autre que l'entretien mécanique et l'entretien de l'ouvrage n'y est autorisée.

3 Le périmètre de protection rapprochée est défini pour protéger le captage des migrations de substances polluantes. Il permet de préserver le captage des risques de pollutions accidentelles ou ponctuelles. Dans le cas de petits bassins versants, il permet aussi d'agir sur des pollutions diffuses. Les activités ou aménagements pouvant nuire à la qualité des eaux y sont réglementés ou interdits.

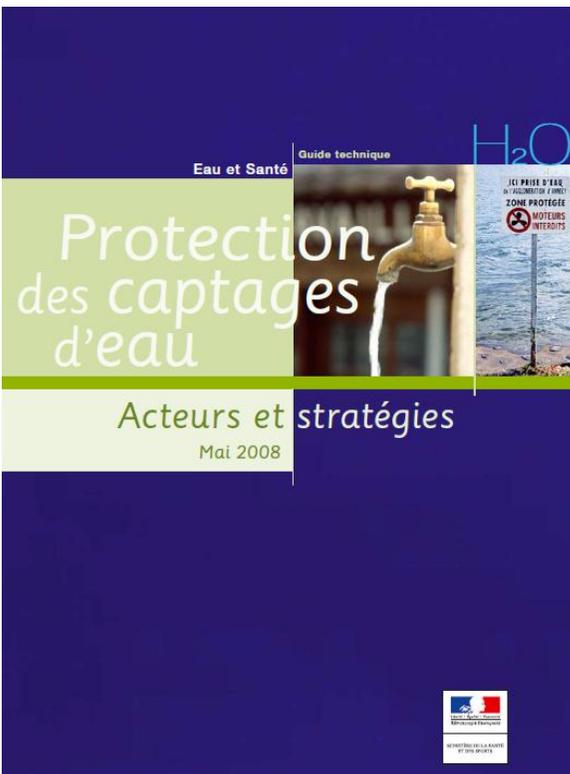
4 Le périmètre de protection éloignée constitue une zone de vigilance particulière, vis-à-vis notamment des pollutions accidentelles pouvant avoir des conséquences sur la ressource. Les activités ou aménagements à l'intérieur de ce périmètre y sont souvent réglementés. L'application de la réglementation générale doit y être appliquée en toute rigueur, c'est-à-dire sans possibilité de dérogation.

5 Le bassin d'alimentation de captage (BAC), aussi appelé aire d'alimentation de captage (AAC), désigne la surface du sol sur laquelle l'eau qui ruisselle et/ou s'infiltrate alimente le captage.

On parle de pollution ponctuelle quand une source de pollution localisée en un point précis provoque une contamination (bactériologique ou par des hydrocarbures...) de la ressource.

Les pollutions accidentelles font référence par exemple à des erreurs de manipulation ou des défaillances de transport. Elles sont localisées.

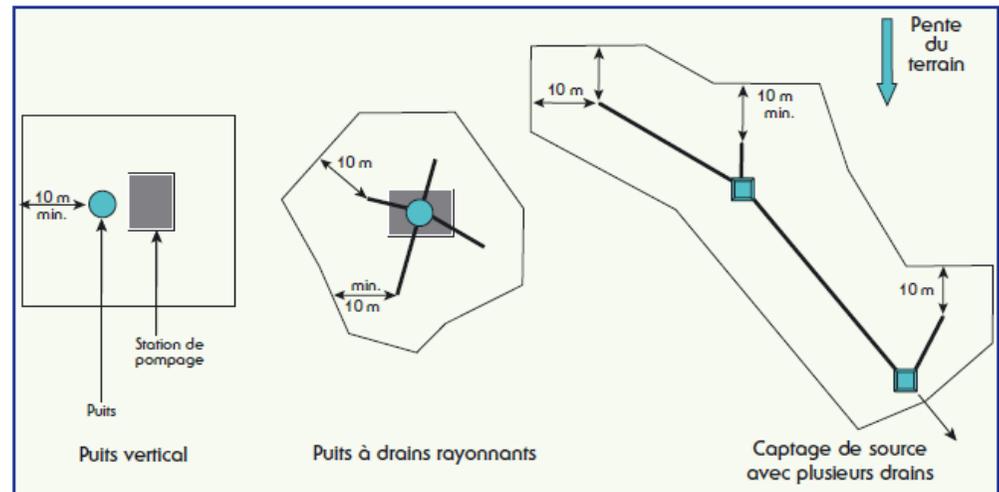
Quant aux pollutions diffuses, leur origine ne peut être localisée en un point précis, ni concerner un acteur en particulier. Elles sont réparties sur une surface importante. Les résidus polluants sont entraînés par les eaux de ruissellement ou par percolation dans le sol et le sous-sol.



Guide sur la définition des périmètres de protection (2008)

- Rappel des principes de la protection des captages
- Recommandations pour la définition des périmètres de protection
- Liste de prescriptions type

Exemple de recommandation pour la définition des PPI



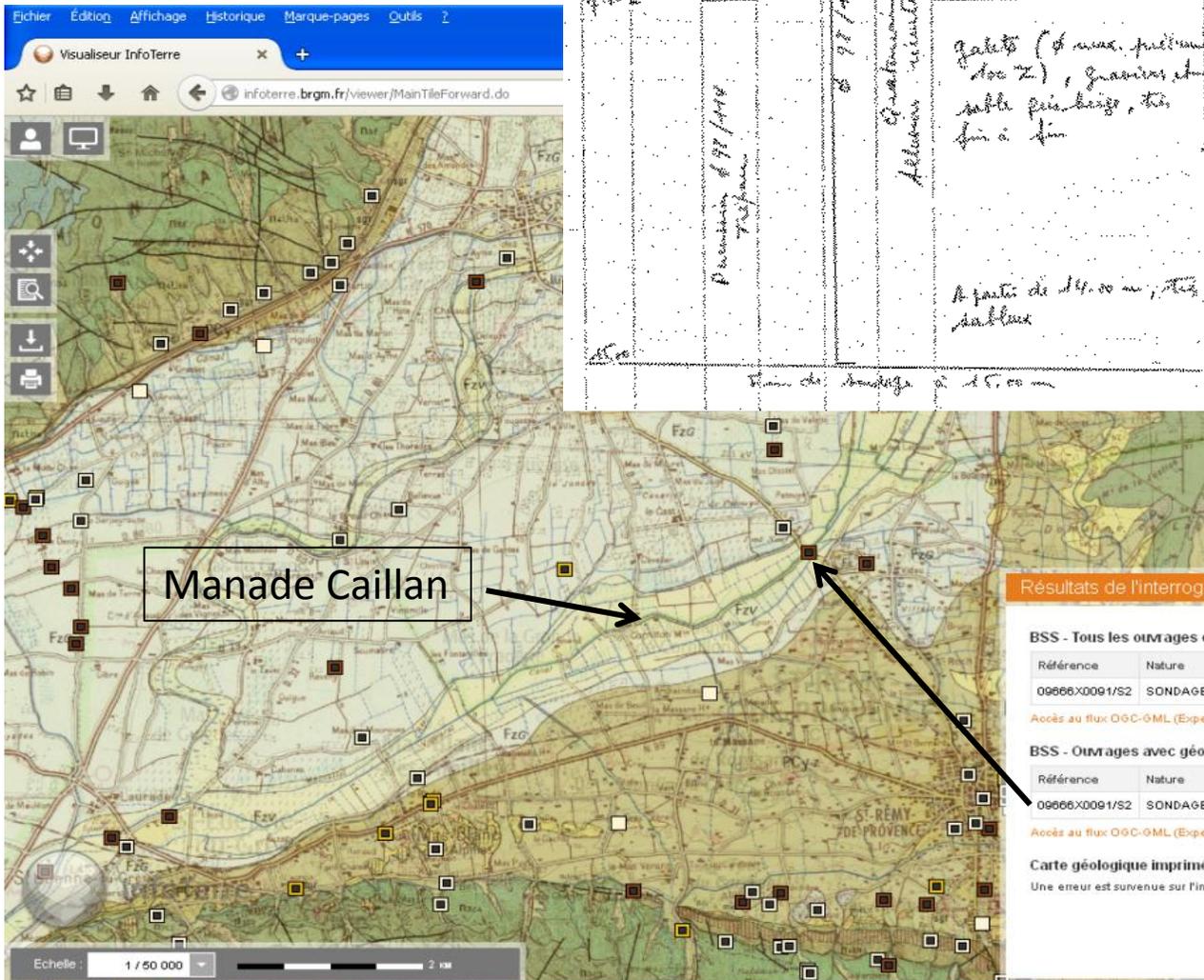
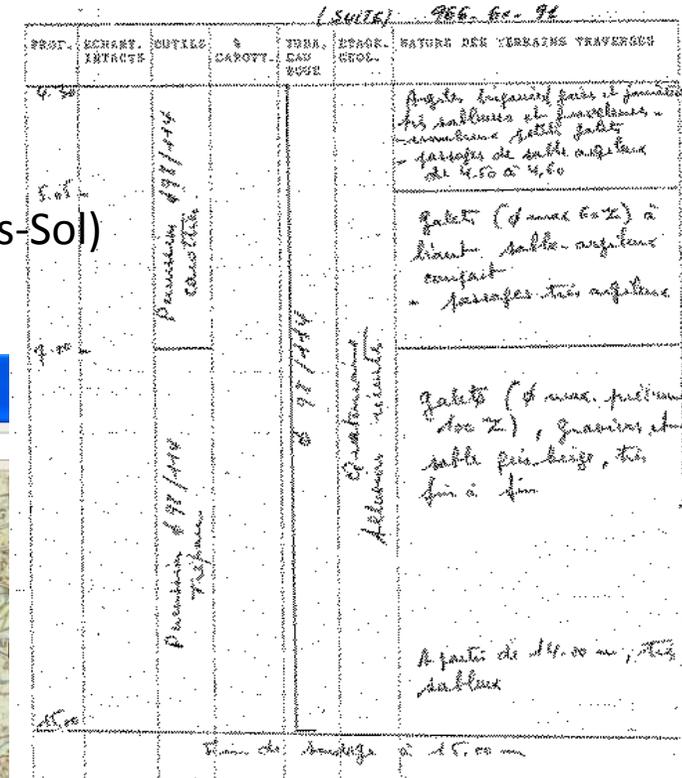
Préconisation pour la délimitation des périmètres de protection rapprochée

(Guide technique Protection des captages d'eau – Acteurs et Stratégie. 2008)

Type d'aquifère ou de ressource	Petits captages gravitaires (montagne et piémont)	Nappe libre alluviale ou non	Nappe alluviale influencée Réalimentation induite	Nappe semi-captive peu profonde	Nappe captive profonde	Nappe de socle (Terrains profonds fissurés)	Eau superficielle		Karst
							Prises au fil de l'eau	Plans d'eau	
Critères de dimensionnement	Débits, méthode du bilan d'eau	Piézométrie, pompages, vitesse, modèles	Piézométrie, pompages, vitesse d'écoulement, modèles, importance respective des apports d'eau superficielle et d'eau souterraine	Piézométrie, pompages, drainance, épaisseur de la couverture imperméable	Débit, rabattement, piézométrie	Géologie, géophysique, fracturation, pompage de longue durée	Vitesses du cours d'eau	Taille du plan d'eau	Débits, limites géologiques, traçages, vitesses,
Paramètres de qualité, caractéristiques de la ressource captée	Température, conductivité, turbidité, bactériologie, nitrates	Nitrates, pesticides, (bactériologie)	Nitrates, micropollution, pesticides (bactériologie)	Potentiel redox, pH, NH ₄ ⁺ , Fe, Mn, métaux	NH ₄ , Fe, Mn, pH, métaux, sulfures	Nitrates (processus dénitrifiant éventuel), Fe, Mn, éléments traces métalliques	Paramètres organiques, température, nitrates, micropolluants organiques dont pesticides	Paramètres organiques, température, nitrates, micropolluants organiques dont pesticides	Turbidité, bactériologie, nitrates, pesticides
Zone d'étude	Bassin hydrogéologique ou topographique	Zone d'alimentation potentielle	Zone d'appel et bassin versant du cours d'eau	Zone d'appel	Recensement d'ouvrages dans un rayon de 2 km	Bassin versant topographique, limites géologiques	Bassin versant (étude globale) et zone proche du captage (étude détaillée)	Bassin versant du cours d'eau (étude globale) et cuvette de la retenue (étude détaillée)	Bassin versant théorique, limite imperméable, engouffrements
Extension de la protection rapprochée en amont du captage	Bassin versant en totalité ou de 150 à 400 m selon la vulnérabilité	Isochrone 50 jours	Isochrone 50 jours en nappe et 2 heures pour le cours d'eau	Zone d'appel ou isochrone 50 jours	PPR = PPI	Zone d'appel	2 heures pour un débit non dépassé 90 % du temps annuellement (ou pour le module)	Un secteur de berge ou auréole de terrain autour du plan d'eau	Quelques heures de temps de transfert + périmètre de protection satellites
Mesures complémentaires de protection des eaux distribuées	Aucun traitement, traitement A1 ou A2	Aucun traitement, traitement A1	Traitement A1 ou A3, détecteur d'alerte, stockage de secours, surveillance piézométrique	Traitement A1 ou A3, limitation du rabattement	Aucun traitement, traitement A1 ou A3, surveillance des forages voisins du captage, limitation du rabattement	Traitement A1 ou A2	Traitement A2 ou A3, stockage d'eau brute ou traitée, interconnexions station d'alerte (si zones urbanisées ou industrielles)	Traitement A2 ou A3, stockage d'eau brute ou traitée, interconnexions station d'alerte (si zones urbanisées ou industrielles)	Traitement A1, A2 ou A3, détection de la turbidité, stockage d'eau brute ou traitée, ressource de secours
Zone de vigilance	Bassin versant	Zone d'alimentation	Zone d'alimentation + élément du bassin versant du cours d'eau	Zone d'alimentation	Rayon de quelques km	Bassin versant ou bassin hydrogéologique connu	Bassin versant en partie ou en totalité	Bassin versant en partie ou en totalité parfois sans objet (grands lacs de montagne)	Bassin versant

Comment connaître l'hydrogéologie autour d'un forage?

→ BSS (Banque de Données du Sous-Sol)
www.infoterre.fr



La vulnérabilité d'un captage et de la ressource :

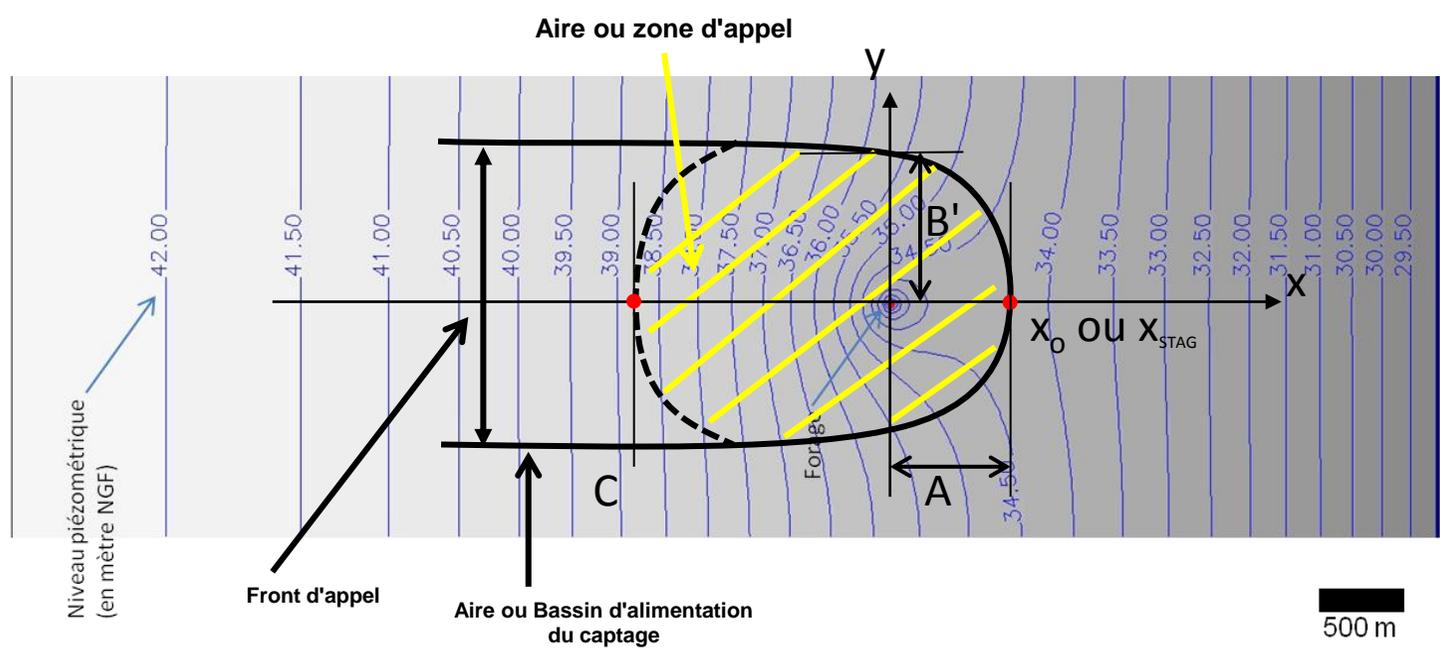
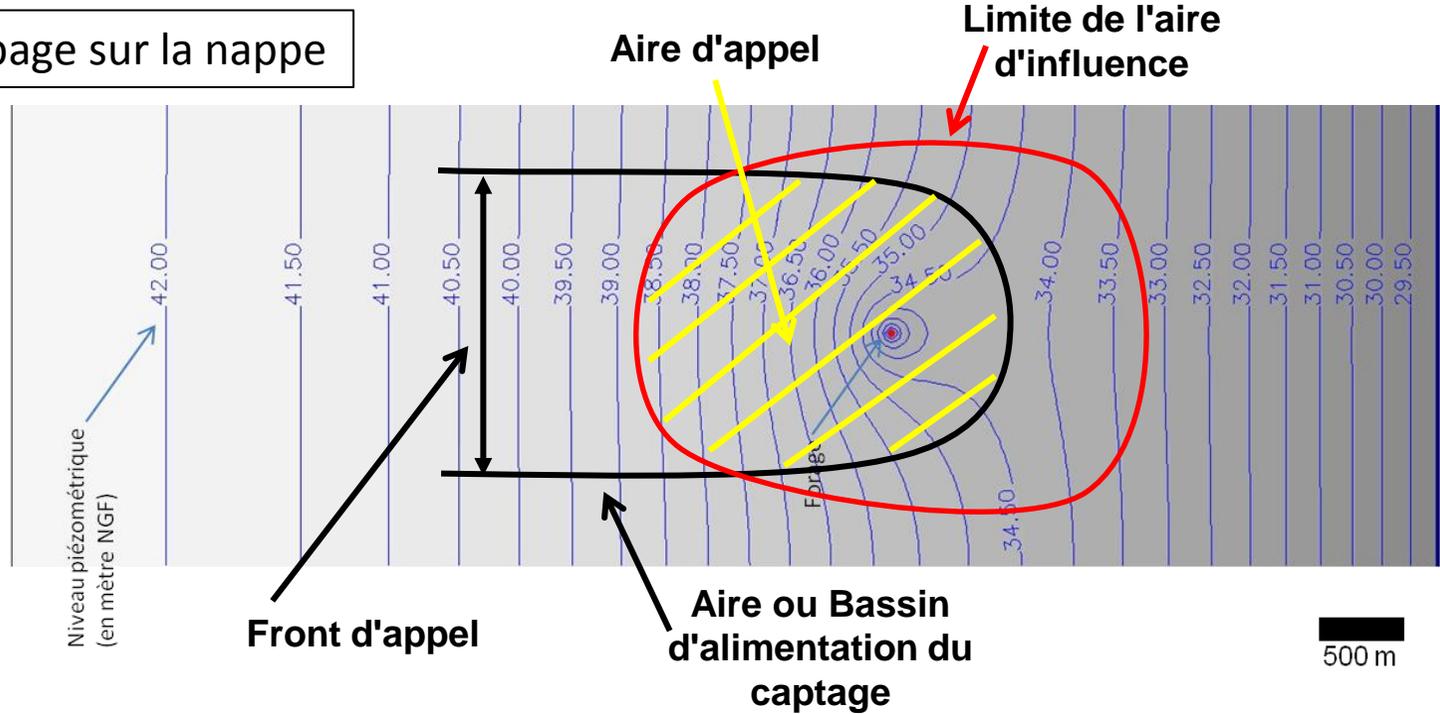
La vulnérabilité d'un aquifère est la possibilité qu'a un contaminant de s'infiltrer et de circuler (par advection-diffusion) depuis la surface jusqu'à la zone saturée dans des conditions naturelles.

- **la vulnérabilité intrinsèque**, propre au captage et à l'aquifère, compte tenu de leurs caractéristiques physiques. Elle s'évalue par le croisement de 2 critères :

- * la facilité et rapidité suivant lesquelles des matières polluantes peuvent atteindre l'eau souterraine et dégrader ses qualités (dépendant du sol, de la zone non saturée et du type de roche)
- * la difficulté et la lenteur de régénération de la qualité de l'eau souterraine (effacement de l'impact après arrêt de la pollution)

- **la vulnérabilité induite, ou extrinsèque**, due à l'occupation du sol et aux activités anthropiques. Cette "vulnérabilité" représente les pressions anthropiques ou activités susceptibles de polluer la ressource (appeler quelques fois la carte de danger).

Effet d'un pompage sur la nappe



- Modèle simplifié : solution analytique (Grubb ou Wyssling)

La méthode est donnée dans le Guide du Québec (2006) :

Analyses simplifiées

i) Il est possible de se contenter de déterminer les distances suivantes (figure 7.3) :

- distance entre la limite aval de la zone d'appel et l'ouvrage de captage (A);
- largeur maximale de l'aire d'alimentation (L);
- largeur de la limite d'alimentation au droit du puits (B);
- distance du puits à l'isochrone considérée (d), selon l'axe des abscisses.

$$\text{En nappe captive : } \begin{cases} A = \frac{Q}{2\pi b K i} \\ L = \frac{Q}{b K i} \\ B = \frac{L}{2} \end{cases} \quad \text{En nappe libre : } \begin{cases} A = \frac{Q\Delta l}{\pi K (h_1^2 - h_2^2)} \\ L = \frac{2Q\Delta l}{K (h_1^2 - h_2^2)} \\ B = \frac{L}{2} \end{cases} \quad B=2B'$$

La valeur de la distance d doit être calculée par erreurs et échecs afin de correspondre à l'isochrone, au temps t considéré selon l'équation :

$$t = \frac{n_e d}{K i} - \frac{Q n_e}{2\pi (K i)^2 b} \ln \left(1 + d \frac{2\pi K b i}{Q} \right) \quad \text{en nappe captive, et} \quad (7.9)$$

$$t = \frac{n_e \Delta l}{K (h_1 - h_2)} d - \frac{Q n_e \Delta l^2}{\pi (h_1 + h_2) (K (h_1 - h_2))^2} \ln \left(1 + \frac{\pi K (h_1^2 - h_2^2)}{Q \Delta l} d \right) \quad (7.10)$$

en nappe libre.

- Rasmussen, H., Rouleau, A. et Chevalier, S. (éditeurs scientifiques) 2006. *Outils de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captages d'eau souterraine*. 311 pages. Document diffusé par le Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec.
<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraine/s/alim-protec/index.htm>

Le périmètre de protection au temps t est alors déterminé par l'arc de cercle de rayon d centré au puits, jusqu'à son intersection avec l'aire d'alimentation. Cette simplification se justifie car elle est conservatrice, l'isochrone réelle se situant à l'intérieur de cet arc de cercle.

La limite de l'aire d'alimentation du captage ("capture zone") est confondue avec la limite de la zone d'appel entre l'aval de la zone et l'intersection avec l'arc de cercle passant par le point C (de centre le puits de captage). L'équation de la courbe formant l'aire d'alimentation du captage est :

En nappe captive (équation 28 de Grubb 1993):

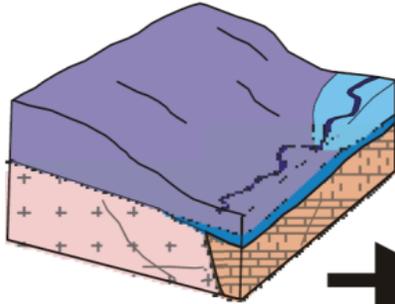
The capture zone of a well extends upgradient to a regional groundwater divide. It extends downgradient only as far as a local groundwater divide created by the cone of depression of the well. In a Cartesian coordinate system, the bounding flowline within which all groundwater flows to the well can be estimated with the following equation:

$$x = \frac{-y}{\tan \left[\frac{2\pi K b i y}{Q} \right]}$$

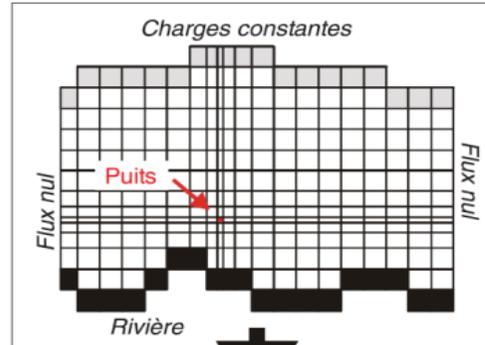
where x and y are coordinate values, Q is the pumping rate of the well, K is the hydraulic conductivity of the aquifer, b is the saturated thickness of the aquifer, i is the regional (pre-pumping) hydraulic gradient, and $\tan []$ is in radians.

Pour une nappe libre : bi est remplacé par $(h_1^2 - h_2^2) / (2\Delta L)$ (équation 31 de Grubb 1993)

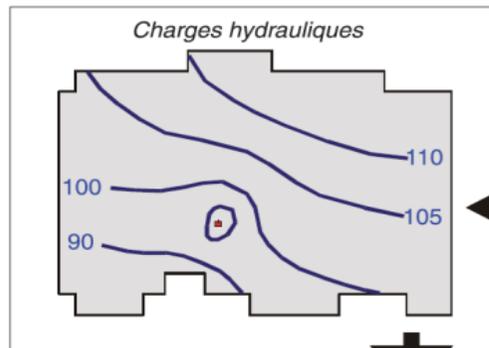
Modèle conceptuel



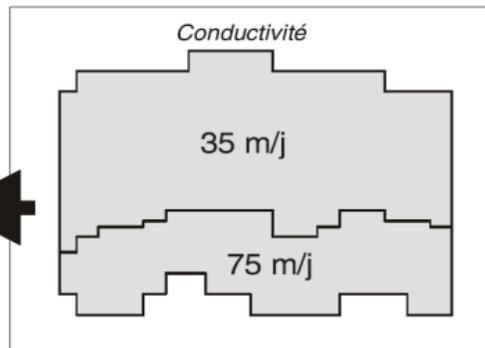
Discretisation



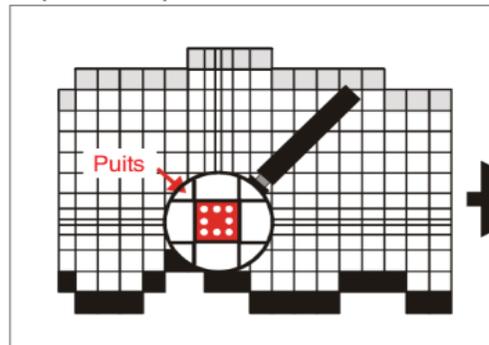
Calibration



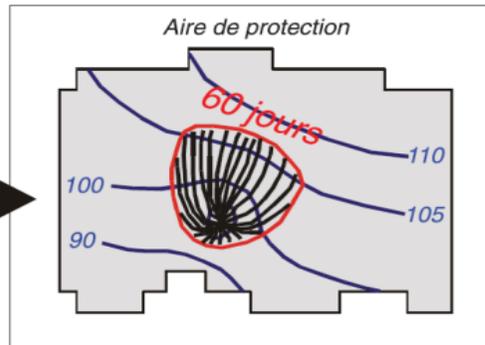
Propriétés de l'aquifère

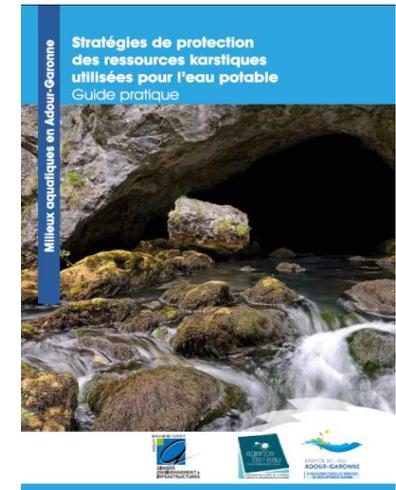


Imposer les particules



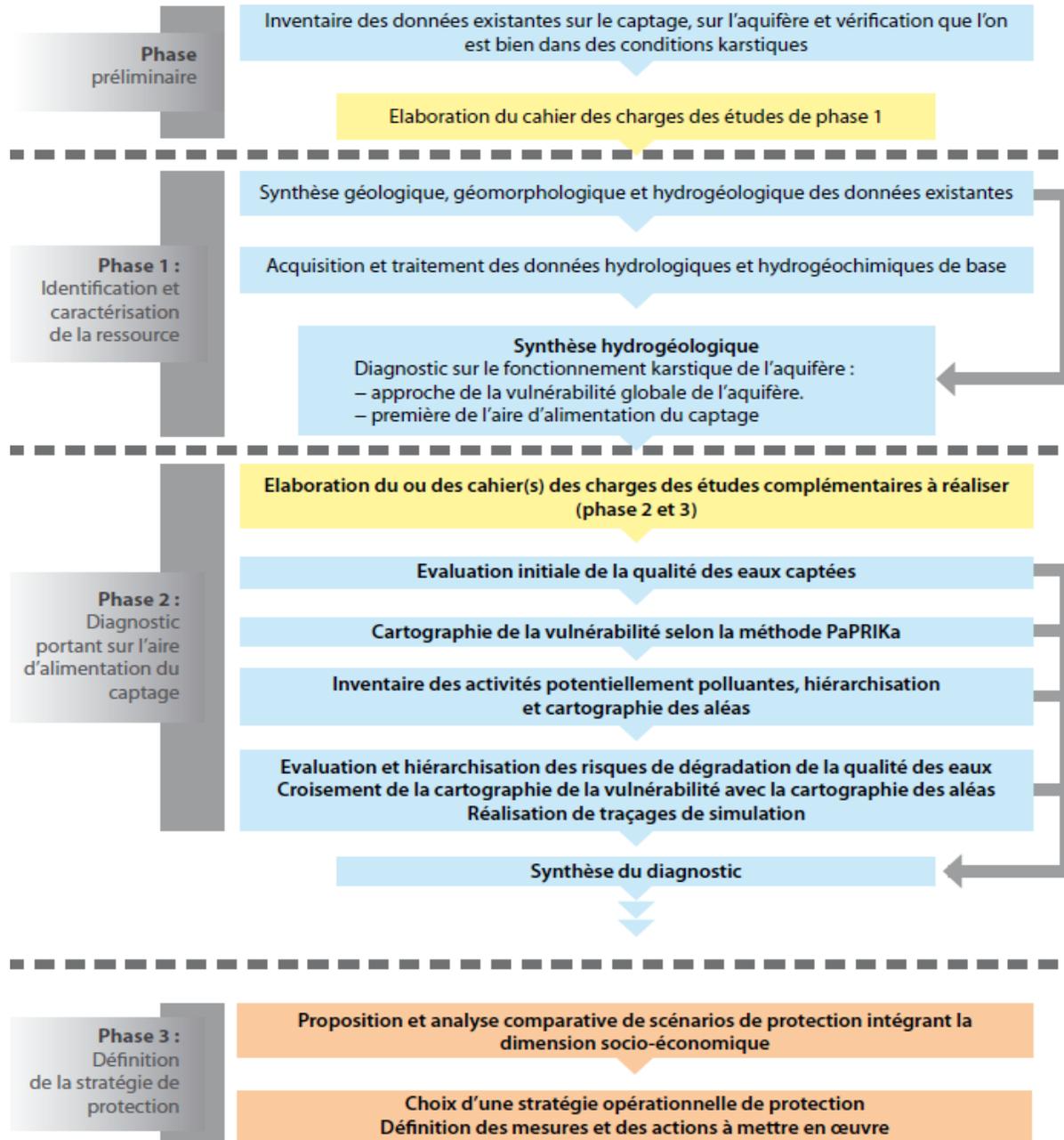
Traçage de particules





Guide Pratique Stratégies de protection des ressources karstiques utilisées pour l'eau potable.

Agence de l'Eau. 2011

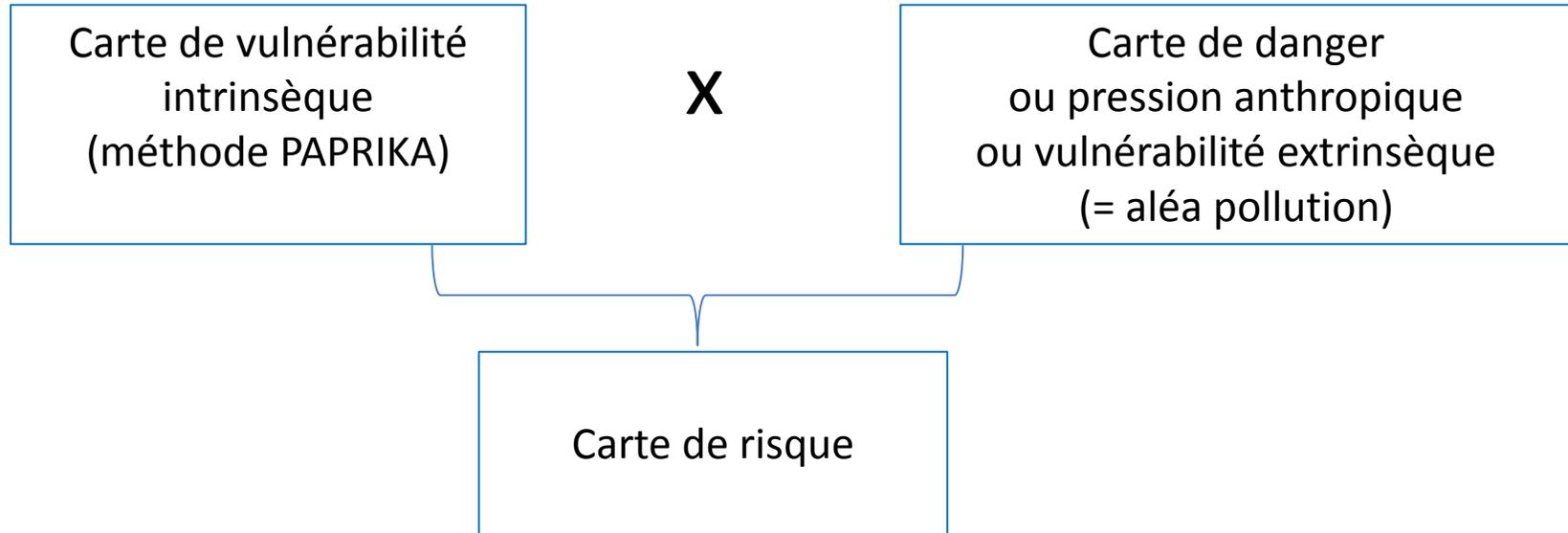


Classification typologique des captages en aquifère karstique

CRITÈRES		SUPERFICIE DE L'AIRE D'ALIMENTATION	
		< 10 km ² / débit moyen annuel faible	> 10 km ² / débit moyen annuel fort
POSITION DU CAPTAGE	Captage de source, forage sur axe de drainage, pompage en source	<p>Type A</p> <ul style="list-style-type: none"> • Souvent systèmes karstiques peu évolués ou peu fonctionnels pour avoir un débit suffisant en étiage • Surfaces à protéger plus réduites • Meilleure maîtrise du foncier • Motivation plus importante car périmètre à proximité de la zone alimentée • Etudes hydrogéologiques préalables plus simples et moins coûteuses <p>Stratégie de protection simple</p>	<p>Type B</p> <ul style="list-style-type: none"> • Surfaces à protéger plus ou moins importantes et souvent éloignées du captage • Vitesses de transit pouvant être élevées (vulnérabilité) • Difficulté de motivation car protection loin de la population alimentée • Etudes hydrogéologiques préalables, longues et complexes • Nécessité d'une forte expertise du bureau d'études et de l'hydrogéologue agréé <p>Stratégie de protection de plus difficile à définir, fonction des résultats des études préalables (fonctionnalité, vulnérabilité,...)</p>
	Forage hors des principaux axes de drainage	<p>Type C</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aire d'alimentation souvent réduite, pas ou peu d'influence des sources de pollution lointaines • Surface à protéger souvent réduite par rapport au type B (dépend du débit de pompage) • Meilleure maîtrise du foncier • Motivation plus importante car périmètre à proximité de la population alimentée • Etudes préalables différentes des autres types, principalement basées sur les pompages d'essai <p>Stratégie de protection différente des types A et B</p>	

Evaluation des risques de dégradation de la qualité des eaux en milieu Karstique

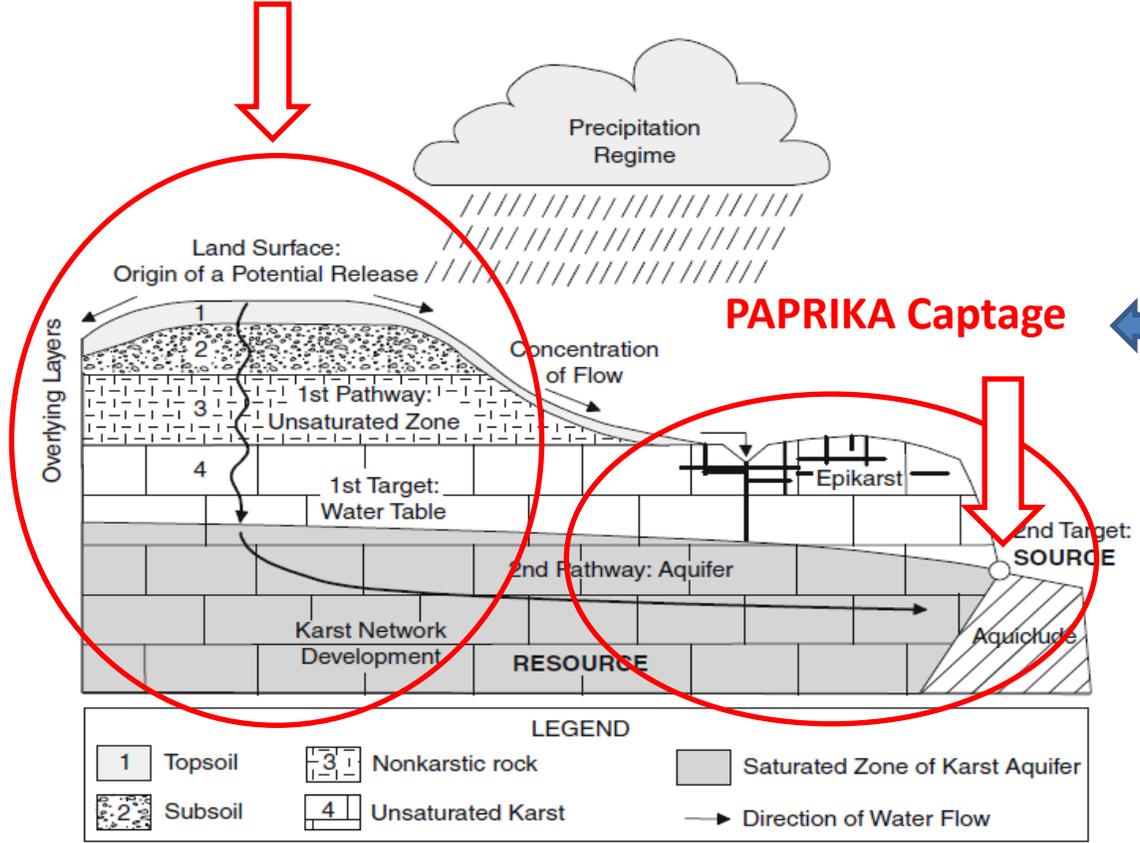
(Guide Pratique Stratégies de protection des ressources karstiques utilisées pour l'eau potable. Agence de l'Eau. 2011)



Méthode d'estimation de la vulnérabilité intrinsèque (RISKE, EPIK, PAPRIKA...)

Vulnérabilité aux pollutions diffuses à travers la zone non saturée

PAPRIKA Ressource



Vulnérabilité aux pollutions accidentelles tenant compte des temps de transit

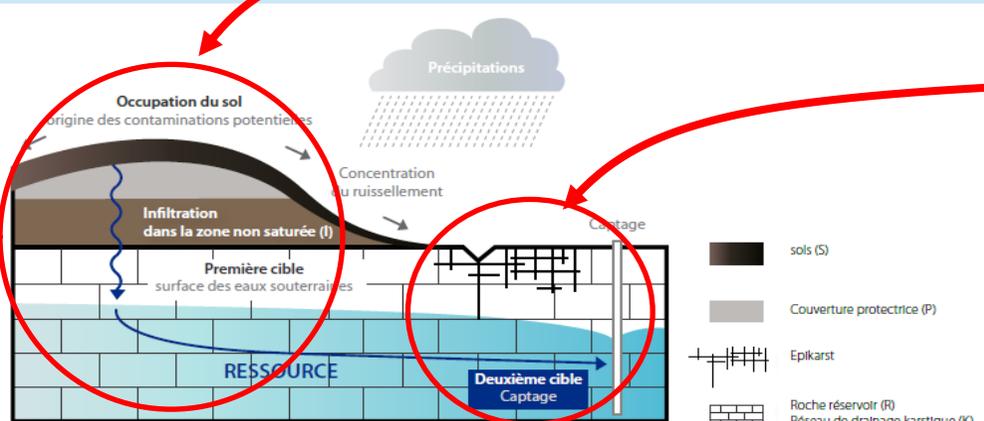
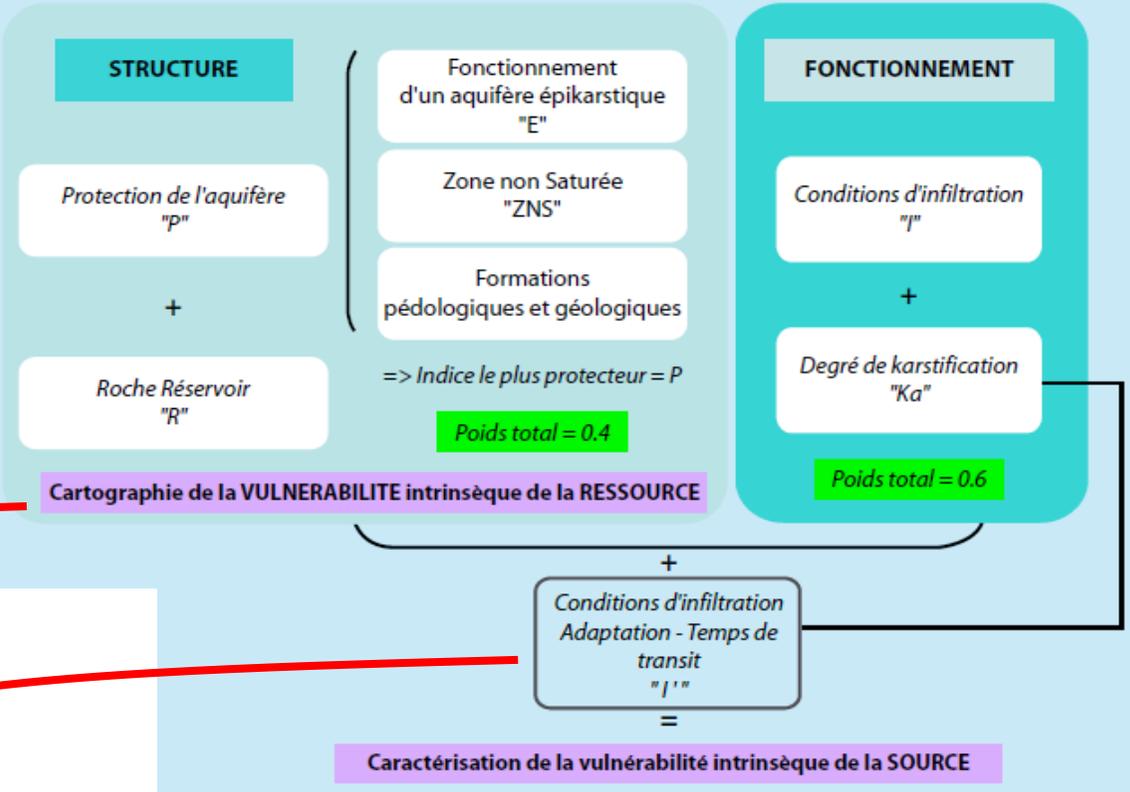
PAPRIKA Captage

FIGURE 8-12 The European approach (EA) to groundwater vulnerability mapping is based on an origin-pathway-target conceptual model and can be used for resource and source vulnerability mapping. The main factors include the precipitation regime, the overlying layers, the concentration of flow, and the karst network development. (Modified after Goldscheider et al., 2000; Daly et al., 2002; Zwahlen, 2004.)

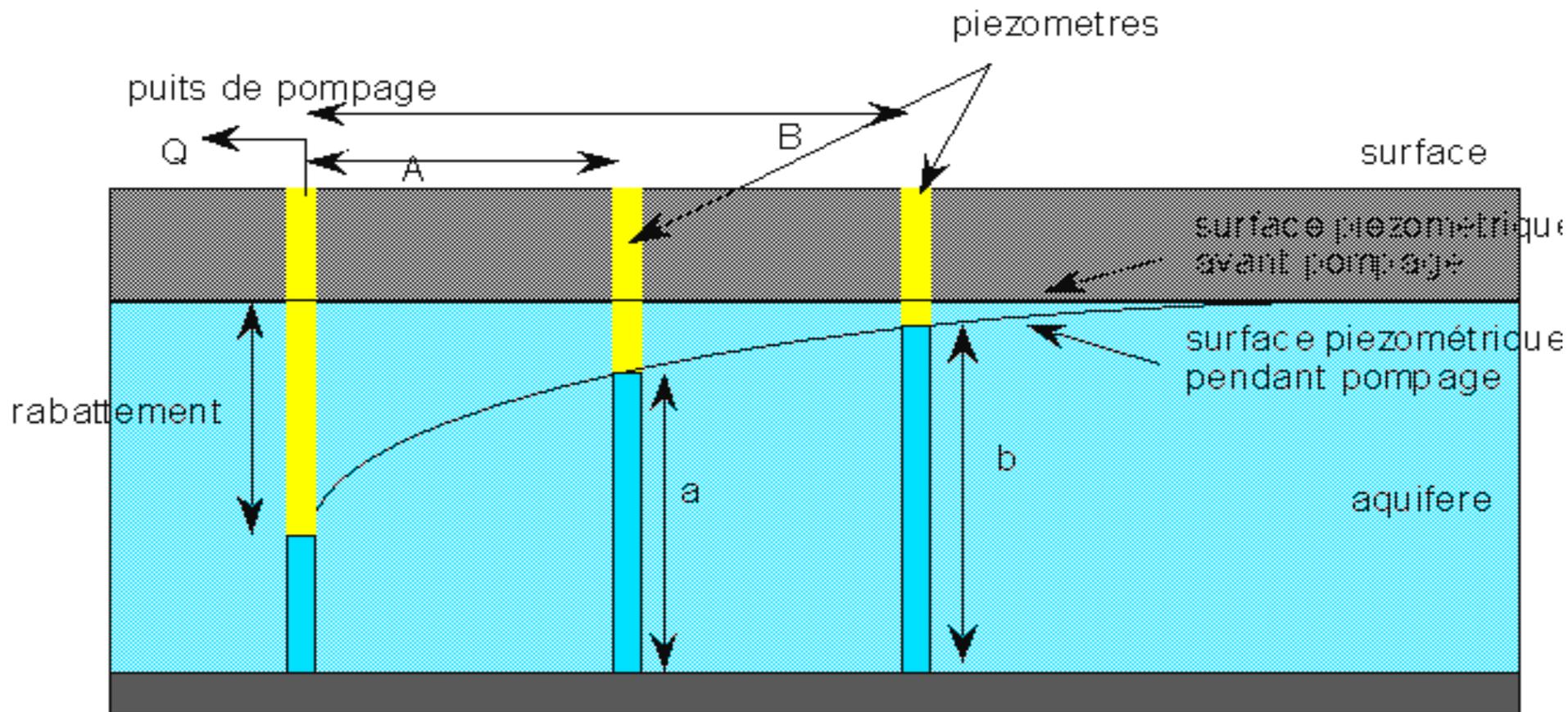
Cette méthode utilise un modèle conceptuel de l'aquifère karstique pour déterminer 4 critères :

- **P pour couverture Protectrice** : Correspond à la structure la plus protectrice résultant de la combinaison du critère Sol, des caractéristiques de la zone non saturée (lithologie, épaisseur, fracturation) et le fonctionnement épikarstique;
- **R pour nature du réservoir souterrain** : Caractérise la potentialité de la roche à être karstifiée ;
- **I pour la nature de l'infiltration** : caractérise les conditions d'infiltration diffuse et ponctuelle à partir des pentes et de la cartographie des pertes, dolines et avens, ainsi que la distance aux cours d'eau alimentant la perte ;
- **K pour degré de karstification et de fonctionnement du système karstique** : tient compte du degré d'organisation des écoulements et souligne la position des axes de drainage connus à partir des études hydrogéologiques et/ou reconnus par exploration directe.

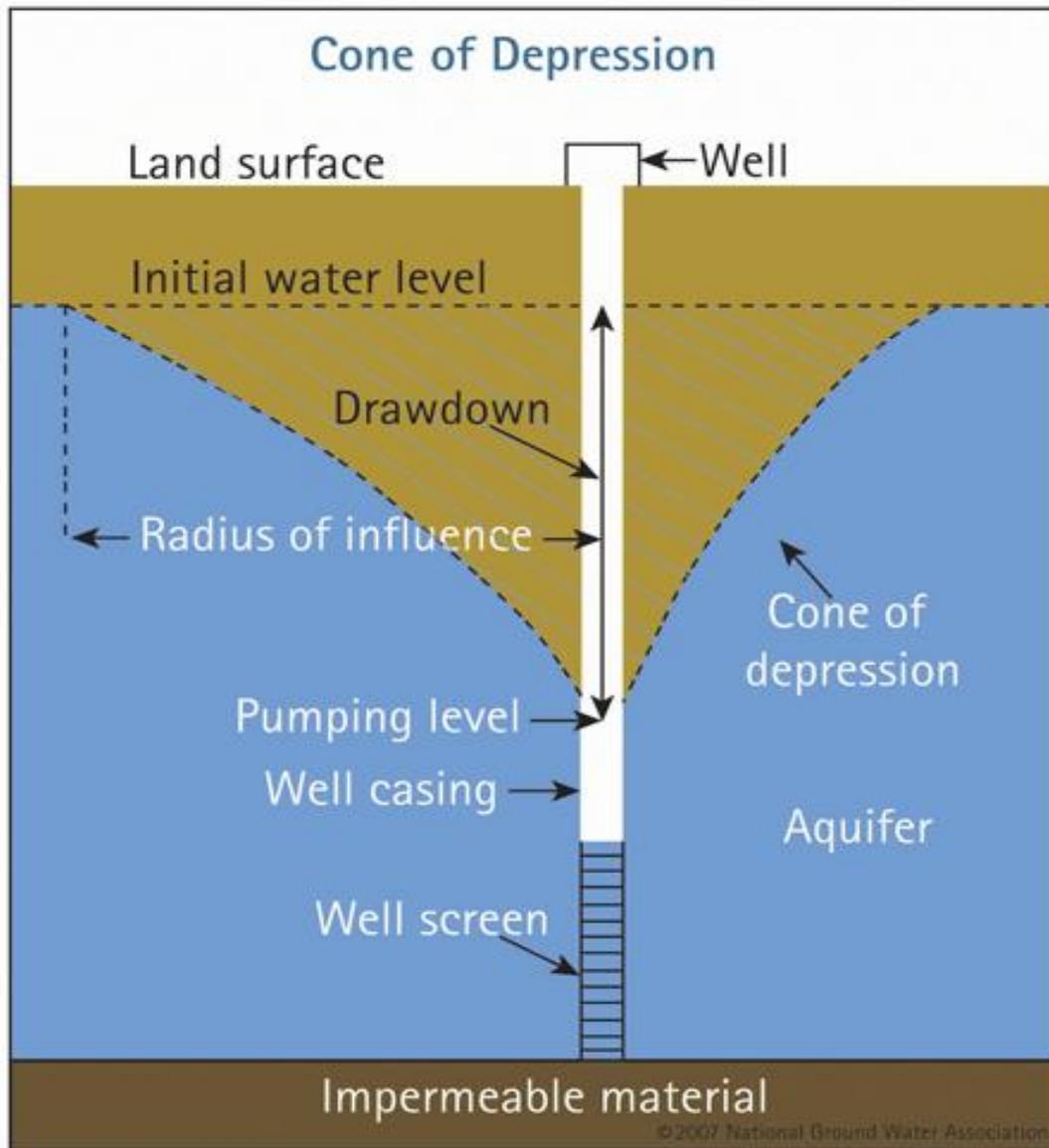
Organisation des différents critères de la méthode PaPRIKa en fonction de la structure et du fonctionnement des aquifères karstiques (extrait du guide BRGM-ONE-MA, octobre 2009)

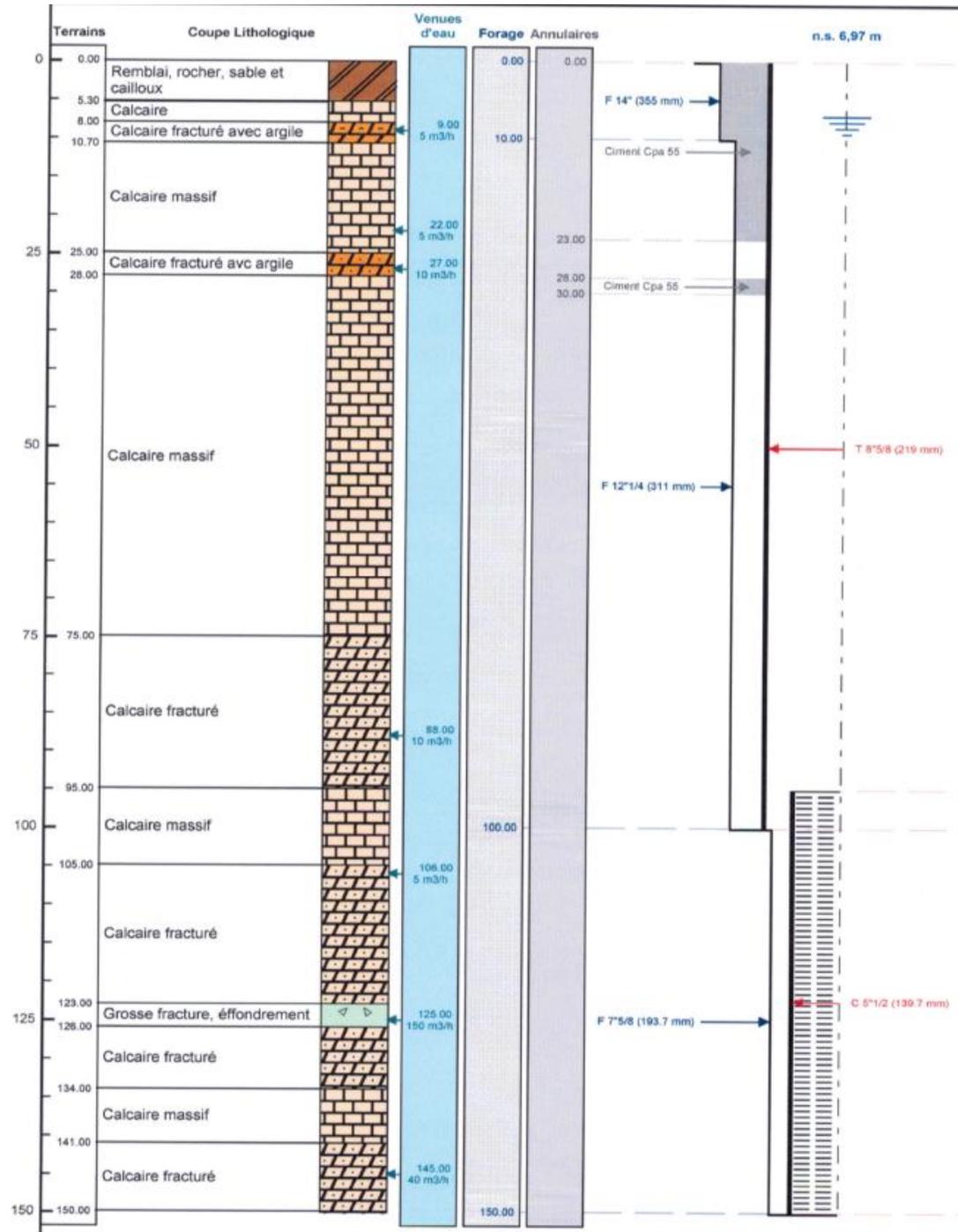


- sols (S)
- Couverture protectrice (P)
- ⊕ Epikarst
- Roche réservoir (R)
- Réseau de drainage karstique (K)



<http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/permeabilite-des-roches.xml>





- Equipement du forage :
- tube acier plein diam: 219 mm
 - cimentation 0-23m
 - crépine acier diam: 139,7 mm

Exemple du forage de Roquevaire (2013)

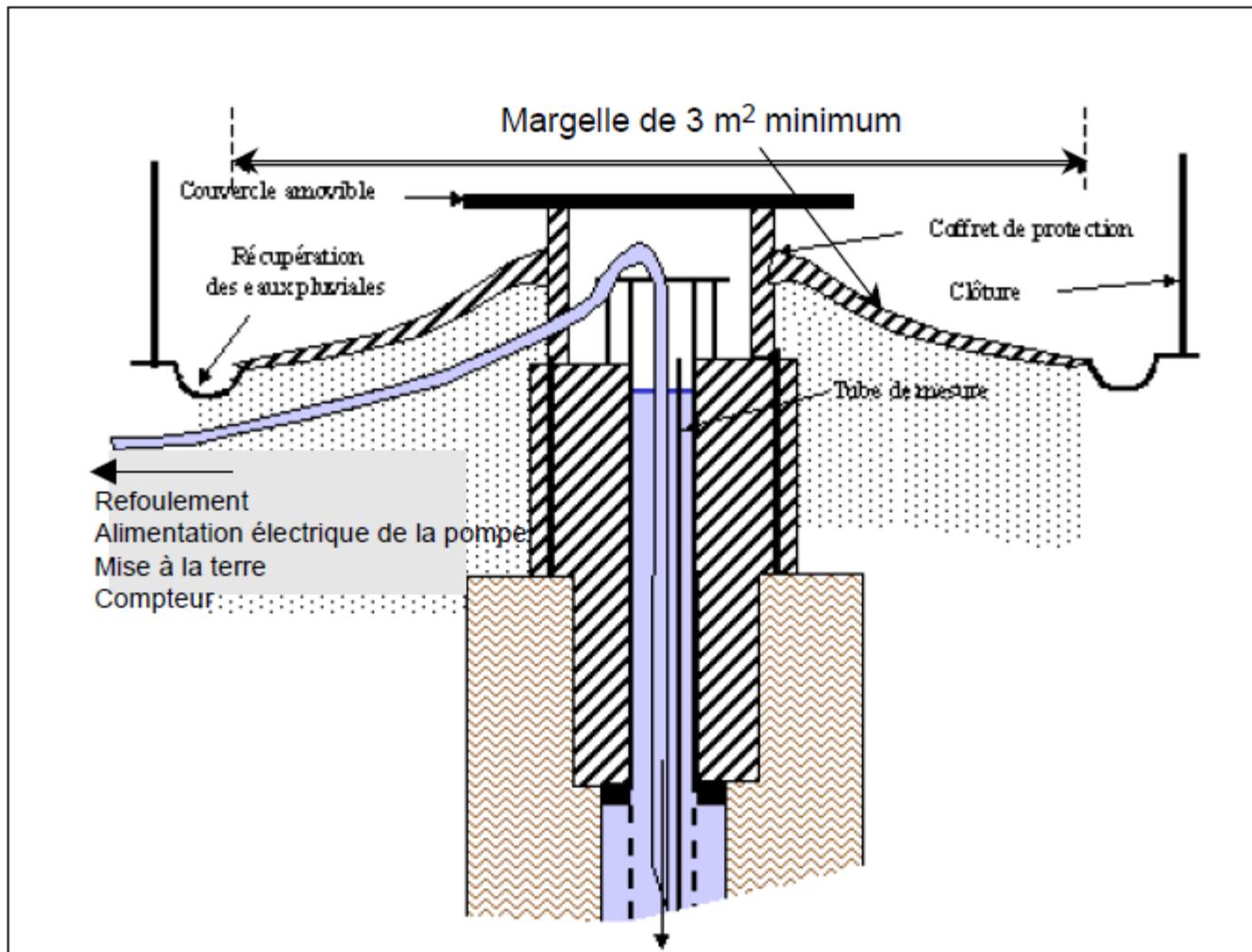
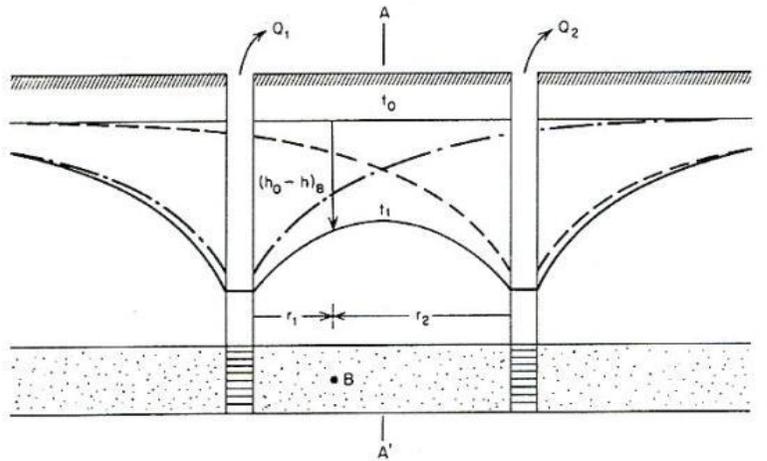


Illustration 15 - Protection de la tête de forage
Source documentaire BRGM : d'après la plaquette « Le forage en Bretagne »

Principe de superposition



--- Drawdown due to Q_2 - - - Drawdown due to Q_1 — Total drawdown

Figure 8.13 Drawdown in the potentiometric surface of a confined aquifer being pumped by two wells with $Q_1 = Q_2$.

Principe des images

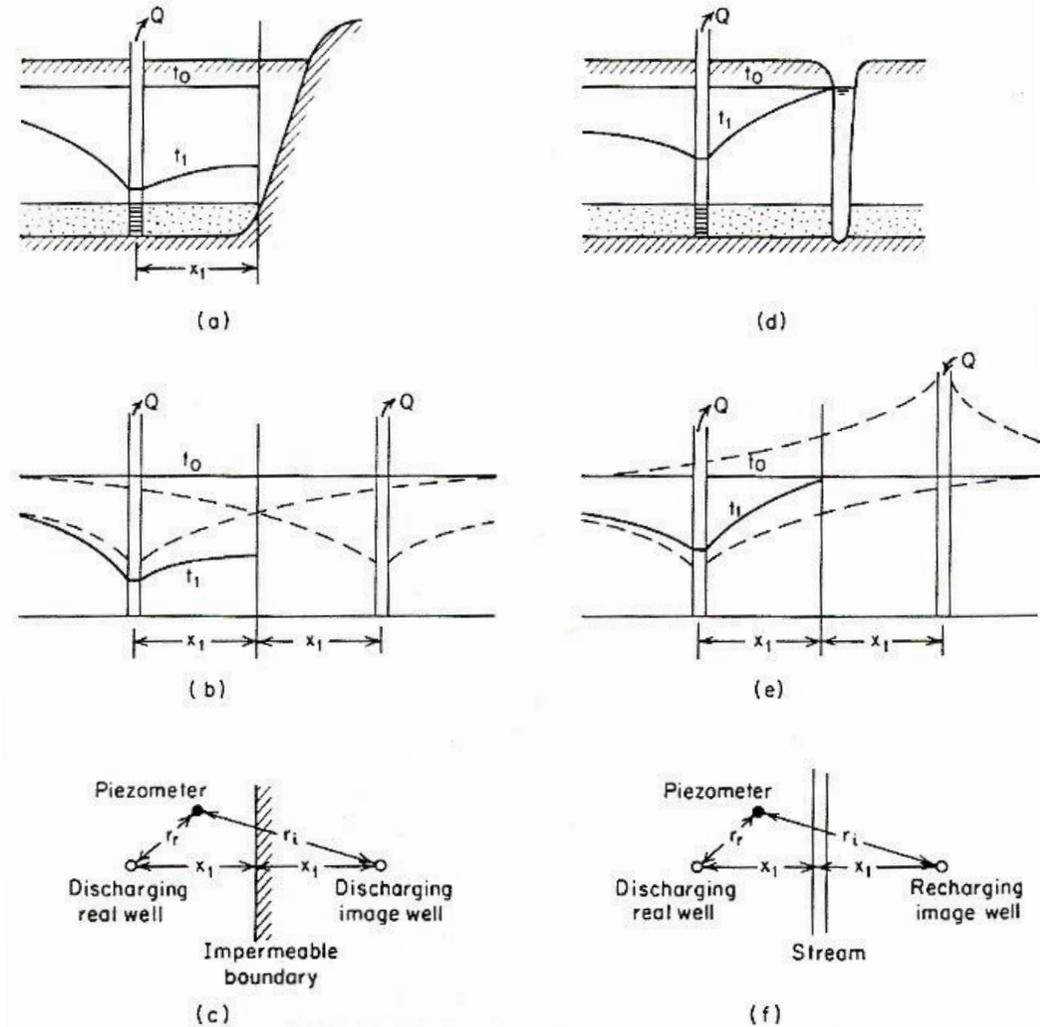
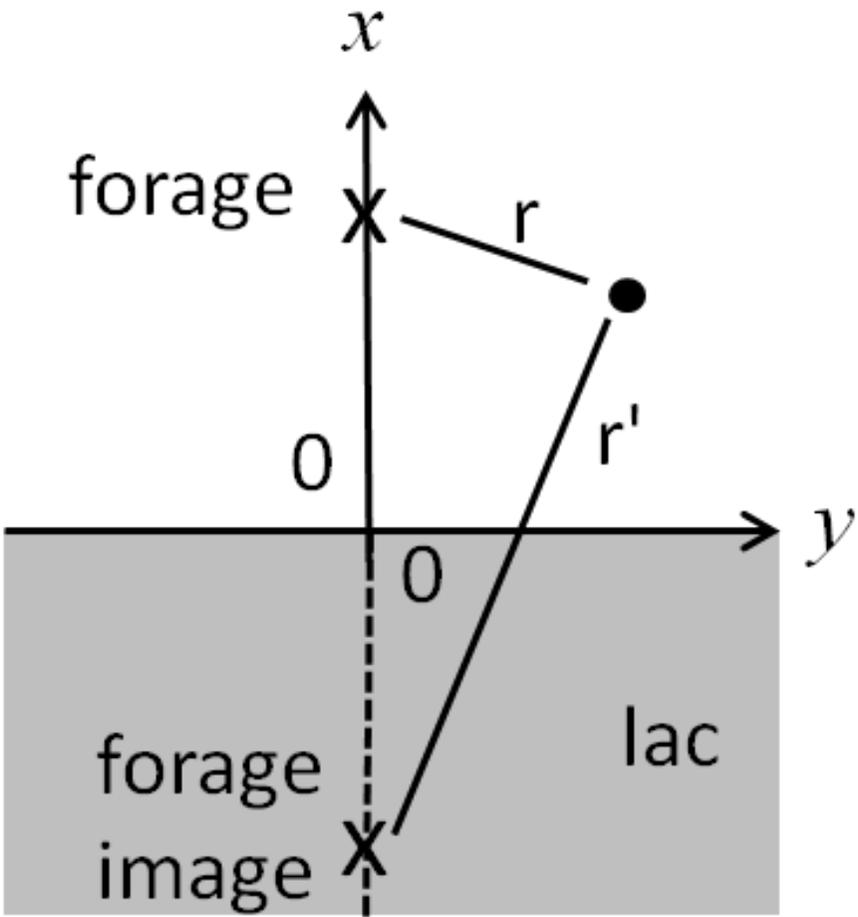


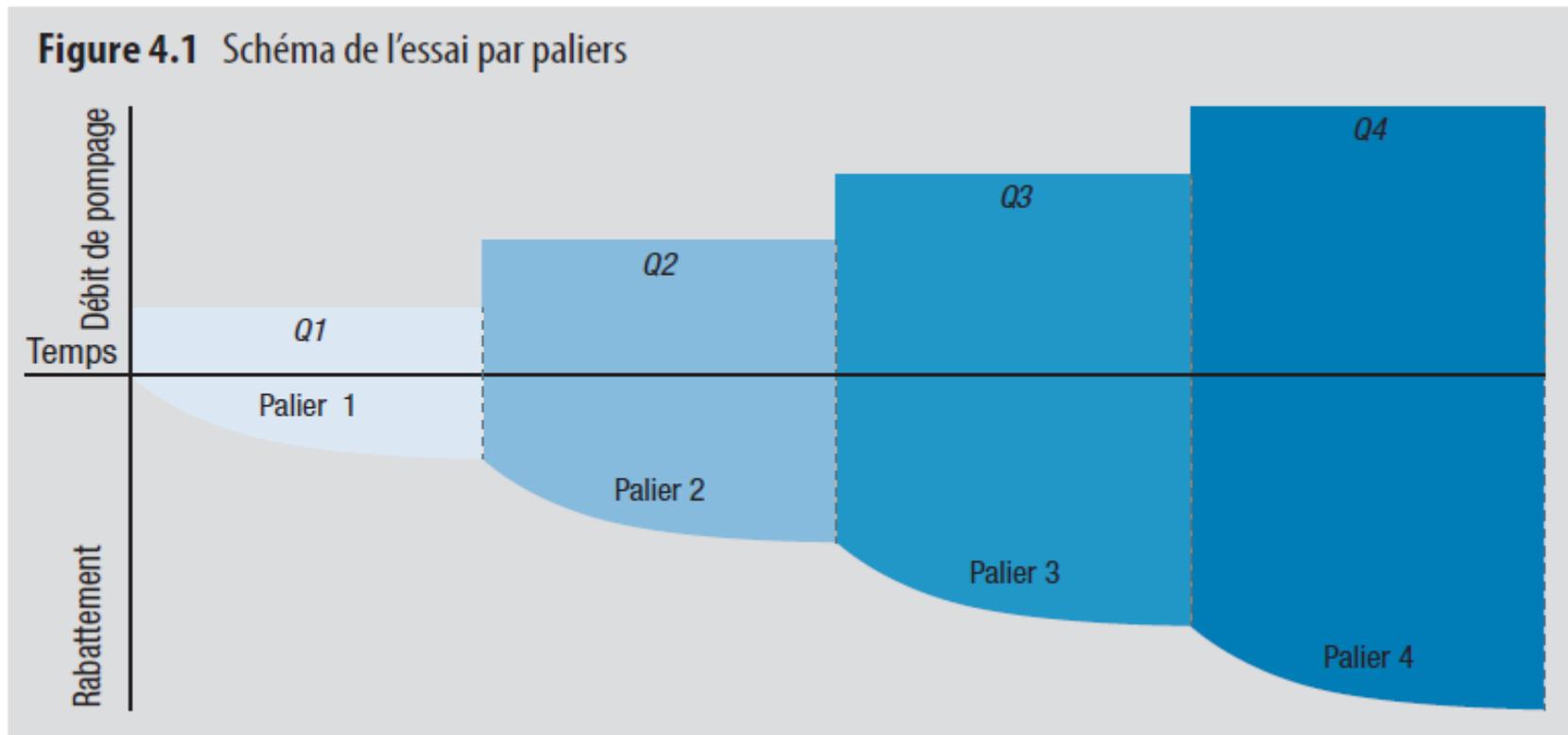
Figure 8.15 (a) Drawdown in the potentiometric surface of a confined aquifer bounded by an impermeable boundary; (b) equivalent system of infinite extent; (c) plan view.

vue en plan



Les essais de pompage

- Essai par paliers de débit → caractériser l'ouvrage
- Essai de pompage longue durée à débit constant → caractériser l'aquifère



Fréquence de mesures du niveau d'eau en cours de pompage et lors de la remontée

Sur l'ouvrage de pompage

Temps (t) écoulé depuis le début du pompage ou de la remontée	Fréquence des mesures
de 0 min à 15 min	1 min
de 15 min à 30 min	5 min
de 30 min à 60 min	10 min
de 1 h à 2 h	15 min
de 2 h à 4 h	30 min
de 4 h à 8 h	1 h
> 8 h	2 h

Sur le(s) piézomètre(s)

Distance du piézomètre par rapport au forage pompé	Temps (t) écoulé depuis le début du pompage ou de la remontée	Fréquence des mesures
Nappe libre < 25 m Nappe captive < 500 m	de 0 min à 10 min de 10 min à 30 min de 30 min à 60 min de 1 h à 4 h > 4 h	2 min 5 min 10 min 20 min idem forage
Nappe libre 25 m — 100 m Nappe captive 500 m — 1 000 m	de 0 min à 60 min de 1 h à 4 h > 4 h	15 min 30 min idem forage
Nappe libre > 100 m Nappe captive > 1 000 m	de 0 min à 60 min de 1 h à 4 h > 4 h	30 min 1 h idem forage

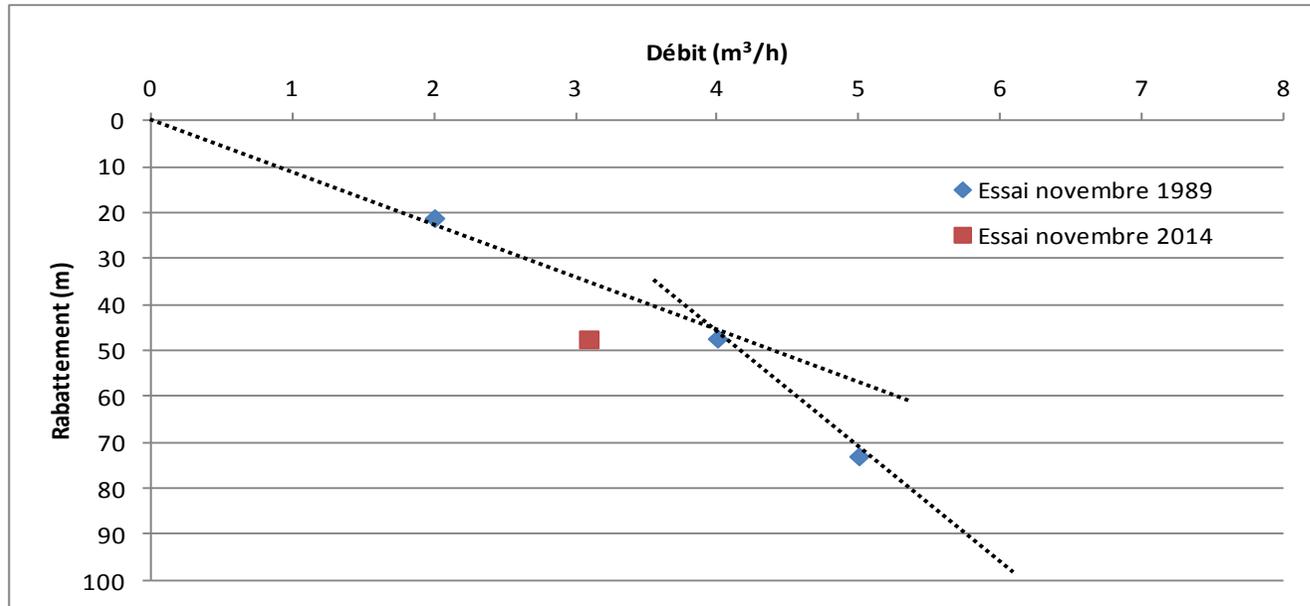
Paliers de débit et durées lors des essais de puits et de nappe

Classe de débits	Essai par paliers ^{a)}	Essai longue durée	Nombre de piézomètres à suivre s'ils existent (à titre indicatif)	Suivi de la remontée à l'issue du pompage de longue durée
> 80 m ³ /h	≥ 4 paliers de 2 h	≥ 72 h	3	≥ 24 h
de 8 m ³ /h à 80 m ³ /h	≥ 4 paliers de 1 h	≥ 24 h	2	≥ 8 h
de 0 m ³ /h à 8 m ³ /h à usage professionnel	≥ 4 paliers de 1 h	≥ 12 h	1	≥ 6 h
< 1 000 m ³ /an (usage domestique)	≥ 3 paliers de 1 h (enchaînés sans remontée)	≥ 3 h enchaîné	—	≥ 3 h

a) Les paliers seront non enchaînés sauf stipulation contraire au cahier des charges.

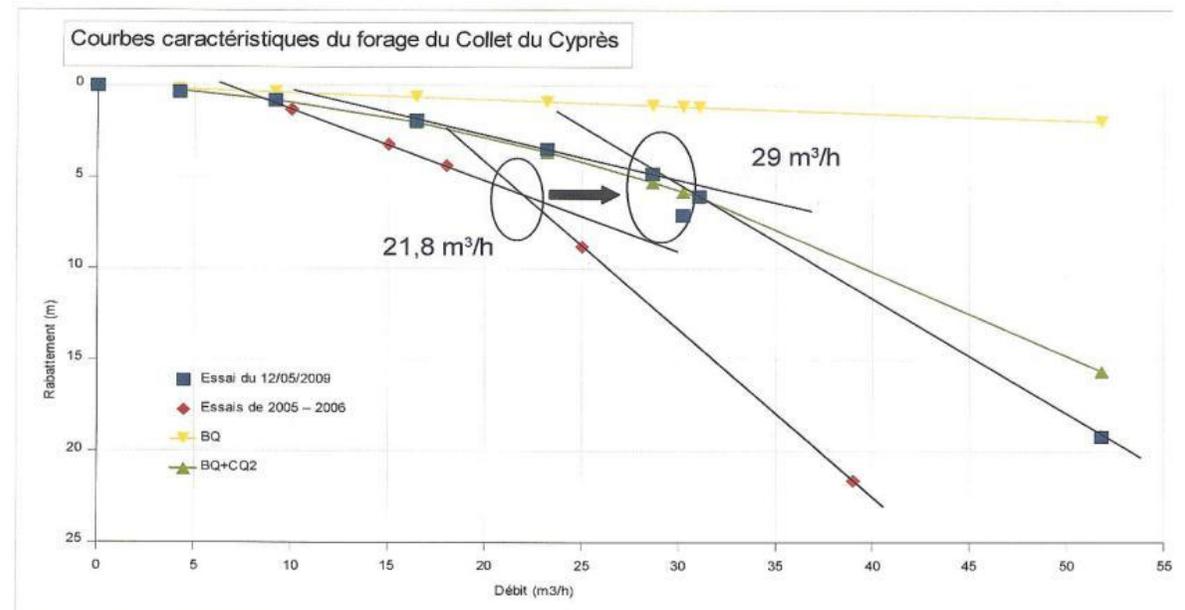
Norme Afnor
Avril 2007
Forage d'eau et de géothermie

Essai de puits : courbe caractéristique du forage



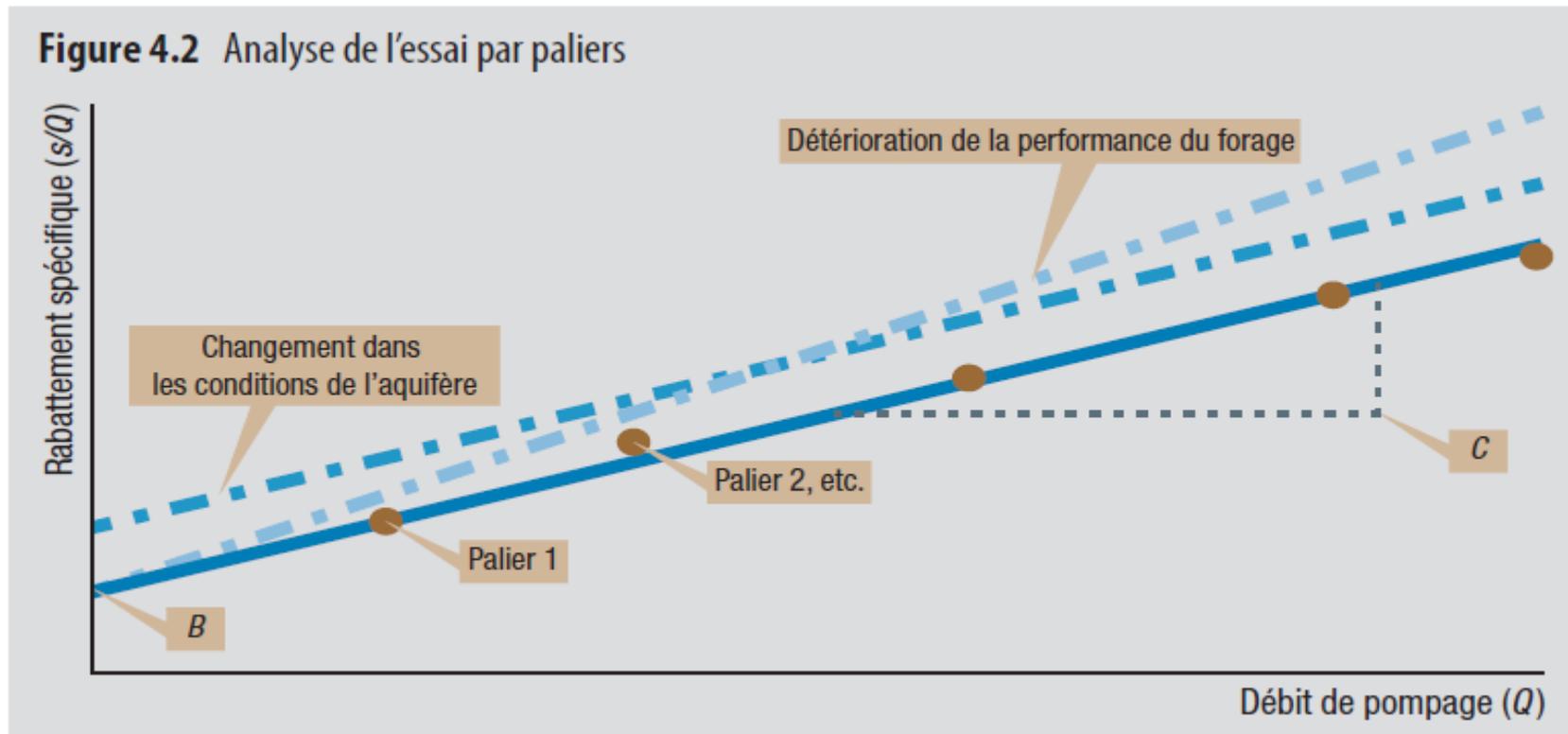
Forage
(Le Bourguet 83)

Forage (Les Arcs 83)



$$S = BQ + CQ^2$$

$S/Q = B + CQ$: équation de droite

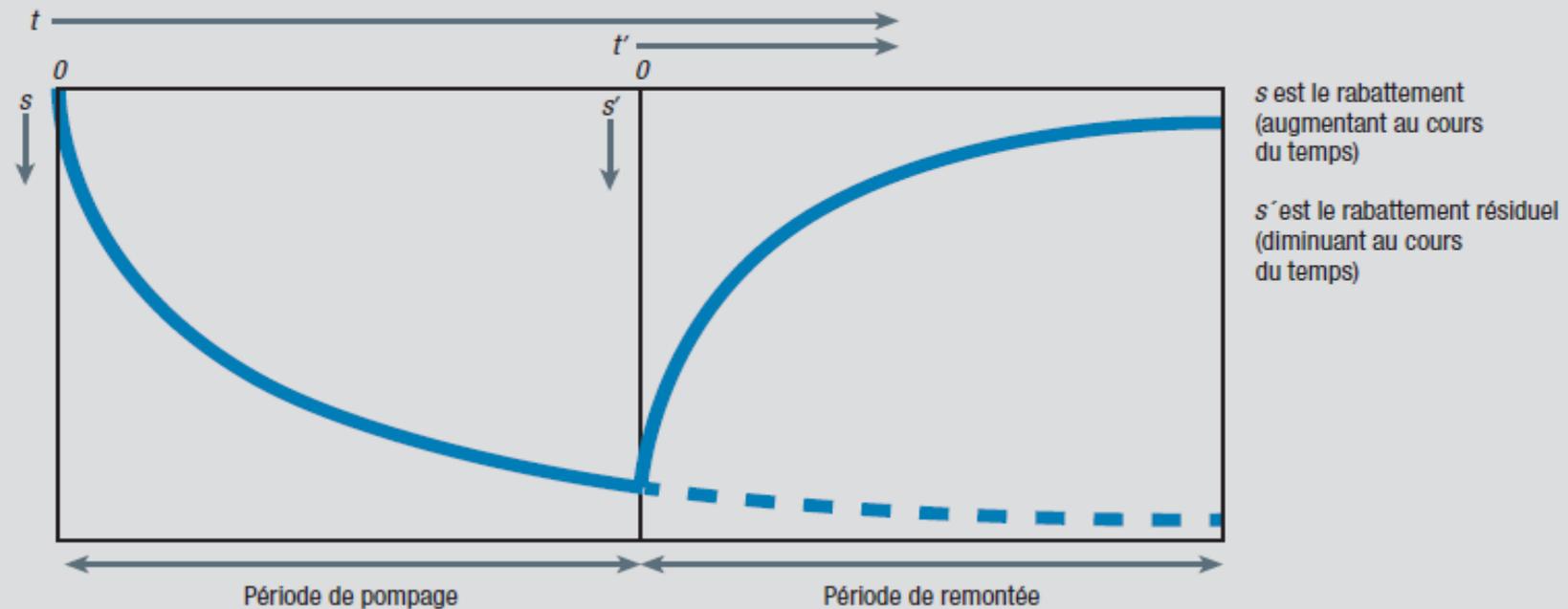


CICR 2011

Pompages d'essai en régime transitoire *théorie*

Figure 6.1 Explication des termes de l'essai de remontée

(tiré de : Kruseman et de Ridder [1990])



Toujours suivre la descente et la remontée

Pompages d'essai en régime transitoire

théorie

- Solution de l'équation de la diffusivité proposée par Theis (1935):

Conditions d'application:

- milieu homogène
- puits complet
- nappe captive, illimitée
- substratum et toit parfaitement imperméables

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

Où u est la variable de Theis:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

W est la fonction de Theis:

$$W(u) = \int_0^u \frac{e^{-u}}{u} du$$

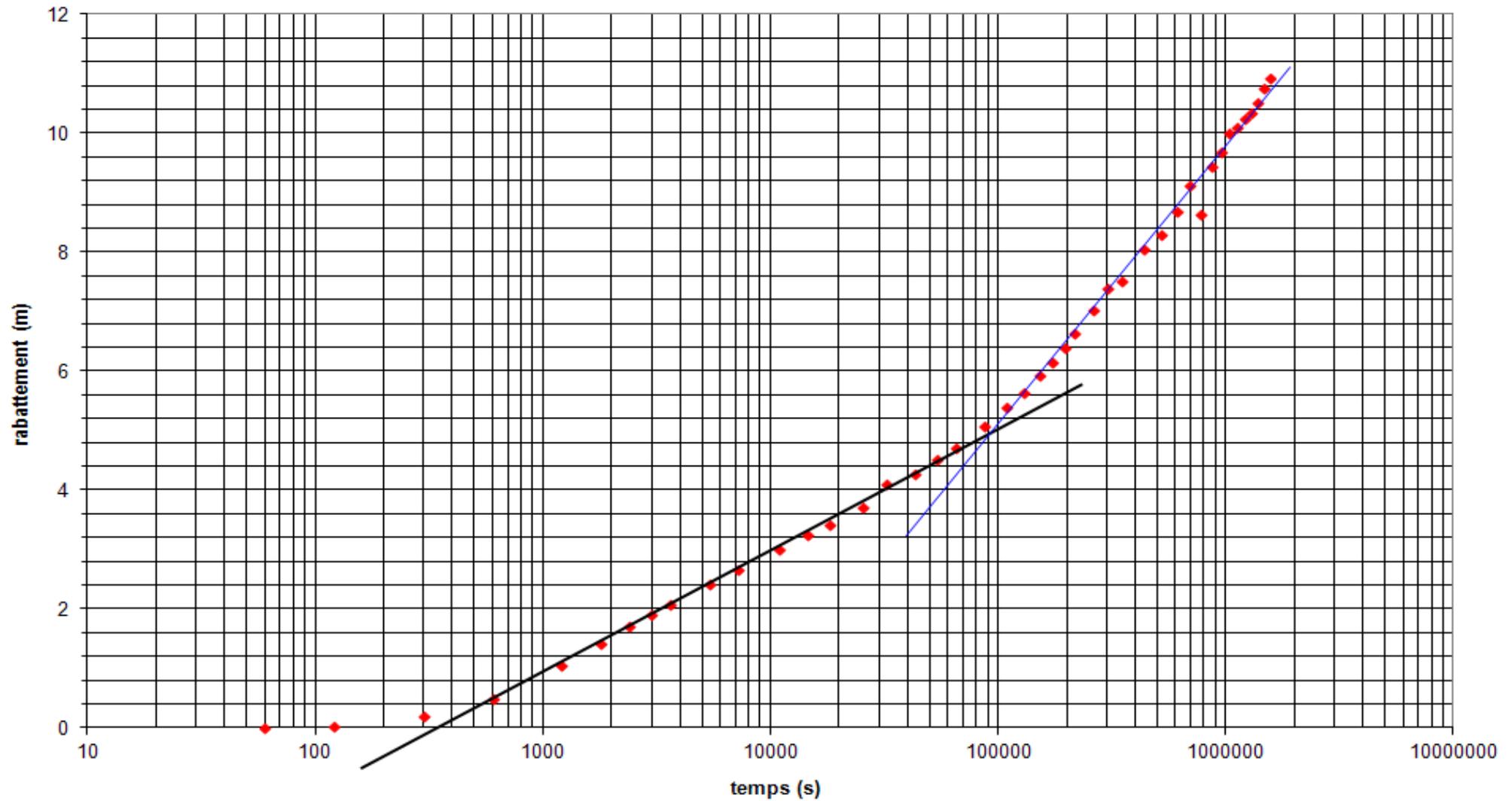
- Solution approchée de Jacob

$$s \approx \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S}$$

valable si

$$1/u = \frac{4Tt}{r^2 S} \geq 100$$

- Solution approchée de Jacob



Cas simple d'une limite à flux nul

Représentations Log-Log (Theis)

Theis

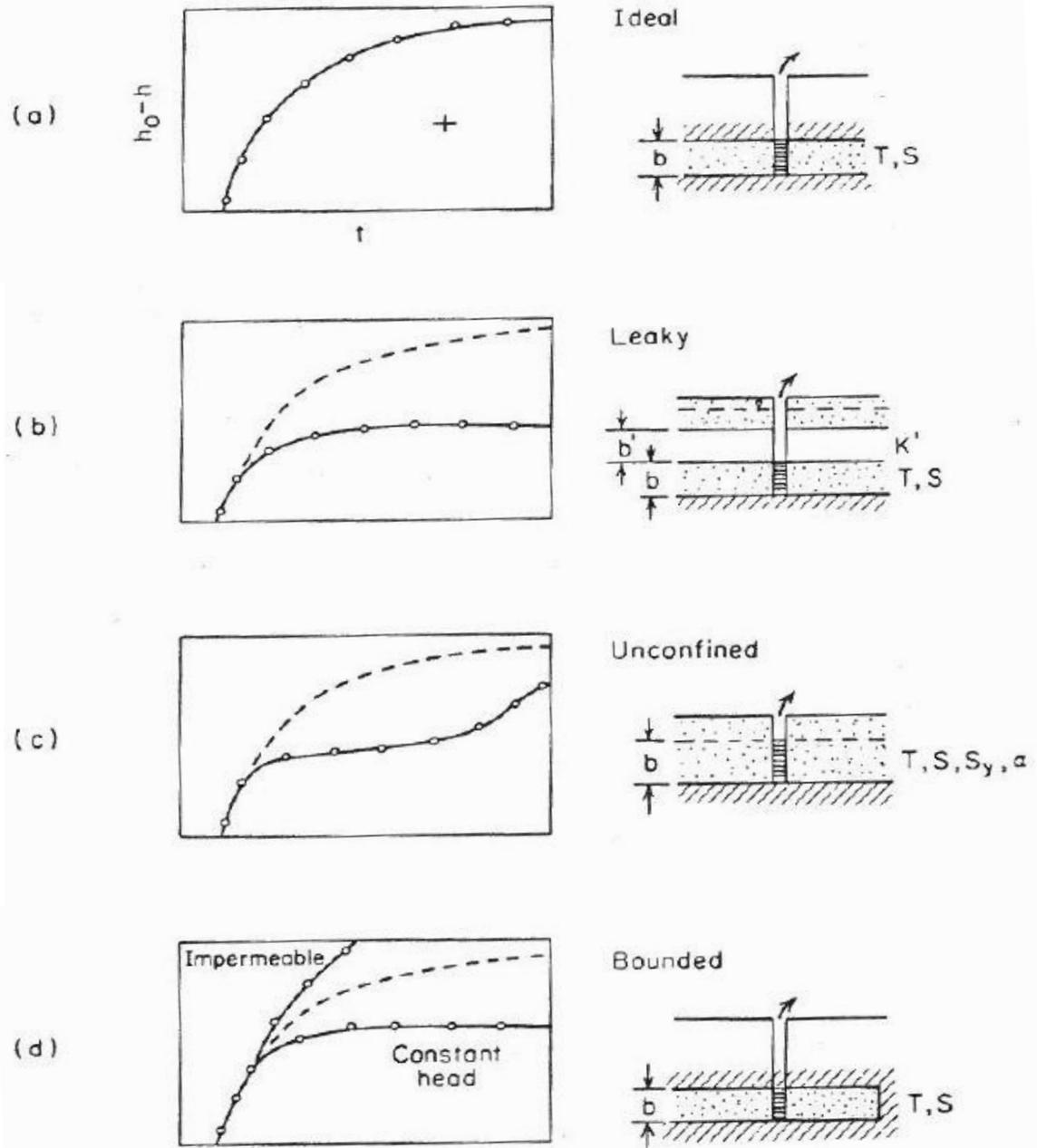
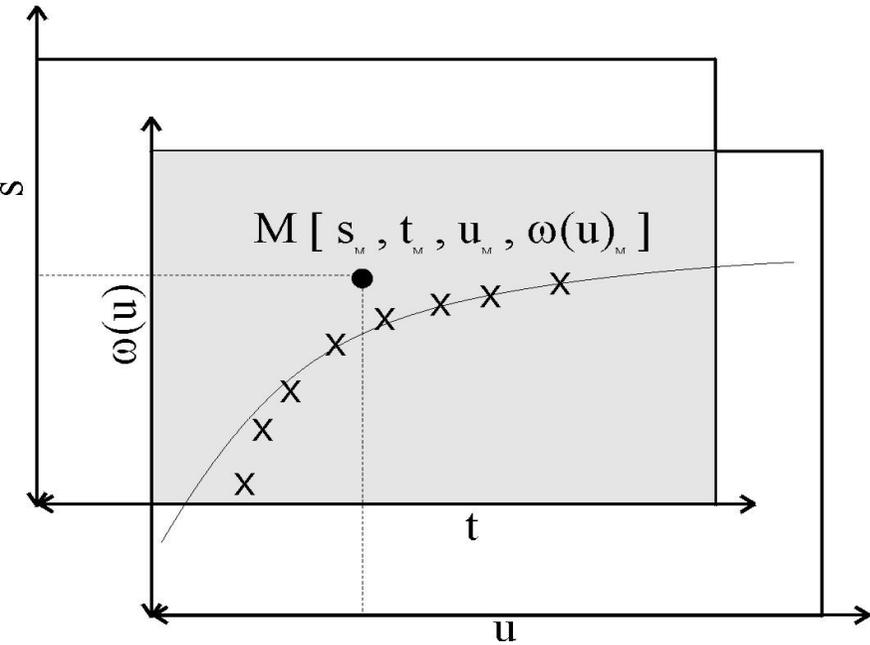


Figure 8.23 Comparison of log-log $h_0 - h$ versus t data for ideal, leaky, unconfined, and bounded systems.

Interprétation des essais de pompages

Solution de Theis

~~Solution approchée de Jacob~~



Un outil gratuit et performant : OUAIP

Outil d'Aide à l'Interprétation des Pompages d'essais

The screenshot shows a web browser window displaying the OUAIP website. The browser's address bar shows the URL `ouaip.brgm.fr/spip.php?article18`. The website header includes the OUAIP logo and the BRGM logo with the tagline "Géosciences pour une Terre durable". A navigation menu contains links for "Accueil", "À propos du projet", "Résultats", "Collaborateurs", "FAQ", and "Nous contacter". The main content area is titled "Contexte et objectifs" and includes a sub-section "Les applications de OUAIP" with a list of uses: determining aquifer parameters, estimating losses, determining discharge rates, simulating exploitation, and inferring geometry. It also features a "Télécharger le logiciel" section with a download button and a "Cofinanceurs" section listing ADeme.

Contexte et objectifs

À propos du projet > Contexte et objectifs

Les applications de OUAIP

OUAIP est utilisé pour :

- ▶ déterminer les paramètres caractéristiques d'un aquifère : Transmissivité (T) et Coefficient d'emmagasinement (S)
- ▶ estimer les pertes de charge dans un ouvrage
- ▶ déterminer le débit d'exploitation d'un puits
- ▶ simuler l'exploitation d'un ouvrage et son influence
- ▶ inférer la géométrie des couches, la profondeur des venues d'eau et autres analyses dérivant de l'interprétation des courbes de l'essai.

Pourquoi utiliser OUAIP ?

L'intérêt de l'utilisation d'un logiciel pour l'interprétation des pompages d'essais n'est plus à démontrer. Le programme informatique offre une grande souplesse par rapport à l'interprétation manuelle qui, en dehors des conditions d'application de la méthode de Jacob, aboutit à l'utilisation d'abaques plus ou moins complexes selon la présence d'effets perturbateurs. Le logiciel offre l'avantage de la rapidité et de la reproductibilité.

Quelques solutions analytiques sont disponibles en utilisant des outils du type Excel, Matlab, etc. Leur compatibilité est remise en cause à chaque nouvelle version. Nous avons fait le choix d'un développement d'une application autonome.

L'outil OUAIP bénéficie de l'expérience acquise lors des développements des outils ISAPE (BRGM) et de sa version Windows avec ANTEA. Il vise à remplacer ces outils qui ne sont plus opérationnels sur les nouveaux systèmes.

OUAIP conserve la philosophie de ses prédécesseurs : il s'agit d'une interprétation assistée par ordinateur et non d'un jeu vidéo ! L'utilisateur est invité à modifier les valeurs de T, S, mettre en oeuvre des effets de puits ou des

Télécharger le logiciel

Cliquer ici pour [télécharger le logiciel OUAIP](#)

Coordinateur

Cofinanceurs

Autres outils

Dans le même esprit que OUAIP :

TRAC, outil pour l'interprétation et le dimensionnement des traçages.

Méthode des dérivées : pour aller plus loin dans l'interprétation de l'essai de pompage

Extrait du rapport BRGM RP-64610-FR sur le projet ARK (2015)

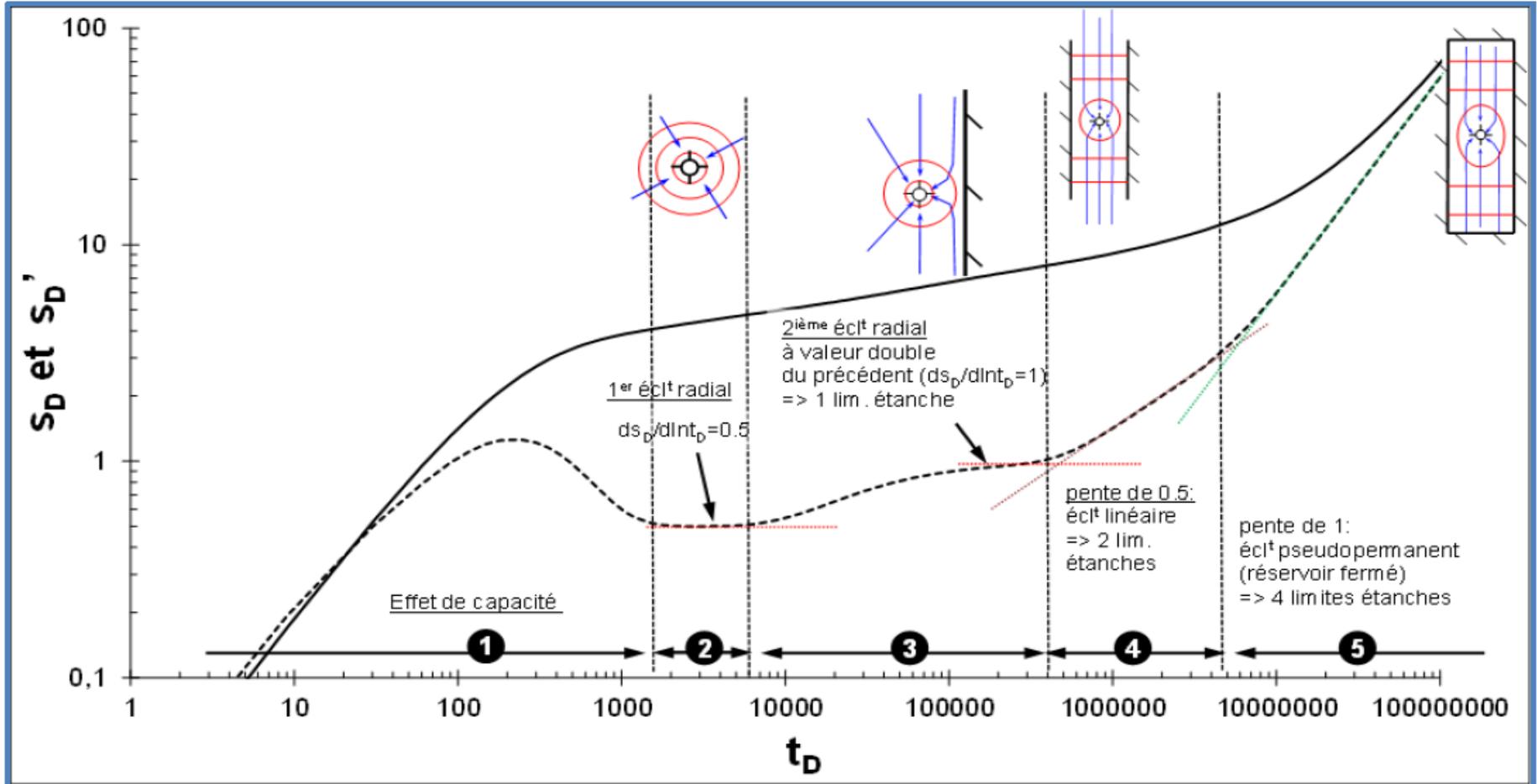
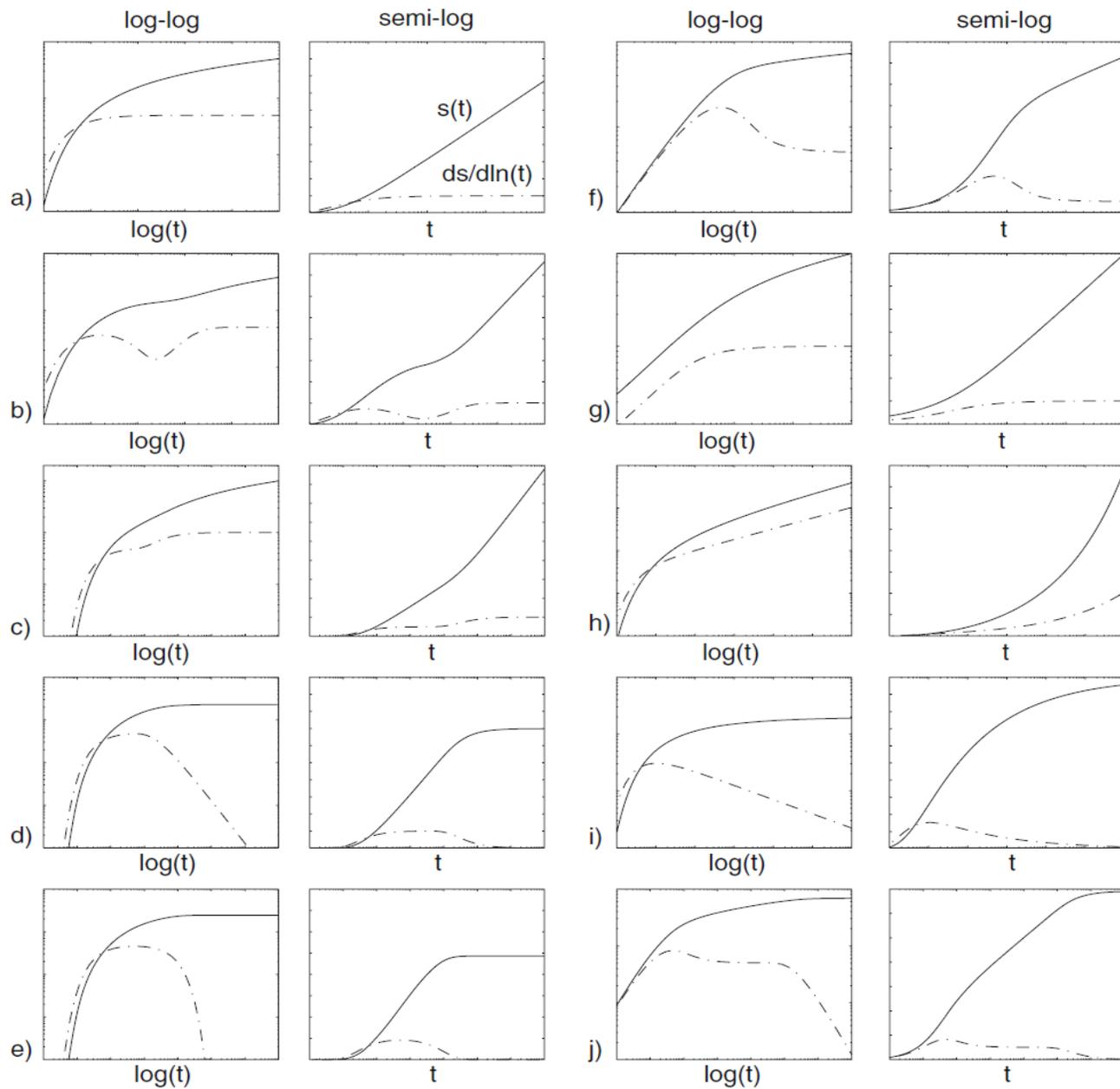


Illustration 25 : Exemple de succession des régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos

Nota : Sur la figure précédente, t_D = temps adimensionnel, s_D (courbe pleine) et s_D' (courbe tirée) = rabattement et dérivée du rabattement (adimensionnel)

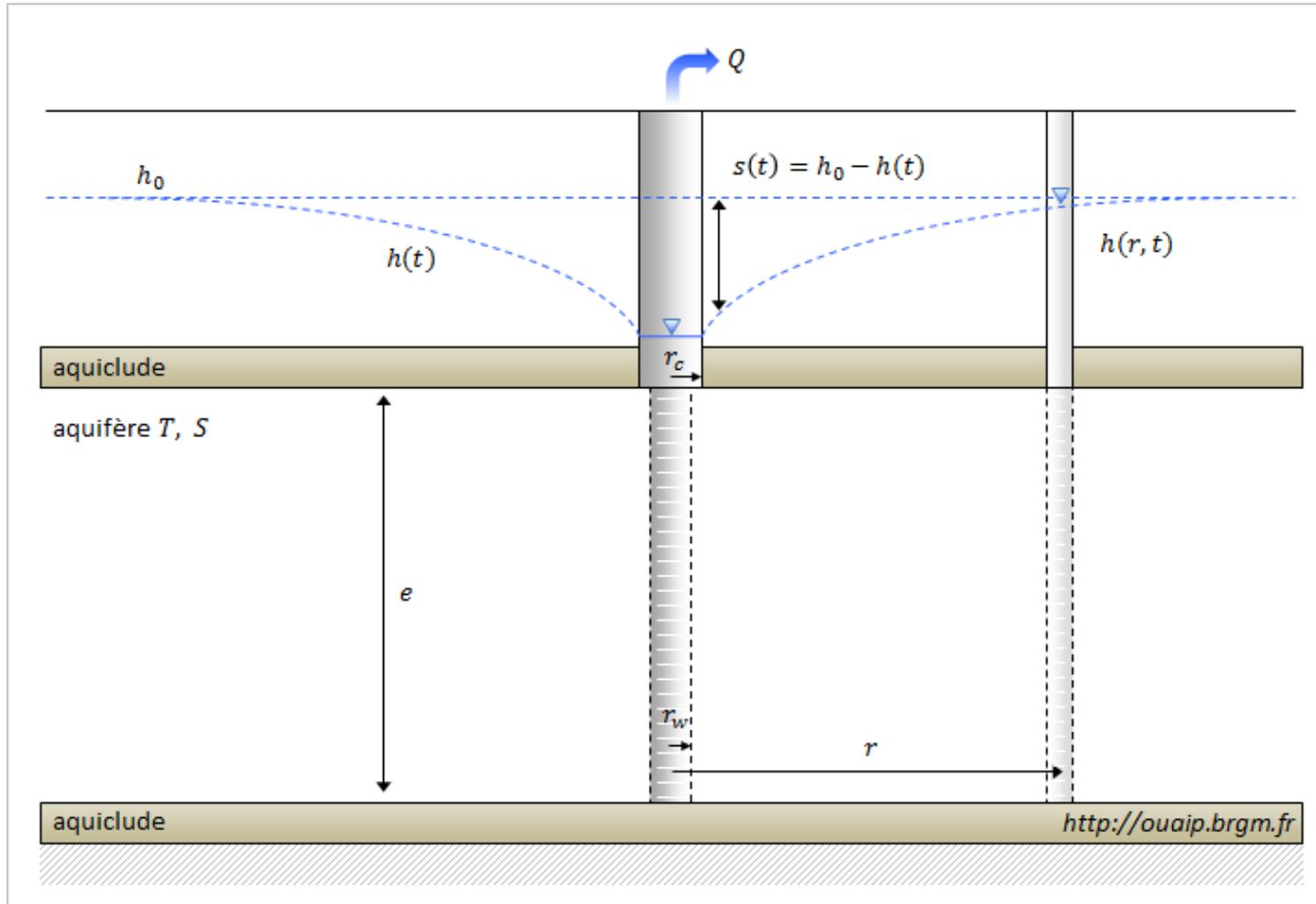


P. Renard, D. Glenz, M. Mejias (2009)
 Understanding diagnostic plots for
 well-test interpretation. *Hydrogeology
 Journal*. 17: 589–600

Fig. 2 Most typical diagnostic plots encountered in hydrogeology: **a** Theis model: infinite two-dimensional confined aquifer; **b** double porosity or unconfined aquifer; **c** infinite linear no-flow boundary; **d** infinite linear constant head boundary; **e** leaky aquifer; **f** well-bore storage and skin effect; **g** infinite conductivity vertical fracture.; **h** general radial flow—non-integer flow dimension smaller than 2; **i** general radial flow model—non-integer flow dimension larger than 2; **j** combined effect of well bore storage and infinite linear constant head boundary (modified from Renard 2005b)

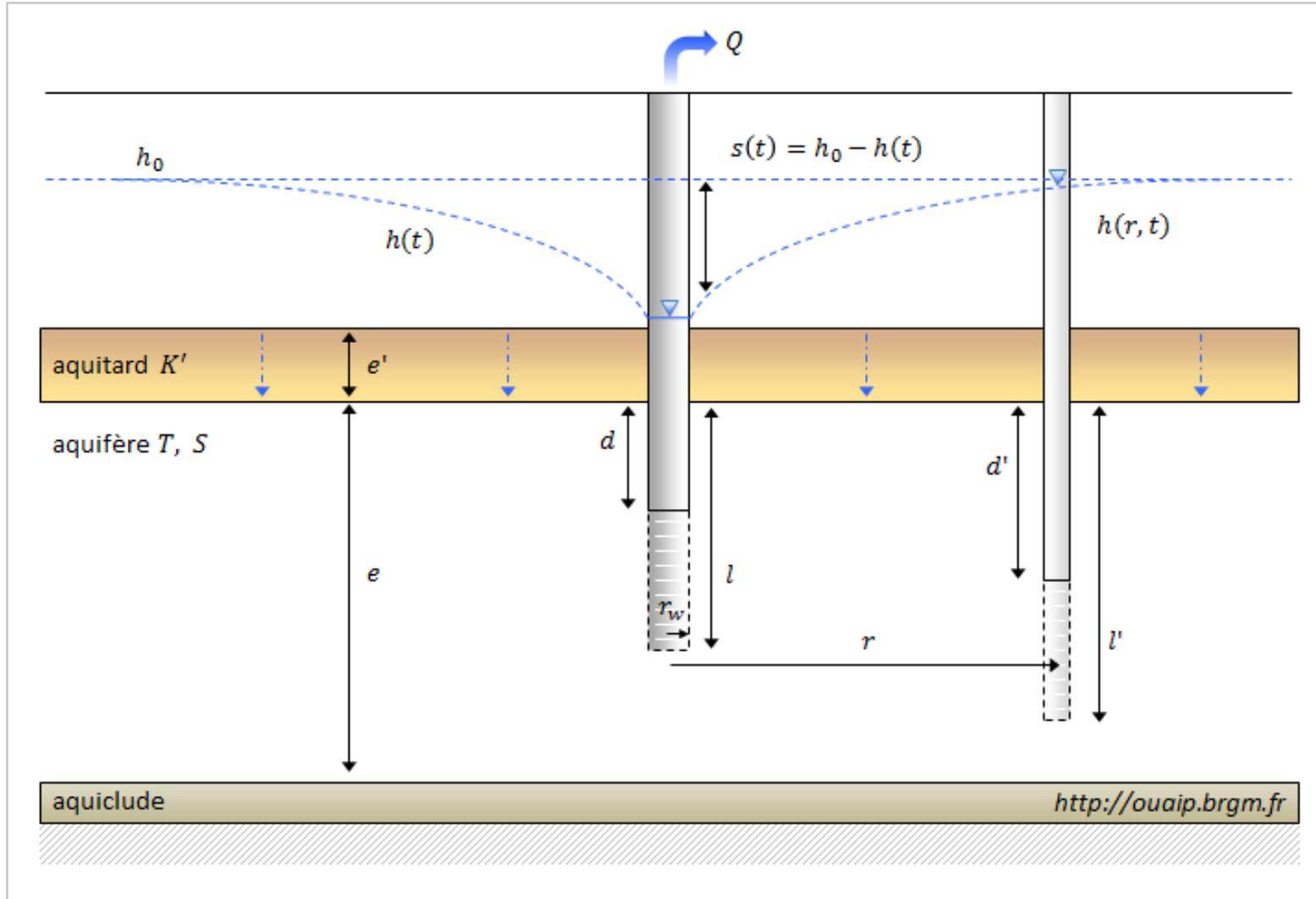
Papadopoulos-Cooper (1967)

Nappe captive en régime transitoire pour un puits parfait de grand diamètre ou un piézomètre avec un effet de capacité.



Hantush (1964)

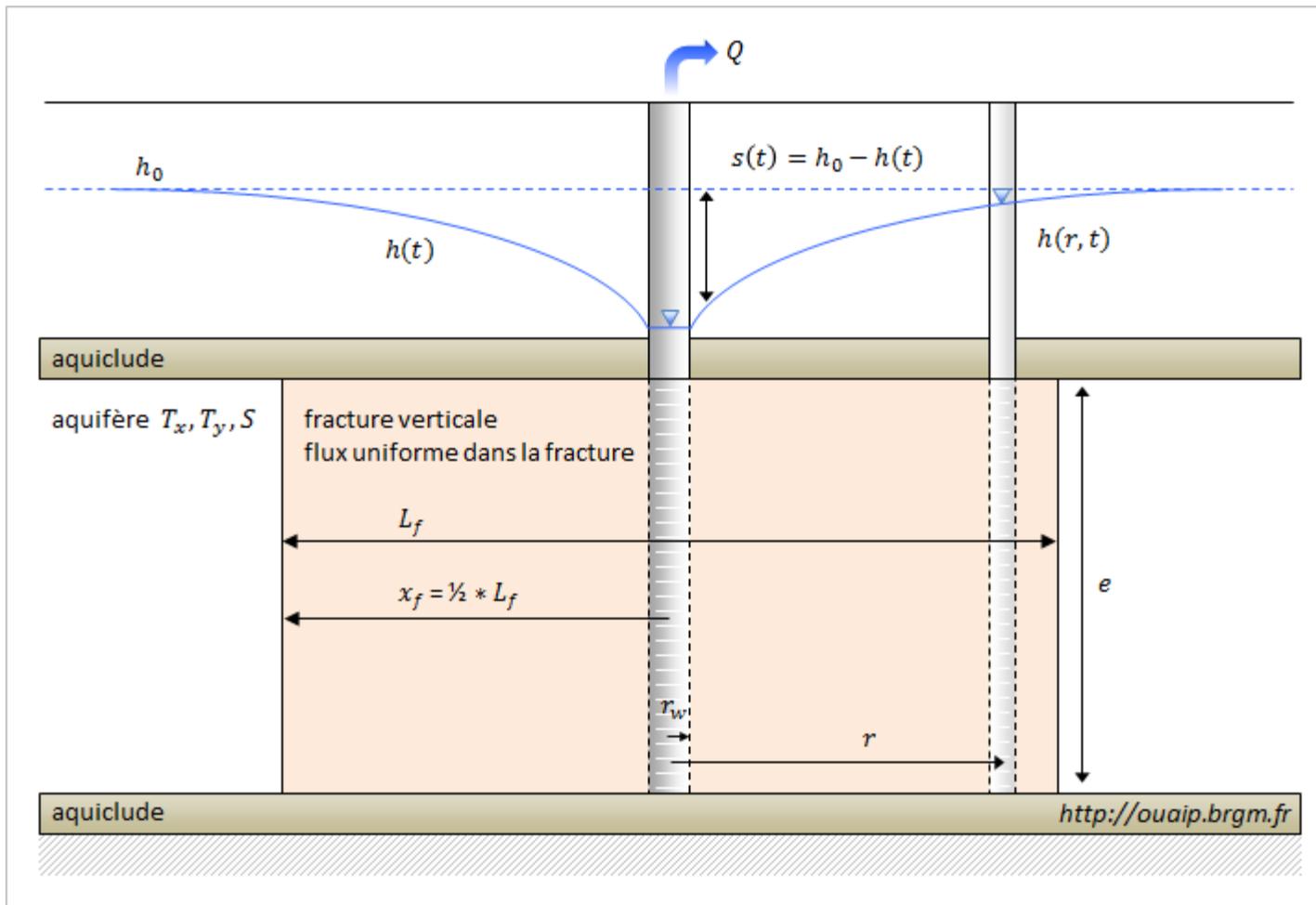
Nappe semi-captive alimentée par une nappe sus-jacente à travers une éponte semi-perméable. La pénétration partielle du puits ou du piézomètre peut être prise en compte.



Gringarten-Witherspoon (1972)

Nappe captive en régime transitoire avec une fracture verticale unique sur toute l'épaisseur de l'aquifère, le puits se situe en son milieu.

Après un certains temps de pompage, l'écoulement est pseudo-radial (comme pour Theis), mais la présence de la fracture donne au puits un rayon d'action plus grand. La courbe ressemble donc à celle de Theis, mais les rabattements obtenus par la méthode de Gringarten-Witherspoon sont inférieurs à ceux calculés par la méthode de Theis.



CTD (Conductivity, Temperature, Depth)

C : Conductivité électrique (à température de référence, généralement 25°C)

T : Température de l'eau

D : Hauteur d'eau

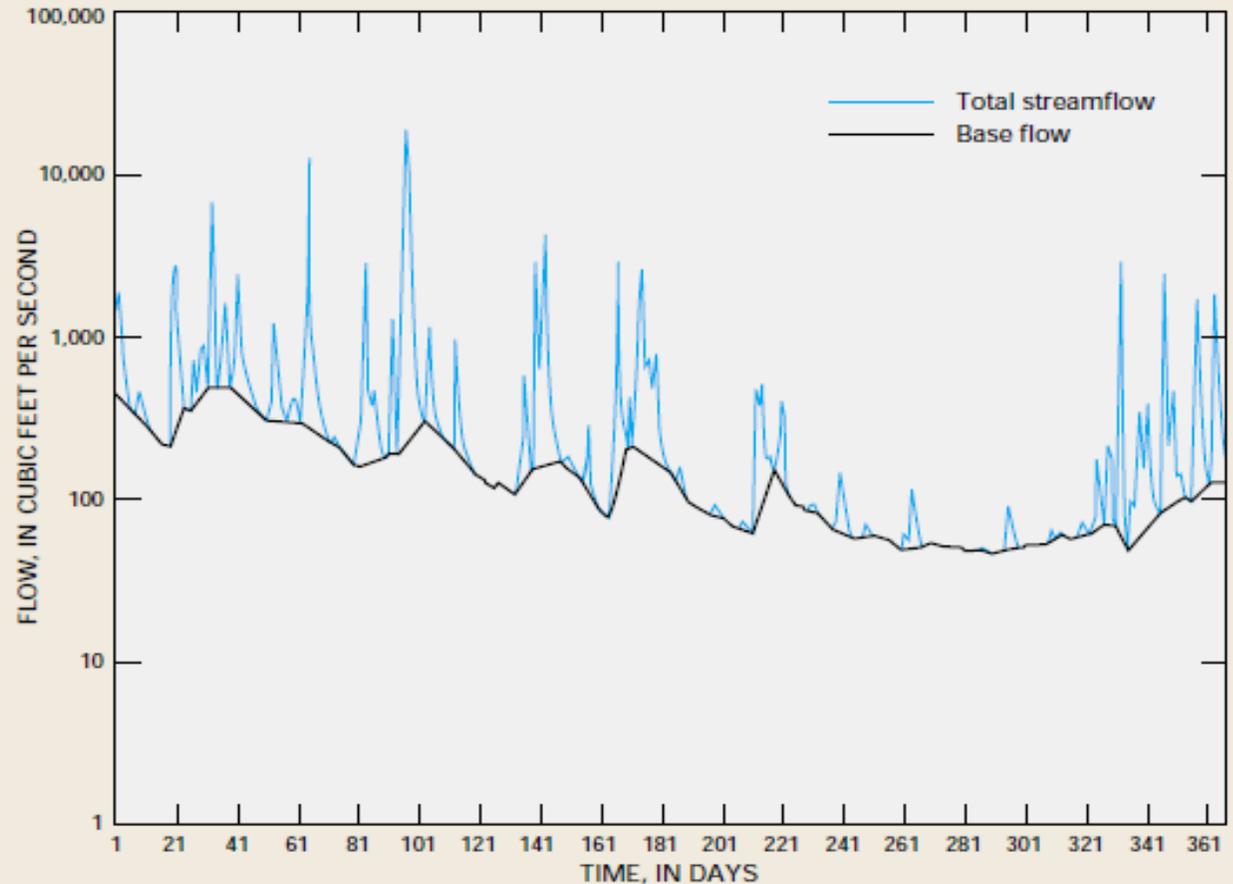
Pourquoi utiliser les paramètres CTD ?

- Une mesure simple : sondes de mesures autonomes de terrain
- Une mesure fiable
- Des informations sur le fonctionnement hydrodynamique de l'hydrosystème
- Un suivi de plus en plus courant, à mettre en place sur les captages d'eau potable
- Des mesures utiles sur un forage avant mise en exploitation (études préalables), et durant l'exploitation (suivi qualitatif du captage)
- Un suivi complémentaire aux analyses chimiques, et au suivi du pH et de la turbidité

Débit d'une source ou d'un cours d'eau :

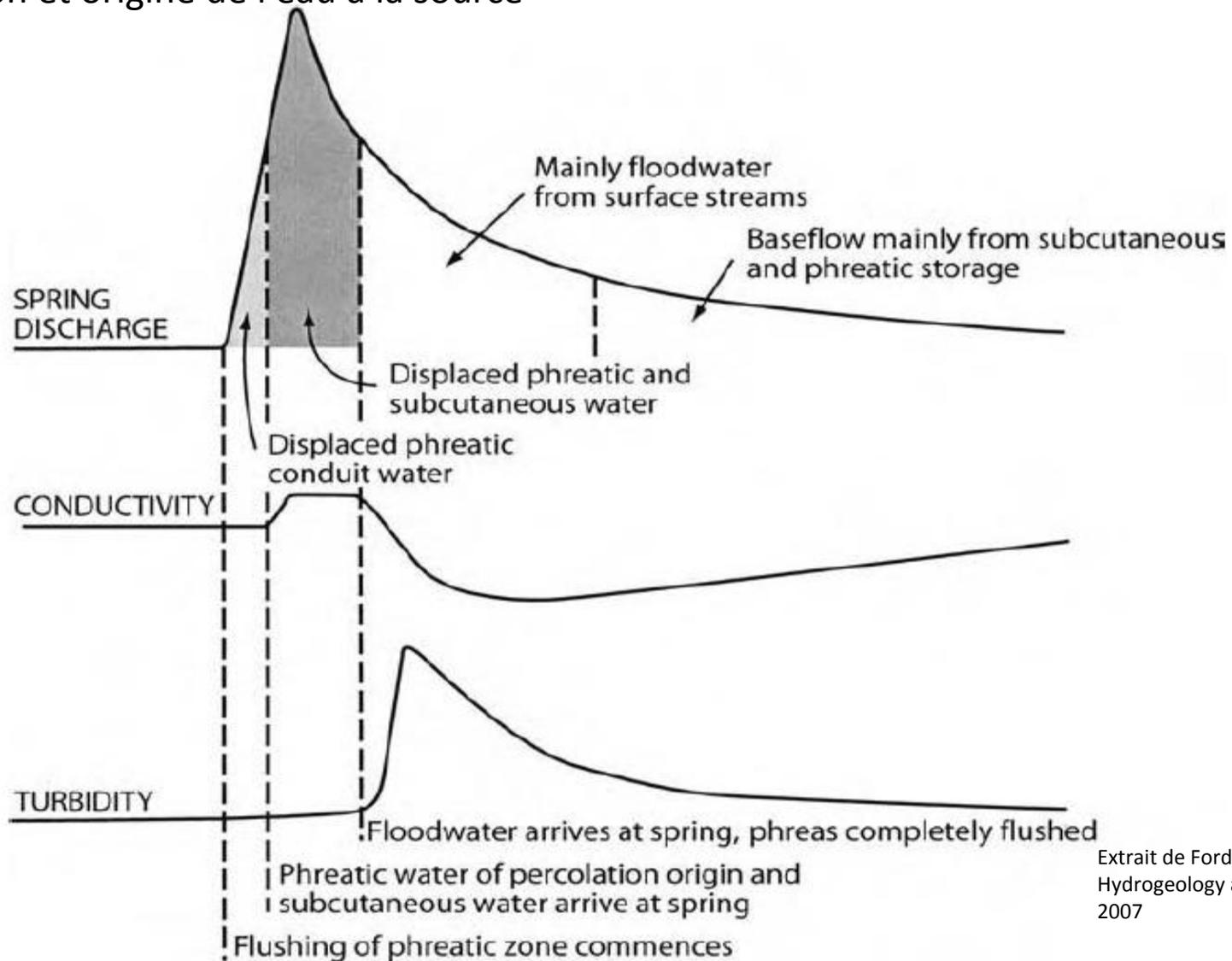
- Composante lente assurant le débit de base (= aquifère)
- Composante rapide donnant des pics de crue : ruissellement superficiel et écoulement karstique

Figure B-1. The ground-water component of streamflow was estimated from a streamflow hydrograph for the Homochitto River in Mississippi, using a method developed by the institute of Hydrology, United Kingdom. (Institute of Hydrology, 1980, Low flow studies: Wallingford, Oxon, United Kingdom, Research Report No. 1.)



Winter T.C., Harvey J.W., Franke O.L. (1998) - Ground Water and Surface Water A Single Resource. U.S. Geological Survey Circular 1139, Denver, Colorado.

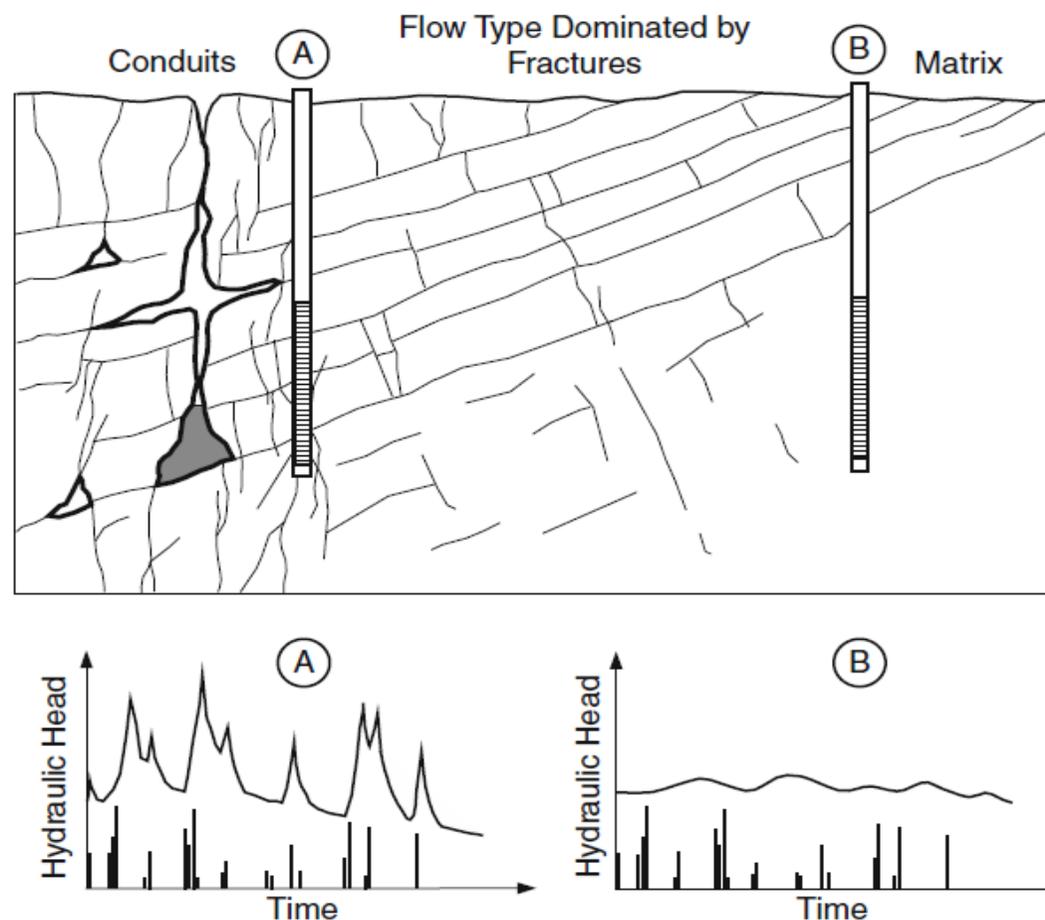
Effet piston et origine de l'eau à la source



Extrait de Ford and William, Karst Hydrogeology and Geomorphology, 2007

Figure 6.34 Idealized interpretation of a karst spring hydrograph and chemograph. Reproduced from Williams, P.W, The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. J. Hydrol. 61, 45–67 © 1983 Elsevier.

Variations de niveaux d'eau en fonction des connexions sur des zones très transmissives



Extrait de Kresic et Stevanovic, Groundwater hydrology of springs, 2010

FIGURE 5–48 Dependence of the hydraulic head measured in monitoring wells on different types of effective porosity (specific yield) in karst aquifers: A, rapid rise of the hydraulic head after major recharge events in portions of the aquifer with large conduits and no significant storage in the matrix; B, delayed and dampened response of aquifer matrix. Flow dominated by fractures may include any combination of these two extremes. (From [Kresic, 2007a](#); copyright Francis & Taylor, reprinted with permission.)

- ➔ Transfert rapide et contamination
- ➔ Adapter le pas de temps de mesure sur l'événement pour détecter la pollution

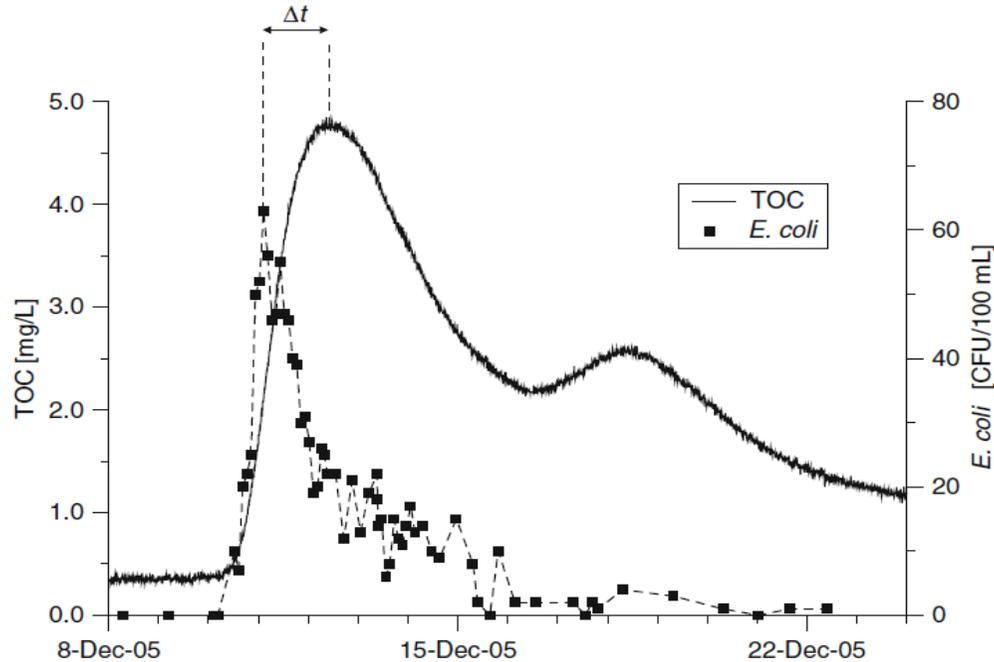


FIGURE 8–4 Evolution of total organic carbon (TOC) and fecal bacteria (*E. coli*, CFU = colony forming units) observed at a karst spring in Switzerland following intense rainfall. Both TOC and bacteria originate from a sinking stream draining agricultural land, which explains the high correlation. High TOC levels consequently indicate poor drinking water quality. Earlier peak times for bacteria (Δt) can be explained by higher transport velocities and a time-dependent die-off function for bacteria. The high temporal variability of fecal contamination also illustrates the necessity of event-based sampling approaches and continuous monitoring techniques. For details see [Pronk et al. \(2006, 2007\)](#).

Extrait de Kresic et Stevanovic, Groundwater hydrology of springs, 2010

Traitement des données de débit d'une source : calcul du volume "dynamique" (= équivalent de l'eau disponible si la recharge s'arrête)

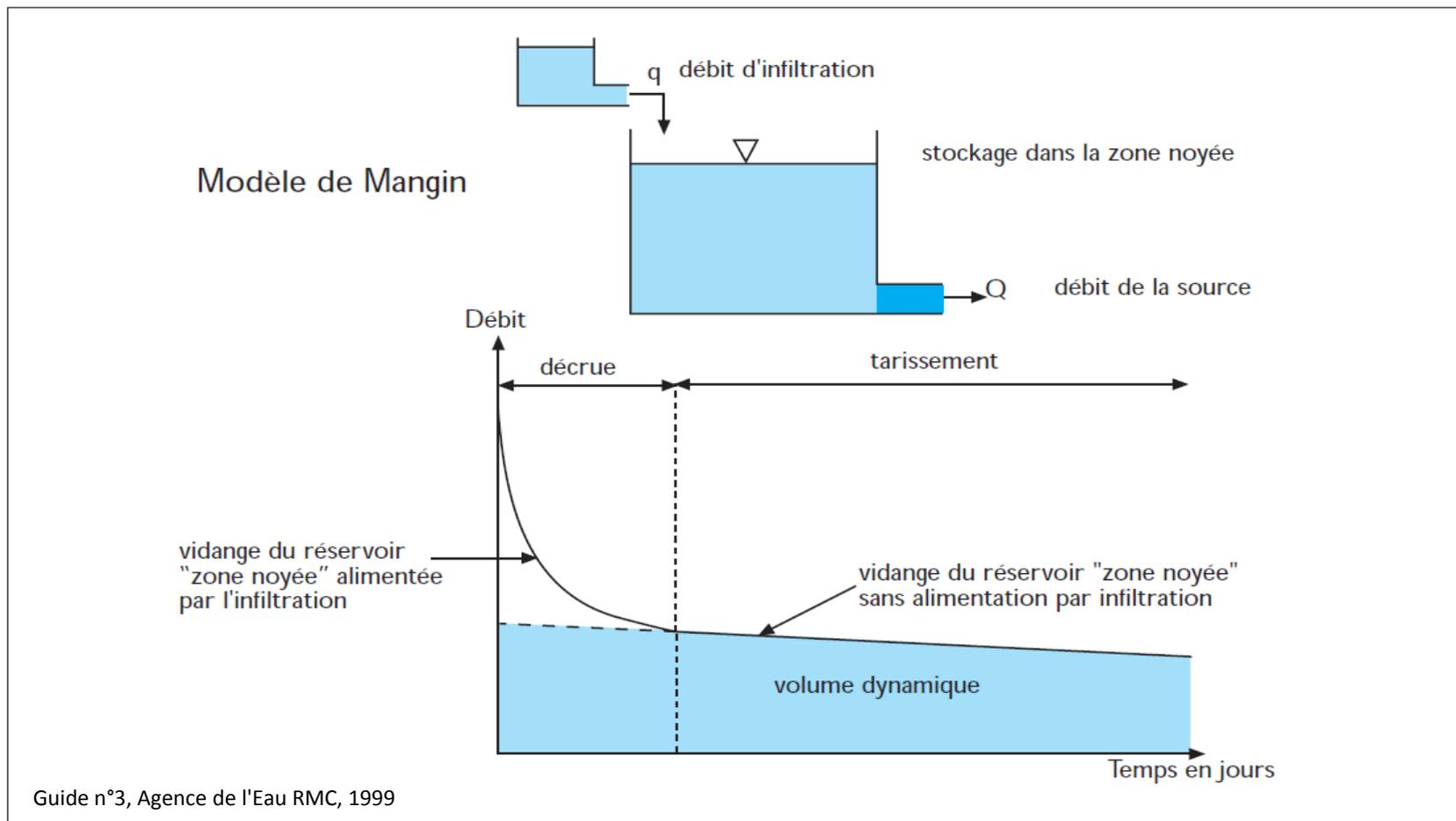


Figure 7 - Décomposition de la récession de l'hydrogramme selon la méthode de Mangin
Analyse de la décrue et du tarissement