



Note sur la réalisation et l'interprétation des pompages d'essais par paliers. Bonnes pratiques et Exemples d'application avec le logiciel OUAIP

BRGM/ RP-65683-FR
Novembre 2016

Note sur la réalisation et l'interprétation des pompages d'essais par paliers

Bonnes pratiques et Exemples d'application avec le logiciel OUAIP

Rapport final

BRGM/ RP-65683-FR
Novembre 2016

Étude réalisée dans le cadre de la convention ONEMA-BRGM 2013-2015

A.Gutierrez

Vérificateur :

Nom : S.LALLIER

Date : 30 mars 2016

Signature :



Approbateur :

Nom : F. GARRIDO

Date : 17/11/2016

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés Pompage d'essais ; essais par paliers ; essais de puits ; débit critique, logiciel OUAIP

Couverture géographique : Nationale
Niveau de lecture :

CORRESPONDANTS ONEMA : AUGÉARD Bénédicte

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Gutierrez A. (2016) – Note sur la réalisation et l'interprétation des pompages d'essais par paliers. Bonnes pratiques et exemples d'application avec le logiciel OUAIP. Rapport final. BRGM/RP-**65683**-FR, p.72, 45 fig., 3 tabl..

© BRGM, 2016, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Résumé

Le pompage par paliers est une pratique courante en hydrogéologie dans le but de caractériser un puits de pompage par des sollicitations de courtes durées à débit variable. Il permet la détermination du débit critique (débit maximal théorique) et éventuellement un débit d'exploitation.

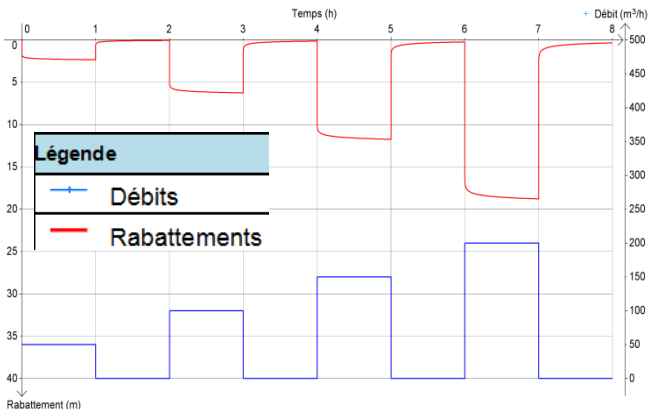
Les notions de débit critique et de débit d'exploitation sont explorées. Après la description de la notion des différentes pertes de charge dans un ouvrage en pompage, ce rapport établit le lien entre le débit critique et les pertes de charges quadratiques ou non linéaires dont la prévalence est synonyme d'écoulement majoritairement turbulent dans l'ouvrage. Faisant le constat que les méthodes de détermination du débit critique actuellement utilisées sont subjectives et peu rigoureuses, il est proposé que le débit critique corresponde au point d'égalité entre les pertes de charges linéaires et non linéaires, soit encore le point à la charnière entre un écoulement laminaire et un écoulement turbulent. Mais il existe des limites à ce concept de base et cette méthode, dite du point d'égalité entre les pertes de charges linéaires et non linéaires, est également discutée.

Dans sa dernière partie, le rapport décrit les conditions de mises en œuvre des pompages par paliers dans les règles de l'art. Il insiste sur l'importance d'une durée identique pour chaque palier et d'une remontée intermédiaire permettant une récupération d'au moins 95% du rabattement. Lorsque ces conditions ne sont pas respectées, les méthodes de détermination du rabattement induit par chaque palier doivent prendre en compte l'historique des pompages.

Enfin, le rapport explique pourquoi le pompage par paliers enchainés n'est pas une pratique optimale pour la caractérisation des pertes de charges et du débit critique, à moins d'utiliser une méthode d'interprétation spécifique.

Synthèse opérationnelle

Le pompage par palier, ou essai de puits, consiste à solliciter un ouvrage à différents débits dans le but de déterminer son débit critique, ainsi que les coefficients de perte de charge linéaires et quadratiques. Leur détermination résulte de la construction de la courbe caractéristique du puits selon un protocole précis.



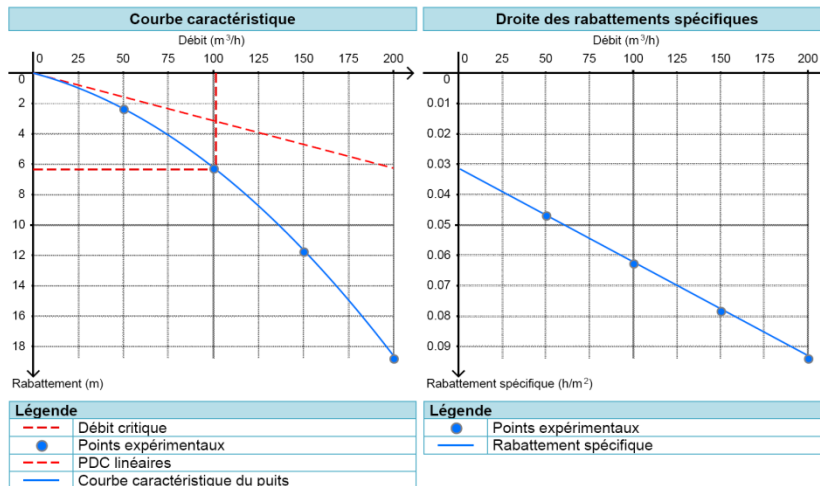
Pompage d'essai par paliers

Mise en œuvre d'un essai par paliers

La norme AFNOR X10-999 (Aout 2014) préconise de réaliser un minimum de 3 paliers (4 paliers sont préférables) d'au moins 1 heure chacun séparés par un arrêt d'une durée équivalente. Chaque phase de pompage doit impérativement être de durée identique et à débit constant. A la fin du palier, la valeur du rabattement est mesurée.

Tracé de la courbe caractéristique et de la droite des rabattements spécifiques

Les couples débit rabattement (Q, s) sont portés sur un graphique appelé courbe caractéristique du puits. Un deuxième graphique représente le rabattement spécifique (s/Q) en fonction du débit. Sauf cas particulier, les points de ce deuxième graphique s'alignent. L'ordonnée à l'origine donne le coefficient B (coefficient des pertes de charge linéaires) et la pente de la droite donne le coefficient C (coefficient des pertes de charge quadratiques).



L'outil OUAIP facilite l'interprétation. OUAIP est un outil d'aide à l'interprétation des pompes développé au BRGM. Il est disponible gratuitement sur <http://ouaip.brgm.fr>

Courbe caractéristique et droite des rabattements spécifiques

Définition du débit critique

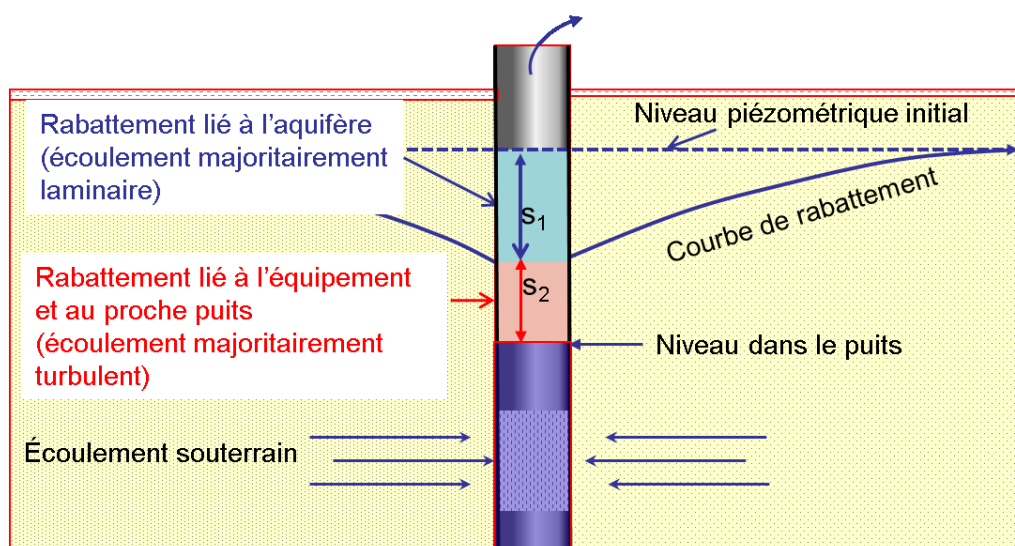
Le débit critique peut être considéré comme le débit maximal acceptable pour le forage pour respecter un régime d'écoulement essentiellement laminaire. En deçà du débit critique les flux convergent vers le puits en suivant des trajectoires pseudo parallèles et régulières (conditions de Darcy: le débit est directement proportionnel au gradient). A l'approche du débit critique cette condition de linéarité disparaît progressivement. Au-delà du débit critique, les écoulements deviennent majoritairement turbulents. Le débit critique est recherché dans le but de prémunir le forage contre les surcoûts énergétiques et les dégâts potentiels générés par les écoulements turbulents (déstabilisation du proche puits et entrainement de fines, usure).

Débit maximal d'exploitation

Le débit critique ne doit pas être confondu avec le débit maximal d'exploitation parce qu'il est établi sur une courte période alors que le débit d'exploitation doit tenir compte de la durée de pompage en exploitation. Un autre critère intervient pouvant minorer le débit d'exploitation par rapport au débit critique : le rabattement maximal acceptable. En pratique, ce n'est qu'après l'interprétation d'un essai de longue durée que le débit d'exploitation peut être simulé et défini en fonction des contraintes de rabattement.

Principe

Le rabattement induit par un pompage peut être décomposé en rabattements individuels correspondant aux pertes de charge dans l'aquifère (s_{aq}), la paroi du trou (s_{sk}), le massif de gravier (s_{gp}), les crépines (s_{sc}) et l'intérieur du forage (s_{up}). De manière schématique il est convenu de considérer seulement deux ensembles de pertes de charge, celles liées à l'aquifère, correspondant à des vitesses d'écoulement relativement lentes donnant lieu à un régime d'écoulement laminaire (appelées pertes de charges linéaires), et celles liées à l'équipement au proche puits, siège des plus fortes vitesses, où des écoulements turbulents sont fréquents. Les pertes de charge y sont alors quadratiques car le rabattement correspondant est proportionnel au carré du débit.



Décomposition des rabattements dans un ouvrage en pompage.



Les modules du logiciel Ouaip (<http://ouaip.brgm.fr>)

Mise en œuvre avec le logiciel Ouaip

Le module « interpréter un pompage par palier » du logiciel Ouaip donne la possibilité de calculer de manière partiellement ou totalement automatique le débit critique Q_c au sens des pertes de charge.

Il suffit de rentrer dans l'onglet « Données » le débit et le rabattement au bout d'un même temps de pompage pour chaque palier.

Après validation de la saisie des paliers, l'utilisateur passe dans l'onglet « Paramètres » pour renseigner les coefficients B et C ou demander leur ajustement automatique. Enfin, l'onglet « Rapport » lui permet d'imprimer une fiche synthétique de l'essai et de son interprétation.

Intérêt de la méthode du point d'égalité des pertes de charges linéaires et quadratiques

Les pompages par paliers sont interprétés classiquement à l'œil, en observant une éventuelle rupture de pente de la courbe caractéristique. La valeur ainsi obtenue est très subjective et très dépendante du mode de construction de la courbe caractéristique (position et nombre de points). En calculant les rabattements liés d'une part aux pertes de charge linéaires et d'autre part aux pertes de charges quadratiques, la méthode du point d'égalité permet une détermination rigoureuse du débit critique.

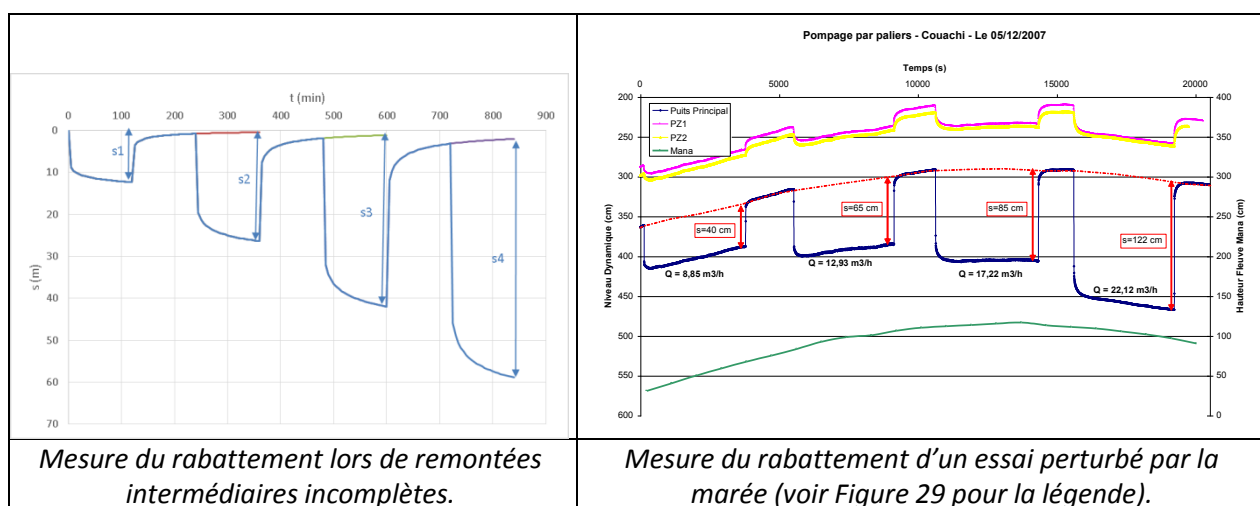
Limites de la méthode du point d'égalité des pertes de charges linéaires et quadratiques

Le concept de l'attribution des pertes de charges quadratiques à l'équipement du forage et des pertes de charge linéaires à l'aquifère, est parfois simpliste. C'est un modèle qui s'adapte bien aux milieux poreux homogènes ou aux milieux fissurés qui s'y apparentent. Mais dans les milieux karstiques en particulier, certains milieux fracturés ou certains milieux poreux tels les éboulis, les vitesses d'écoulement souterrain induites par un pompage peuvent être très élevées et générer des pertes de charges quadratiques qui ne sont pas dues à l'équipement du forage. Dans certains cas, les rabattements très faibles au puits de pompage permettent d'envisager des débits critiques bien supérieurs à ceux donnés par la méthode.

Conditions de mise en œuvre

Les règles simples suivantes permettent de réaliser les pompages d'essais par paliers dans les meilleures conditions :

- Chaque palier doit être indépendant, à pompage constant de durée identique et suffisante pour s'affranchir de l'effet de capacité et obtenir un niveau dynamique pseudo-stabilisé (1 à 2h suffisent généralement).
- Les paliers de débit ne sont pas nécessairement réalisés de manière croissante ou décroissante. Ils doivent cependant concerner une plage de débit convenablement répartie. Par exemple, pour 4 paliers, entre $Q/4$ et Q si Q est le débit maximal espéré.
- Les débits ne doivent pas provoquer des vitesses d'entrée dans les crépines supérieures à 3 cm/s
- Les rabattements ne doivent pas dénoyer les venues d'eau..
- En nappe libre, les rabattements ne doivent pas dépasser 30 % de la hauteur saturée de l'aquifère.
- La remontée intermédiaire doit permettre le retour à l'état initial, ou à un niveau proche de celui-ci (récupération de 95% du rabattement). Lorsque ce n'est pas possible, le rabattement à prendre en compte en fin de palier doit être établi par rapport au niveau qui aurait été atteint si la remontée s'était poursuivie.
- De même, lorsque des phénomènes extérieurs influencent la nappe, le rabattement à considérer doit être corrigé de leur impact (exemple : influence de la marée).



Influence de la durée des paliers

Certains ouvrages préconisent d'attendre la stabilisation du niveau dynamique. En toute rigueur, c'est effectivement à partir de niveaux stabilisés que la courbe caractéristique devrait être construite. La réalisation d'essais trop courts aura pour conséquence une sous-estimation du débit critique. Cependant, les pertes de charges quadratiques se manifestent instantanément et leur détermination ne nécessite pas des pompages de longue durée, à condition de pomper plus longtemps que la durée de l'effet de capacité (généralement 1 à 2 h de pompage suffisent).

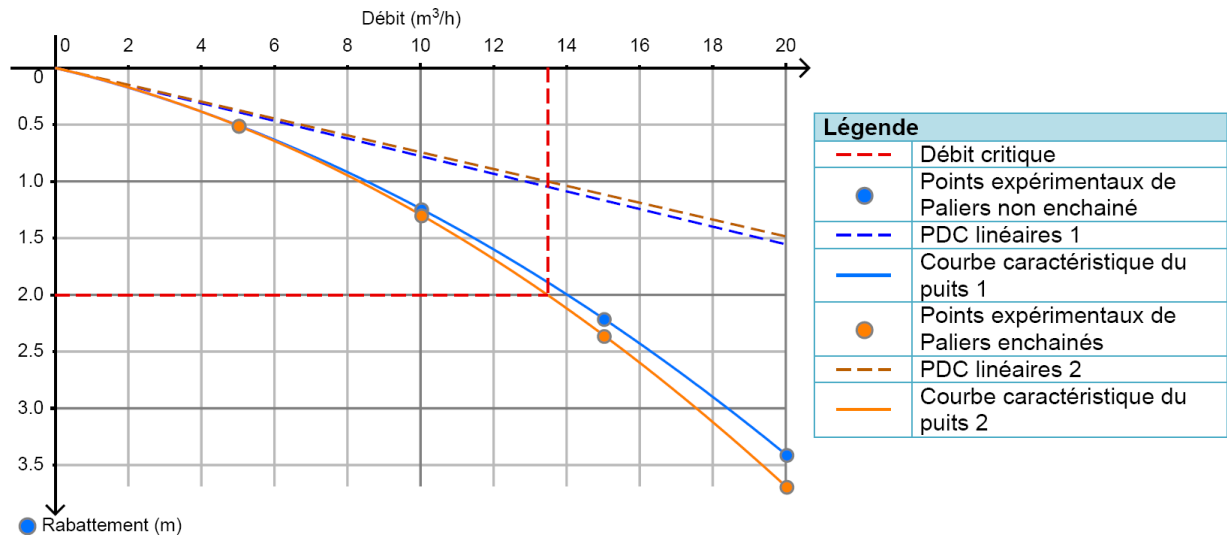
Influence de l'enchaînement des paliers

L'enchaînement direct des paliers sans remontée intermédiaire n'est pas recommandé pour deux raisons :

- Le rayon d'action d'un pompage est directement lié au temps de pompage. Lorsque les paliers sont de durée identique et interrompus par une période de repos chaque palier a le même rayon d'action. En revanche, lorsque plusieurs paliers se succèdent, le rayon d'action ne cesse de croître et chaque palier intéresse un volume d'aquifère différent.

Ainsi, toute hétérogénéité ou limite rencontrée lors de cette progression affectera le rabattement et biaisera l'interprétation.

- L'historique des pompages influence les paliers successifs conduisant à une sous-estimation du débit critique. Les rabattements doivent alors être calculés, non pas par rapport au niveau statique mais par la méthode de Bierschenk (1963) qui permet de défalquer au palier « n » l'influence des pompages précédents et des éventuelles hétérogénéités.



Interprétation d'un essai par paliers non enchainés ($Q_c=16.8 \text{ m}^3/\text{h}$) et enchainés sans correction des rabattements observés ($Q_c=13.5 \text{ m}^3/\text{h}$) dans un milieu compartimenté (2 limites étanches).

Conclusions

L'interprétation des pompages par paliers dépend en grande partie du soin apportée à la réalisation des essais. En particulier, le développement de l'ouvrage doit être achevé. Les essais peuvent être de courte durée car ils caractérisent l'environnement immédiat de l'ouvrage. La détermination du coefficient de pertes de charges quadratiques à partir d'essais correctement réalisés permet d'intégrer cette valeur pour l'interprétation des paramètres de l'aquifère ainsi que dans les simulations d'exploitation pour déterminer le débit d'exploitation du forage. L'outil Ouaip peut être utilisé dans chacune de ces tâches.

Sommaire

1. Introduction	15
1.1. CONTEXTE GENERAL	15
1.2. OBJECTIFS DE CE DOCUMENT	15
1.3. DOCUMENTS NORMATIFS	16
2. Méthodologie pour la détermination d'un débit d'exploitation.	17
2.1. L'AQUIFERE PEUT-IL FOURNIR LE DEBIT SOUHAITE ?.....	17
2.2. QUEL EST LE RABATTEMENT MAXIMAL ADMISSIBLE ?.....	18
2.3. LES ECOULEMENTS SONT-ILS LAMINAIRES ?	19
2.4. ESTIMATION DU DEBIT D'EXPLOITATION	20
3. La notion de débit critique	22
3.1. ECOULEMENTS LAMINAIRES ET ECOULEMENTS TURBULENTS	22
3.2. VITESSE CRITIQUE.....	24
3.3. DEFINITION DES PERTES DE CHARGES DANS L'OUVRAGE ET AUTOUR DE CElui-CI (PROCHE Puits).....	25
3.4. DETERMINATION DU DEBIT CRITIQUE	27
3.4.1. Méthodes classiques	27
3.4.2. Critique des méthodes classiques.....	29
3.4.3. La méthode du point d'égalité des pertes de charges linéaires et quadratiques...	29
3.4.4. Mise en œuvre avec le logiciel Ouaip.....	32
3.4.5. Limites de la méthode du point d'égalité des pertes de charges linéaires et quadratiques	35
3.4.6.- Cas de pertes de charges non-linéaires non-quadratiques	35
3.5. COEFFICIENT D'EFFICACITE	38
4. Conditions de mise en œuvre des essais par paliers pour une détermination correcte des coefficients de pertes de charge.	40
4.1. DEBITS DES PALIERS.....	40
4.2. DUREE DES PALIERS	42
4.2.1. Importance d'une durée identique pour chaque palier.....	42
4.2.2. Influence de l'effet de capacité.....	45
4.2.3. Influence de la durée des paliers sur les résultats.....	47

4.3. CALCUL DU RABATTEMENT EN FIN DE PALIER.....	49
4.4. CAS PARTICULIER DES POMPAGES PAR PALIERS ENCHAINES	54
4.4.1. Effet de l'historique de pompage	55
4.4.2. Effet de limites	62
5. Conclusions	67

Liste des illustrations

Figure 1 : Régimes d'écoulement proche puits en fonction du gradient hydraulique (d'après Houben 2015a°)	19
Figure 2 : Simulation d'exploitation à un débit de 15 m ³ /h 15h/24 pendant 1 an (Logiciel OUAIP)	21
Figure 3 : Ecoulement laminaire (a) et écoulements turbulents (b, c, d) pour des nombres de Reynolds croissants (source : Cours A.Robichon/Annecy)	23
Figure 4 : Relation entre la vitesse de l'eau et la distance au forage : plus on se rapproche du forage, plus la vitesse de l'écoulement souterrain est grande.	23
Figure 5 : La cavitation : lorsqu'un liquide soumis à une dépression passe en dessous de la pression de vapeur saturante, des bulles de vapeur se forment (source : Wikipedia).	24
Figure 6 : Décomposition des rabattements dans le proche puits (d'après Houbein, 2015b): rabattement lié à l'aquifère S_{aq} , à la paroi du forage S_{sk} , au massif filtrant S_{gp} et à la crépine S_{sc} .	26
Figure 7 : Effet des pertes de charges et de la pénétration partielle sur le rabattement (Misstear et al., 2006)	27
Figure 8 : Détermination du débit critique par identification d'une partie linéaire	28
Figure 9 : Détermination du débit critique par l'intersection de deux droites	28
Figure 11 : Graphique de base de la méthode C.I.E.H.	29
Figure 12 : Détermination du débit critique : le débit critique corespond au point où le rabattement observé correspond au double du rabattement théorique.	31
Figure 13 : Tracé des pertes de charges linéaires et non linéaires	32
Figure 14 : panneau principal à l'invite du logiciel Ouaip	33
Figure 15 : module de saisie des données dans Ouaip	33
Figure 16 : Les deux graphes $s=f(Q)$ et $s=f(s/Q)$ après saisie des données	34
Figure 17 : Barre d'outils de Ouaip : parmi les outils du bandeau, l'outil « Tracer la droite des rabattements spécifiques » permet d'ajuster manuellement sa propre interprétation.	34
Figure 18 : Exemple d'interprétation de courbe caractéristique comparant un ajustement de la courbe $s=BQ+CQ^n$ avec $n=2$ et avec $n=2,1$	37
Figure 19 : Exemple du forage d'Azay le Rideau affecté par un dénoyage progressif des venues d'eau	38
Figure 20 : Tube à diaphragme	42
Figure 21 : Exemple de paliers de différentes durées	43
Figure 22 : Courbes obtenues à partir des valeurs en fin de palier de durées hétérogènes (même essai que la figure 23)	44
Figure 23 : Courbes obtenues à partir des valeurs après 1h de pompage de chaque palier (même essai que la figure 22)	45
Figure 24 : Durée de l'effet de capacité en fonction de la transmissivité T , et du diamètre du puits d_p (Genetier – 1984)	46
Figure 25 : Un exemple d'essai par palier avec (courbe pleine) et sans (courbe pointillée) effet de capacité ; la courbe en bleu indique le débit.	47
Figure 26 : Influence de l'effet de capacité sur la courbe caractéristique pour deux durées de pompage (30 min et 1h)	47
Figure 27 : Simulation de quatre essais de 24h	48

Figure 28 : Evolution des résultats de l'essai avec la durée du pompage	49
Figure 29 :Essais par palier perturbés par la marée	50
Figure 30 : Essais par palier avec remontée incomplète (exemple A)	51
Figure 31 : Interprétation de l'essai A avec (vert) et sans (bleu) correction du niveau statique	52
Figure 32 : Essais par palier avec remontée incomplète (exemple B)	53
Figure 33 : Interprétation de l'essai B avec (vert pointillé) et sans (bleu – trait plein) correction du niveau statique	54
Figure 34 : Exemple d'un essai de 3 paliers enchainés	55
Figure 35 : Principe de la méthode de Bierschenk.....	56
Figure 36 : Interprétation des essais par paliers enchainés (méthode de Bierschenk)	57
Figure 37 : Interprétation de l'essai par paliers enchainés sans correction	58
Figure 38 : Interprétation de l'essai par paliers enchainés avec la méthode de Bierschenk	59
Figure 39 : Vérification de la cohérence de l'interprétation de l'essai par paliers enchainés.....	60
Figure 40 : Interprétation de l'essai si les paliers avaient été non enchainés	61
Figure 41 : Influence de l'effet de deux limites étanches sur l'essais par paliers enchainés (la courbe 2 représente l'essai sans les limites)	62
Figure 42 : Application de la méthode de Bierschenk à l'essai avec limites étanches	63
Figure 43 : Interprétation de l'essai par paliers enchainés avec 2 limites étanches, rabattements bruts.	64
Figure 44 : Interprétation de l'essai par paliers enchainés avec 2 limites étanches méthode de Bierschenk	65
Figure 45 : Interprétation de l'essai par paliers non enchainés avec deux limites étanches	66

Tableaux

Tableau 1 : Données de l'essai simulé A	51
Tableau 2 : Données de l'essai simulé B	53
Tableau 3 : Comparaison des résultats des interprétations	63

1. Introduction

1.1. CONTEXTE GENERAL

L'exécution d'un nouvel ouvrage destiné au prélèvement d'eaux souterraines s'achève par la réalisation d'un pompage d'essai dont l'objectif est d'évaluer la capacité de production du forage. De même, sur un ouvrage ancien, les pompages d'essai visent à établir un diagnostic avant travaux ou une évaluation de l'efficacité de ces derniers après la réhabilitation d'un forage. Les pompages d'essai mis en œuvre pour atteindre ces objectifs sont des pompages de courtes durée, à divers débits, intermittents ou enchainés, appelés pompages par paliers, parfois complétés par un pompage de longue durée.

L'analyse de nombreux rapports de forage montre que l'interprétation de ces pompages par paliers est souvent erronée. En effet, cette interprétation peut être entachée d'erreur du fait de plusieurs facteurs :

- Des perturbations extérieures, naturelles ou artificielles (effet de marée, effet barométrique, influence d'un cours d'eau, interférence avec un ou plusieurs ouvrages voisins...)
- L'impact de la géométrie de l'aquifère et de son épaisseur (effet de limites, désaturation partielle, dénoyage des venues d'eau, effet de drainance, artésianisme...)
- Le rôle de la conception de l'ouvrage (effet de capacité, pénétration partielle, effet de skin...)
- Le mode opératoire de l'essai (paliers incomplets, enchainés, ...)

Ces facteurs influencent le choix d'un débit dit « critique » souvent confondu, à tort, avec le débit d'exploitation. L'influence des erreurs ou approximations résultantes de ce choix a un impact potentiel sur le bon fonctionnement de l'ouvrage, son rendement et sa longévité.

1.2. OBJECTIFS DE CE DOCUMENT

Les objectifs de ce document sont les suivants :

- donner à l'opérateur ou au maître d'œuvre un protocole lui permettant de réaliser un pompage d'essais dans les règles de l'art, dans le but de déterminer le débit d'exploitation d'un ouvrage ;
- donner à l'hydrogéologue ou l'ingénieur des éléments pour comprendre et justifier la préconisation d'un débit d'exploitation propre à l'ouvrage de captage ;
- donner aux agents des services de l'état des critères clairs pour juger du respect de la réglementation et des règles de l'art dans la réalisation d'un pompage d'essai et du bien fondé de ses conclusions sur l'exploitabilité du forage.

Cette note n'a pas pour vocation de remplacer les publications abondantes sur la pratique et la théorie des pompages d'essais.

Les ouvrages concernés par les pompages d'essai sont les forages d'eau et de géothermie de très basse énergie, pour lesquels l'influence de la température ou des gaz dissous sur les

écoulements est négligeable. Pour les essais sur les ouvrages géothermiques, il existe également un guide de bonnes pratiques (BRGM RP-64435-FR).

Il n'est pas question ici de présenter les équations mathématiques qui sous-tendent les règles de bonne conduite des essais et leurs interprétations. On insistera au contraire sur les aspects pratiques en illustrant les propos par des exemples concrets et des démonstrations à l'aide de l'outil OUAIP (Outil d'Aide à l'Interprétation des Pompages d'essai) développé au BRGM et disponible sur le site <http://ouaip.brgm.fr>. Les exemples de ce rapport ont été réalisés avec la version 1.9.4

1.3. DOCUMENTS NORMATIFS

Il existe une norme AFNOR intitulée « Essai de pompage » (NF-P 94-130) qui traite d'essais réalisés dans le cadre des reconnaissances et essais de géotechnique. L'objectif des essais en géotechnique n'est pas d'obtenir un débit optimal d'un ouvrage mais d'assurer un rabattement de la nappe suffisant pour réaliser des travaux de surface. Bien que reposant sur les mêmes bases théoriques, cette norme n'est pas applicable en hydrogéologie, dont la finalité et la nomenclature sont différentes de celles de la géotechnique.

Il n'existe pas à ce jour de norme sur les pompages d'essais en hydrogéologie. En revanche, la norme NF-X10-999 sur les forages d'eau et de géothermie, révision du 30 Aout 2014, décrit en détail la procédure préconisée (chapitre 11) qui est en adéquation avec les bonnes pratiques décrites dans cette note.

Il existe également une norme internationale ISO 14686:2003 dont les préconisations sont très largement en phase avec la présente note.

Toutefois, les normes prescrivent des protocoles sans en expliquer les raisons ni ce qui se passe si ces derniers ne sont pas respectés. Elles traitent des cas généraux mais ne considèrent pas les cas particuliers. Nous tenterons ici de compléter modestement ces documents normatifs.

2. Méthodologie pour la détermination d'un débit d'exploitation.

La détermination du débit d'exploitation d'un ouvrage repose sur au moins quatre facteurs :

- la capacité du système aquifère capté à fournir le débit souhaité,
- la position des crépines,
- la position de la pompe, le cas échéant,
- la conservation d'un écoulement principalement laminaire lors de l'entrée de l'eau dans les crépines (notion de débit critique).

D'autres contraintes liées par exemple au système de distribution (volume du réservoir), aux besoins (débit de pointe), à la disponibilité de l'énergie, à des soucis d'économie d'énergie (pompage en heure creuse) etc... peuvent influencer le choix du débit d'exploitation et le mode d'exploitation. Nous traitons ici des aspects propres au puits et à l'aquifère. De même, les limitations liées au diamètre de la chambre de pompage ou au choix de la pompe ne sont pas considérées ici, mais il est évident que ces considérations doivent être examinées au moment de la création de l'ouvrage. Un forage d'eau est réalisé dans le but d'obtenir un certain débit, et il est dimensionné pour ce faire. Son diamètre doit permettre de descendre une pompe adéquate pour satisfaire ces besoins.

2.1. L'AQUIFERE PEUT-IL FOURNIR LE DEBIT SOUHAITE ?

En premier lieu, ce qui limitera le débit d'exploitation c'est la ressource elle-même : le potentiel de l'aquifère à fournir le débit demandé. Cette ressource peut être limitée du fait d'une faible capacité (milieu compartimenté, faible recharge, zone littorale) ou d'une forte sollicitation (surexploitation de l'aquifère, interférence entre puits, impact sur les cours d'eau connectés à l'aquifère), voire de la combinaison fréquente des deux. Cette limitation joue sur le plan quantitatif mais aussi qualitatif. Ainsi, un débit d'exploitation dans un aquifère côtier peut être limité afin de ne pas attirer de l'eau salée. En France, les dossiers administratifs déposés pour une demande d'exploitation d'un forage (dossiers loi sur l'eau ou études d'impact pour les ICPE) contiennent un volet hydrogéologique destiné à évaluer l'impact du captage sur la ressource et proposer des débits d'exploitation compatibles avec le contexte local.

En corrolaire, la capacité de l'aquifère à transmettre le débit demandé dépend de la perméabilité des roches réservoirs et de leur capacité à la stocker. L'épaisseur de l'aquifère est fort justement appelée la puissance de l'aquifère, terme qui suggère que plus l'aquifère est épais, plus il sera productif. Cette idée est transcrite dans la notion de transmissivité, produit de la perméabilité par l'épaisseur de l'aquifère, qui représente la productivité de l'aquifère. De même, la notion de capacité est transcrite par le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère, qui représente la quantité d'eau libérée ou stockée sous l'effet d'une variation de niveau (charge). Les essais de pompage permettent d'estimer la transmissivité, localement, autour du forage. En parallèle, l'interprétation permet parfois d'estimer aussi le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère dans certaines conditions (interprétation au piézomètre).

L'interprétation des essais de pompage pour déterminer la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement du système aquifère autour du forage est un exercice difficile qui demande une bonne connaissance des écoulements souterrains et du milieu géologique dans lequel ils évoluent. Cette interprétation se fait à partir d'un essai dit de longue durée, généralement 24h à 72h mais pouvant s'étendre parfois à plusieurs mois. Elle est le plus souvent réalisée par un hydrogéologue. Cette note ne traite pas des méthodes d'interprétation des essais de longue

durée, en revanche nous parlerons plus loin de quelques effets perturbateurs qui peuvent être mis en évidence par les essais par paliers, et qui doivent être considérés lors de l'interprétation des essais de longue durée.

C'est bien la détermination de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement qui permettront de savoir si l'aquifère pourra fournir le débit d'exploitation demandé, et dans le cas contraire, quel est le débit maximal exploitable. C'est en effet, de ces paramètres hydrodynamiques que dépend le rabattement créé par le pompage au bout d'un temps d'exploitation donné. Ce rabattement est forcément limité en profondeur (notion de rabattement maximal admissible). La question du débit exploitable ne peut donc être résolue qu'une fois que les autres facteurs sont établis.

2.2. QUEL EST LE RABATTEMENT MAXIMAL ADMISSIBLE ?

Le forage d'eau est un ouvrage dont la durée de vie est dépendante du mode d'exploitation. Des exemples dans lesquels le non-respect de quelques règles de base a entraîné le vieillissement prématuré des ouvrages seront prochainement présentés dans le cadre d'une étude du BRGM financée par l'ONEMA. Parmi ces règles, la position de la pompe et des crépines (tubages crépinés) est primordiale. Il faut s'efforcer de :

- ne pas dénoyer les crépines
- ne pas dénoyer les venues d'eau
- conserver une hauteur minimale au dessus de la pompe.

Les raisons qui sous-tendent ces principes sont les suivantes :

L'aération des crépines due au rabattement lors du pompage favorise les phénomènes d'oxydation, de précipitation chimique et de colonisation bactérienne pouvant donner lieu à une dégradation rapide des équipements ou de la qualité de l'eau.

Le dénuyage des venues d'eau fait chuter la productivité de l'ouvrage. Les niveaux producteurs dénuyés ne sont plus sollicités par l'aspiration de la pompe. Même si un écoulement gravitaire peut encore se produire vers le puits (on entend alors l'eau qui chute dans le puits), ce débit est sans commune mesure avec celui obtenu lorsque les niveaux producteurs sont saturés ;

Le rabattement doit impérativement laisser au-dessus de la pompe une charge minimale absolue pour son fonctionnement (le Net Positive Suction Head, N.P.S.H., donné par le constructeur de la pompe). Dans le cas contraire, la pompe peut se mettre à caviter (voir plus loin pour l'explication du phénomène de cavitation). Idéalement, la pompe est située dans une chambre de pompage (section de tubes pleins) située au-dessus des crépines, ce qui permet de garantir le respect de la première condition (non dénuyage des crépines) ;

En milieu poreux intergranulaire, les crépines sont positionnées dans l'aquifère face aux zones les plus perméables. Plusieurs cas de figure peuvent se rencontrer :

- En nappe captive, il est fréquent de distinguer la partie captante où se situe la crépine du forage, de la chambre de pompage, ce qui permet de s'assurer que les venues d'eau et les crépines sont toujours noyées.
- En nappe libre, il est moins aisé de ménager un espace pour la pompe au dessus des crépines, en particulier si l'aquifère est peu épais. En fonction du diamètre une longueur minimale de crépine est nécessaire pour assurer le débit souhaité (voir le chapitre 3.2).
- En milieu fissuré ou karstique, les crépines sont disposées face aux venues d'eau que l'on veut capter. Le sommet de la crépine est au-dessus de la venue d'eau la moins profonde.

2.3. LES ECOULEMENTS SONT-ILS LAMINAIRES ?

Les hydrogéologues ont l'habitude de se référer à la loi de Darcy pour décrire les écoulements souterrains. Or, elle est valable pour des écoulements laminaires assez lents (l'écoulement est laminaire lorsque les lignes de courant restent régulières et pseudo-parallèles entre elles voir §3.1 pour la définition précise des écoulements laminaires et turbulents). Elle exprime la proportionnalité linéaire entre le débit et le gradient hydraulique.

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta H}{L} \text{ que l'on peut aussi écrire } \frac{Q}{\Delta H} = Cste$$

où : Q est le débit d'écoulement souterrain, en m^3/s

K est la conductivité hydraulique (ou perméabilité) du milieu, en m/s

A est la section de passage du flux souterrain en m^2

ΔH est la perte de charge en m

L est la distance correspondant à la perte de charge considérée m .

$\frac{\Delta H}{L}$ est donc le gradient hydraulique de la nappe et $\frac{Q}{\Delta H}$ est le débit spécifique.

Quand un écoulement se rapproche d'un puits de pompage prélevant un débit Q , la section A à travers laquelle passe le flux constant (cylindrique dans une nappe horizontale) se réduit. Le principe de continuité (Q constant) implique que c'est l'augmentation de la vitesse qui compense la réduction de la section. Cette augmentation de la vitesse (ou du gradient hydraulique qui lui est liée) entraîne un changement de régime dans les écoulements qui parviennent au puits.

Dans les secteurs éloignés du cône de rabattement induit par un puits de pompage, le gradient est faible, le débit spécifique est constant, les écoulements sont laminaires. A partir d'une certaine vitesse, le débit spécifique est plus faible que celui dicté par la loi de Darcy mais les écoulements demeurent laminaires (conditions de Forchheimer). Puis, plus proche du puits, apparaît (progressivement) la zone où les écoulements deviennent turbulents.

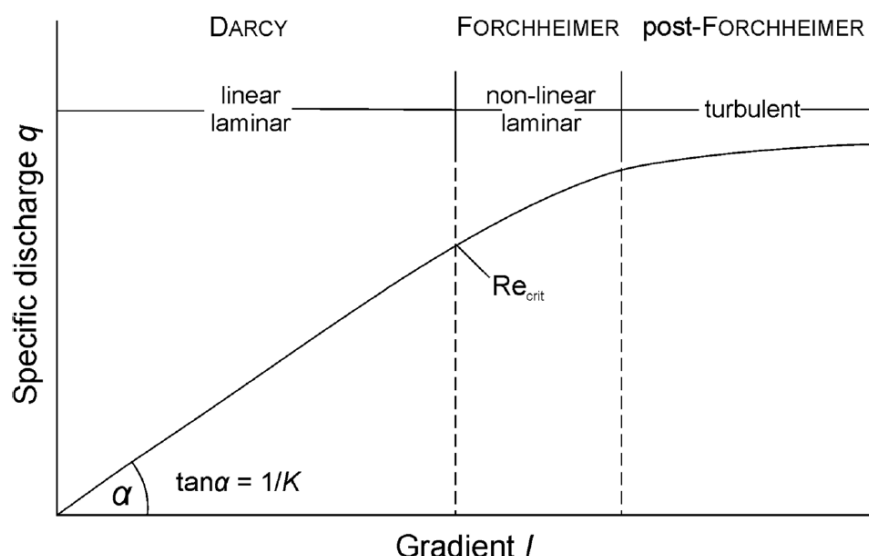


Figure 1 : Régimes d'écoulement proche puits en fonction du gradient hydraulique (d'après Houben 2015a°)

Il existe donc un débit, dit *débit critique*, qui permet de conserver en tout point du système aquifère un écoulement majoritairement laminaire.

Il est coutume de considérer que le passage au régime turbulent, lié à un gradient élevé (donc à une vitesse élevée) est le résultat de pertes de charges excessives. Les pertes de charges sont le résultat du frottement de l'eau sur les parois des pores de la formation et des équipements du forage ainsi que les chocs des molécules entre elles. Des pertes de charge excessives se manifestent par une augmentation du rabattement éventuellement accompagnée de turbidité ou de particules en suspension. L'exploitation du forage avec des pertes de charges excessives est générateur de coûts de fonctionnement supplémentaires (l'énergie dépensée est supérieure à celle nécessaire pour pomper le même débit dans un ouvrage à faible perte de charge) et une dégradation plus rapide de l'ouvrage. L'exploitant a tout intérêt à minimiser ces pertes de charge lors de la conception de l'ouvrage et à respecter les débits de pompage préconisés, débit critique et débit d'exploitation, qu'il est primordial de distinguer.

Le chapitre 3 explicite largement la notion de débit critique, qui doit être entendue comme le débit critique au sens des pertes de charge et correspond au débit maximal permettant de conserver un écoulement majoritairement laminaire dans l'ouvrage.

2.4. ESTIMATION DU DEBIT D'EXPLOITATION

Lorsque les facteurs précédents (paramètres hydrodynamiques, rabattement maximal admissible et débit critique) ont été identifiés, il devient possible d'estimer le débit d'exploitation optimal pour l'ouvrage. Ce débit doit être établi sur la base d'une simulation correspondant à la durée d'exploitation prévue en tenant compte du cycle hydrologique de la nappe.

Certains auteurs préconisent comme débit maximal d'exploitation une valeur réduite de 5 à 10% du débit critique (Detay, 1993). Ainsi, si $Q_c=150 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{\max}=135 \text{ m}^3/\text{h}$. Cette méthode est empirique et ne présente pas la rigueur qu'apporte la simulation d'exploitation.

L'exemple de la Figure 2 illustre bien la nécessité de réaliser des simulations. Dans ce forage (Forage de Ouroveni à Mayotte), les rabattements des premiers paliers sont sans commune mesure avec ceux qui seront obtenus sur le long terme.

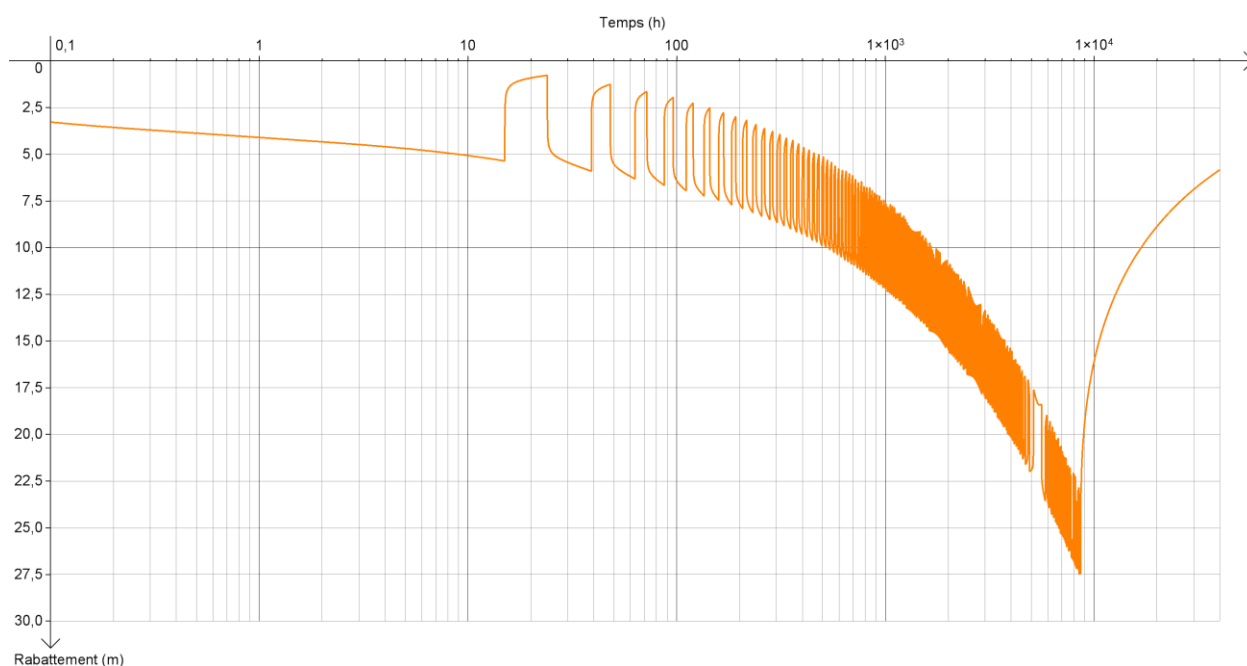


Figure 2 : Simulation d'exploitation à un débit de $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 15h/24 pendant 1 an (Logiciel OUAIP)

3. La notion de débit critique

La définition du débit critique est établie par Castany et Margat (1977) comme étant le « débit maximal pouvant affluer d'un aquifère à un puits de pompage en écoulement laminaire ». Cette définition a souvent conduit à l'assimilation entre le débit critique et le débit maximal d'exploitation. Or, cet amalgame est abusif et dangereux.

En effet, il existe une différence significative entre le débit critique, que l'on détermine par l'une des méthodes exposées plus loin à partir d'essais de courte durée, et le débit maximal d'exploitation, qui dépend bien sûr du débit critique mais aussi de la configuration de l'ouvrage et de l'aquifère capté.

3.1. ECOULEMENTS LAMINAIRES ET ECOULEMENTS TURBULENTS

En mécanique des fluides, un écoulement est dit laminaire si deux particules fluides voisines à un instant donné restent voisines aux instants suivants. Les trajectoires des deux particules constituent des lignes de courant qui restent parallèles entre elles si aucun obstacle ne perturbe l'écoulement. Dans le milieu souterrain, toutefois les obstacles sont nombreux puisque, dans un milieu poreux constitué de grains et de vides les écoulements sont déviés par les grains. De même dans un milieu fissuré, les écoulements seront déviés par les changements de direction et intersections des différentes fissures. Dans les deux cas, les écoulements peuvent demeurer laminaires si après le passage de l'obstacle les deux particules considérées redeviennent voisines.

La mécanique des fluides utilise le nombre de Reynolds qui exprime le rapport entre deux forces, l'inertie et la viscosité. Le nombre de Reynolds dépend ainsi de la masse volumique et de la viscosité du fluide, de la vitesse de ce dernier et de la géométrie de l'endroit où le fluide se déplace (rayon des pores par exemple).

$$Re = \frac{\rho LV}{\mu}$$

Avec Re : Nombre de Reynolds

ρ : masse volumique du fluide [kg/m³]

μ : viscosité dynamique [Pa.s]

L : dimension caractéristique [m]

V, vitesse caractéristique du fluide [m/s]

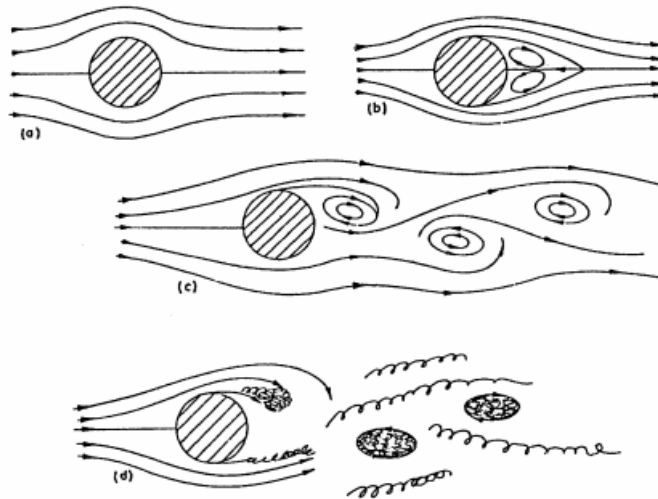


Figure 3 : Écoulement laminaire (a) et écoulements turbulents (b, c, d) pour des nombres de Reynolds croissants (source : Cours A.Robichon/Annecy)

Le nombre de Reynolds est un ordre de grandeur, variable dans l'espace et le temps. Lorsque sa valeur est <1 , les écoulements sont considérés comme laminaires (Figure 3, a). Dans les eaux souterraines, les écoulements sont généralement très lents (quelques mètres par jour) ce qui confère une valeur faible au nombre de Reynolds. Il existe toutefois des cas spécifiques où la vitesse est importante lors d'un pompage :

- Dans les milieux très transmissifs à faible section d'écoulement : fissures ouvertes, chenaux karstiques...
- A proximité immédiate du forage : l'endroit où les écoulements atteignent leur vitesse maximale est, du fait de la réduction de la section d'écoulement, la zone « proche puits », et en particulier, la paroi du forage, le massif de gravier et la crépine, où les vitesses augmentent de plusieurs ordres de grandeur. La Figure 4 donne un exemple pour un aquifère de 30 m d'épaisseur et un pompage de 50 m³/h.

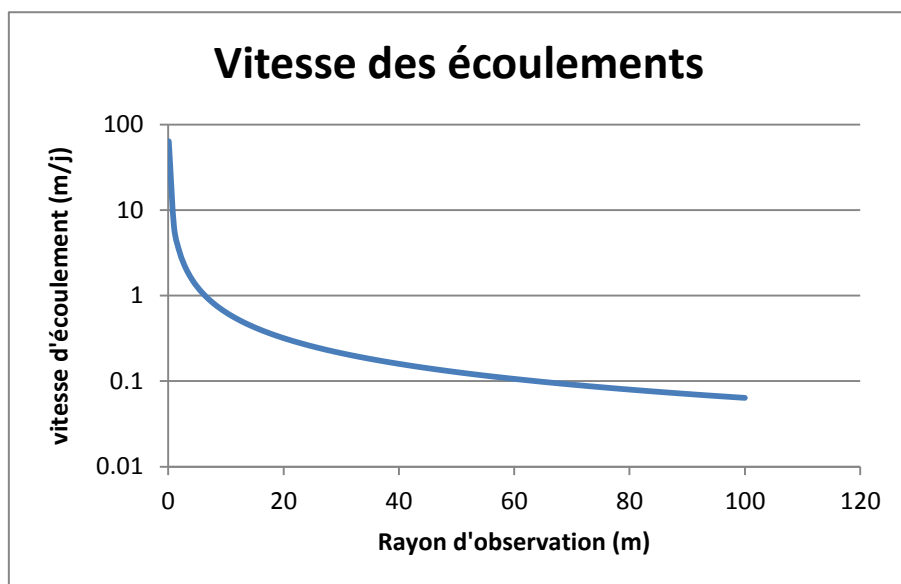


Figure 4 : Relation entre la vitesse de l'eau et la distance au forage : plus on se rapproche du forage, plus la vitesse de l'écoulement souterrain est grande.

Dans ces domaines, l'augmentation de la vitesse conduit à une déstabilisation des écoulements. Dans les zones turbulentes, le champ de vitesses devient chaotique. Les équations de la mécanique des fluides ne s'appliquent plus.

Outre le fait que les calculs déterministes ne s'appliquent plus, le pompage de l'eau dans des conditions d'écoulement turbulent est susceptible de provoquer des désordres plus ou moins prononcés :

- L'énergie nécessaire pour extraire un même débit est plus élevée en écoulement turbulent qu'en écoulement laminaire. Cela pose un problème non seulement économique (consommation d'énergie) mais également d'usure des équipements de pompage (diminution du rendement de la pompe, fonctionnement en dehors de sa plage normale d'utilisation).
- Dans le massif de gravier, les grains peuvent être réagencés par les turbulences (en particulier si le gravier est mal tassé), laissant se créer des couloirs de passage de particules fines. Ces particules sont susceptibles de provoquer une détérioration de la qualité de l'eau, une usure accélérée de la pompe, une sédimentation dans l'ouvrage et un colmatage mécanique au niveau des crépines.
- Dans le milieu où se produisent les turbulences, l'accélération de l'eau s'accompagne d'une dépression du liquide. Ce dernier peut alors atteindre son point de pression de vapeur saturante et entraîner des bulles de vapeur d'eau, c'est la cavitation (Figure 5). La création puis l'implosion de ces bulles entraînent des désordres mécaniques et chimiques (précipitation de composés chimiques présents dans l'eau tels des hydroxydes de fer ou de manganèse).

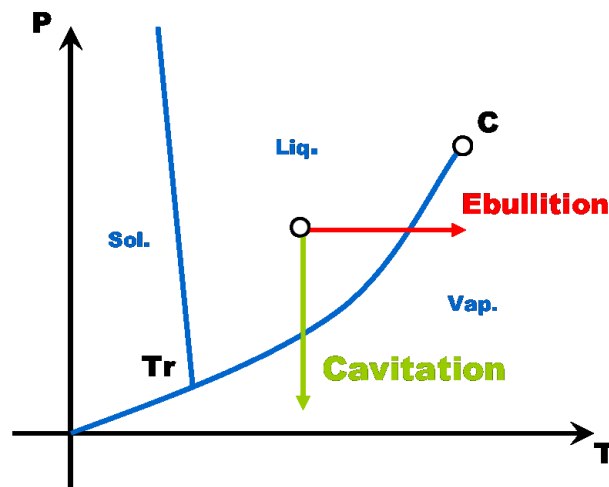


Figure 5 : La cavitation : lorsqu'un liquide soumis à une dépression passe en dessous de la pression de vapeur saturante, des bulles de vapeur se forment (source : Wikipedia).

3.2. VITESSE CRITIQUE

De manière empirique, la vitesse d'entrée de l'eau dans les crépines doit rester inférieure à 3 cm/s. Cette vitesse est appelée la vitesse critique. La valeur de cette limite a fait l'objet de nombreuses discussions (Roscoe Moss, 1975 ; Driscoll, 1986 ; Lauga, 1990), mais une valeur entre 1 et 3 cm/s est communément admise aujourd'hui. On voit qu'elle permet de donner une autre définition du débit critique. Le débit critique est alors donné par mètre de crépine en fonction du diamètre, du « slot » (largeur des fentes) et du pourcentage d'ouverture de la crépine.

Ainsi on peut calculer, par exemple, le débit critique d'un ouvrage captant la totalité de l'épaisseur d'un aquifère de 10 m d'épaisseur, par une crépine à fil enroulé 8''5/8 (219 mm), de largeur de fil 3,5 mm et de fente 0,6 mm. Le coefficient d'ouverture de la crépine est alors de 14,6 %, la section d'entrée (la surface du cylindre multipliée par le coefficient d'ouverture) est de 0,1 m². Dans ces conditions, le débit maximal par mètre de crépine correspondant à une vitesse de 3 cm/s est de 10,9 m³/h. Pour 10 m de crépine, le débit critique est alors de 109 m³/h.

Ce débit critique est toutefois une valeur théorique qui ne préjuge pas :

- Des variations de perméabilité de l'aquifère sur la hauteur captée (la hauteur crépinée n'est pas toujours l'épaisseur perméable de l'aquifère, en particulier dans le milieu fissuré). Les vitesses d'entrées peuvent donc varier sur la hauteur crépinée.
- De la qualité et de la bonne mise en place du massif filtrant (les vitesses critiques peuvent également s'y produire)
- De l'état des crépines (la corrosion ou le coincement de grains de sables peuvent diminuer le slot)

Il est donc préférable de calculer un débit critique à partir d'observations plutôt qu'à partir de données théoriques. Toutefois, ces caractéristiques tubulaires donnent une limite maximale au débit exploitable.

Citons également une autre vitesse maximale à respecter : la vitesse de l'écoulement dans une conduite. On recommande généralement de ne pas dépasser une vitesse de circulation de l'eau dans les tuyauteries de 0,5 m/s (Lauga, 1990) à 1,5 m/s pour conserver un écoulement laminaire dans les tubages. Cette contrainte s'applique plus souvent sur les colonnes d'exhaure des pompes que sur l'équipement du forage (tubages).

3.3. DEFINITION DES PERTES DE CHARGES DANS L'OUVRAGE ET AUTOUR DE CELUI-CI (PROCHE PUITS)

L'objectif premier de la détermination des pertes de charges dans un forage est d'être capable de prédire quel sera le rabattement dans l'ouvrage si celui-ci est pompé avec un autre débit que celui du test. Cette information est donc primordiale pour l'estimation du débit d'exploitation, ainsi que, comme nous le verrons, du débit critique.

Le rabattement total (s_{tot}) mesuré dans un forage en pompage peut être décomposé en rabattements individuels (Figure 6) correspondant aux pertes de charge dans l'aquifère (s_{aq}), la paroi du trou (s_{sk}), le massif de gravier (s_{gp}), les crépines (s_{sc}) et l'intérieur du forage (s_{up}). Dans cet exemple l'auteur (Houbein, 2015b) envisage le cas où deux massifs de graviers sont présents dans le puits, l'un collé à la crépine par exemple et l'autre dans l'espace annulaire. En dehors des pertes de charges dues à l'aquifère, les autres termes, appelés pertes de charge singulières, sont dépendants de la réalisation technique du puits et du dispositif de captage. En théorie, la réalisation de l'ouvrage, son développement et sa coupe technique doivent être optimisés de manière à minimiser les pertes de charge singulières.

Plusieurs auteurs proposent des solutions pour prendre en compte chacun de ces termes (Barker and Herbert, 1992 ; Parsons, 1994 ; Houbein, 2015b) mais la mise en œuvre de ces méthodes manque de pragmatisme car les éléments de calculs (par exemple des coefficients de vitesse ou de contraction des pores) sont rarement connus.

La plupart des méthodes de définition des pertes de charges s'attachent à les estimer globalement, distinguant seulement les pertes de charges liées à l'aquifère (supposées linéaires car directement proportionnelles au débit en nappe captive) et les pertes de charges singulières (dites non linéaires).

Les diverses perturbations de l'écoulement dans le proche puits sont responsables d'un rabattement supplémentaire qui s'ajoute au rabattement théorique qui serait imposé par le milieu poreux si celui-ci était capté dans des conditions idéales. Le fait de ne capter que partiellement l'aquifère ajoute également un rabattement additionnel qui doit toutefois être considéré à part (Figure 7) et que nous ne traiterons pas ici.

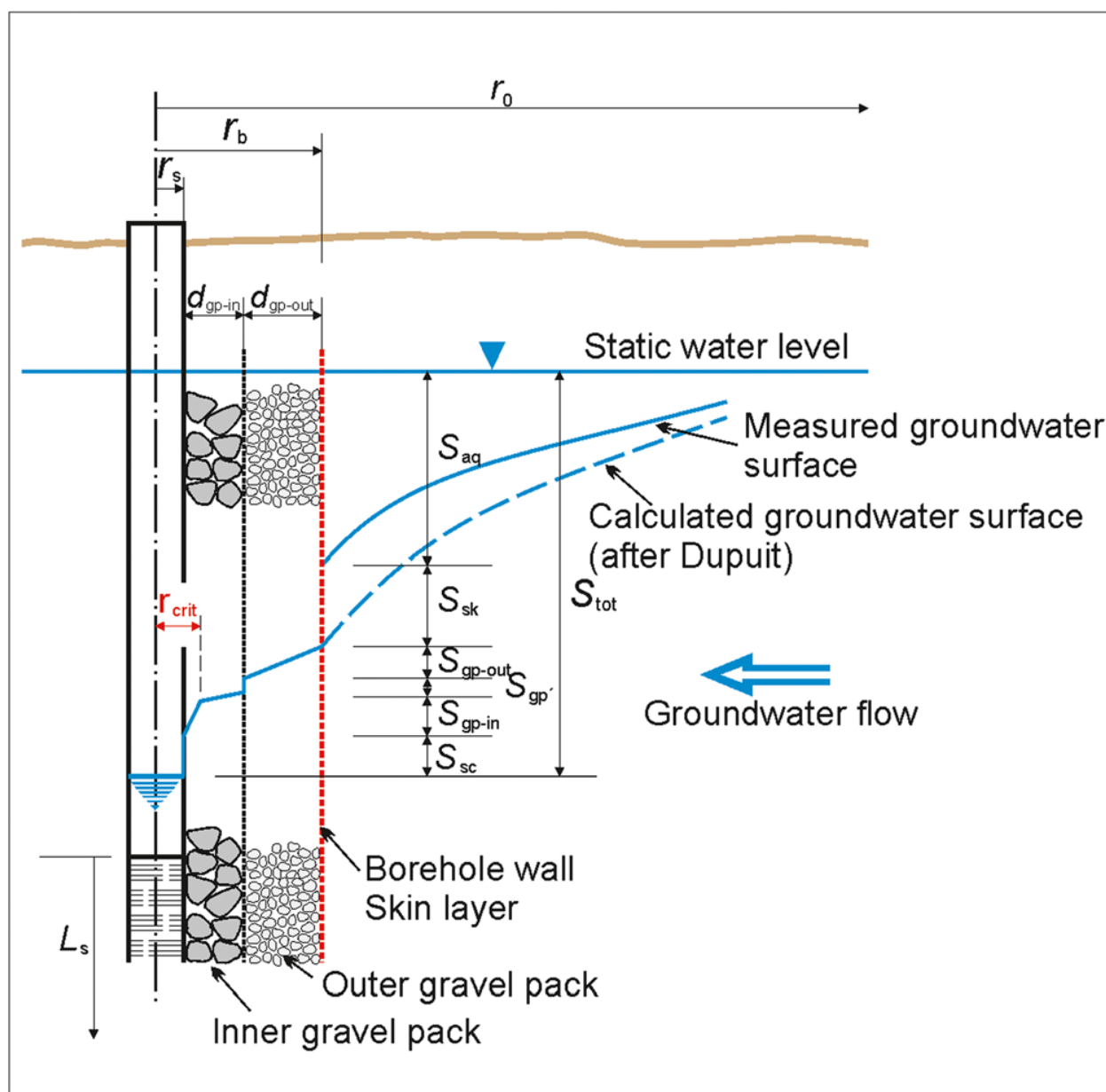


Figure 6 : Décomposition des rabattements dans le proche puits (d'après Houbein, 2015b) : rabattement lié à l'aquifère S_{aq} , à la paroi du forage S_{sk} , au massif filtrant S_{gp} et à la crépine S_{sc} .

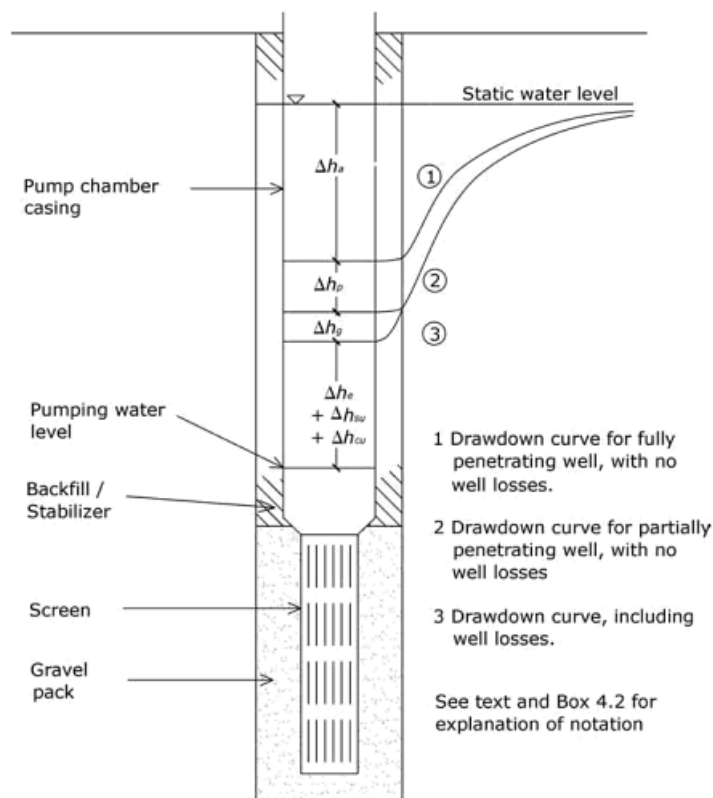


Figure 4.6 Components of head loss at a well

Figure 7 : Effet des pertes de charges et de la pénétration partielle sur le rabattement (Missteart et al., 2006)

3.4. DETERMINATION DU DEBIT CRITIQUE

Nous allons examiner les méthodes les plus courantes avant de les critiquer, puis de proposer une autre méthode.

Pour déterminer un débit critique, un minimum de 3 paliers de débits, de même durée est nécessaire. Les paliers sont de préférence non enchaînés (donc, interrompus par un arrêt suffisant pour réinitialiser le système) comme cela est discuté plus loin. Bien évidemment, plus il y a de paliers, plus fine sera l'analyse du débit critique.

3.4.1. Méthodes classiques

La méthode la plus répandue pour déterminer le débit critique consiste à construire la courbe caractéristique de l'ouvrage, $s=f(Q)$ en coordonnées cartésiennes.

La valeur du débit critique est donnée par l'abscisse du point où la courbe mesurée s'écarte d'une éventuelle première partie rectiligne (Figure 8).

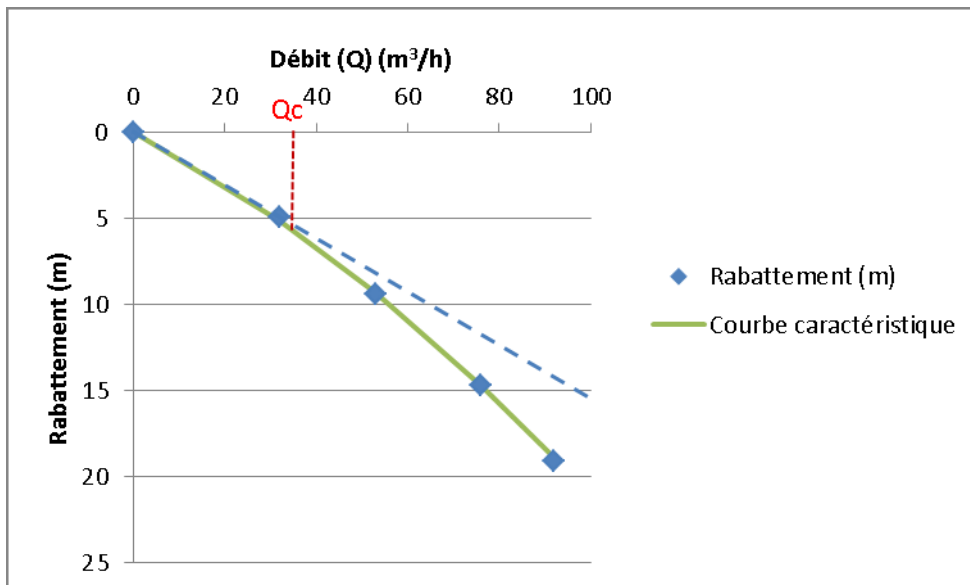


Figure 8 : Détermination du débit critique par identification d'une partie linéaire

Cette méthode étant souvent considérée comme pénalisante, il est coutume de rechercher le point d'inflexion de la courbe caractéristique en identifiant non pas une mais deux portions rectilignes en début et en fin d'essai. L'intersection de ces deux droites donne le débit critique (Figure 9).

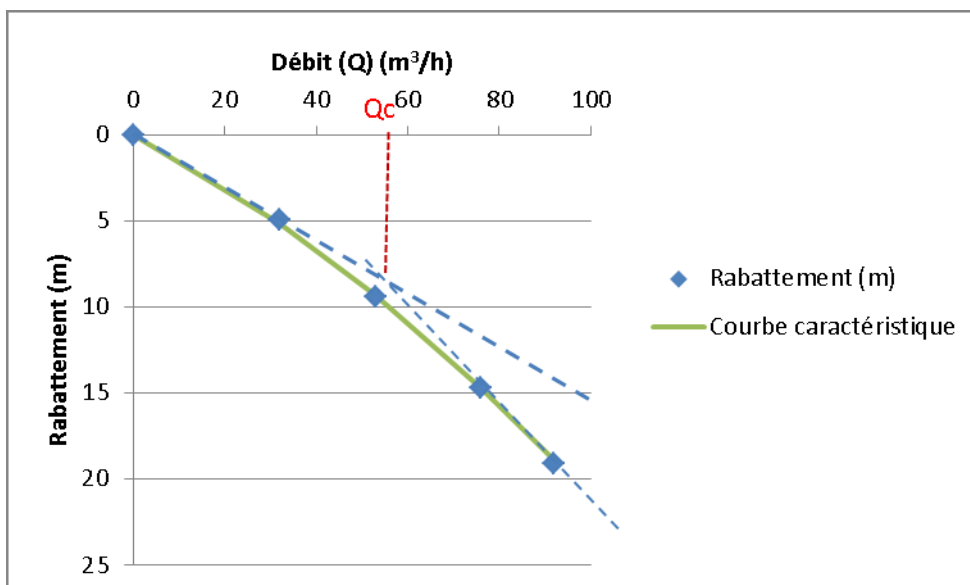


Figure 9 : Détermination du débit critique par l'intersection de deux droites

Citons enfin la méthode du C.I.E.H. (Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques) encore répandue en Afrique de l'Ouest. Basée sur une construction graphique particulière (Figure 10) non détaillée ici et plusieurs coefficients empiriques, la méthode détermine des coefficients de pertes de charge à partir d'un test de 4 heures seulement, comprenant 3 paliers, permettant d'estimer un débit maximal tenant compte d'un rabattement maximal et d'une saison sèche de 8

mois. La méthode a été élaborée pour les besoins de programmes d'hydrauliques villageoise, en domaine de socle (BURGEAP, 1988). Elle n'est pas extrapolable à d'autres contextes.

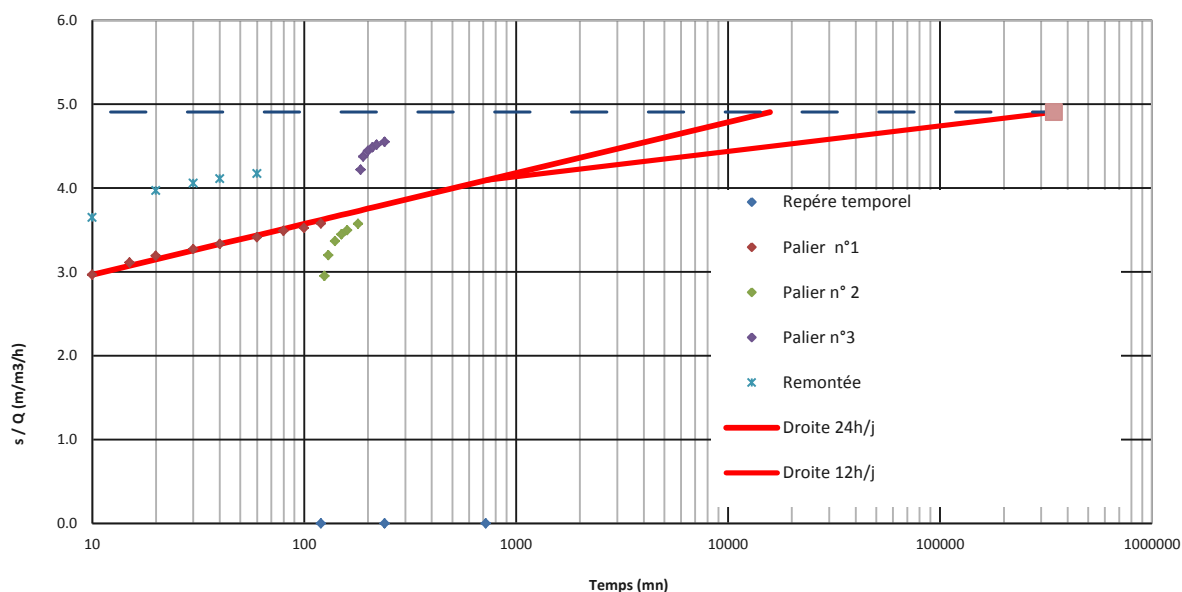


Figure 10 : Graphique de base de la méthode C.I.E.H.

3.4.2. Critique des méthodes classiques

La plupart de ces méthodes sont sujettes à une grande subjectivité qui dépend du choix des débits des paliers. Ainsi la portion de courbe avant le premier point sera toujours linéaire pour la première et la troisième méthode. De même, le débit critique sera toujours situé avant le dernier palier, et le plus souvent entre les paliers 2 et 3, lorsque 4 paliers sont mis en œuvre. Il est ainsi aisé pour l'hydrogéologue souhaitant satisfaire son client, de trouver un débit critique proche des besoins de ce dernier en encadrant le débit souhaité par des paliers judicieusement choisis.

Nous recommandons d'utiliser une méthode de construction plus rigoureuse, basée sur la détermination des pertes de charge dans l'ouvrage selon la méthode de Jacob décrite ci-après. Cette méthode est appelée méthode du point d'égalité des pertes de charges linéaires et quadratiques. Bien qu'elle repose sur du bon sens, elle n'est décrite dans aucun ouvrage d'hydrogéologie. Elle commence toutefois à être popularisée grâce à son implémentation dans le logiciel Ouaip.

3.4.3. La méthode du point d'égalité des pertes de charges linéaires et quadratiques

La réalisation technique du forage et du dispositif de captage perturbe l'écoulement au voisinage de l'ouvrage. Cette perturbation se traduit par l'apparition de pertes de charges supplémentaires qui s'ajoutent à la perte de charge théorique résultant de l'écoulement dans un milieu poreux supposé capté dans les conditions idéales. Ainsi, le rabattement réel s_r observé lors d'un pompage dans un puits s'écrit :

$$s_r = s_{th} + \Delta H_p$$

Où s_{th} est le rabattement théorique pour le puits parfait et ΔH_p correspond aux pertes de charges dues au captage. L'effet de ces dernières se traduit donc par une translation de la quantité ΔH_p de la courbe théorique, sans modification de pente.

Le rabattement théorique évolue selon des lois de la forme :

$s_{th} = \frac{Q}{T} f(T, S, r, t)$ avec éventuellement des paramètres supplémentaires selon la complexité du système.

Les pertes de charges dues au captage se décomposent comme suit (Forkasiewicz, 1972) :

$$\Delta H_p = AQ + CQ^2$$

avec AQ : pertes de charges linéaires et CQ^2 pertes de charges quadratiques, ces dernières étant dues à l'apparition de vitesses d'écoulement excessives.

$$s_r = s_{th} + AQ + CQ^2$$

Observant que s_{th} est également une fonction du débit Q , Jacob (1947) écrit que :

$$s_r = (B_1 + B_2)Q + CQ^2$$

où B_1 = pertes de charges linéaires liées au milieu poreux (et au temps de pompage)

B_2 = pertes de charges linéaires liées au puits (=A dans la formulation précédente)

En posant $B=B_1+B_2$, l'équation de Jacob devient :

$$s_r = BQ + CQ^2,$$

avec B = coefficient de pertes de charges linéaires

C = coefficient de pertes de charges quadratiques.

En écrivant $\frac{s_r}{Q} = B + CQ$ Jacob se ramène à l'équation d'une droite dont C est la pente et B l'ordonnée à l'origine. Le logiciel Ouaip, en représentant les données de pompage par paliers sur un graphique $s/Q=f(Q)$ permettra l'interprétation des paramètres B et C (cf. §3.4.4)

Rorabaugh (1953) suggère une formulation plus large, $s_r = BQ + CQ^n$, où n est un exposant variant entre 1.5 et 3.5, mais la valeur $n=2$ est la plus couramment acceptée (Kruseman, de Ridder, 1994).

Certains auteurs (tel Walton, 1970) ont proposé des plages de valeurs pour le coefficient C , distinguant des pertes de charges quadratiques acceptables de pertes de charges excessives. A l'usage, ces valeurs de référence se révèlent peu adaptées et il nous semble préférable de considérer les proportions entre les différents termes (linéaires et non linéaires).

Puisque l'on considère qu'il est possible dans le forage d'accepter qu'une partie des écoulements ne soit pas linéairement dépendante du débit, il est raisonnable de considérer que les conditions d'exploitation du forage doivent se trouver dans la plage où les écoulements non-linéaires restent minoritaires (Figure 11). La condition limite sera donc lorsque $BQ=CQ^2$.

Nous appelons cette condition, le point d'égalité des pertes de charges linéaires et quadratiques. De notre point de vue, c'est elle qui définit le mieux le débit critique (Q_c) d'un ouvrage. A partir de l'équation de Rorabaugh (1953), cette condition s'écrit $BQ_c = CQ_c^n$

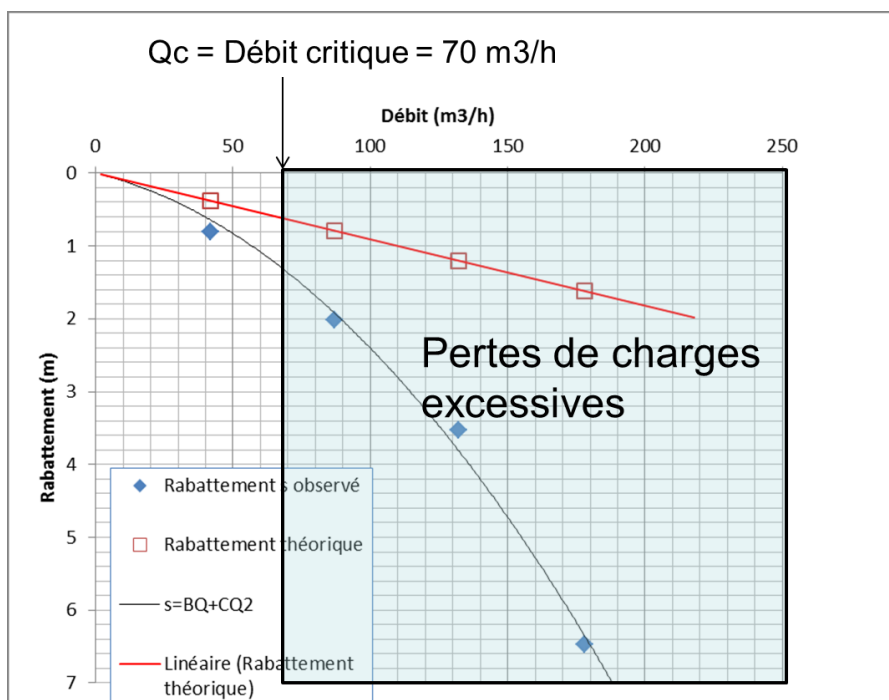


Figure 11 : Détermination du débit critique : le débit critique corespond au point où le rabattement observé correspond au double du rabattement théorique.

Une façon de représenter ce point qui détermine le débit critique est de tracer les différentes fonctions correspondant aux termes linéaires et non linéaires sur un même graphique (Figure 12). Le point où les deux courbes se coupent correspond au débit critique.

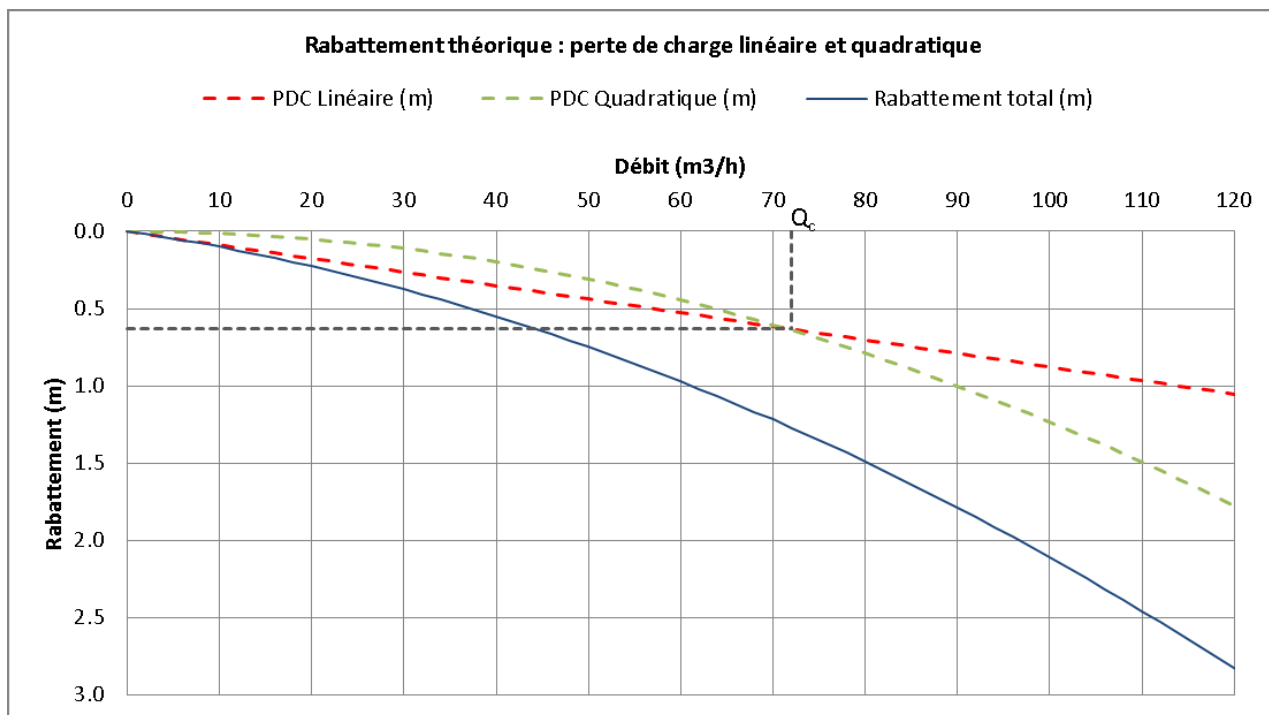


Figure 12 : Tracé des pertes de charges linéaires et non linéaires

3.4.4. Mise en œuvre avec le logiciel Ouaip

Le logiciel Ouaip donne la possibilité de calculer de manière partiellement ou totalement automatique le débit critique Q_c au sens des pertes de charge.

La méthode semi-automatique est préférable car elle permet de maîtriser les paramètres.

L'accès à l'outil permettant la détermination du débit critique se fait en choisissant dans le panneau principal le module « interpréter un pompage par paliers » (Figure 13).

Une fenêtre constituée d'un panneau (à gauche) avec 3 onglets et de deux graphiques apparaît. La première étape consiste à entrer ou importer les données. Généralement, le nombre de paliers est assez faible et peut être directement saisi via le bouton Saisir/Editer de l'onglet Données. Celui-ci donne accès à un tableur dans lequel les deux colonnes indispensables à renseigner sont le débit et le rabattement, les durées étant saisies à titre informatif (Figure 14 et Figure 15).



Figure 13 : panneau principal à l'invite du logiciel Ouaip

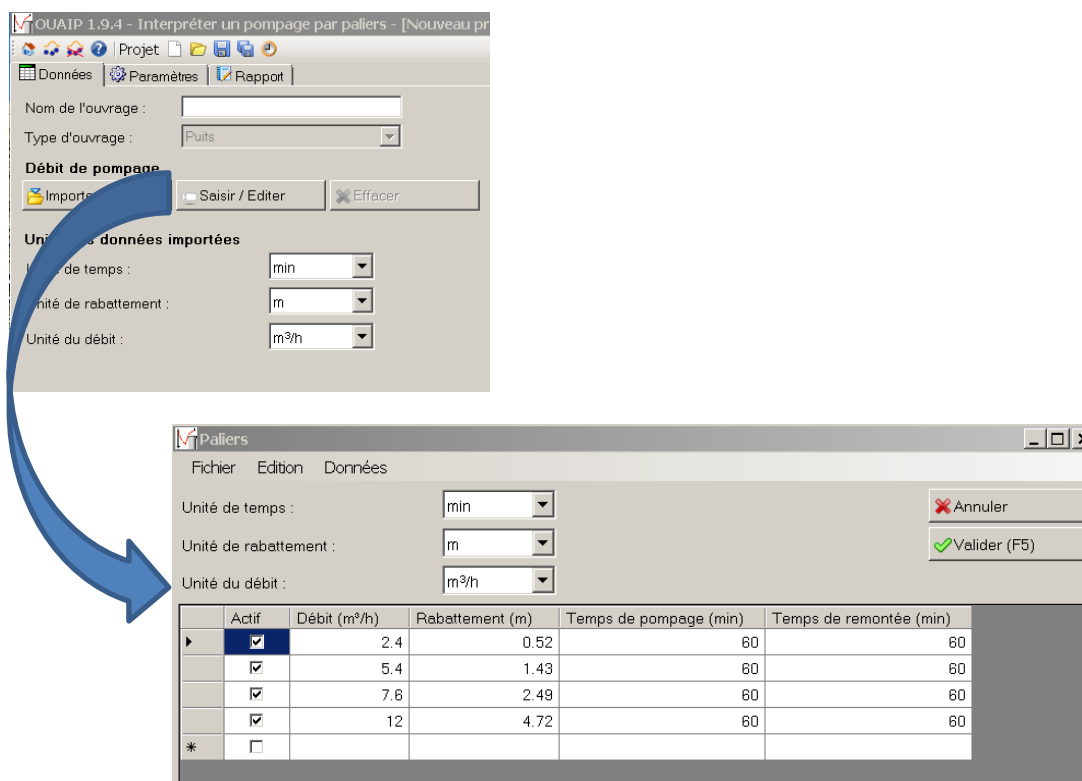


Figure 14 : module de saisie des données dans Ouaip

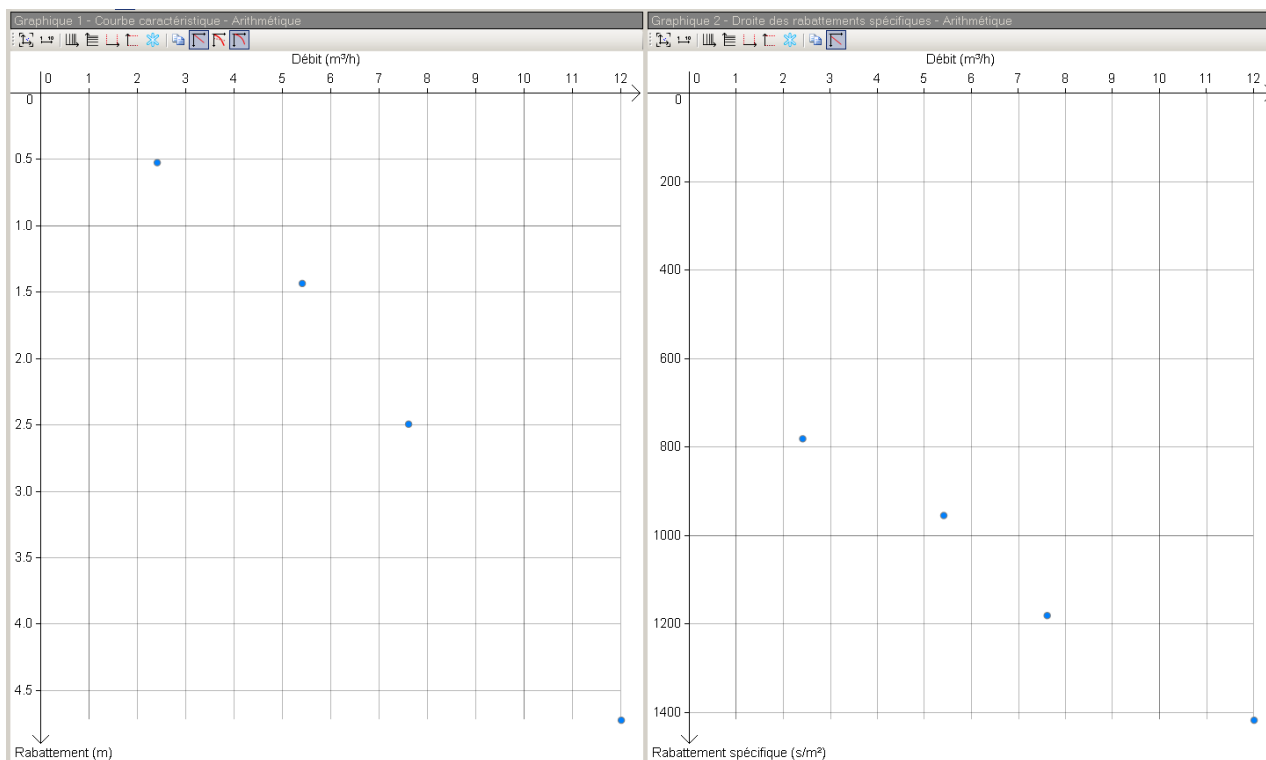


Figure 15 : Les deux graphes $s=f(Q)$ et $s=f(s/Q)$ après saisie des données

Après validation de la saisie des paliers, l'utilisateur passe dans l'onglet paramètres pour renseigner les coefficients B et C (et éventuellement n). Plusieurs possibilités sont offertes. L'une d'entre elles, très simple, consiste à tracer manuellement la droite des rabattements spécifiques à l'aide de l'outil « Tracer la droite des rabattements spécifiques » (Figure 16) sur le deuxième graphique (celui qui exprime le débit Q en fonction du rabattement spécifique s/Q), en cliquant une fois pour définir le premier point de la droite et une deuxième fois pour le deuxième point.

En faisant passer la droite par les points (ou à proximité des points) jugés les plus représentatifs l'utilisateur va déterminer automatiquement les coefficients des pertes de charges linéaires et quadratiques. Il y a également une manière entièrement automatique d'ajuster la droite, mais les méthodes semi-automatiques sont toujours préférables, car en impliquant l'utilisateur dans le tracé, elles le forcent à réfléchir sur la validité de ses données ou de son modèle conceptuel.



Figure 16 : Barre d'outils de Ouaip : parmi les outils du bandeau, l'outil « Tracer la droite des rabattements spécifiques » permet d'ajuster manuellement sa propre interprétation.

Les unités utilisées pour ces coefficients sont celles du système international (s/m^2 pour le coefficient des pertes de charge linéaire, et s^2/m^5 pour celui des pertes de charge quadratiques). Ce choix est dicté par l'ordre de grandeur des coefficients, afin d'éviter de manipuler des chiffres très faibles où les arrondis feraient perdre en précision. Par contre, le débit peut être saisi et affiché dans une unité choisie par l'utilisateur.

3.4.5. Limites de la méthode du point d'égalité des pertes de charges linéaires et quadratiques

Il existe des cas où la méthode de l'égalité des pertes de charge n'est pas applicable, car le modèle conceptuel de Jacob ne correspond pas à la réalité ou sa mise en œuvre n'est pas faite selon ses critères d'application :

- Régime pseudo-permanent non atteint

La méthode de la courbe caractéristique (Jacob, 1947) suppose que chaque palier atteint un régime d'équilibre. Ce n'est pas le cas lorsque la durée de pompage est trop courte. Ce point est traité au chapitre 4.2.3 et n'est pas spécifique à la méthode du point d'égalité des pertes de charge. Toutefois, comme cette méthode est de construction plus rigoureuse que les méthodes précédentes, il faut garder à l'esprit que les débits critiques obtenus seront sous-estimés si les niveaux dynamiques en fin de paliers paraissent loin d'un état stabilisé.

- Cas de milieux de très forte perméabilité

Dans les milieux karstiques en particulier, certains milieux fracturés ou certains milieux poreux tels les éboulis, les vitesses d'écoulement souterrain induites par un pompage peuvent être très élevées. Les conduits, non rectilignes et semés d'obstacles sont le siège d'écoulements à dominance turbulente qui n'appartiennent plus au domaine de validité de la loi de Darcy. Ces écoulements non-darcéens sont caractérisés par des pertes de charges linéaires très faibles (traduisant la forte perméabilité du milieu) et des pertes de charge non linéaires élevées (traduisant la turbulence des écoulements dans les conduits).

Dans ces milieux, le rabattement observé est souvent très faible et le débit spécifique très élevé. Pourtant, la méthode du point d'égalité donnera un débit critique bien inférieur à celui que le bon sens voudrait suggérer. La méthode n'est pas applicable pour les raisons mentionnées ci-dessus. Le critère pour définir le débit critique au sens des pertes de charge devra tenir compte des contraintes techniques du forage, en particulier de la vitesse d'entrée dans les crépines¹ et le massif filtrant éventuel (<3 cm/s) ou de la vitesse de circulation ascensionnelle dans les tubages pleins (<1,50 m/s).

Le critère majeur qui concernera la définition du débit d'exploitation consistera à ne pas dénoyer les arrivées d'eau, et portera donc sur un rabattement maximal à ne pas dépasser.

3.4.6. - Cas de pertes de charges non-linéaires non-quadratiques

Lorsque le rabattement s'écrit, $s_r = BQ + CQ^n$, avec n différent de 2, ce qui peut arriver dans le cas où les débits sont élevés, les coefficients B et C ne peuvent pas être déterminés par la pente et l'intersection de la « droite » des rabattements spécifiques, car l'équation $s/Q=f(Q)$ n'est plus celle d'une droite.

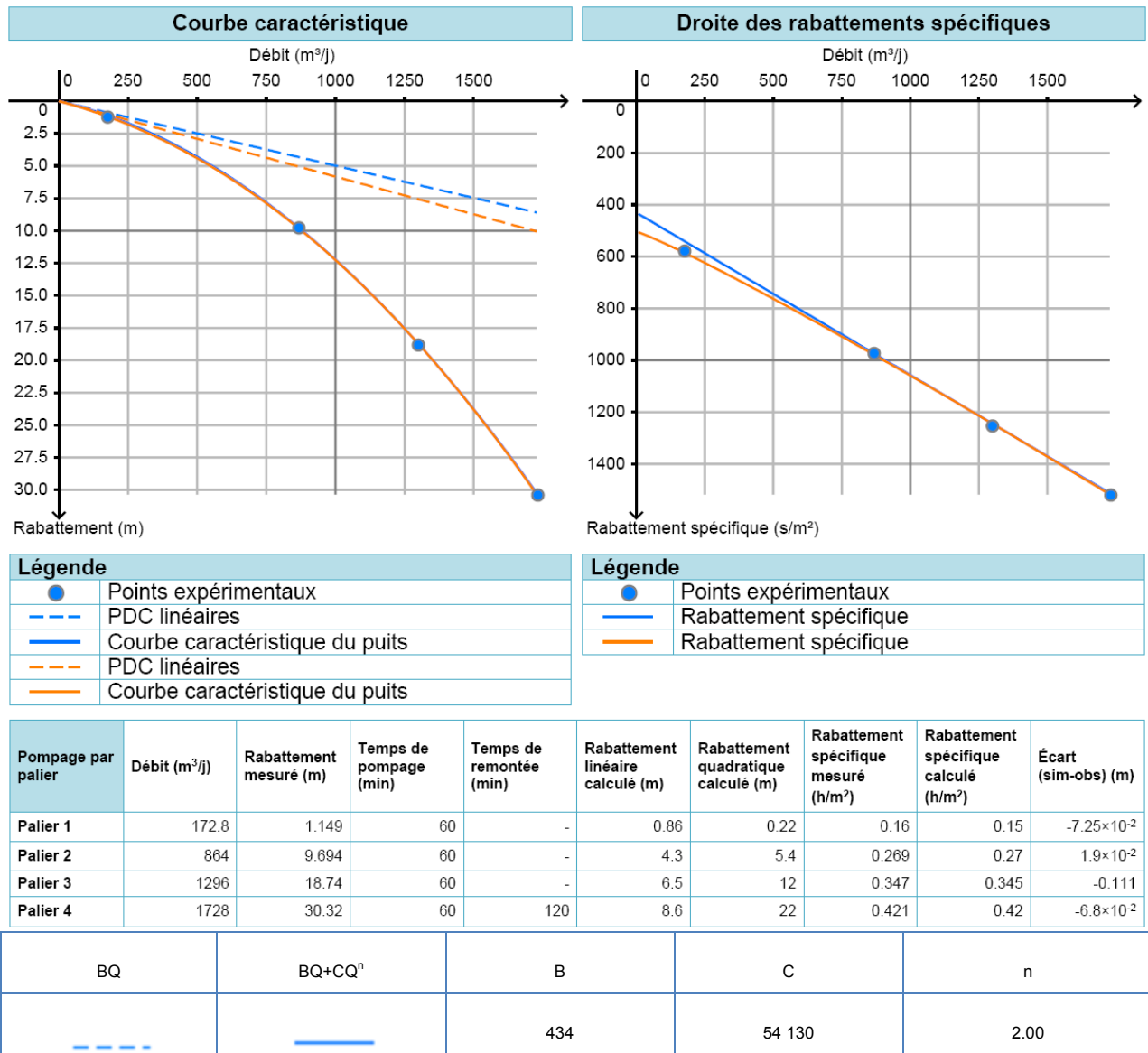
$$\frac{s_r}{Q} = B + CQ^{n-1}$$

¹ La vitesse d'entrée dans les crépines est obtenue en divisant le débit pompé par la section d'entrée de l'eau dans le forage, c'est-à-dire, la surface du cylindre crépiné.

Dans ce cas, il existe d'autres méthodes (Raurabaugh, 1953 ; Sheahan, 1971) pour déterminer les coefficients B et C graphiquement. Ces méthodes ne sont pas décrites ici, car ces constructions graphiques sont devenues obsolètes avec l'avènement des ordinateurs.

Le logiciel Ouaip permet d'ajuster les coefficients B et C même lorsque l'exposant n est différent de 2. Toutefois, il faut bien voir que ce coefficient C est associé à l'exposant n. Il ne peut être utilisé ensuite dans l'interprétation des pompages d'essais ou dans une simulation (2eme et 3eme modules du logiciel Ouaip) dans les versions de Ouaip antérieures à la version 2.0 car l'exposant n=2 y est fixé.

L'exemple ci-dessous (Figure 18), tiré de la publication de Birsoy et Summers, 1980, montre une interprétation des pertes de charges avec le coefficient n=2 et n=2,1. L'ajustement est meilleur pour n=2,1. L'impact sur les coefficients B et C est important et par voie de conséquence, le débit critique (non représenté sur la figure) est affecté : $Q_c=693 \text{ m}^3/\text{j}$ ($29 \text{ m}^3/\text{h}$) si on prend n=2, et $Q_c=913 \text{ m}^3/\text{j}$ ($38 \text{ m}^3/\text{h}$) en considérant n=2,1, soit 24% d'écart. Dans le cas de cet exemple, le débit critique est sous-estimé de 24% en faisant l'approximation proposée par Jacob (n=2), ce qui n'est pas négligeable pour un exploitant de forage.



		503	75 040	2.10
---	---	-----	--------	------

Figure 17 : Exemple d'interprétation de courbe caractéristique comparant un ajustement de la courbe $s=BQ+CQ^n$ avec $n=2$ et avec $n=2,1$

Dans le cas de l'exemple suivant (Figure 18), un pompage par palier dans les calcaires de Touraine à Azay le Rideau, un ajustement est obtenu avec une valeur $n=3$. Dans ce cas précis, c'est le dénoyage de venues d'eau qui impacte le rabattement des paliers les plus élevés. Les débits pompés sont excessifs par rapport à la position des arrivées d'eau qui se dénoient progressivement.

En d'autres termes, le fait d'avoir une alimentation du captage qui diminue lorsque le rabattement augmente biaise l'essai. Le débit critique qui en découle n'est pas valable. C'est la profondeur des arrivées d'eau à ne pas dénoyer qui fixera un rabattement maximal admissible, et en conséquence le débit d'exploitation. Pour cela, il sera donc nécessaire de faire une simulation d'exploitation sur la durée de pompage en phase d'exploitation, probablement bien plus longue que celle des paliers, afin d'estimer le débit adéquat pour respecter le rabattement maximal admissible. Il existe une fonction spécifique dans Ouaip pour cela (cf manuel du logiciel Ouaip, chapitre simulation).

Remarque : Un pompage d'essai en nappe libre peut présenter le même biais : le dénoyage d'une partie de l'aquifère est d'autant plus important que le débit est élevé. Ainsi les paliers de fort débit, en fin d'essai dénoient plus que ceux de faible débit, en début d'essai. La transmissivité du milieu (proportionnelle à l'épaisseur saturée) est donc différente en début et en fin d'essai.

Pour éviter cet impact il convient de conserver une valeur faible du rabattement s par rapport à l'épaisseur e de l'aquifère. Dans son ouvrage de référence « Principes et méthode de l'Hydrogéologie », Castany (1982) recommande de fixer $s \leq 0,1 e$ avec une tolérance jusqu'à $s \leq 0,3 e$ (soit un dénoyage maximal de 30% de l'épaisseur initiale de la nappe).

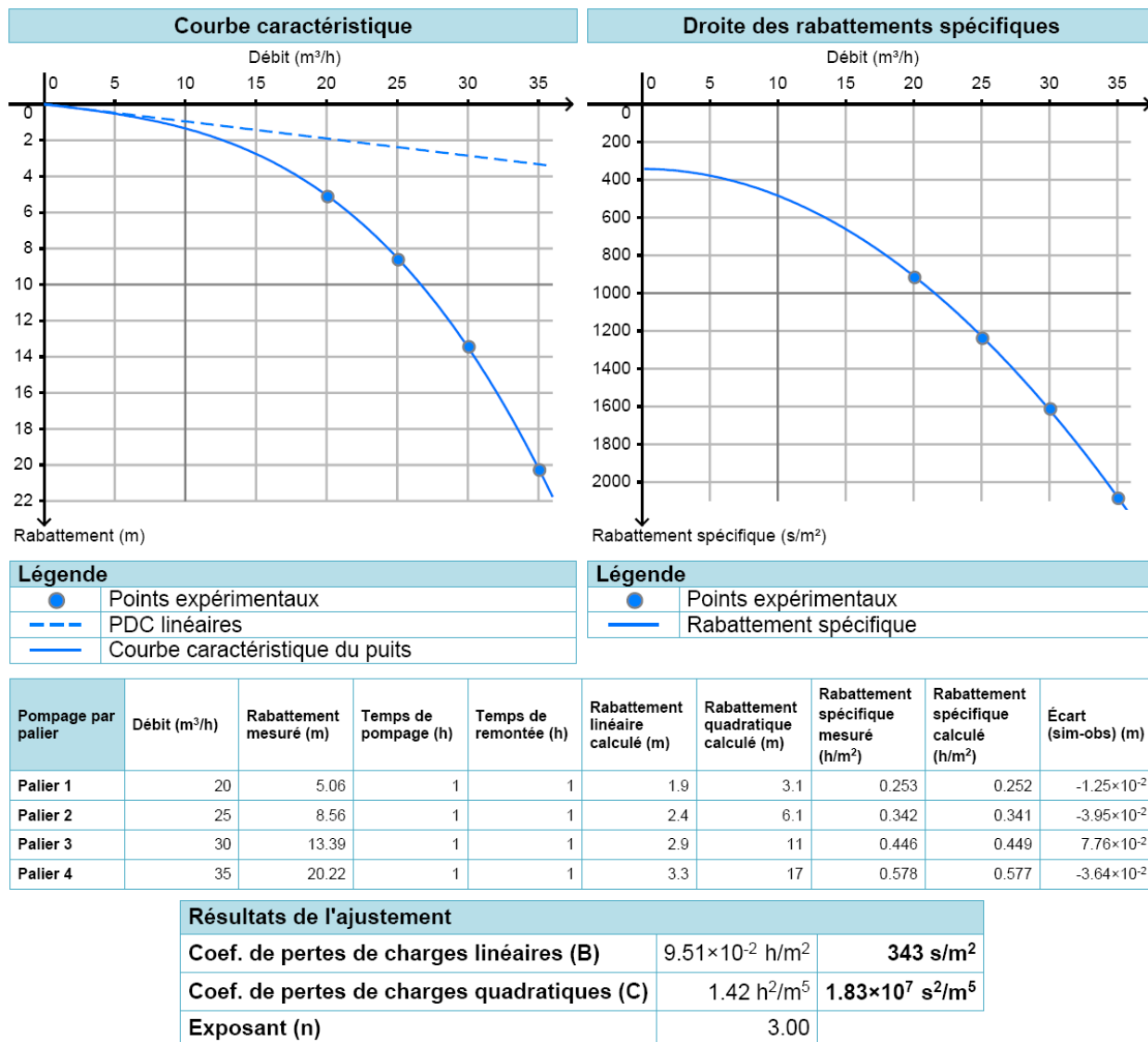


Figure 18 : Exemple du forage d'Azay le Rideau affecté par un dénoyage progressif des venues d'eau

3.5. COEFFICIENT D'EFFICACITE

Plusieurs auteurs proposent de caractériser un forage par le calcul d'un coefficient d'efficacité ou de performance du forage. Plus les pertes de charges quadratiques sont réduites, plus l'ouvrage est considéré comme performant, indépendamment de la productivité de l'aquifère capté.

MOGG (1969) cité par Forkasiewicz (1972) propose un index pour évaluer l'importance des pertes de charges quadratiques par rapport aux pertes de charges linéaires basé sur la variation du débit spécifique au cours de l'essai entre le 1^{er} et le dernier palier :

$$J = \frac{\Delta\left(\frac{Q}{s}\right)}{(Q/s)_{moyen}}$$

Si ce terme est inférieur à 10%, il est admis que les effets de la turbulence sont négligeables.

Rorabaugh (1953) cité et critiqué par Forkasiewicz (1978) propose un coefficient d'efficacité du puits défini ainsi : $E = BQ/s$. Forkasiewicz estime que cette méthode conduit dans certain cas à calculer une « forte mais fausse efficacité ».

Une estimation de l'efficacité du puits plus largement acceptée est donnée par Roscoe Moss (1989) à partir des coefficients B et C tirés de l'interprétation de l'essai par palier :

$$E = \frac{100}{1 + CQ/B}$$

A titre d'exemple, considérons $B=79,1 \text{ s/m}^2$ et $C=4430 \text{ s}^2/\text{m}^5$, pour un débit $Q=20 \text{ m}^3/\text{h}$ (à convertir en $5,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$), le coefficient d'efficacité est égal à 76%

D'autres méthodes sont proposées dans les ouvrages spécialisés mettant en œuvre une estimation du rabattement observé ou du débit spécifique théorique par rapport à leurs équivalents théoriques.

Ainsi Lauga (1990) propose le calcul du rendement du puits :

$$r = \frac{\text{rabattement théorique}}{\text{rabattement réel}}.$$

Le rabattement théorique peut être calculé aisément par Ouaip dans le module « interprétation » en décochant la prise en compte de l'effet de pertes de charges quadratiques (cf manuel du logiciel Ouaip).

Ces indices d'efficacité ou de rendement n'ont de réel intérêt que dans le diagnostic et la maintenance des forages, afin de comparer l'état du forage à différentes périodes et identifier une éventuelle perte de rendement.

4. Conditions de mise en œuvre des essais par paliers pour une détermination correcte des coefficients de pertes de charge.

Deux types de pompages d'essais par paliers sont couramment pratiqués :

- Les pompages par paliers non enchainés, où chaque palier de débit constant est interrompu par un retour à l'état de repos initial. Nous allons voir que ce type de pratique est la plus correcte.
- Les pompages par paliers enchainés, où chaque palier débute à la suite du palier précédent.

La bonne exécution des pompages par paliers repose sur deux principes de base :

- S'efforcer d'obtenir des débits constants pour chaque palier.
- Considérer toujours la même durée de pompage pour chaque palier.

La méthode d'interprétation s'appuyant sur les hypothèses de base de l'interprétation des pompages d'essais, il est bon de les rappeler afin de placer les résultats dans la perspectives de ces hypothèses :

- La nappe est captive et horizontale
- L'aquifère est homogène, isotrope et infini.

A l'échelle d'un pompage par paliers, la nappe (au repos) est généralement proche de l'horizontale et le volume d'aquifère concerné par des pompages de courte durée atteint rarement les limites de l'aquifère. Dans les milieux perméables à porosité d'interstices ou assimilés (milieu poreux équivalent) les hypothèses d'isotropie et d'homogénéité peuvent être considérées valables.

L'application de la méthodologie en nappe libre est tolérée lorsque les rabattements n'excèdent pas 25 à 30 % de l'épaisseur saturée de l'aquifère (Castany, .

4.1. DEBITS DES PALIERS

Plusieurs critères peuvent être considérés pour déterminer les débits des paliers. Il est souhaitable d'avoir une idée du débit que l'on peut espérer pomper sans risquer de dénoyer les crépines ou la pompe. C'est généralement le cas à partir des informations collectées durant les opérations de développement qui sont très importantes en préalable aux essais de pompage dans un nouveau forage, car ces essais doivent être réalisés sur un ouvrage stable i.e. dont la productivité ne risque pas d'évoluer durant les essais.

En complément, les autres critères qui interviennent peuvent concerner le besoin du maître d'ouvrage (le choix des débits permettant de l'encadrer), la courbe caractéristique de la pompe, le diamètre du forage (qui limite celui de la pompe et par conséquent le débit que l'on peut pomper avec) et la hauteur crépinée dans la zone noyée en permanence, afin de conserver une vitesse d'entrée dans la crépine inférieure à la vitesse critique de 3 cm/s (cf §3.2).

L'ensemble de ces critères guide le choix de la pompe à mettre en place dans l'ouvrage et le débit maximal Q_{max} .

Pour les deux types de pompages par paliers (enchainés et non-enchainés), il n'y a pas une absolue nécessité à réaliser les paliers en augmentant régulièrement le débit (paliers de débit croissants) mais c'est la pratique la plus courante. Les paliers sont parfois enchainés ou interrompus de manière irrégulière, avec des débits variables. Cependant, afin de balayer une large plage de débits il est d'usage de diviser le débit maximal établi précédemment (Q) par 4, et de répartir les paliers ainsi : $Q_1 = Q/4$, $Q_2 = Q/2$, $Q_3 = 3Q/4$ et $Q_4 = Q = Q_{\max}$. Notons que cette valeur de $Q_{\max}$ ne concerne que les essais par paliers, de manière à établir le débit critique.

Lorsque le débit exploitable est à peu près connu, en particulier pour des pompages d'essais par paliers réalisés dans le cadre de la maintenance d'ouvrages en production, il est souhaitable d'avoir un palier au-delà du débit d'exploitation Q_{exp} , à condition que le débit de ce quatrième palier ne représente pas de risque pour l'ouvrage (vitesse critique à respecter notamment). Il est alors suggéré de pomper à $Q_1 = Q_{\text{exp}}/3$, $Q_2 = 2Q_{\text{exp}}/3$, $Q_3 = Q_{\text{exp}}$ et $Q_4 = 4Q_{\text{exp}}/3$.

Il n'est pas toujours possible de faire varier le débit d'une pompe dans de telles proportions. Certaines pompes ne sont pas prévues pour fonctionner dans une aussi large gamme de valeurs. Les brider fortement par une vanne en tête de forage peut les faire chauffer de manière excessive, voire les griller. Ce risque est à prendre en considération dans l'exécution d'un essai et il peut s'avérer nécessaire d'utiliser une autre pompe le temps de l'essai.

Lorsque des pompes immergées électriques sont utilisées, l'utilisation d'un variateur de fréquence est conseillée. Le variateur permet d'éviter les à-coups au changement de débit et autorise un ajustement plus fin du débit pompé. Quel que soit le moyen de pompage, le débit doit toujours être contrôlé par au moins deux types de mesures différentes (par exemple : compteur volumétrique et jaugeage au seau pour de faibles débits). Le mode de mesure est adapté à la précision souhaitée.

Une astuce permettant d'obtenir rapidement le réglage de chaque palier est de disposer d'un manomètre sur la conduite d'exhaure, ou, ce qui revient au même, d'un tube à diaphragme (communément mais improprement appelé tube de Pitot - Figure 19). Il est en effet bien plus aisé d'ajuster une pression par un réglage de vanne (l'aiguille du manomètre s'ajuste instantanément) que d'ajuster un débit car la mesure du débit, en l'absence de débitmètre capable de donner un débit instantané requiert plusieurs minutes. Ainsi il suffit d'établir à l'avance (lors de tests de la pompe par exemple) les pressions à obtenir, ou de calculer les hauteurs à lire sur la jauge du tube à diaphragme pour les quatre débits, pour être en mesure d'obtenir quasi-instantanément le débit souhaité.

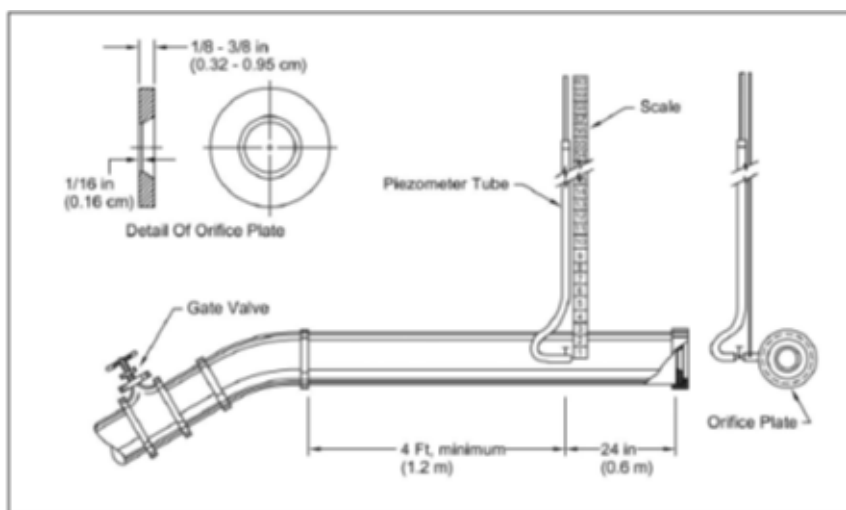


Figure 19 : Tube à diaphragme

Les débits de chaque palier sont donc déterminés à l'avance et doivent être constants. En pratique, il est parfois nécessaire de réajuster le débit dans les toutes premières minutes car le rabattement de la nappe affecte la hauteur manométrique, et pour certaines pompes, l'impact peut être sensible. Au final, le débit à prendre en compte est le débit moyen, c'est-à-dire la moyenne des débits pondérée par les durées de pompage. Si l'on a fait usage d'un compteur volumétrique, il est plus aisé de prendre le volume écoulé divisé par la durée du palier. Enfin, s'il n'a pas été possible de conserver un débit constant pendant la majorité de l'essai, le palier devra être recommencé.

4.2. DUREE DES PALIERS

Il n'y a pas lieu de fixer de longues durées de pompage pour chaque palier car ce que l'on cherche à caractériser ce sont les pertes de charge non linéaires. Celles-ci interviennent à proximité du puits (dans le « proche puits », c'est-à-dire quelques mètres autour du puits) dans la plupart des cas, où la vitesse est la plus forte (cf 3.3). Toutefois, pour une bonne détermination du débit critique, il est nécessaire de respecter trois conditions :

- travailler sur des durées de pompage identiques
- ne pas se trouver dans la plage de pompage influencée par l'effet de capacité du puits
- avoir atteint un régime pseudo stabilisé

Ces trois conditions sont discutées ci-dessous.

4.2.1. Importance d'une durée identique pour chaque palier

Il est important de respecter le principe d'une durée de pompage fixe pour chaque palier pour la raison suivante : chaque prélèvement sur l'aquifère se traduit par la création d'un cône de rabattement autour du puits dont le rayon dépend uniquement du temps de pompage. Ainsi, si le temps de pompage est différent, la zone d'aquifère qui contribue au prélèvement est également différente. Or, les paramètres hydrodynamiques autour du puits sont rarement homogènes pour un certain nombre de raisons : influence du mode de foration, invasion du fluide de forage, incidence sur les écoulements du massif de gravier, variation de perméabilité dans l'espace etc...ce qui fait que des paliers de durée différente intègrent des volumes d'aquifères de propriétés différentes. Embrasser des volumes d'aquifères différents entre chaque palier introduit donc un biais sur les pertes de charge linéaires (celles liées principalement à l'aquifère) et influence donc la détermination du débit critique.

Cet effet de la propagation du cône de rabattement dans l'aquifère, au-delà du proche puits, est l'une des raisons pour lesquelles le pompage par paliers enchainés n'est pas recommandé. Nous y reviendrons.

Une autre raison de considérer une durée de temps fixe tient du fait que les niveaux dynamiques décroissent avec le temps. La stabilisation d'un niveau n'est en effet complète que lorsqu'une limite de type « alimentée » (un cours d'eau, un lac, un forage en injection...) vient compenser le débit prélevé. La décroissance du niveau dynamique dans le temps suit une loi qui dépend de la transmissivité (si l'on considère que le milieu est homogène, isotrope et infini). Ce point est discuté au 4.2.3. °

Ainsi, si les paliers ont été conduits sur des durées plus ou moins longues, il faudra considérer le rabattement de chacun obtenu au bout d'un intervalle de temps identique, et non le rabattement à la fin de chaque palier.

Prenons comme exemple la Figure 20 issue du rapport BRGM/RP-60905-FR (Klinka, Gennevier, 2012). Il s'agit de pompages réalisés indépendamment, avec des durées variables, dans les alluvions de la Gravone en Corse.

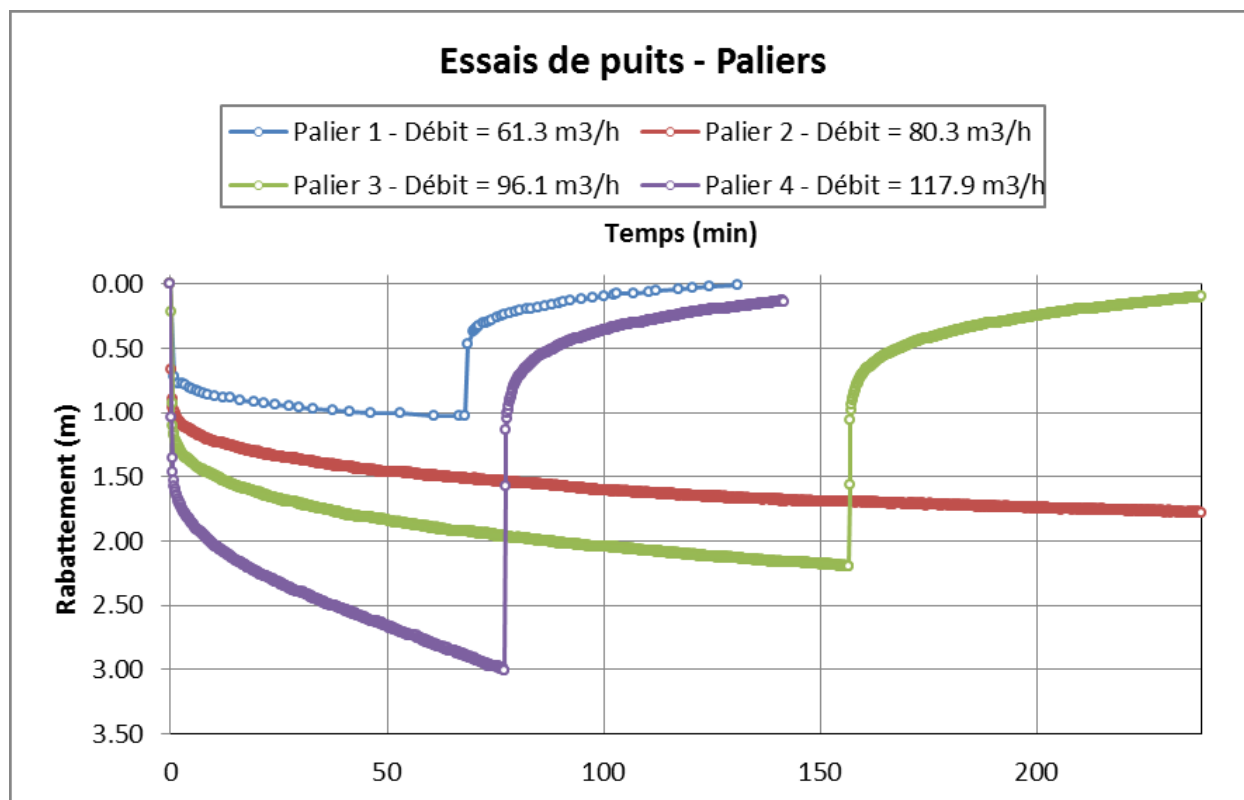


Figure 20 : Exemple de paliers de différentes durées

Les figures suivantes illustrent ce qui se produit selon que l'on considère les fins de paliers, dont les durées sont ici hétérogènes (Figure 21) et des paliers à durée fixe de 1 h (Figure 22). Dans le premier cas, l'ajustement est mauvais, la droite des rabattements spécifiques optimisée passe dans le nuage de points et donne un débit critique de l'ordre de 94 m³/h.

En réalité, la courbe n'est pas correctement construite. Elle doit considérer des durées identiques pour représenter des rabattements comparables. Ainsi, la Figure 22 est mieux ajustée. Son interprétation donne une valeur plus faible du débit critique (48 m³/h) mais plus juste.

Comme nous l'avons dit plus haut, afin que le pompage par palier teste le proche puits, la durée de chaque palier doit être courte. La norme AFNOR NFX10-999 du 30 Aout 2014 sur les forages préconise une durée de 2h de pompage interrompue par 2h de repos entre chaque palier. Pour des raisons pratiques et économiques, il est parfois possible de raccourcir ces durées à 1h chacune, à condition que :

- le niveau remonte au niveau initial entre chaque palier (on tolère une récupération de 95% du rabattement si le niveau initial peine à se rétablir).
- l'effet de capacité du puits soit négligeable (voir paragraphe 4.2.2)

- la courbe de descente sur un graphique semi-logarithmique du rabattement en fonction du temps est une droite (dite droite de Jacob).

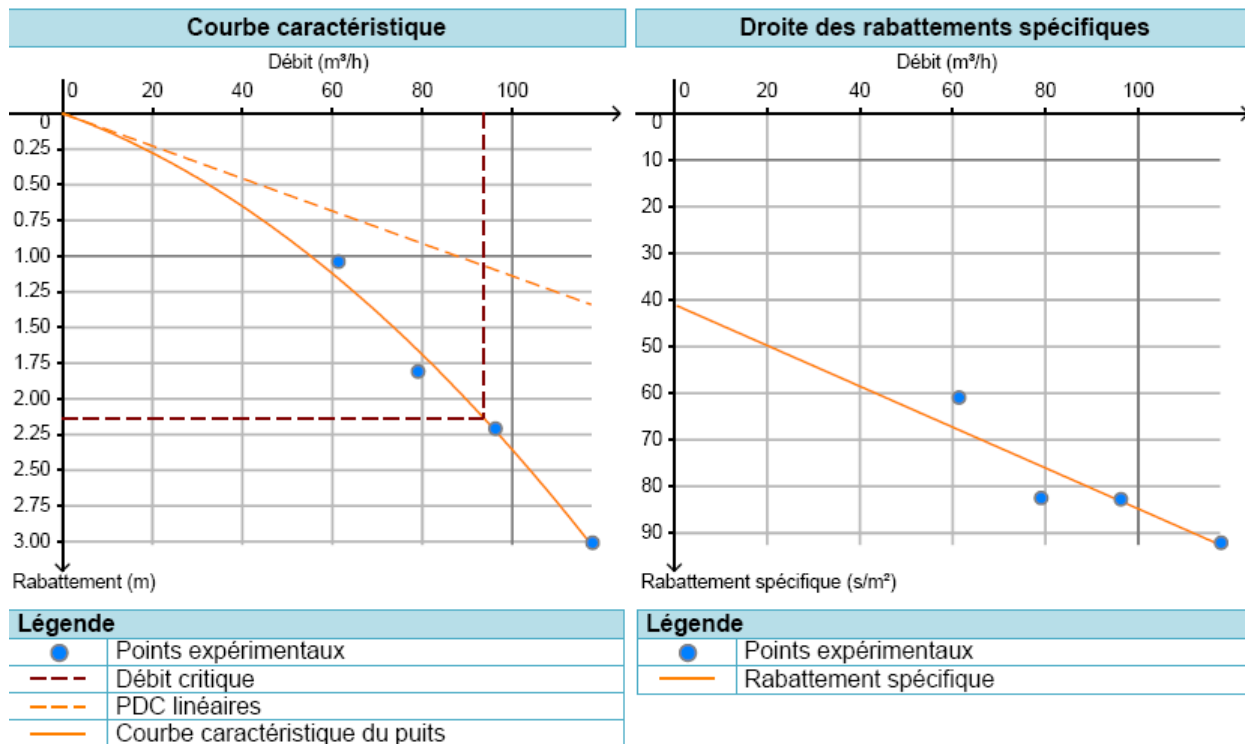


Figure 21 : Courbes obtenues à partir des valeurs en fin de palier de durées hétérogènes (même essai que la figure 23)

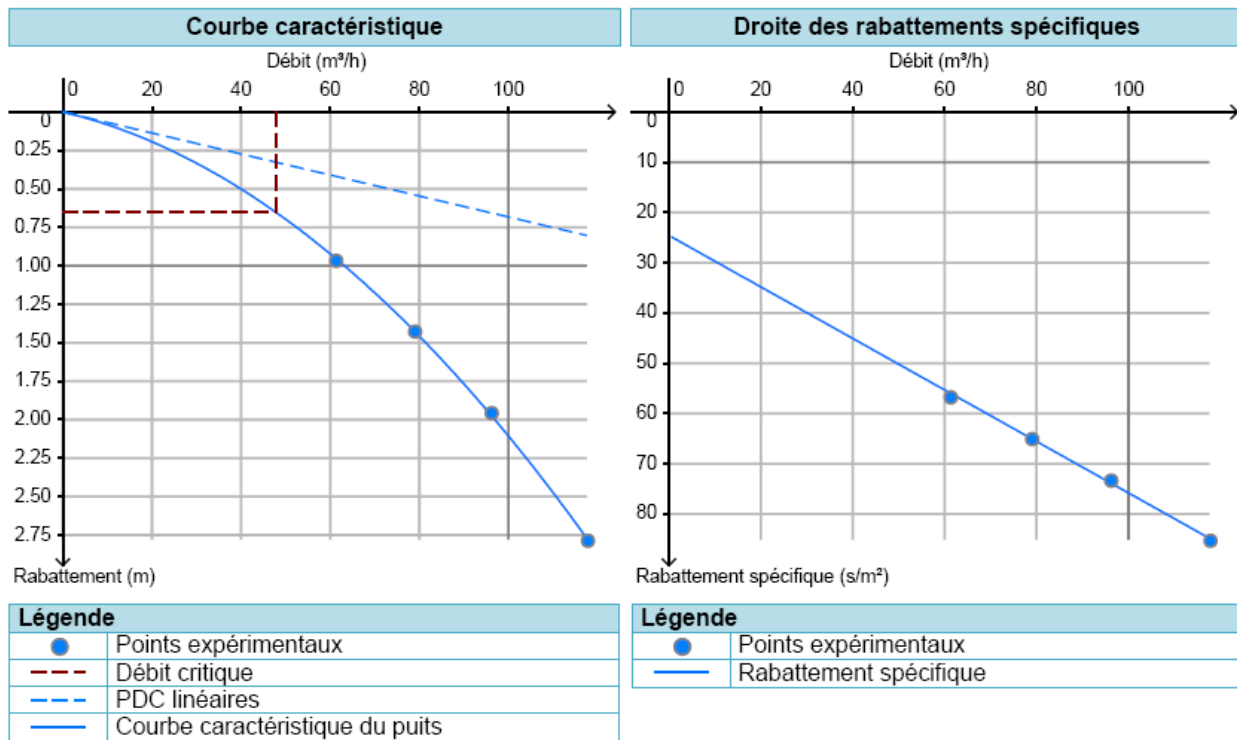


Figure 22 : Courbes obtenues à partir des valeurs après 1h de pompage de chaque palier (même essai que la figure 22)

4.2.2. Influence de l'effet de capacité

L'effet de capacité est un artéfact sur le niveau dynamique lié au volume d'eau présent dans le puits au début du pompage. Au démarrage de la pompe, le volume dans le forage est plus facilement mobilisable que celui dans le proche puits. Si ce volume est important et la transmissivité de l'aquifère faible, l'effet de capacité peut durer plusieurs dizaines de minutes. Dans ce cas, il est préférable de pomper 2h.

Le temps théorique de la durée de l'effet de capacité peut être calculé, mais il dépend de la transmissivité du milieu qui n'est en général connue que postérieurement. Il est donné par la

$$\text{formule : } t_c = 25 \times \frac{r^2}{T}$$

avec t_c , durée de l'effet de capacité en secondes ; r , rayon de l'ouvrage en mètres, T , transmissivité en m^2/s . Notons que ce temps théorique est souvent excessif car l'effet de capacité s'amenuise progressivement. Genetier (1984) propose la table suivante (Figure 23), qui suppose également que la transmissivité T soit plus ou moins connue.

L'influence de l'effet de capacité est visualisée sur la Figure 24. Il s'agit d'une simulation avec et sans prise en compte de l'effet de capacité. Les paramètres de cette simulation sont les suivants : $T=1.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$; $S=1.10^{-3}$; $r=0,2 \text{ m}$; $C=324\,000 \text{ s}^2/\text{m}^5$. L'effet de capacité se marque sur environ 1h. Il se traduit par un retard dans l'établissement d'un pseudo-équilibre entre le pompage et la nappe. Ainsi, si on établissait la courbe caractéristique à 30 minutes au lieu d'une heure ou deux heures, on introduirait une erreur sur la détermination du coefficient de pertes de charges non linéaire et sur le débit critique (cf Figure 25)

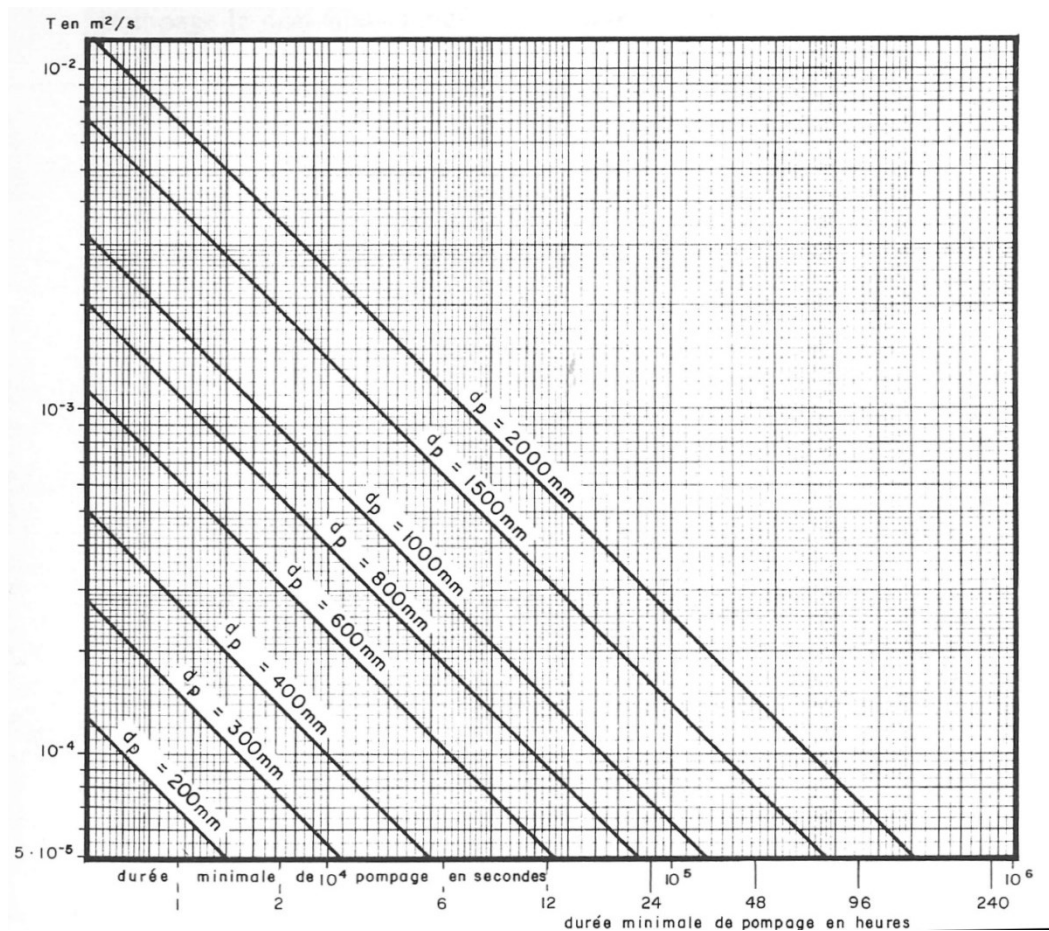


Figure 23 : Durée de l'effet de capacité en fonction de la transmissivité T , et du diamètre du puits d_p (Genetier – 1984)

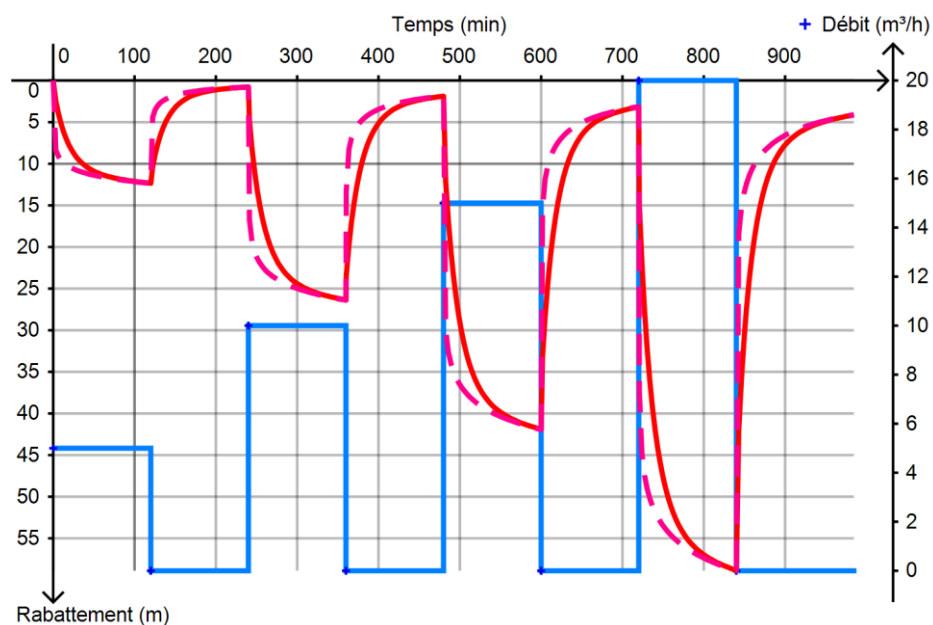


Figure 24 : Un exemple d'essai par palier avec (courbe pleine) et sans (courbe pointillée) effet de capacité ; la courbe en bleu indique le débit...

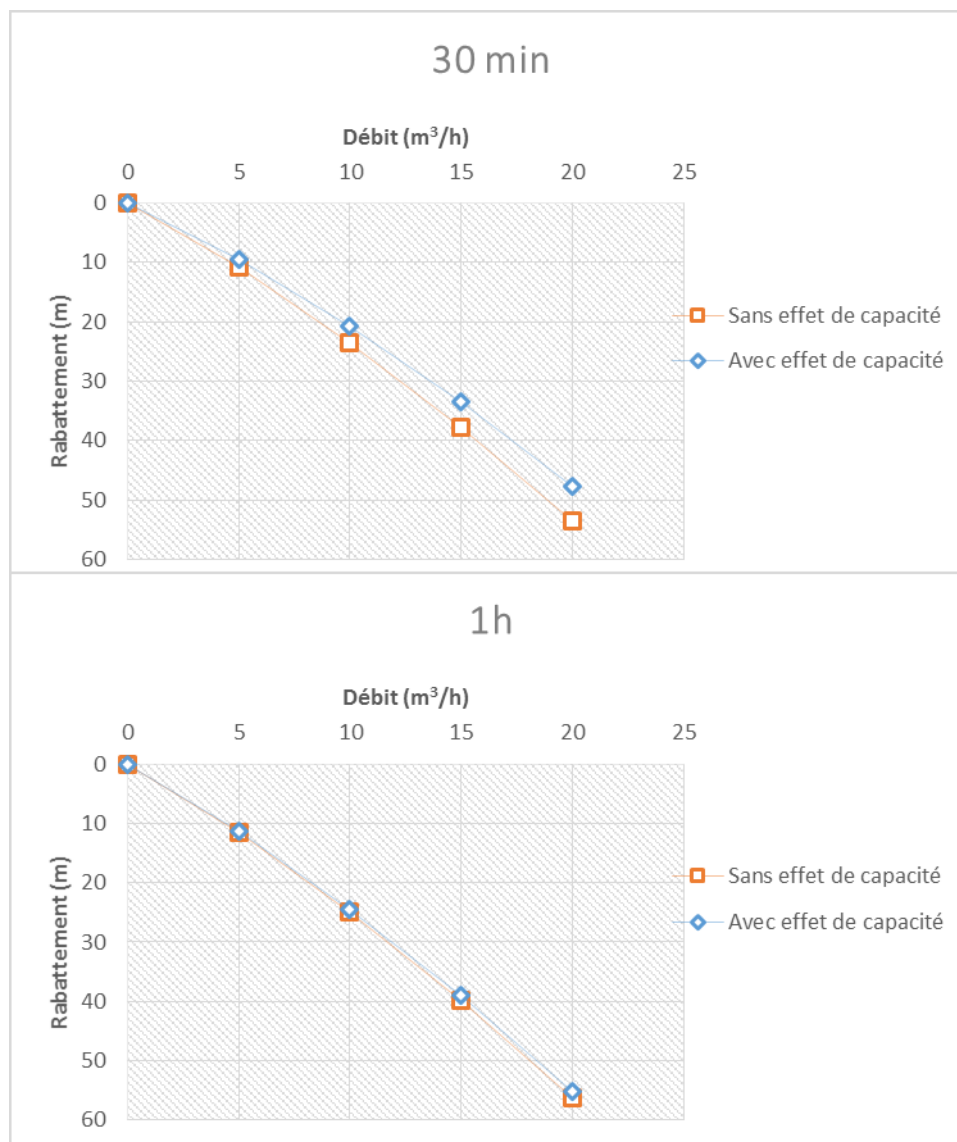


Figure 25 : Influence de l'effet de capacité sur la courbe caractéristique pour deux durées de pompage (30 min et 1h)

4.2.3. Influence de la durée des paliers sur les résultats

La question qui se pose ici est de savoir s'il est nécessaire d'atteindre un régime stabilisé ou pseudo-stabilisé, c'est-à-dire une situation où le niveau dynamique évolue très lentement et régulièrement en fonction du temps (par rapport au début de l'essai où cette variation est rapide).

Si l'on revient à l'écriture de la formule initiale ayant permis à Jacob de poser son équation de la courbe caractéristique, on remarque que l'un des termes de l'équation, B_1 , est fonction de la durée de pompage.

$$s_r = (B_1 + B_2)Q + CQ^2$$

En effet, B_1Q représente le rabattement théorique qui est modélisé par différents auteurs, Theis (1935) en particulier. Ainsi, B_1 est une fonction du temps, donc le coefficient de pertes de charge linéaire $B=B_1(t)+B_2$ augmente avec le temps. B n'est constant que lorsque le régime permanent est établi, ce qui est rarement le cas en pompage d'essai. Certains auteurs (tel Detay, 1993) préconisent d'atteindre la stabilisation du niveau pompé dans l'ouvrage pour interpréter l'essai ce qui peut conduire à des durées de palier relativement longues. Dawson et Istok (1992) argumentent que pour que la condition $\frac{4Tt}{r^2S} > 100$ qui sous-tend la formule de Jacob soit respectée, il faut attendre que la courbe de descente se linéarise sur un graphique semi-logarithmique.

Pour comprendre comment l'influence de la stabilisation du régime sur les résultats, comparons quatre interprétations d'un même essai par palier dont les paramètres sont les suivants :

T 1.10^{-4} m^2/s

S 1.10^{-3}

r 0,2 m^2/s

C 2.10^6 s^2/m^5

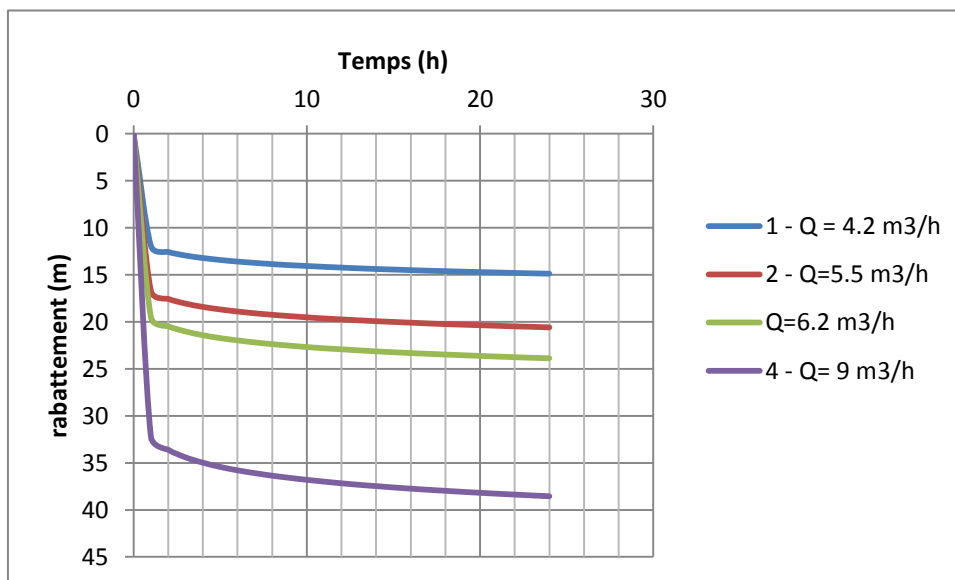


Figure 26 : Simulation de quatre essais de 24h

A partir de ces essais de 24h chacun, nous pouvons tracer la courbe des rabattements spécifiques à différentes périodes (par exemple 2h, 12h et 24h). Nous observons une translation de la droite obtenue qui s'atténue dans le temps (Figure 27). Dans la pratique, il n'est généralement pas possible pour des raisons de budget, de faire d'aussi longs paliers que ceux de la Figure 27 pour bien caractériser le proche puits. Sur des paliers de 1 ou 2 h, la valeur de B (ordonnée à l'origine) est donc sous-estimée par rapport à la valeur vers laquelle B

tend pour un régime permanent, alors que la valeur de C reste la même. Le débit critique (égal à une puissance de B/C) qui résulte d'un essai court est donc sous-estimé, ce qui joue dans le sens sécuritaire. Des essais très courts dont la descente est loin d'être stabilisée, suffiront à caractériser le coefficient C mais pourront apparaître trop éloignés d'un régime pseudo-permanent pour caractériser le débit critique.

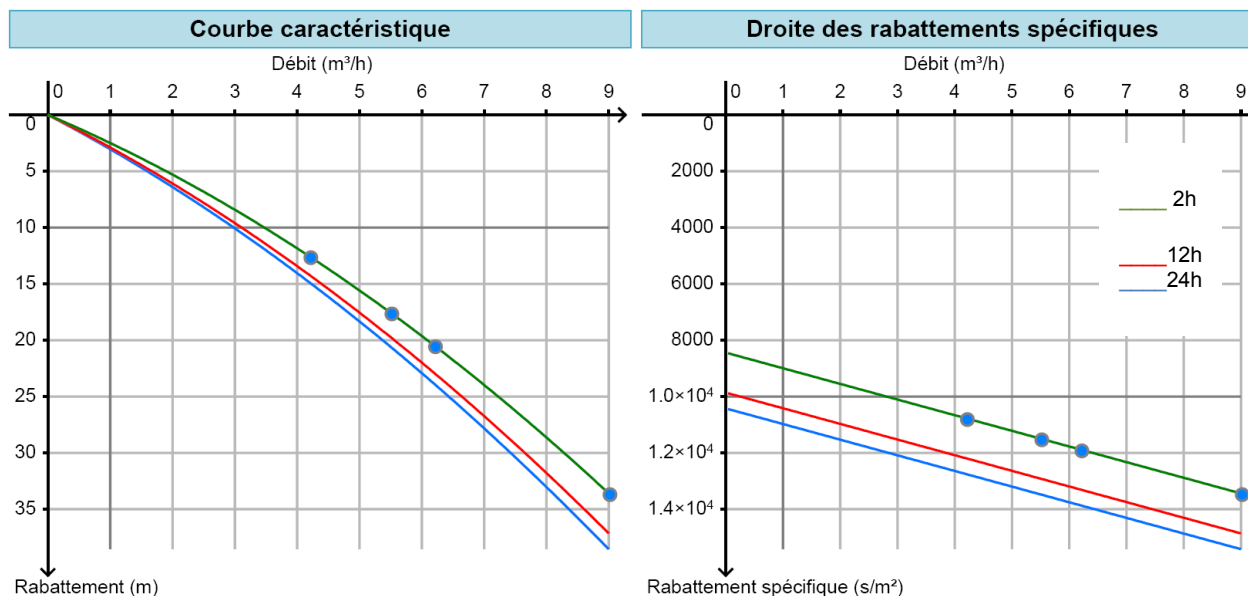


Figure 27 : Evolution des résultats de l'essai avec la durée du pompage

4.3. CALCUL DU RABATTEMENT EN FIN DE PALIER

Le rabattement est la différence entre le niveau statique et le niveau dynamique au temps t.

$$s(t) = h_0 - h(t)$$

avec : $s(t)$ rabattement qui évolue en fonction du temps de pompage

$h(t)$ profondeur ou altitude du niveau dynamique au bout du temps t

h_0 profondeur ou altitude de l'eau de référence (niveau « statique »)

Le calcul du rabattement à la fin de la durée du palier fixée ne pose généralement pas de problème. Cependant, il arrive que la détermination du niveau statique soit difficile.

Le terme « statique » est relativement inapproprié car les nappes souterraines sont en mouvement et leur niveau fluctue en fonction du temps, selon les saisons ou les influences qu'elles subissent. Il signifie toutefois que l'état de la nappe avant le pompage doit être un état stabilisé et non influencé par des prélèvements ou des injections voisins, afin de se référer à un niveau fixe.

Cependant, si la nappe est affectée par un mouvement général, celui-ci affecte la totalité de l'essai. Le niveau « statique » à considérer dans le calcul n'est pas le niveau initial, mais le niveau que la nappe aurait au même moment dans des conditions de repos.

$$s(t) = h_0(t) - h(t)$$

Un exemple démonstratif est donné par l'essai par palier sur le captage de Couachi près de Mana (Guyane) représenté sur la Figure 28 (Rapport BRGM/RP-56037-FR). Il s'agit d'un captage dans des alluvions, proche d'un fleuve qui subit l'influence de la marée. Le niveau de la nappe au repos est lui-même perturbé par la marée, avec un déphasage et un amortissement de l'amplitude. La détermination du niveau de référence $h_0(t)$ nécessite la reconstitution de l'influence de la marée sur le niveau de la nappe au repos.

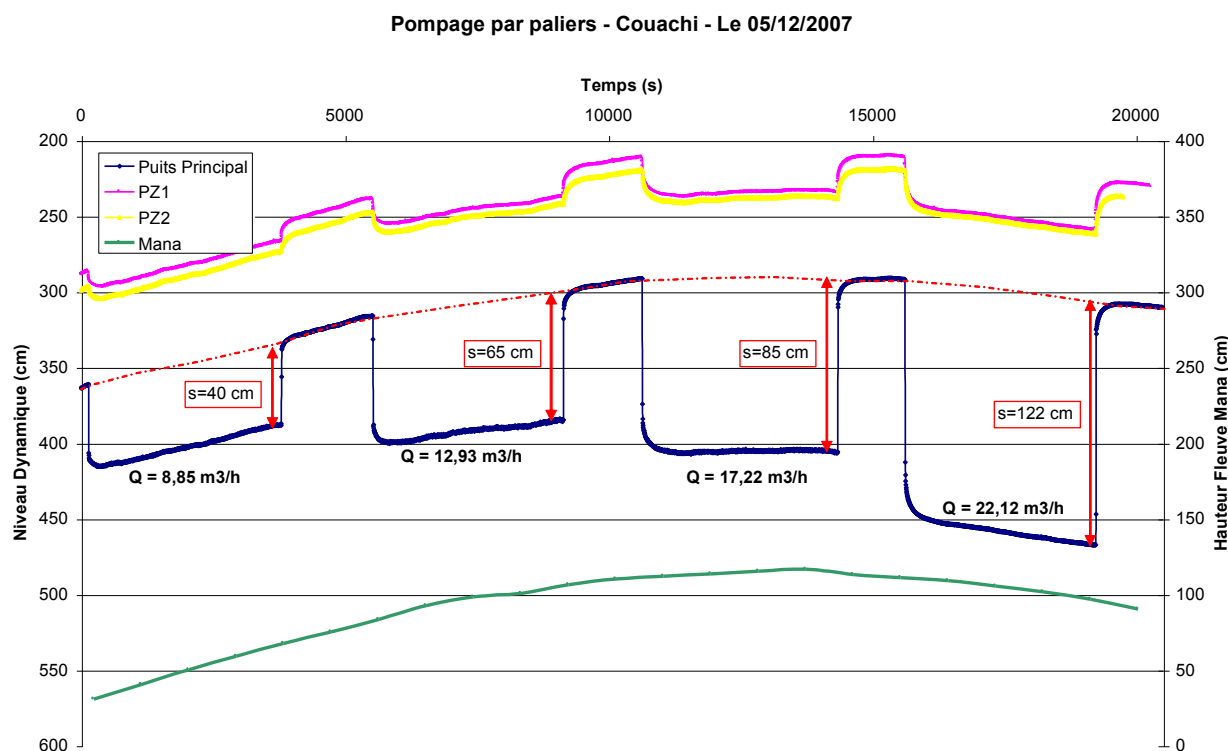


Figure 28 : Essais par palier perturbés par la marée

Un autre cas particulier concerne le cas où le niveau initial n'est pas atteint à la fin de la remontée intermédiaire d'un essai par palier non enchainé, parce que la remontée est trop courte. La norme AFNOR et divers auteurs recommandent de ne pas démarrer le palier suivant tant que 95% du rabattement n'a pas été récupéré. La raison de cette tolérance est liée aux éléments suivants :

- Les milieux faiblement transmissifs sont lents à récupérer leur niveau initial. Rechercher le retour à l'état initial peut largement dépasser le temps disponible et générer des coûts de suivis excessifs.
- Lorsque le pompage est démarré avant la fin de la remontée, l'historique des pompages précédents influence le pompage suivant. Le niveau initial du nouveau palier n'est plus le niveau statique. Cependant, si la règle des 95% est respectée, l'approximation consistant à prendre le niveau statique est acceptable.

En toute rigueur, lorsque le niveau statique n'est pas atteint avant le démarrage du pompage suivant, il faut considérer le rabattement par rapport à ce que serait la nappe si elle avait pu poursuivre sa remontée. Ainsi, il faut reconstituer la remontée de la nappe et lire le rabattement en fin de palier entre le niveau dynamique et le niveau ainsi reconstitué. L'exemple suivant illustre l'approximation faite si l'on néglige cette correction de niveau « statique ».

Considérons un pompage par palier théorique, appelé essai A, simulé avec Ouaip à l'aide de la solution de Theis, pour les paramètres suivants :

$$T=3.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S=5.10^{-3}$$

$$r=0,2 \text{ m}$$

$$C=1\,000\,000 \text{ s}^2/\text{m}^5$$

Le coefficient de pertes de charges quadratique, C, est fixé dans la simulation. L'objectif est de le retrouver par interprétation de la courbe caractéristique.

Quatre paliers sont mis en œuvre. Les données sont présentées par le Tableau 1. A la fin de la remontée de chaque palier, le niveau n'atteint pas le niveau statique initial (NS). Le palier suivant débute à 95% ou 96% de la remontée du palier précédent.

Palier	Débit (m ³ /h)	Rabattement résiduel avant nouveau palier (m)	Rabattement résiduel fictif du palier précédent (m)	Rabattement observé ND-NS (m)	Rabattement corrigé ND-(NS-Rab Résiduel fictif)	Pourcentage de remontée avant début du palier
1	5	2.55E-01	0	5.65	5.65	
2	10	6.17E-01	1.49E-01	15.30	15.15	95%
3	15	1.05E+00	0.381	28.90	28.52	96%
4	20		6.69E-01	46.41	45.74	96%

Tableau 1 : Données de l'essai simulé A

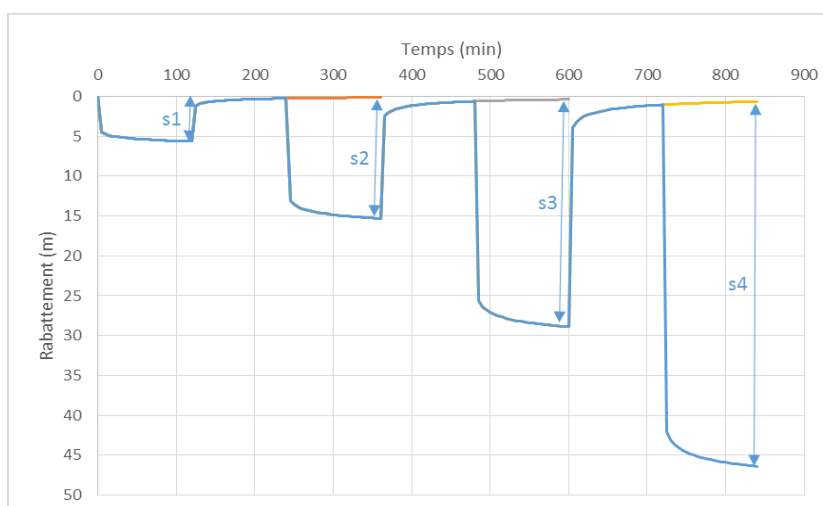


Figure 29 : Essais par palier avec remontée incomplète (exemple A)

Les deux courbes caractéristiques et les courbes des rabattements spécifiques correspondantes sont tracées en Figure 30 l'une, en trait plein (rabattements observés) à partir de l'approximation à un niveau statique constant, l'autre, en trait pointillé (rabattements corrigés) à partir des valeurs s_1 à s_4 de la Figure 29. Les deux courbes sont très proches. Les coefficients C obtenus sont respectivement $C=1\,025\,000$ et $C=1\,000\,000\text{ s}^2/\text{m}^5$ et les débits critiques $9,36$ et $9,52\text{ m}^3/\text{h}$. Ces valeurs très proches confirment que prendre un niveau statique constant est une approximation acceptable dans cet exemple.

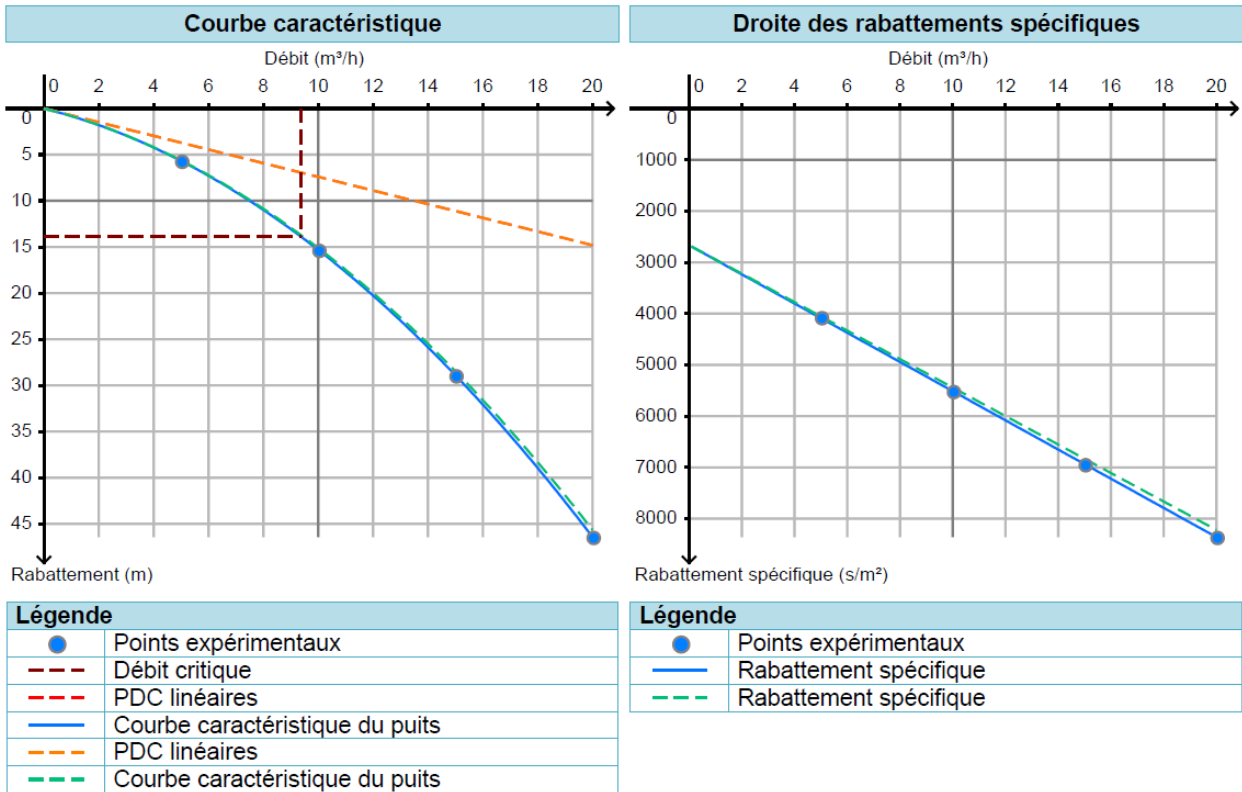


Figure 30 : Interprétation de l'essai A avec (vert) et sans (bleu) correction du niveau statique

Un deuxième exemple est considéré. L'essai B est une simulation similaire à l'essai A, mettant en œuvre quatre paliers de débits 5, 10, 15 et 20 m³/h avec les paramètres :

$T=1.10^{-3}\text{ m}^2/\text{s}$
 $S=1.10^{-3}$
 $r=0,2\text{ m}$
 $C=324\,000\text{ s}^2/\text{m}^5$

Les données sont présentées dans le Tableau 2 et la Figure 31Figure 1. Les niveaux dynamiques sont à 93 et 94% lorsque les pompages des paliers 2 à 4 démarrent.

Palier	Débit (m ³ /h)	Rabatement résiduel avant nouveau palier (m)	Rabatement résiduel fictif du palier précédent (m)	Rabatement observé ND-NS (m)	Rabatement corrigé ND-(NS-Rab Résiduel fictif)	Pourcentage de remontée avant début du palier
1	5	7.7E-01	0.00	12.35	12.35	
2	10	1.9E+00	0.45	26.40	25.95	94%
3	15	3.1E+00	1.14	41.94	40.80	93%
4	20		2.01	58.90	56.89	93%

Tableau 2 : Données de l'essai simulé B

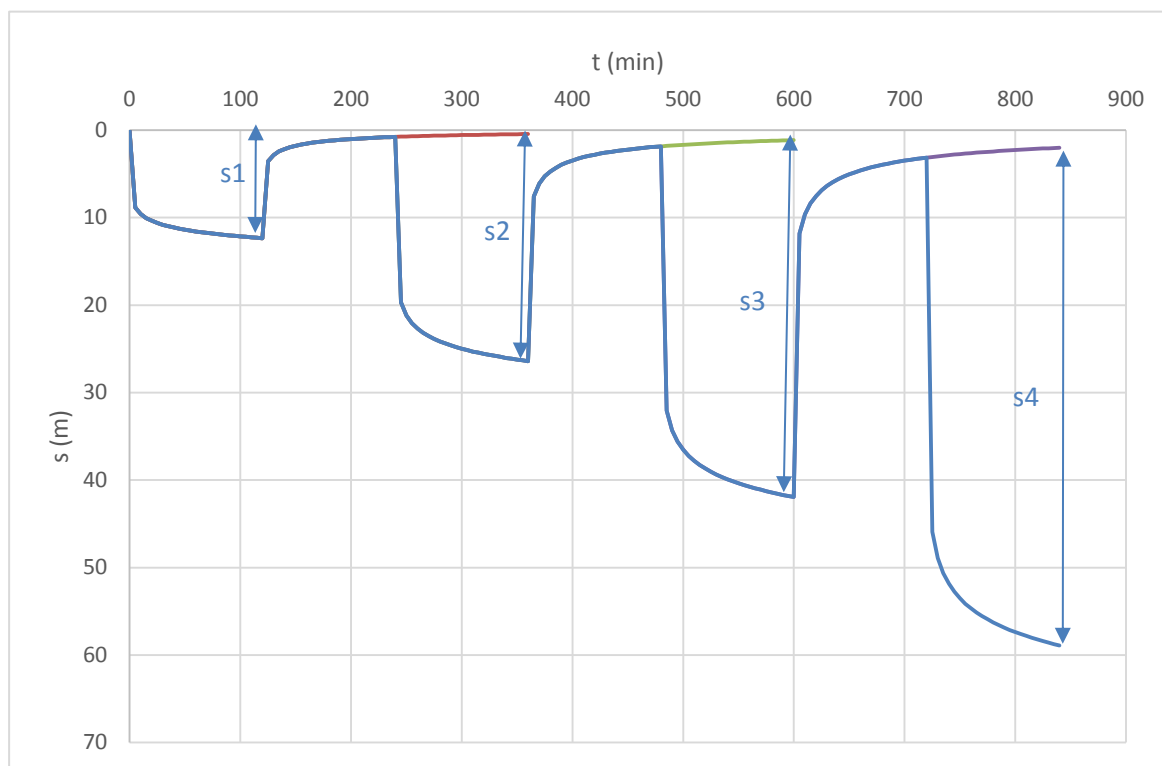


Figure 31 : Essais par palier avec remontée incomplète (exemple B)

Les résultats de l'interprétation sont présentés en Figure 32. Dans cet exemple, le débit critique est largement au-delà des 4 paliers. Les deux courbes semblent peu éloignées l'une de l'autre. Pourtant, l'écart sur la valeur du coefficient de pertes de charge quadratique est significatif (différence de pente de la droite 19%).

Cet exemple montre que lorsque les pertes de charges quadratiques sont faibles, négliger le rabattement résiduel induit par les paliers précédents peut avoir un impact important sur la détermination des pertes de charge. L'absence de correction se traduit par une surestimation du coefficient C (de 19%) et par voie de conséquence, une sous-estimation du débit critique (de 19%).

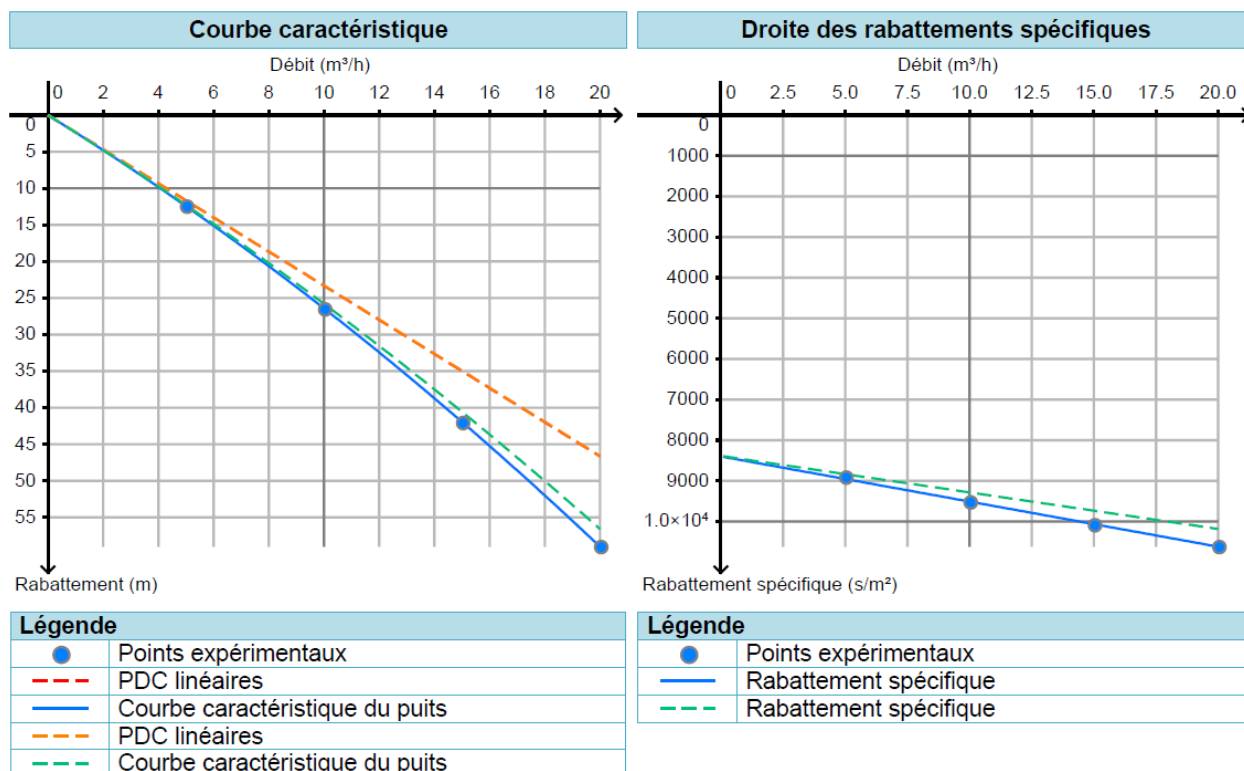


Figure 32 : Interprétation de l'essai B avec (vert pointillé) et sans (bleu – trait plein) correction du niveau statique

4.4. CAS PARTICULIER DES POMPAGES PAR PALIERS ENCHAINES

Certains ouvrages préconisent de réaliser les pompages par paliers en enchainant trois ou quatre paliers (voire plus) de débit croissant et en appliquant la même méthode que pour les pompages non enchainés. Il s'agit souvent de guides pour réaliser des pompages d'essais dans des conditions particulières : guides à destination d'ONG (Croix, Rouge, Unicef etc), programmes d'hydraulique villageoise (Burgeap) ... dont l'objectif est une estimation rapide des pertes de charges ou du débit critique au détriment de la qualité de l'interprétation.

En réalité le fait d'enchaîner les paliers présente deux biais :

- Chaque nouveau palier est influencé par l'historique des pompages précédents, ce qui a pour effet de surestimer les pertes de charge quadratiques et de sous-estimer les pertes de charge linéaires (sous-estimation du débit critique).
- L'accroissement du cône de rabattement, qui est fonction du temps de pompage, ne cesse pas avant la fin de l'ensemble des paliers. Ainsi, chaque palier correspond à un volume d'aquifère sollicité différent, contrairement à l'essai avec phase de remontée intermédiaire. Toute modification de la transmissivité ou de la géométrie de l'aquifère dans l'espace affectera donc l'essai par palier dès lors que son cône de rabattement atteindra cette hétérogénéité. L'impact peut être variable. S'il s'agit d'un accroissement de perméabilité, l'interprétation sous-estimera le coefficient de pertes de charges quadratiques. Dans certains cas, l'essai donnera l'impression d'un développement de l'ouvrage. S'il s'agit à l'inverse, d'une diminution des perméabilités ou d'une limite étanche, l'essai sera interprété de manière erronée comme une réduction du débit spécifique lié aux écoulements turbulents, le coefficient de pertes de charge quadratiques sera surestimé, entraînant une sous-estimation du débit critique.

Bierschenk (1963) propose une méthode d'interprétation des pompages par paliers enchainés qui permet de corriger ces effets.

4.4.1. Effet de l'historique de pompage

Pour évaluer le biais introduit par un pompage par palier enchainé, nous travaillons sur un exemple réel (Figure 33) constitués de trois paliers de débit croissants dans la formation du Continental Intercalaire d'Algérie (communication de T.Klinka).

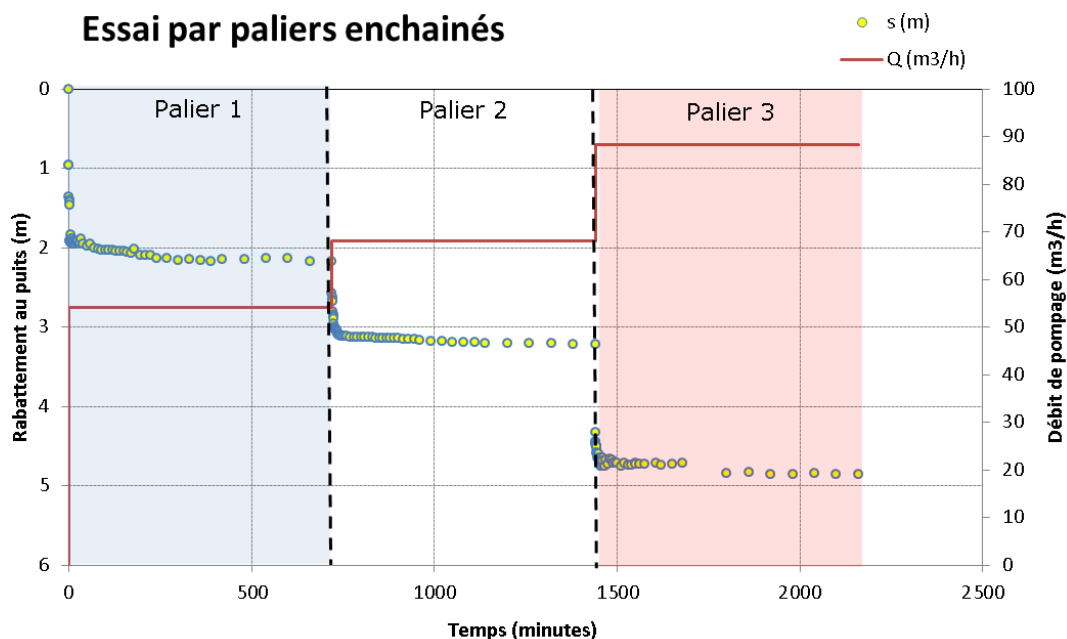


Figure 33 : Exemple d'un essai de 3 paliers enchainés

Pour tenir compte de l'influence de l'historique des paliers, il faut appliquer la méthode de Bierschenk (1963). Illustrée par la Figure 34 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Elle consiste à écrire que la somme des rabattements induits par chaque palier est de la forme de l'équation de Jacob pour les paliers non enchainés : $\sum_1^n \Delta s_i = BQ + CQ^2$.

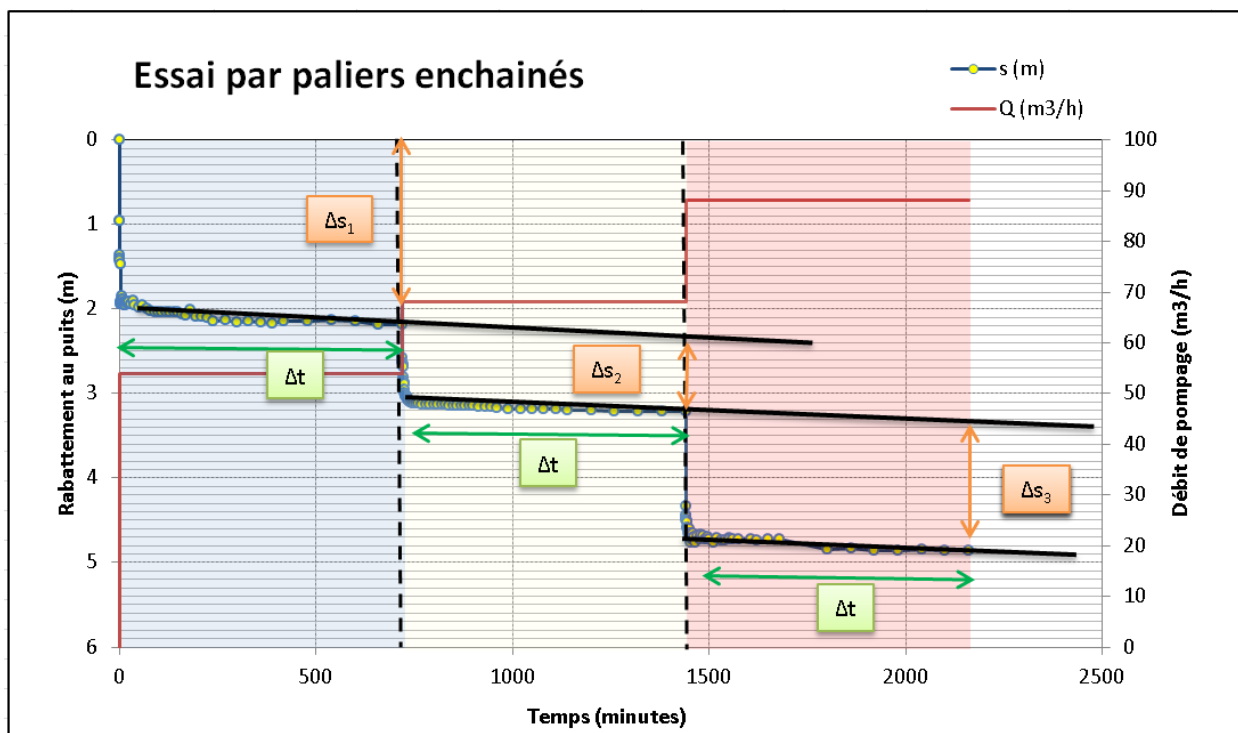


Figure 34 : Principe de la méthode de Bierschenk

Chaque rabattement individuel Δs est lu au bout d'un temps Δt identique pour chaque palier. L'interprétation se fait ensuite de la même manière que pour les paliers non enchainés, en prenant le cumul des rabattements individuels (Δs_1 , $\Delta s_1 + \Delta s_2$, $\Delta s_1 + \Delta s_2 + \Delta s_3 \dots$) en lieu et place des rabattements observés.

On remarque que la somme des rabattements individuels est proche des rabattements observés lorsque les niveaux dynamiques sont stabilisés et proches de l'horizontale. En revanche, l'écart se creuse dès lors que les rabattements ont une pente significative. En d'autres termes, plus la transmissivité est faible et plus le recours à la méthode de Bierschenk est justifié.

Pour une meilleure extrapolation des paliers, l'échelle semi-logarithmique peut être utilisée (Figure 35).

Le module d'interprétation des pompages par palier du logiciel Ouaip (v.1.9.4) ne considère qu'un couple de valeurs (Débit, rabattement) pour chaque palier. L'utilisateur doit donc appliquer la méthode de Bierschenk sur ses données brutes, dans un outil comme ExcelTM afin d'estimer la valeur du rabattement corrigé pour chaque palier. Ensuite, il poursuivra son interprétation avec Ouaip : saisie des couples de chaque palier, puis optimisation des paramètres B et C.

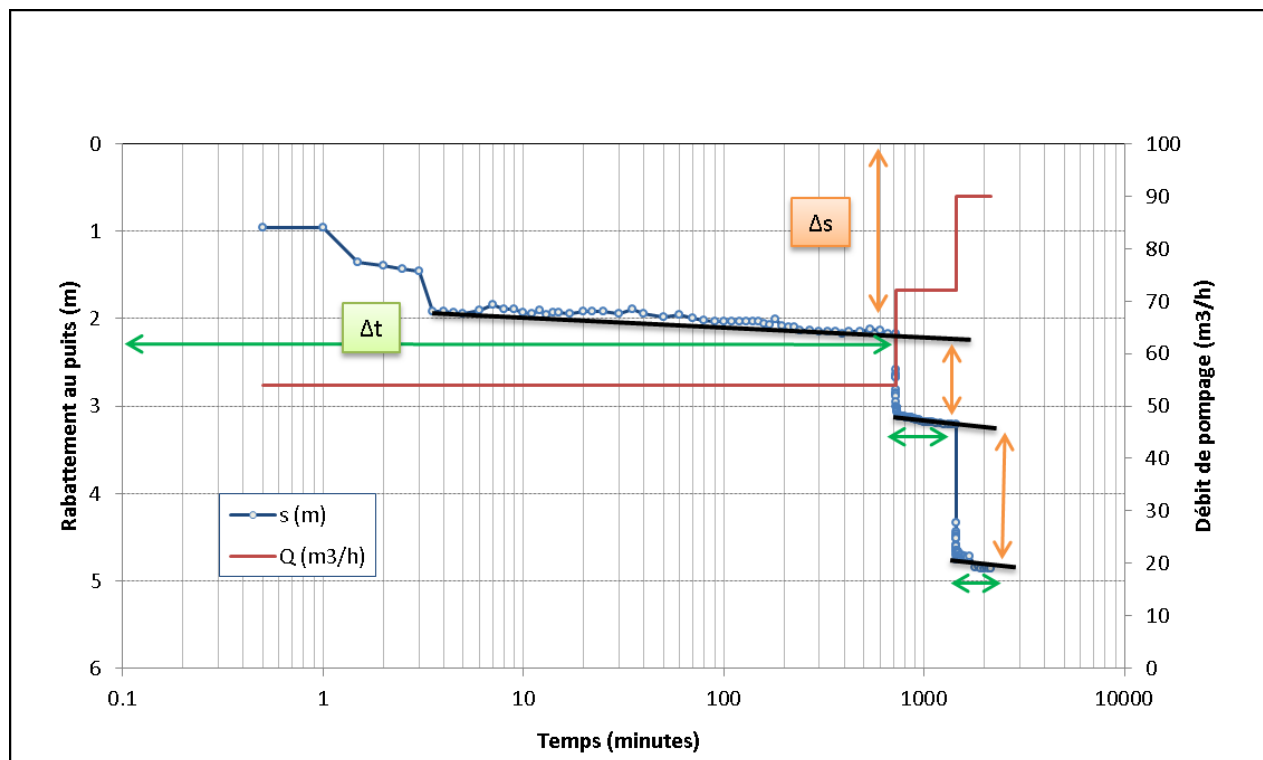


Figure 35 : Interprétation des essais par paliers enchainés (méthode de Bierschenk)

En prenant l'exemple de la Figure 33, l'interprétation selon la méthode de Bierschenk est présentée sur la Figure 35 tandis que l'interprétation sans correction (à partir des rabattements bruts) est présentée sur la Figure 36. A première vue, chacun des deux jeux de données (corrigés et non corrigés) aboutit au tracé d'une droite sur le graphique des rabattements spécifiques. Cependant, la pente de la droite et la valeur de l'ordonnée à l'origine sont différentes. Il en résulte un écart non négligeable sur le débit critique estimé (41,5 m³/h sans correction contre 64,2 m³/h avec correction).

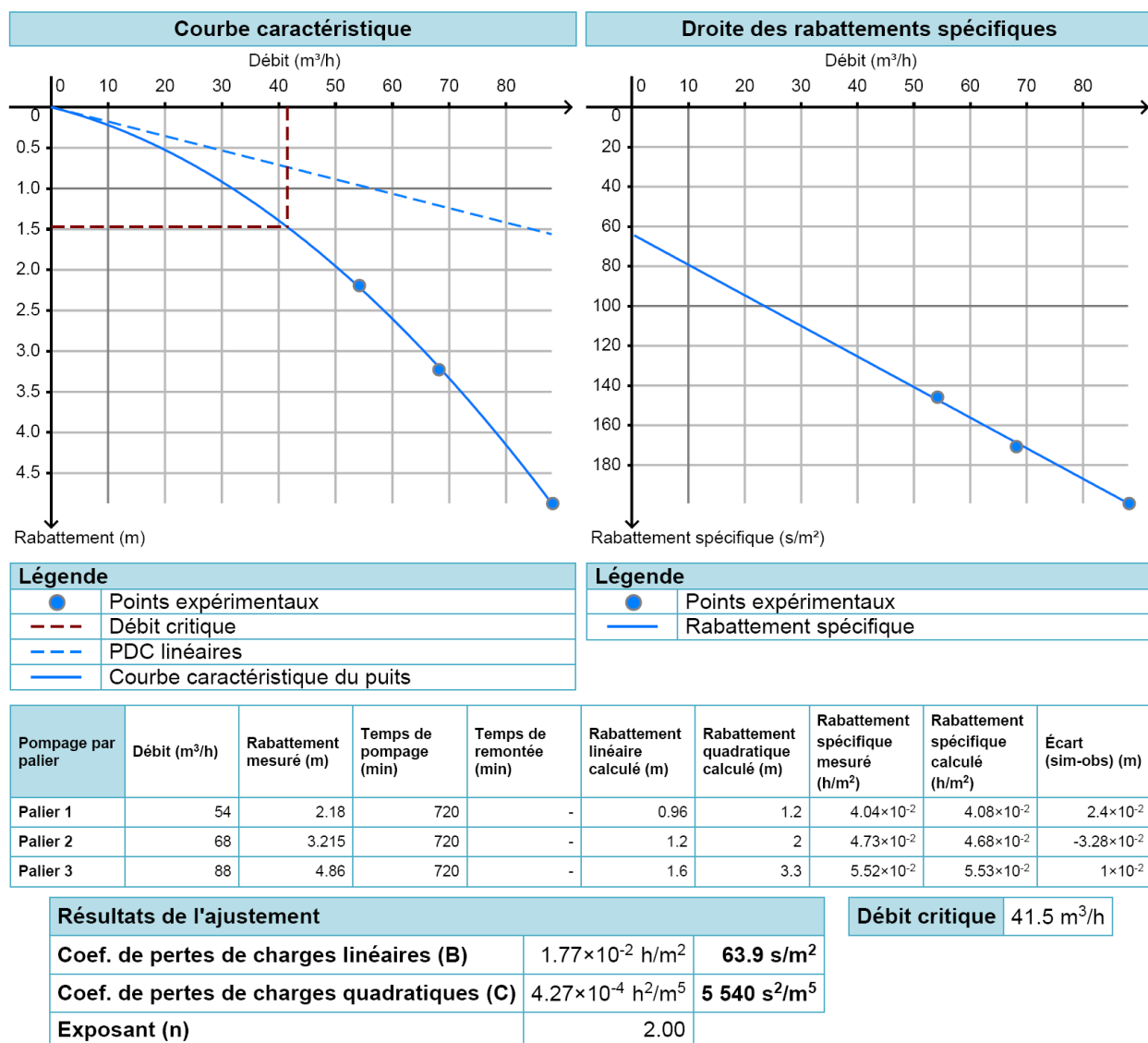


Figure 36 : Interprétation de l'essai par paliers enchainés sans correction

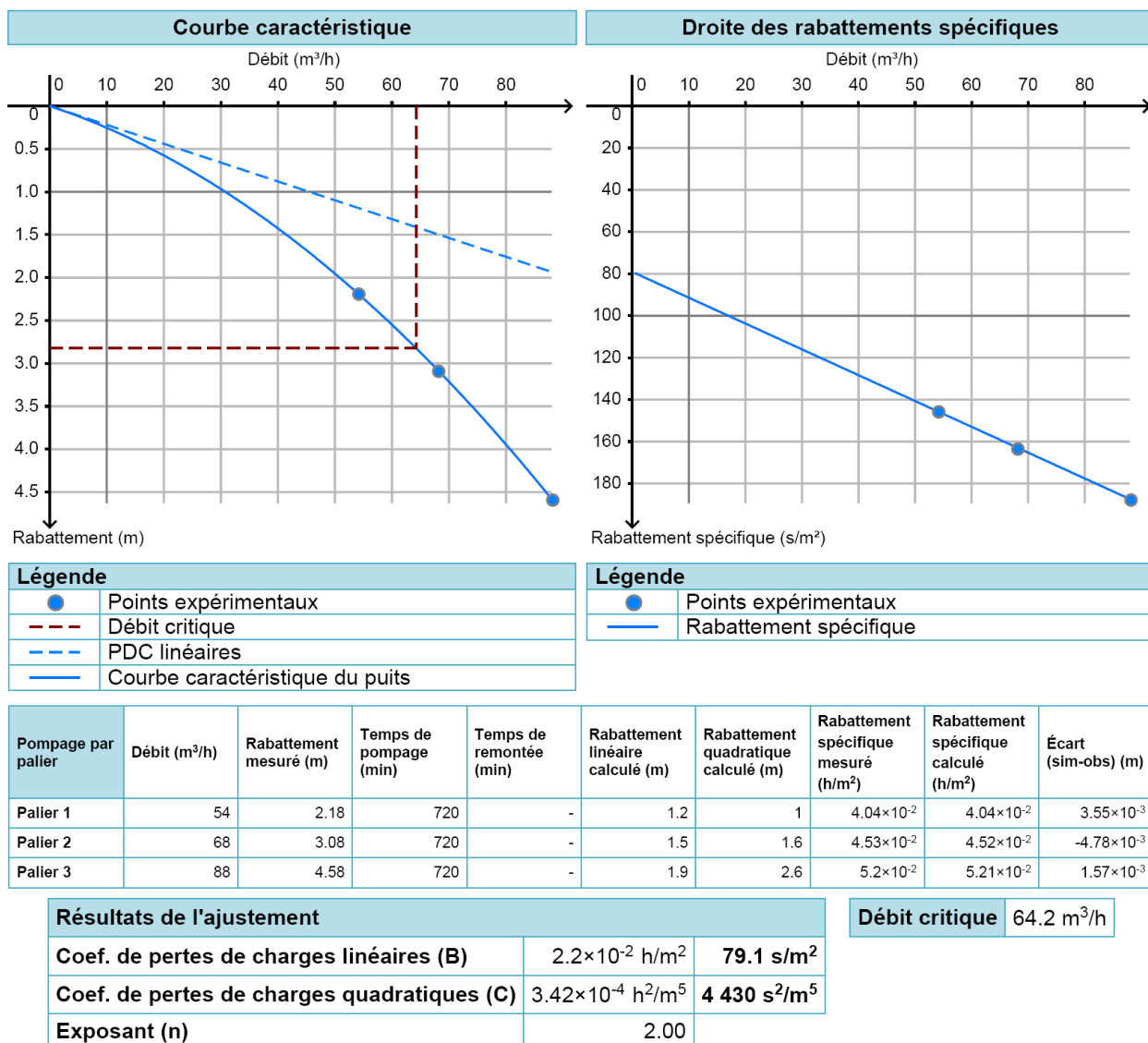


Figure 37 : Interprétation de l'essai par paliers enchainés avec la méthode de Bierschenk

La cohérence de la valeur du coefficient de pertes de charges quadratiques estimé avec la méthode de Bierschenk est vérifiée par une estimation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère par l'interprétation de l'essai à l'aide de la méthode de Theis (module interprétation du logiciel Ouaip). En fixant la valeur $C=4430 \text{ s}^5/\text{m}^2$, les valeurs $T=10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ et $S=10\%$ aboutissent à un ajustement très acceptable (Figure 38) entre les données observées et le calcul théorique.

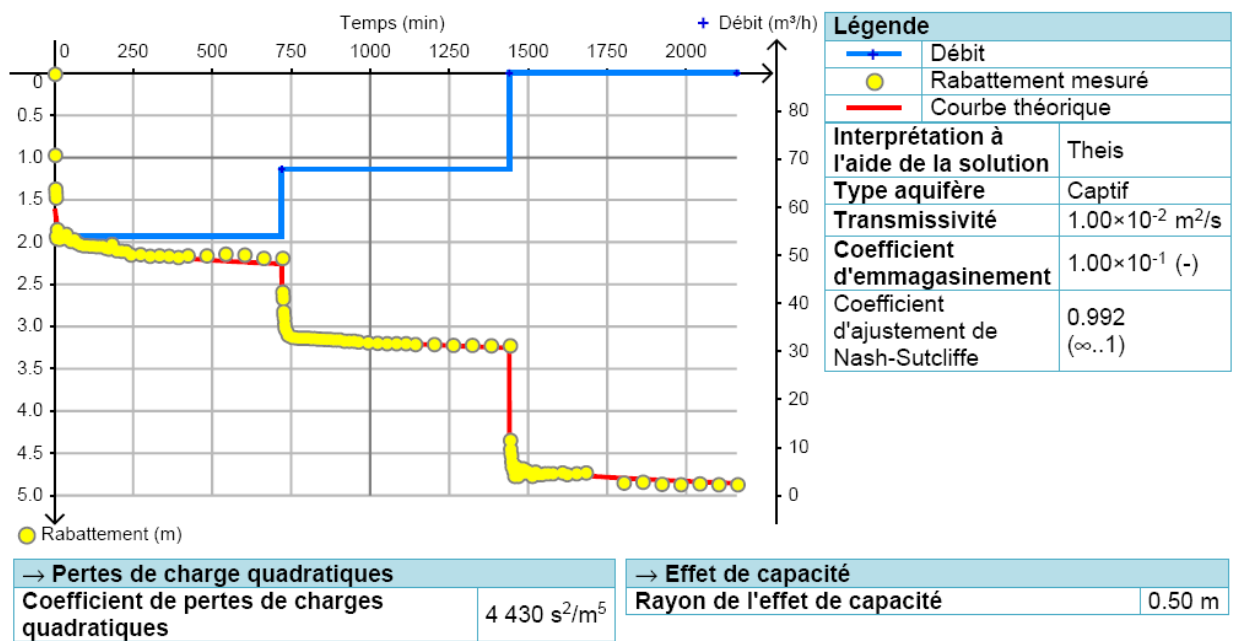


Figure 38 : Vérification de la cohérence de l'interprétation de l'essai par paliers enchainés

En reprenant les paramètres T et S du calage de l'essai sur la Figure 38 il est possible de simuler ce qu'aurait donné l'essai si les paliers n'avaient pas été enchainés. En considérant chaque palier indépendamment, les rabattements sont simulés avec le module simulation de Quaip, pour les trois débits. Les résultats sont exposés sur la Figure 39. Ils sont très proches de ceux obtenus avec la méthode de Bierschenk (débit critique estimé à $67 \text{ m}^3/\text{h}$).

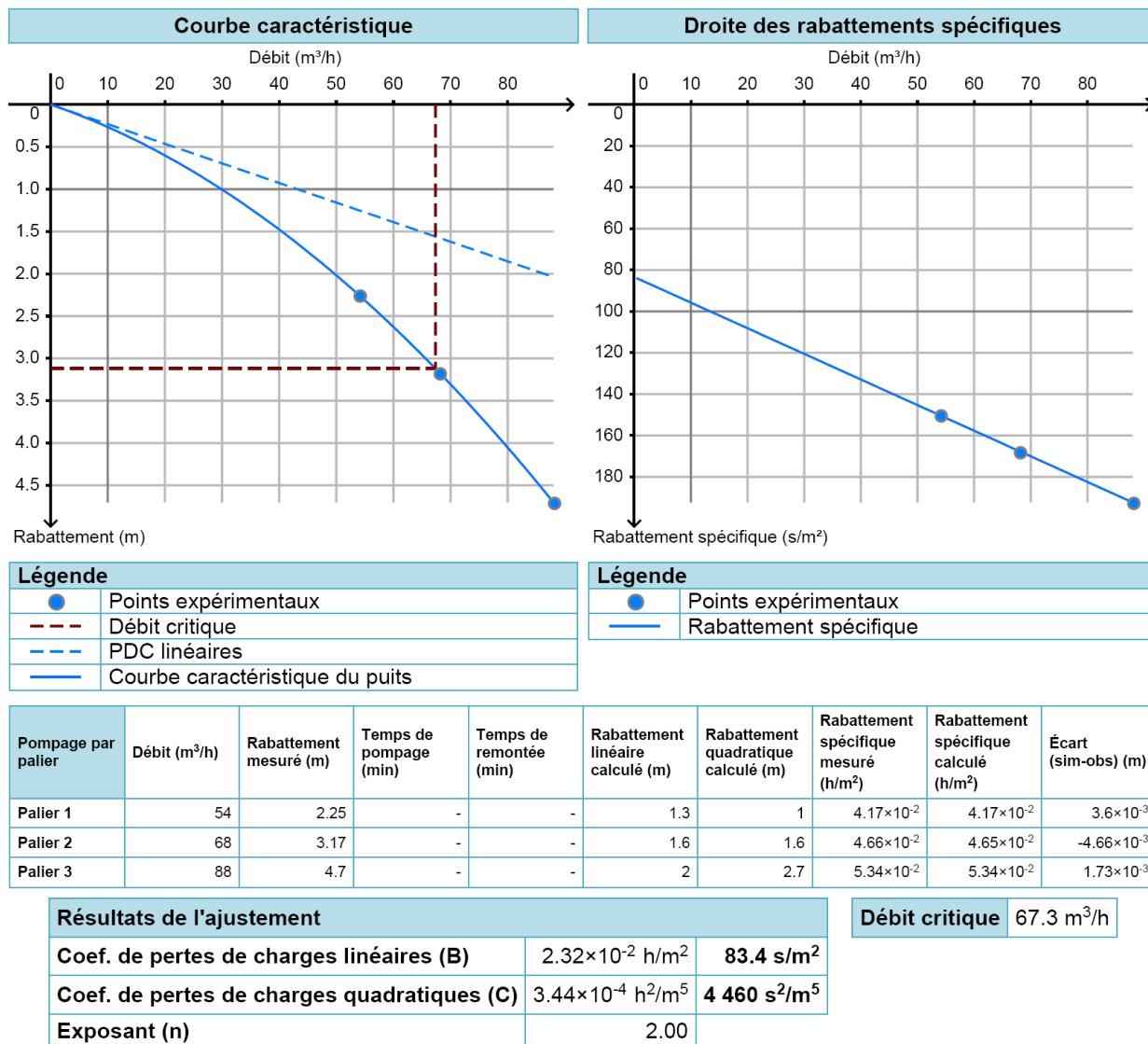


Figure 39 : Interprétation de l'essai si les paliers avaient été non enchainés

L'exemple qui vient d'être traité illustre :

- qu'un bon alignement des points sur le graphique des rabattements spécifiques ne prouve pas que l'interprétation est correcte.
- que l'approximation consistant à prendre le niveau statique sans correction par la méthode de Bierschenk résulte en une sous-estimation du débit critique non négligeable,
- que le débit critique est très sensible à la qualité de l'ajustement des paramètres B et C. Son interprétation est donc très dépendante du soin apporté dans la mesure des débits et des rabattements.

4.4.2. Effet de limites

La présence d'une discontinuité, d'un changement de faciès, d'un cours d'eau de surface ou souterrain dans le milieu est atteinte par le cône de rabattement d'un pompage au bout d'un temps t_i appelé temps d'interception. Si t_i est inférieur à la durée de l'essai par paliers enchainés, la présence de l'hétérogénéité va influencer le rabattement mesuré et par voie de conséquence, va perturber l'essai. L'influence des limites est nettement visible sur l'exemple de la Figure 40 où l'écart entre les deux courbes (avec et sans limite) se creuse avec le temps.

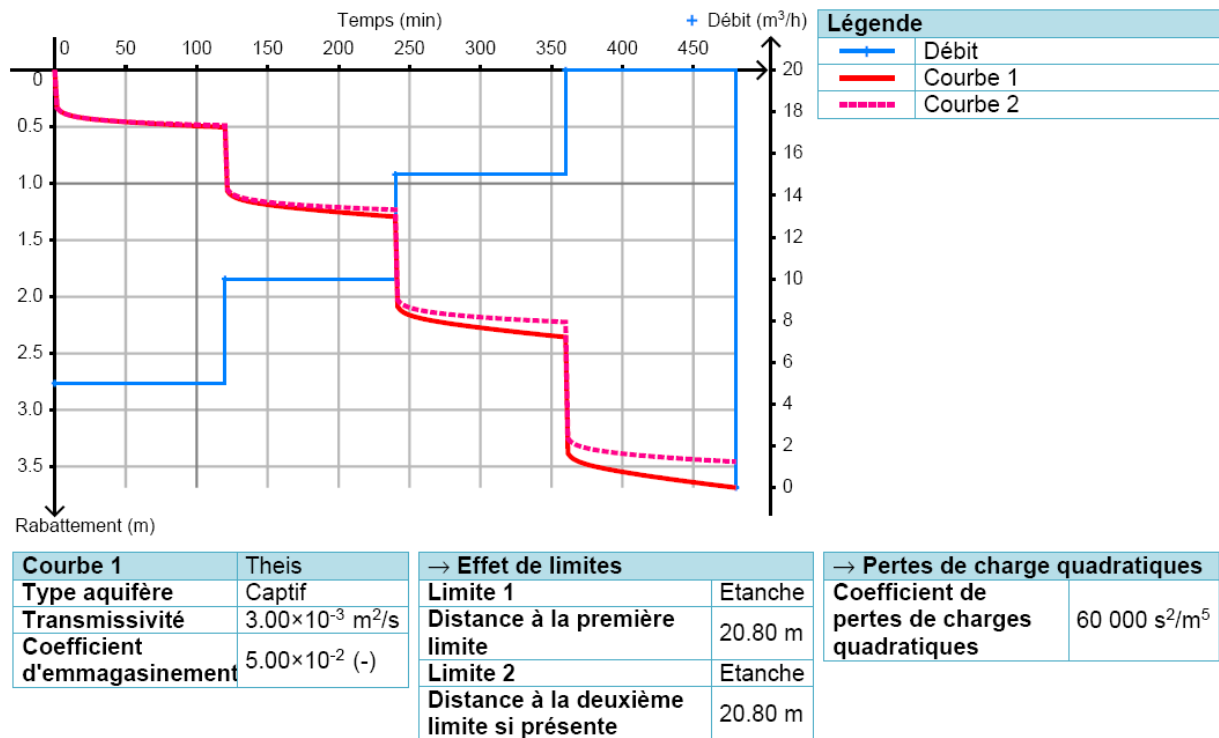


Figure 40 : Influence de l'effet de deux limites étanches sur l'essai par paliers enchainés (la courbe 2 représente l'essai sans les limites)

Notons que dans le cas d'un essai par palier non enchainé, la présence d'une hétérogénéité est moins susceptible de poser problème car la durée de chaque palier est courte (l'hétérogénéité ne sera peut-être pas atteinte) et toujours identique (son effet est constant sur l'essai).

Pour illustrer l'impact d'une hétérogénéité sur un essai par palier enchainé, nous utilisons l'exemple de la Figure 40, issue d'une simulation d'un essai par paliers enchainés en appliquant la solution analytique de Theis avec effet de deux limites étanches. Chaque limite est située à 20,80 m (le temps d'interception est ici d'une demi-heure). Les paramètres hydrodynamiques considérés sont les suivants :

$$T = 3.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S = 5\%$$

$$C = 60\,000 \text{ s}^2/\text{m}^5$$

Dans un premier temps, les graphiques sont élaborés avec les rabattements observés au bout de 120 minutes (Figure 42). Puis, à l'aide de la méthode de Bierschenk (Figure 41), les rabattements Δs et leur cumul $\Sigma \Delta s$ sont calculés pour tracer les graphiques d'interprétation

corrigés (Figure 43). Enfin, la simulation de 4 paliers indépendants (correspondant à un essai par palier non enchainés) est également présentée (Figure 44).

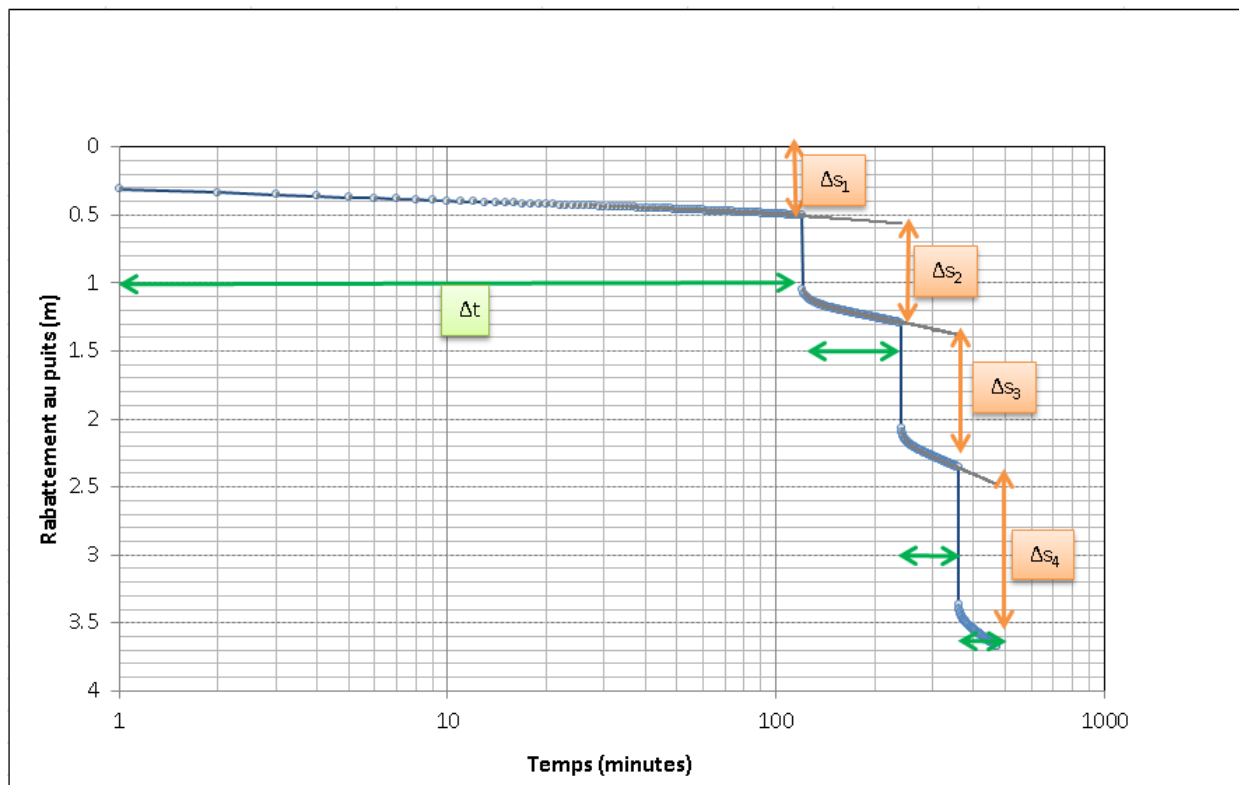


Figure 41 : Application de la méthode de Bierschenk à l'essai avec limites étanches

Le Tableau 3 synthétise les résultats : la méthode de Bierschenk réalise une correction parfaite. L'interprétation retrouve le coefficient de pertes de charges quadratiques de $60\,000\text{ s}^5/\text{m}^2$ utilisé pour simuler l'essai. Les débits critiques sont identiques entre l'interprétation avec Bierschenk et celle d'un essai par paliers non enchainés.

Omettre de faire la correction de Bierschenk aboutit à une surestimation du coefficient C et une sous-estimation du débit critique significative (20% dans cet exemple).

Méthode	Coefficient C (s^5/m^2)	Débit critique (m^3/h)
Paliers enchainés ; pas de correction	71 400	13,5 m^3/h
Paliers enchainés ; correction de Bierschenk	60 100	16,8 m^3/h
Paliers non enchainés	60 000	16,8 m^3/h

Tableau 3 : Comparaison des résultats des interprétations

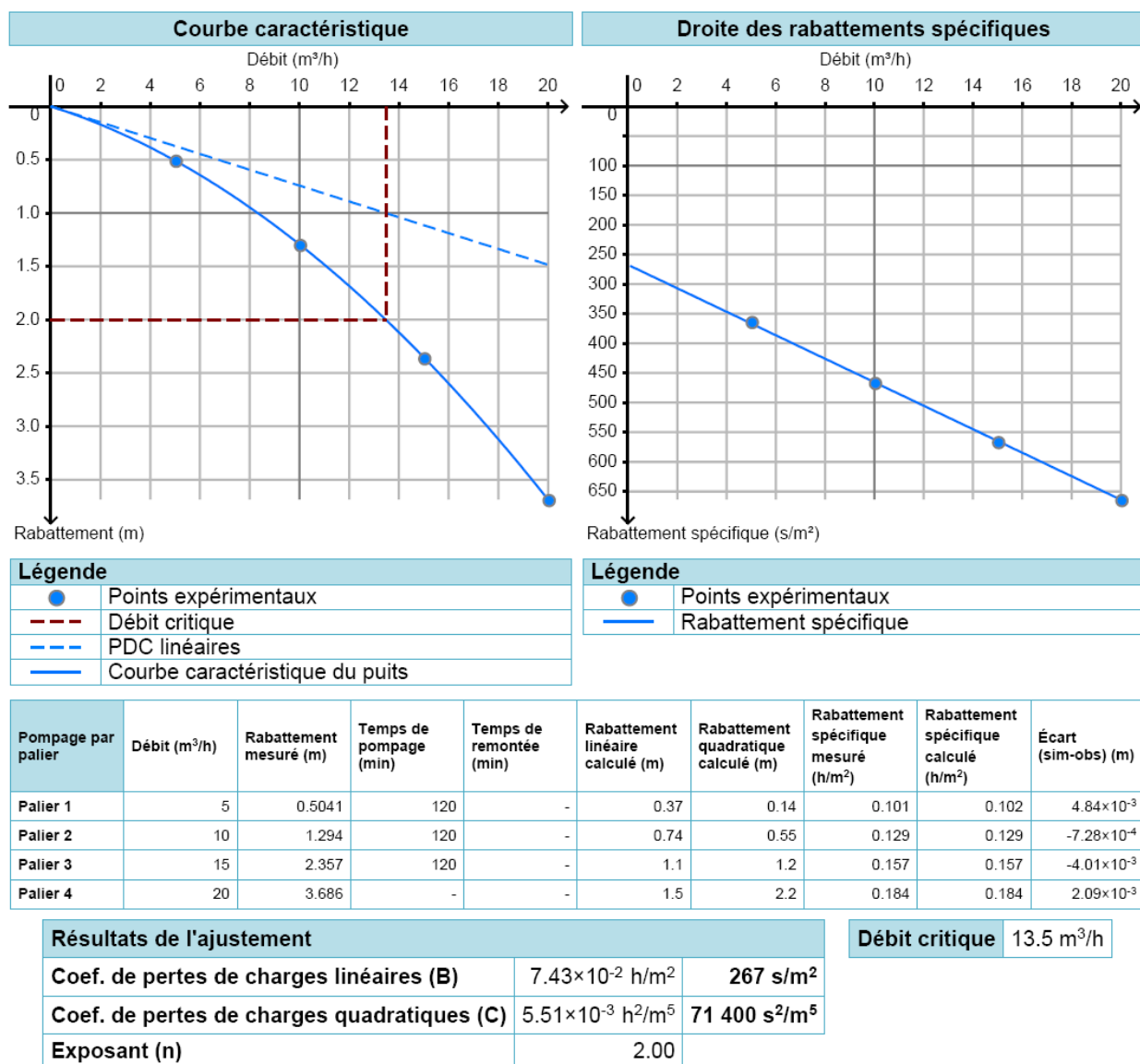


Figure 42 : Interprétation de l'essai par paliers enchainés avec 2 limites étanches, rabattements bruts.

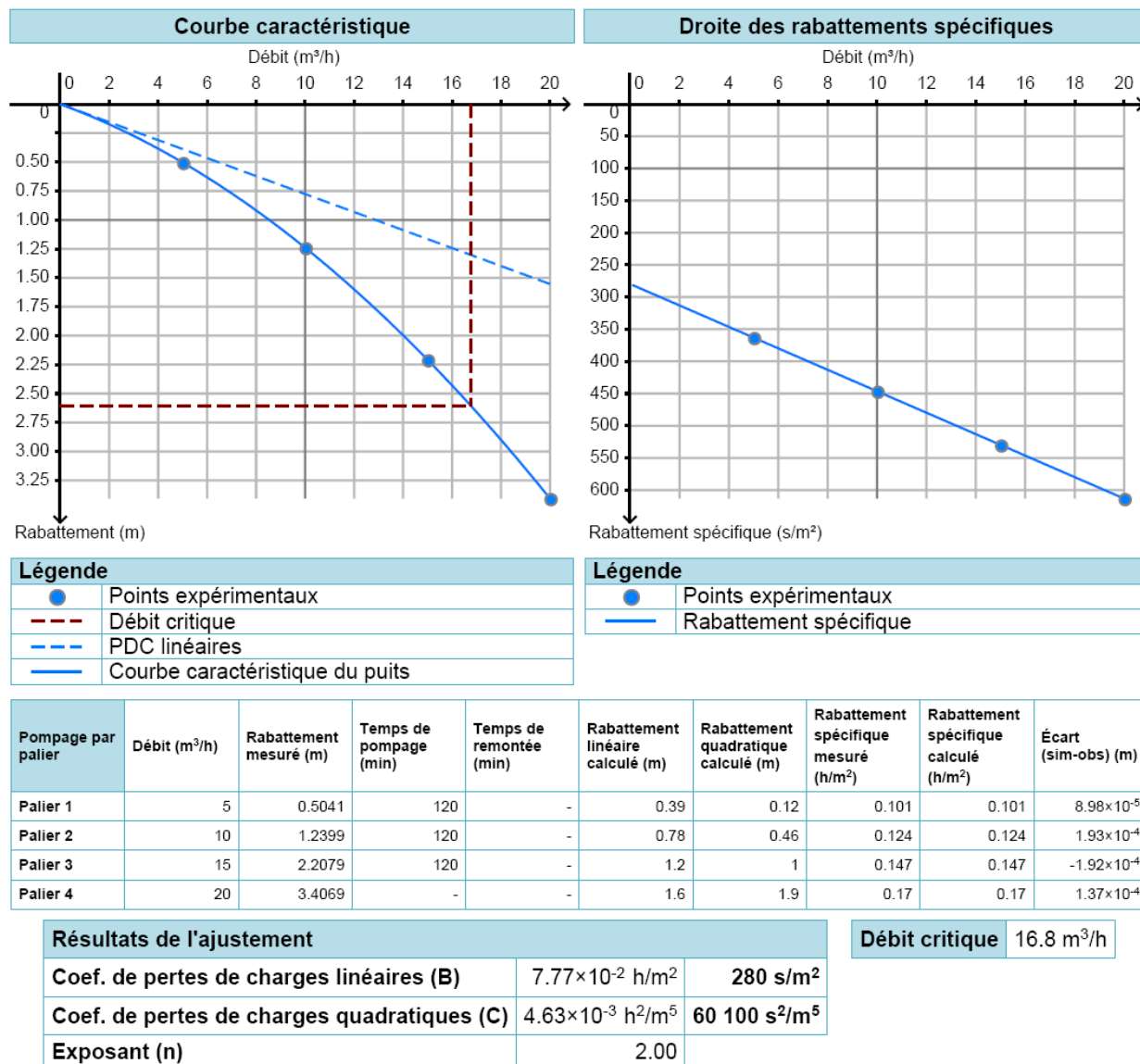


Figure 43 : Interprétation de l'essai par paliers enchainés avec 2 limites étanches méthode de Bierschenk

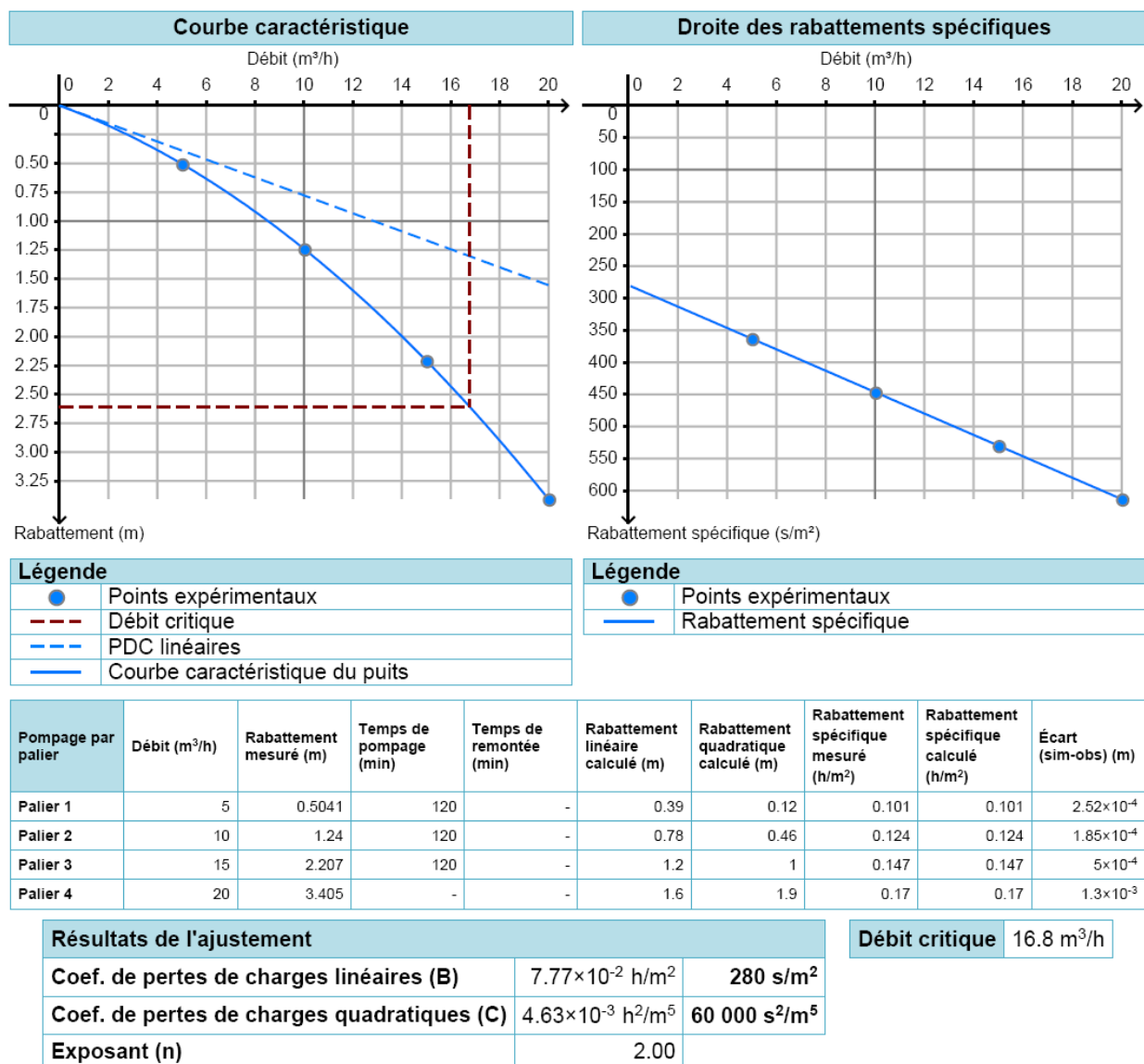


Figure 44 : Interprétation de l'essai par paliers non enchainés avec deux limites étanches

Ces différents calculs illustrent sur un exemple les principes énoncés précédemment, à savoir :

- Les essais par paliers enchainés sont plus difficiles à interpréter que les essais non enchainés, car il n'y a pas d'outil automatique pour effectuer les corrections qui s'imposent.
- Les essais par paliers enchainés interprétés comme des essais par paliers non enchainés aboutissent à une sous-estimation du débit critique non négligeable.
- Le coefficient C issu d'une interprétation d'un essai par palier non enchainé ou d'un essai par palier enchainés corrigé par la méthode de Bierschenk est cohérent et peut être intégré à une interprétation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère ou à une simulation de pompage dans le but de définir un débit d'exploitation.

5. Conclusions

Réaliser des pompages d'essais par paliers peut répondre à plusieurs objectifs :

- Caractériser le débit critique d'un ouvrage en vue de déterminer son débit d'exploitation
- Evaluer un coefficient de pertes de charge quadratique (ou non linéaire) qui sera utile dans l'interprétation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère.
- Diagnostiquer l'état d'un forage par comparaison avec un essai antérieur.

Ces objectifs sont facilement atteignables à condition de respecter quelques règles :

- Pomper suffisamment longtemps pour s'affranchir de l'effet de capacité du forage et atteindre un régime pseudo permanent (généralement 1 à 2 heures suffisent) ;
- Utiliser ou considérer des durées identiques pour chaque palier ;
- Permettre à la nappe de retrouver son niveau initial (ou un niveau très proche) avant de démarrer un nouveau palier de pompage ;
- Choisir les débits des paliers en tenant compte des contraintes techniques et hydrogéologiques : éviter de dénoyer les crépines, respecter une vitesse d'entrée dans les crépines $< 3 \text{ cm/s}$;

Certains opérateurs préféreront enchaîner les paliers pour des raisons essentiellement économiques. Ils doivent avoir conscience que l'enchaînement des paliers introduit un biais dans la valeur des rabattements observés induisant une forte incertitude sur le débit critique et le coefficient de pertes de charge quadratique. Ce type d'essai peut être efficacement interprété à condition de mettre en œuvre la méthode d'interprétation de Bierschenk, qui est moins facile d'utilisation que la méthode classique.

Le logiciel Ouaip est un outil pratique pour l'interprétation des pompages d'essais par palier à partir des couples de données (rabattement, débit) de chaque palier, qu'ils soient lus directement (cas des pompages par palier non enchainés) ou corrigés (cas des pompages par palier enchainés). Il permet en outre l'interprétation des paramètres hydrodynamiques et la simulation sur du long terme, qui constitue le préalable à la définition du débit d'exploitation du forage. Il est téléchargeable gratuitement sur le site <http://ouaip.brgm.fr>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Barker JA, Herbert R. 1992. A simple theory for estimating well losses with application to test wells in Bangladesh. Appl. Hydrogeol 0:20-31.
- Bierschenk, W. H. 1963. Determining well efficiency by multiple step-drawdown tests. International. Association of Scientific Hydrology 64: 493-507
- BURGEAP 1988. Essais de débit simplifié sur forage d'hydraulique villageoise. Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques C.I.E.H
- Castany G., 1982. Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod. ISBN 2-04-011221-9
- Dawson K.J., Istok J.D., 1992. Aquifer testing. Design and analysis of pumping and slug tests. CRC Press Ed. 344 p.
- Detay M., 1993. Le forage d'eau. Réalisation, entretien, réhabilitation. Masson Ed., 380 p.
- Driscoll F.G., Groundwater and Wells. Johnson Division. 1108 p.
- Forkasiewicz J., 1972. Interprétation des données de pompages d'essai pour l'évaluation des paramètres des aquifères. Rapport BRGM 72-SGN-273-AME
- Forkasiewicz J., 1978. Essais de puits par paliers de débit. Analyse et interprétation des données. Rapport BRGM 78-SGN-040-HYD
- Genetier B., 1984. La pratique des pompages d'essai en hydrogéologie. BRGM Coll. Manuels & méthodes n°9. 133 p.
- Gutierrez A., Klinka T., Elsass J., Croiset N., Dewandel B., 2016 : Manuel du logiciel Ouaip. Rapport BRGM en préparation.
- Jacob, C.E. 1947. Drawdown test to determine effective radius of artesian well. Trans. Am. Soc. Of Civil Engrs. Vol 112. Paper 2321 pp.1047-1064
- Klinka T., Gennevier M. 2012. Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des alluvions de la Gravone sur site de Piatanicia, Corse du sud. Rapport BRGM/RP-60905-FR
- Kruseman, G.P.& de Ridder, N.A. (1990). Analysis and evaluation of pumping test data. Publication Series no 47. International Institute for Land Recycle and Improvement (IILRI), Wageningen, The Netherlands, 213 p.
- Lauga R., 1990. Pratique du forage d'eau. Seesam Ed.
- Mogg J. 1969. Step-drawdown test needs critical review. Groundwater, vol 7, n°1, 1969
- Mistear B., Banks D., Clark L., 2006. Water wells and Boreholes. John Wiley & sons.489 p.
- Parsons S.B., 1994. A re-evaluation of well design procedures. Q J Eng Geol 27:S31-S40
- Rorbaugh M.J., 1953. Graphical and theoretical analysis of step-drawdown test of artesian well. Proceedings separate, n°362 ASCE, vol. 79

Roscoe Moss company; 1989. Handbook of Groundwater development. John Wiley & sons Ed. 493 p.

Theis C.V., 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. ; Am.Geophys.Union Trans.; Vol. 16; p. 519-524

Walton W.C., 1970. Groundwater resource evaluation. Mc Graw Hill, 664 p.



Centre scientifique et technique
Direction des Géoressources / Division Géothermie
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr