

**Université Frères Mentouri Constantine 1**  
**Faculté de Sciences de la Terre, de Géographie et**  
**d'Aménagement du Territoire**  
**Département des Sciences Géologique**

# **HYDROGEOLOGIE SOUTERRAINE**

**RABAH GUERIREM**

Les essais ponctuels ne donnent qu'une estimation localisée du coefficient de perméabilité du sol. Or dans les applications pratiques c'est un volume (global) de sol considérable qui est intéressé par la circulation de l'eau.

C'est pourquoi dans une étude hydrogéologique ~~il~~, il est toujours souhaitable de procéder à une mesure globale de la perméabilité par essais de pompage.

La préparation de ces essais comporte en effet:

- L'exécution d'un puits de gros diamètre et son aménagement.
- l'installation d'un groupe de pompage.
- la mise en place d'un certain nombre de piézomètres à distance variable du puits.
- le pompage proprement dit qui peut durer plusieurs jours avec mesure des niveaux dans les puits et dans les piézomètres en fonction du temps.

pendant le pompage, on constate que les niveaux dans les piézomètres s'abaissent régulièrement. Au instant  $t$ , on peut donc tracer un profil de la nappe (nappe libre) ou de ligue piézométrique (nappe captive) qui, en tenant compte est une surface de révolution axée sur le puits et tangente au niveau statique de la nappe suivant un cercle (T) de rayon  $R$  (voir Figure 01) si l'on continue à pomper à débit constant, la surface piézométrique s'abaisse et le rayon  $R$  augmente. Ce rayon est appelé « rayon d'action » du puits <sup>ou rayon d'affluence</sup> comme la quantité d'eau pompée pendant l'unité de temps est constante et que le volume de sol intéressé est plus grand, le rabattement du niveau de la nappe de croît. Pratiquement au bout d'un certain temps le rabattement de la nappe devient si faible que l'on peut admettre qu'il y a stabilisation.

mais théoriquement, si la nappe n'est pas alimentée, le rayon d'action tend vers

l'infini. Par contre si la nappe est alimentée, le rayon d'action reste fini au bout d'un temps fini, et la stabilisation est effective. ②

Les expérimentations par pompage à débit constant sur les puits et piézomètres sont exécutées par des essais de puits et des pompages d'essais. Elles consistent à mesurer l'abaissement des rabattements du niveau piézométrique en relation avec le temps de pompage et leur remontée après arrêt de l'opération. Les interprétations sont effectuées par résolution graphique des expressions hydrodynamiques souterraines.

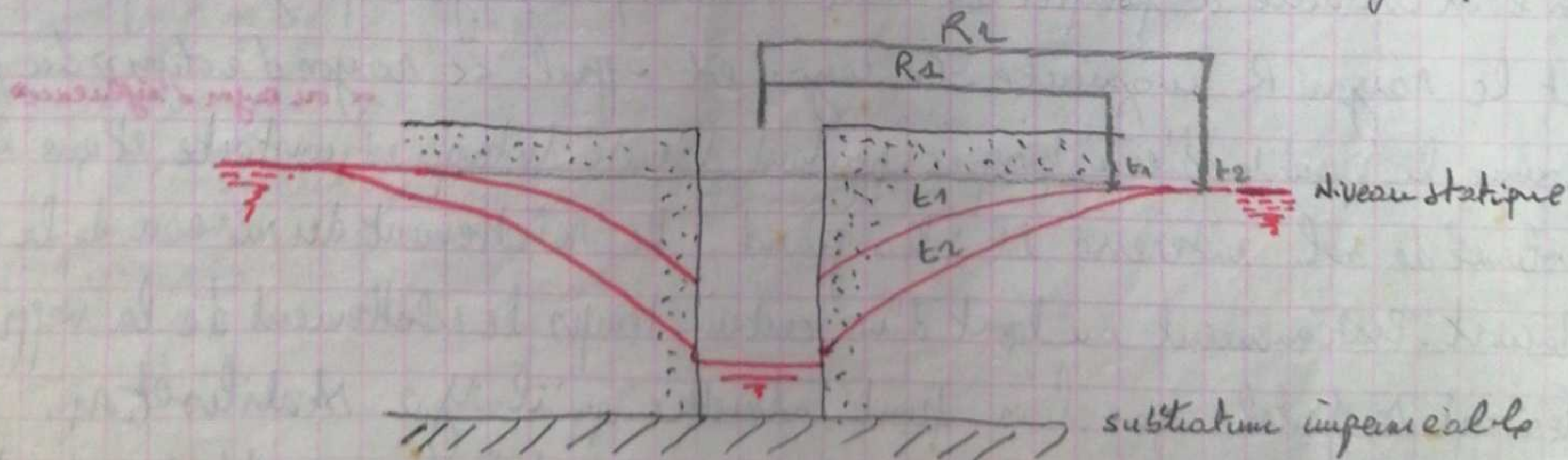
Les essais de puits par puits de débits, puis d'arrêts de durées égales et courtes, évaluent les caractéristiques du complexe aquifère/ouvrage de captage. (débit spécifique, les pertes de charge et la productivité).

Les pompages d'essais de longue durée, mesurent la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement et étudient qualitativement les caractéristiques particulières de l'aquifère comme les conditions aux limites, les hétérogénéités et la drainage.

\* transmissivité = produit du coefficient de perméabilité par l'épaisseur de la couche aquifère ( $T = K \cdot H$ )

\* coefficient d'emmagasinement = variation du volume d'eau dans un prisme vertical de section unité pour une variation unité de la charge.

S = permet d'apprécier le volume d'eau qu'un milieu aquifère peut libérer.



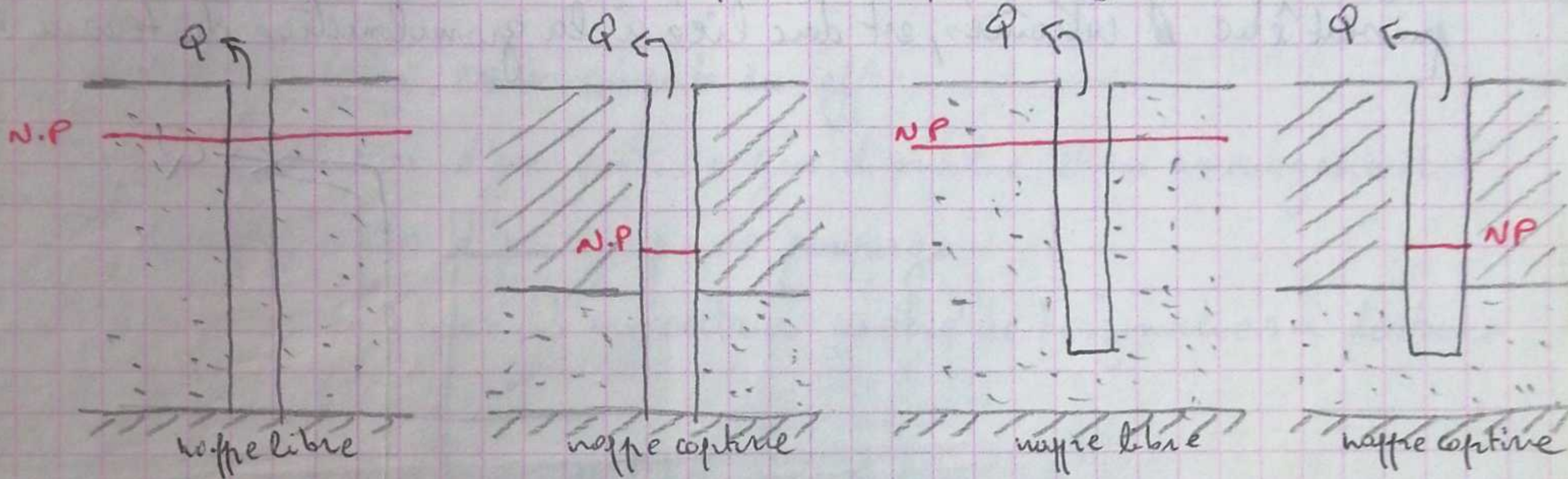
Evolution d'une nappe au cours d'un pompage

\* ~~La réalisation et la préparation des puits et sondages:~~

\* Réalisation et préparation des puits et sondages:

Le diamètre du puits est déterminé à partir de considérations purement matérielles. Il est en particulier fonction des dimensions du matériel de pompage que l'on doit y introduire.

Dans la mesure du possible, le forage devra être descendu jusqu'à un horizon imperméable. on aura alors ce qu'on appelle un « ~~puits parfait~~ » ou « ~~un puits complet~~ »



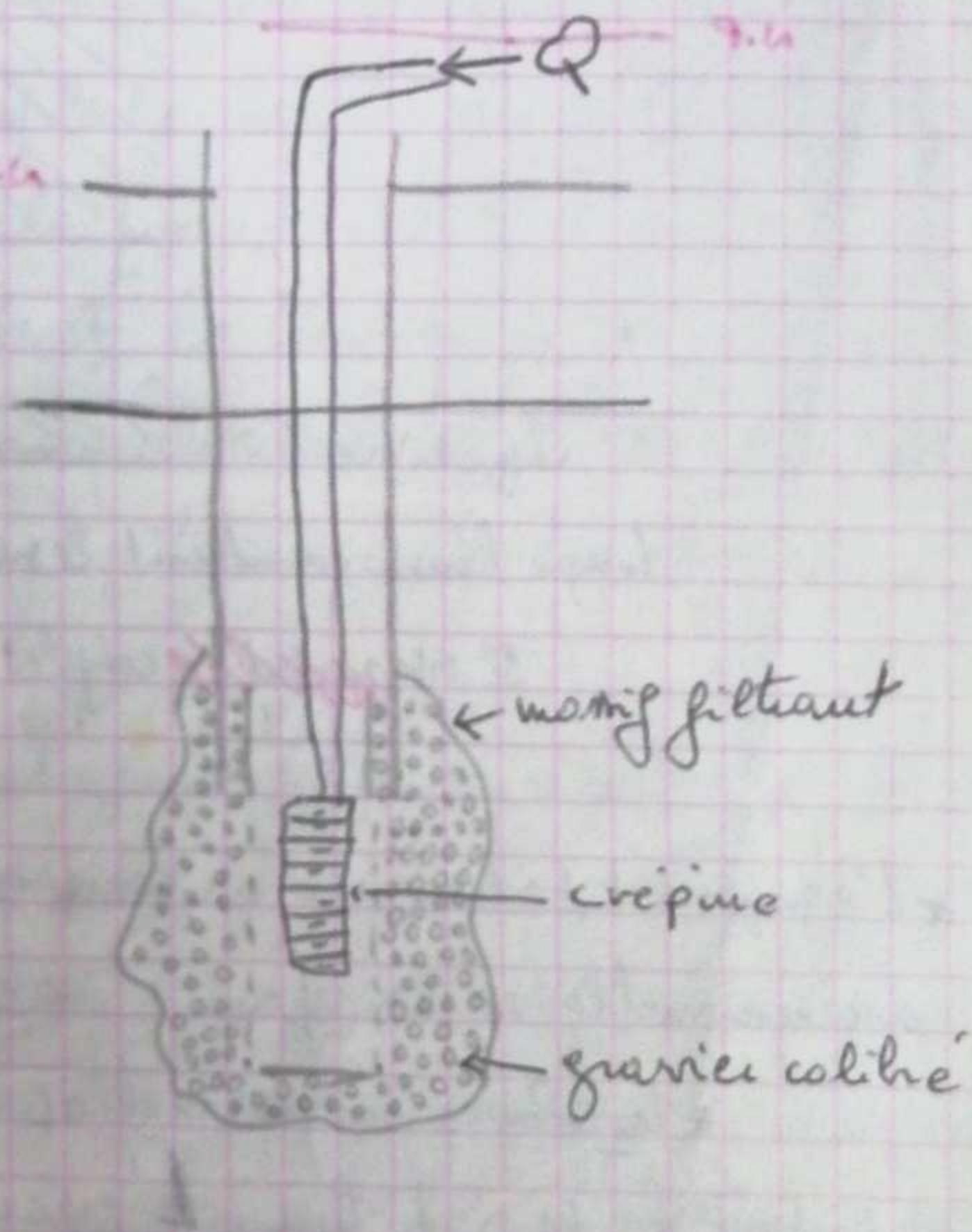
Lorsque l'ouvrage atteint le substratum imperméable  
Il est ~~parfait~~ ou complet

s'il atteint pas le substratum imperméable.  
Il est ~~parfait~~ ou incomplet

\* L'équipement technique d'un sondage comporte deux éléments essentiels: la colonne onctionnelle et la partie captante. (Fig X)

\* La colonne onctionnelle constituée d'un tube unique ou d'éléments télescopique soutient la paroi du trou. L'espace annulaire, entre le tubage et le terrain, est obturé par une colonne de ciment. Celle-ci joue un double rôle: consolidation de l'ouvrage et suppression des fuites et intercommunications entre aquifères. A sa base elle est ancrée dans le toit de l'aquifère à nappe captive ou dans le substratum de la nappe libre. Son diamètre est calculé pour le logement de la pompe et en vue de limiter la perte de charge quadratique.

(4)  
\* la partie captante comporte une crépine et, éventuellement un monif filtrant.  
La crépine est un tube perforé d'ouvertures de formes diverses, à travers lesquelles l'eau pénètre dans le sondage. Dans les terrains meubles l'espace annulaire, entre la crépine et le terrain, est rempli de gravier calibré. Son rôle est double : Filtrer retenant les éléments fins, et augmenter la perméabilité au voisinage du sondage et surtout du terrain.  
La granulométrie du filtre qui doit être telle que les éléments fins du sol ne puissent être extraînés, est donc liée à la granulométrie du terrain aquifère.

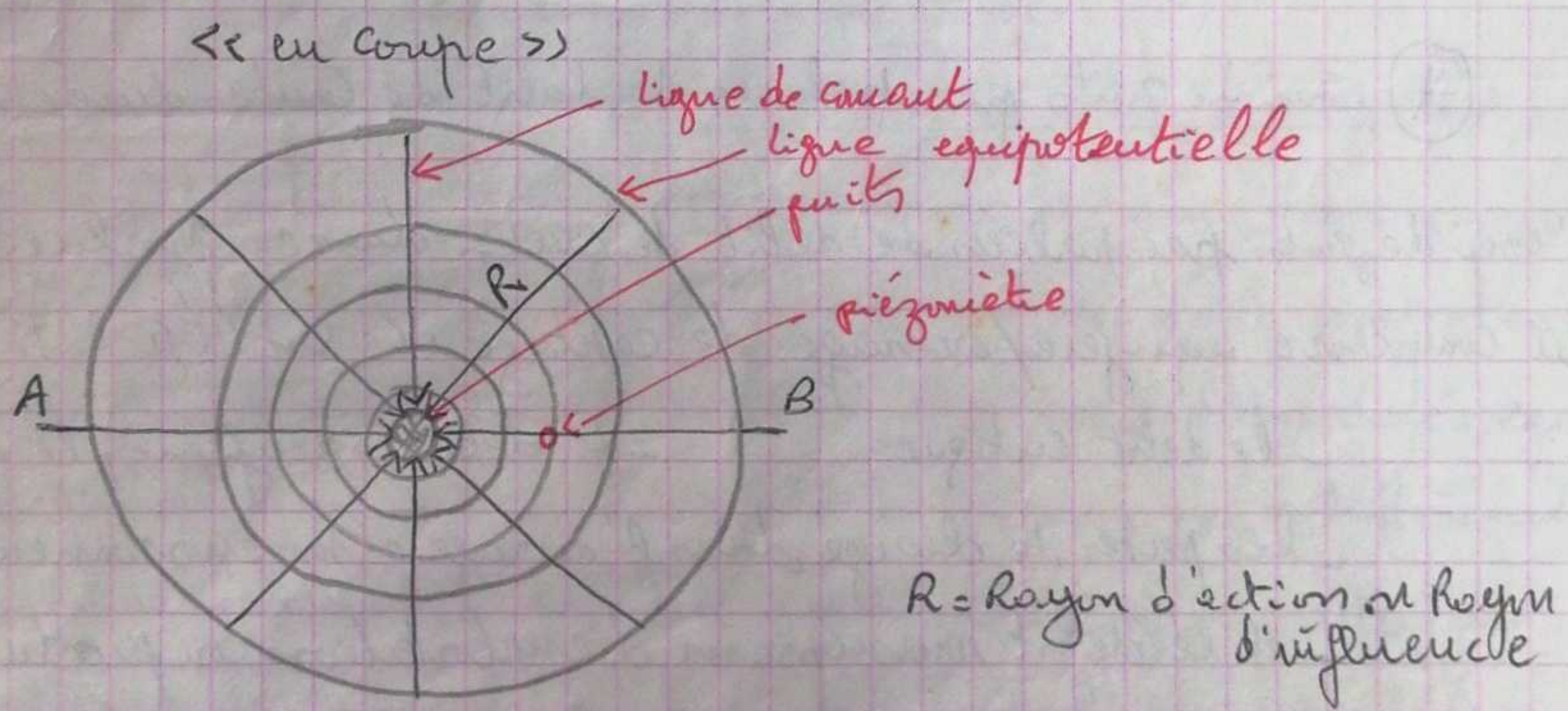
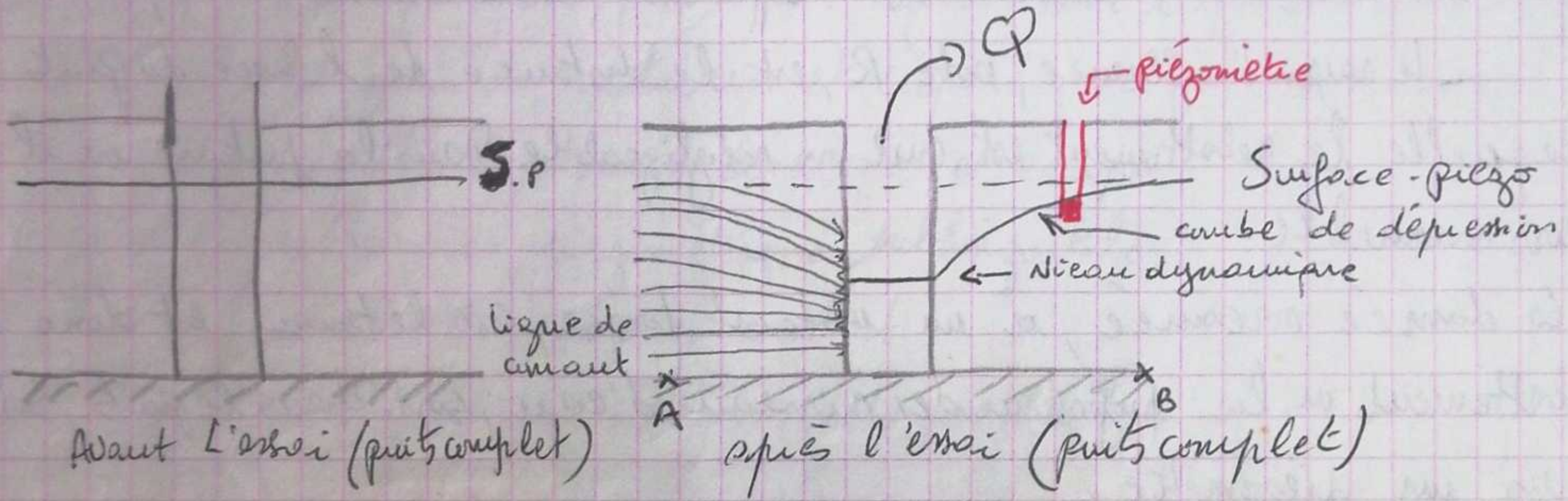


### \* Réalisation de l'essai :

L'essai proprement dit se ramène à la mesure du débit tiré du puits et de l'abaissement du niveau de l'eau dans le puits lui-même et dans les piezomètres en fonction du temps.

\* effets du pompage sur l'aquifère: Cône de dépression

Le pompage dans un aquifère dont la surface piézométrique initiale est supposée horizontale, crée une dépression en forme d'entonnoir, son axe coïncide avec celui de l'ouvrage. C'est le cône de dépression. Dans l'aquifère à nappe libre, il affecte le réservoir tandis qu'il est factif dans celui de la nappe captive.



R = Rayon d'action ou Rayon d'influence

<< En plan >> Cône de dépression

\* L'expérimentation a pour but de mesurer, à débit constant, les dimensions de ce cône à un instant donné et leur évolution dans le temps. Elle porte également sur son effacement après arrêt du pompage, appelé remontée.

les deux données géométriques du cône de dépression, à un instant donné,  $t$ , sont :

- le rabattement, noté  $s$ , mesuré par l'abaissement du niveau piézométrique dans le puits de pompage ou dans un piézomètre implanté à une distance,  $x$ , de l'axe de l'ouvrage. Le plan d'eau dans l'ouvrage est le niveau dynamique. La profondeur du niveau dynamique, au-dessous du niveau piézométrique initial, en régime non influencé, est le rabattement,  $s_0$ . Le rabattement, mesuré au cours de la remontée, est appelé rabattement résiduel,  $s_r$ .

- le rayon d'influence, noté  $R$ , est la distance de l'axe du puits à laquelle le rabattement est nul ou négligeable. Dans la pratique on il n'est plus mesurable.

\* la donnée mesurée, à un instant donné, au terrain est donc le rabattement ou la profondeur des niveaux d'eau, soit dans le puits, soit dans un piézomètre.

\* Essai de puits par pannes de débit de courtes durées :

L'essai de puits par pannes de débit de courtes durées évolue les caractéristiques du complexe aquifère/ouvrage de captage. Ce sont :

- le débit critique
- le débit spécifique, le débit spécifique relatif
- les pertes de charge dans l'ouvrage et son environnement immédiat
- et le débit maximum d'exploitation ou productivité (E. Berkaloïff, 1969 et J. Forchariewicz, 1978)

Il permet d'établir le programme d'équipement technique de l'ouvrage : tubage, crépine massif fixant, puissance de la pompe, etc.

## ④ Conditions de base

les conditions de base d'application des expressions d'hydrodynamiques souterraines en régime transitoire, auxquelles doit satisfaire le complexe aquifère / ouvrage de captage sont :

- Validité de la loi de Darcy : écoulement laminaire et milieu isotrope ou homogène.
- puits complet, c'est à dire capter toute l'épaisseur de l'aquifère atteignant le substratum et crépiné sur toute sa hauteur.
- puits correctement développé et équipé.
- Surface piézométrique subhorizontale.
- débit de pompage constant
- rayon du puits le plus petit possible

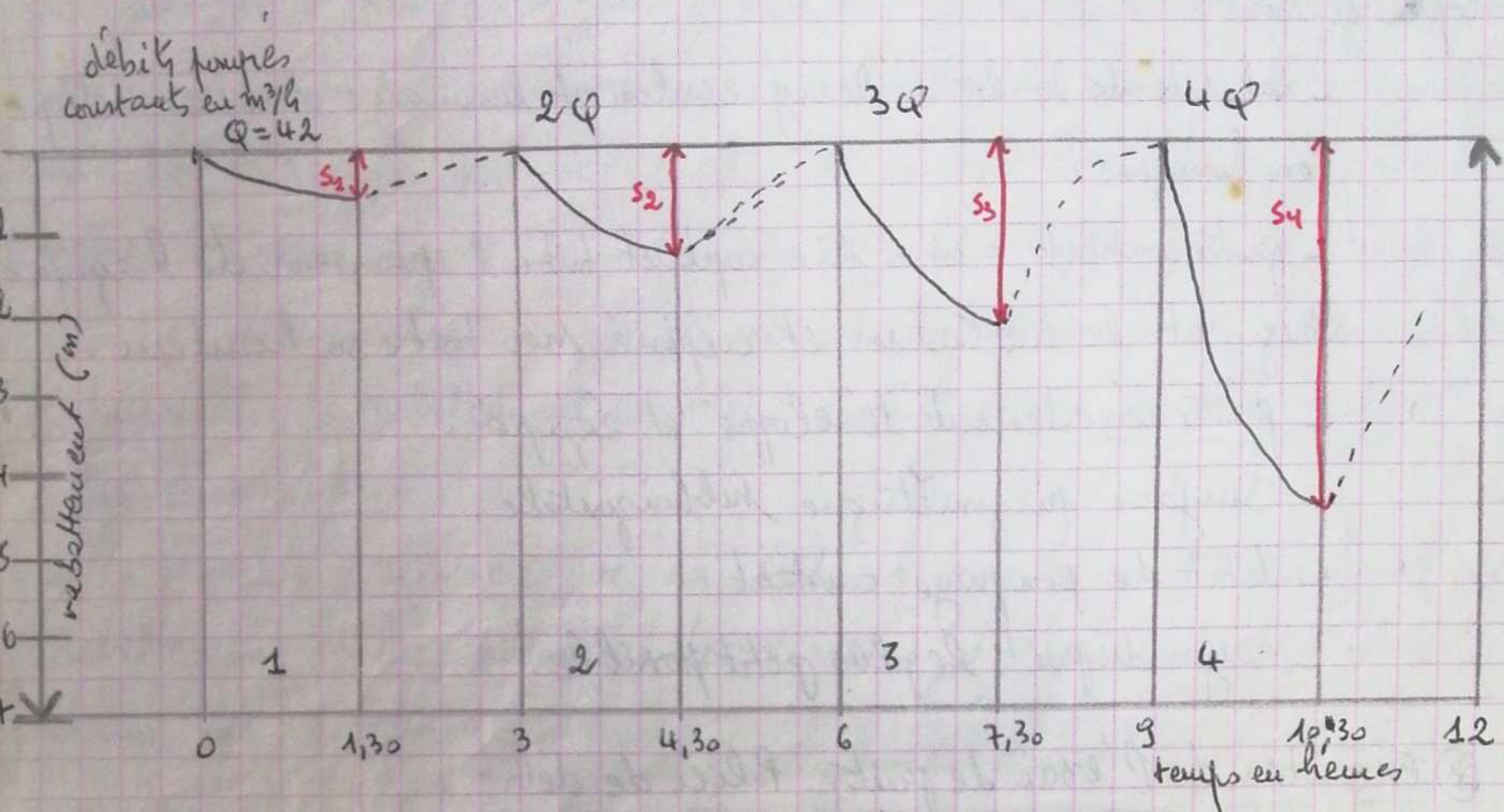
## ④ Exécution de l'essai de puits. Polier de débit

l'essai de puits est effectué en réalisant des poliers de débit, à débit constant pendant une courte durée déterminée, 1 à 3 heures. Il mesure deux données le rabattement en mètres, mesuré en fin de polier et le débit constant en  $m^3/h$ . chaque polier de débit est suivi d'un arrêt de pompage d'une durée égale, permettant la remontée du niveau d'eau et la mesure du rabattement résiduel. la première remontée doit être pourvue jusqu'à atteindre approximativement le niveau piézométrique initial. En général le temps de pompage du premier polier est suffisant, les durées égales de pompages et d'arrêts sont courtes, une à trois heures au maximum.

le débit initial est égal à celui de la puissance minimale de la pompe. Ensuite les débits croissent selon une progression de 2, 3, 4. le nombre de poliers de débit est au minimum de quatre. Il est préférable de choisir des durées courtes et d'en augmenter le nombre jusqu'à un optimum de six (06).



Pour les aquifères à nappe captive, trois paliers de débits peuvent être suffisants. Il doit être supérieur pour les aquifères à nappe libre.



essai de puits par pompage à paliers de débit de courtes durées dans un sondage captant l'aquifère à nappe libre.

Lors de la mise en route du pompage les premiers volumes d'eau extraits correspondent à la vidange de l'ouvrage, donc à un écoulement quadratique non linéaire. L'aquifère n'est sollicité qu'après un certain délai. C'est l'effet de capacité du puits.

L'exécution du premier palier de débit doit être précédée d'une durée de pompage,  $t_c$ , suffisante pour l'effacer. Elle est fonction de la transmissivité,  $T$ , de l'aquifère et du volume d'eau contenue dans l'ouvrage sur de son rayon,  $r$  ( $t_c = 25r^2/T$ ). Lorsque la transmissivité n'est pas connue, le volume d'eau minimum extrait sera de  $40r^2 \cdot s$  ( $r = \text{rayon du puits}$ ,  $s = \text{rebattement}$ )

## \* Signification du rabattement dans les ouvrages: Pertes de charge: (9)

Le rabattement mesuré dans l'ouvrage à un instant  $t$ , est la somme de deux composantes,

- Une perte de charge linéaire provoquée par l'écoulement laminaire dans l'aquifère au voisinage du puits (écoulement suivant la loi de Darcy) notée  $BQ$

- Une perte de charge quadratique, non linéaire provoquée par l'écoulement turbulent dans l'ouvrage, nappe et tubage, notée  $CQ^2$

Donc

$$S = BQ + CQ^2$$

Cette expression est utilisée pour une nappe captive, elle est étendue à l'aquifère à nappe libre sous condition que le rabattement mesuré soit inférieur à  $0,1h$  ( $h$  hauteur de nappe)

\* si l'écoulement turbulent est négligeable  $\Rightarrow S = BQ$

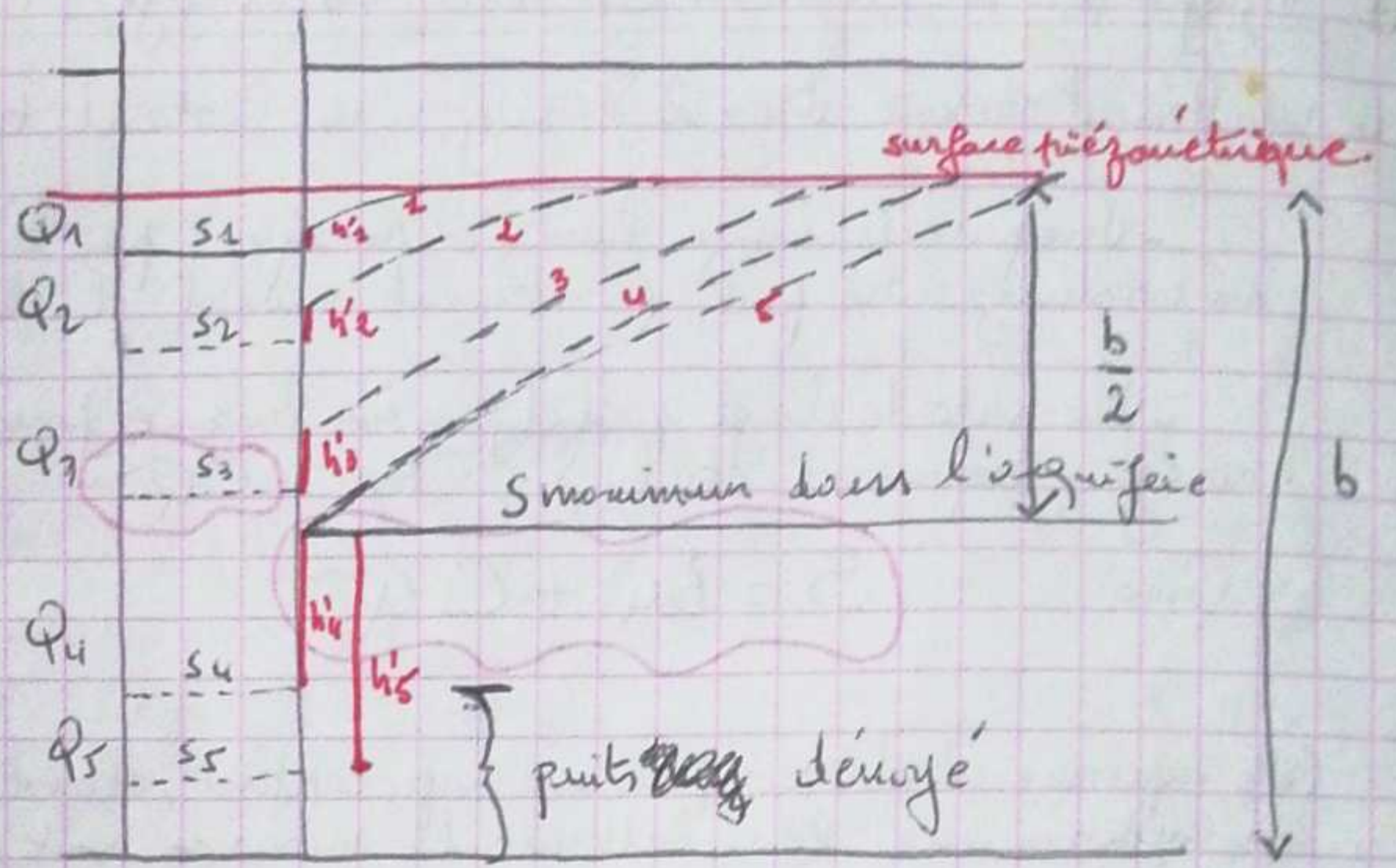
\* si l'écoulement laminaire est négligeable  $\Rightarrow S = CQ^2$

## \* Vitesse critique et débit critique:

Au cours du pompage le niveau dynamique dans le puits est inférieur au niveau piézométrique dans l'aquifère au voisinage de l'ouvrage. Cette différence est la hauteur de la surface de sursurte, notée  $h'$ . Elle croît avec le rabattement pour atteindre une valeur maximale lorsque le rabattement dans l'aquifère est voisin de  $\frac{h}{2}$ . Au delà les rabattements dans le puits augmentent et ceux dans l'aquifère se stabilisent. Au delà de cette limite l'écoulement laminaire fait place à un écoulement turbulent. La vitesse critique est atteinte. Elle correspond à un débit critique.

Le régime turbulent augmente la perte de charge quadratique, donc diminue le rendement de l'ouvrage. En outre il provoque l'entraînement des particules fines du terrain, d'où colmatage de la partie captante et ensablement du puits.

Dans la pratique le débit de pompage doit être inférieur au débit critique. Le débit critique est évalué par interprétation de la courbe débits / rabattements.



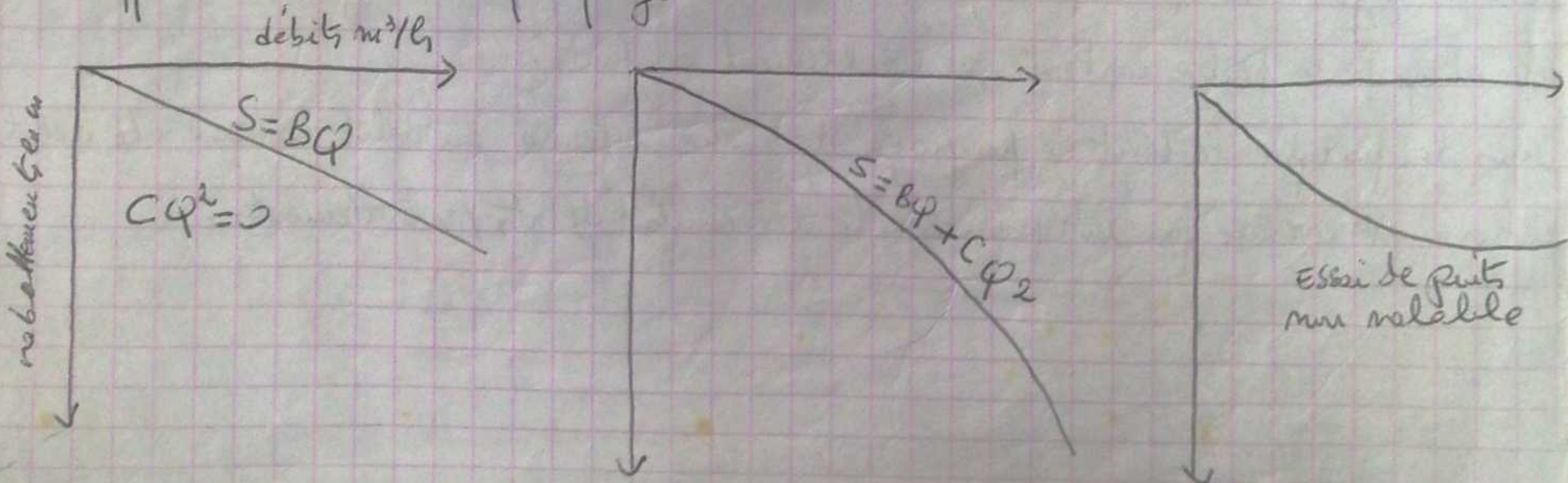
⊛ schéma de l'évolution du cône de dépression en fonction du rabattement dans le puits au cours de l'essai de puits.

\* Interprétation graphique des données de l'essai de puits:

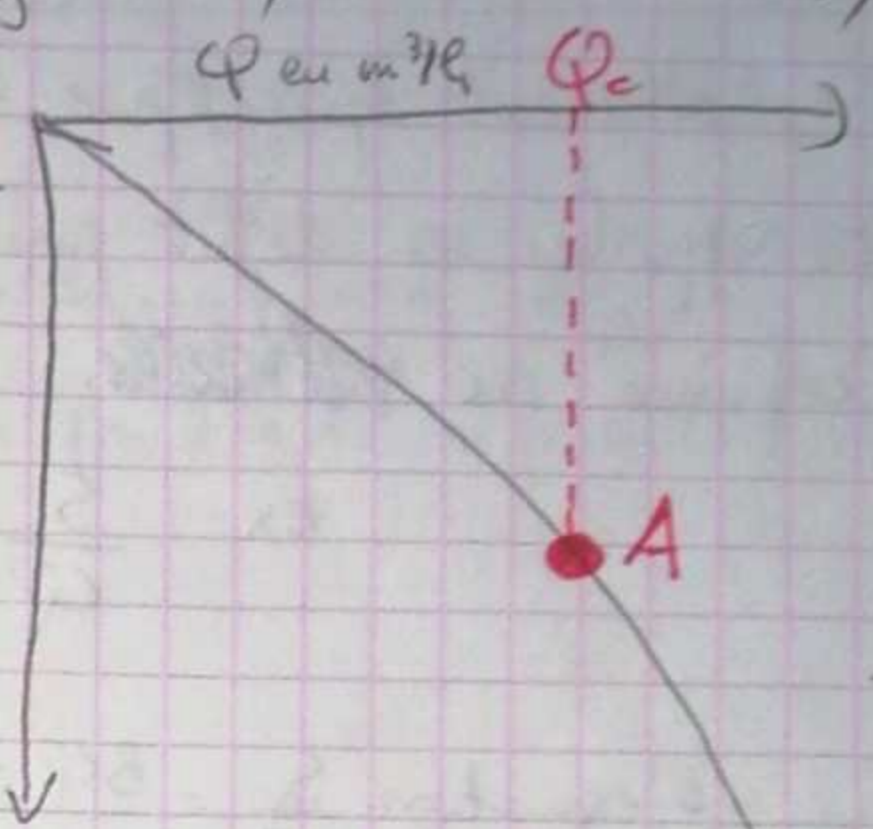
- Courbe débits / rabattements - Débit critique.

Sur un papier graphique linéaire, on porte le débit constant en  $m^3/h$  et le rabattement en m. Les points obtenus tracent la courbe débits / rabattements, ou courbe caractéristique, représentant la fonction  $s = f(Q)$ . Sa forme apporte des informations sur le comportement hydrodynamique du complexe aquifère / ouvrage de captage à l'origine de la perte de charge quadratique. Si on a une droite, la perte de charge quadratique est nulle ou négligeable, elle est importante avec une courbe concave.

Une courbe concave traduit un essai de puits non fiable. Même incorrecte ou apparition d'un développement au cours du pompage.



Donc si les pertes de charge quadratiques ne sont pas négligeables, la courbe débits / rabattements présente deux parties qu'on peut distinguer par le point **A**, appelé le point critique, correspondant en abscisse au débit critique.

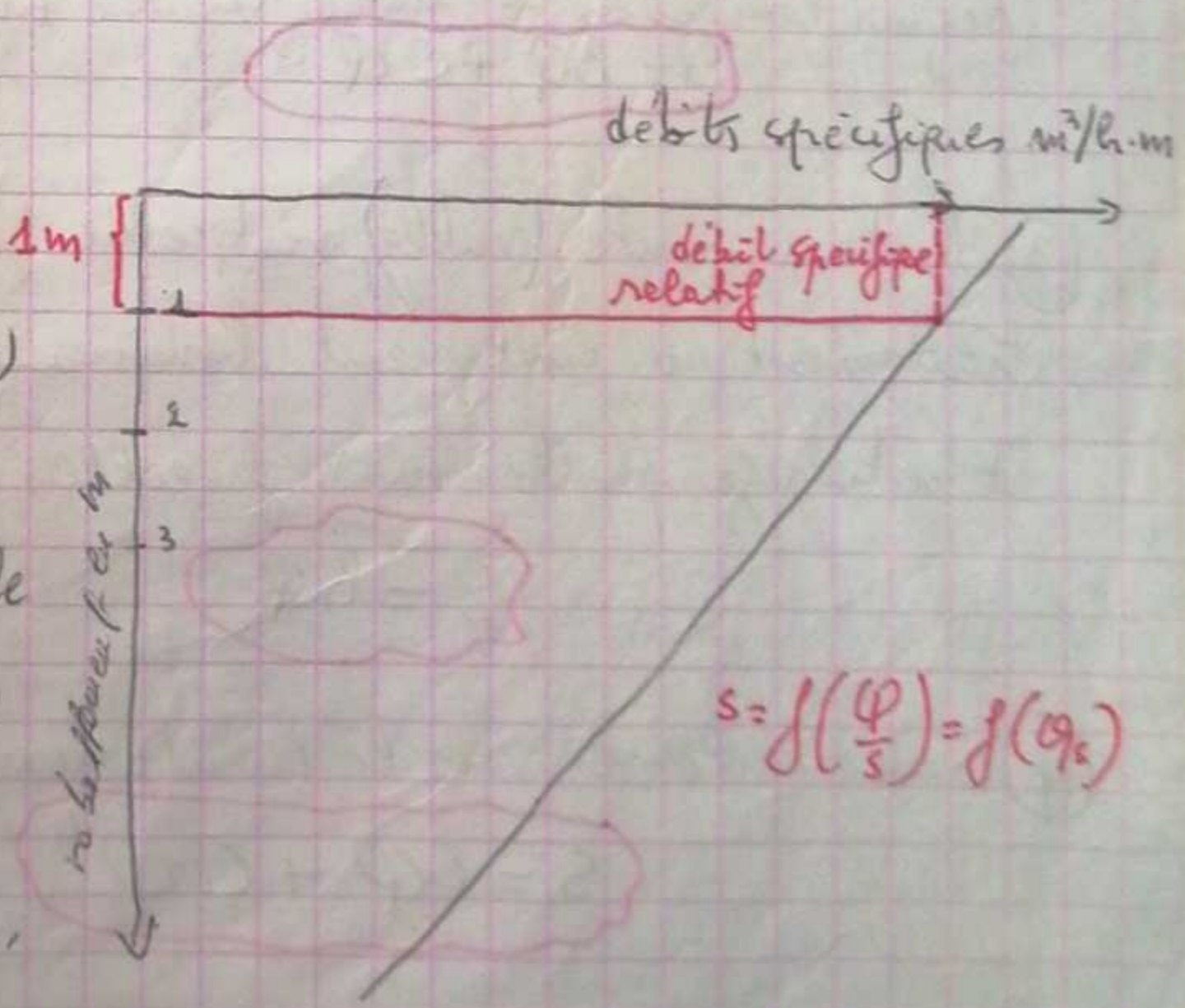


Le point A correspond à l'augmentation de la pente de la courbe.

\* Unité débits spécifiques / rabattement. Débit spécifique et débit spécifique relatif. Le débit spécifique d'un puits, noté  $q_s$  est le débit pompé  $Q$  rapporté au rabattement  $s$ , dans le puits.

$$q_s = \frac{Q}{s} \quad \text{ex} \quad q_s = \frac{42}{0,81} = 51,85 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}$$

La relation débits spécifiques / rabattements est représentée par une droite inclinée représentative de la fonction  $s = f(q_s)$ . Cette droite permet de calculer le débit spécifique relatif, ou débit constant pompé déterminant un rabattement unitaire (1 mètre) à la fin d'un puits de débit. Sur la droite débits spécifiques / rabattements, l'abscisse correspondant à l'ordonnée 1 mètre donne la valeur du débit spécifique relatif.



Les débits spécifiques relatifs, mesurés avec des puits de débit identiques (débits et durées) dans les ouvrages d'un aquifère permettent de dresser une carte de leur distribution spatiale (courbes d'égale valeur). Ce document constitue la trame d'une interpolation spatiale des mesures ponctuelles de transmissivités.

② droite débits / rabattements spécifiques :

Le rabattement spécifique  $s/Q$  est la hauteur de rabattement mesurée dans le puits rapportée au débit pompé dans des conditions d'écoulement de puits définies. Il est exprimé en ~~cm~~  $m \cdot l / m^3$

Ex  $\frac{s}{Q} = \frac{0,81}{42} = 0,019$  ~~cm~~  $m \cdot l / m^3$

L'équation  $\frac{s}{Q} = \frac{BQ + CQ^2}{Q} = B + CQ$

C'est l'équation d'une droite sans réserve que les mesures de chacun des débits soient effectuées au même instant. Cette droite met en évidence certaines formulations simples de la relation débits / rabattements. Quatre cas peuvent se présenter

① droite passant par l'origine indiquant que le régime turbulent est fortement prédominant dans l'aquifère et dans le puits.

$S = CQ^2$

② droite ne passant pas par l'origine indiquant un régime laminaire + un régime turbulent

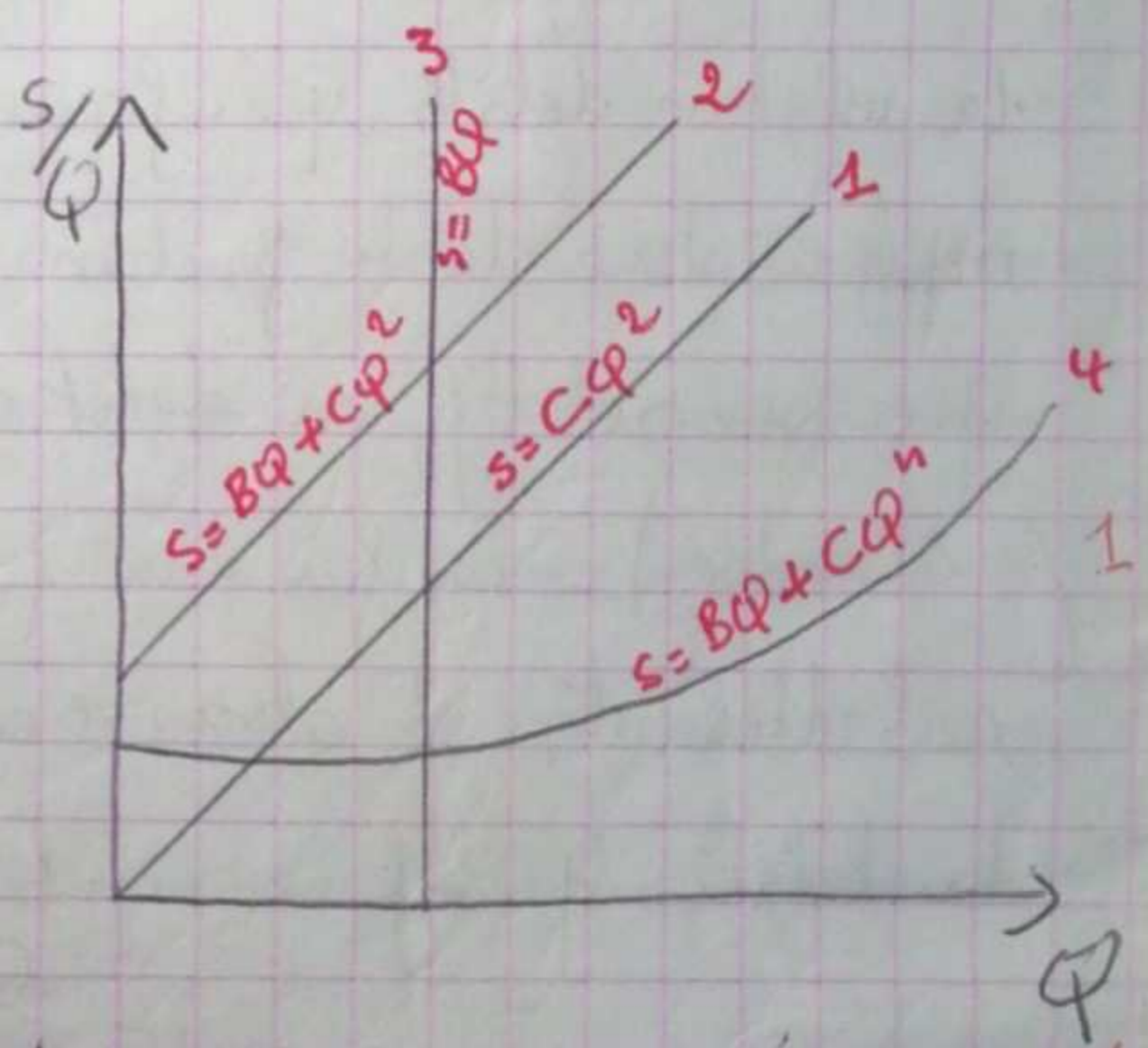
$S = BQ + CQ^2$

③ droite à pente (nulle) verticale parallèle à l'axe des ordonnées, traduisant un écoulement laminaire, avec pertes de charge dans le crépine et le tubage nulles ou négligeables :

$S = BQ$

④ Courbe concave vers le haut : mesure effectuée par opposition d'un développement au cas du forage.

$S = BQ + CQ^m$  avec  $m = 3, 4, \text{etc} \dots$



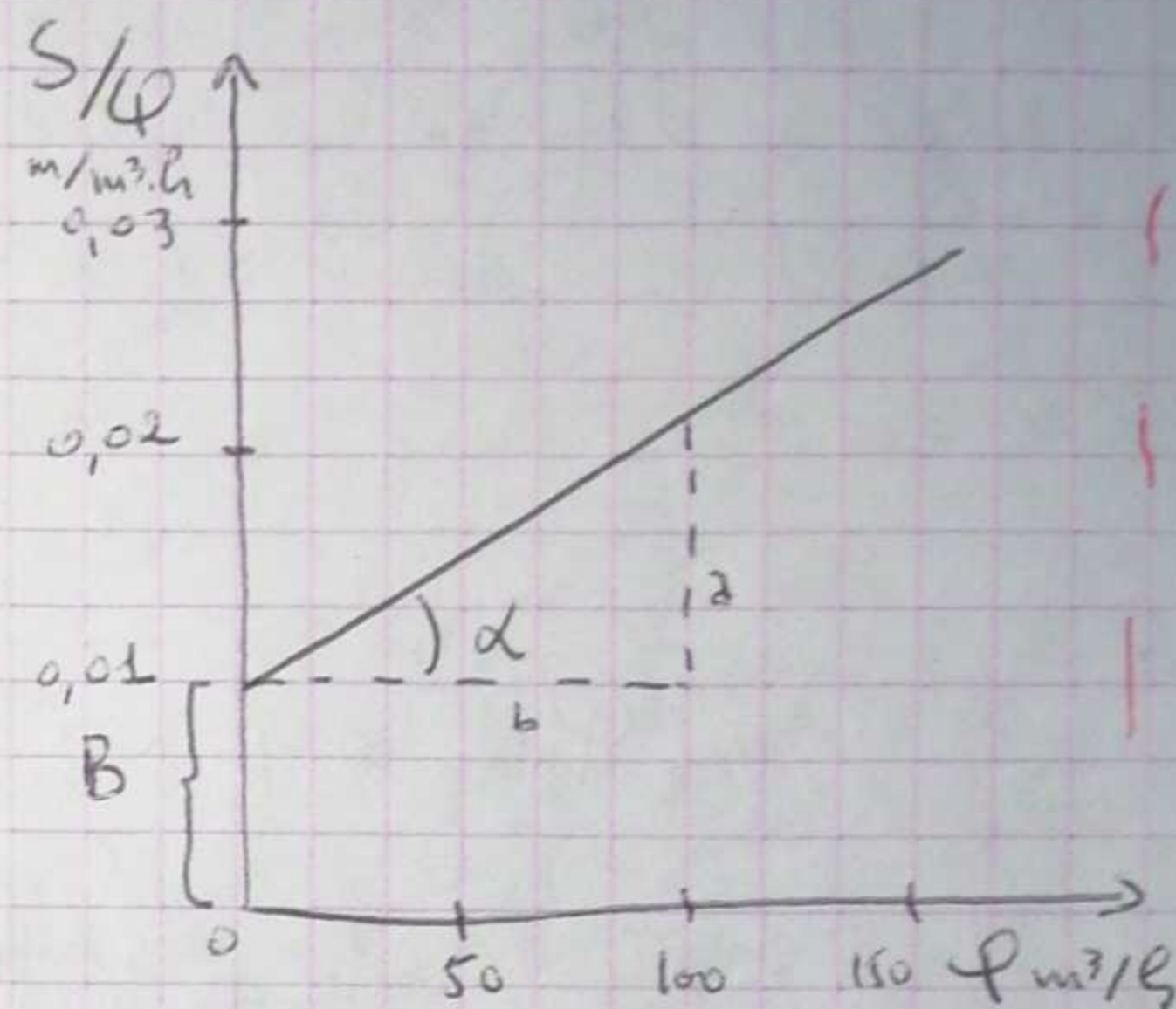
\* Calcul des pertes de charges :

La suite de débits rabattements spécifiques, permet de déterminer les coefficients  $B$  et  $C$  de l'équation  $S/Q = B + CQ$

- Le coefficient  $B$  est obtenu par l'intersection de la suite représentative avec l'axe des rabattements spécifiques. Dans notre exemple  $B = 0,01$

- Le coefficient  $C$  est égal à la pente de la suite représentative

$$C = \tan \alpha = \frac{\alpha}{b} = \frac{0,01}{100} = 1,0 \cdot 10^{-4}$$



L'équation de la suite représentative est :

$$S = BQ + CQ^2 = 0,01Q + 1,0 \cdot 10^{-4} Q^2$$

Le rabattement, déterminé à l'instant  $t$ , imputable à la perte de charge linéaire conséquence de l'écoulement laminaire de l'aquifère ( $BQ$ ) imposée par ses paramètres hydrodynamiques, est donnée par l'expression :

$$S = BQ = 0,01Q \quad (\text{pour l'exemple considéré})$$

Les valeurs calculées donnent la suite représentative pour chaque débit.

La différence entre le point de cette suite et celui de la courbe débits rabattements ~~est~~ donne la valeur de la perte de charge quadratique  $CQ^2$ .

