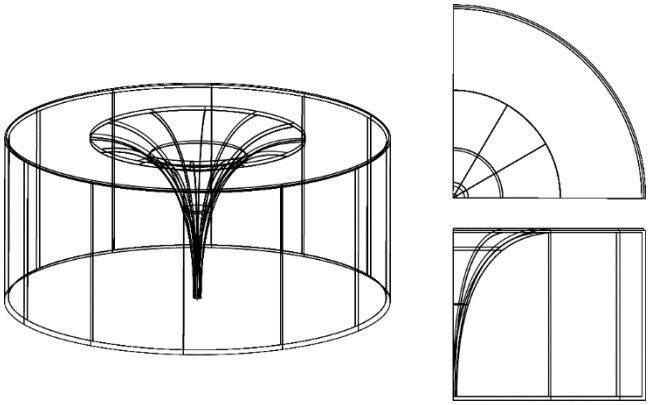
Document public

Manuel de OUAIP v2 – Outil d'Aide à l'Interprétation des Pompages d'essai

Rapport final

BRGM/RP-68509-FR
Janvier 2020



OUAIP

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Manuel de OUAIP v2

Rapport final

BRGM/RP-68509-FR
Janvier 2020

T. KLINKA, A. GUTIERREZ
Avec la collaboration de
J. ELSASS, B. LETAT

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Benoît DEWANDEL	Nom : Pascal AUDIGANE
Fonction : Hydrogéologue	Fonction : Responsable D3E/GDR
Date : 10/12/2018	Date : 17/01/2019
Signature **:**	Signature **:**

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

OUAIP

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots-clés : OUAIP, pompage d'essai, essai de puits, essai de nappe, méthode d'interprétation, logiciel d'interprétation, outil, programme, VBA.NET, rabattement, nappe, aquifère, solution analytique, Theis, Hantush, Jacob.

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

KLINKA T., GUTIERREZ A. (2020) – Manuel de OUAIP v2 – Outil d'Aide à l'Interprétation des Pompages d'essai. Rapport final. BRGM/RP-68509-FR, 136 p., 127 ill.

Rapport téléchargeable à cette adresse : http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-68509-FR.pdf

© BRGM, **2020**, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

L'interprétation des pompages d'essai a bénéficié depuis le milieu du XXème siècle du développement de méthodes et de solutions analytiques permettant de déterminer des caractéristiques hydrodynamiques du puits de pompage et de l'aquifère pompé. Dès les années 1980 ces méthodes ont été transcrites dans des outils informatiques prenant en compte des solutions mathématiques de plus en plus complexes.

Le logiciel OUAIP (Outil d'Aide à l'Interprétation des Pompages d'essai) est dans la continuité du logiciel ISAPE (BRGM). Il est développé sur financement interne en langage VBA.NET et mis en ligne gratuitement sur le site du BRGM (https://www.brgm.fr/production-scientifique/logiciels-scientifiques/logiciels-scientifiques). La version 2 apporte quelques améliorations par rapport à la version précédente (1.9.4) : corrections de bugs d'affichage, possibilité de mettre plusieurs courbes caractéristiques sur un même graphique, suppression du numéro de licence, amélioration du manuel d'utilisation.

Le manuel présente les opérations d'installation du logiciel, les principes de base, la description des différents menus. Une large part du manuel est consacrée à des exemples d'application à partir des jeux de données réels fournies avec le logiciel.

L'outil OUAIP est un logiciel gratuit et collaboratif dans le sens où les utilisateurs peuvent contribuer à son amélioration par l'ajout de formules analytiques et sa traduction en différentes langues. Il existe en français et en anglais pour l'instant.

Bien qu'ayant fait l'objet de nombreux tests, la version 2.3 qui sert de base à ce manuel n'est probablement pas exempt d'erreurs ou de bugs. Les éventuelles anomalies peuvent être signalées et adressées à l'adresse ouaip@brgm.fr.

L'outil est distribué gratuitement de manière à rendre service à la communauté des hydrogéologues. Le BRGM ne garantit pas les résultats et ne pourra être tenu responsable en cas de litige.

Sommaire

1. Introduction 11

1.1. QU'EST-CE QUE OUAIP ? 11

1.2. OBJECTIFS DU LOGICIEL OUAIP 13

1.3. FONCTIONNALITÉS DE OUAIP V2.3 14

1.4. INSTALLATION 14

1.5. PRESENTATION DU LOGICIEL OUAIP 17

1.5.1. L'invite de OUAIP 17

1.5.2. L'interface graphique 21

2. Principes 23

2.1. INTERPRÉTATION D'UN ESSAI DE PUITS 23

2.2. SOLUTIONS ANALYTIQUES POUR L'INTERPRÉTATION D'UN ESSAI DE NAPPE OU LA SIMULATION DES POMPAGES D'ESSAI 25

2.2.1. Solution de Theis (1935) 26

2.2.2. Solution de Papadopulos-Cooper (1967) 28

2.2.3. Solution de Hantush-Jacob (1955) 30

2.2.4. Solution de Gringarten-Witherspoon (1972) 33

2.3. DESCRIPTION DES EFFETS ADDITIONNELS 36

2.3.1. Effet de capacité 36

2.3.2. Effet de vidange 38

2.3.3. Effet de skin (effet pariétal) 38

2.3.4. Pertes de charge quadratiques 39

2.3.5. Effets de limites (alimentée, étanche) 40

3. Première utilisation rapide de OUAIP 45

3.1. INTERPRÉTER UN ESSAI DE PUITS 45

3.2. INTERPRÉTER UN ESSAI DE NAPPE 45

3.3. SIMULER UN POMPAGE D'ESSAI 46

4. Interface graphique de OUAIP 47

4.1. INTERFACE DE SAISIE : LES ONGLETS 47

4.1.1. Onglet Données 47

4.1.2. Onglet Formule 55
4.1.3. Onglet Paramètres 58
4.1.4. Onglet Rapport 65

4.2. RÉSULTATS EN TEMPS RÉEL : LES GRAPHIQUES 70

4.3. LES BARRES D'OUTILS 72
4.3.1. Barre d'outils Projet 72
4.3.2. Barre d'outils Ajustement 73
4.3.3. Barre d'outils Graphique 74
4.3.4. Barre d'outils Courbe 75

4.4. LES OPTIONS DU GRAPHIQUE 78
4.4.1. Onglet Général 79
4.4.2. Onglet Axe X 81
4.4.3. Onglet Axe Y 83
4.4.4. Onglet Axe Y2 84
4.4.5. Onglet Format 84
4.4.6. Onglet Divers 86

4.5. OPTIONS AVANCÉES DE OUAIP – FICHIERS *.INI 87
4.5.1. Options.ini 88
4.5.2. Formules.ini 88
4.5.3. Bornes.ini 89
4.5.4. Unites.ini 90
4.5.5. Langue.ini 91

5. Exemples d'utilisation 93

5.1. ESSAIS DE PUITS 93
5.1.1. Tutoriel n°1 - Interprétation unique 93
5.1.2. Tutoriel n°2 - Interprétation comparée 104
5.1.3. Autres tutoriels 106

5.2. INTERPRÉTER UN ESSAI DE NAPPE 107
5.2.1. Tutoriel n°5 - Solution de Theis (1936) 107
5.2.2. Tutoriel n°6 - Solution de Papadopulos-Cooper (1967) 117
5.2.3. Tutoriel n°7 - Solution de Hantush (1964) 120
5.2.4. Tutoriel n°8 - Solution de Gringarten-Witherspoon (1972) 122

5.3. SIMULER UN POMPAGE D'ESSAI 123
5.3.1. Tutoriel n°9 - Simulation de l'exploitation des eaux souterraines 123
5.3.2. Tutoriel n°10 - Optimisation du débit de pompage sous contrainte de rabattement 129

6. Conclusion et perspectives 133

7. Bibliographie 135

Liste des illustrations

Illustration 1 : Exemple de simulation prédictives des rabattements au droit d'un puits de pompage 16h/24 pendant 10 jours. En bleu : chronique de pompage, en rouge, rabattement modélisé..... 11

Illustration 2 : Extraction de l'archive ZIP OUAIP 14

Illustration 3 : Procédure d'extraction de l'archive ZIP OUAIP 15

Illustration 4 : Arborescence et contenu du répertoire de OUAIP 15

Illustration 5 : A la première éxécution OUAIP propose d'associer les fichiers projet (*.ouaipp, *.ouaipi, *.ouaips) avec le programme OUAIP.exe..... 16

Illustration 6 : Affichage des raccourcis clavier au passage de la souris sur les icônes..... 16

Illustration 7 : Invite de OUAIP v2.3 18

Illustration 8 : Projets récents de OUAIP 19

Illustration 9 : Fenêtre Parcourir de OUAIP 19

Illustration 10 : Fenêtre À propos de OUAIP 20

Illustration 11 : Interface générale de OUAIP (les flèches indiquent les redimensionnements possibles des différentes fenêtres) 21

Illustration 12 : Schéma simplifié des pertes de charge dans un ouvrage et dans l'aquière 24

Illustration 13 : Synthèse des solution analytiques de OUAIP et des effets additionnels disponibles 26

Illustration 14 : Schéma de la configuration de la solution de Theis 26

Illustration 15 : Schéma de la configuration de la solution de Papadopulos-Cooper..... 28

Illustration 16 : Schéma de la configuration de la solution de Hantush 32

Illustration 17 : Schéma de la configuration de la solution de Gringarten-Witherspoon 33

Illustration 18 : Prise en compte des effets 36

Illustration 19 : Schéma de l'incidence de l'effet de capacité dans un ouvrage en pompage..... 37

Illustration 20 : Paramètre rc de l'effet de capacité 38

Illustration 21 : Paramètres de l'effet de vidange 38

Illustration 22 :Schéma de l'effet de skin..... 39

Illustration 23 : Effet pariétal, effet de skin 39

Illustration 24 : Paramètre des pertes de charge quadratiques 40

Illustration 25 : Calcul des pertes de charge quadratiques au travers de la perte de charge (rabattement en m) pour un débit donné 40

Illustration 26 : Schéma de l'effet d'une limite alimentée (en haut) et d'une llimite étanche (en bas) sur le cône de rabattement 41

Illustration 27 : Schéma de la définition des limites dans un repère orthonormé..... 42

Illustration 28 : Paramètres de l'effet de limites au puits (cliquer sur le schéma pour l'agrandir) 43
Illustration 29 : Paramètres de l'effet de limites au piézomètre (schéma cliquable) 43
Illustration 30 : Onglets du mode interprétation d'un essai de puits 47
Illustration 31 : Onglets du mode interprétation d'un essai de nappe ou simulation d'un pompage d'essai 47
Illustration 32 : Onglet Données en mode interprétation d'un essai de puits 48
Illustration 33 : Onglet Données (en mode interprétation d'un essai de nappe) 50
Illustration 34 : Convention de temps pour les débits variables 51
Illustration 35 : Fenêtre pour saisir et éditer des données 52
Illustration 36 : Unité des données importées dans OUAIP 53
Illustration 37 : Filtrage des données de temps, rabattement et débit 53
Illustration 38 : Sélection d'un intervalle de rabattement (en rouge) 54
Illustration 39 : Informations synthétiques sur les données importées 55
Illustration 40 : Onglet Données (en mode simulation d'un pompage d'essai) 55
Illustration 41 : Onglet Formule 56
Illustration 42 : Description des paramètres de la solution analytique et schéma conceptuel associé 58
Illustration 43 : Calcul d'un débit critique selon OUAIP 59
Illustration 44 : Onglet Paramètres en mode interprétation d'un essai de puits par paliers de débit non enchainés 60
Illustration 45 : Onglet Paramètres en mode interprétation d'un essai de nappe 61
Illustration 46 : Modification des paramètres à l'aide des raccourcis clavier Ctrl ou Shift 62
Illustration 47 : Description des paramètres de la solution de Theis 62
Illustration 48 : Menu déroulant des unités 62
Illustration 49 : Utilisation du convertisseur d'unité de OUAIP 63
Illustration 50 : Bornes d'un paramètre (Transmissivité) 63
Illustration 51 : Onglet Paramètres en mode simulation d'un pompage d'essai 64
Illustration 52 : Fonctionnalité Optimisation du débit en mode simulation d'un pompage d'essai 64
Illustration 53 : Onglet Rapport en mode interprétation d'un essai de puits 66
Illustration 54 : Fenêtre d'exportation du rapport en PDF et/ou HTML 67
Illustration 55 : Aperçu avant impression du rapport 68
Illustration 56 : Onglet Rapport en mode interprétation d'un essai de nappe 69
Illustration 57 : Graphiques affichés en mode interprétation d'un essai de puits 70
Illustration 58 : Graphiques affichés en mode interprétation d'un essai de nappe 71
Illustration 59 : Barres d'outils Projet 72
Illustration 60 : Barre d'outils Courbe 75
Illustration 61 : Tableau de valeurs 76
Illustration 62 : Tableau de valeurs – Exemple de calcul des valeurs 77
Illustration 63 : Graphiques de OUAIP et options du graphique 78

Illustration 64 : Menu contextuel des graphiques via clic droit 79
Illustration 65 : Fenêtre Options du graphique – Onglet Général 79
Illustration 66 : Fenêtre style des points 80
Illustration 67 : Fenêtre style des courbes 81
Illustration 68 : Options du graphique – Axe X 82
Illustration 69 : Fenêtre Axe Y 83
Illustration 70 : Fenêtre Axe Y2 84
Illustration 71 : Fenêtre Format 85
Illustration 72 : Fenêtre Définir … (la police) 85
Illustration 73 : Fenêtre Couleur 86
Illustration 74 : Fenêtre Divers 87
Illustration 75 : Fichiers *.ini dans le répertoire de OUAIP 87
Illustration 76 : Définition des bornes 89
Illustration 77 : Traduction des libellés 91
Illustration 78 : Système de traduction de OUAIP dans d'autres langues 91
Illustration 79 : Système de traduction de OUAIP 92
Illustration 80 : Menu traduction 92
Illustration 81 : Évolution des rabattements en fonction du débit de pompage 94
Illustration 82 : Synthèse des données de l'essai par paliers 94
Illustration 83 : Onglet Données 95
Illustration 84 : Copier-coller des données depuis un tableur vers OUAIP 96
Illustration 85 : Graphiques Courbe caractéristique et Droite des rabattements spécifiques 97
Illustration 86 : Tracé manuel de la droite des rabattements spécifiques 99
Illustration 87 : Estimation du coefficient de perte de charge linéaire 99
Illustration 88 : Info bulle pour la modification des paramètres 100
Illustration 89 : Modification des paramètres 100
Illustration 90 : Résultat après calage 101
Illustration 91 : Détermination du débit critique 102
Illustration 92 : Onglet Rapport 102
Illustration 93 : Rapport d'interprétation de l'essai de puits 103
Illustration 94 : Ajout d'un nouveau jeu de données 104
Illustration 95 : Liste des courbes et association d'un jeu de données (colonne « Référence test ») 105
Illustration 96 : Associer un jeu de données 105
Illustration 97 : Comparaison des interprétations des deux essais de puits 106
Illustration 98 : Onglet Données 107
Illustration 99 : Import des débits 108
Illustration 100 : Options de filtrage des données 109
Illustration 101 : Filtrage des données 110

Illustration 102 : Conséquence du filtrage des données sur le rabattement (points blancs filtrés)110
Illustration 103 : Saisie et visualisation directe des données 111
Illustration 104 : Activation de l'onglet Formule 111
Illustration 105 : Onglet Formule 112
Illustration 106 : Modification des paramètres 112
Illustration 107 : Initialisation des paramètres 113
Illustration 108 : Ajustement des paramètres 113
Illustration 109 : Modification des bornes des paramètres 114
Illustration 110 : Définition des bornes des paramètres 115
Illustration 111 : Ajout d'une nouvelle courbe 115
Illustration 112 : Ajustement de deux courbes 116
Illustration 113 : Rabattement et débit de pompage 118
Illustration 114 : Rabattement simulé avec la solution de Papadopulos-Cooper (effet de limite alimentée et pertes de charge quadratiques) 119
Illustration 115 : Rabattement et débit de pompage 121
Illustration 116 : Ajustement de la solution analytique de Hantush aux données expérimentales122
Illustration 117 : Saisir / Éditer les débits de pompage 124
Illustration 118 : Menu Edition – Répéter la sélection en incrémentant n fois 125
Illustration 119 : Paliers de débit 125
Illustration 120 : Répéter les paliers de débit 126
Illustration 121 : Chronique de pompage générée 126
Illustration 122 : Visualisation de la chronique de pompage 127
Illustration 123 : Évolution des rabattements simulés en fonction de différentes configurations de l'aquifère 128
Illustration 124 : Tableau de valeurs 129
Illustration 125 : Saisie du motif de débit à répéter pour constituer la chronique de pompage de 30 jorus 130
Illustration 126 : Cycles de pompages, rabattement simulé et rabattement maximal souhaité (ligne rouge horitonzale à s=33 m) 131
Illustration 127 : Application de l'optimisation du débit 132

1. Introduction

1.1. QU'EST-CE QUE OUAIP ?

OUAIP (se prononce « wep ») est l'acronyme d'**Ou**til d'**A**ide à l'**I**nterprétation des **P**ompages d'essai.

Il s'agit d'un logiciel développé par le BRGM (D3E – Unité Gestion De la Ressource), diffusé gratuitement et destiné à l'interprétation des pompages d'essai pratiqués en hydrogéologie, tels que :

- Les essais de puits (essai par paliers de débits non enchainés).
- Les essais de nappe (essai de longue durée à débit constant ou variable).
- Il permet en outre de simuler de manière prédictive l'évolution du niveau des eaux souterraines soumises à l'effet d'une chronique de pompage (Illustration 1).

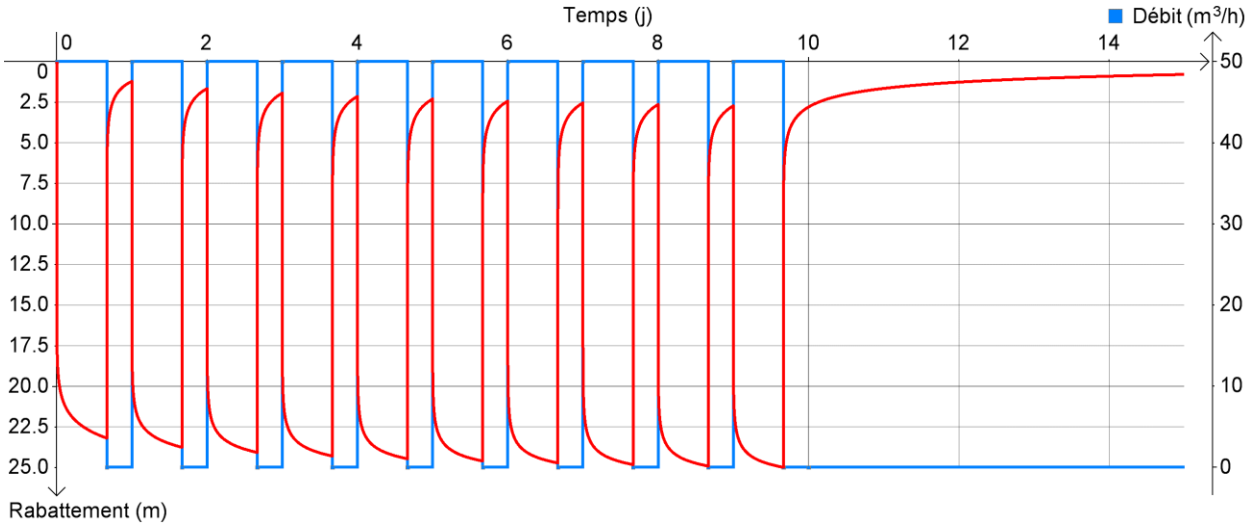


Illustration 1 : Exemple de simulation prédictives des rabattements au droit d'un puits de pompage 16h/24 pendant 10 jours. En bleu : chronique de pompage, en rouge, rabattement modélisé

Le logiciel OUAIP, ainsi que ce manuel, peuvent-être téléchargés à l'adresse : http://ouaip.brgm.fr

Il suffit pour cela au travers du formulaire en ligne de donner une adresse e-mail valide pour le télécharger. Contrairement à la version 1.9.4, OUAIP v2 (et versions supérieures) ne nécessite pas l'utilisation d'un code utilisateur OUAIP, il peut être installé sans aucune contrainte sur un ou plusieurs ordinateurs, salle de cours, en entreprise.

Ce manuel a pour objectif de présenter succinctement la prise en main de OUAIP au travers de 10 tutoriels permettant de survoler les principales fonctionnalités du logiciel.

Il s'agit de :

- L'interprétation d'un **essai de puits** (essai par paliers de débit non enchainés).
- L'interprétation d'un **essai de nappe** (essai de longue durée à débit constant ou variable) selon 4 solutions analytiques différentes.
- La **simulation prédictive des rabattements** de la nappe souterraine sur la base des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère et des propriétés hydrauliques du puits.

L'Illustration 7 montre l'invite de OUAIP, trois modules de fonctionnement sont proposés à l'utilisateur, de haut en bas :

- (1) Un mode pour l'interprétation des essais de puits afin de caractériser les performances de l'ouvrage (pertes de charge quadratiques, débit critique éventuel).
- (2) Un mode pour l'interprétation des essais de nappes permettant de déterminer la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement du milieu souterrain à partir de mesures de niveau/débit réalisées au puits ou aux piézomètres pendant la phase de pompage et la phase de remontée.
- (3) Un mode simulation du niveau dynamique qui consiste à calculer de manière prédictive l'évolution des niveaux d'eau induits dans un puits de pompage et/ou un piézomètre par une chronique de pompage déterminée, plus ou moins complexe.

Au moment de sa rédaction, ce manuel est basé principalement sur la version 2.2 r14 de OUAIP, datée du 14/03/2018. Il se peut que selon les versions du logiciel, l'interface graphique ou certaines fonctionnalités aient légèrement changés.

Pour **citer l'utilisation de OUAIP** dans vos rapports d'études, vous pouvez utiliser la citation suivante :

KLINKA T., GUTIERREZ A. (2020) – Manuel de OUAIP v2 – Outil d'Aide à l'Interprétation des Pompages d'essai. Rapport final. BRGM/RP-68509-FR, 134 p., 127 ill.

Pour notifier un bug que vous auriez rencontré vous pouvez nous écrire à l'adresse : **ouaip@brgm.fr**. N'hésitez pas à fournir des impressions d'écran, votre version de Windows ainsi que le fichier OUAIP concerné par votre commentaire.

Vous pouvez également utiliser le formulaire « Nous contacter » de la page web.

Formation : le succès d'une interprétation de pompage d'essai dépend de prime abord de la qualité de réalisation de ce pompage (protocole expérimental). Vous pouvez vous former à la réalisation et à l'interprétation des pompages d'essai avec OUAIP au BRGM à Orléans, pour cela consulter les liens suivants :

- http://www.brgm.fr/sites/default/files/brgm-formation-2018_EAU05.pdf ou
- http://www.brgm.fr/missions/formation/formation-professionnelle-continue

Des formations sur mesures peuvent aussi être réalisées.

1.2. OBJECTIFS DU LOGICIEL OUAIP

OUAIP s'inspire du logiciel ISAPE (Interprétation Semi-Automatique des Pompages d'Essai) développé au BRGM à la fin des années 1980 à partir notamment des travaux de Ph. Leblanc (1987). Il en reprend les principes énumérés ci-après.

L'interprétation d'un pompage d'essai débute par le choix d'un schéma théorique d'écoulement le plus proche possible du cas réel à traiter (type d'aquifère, type de milieu, géométrie, …). Ce choix pourra s'appuyer dans de futures versions sur les techniques de diagnostic par la méthode des dérivées logarithmiques du rabattement pour valider le(s) schéma(s) théorique(s) choisi(s) ou sélectionner les portions de courbes qui y répondent (Bourdet, 2002 ; Renard et al., 2009). Le module « dérivées du rabattement » n'a pas encore été implémenté dans l'outil OUAIP.

Les écarts qui subsistent entre ce schéma théorique et la réalité sont la conséquence d'hétérogénéités du milieu (nature, épaisseur) qui altèrent l'analogie du modèle au réel mais aussi d'effets perturbateurs aux origines multiples et dont les impacts se superposent :

- Effets liés à l'environnement de l'aquifère qui induisent des mouvements de la nappe indépendamment du pompage (marée, pression atmosphérique, interférences avec d'autres pompages) qu'il sera nécessaire de filtrer ou corriger au niveau des données d'entrée.
- Effets dits « de puits », propres aux caractéristiques du forage (effet de capacité, pertes de charge, effet de parois ou de « skin », pénétration partielle, effet de vidange).
- Effets propres à la mise en œuvre du pompage d'essai (variation du débit), et ceux liés à la qualité du suivi (précision des mesures, dérive des appareils) qui relèvent de la responsabilité et du sérieux de l'opérateur.

L'objectif du logiciel OUAIP est de mettre à la disposition de l'hydrogéologue un outil capable de prendre en compte les effets cumulés du pompage calculé selon un schéma théorique (solution analytique) **et des effets perturbateurs liés au puits et aux variations de débit de pompage**.

En pratique, OUAIP reconstitue l'évolution théorique des niveaux d'eau (ou du rabattement) au puits ou dans un piézomètre à partir des paramètres hydrodynamiques proposés par l'opérateur. Ce dernier les compare graphiquement aux observations et œuvre pour minimiser les écarts entre la courbe théorique et les rabattements mesurés. Bien qu'il soit possible à tout moment de demander l'ajustement des paramètres de façon automatique, la « philosophie » de l'interprétation semi-automatique est de caler successivement par essai et erreur les paramètres hydrodynamiques recherchés (généralement la transmissivité « T » et le coefficient d'emmagasinement « S ») dans des plages de valeurs plausibles dans le contexte hydrogéologique de l'essai. Car comme cela est le cas pour de nombreuses modélisations, plusieurs solutions peuvent aboutir à un résultat équivalent mais toutes ne sont pas forcément réalistes. L'ajustement automatique doit donc être soigneusement encadré par l'opérateur (d'où le principe d'ajustement semi-automatique). C'est pourquoi, bien qu'accessible aux non spécialistes et suffisamment convivial pour obtenir un résultat satisfaisant dans de nombreux cas, l'outil OUAIP ne doit pas être utilisé sans l'expertise de l'hydrogéologue.

1.3. FONCTIONNALITÉS DE OUAIP V2.3

Pour les actuels utilisateurs de OUAIP, par rapport à la version 1.9.4 de OUAIP, la version 2.3 offre les fonctionnalités suivantes :

- L'installation de OUAIP ne nécessite plus de code utilisateur.
- Il est possible de comparer simultanément sur la même interface plusieurs essais de puits (données expérimentales et interprétations).
- Il est possible de modifier les unités par défaut utilisées par les solutions analytiques.
- L'édition des rapports d'interprétation au format PDF ou HTML a été améliorée.
- L'affichage des graphiques (arithmétique, semi-logarithmique, log-log) a été amélioré.
- Il est dorénavant possible d'importer des profondeurs de niveau d'eau plutôt que des rabattements.
- La traduction en anglais a été enrichie.
- Le manuel détaille davantage les fonctions avancées de OUAIP.
- Un manuel en anglais est disponible.
- Une version géothermie a été initiée, elle est toutefois non disponible par défaut à ce jour.

1.4. INSTALLATION

Configuration requise

- OUAIP est disponible sur système d'exploitation Windows uniquement, il a été testé avec Windows XP, Windows Vista, Windows 7, Windows 8 et Windows 10.
- OUAIP n'est pas disponible, à ce jour, sur système d'exploitation Linux ou Mac OS.

Installation

Après avoir téléchargé OUAIP depuis l'adresse : http://www.brgm.fr/ouaip vous disposez d'un fichier ZIP dont le nom correspond à la dernière version de OUAIP disponible. À la date de rédaction de ce manuel il s'agit de :

- OUAIP-v2.3.zip

Pour installer OUAIP, il suffit d'extraire le dossier du fichier ZIP. Pour cela, un clic droit sur le fichier OUAIP-v2.3.ZIP permet de faire apparaître dans le menu contextuel de Windows l'option « Extraire tout … » (Illustration 2), cliquer ensuite sur « Extraire » (Illustration 3) pour achever l'extraction de l'archive sur votre disque dur.

Il n'est pas recommandé d'installer OUAIP sur un emplacement réseau bien que cela soit tout à fait possible.

NB : Si vous ne disposez pas de programme pour extraire l'archive OUAIP ou si votre version de Windows ne le permet pas, vous pouvez télécharger le programme gratuit et Open Source 7-Zip.

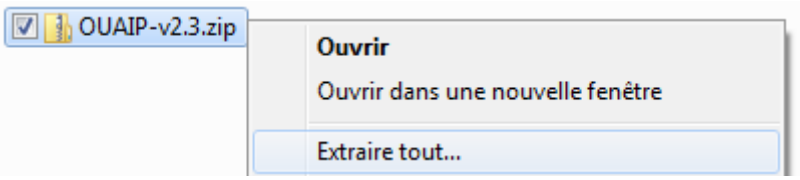


Illustration 2 : Extraction de l'archive ZIP OUAIP

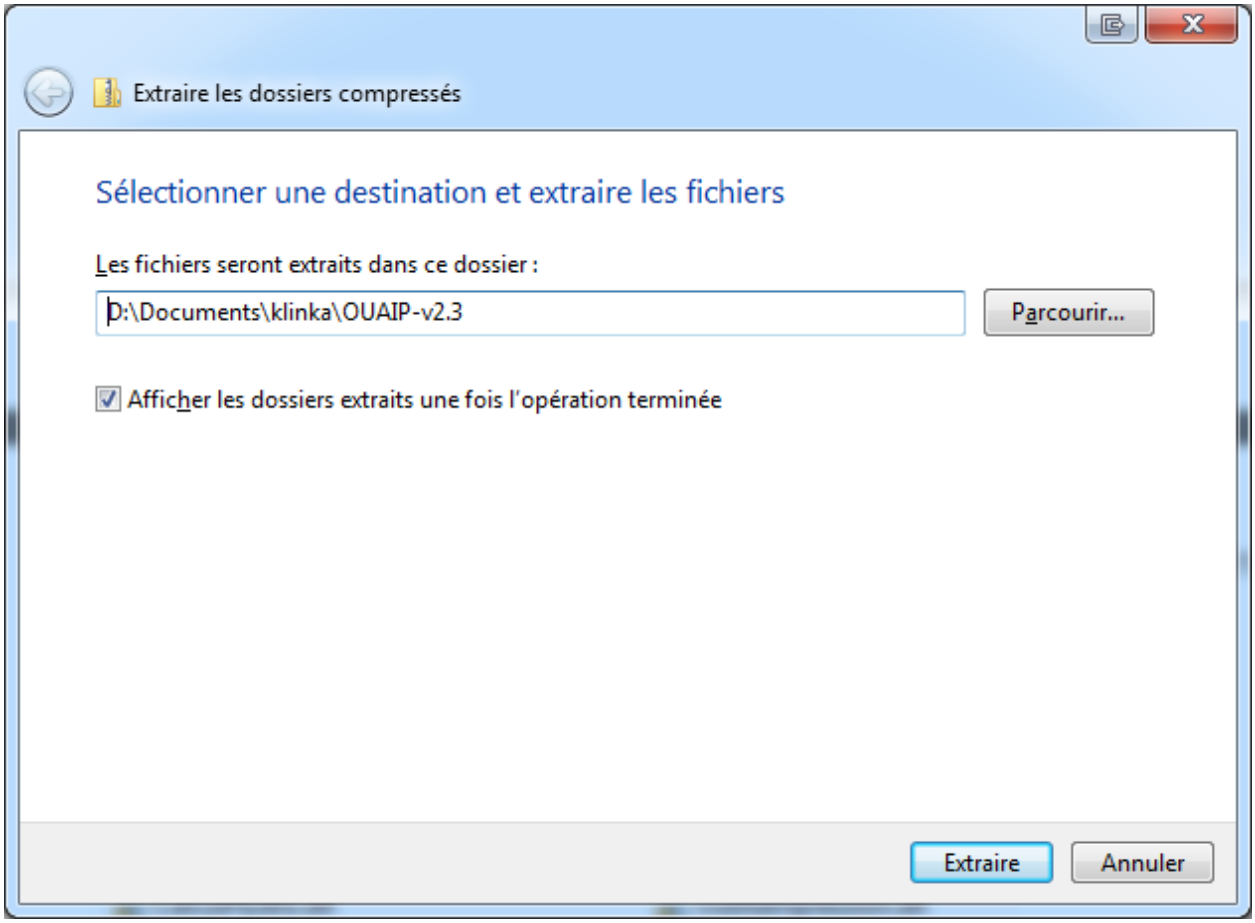


Illustration 3 : Procédure d'extraction de l'archive ZIP OUAIP

Une fois l'extraction réalisée, un répertoire OUAIP portant le nom de la version installée a été créé, par exemple **OUAIP v2.3**. Ce dossier contient les fichiers suivants (Illustration 4) :

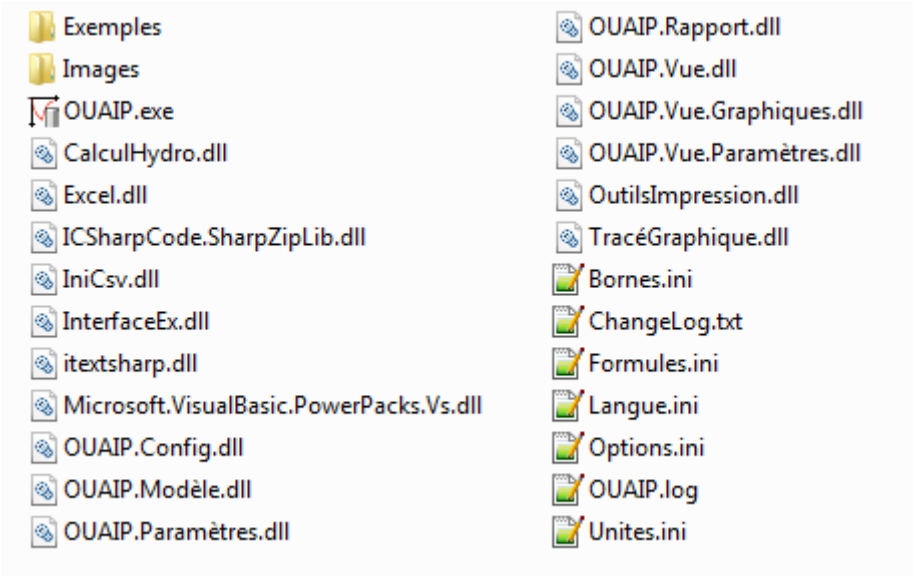


Illustration 4 : Arborescence et contenu du répertoire de OUAIP

Vous pouvez installer OUAIP sur plusieurs ordinateurs (salle de cours, salle informatique) sans contrainte.

Démarrer OUAIP

Pour démarrer OUAIP, il suffit d'exécuter le fichier **OUAIP.exe**. Au démarrage de OUAIP, l'invite se lance (Illustration 7). Lors de la première exécution de OUAIP, le logiciel propose d'associer automatiquement les extensions des fichiers OUAIP (projet : *.ouaipp, *.ouaipi, *.ouaips) avec le logiciel. Il suffit ensuite de double cliquer sur un fichier OUAIP pour démarrer le logiciel sans passer par l'invite. Notez qu'il est possible d'exécuter plusieurs instances de OUAIP simultanément sur un même ordinateur.

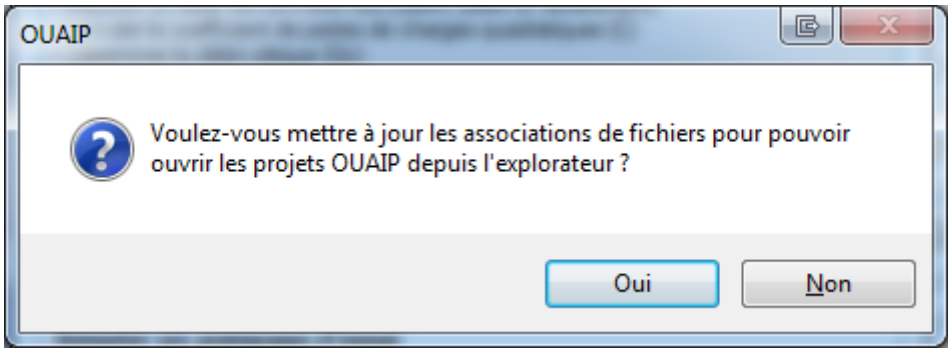


Illustration 5 : A la première éxécution OUAIP propose d'associer les fichiers projet (.ouaipp, *.ouaipi, *.ouaips) avec le programme OUAIP.exe*

Les fichiers projet OUAIP

Pour sauvegarder votre travail/projet, OUAIP enregistre des fichiers portant les 3 extensions suivantes selon le mode d'utilisation :

- *.ouaipp : module d'interprétation d'un essai de puits (essai par paliers de débit).
- *.ouaipi : module d'interprétation d'un essai de nappe (essai de longue durée).
- *.ouaips : module de simulation d'un pompage d'essai.

Il suffit de cliquer sur un des fichiers portant ces extensions pour lancer OUAIP dans le mode adéquat.

Raccourcis clavier

OUAIP utilise de nombreux raccourcis clavier, la liste des raccourcis est détaillée au chapitre « 4 Interface graphique de OUAIP ». En survolant une icône avec la souris, son utilité ainsi que son raccourci clavier apparaissent (Illustration 6).

Illustration 6 : Affichage des raccourcis clavier au passage de la souris sur les icônes

1.5. PRESENTATION DU LOGICIEL OUAIP

1.5.1. L'invite de OUAIP

Lors de l'exécution de OUAIP, l'invite s'affiche et propose 3 modules d'utilisation, logiquement de haut en bas :

- Module pour l'interprétation d'un essai de puits par paliers de débits non enchainés, selon la méthode de Jacob (1947). Ce module permet d'évaluer les pertes de charge linéaires et quadratiques dans l'ouvrage de pompage, éventuellement un débit critique.
- Module pour l'interprétation d'un essai de nappe de longue durée. Ce module permet d'évaluer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, en prenant éventuellement en compte, par exemple, les pertes de charge quadratiques déterminées durant l'essai de puits.
- Module pour la simulation prévisionnelle des rabattements dans un aquifère soumis à une chronique de pompage, dont les propriétés hydrodynamiques (nappe) et hydraulique (puits) ont été évaluées précédemment.

Ces 3 modules d'utilisation sont présentés pour une prise en main détaillée au travers de tutoriaux au chapitre « 5 Exemples d'utilisation ».

Ces trois modules correspondent aux opérations et analyses à mettre en œuvre pour la détermination d'un débit d'exploitation selon les préconisations de la norme AFNOR NF-X-10-999 d'août 2014. Ces opérations sont les suivantes :

- Détermination du débit critique par la réalisation d'un essai par paliers et choix du débit du pompage longue durée (Module 1).
- Interprétation du pompage longue durée, détermination du schéma conceptuel et des paramètres hydrodynamiques (Module 2).
- Simulation d'exploitation et optimisation du débit d'exploitation à partir des paramètres déterminés (Module 3).

Illustration 7 : Invite de OUAIP v2.3

Dans la partie inférieure de l'invite de OUAIP, plusieurs boutons sont disponibles :

-

Projets récents (Illustration 8) : permet de visualiser rapidement la liste des fichiers que vous avez récemment créés/utilisés et de les charger directement dans OUAIP sans avoir à parcourir votre arborescence.

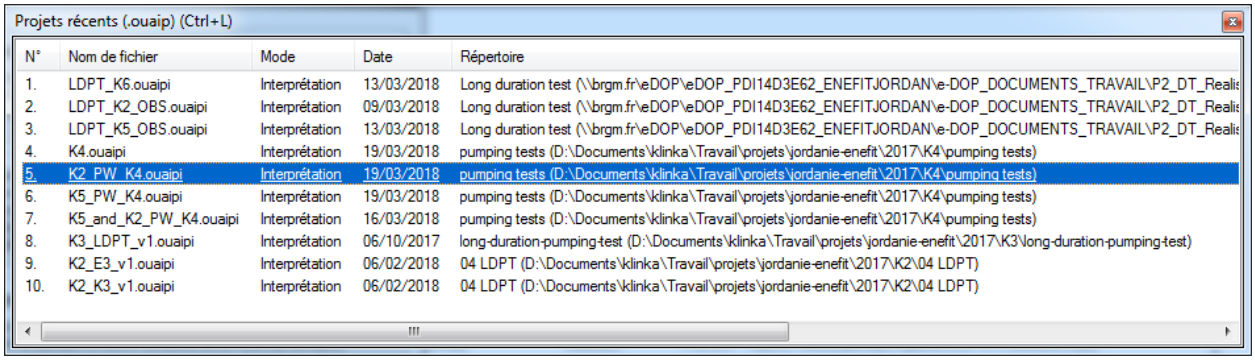


Illustration 8 : Projets récents de OUAIP

-

Parcourir (Illustration 9) : affiche une fenêtre explorateur Windows afin d'ouvrir un projet OUAIP (fichier d'extension *.ouaipp, *.ouaipi, *.ouaips)

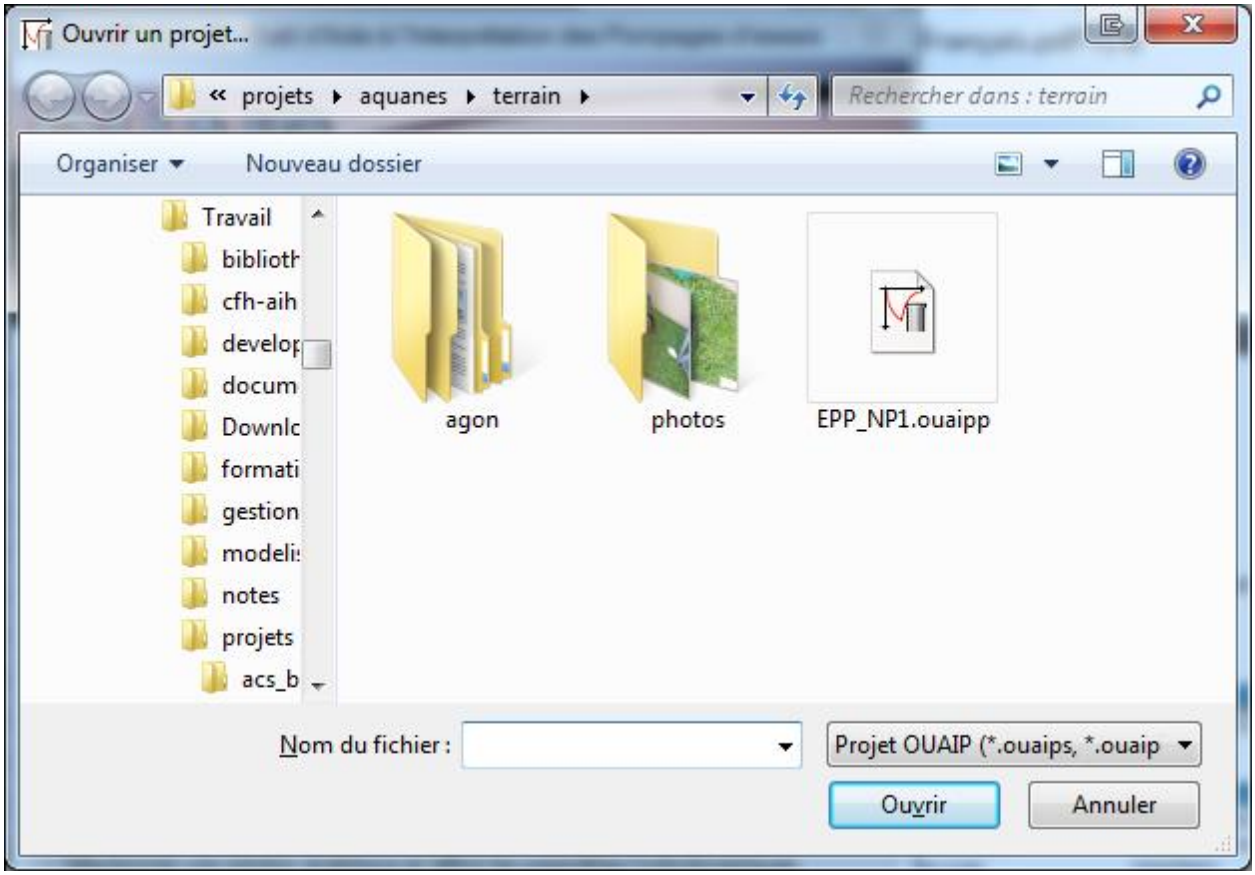


Illustration 9 : Fenêtre Parcourir de OUAIP

-

Manuel utilisateur : ouvre ce manuel utilisateur au format PDF. Ce rapport BRGM est accessible en ligne à l'adresse : http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-68509-FR.pdf

-

À propos (Illustration 10) : affiche une fenêtre avec les informations relatives à la version actuellement installée de OUAIP, en cliquant sur le numéro de version, un fichier texte notifie les évolutions de OUAIP en fonction des versions.

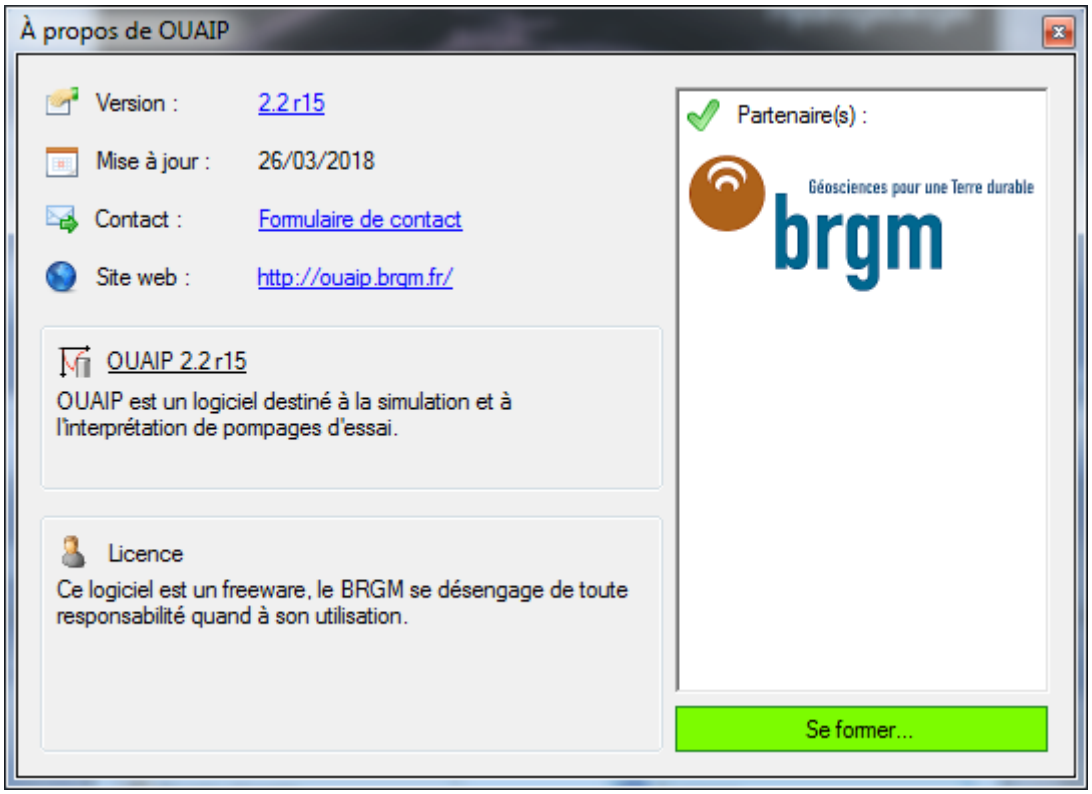


Illustration 10 : Fenêtre À propos de OUAIP

- Option : il s'agit d'un mode actuellement désactivé permettant d'utiliser OUAIP soit en mode « hydrogéologie » soit pour des applications en « géothermie » pour tenir compte des variations de densité de l'eau « chaude » liées à la viscosité, la température et la minéralisation de l'eau. Par défaut, seule l'option hydrogéologie est accessible au public à ce jour.

- Langue : OUAIP a été traduit en français et en anglais. Si vous êtes intéressé, il est possible de traduire OUAIP dans une autre langue pour en faire profiter la communauté. Ce point est décrit au chapitre « 4.5.5 Langue.ini ».

1.5.2. L'interface graphique

Que ce soit en mode « Interprétation » d'un essai de puits ou d'un essai de nappe ou bien en mode « Simulation », l'interface graphique de OUAIP est organisée en deux parties distinctes (Illustration 11) :

- La partie de **gauche** (encadrée en **vert**) permet la **saisie des données**, elle est structurée sous forme d'onglets dont l'utilisation se fait progressivement de la gauche vers la droite.
- La partie de **droite** (encadrée en **rouge**) est réservée **aux graphiques en temps réel** résultants de la saisie des données et des paramètres.
- La partie supérieure en **haut** à gauche (en **violet**) est la barre d'outils permettant de sauvegarder ou charger un projet.

Les flèches **noires** indiquent les 4 zones qui peuvent être redimensionnées par l'utilisateur à l'aide de la souris afin d'ajuster l'ergonomie du logiciel à son poste de travail.

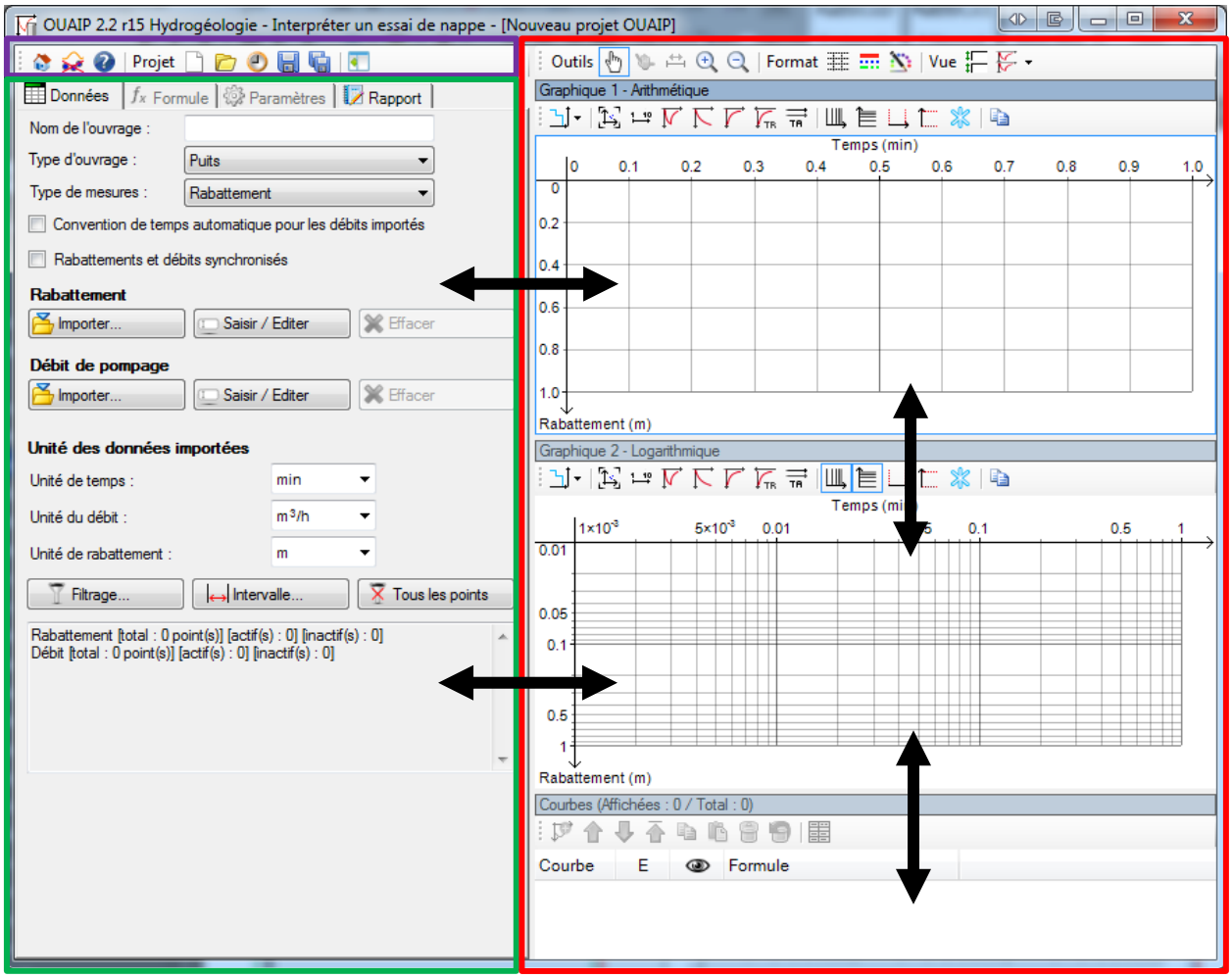


Illustration 11 : Interface générale de OUAIP

(les flèches indiquent les redimensionnements possibles des différentes fenêtres)

2. Principes

2.1. INTERPRÉTATION D'UN ESSAI DE PUITS

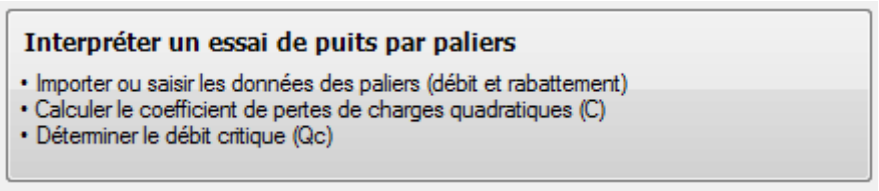
Le premier module de OUAIP est consacré à l'interprétation des essais de puits.

Les essais de puits ont pour objectif d'évaluer les caractéristiques hydrauliques intrinsèques à l'ouvrage de captage (forage) par une série de paliers de courte durée, en général de débits croissants.

Ce type d'essai met généralement en évidence l'apparition de difficultés d'écoulements de l'eau de l'aquifère vers le forage, qui sont liées à des pertes de charge dites « quadratiques » parce qu'elles évoluent proportionnellement au carré du débit. Elles sont générées par un écoulement turbulent qui se produit en général au niveau des crépines. Or, dans un forage, il est absolument nécessaire d'éviter l'apparition de ce type d'écoulement qui génère des désagréments physiques (entrainement de particules), chimiques (oxydation) et ont un impact financier important (usure de la pompe et du forage, coût énergétique plus important).

Le tracé de la courbe caractéristique du puits permet de déterminer un débit critique vis-à-vis du critère des pertes de charge quadratiques. OUAIP permet de déterminer les pertes de charge dans l'ouvrage et propose une détermination du débit critique vis-à-vis des pertes de charge. La méthode qui suit la norme AFNOR X10-999 est largement décrite dans le rapport BRGM/RP-65683 (en ligne).

S'il est compatible avec la coupe technique et hydrogéologique du forage, la position de la pompe et sa puissance, le débit ainsi déterminé est généralement celui utilisé ensuite pour l'essai de nappe de longue durée. En revanche, il ne doit pas être confondu avec le débit optimal d'exploitation qui fait intervenir d'autres critères que les pertes de charge dans l'ouvrage et nécessite une simulation d'exploitation (cf. module simulation de OUAIP).



Principe de l'interprétation

L'interprétation proposée pour la détermination automatique du débit critique diffère de la méthode Porchet, qui détermine de manière plus ou moins subjective un point d'inflexion sur la courbe caractéristique. OUAIP propose une méthode plus rigoureuse, basée sur le calcul des pertes de charge linéaires et quadratiques (Illustration 12) par la méthode de Jacob. Toutefois ce mode de détermination automatique ne doit pas occulter le sens critique de l'utilisateur.

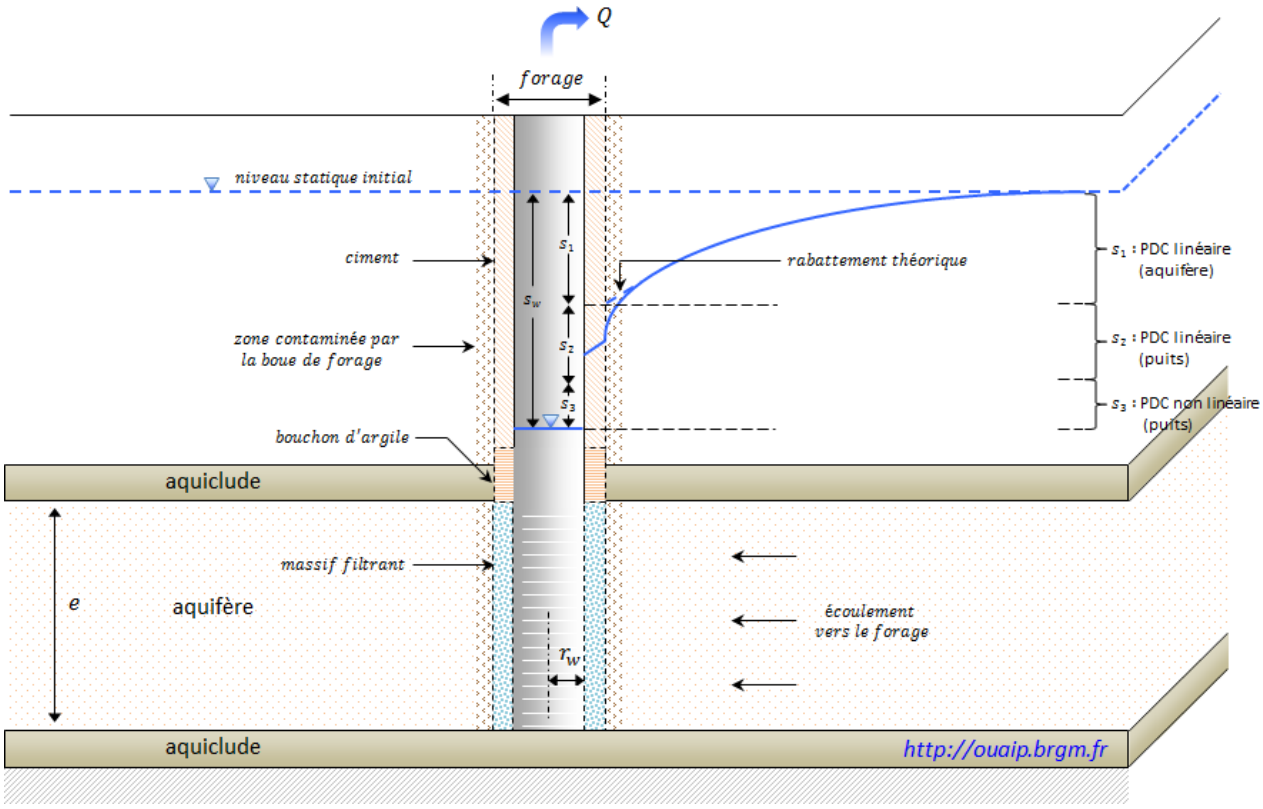


Illustration 12 : Schéma simplifié des pertes de charge dans un ouvrage et dans l'aquière

De manière assez schématique, Jacob estime que le rabattement total (s_{total} ; s_w Illustration 12) mesuré dans un ouvrage en pompage est la somme d'un rabattement qui dépend des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère (s_{aqui} ; s_1 Illustration 12) et d'un rabattement additionnel provoqué par l'équipement installé et l'environnement immédiat du captage ($s_{équip}$; s_1+s_2 Illustration 12).

$$s_{total} = s_{aqui} + s_{équip}$$

Du fait de l'augmentation des vitesses de l'eau à proximité du forage, le premier terme s_{aqui} varie généralement de manière linéaire par rapport au débit (conditions d'écoulement de Darcy où les écoulements sont schématisés par des filets d'eau parallèles entre eux) tandis que le second comporte une composante proportionnelle au carré du débit (pertes de charge quadratiques). Dans ce cas, les écoulements ne sont plus laminaires mais turbulents. Ainsi, Jacob (1947) écrit la relation suivante :

$$s_{total} = BQ + CQ^2$$

Où B est le coefficient de pertes de charge linéaires et C le coefficient de pertes de charge quadratiques. Ainsi, le terme BQ représente la part d'écoulement laminaire et le terme CQ^2 représente la part d'écoulement turbulent des écoulements souterrains sollicités par le pompage.

OUAIP donne la possibilité d'utiliser la formule généralisée (Rorabaugh, 1953) où l'exposant « n » peut être différent (entre 1.5 et 3.5, Lennox, 1966) bien que généralement proche de 2.

$$s_{total} = BQ + CQ^n$$

Sur la base de cette conceptualisation des écoulements, OUAIP propose de déterminer le débit critique comme étant le débit à ne pas dépasser pour maintenir autour et à l'entrée dans l'ouvrage des écoulements majoritairement laminaires. Ce point est défini pour :

$$BQ = CQ^n$$

C'est le point dit « d'égalité des pertes de charge » linéaires et quadratiques. Sélectionner cette méthode de détermination fera apparaitre sur le graphique le débit critique et le rabattement correspondant.

Remarque importante :

Il existe des cas où la **méthode de l'égalité des pertes de charge n'est pas applicable**, car la conceptualisation de Jacob ne correspond pas à la réalité :

- Cas de milieux de très forte perméabilité (milieux karstiques en particulier, milieux fracturés) : les pertes de charge quadratiques « explosent » du fait des vitesses d'écoulement très importantes existants déjà dans les fractures ou chenaux karstiques.
- Si l'exposant n est différent de 2, le schéma conceptuel est probablement différent du schéma simple de Jacob.

Il est laissé à l'utilisateur la possibilité de déterminer manuellement (en cliquant avec la souris sur la courbe) le débit critique selon ses propres critères. Par ailleurs, lorsque la droite des rabattements spécifiques montre une cassure/inflexion de la tendance linéaire, on peut suspecter une modification significative des conditions d'écoulements dans l'ouvrage.

Par défaut, OUAIP utilise le système international comme unité des pertes de charges. B est en s/m^2 et C en s^2/m^5. Le choix de ces unités permet de manipuler des chiffres sans décimales. Toutefois il est possible de modifier les unités proposées par défaut.

2.2. SOLUTIONS ANALYTIQUES POUR L'INTERPRÉTATION D'UN ESSAI DE NAPPE OU LA SIMULATION DES POMPAGES D'ESSAI

Les deuxièmes et troisièmes modules de OUAIP sont consacrés respectivement à :

- L'interprétation des pompages d'essai dans l'objectif de déterminer les caractéristiques de l'aquifère testé dans l'environnement du pompage : paramètres hydrodynamiques, géométrie, et diverses observations sur le comportement de la nappe en pompage.
- La simulation d'un pompage dans l'objectif de déterminer un débit d'exploitation ou l'incidence d'un pompage sur la nappe à un endroit quelconque.

OUAIP intègre actuellement 4 solutions analytiques décrites ci-après, ces méthodes sont disponibles pour l'interprétation des essais de nappe et le mode simulation. Il est possible d'ajouter d'autres solutions analytiques dans OUAIP, pour cela, se reporter au chapitre « 4.5.2 Formules.ini ». L'Illustration 13 présente de manière synthétique les caractéristiques des solutions analytiques ainsi que les effets additionnels disponibles :

		Interprétation			Liste des effets				
Solution analytique	Débit variable	Au puits	Au(x) piézomètre(s)	Pénétration partielle	Effet de limites	Pertes de charges quadratiques	Effet de skin	Effet de capacité	Effet de vidange
Theis (1935)	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Papadopulos-Cooper (1967)	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Hantush (1964)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Gringarten-Witherspoon (1972)	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓

Illustration 13 : Synthèse des solution analytiques de OUAIP et des effets additionnels disponibles

2.2.1. Solution de Theis (1935)

La solution de Theis (1935) simule une nappe captive en régime transitoire pour un puits parfait ou un piézomètre (Illustration 14). Cette solution est toutefois utilisable pour le cas des nappes libres à condition que le rabattement de la nappe soit faible pour ne pas altérer les hypothèses de Dupuits (en pratique, Theis est admissible si le rabattement dans l'aquifère aux abords du puits ne dépasse pas le 1/3 de l'épaisseur captée).

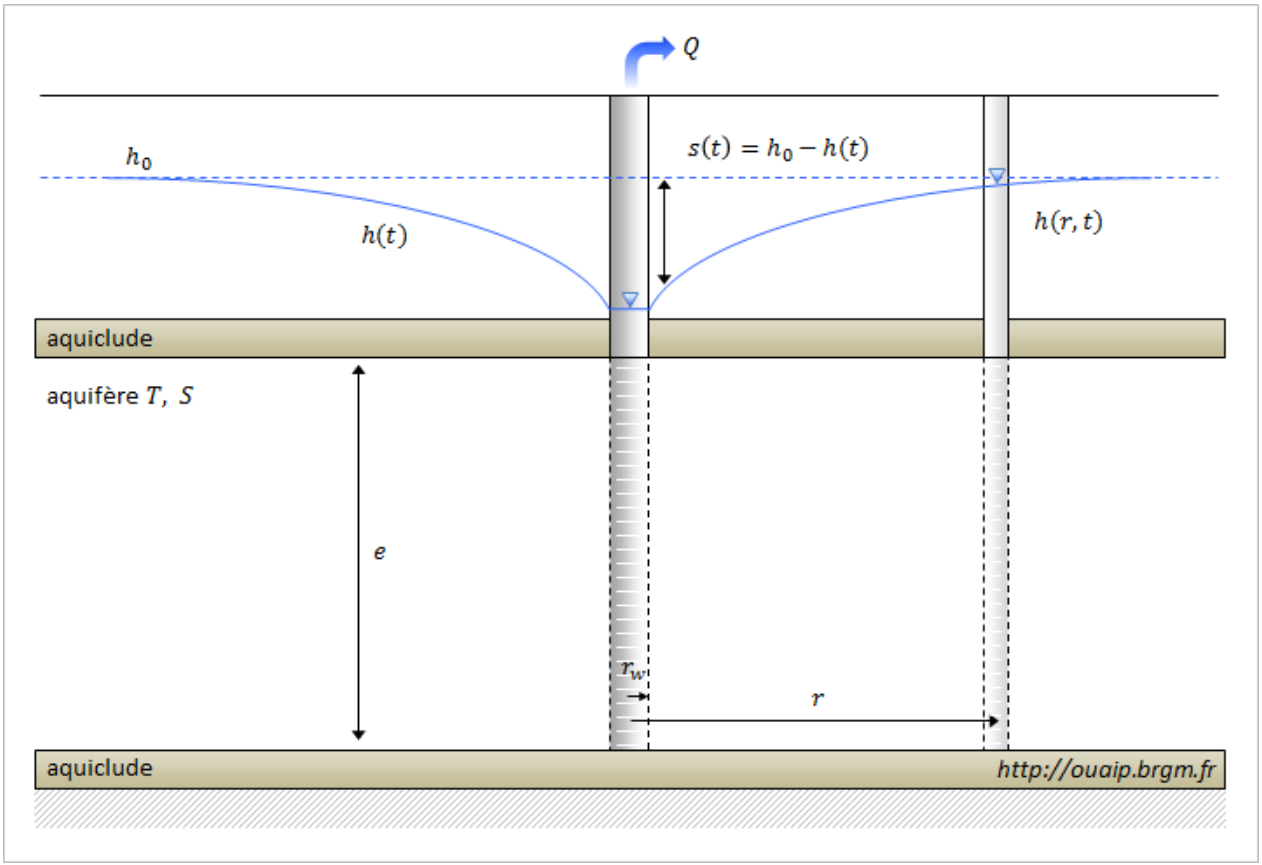


Illustration 14 : Schéma de la configuration de la solution de Theis

Formule

$$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T}\int_u^{\infty}\frac{1}{y}exp(-y)\,dy = \frac{Q}{4\pi T}W\left(\frac{r^2S}{4Tt}\right)$$

Avec :

- s(r,t) : rabattement fonction de la distance au centre du puits et du temps de pompage [L],
- Q : débit [L3/T],
- T : transmissivité de l'aquifère [L2/T],
- S : coefficient d'emmagasinement de l'aquifère [-],
- r : rayon d'observation (distance au puits ou rayon du puits si les mesures de rabattement y sont réalisées) [L],
- t : temps de pompage [T].

En posant $u = \frac{r^2S}{4Tt}$, la formule de Theis devient $s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T}W(u)$

W(u) est la fonction Theis.

Hypothèses

Type d'aquifère :
- Nappe captive.
- Nappe homogène, isotrope, d'extension latérale infinie et d'épaisseur constante.

Type d'ouvrage :
- Puits parfait (rayon du puits négligeable et pénétration totale).
- Piézomètre.

Conditions d'applications :
- Régime transitoire.
- Hypothèses de Dupuits : les écoulements vers le puits sont horizontaux.

Effets disponibles : effet de limites, pertes de charge quadratiques, effet de skin, effet de capacité, effet de vidange.

Paramètres de la solution au puits de pompage :

- T (en m^2/s) : transmissivité de l'aquifère.
- S (sans unité) : coefficient d'emmagasinement de l'aquifère.
- r (en m) : distance entre le puits de pompage et la mesure du niveau dynamique. Soit pour une mesure au puits de pompage, r est équivalent au rayon de l'ouvrage (crépine, forage).

Au piézomètre :

- r (en m) : distance entre le puits de pompage et la mesure du niveau dynamique. Soit pour une mesure au piézomètre, r est équivalent à la distance horizontale puits – piézomètre.

Référence :

- *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, pp. 519-524.*

2.2.2. Solution de Papadopulos-Cooper (1967)

Lorsque le puits de pompage est de large diamètre, l'hypothèse du rayon négligeable du puits parfait dans la solution de Theis n'est plus valide. La solution de Papadopulos-Cooper simule une nappe captive en régime transitoire pour un puits parfait de grand diamètre ou un piézomètre avec un effet de capacité (Illustration 15). Cette solution est toutefois utilisable pour le cas des nappes libres dans les mêmes conditions que la solution de Theis. Notons que la prise en compte de l'effet de capacité de puits est aussi possible avec la solution de Theis (et les autres solutions de OUAIP) *via* des solutions offrant une très bonne approximation (Blasingame et al., 1991).

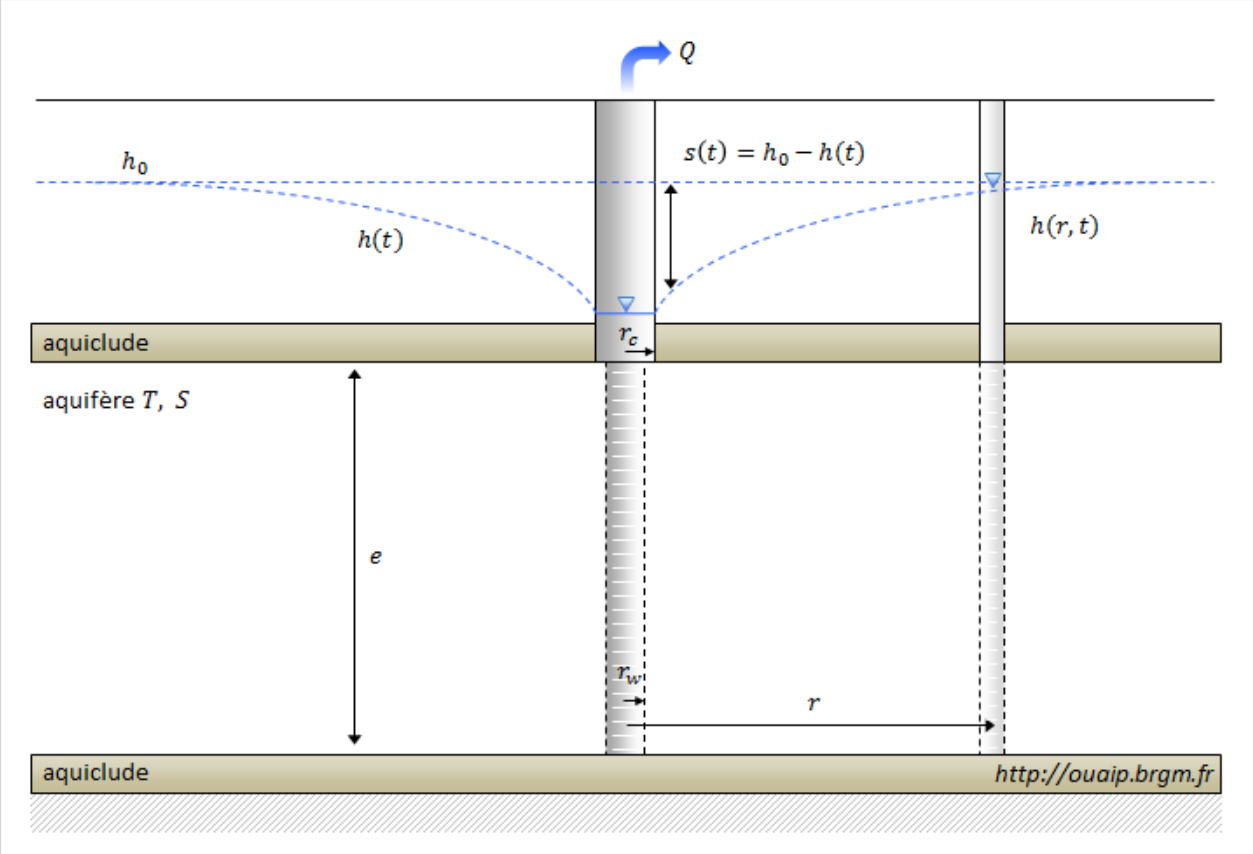


Illustration 15 : Schéma de la configuration de la solution de Papadopulos-Cooper

Formule

Par analogie au problème de flux de chaleur, les auteurs établissent que la transformée de Laplace du rabattement, avec *p* le paramètre de la transformation, peut être calculée par :

$$\bar{s}(p) = \frac{QK_0(qr)}{\pi p\left[r_c^2 pK_0(qr_w)+2r_w TqK_1(qr_w)\right]} \text{ où } q = \sqrt{\frac{pS}{T}}$$

r est la distance au puits, r_w est le rayon du puits, r_c est le rayon du tube plein dans lequel le niveau d'eau fluctue et K_0 et K_1 sont les fonctions de Bessel modifiées de second type et d'ordre 0 et 1.

Le rabattement s(t) est obtenu par la transformée de Laplace inverse de cette fonction.

Hypothèses

Type d'aquifère :
- Nappe captive.
- Nappe homogène, isotrope, d'extension latérale infinie et d'épaisseur constante.

Type d'ouvrage :
- Puits captant la totalité de l'épaisseur de l'aquifère.
- Piézomètre.

Conditions d'applications :
- Régime transitoire.
- Hypothèses de Dupuits : les écoulements vers le puits sont horizontaux.

Effets disponibles : effet de limites, pertes de charge quadratiques, effet de skin, effet de vidange.

Paramètres de la solution au puits de pompage :

- T (en m^2/s) : transmissivité de l'aquifère.
- S (sans unité) : coefficient d'emmagasinement de l'aquifère.
- r_c (en m) : rayon de la portion tubée (non crépinée).
- r_w (en m) : rayon dans la partie captée.

NB : les indices rc et rw désignent respectivement les mots anglais **c**asing (tubage) et **w**ell (puits/forage)

Si l'interprétation est réalisée sur des mesures au piézomètre, la distance puits – piézomètre est à considérer :

- r (en m) : distance entre le puits de pompage et le piézomètre.

Référence :

- *Papadopulos, I.S. and H.H. Cooper, 1967. Drawdown in a well of large diameter, Water Resources Research, vol. 3, no. 1, pp. 241-244.*
- *Blasingame T.A., Johnston J.L., Lee W.J., Raghavan R., 1991. Advances in the use of convolution methods in well test analysis. Soc. Petr. Eng., SPE 21826, presented at the SPE Rocky Mountain Regional symposium, Denver, Colorado, 15-17 April.*

2.2.3. Solution de Hantush-Jacob (1955)

La solution de Hantush-Jacob (1955) simule le rabattement d'une nappe semi-captive alimentée par une nappe sus-jacente (ou sous-jacente) à travers une éponte semi-perméable (Illustration 16). Dans cette solution, le stock d'eau dans l'aquifère de surface (sus jacent à l'éponte) est supposé infini et donc son niveau ne varie pas durant l'essai. Ainsi, cette solution est applicable pour les cas où le niveau d'eau dans l'aquifère de surface ne varie pas de façon significative durant l'essai.

Le flux d'eau traversant l'éponte est constant et vertical. En début de pompage, la courbe est similaire à celle de Theis. Puis l'influence de la drainance se manifeste par une stabilisation du rabattement.

Hantush (1961) a proposé une méthode pour prendre en compte la pénétration partielle du puits dans l'aquifère qui est implémentée dans le logiciel.

Formule

Calcul du rabattement s(r,t), avec r la distance au puits (sans captage partiel de l'ouvrage) :

$$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T}\int_u^{\infty}\frac{1}{y}exp\left(-y-\frac{r^2}{4L^2y}\right)dy = \frac{Q}{4\pi T}W\left(u,\frac{r}{L}\right)$$

Avec :

- $u = \frac{r^2S}{4Tt}$
- T : la transmissivité de l'aquifère [L2/T],
- S : le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère [-],
- t : le temps [T],
- r : la distance au puits [L],
- Q : le débit de pompage (constant) [L3/T],
- $L = \sqrt{Te'/K'}$: le facteur de drainance [L],
- K' et e' : respectivement perméabilité [L/T] et épaisseur de l'aquitard [L],
- $W\left(u,\frac{r}{L}\right)$: est appelée la fonction de Hantush-Jacob.

Hypothèses

Type d'aquifère :
- Nappe semi-captive.
- Nappe homogène, anisotrope (suivant la verticale si captage partiel de l'ouvrage), de dimension infinie et d'épaisseur constante.
- Effet de drainance à travers une éponte semi-perméable.
- Le coefficient d'emmagasinement de l'éponte est négligeable.
- La charge dans la nappe sus-jacente reste constante (pas de variation liée au pompage).

Type d'ouvrage :
- Puits parfait ou puits à pénétration partielle (incomplet).

- Piézomètre parfait ou piézomètre à pénétration partielle (incomplet).

Conditions d'application :
- Régime transitoire.
- Écoulement vertical dans l'éponte.

Effets disponibles : effet de limites, pertes de charge quadratiques, effet de skin, effet de capacité, effet de vidange.

Paramètres de la solution dans OUAIP :

Au puits de pompage :

- T (en m^2/s) : transmissivité de l'aquifère.
- S (sans unité) : coefficient d'emmagasinement de l'aquifère.
- L (en m) : facteur de drainance, soit $L = \sqrt{\frac{T*e'}{K'}}$;
- e' (en m) : épaisseur de l'aquitard.
- K' (m/s) : perméabilité de l'aquitard.

Au piézomètre :

- r (en m) : distance entre le puits de pompage et la mesure du niveau dynamique. Soit pour une mesure au piézomètre, r est équivalent à la distance puits – piézomètre.

Solution avec captage partiel de l'ouvrage :

$$s(x,y,t) = \frac{Q}{4\pi T}\mathrm{f}\left(u_r, \frac{r}{B_r}, \frac{r}{B}, \frac{d}{B}, \frac{l}{B}, \frac{z}{B}\right) = \frac{Q}{4\pi T}\left\{\mathrm{W}\left(u_r, \frac{r}{B_r}\right) + \mathrm{f_S}\left(u_r, \frac{r}{B_r}, \frac{r}{B}, \frac{d}{B}, \frac{l}{B}, \frac{z}{B}\right)\right\}$$

$$\mathrm{f_S}\left(u_r, \frac{r}{B_r}, \frac{r}{B}, \frac{d}{B}, \frac{l}{B}, \frac{z}{B}\right) = \frac{2B}{\pi(l-d)}\sum_{i=1}^{\infty}\left\{\begin{array}{l}\frac{1}{i}\left[\sin\left(i\pi\frac{l}{B}\right) - \sin\left(i\pi\frac{d}{B}\right)\right] \\ \cos\left(i\pi\frac{z}{B}\right)W\left(u_r, \sqrt{\left(\frac{r}{B_r}\right)^2 + \frac{k_z}{k_h}\left(i\pi\frac{r}{B}\right)^2}\right)\end{array}\right\}$$

$$u_r = u_{rw} = \frac{r_w^{\,2}S}{4Tt} \qquad B_r = \frac{T}{k'/e'}$$

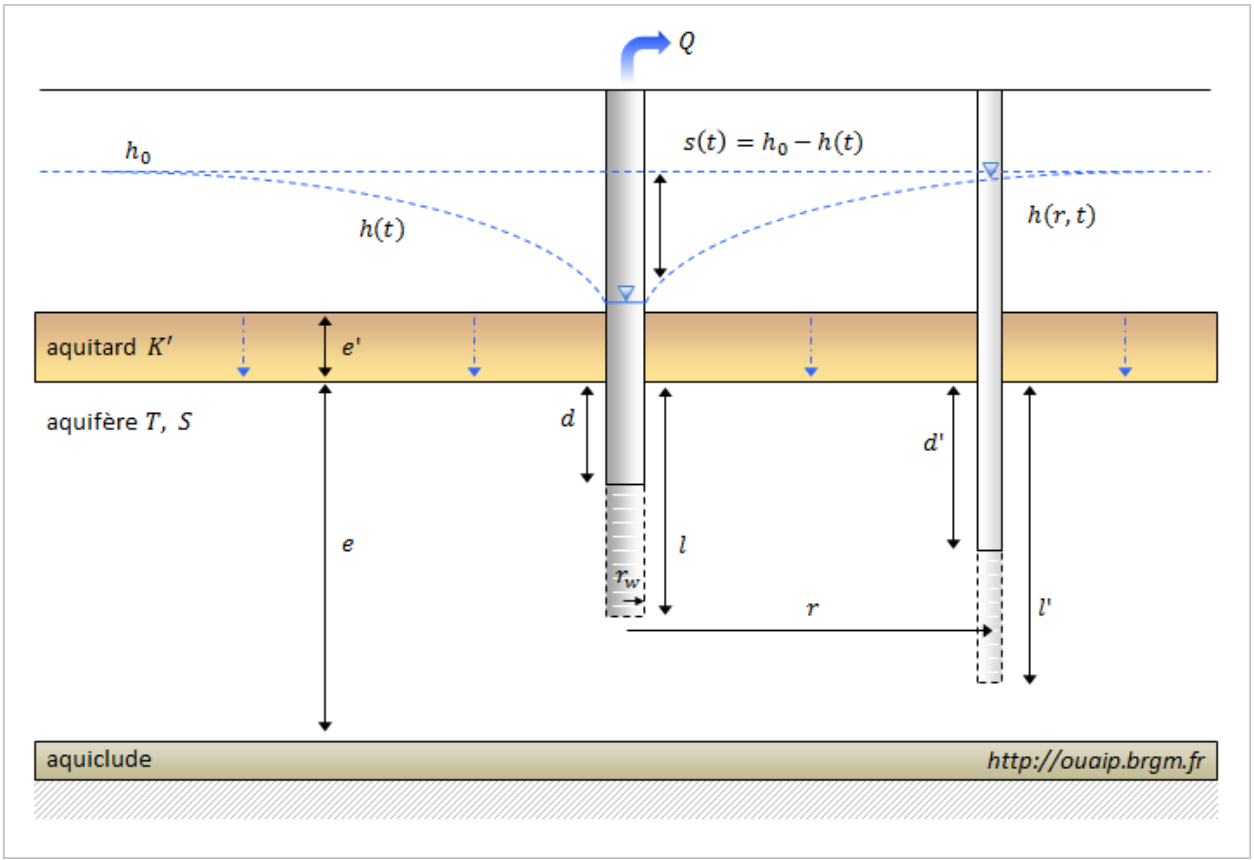


Illustration 16 : Schéma de la configuration de la solution de Hantush

Référence :

- *Hantush, M.S., 1964. Hydraulics of wells, in: Advances in Hydroscience, V.T. Chow (editor), Academic Press, New York, pp. 281-442.Hantush, M.S. and C.E. Jacob, 1955. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer, Am. Geophys. Union Trans., vol. 36, pp. 95-100.*

2.2.4. Solution de Gringarten-Witherspoon (1972)

La solution de Gringarten-Witherspoon (1972) simule, en régime transitoire, le pompage dans une fracture verticale unique interceptant la totalité d'un aquifère captif. Le puits se situe en son milieu (Illustration 16). Dans la solution proposée, le flux dans la fracture est uniforme. Cette solution est toutefois utilisable pour le cas des nappes libres si le rabattement est faible devant l'épaisseur de l'aquifère.

Après un certain temps de pompage, l'écoulement est pseudo-radial (comme pour Theis), mais la présence de la fracture donne au puits un rayon d'action plus grand dans l'axe de la fracture.

On considère que la fracture n'induit pas d'effet de capacité sensible (toutefois un tel effet, s'il est observé, peut être pris en compte). La fracture a une perméabilité pratiquement infinie comparé à celle de l'aquifère, et une épaisseur négligeable comparée à l'épaisseur de l'aquifère. Dans ces conditions, en pompage, le niveau va baisser très rapidement dans la fracture, induisant un écoulement de l'aquifère vers la fracture. Gringarten et al. (1974) proposent une solution plus générale avec piézomètre.

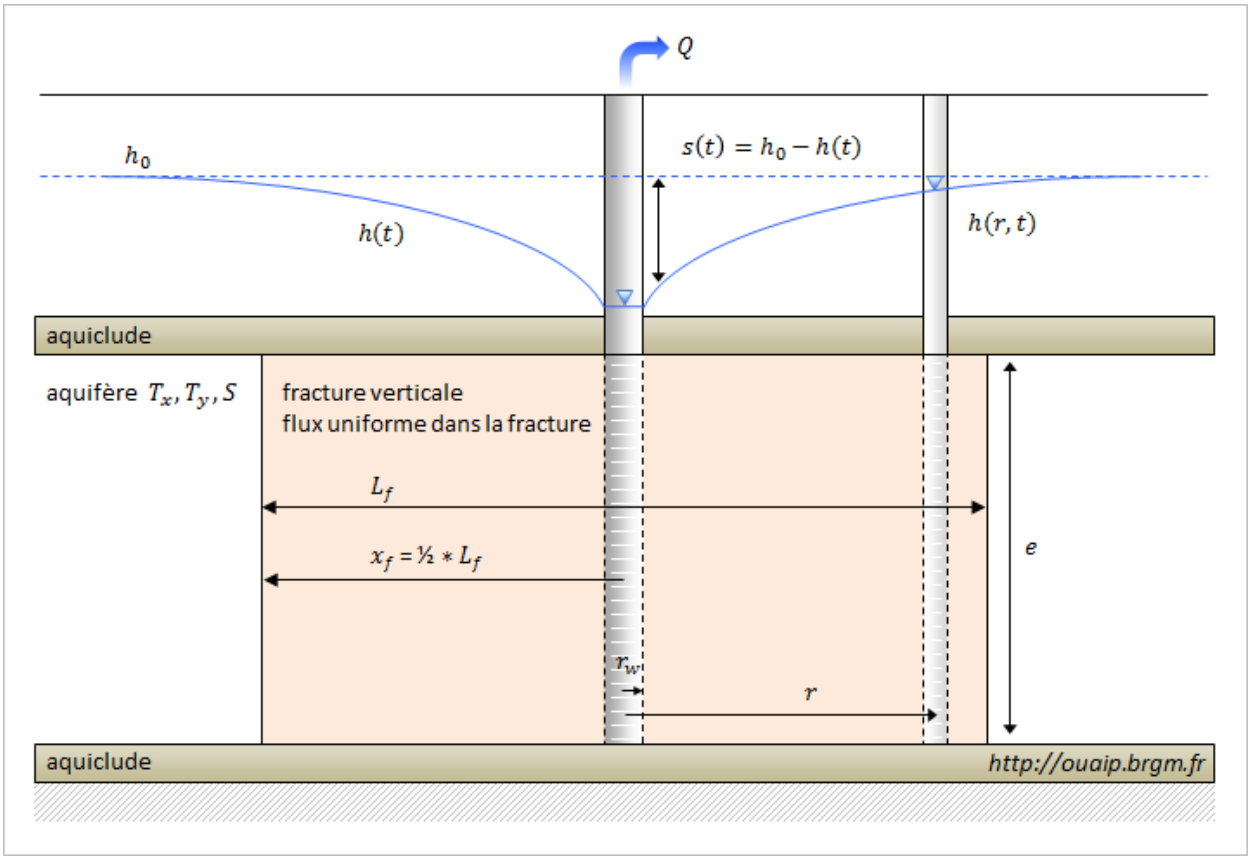


Illustration 17 : Schéma de la configuration de la solution de Gringarten-Witherspoon

Formule

Au puits de pompage la formule s'écrit :

$$s = \frac{Q}{4\pi\sqrt{T_x T_y}}\left(2\sqrt{\pi t_d}\,\mathrm{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{t_d}}\right) + W\left(\frac{1}{4t_d}\right)\right)$$

Avec :

- $t_d = \frac{T_x t}{x_f^2 S}$

Où :

- T_x : la transmissivité horizontale dans l'axe de la fracture [L2/T],
- T_y : la perméabilité horizontale dans l'axe perpendiculaire à la fracture [L2/T],
- S : le coefficient d'emmagasinement [-],
- x_f : est la demi-longueur de la fracture [L].

Au piézomètre, la formule est un peu plus compliquée. Elle introduit :

- r : la distance entre le piézomètre et le puits de pompage,
- x et y : les coordonnées du piézomètre en considérant que le puits de pompage est au centre du repère et l'axe des x est confondu avec l'axe de la fracture. On a donc $x^2 + y^2 = r^2$

$$s = \frac{Q}{2\pi\sqrt{T_x T_y}}\int_0^{t_d} \exp\left(-\frac{y_d^2}{4\tau}\right).\left[\mathrm{erf}\left(\frac{1-x_d}{2\sqrt{\tau}}\right) - \mathrm{erf}\left(\frac{1+x_d}{2\sqrt{\tau}}\right)\right].\frac{d\tau}{4\sqrt{\tau/\pi}}$$

Où $x_d = \frac{x}{x_f}$ et $y_d = \frac{y}{x_f}$

Les solutions de Gringarten font intervenir une anisotropie de transmissivité de l'aquifère exprimée par le rapport $\frac{T_y}{T_x}$. Selon son auteur, la méthode permet d'analyser un aquifère fracturé comme un « milieu poreux équivalent, homogène et anisotrope avec une fracture unique verticale de perméabilité beaucoup plus forte intersectant le puits de pompage ». L'outil OUAIP introduit une transmissivité équivalente $T = (T_x T_y)^{0,5}$ assortie du coefficient d'anisotropie $\frac{T_y}{T_x}$

Hypothèses

Type d'aquifère :

- Nappe captive.
- Aquifère anisotrope, d'extension latérale infinie et d'épaisseur constante.
- Une seule fracture verticale centrée sur le puits.
- La fracture se limite à la nappe et la traverse en entier.
- La fracture a une perméabilité infinie, un emmagasinement nul et une épaisseur nulle.

Pas de drainance avec cette solution.

Type d'ouvrage :

- Puits parfait : rayon négligeable et pénétration totale (relatif, puisque c'est la fracture qui doit recouper tout l'aquifère, pas nécessairement le puits de pompage).
- Piézomètre, défini par x et y (y≠0).

Conditions d'application :

- Régime transitoire.
- Écoulement horizontal.

Effets disponibles : effet de limites, pertes de charges quadratiques, effet de skin, effet de capacité, effet de vidange.

Paramètres de la solution dans OUAIP :

- T (en m^2/s) : transmissivité de l'aquifère.
- S (sans unité) : coefficient d'emmagasinement de l'aquifère.
- T_y/T_x (sans unité) : coefficient d'anisotropie de la transmissivité, T_y étant la transmissivité horizontale perpendiculairement à la fracture et T_x la transmissivité horizontale dans l'axe de la fracture.
- x_f (en m) : demi-longueur de la facture (soi L_f la longueur de la fracture : $x_f = L_f / 2$).
- Il n'est pas nécessaire de définir le rayon de l'ouvrage pour utiliser cette solution, au puits l'équation ne dépend pas de ce paramètre. La fracture a une perméabilité très grande, considérée comme infinie par rapport à celle de l'aquifère, le rabattement dans celle-ci est quasiment le même. La solution proposée est aussi la meilleure approximation pour une fracture à perméabilité infinie.

Au piézomètre :

- x_{piezo} (en m) : projection du piézomètre sur l'axe de la fracture.
- y_{piezo} (en m) : coordonnée du piézomètre perpendiculairement à l'axe de la fracture.
- NB : par défaut, pour toutes les solutions, le puits de pompage est centré en x=0 (m), y=0 (m).

Référence :

- *Gringarten, A.C. and P.A. Witherspoon, 1972. A method of analyzing pump test data from fractured aquifers, Int. Soc. Rock Mechanics and Int. Assoc. Eng. Geol., Proc. Symp. Rock Mechanics, Stuttgart, vol. 3-B, pp. 1-9.*
- *Gringarten, A.C., Ramey, H.J., Jr. and R. Raghavan, 1974. Unsteady-state pressure distributions created by a well with single infinite-conductivity vertical fracture, SPE Journal (August 1974), pp. 347-360.*

2.3. DESCRIPTION DES EFFETS ADDITIONNELS

D'une manière générale, pour le calcul des rabattements théoriques au puits ou au piézomètre, quelle que soit la solution mathématiques utilisée, OUAIP donne la possibilité de tenir compte de différents effets perturbateurs présentés ci-après à l'Illustration 18 :

Effet	Puits	Piézomètre
Effet de capacité	✓	
Effet de vidange	✓	
Effet de skin (effet pariétal)	✓	
Pertes de charges quadratiques	✓	
Effets de limites (alimentée, étanche)	✓	✓

Illustration 18 : Prise en compte des effets

2.3.1. Effet de capacité

Un effet de capacité se manifeste lorsque le puits de pompage contient un volume d'eau non négligeable. Dans ces conditions, en effet, une partie de l'eau pompée provient du déstockage de l'eau emmagasinée dans le puits, sans transiter par l'aquifère. Dans un premier temps, le rabattement mesuré s'en trouve réduit par rapport à ce qui serait observé sans effet de capacité. À l'arrêt du pompage, le phénomène inverse se produit et la remontée est ralentie par le remplissage du puits.

Cet effet, spécifique au puits de pompage, est d'autant plus marqué que le diamètre de l'ouvrage est grand, le rabattement important et l'aquifère peu transmissif. Les diamètres de la coupe technique du forage sont en toute rigueur nécessaires pour calculer l'effet de capacité (en particulier les diamètres de tubage ou de forage (si les tubes sont crépinés ou non cimentés) concernés par le rabattement de la nappe. OUAIP introduit une seule variable appelée « Rayon de l'effet de capacité ».

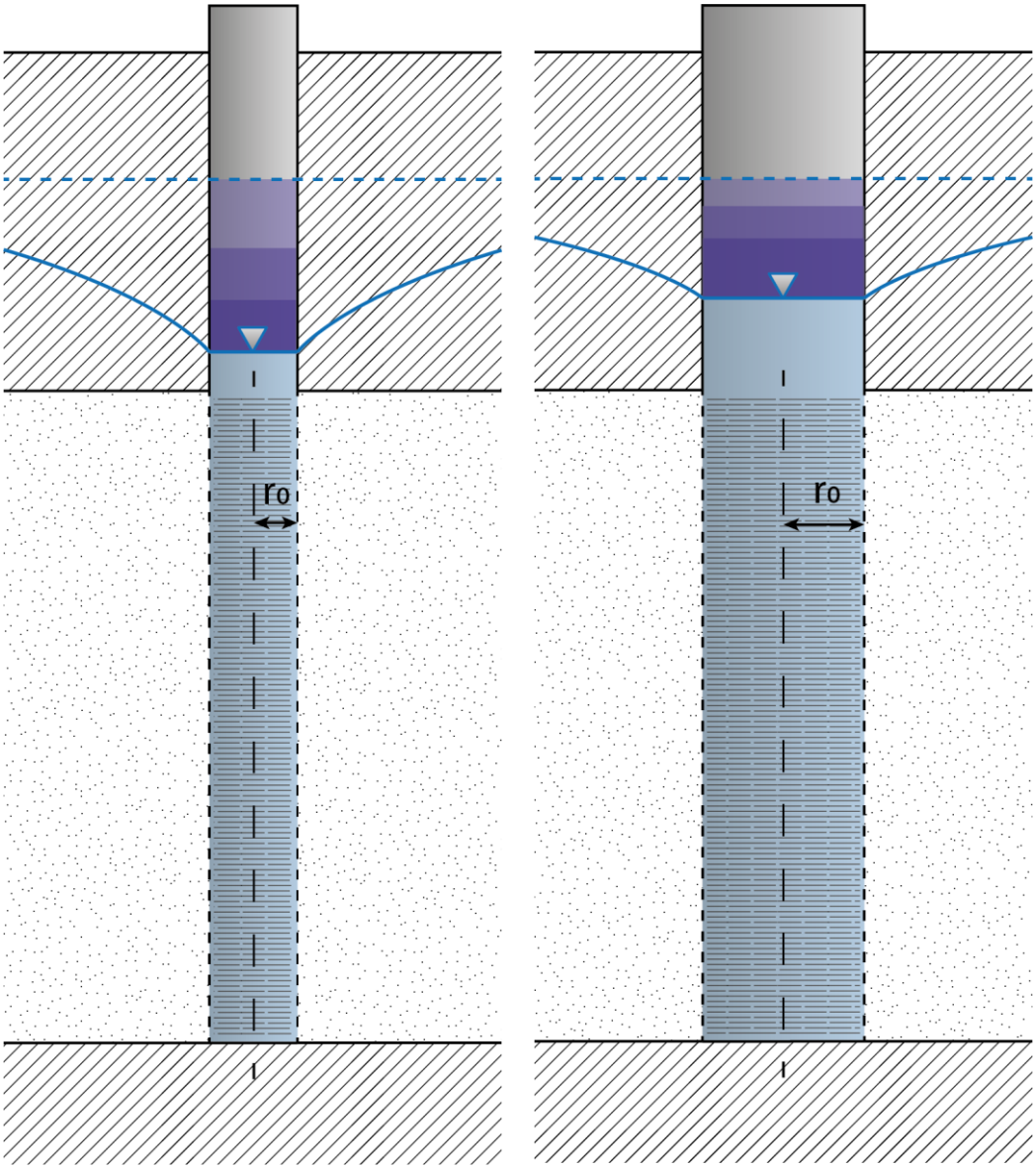


Illustration 19 : Schéma de l'incidence de l'effet de capacité dans un ouvrage en pompage

OUAIP peut effectuer un calcul de l'effet de capacité sur la colonne de captage à condition d'indiquer son rayon (Illustration 20). L'approximation de Blasingame est utilisée :

$$s_{Dw} = s_D\left(1 - Exp\left(-\frac{t_D}{s_D C_D}\right)\right)$$

et

$$C_D = \frac{r_c^{\,2}}{2Sr^2}$$

Soit :

- s_{Dw} : rabattement d'une solution analytique avec effet de capacité,
- s_D : rabattement d'une solution analytique (sans dimension),
- t_D : temps (sans dimension),
- C_D : effet de capacité (sans dimension),
- r_c : rayon de l'effet de capacité (m),
- S : coefficient d'emmagasinement (sans dimension),
- r : rayon de l'ouvrage (m).

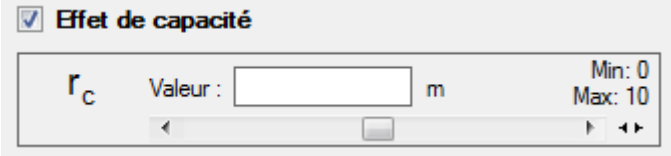


Illustration 20 : Paramètre rc de l'effet de capacité

2.3.2. Effet de vidange

Cet effet résulte de l'absence ou du dysfonctionnement du clapet anti-retour à la base de la colonne de refoulement. Dans ce contexte, en effet, la colonne de refoulement se vide dans le puits dès l'arrêt de la pompe, ce qui équivaut à la réinjection d'un débit parasite Q_{cor}.

Pour simuler l'effet de vidange, il faut fournir à OUAIP le diamètre de la colonne de refoulement (d_v, en m), la hauteur de la colonne de refoulement (h_v, en m), ainsi qu'un « coefficient de vidange » (K_v en m²/s). Ce dernier représente le degré d'ouverture de la colonne. Difficile à apprécier, il varie entre 0 (clapet étanche) et l'infini (absence de clapet, ouverture maximale). Un quatrième paramètre, optionnel, est le temps de vidange (t_v en s), il correspond à la durée de chute libre de l'eau sur la hauteur h_v. S'il n'est pas spécifié, alors $t_v = \frac{\pi r^2}{Kv}$. Voir le § 4.4.6 pour la précision du calcul.

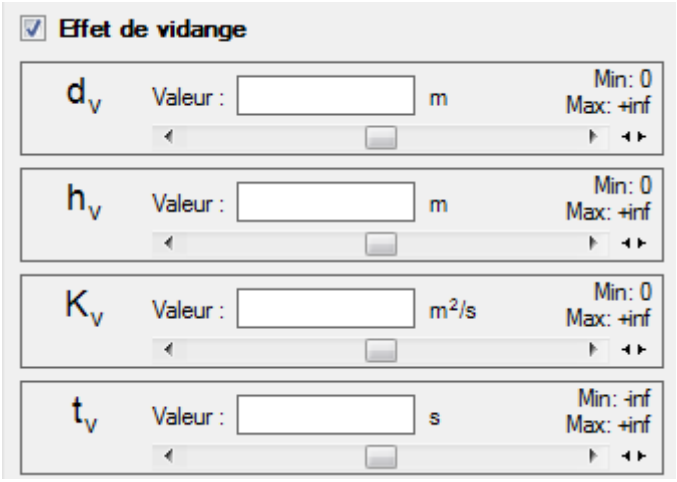


Illustration 21 : Paramètres de l'effet de vidange

2.3.3. Effet de skin (effet pariétal)

L'effet de skin (W_{skin}, sans unité, Illustration 23) correspond à des pertes de charges singulières (linéaires) en paroi de forage - en cas de colmatage par le « cake » (Illustration 22) résiduel laissé par la boue de foration ou, au contraire, à une perméabilité accrue induite par la fissuration du milieu - naturelle ou résultant de la décompression des terrains par le forage.

La fourchette de valeurs [-2 ; +40] proposée pour le skin permet de traduire des effets pariétaux importants pour les rapports perméabilité de la formation aquifère (K_f) / perméabilité de la zone à effet de skin (K_s) les plus courants :

- Le skin est positif quand K_f / K_s > 1 (de 10 à 100 pour un puits colmaté).
- Le skin est négatif quand K_f / K_s < 1 (de 10^{-2} à 10^{-5} en cas de fissuration périphérique).

L'effet de skin est un rabattement additionnel (s), calculé de la manière suivante :

$$s = skin * \left(\frac{Q}{2\pi T}\right) \qquad avec \qquad skin = \left(\frac{K}{K_s - 1}\right) \ln\left[\frac{(r_0 + es)}{r_0}\right]$$

Soit :

- Q : débit de pompage (m^3/s),
- skin : paramètre d'effet de skin (sans unité),
- K : perméabilité de la formation aquifère (m/s),
- K_s : perméabilité de la zone à effet de skin (m/s),
- r_0 : rayon du puits (m),
- es : épaisseur de la zone à effet de skin (m),
- s : rabattement supplémentaire (ou non) dû à l'effet de skin (m).

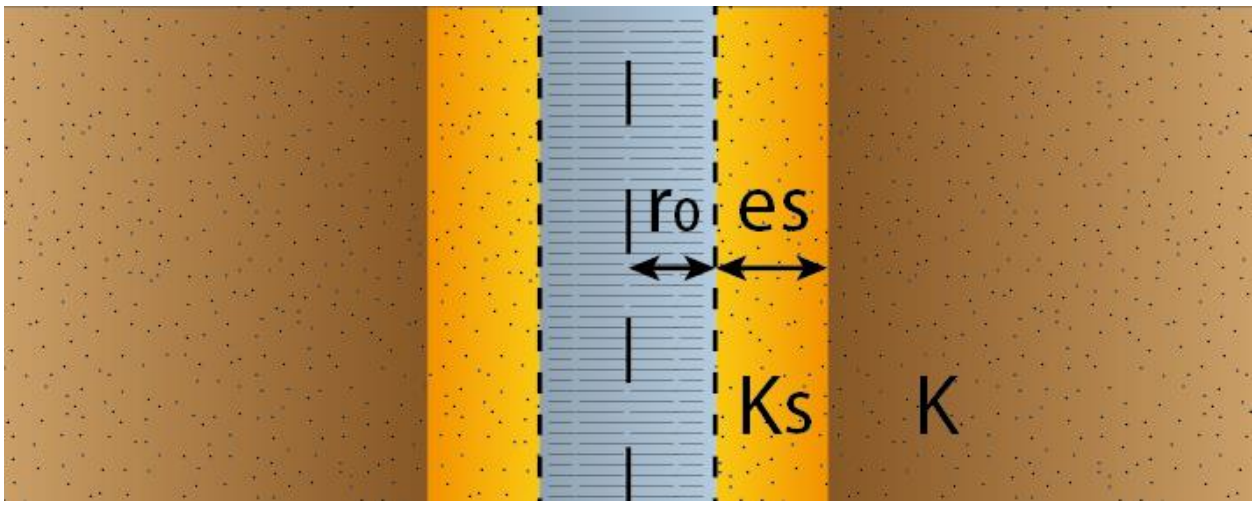


Illustration 22 :Schéma de l'effet de skin

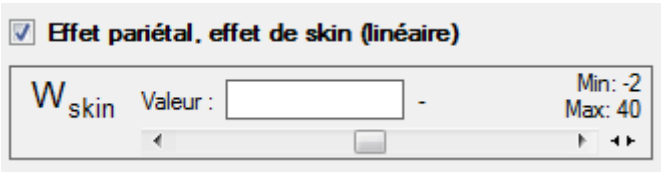


Illustration 23 : Effet pariétal, effet de skin

2.3.4. Pertes de charge quadratiques

Les pertes de charge quadratiques ne se manifestent que dans le puits de pompage. Elles sont générées par l'équipement de l'ouvrage, et plus particulièrement par les effets de turbulence dans le proche-puits, les crépines et les tubages.

Les pertes de charges quadratiques ont deux origines :

- Le passage de l'eau dans le massif filtrant et à travers les fentes de la crépine (pertes de charges singulières).
- L'écoulement turbulent dans la colonne de captage, de la crépine du forage à la crépine de la pompe.

Comme leur nom l'indique, les pertes de charges quadratiques sont proportionnelles au carré du débit, soit : $s = C.Q^2$, où :

- s : rabattement supplémentaire dû aux pertes de charges quadratiques [L].
- Q : débit pompé dans le puits [L^3/T].
- C : coefficient de perte de charge quadratique [T^2/L^5].

Ce terme s'ajoute au rabattement calculé.

Pour évaluer les pertes de charge quadratiques dans un puits de pompage, il faut effectuer un pompage d'essai particulier, appelé essai de puits par paliers de débits (ou "pompage par paliers"). Ce type de test consiste à enchaîner plusieurs paliers de débit - entre 3 et 5 - séparés par des arrêts de pompage. En règle générale, il est souhaitable que toutes les phases de test - paliers de pompage et paliers de remontée - soient de même durée.

OUAIP permet de prendre en compte les pertes de charge quadratiques en saisissant soit directement le coefficient C (Illustration 24) soit en exprimant la valeur de la perte de charge observée pour un débit donné (Illustration 25, calcul automatique du coefficient de pertes de charges quadratiques).

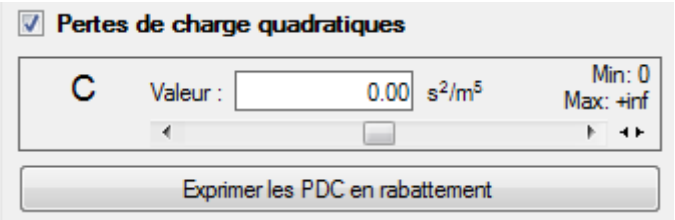


Illustration 24 : Paramètre des pertes de charge quadratiques

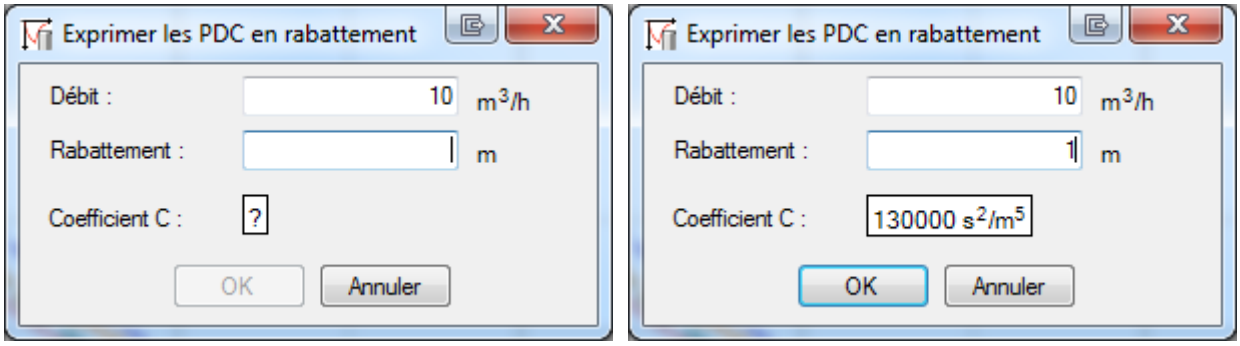


Illustration 25 : Calcul des pertes de charge quadratiques au travers de la perte de charge (rabattement en m) pour un débit donné

2.3.5. Effets de limites (alimentée, étanche)

OUAIP permet de simuler deux types de limites rectilignes (Illustration 26) :

- Les limites de réalimentation (à « charge imposée »).
- Les limites étanches (à « flux nul »).

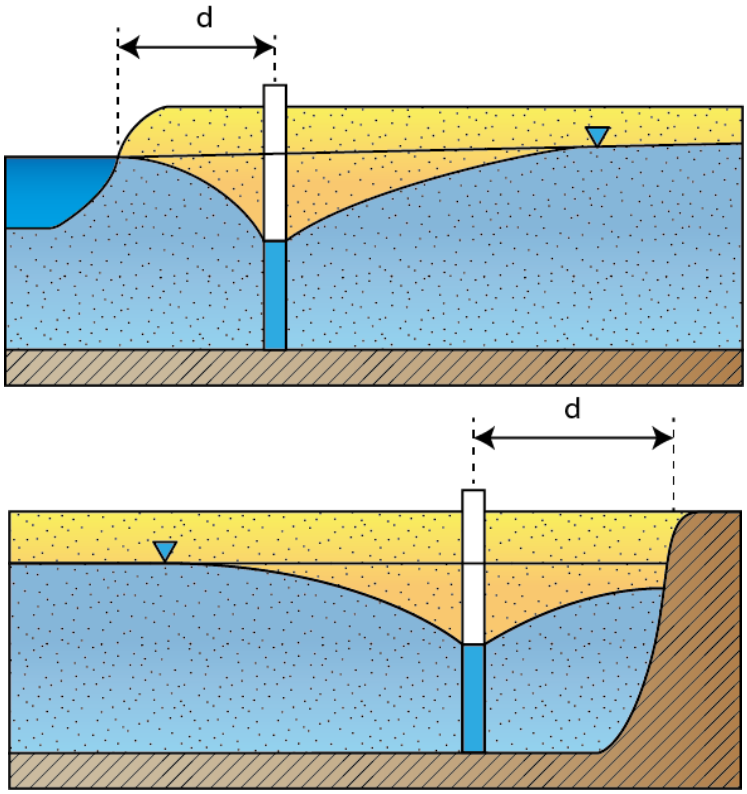


Illustration 26 : Schéma de l'effet d'une limite alimentée (en haut) et d'une llimite étanche (en bas) sur le cône de rabattement

Les limites sont définies dans un repère orthonormé (Illustration 27) où :

- Le puits de pompage est centré en X = 0 m et Y = 0 m.
- Le piézomètre a pour coordonnées X et Y de sorte que $X^2 + Y^2 = R_{obs}^2$. Par défaut, le piézomètre se trouve sur l'axe X, soit l'angle alpha par rapport à l'axe Y = 90°. Lorsque alpha = 0°, le piézomètre se trouve aligné avec l'axe Y (Illustration 28 et Illustration 29).
- Les limites sont parallèles à l'axe des abscisses :
    - L1, la première limite, a une ordonnée positive Y > 0
    - L2, la seconde limite, a une ordonnée négative Y < 0

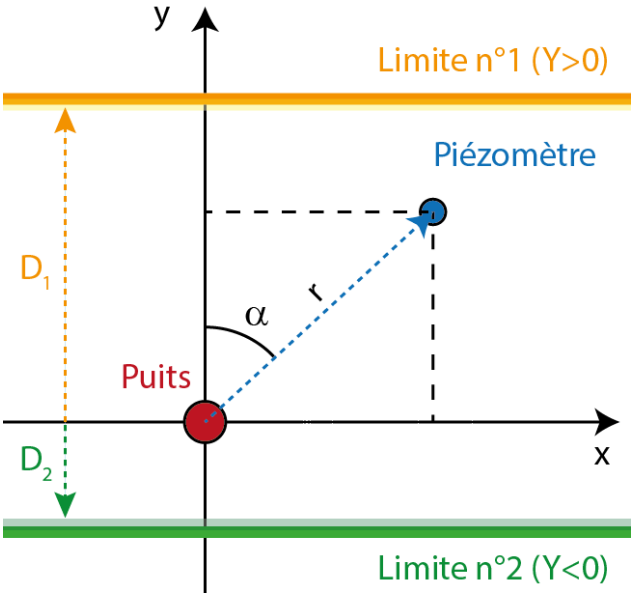


Illustration 27 : Schéma de la définition des limites dans un repère orthonormé

Chaque limite est soit étanche, soit alimentée, soit absente (c'est-à-dire sans rôle particulier : aquifère d'extension infinie).

OUAIP prend en compte les limites en simulant la présence d'une image située à une distance 2d du puits de pompage (où d est la distance puits - limite). Les rabattements imputables au puits réel et au puits image s'ajoutent ; c'est le principe de superposition.

Les limites sont localisées en indiquant (Illustration 28 et Illustration 29) :

- Soit la distance d séparant le puits de pompage de la limite.
- Soit le temps d'influence t au puits de pompage : t est l'instant où le rabattement s induit par le puits image situé à une distance 2d du puits de pompage commence à atteindre celui-ci.

t et d peuvent être évalués en appliquant l'approximation de Jacob :

- $s = \frac{Q}{4\,\pi\,T} \log\left(\frac{2.25\,T\,t}{4\,d^2 S}\right)$
- d'où : $\frac{2.25\,T\,t}{4\,d^2\,S} = 1$
- soit : $t = \frac{4\,d^2\,S}{2.25\,T}$
- ou encore : $d^2 = \frac{2.25\,T\,t}{4\,S}$

Dans OUAIP, pour calculer le temps à partir duquel le rabattement atteint la limite on utilise la solution de Theis, on obtient (Bourdarot, 1996) :

- $d = 2\sqrt{\frac{T\,t}{S}}$
- $t = \frac{d^2 S}{4\,T}$

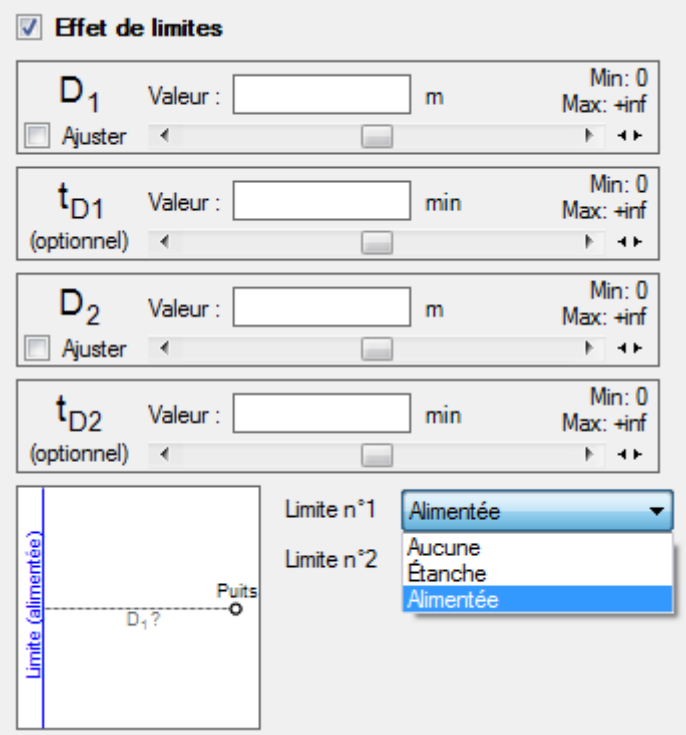


Illustration 28 : Paramètres de l'effet de limites au puits (cliquer sur le schéma pour l'agrandir)

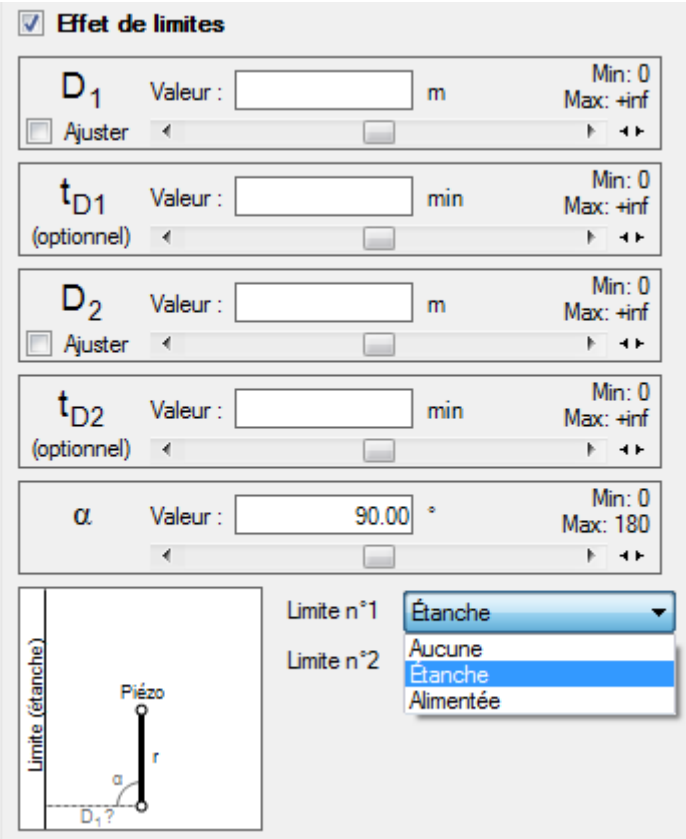


Illustration 29 : Paramètres de l'effet de limites au piézomètre (schéma cliquable)

3. Première utilisation rapide de OUAIP

Ce très court chapitre a pour objectif de montrer des exemples d'utilisation de OUAIP en seulement quelques minutes, au travers de projets déjà réalisés, dont il s'agit de modifier au besoin les paramètres. Il s'agit pour l'essentiel de se familiariser avec l'interface de OUAIP. Le chapitre « 5 Exemples d'utilisation » présente en détail les façons de créer un projet, d'importer ou saisir vos données, d'interpréter un essai ou simuler un pompage et d'éditer un rapport. Les exemples de projets se trouvent dans l'arborescence de OUAIP :

OUAIP-2.3\Tutoriels

- Tutoriel n°1 - Essai de puits
- Tutoriel n°2 - Essai de puits
- Tutoriel n°3 - Essai de puits
- Tutoriel n°4 - Essai de puits
- Tutoriel n°5 - Essai de nappe - Theis
- Tutoriel n°6 - Essai de nappe - Papadopulos-Cooper
- Tutoriel n°7 - Essai de nappe - Hantush-Jacob
- Tutoriel n°8 - Essai de nappe - Gringarten
- Tutoriel n°9 - Simulation
- Tutoriel n°10 - Simulation optimisation

3.1. INTERPRÉTER UN ESSAI DE PUITS

Vous pouvez tester/ouvrir les fichiers projets *.**ouaipp** suivants :

- Tutoriel n°1 - Essai de puits\Essais de puits - Solution Tutoriel n°1.ouaipp
- Tutoriel n°2 - Essai de puits\Essais de puits - Solution Tutoriel n°2.ouaipp
- Tutoriel n°3 - Essai de puits\Solution\1. TF1 - 2010 - Solution.ouaipp (et 7 autres fichiers *.ouaipp)
- Tutoriel n°4 - Essai de puits\Essais de puits - Tutoriel n°4 Solution.ouaipp

3.2. INTERPRÉTER UN ESSAI DE NAPPE

Vous pouvez tester/ouvrir les fichiers projets *.**ouaipi** suivants :

- Tutoriel n°5 - Essai de nappe - Theis\Essais de nappe - Solution Tutoriel n°5.ouaipi
- Tutoriel n°6 - Essai de nappe - Papadopulos-Cooper\Essais de nappe - Solution Tutoriel n°6.ouaipi
- Tutoriel n°7 - Essai de nappe - Hantush-Jacob\Essais de nappe - Solution Tutoriel n°7.ouaipi
- Tutoriel n°8 - Essai de nappe - Gringarten\Essais de nappe - Solution Tutoriel n°8.ouaipi

3.3. SIMULER UN POMPAGE D'ESSAI

Vous pouvez tester/ouvrir le fichier projet *.**ouaips** suivant :

- Tutoriel n°7 – Simulation\Simulation d'un essai de nappe - Solution Tutoriel n°7.ouaips

4. Interface graphique de OUAIP

4.1. INTERFACE DE SAISIE : LES ONGLETS

OUAIP est organisé sous forme d'onglets (il n'y a pas de menu déroulants) qui s'utilisent logiquement de la gauche vers la droite. Ils permettent la saisie des données, tandis que les graphiques traduisent instantanément le résultat des saisies. Selon le mode d'utilisation de OUAIP, il s'agit de 3 ou 4 onglets :

- En mode interprétation d'un essai de puits (Illustration 30) : dans ce mode l'onglet « Formule » est absent car une seule méthode est utilisée pour interpréter un essai de puits par paliers de débits non enchainés (méthode de Jacob, 1947).

Illustration 30 : Onglets du mode interprétation d'un essai de puits

- Mode interprétation d'un essai de nappe ou simulation d'un pompage d'essai (Illustration 31) : dans ces deux modules, l'onglet « Formule » apparait, permettant à l'utilisateur de choisir parmi les solutions analytiques disponibles.

Illustration 31 : Onglets du mode interprétation d'un essai de nappe ou simulation d'un pompage d'essai

4.1.1. Onglet Données

En mode interprétation d'un essai de puits

L'onglet Données est présenté ci-dessous (Illustration 32). Pour démarrer votre projet, il est recommandé d'identifier l'ouvrage par son nom (son numéro BSS par exemple), le nom de l'ouvrage sera par la suite repris dans le rapport d'interprétation.

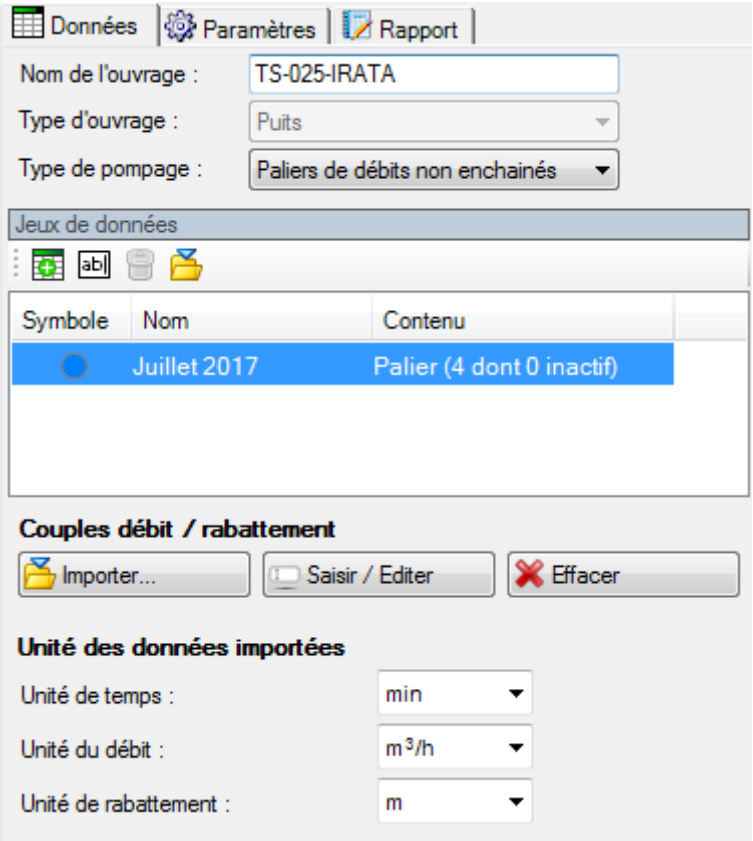


Illustration 32 : Onglet Données en mode interprétation d'un essai de puits

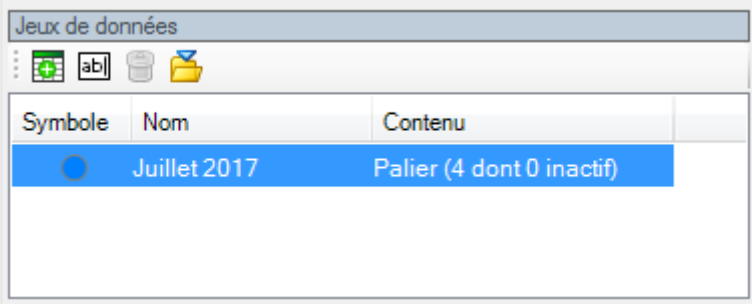
Le **type d'ouvrage** est invariable puisqu'un essai de puits est par définition réalisé sur un ouvrage en pompage appelé puits pour puits de pompage (en opposition à piézomètre).

Le **type de pompage**, à titre informatif (l'information est reprise dans le rapport de pompage), renseigne sur la façon dont l'essai de puits a été réalisé :

- Indéterminé (si les données sources ne sont pas accessibles ou non connues).
- Par « Paliers de débits enchainés », dans ce cas il est nécessaire/recommandé d'utiliser la méthode de Bierschenk (1963) (non intégrée à OUAIP) pour interpréter l'essai.
- Par « Paliers de débits non enchainés », OUAIP met en œuvre la méthode ad'hoc (méthode dite de Jacob) pour interpréter ce type d'essai de puits.

Pour plus d'informations sur l'interprétation des essais par paliers, se référer au rapport BRGM/RP-65683 (Gutierrez, 2016), en ligne : http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-65683-FR.pdf

Dans l'encart « Jeux de données », il est possible de renseigner un ou plusieurs essais de puits dans le cas où l'on voudrait comparer des essais de puits réalisés dans le temps par exemple. Pour chaque jeu de données, il est possible d'associer une ou plusieurs interprétations. En revanche, une interprétation est associée à un jeu de données.



Les icones de l'encart jeux de données permettent de :

- Ajouter un jeu de données (couple débit, rabattement).
- Renommer un jeu de données.
- Supprimer un jeu de données.
- Importer un fichier *.ouaipp pour ajouter un nouveau jeu de données préexistant.

Deux méthodes permettent d'intégrer vos données de débits et rabattements correspondants :

- Importer... **« Importer » un fichier** contenant les couples de débits et rabattements pour une durée identique de pompage. Les types de fichiers lus sont CSV, TXT, XLS ou XLSX, les données doivent être organisées en tableau et les en-têtes doivent contenir le nom de la colonne et son unité. Des exemples de fichiers CSV sont donnés dans le répertoire de OUAIP : \Données.
- Saisir / Editer **« Saisir / Editer » permet de copier-coller** les données depuis un tableur ou de saisir les données à la main. Dans le tableur OUAIP, utiliser le raccourci Ctrl+V pour coller les données copiées. Il est aussi possible de modifier l'unité des données de débit et de rabattement.

Effacer « Effacer » permet d'effacer les données intégrées dans OUAIP.

L'encart « Unité des données importées » permet de contrôler / modifier les unités des données importées.

En mode interprétation d'un essai de nappe

L'onglet Données est présenté ci-dessous (Illustration 33). Pour démarrer votre projet, il est recommandé d'identifier dès le début l'ouvrage par son nom ou son numéro BSS par exemple, le nom de l'ouvrage sera par la suite repris dans le rapport d'interprétation.

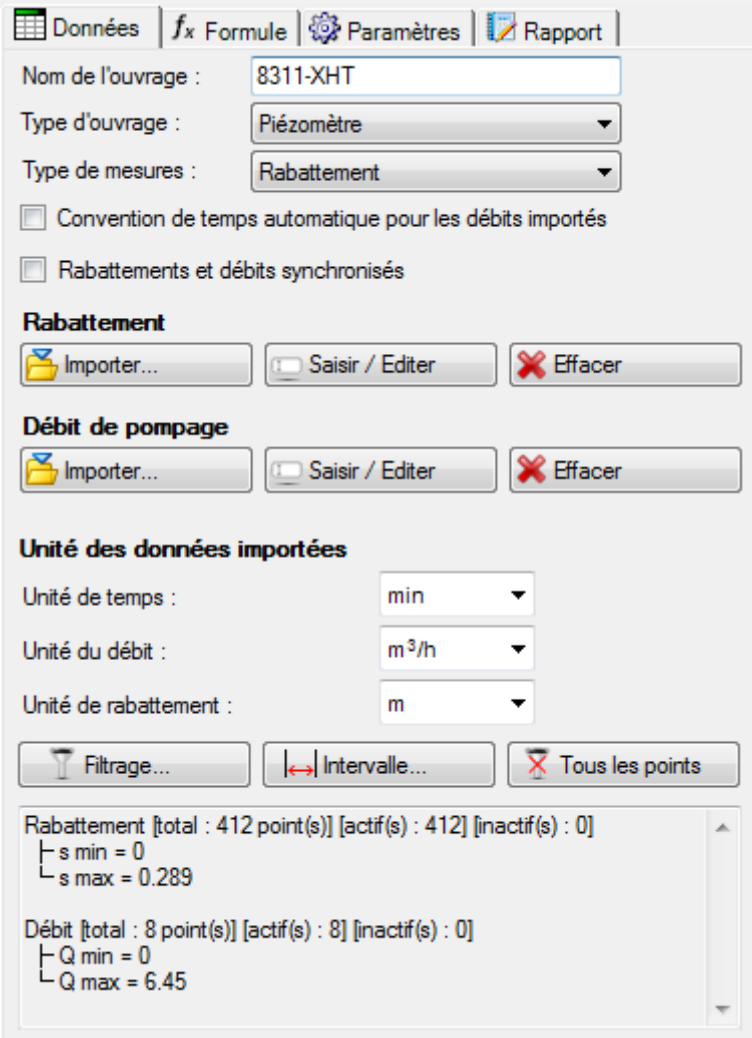


Illustration 33 : Onglet Données (en mode interprétation d'un essai de nappe)

Le type d'ouvrage correspond à l'ouvrage dans lequel la mesure de rabattement ou de profondeur du niveau d'eau a été réalisée :

- Si la mesure a été réalisée dans le puits de pompage choisir : **Puits**.
- Si la mesure a été réalisée dans un ouvrage de surveillance choisir : **Piézomètre**.

NB : Les solutions analytiques choisies par la suite dépendent du type d'ouvrage.

Type de mesures correspond à la nature des mesures réalisées/importées :

- S'il s'agit d'une profondeur d'eau par rapport à un repère de mesure choisir : **Profondeur**. Si cette option est choisie, la **« Profondeur du niveau statique initial : (m/repère)** » apparaît. Une fois ce paramètre saisit, OUAIP calcule automatiquement le rabattement qui en découle. Il est rappelé que la profondeur du niveau statique ou dynamique est compté positivement vers le bas. Soit, lorsque la profondeur du niveau d'eau est de 5 m/repère on écrit 5.
- S'il s'agit directement d'un rabattement calculé (niveau dynamique moins niveau statique avant le début de l'essai) choisir : **Rabattement**. C'est le choix proposé par défaut, l'utilisateur doit avoir calculé le rabattement au préalable.

NB : OUAIP affiche toujours des rabattements.

Lorsqu'une mesure du niveau dynamique est réalisée, il n'y a pas d'ambiguïté, la mesure correspond à la date à laquelle elle a été faite.

En revanche, pour l'expression des débits de pompage, il peut y avoir ambiguïté :

- Soit la mesure traduit le début d'un palier de débit (à partir de X minutes le débit est de Y).
- Soit la mesure traduit la fin d'un palier de débit (débit Y jusqu'à X minutes).

Lors d'un import, OUAIP pourra être amené à poser la question pour lever l'ambigüité (Illustration 34).

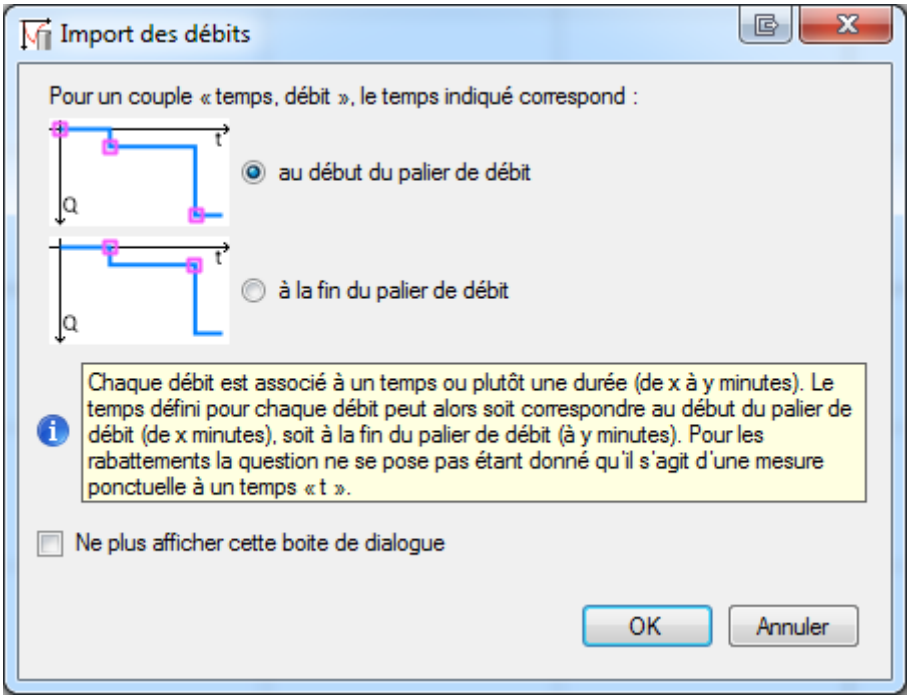
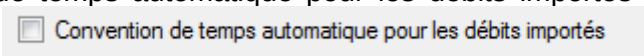
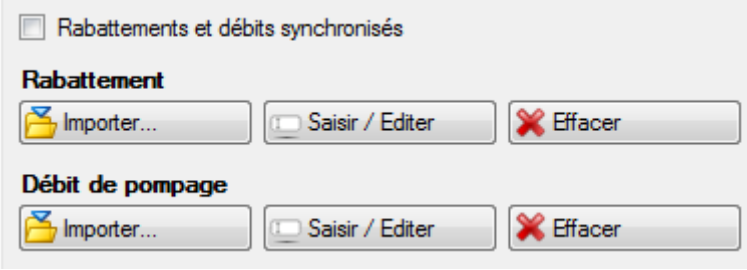


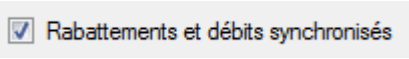
Illustration 34 : Convention de temps pour les débits variables

Lorsque la case « Convention de temps automatique pour les débits importés » est cochée, OUAIP ne pose pas la question. 

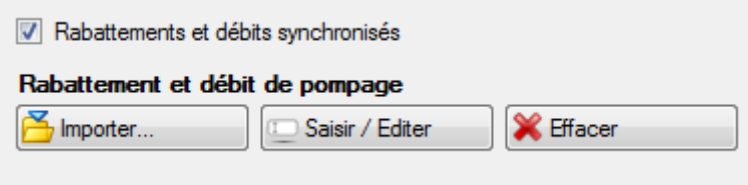
Dans tous les cas, il est souhaitable d'augmenter la fréquence des mesures dès lors que le débit varie. Lors de la constitution d'un fichier de données on prendra soin de conserver les valeurs qui encadrent ces variations. Par exemple, à la fin du pompage, la dernière mesure sera réalisée juste avant de couper la pompe et la première immédiatement après.

OUAIP donne la possibilité de saisir ou importer les débits et les rabattements de manière simultanée (temps, rabattement, débit) ou séparément (temps, débit) et (temps, rabattement). Par défaut, on suppose que les données de rabattements et de débits ont été faites à des temps différents (données non synchronisées) : par la suite on peut saisir / importer / copier-coller depuis un tableur les données de rabattement et de débit de pompage de manière indépendante.



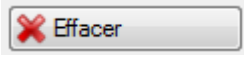
Si en revanche les données de rabattements et débits ont été systématiquement mesurés aux mêmes temps, cocher la case : 

Dans ce cas, les temps rabattements débits sont importés ou saisis pour des temps communs :



Dans tous les cas, deux méthodes permettent d'intégrer vos données à OUAIP :

- **« Importer » *via* un fichier** : l'import de données (temps et rabattement, temps et débit ou temps rabattement et débit) est possible via le bouton « Importer ». Les types de fichiers lus sont CSV, TXT, XLS ou XLSX, les données doivent être organisées en tableau et les en-têtes doivent contenir le nom de la colonne et son unité. Des exemples de fichiers CSV sont donnés dans le répertoire de OUAIP : \Données.
- **« Saisir / Editer » à l'aide d'un copier-coller** depuis un tableur (Illustration 35) : cliquer sur « Saisir / Editer », dans la fenêtre utiliser le raccourci Ctrl+V pour coller les données dans le tableur OUAIP. Il est également possible de modifier l'unité de la donnée à ce moment.



« Effacer » permet d'effacer les données intégrées dans OUAIP.

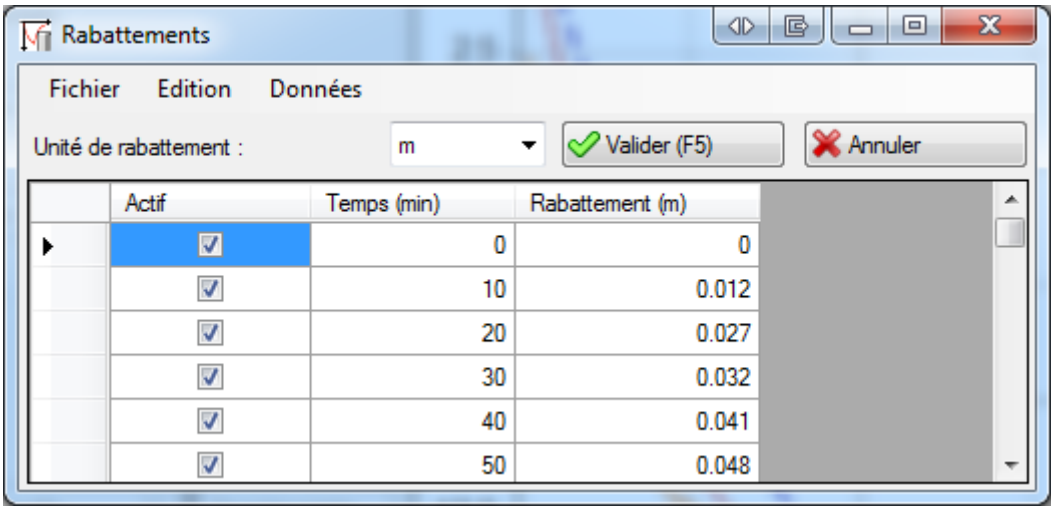


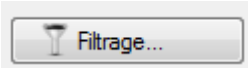
Illustration 35 : Fenêtre pour saisir et éditer des données

Il est possible de définir ou de modifier les « Unité des données importées » (temps, rabattement, débit) dans l'encart prévu à cet effet (Illustration 36) :

Illustration 36 : Unité des données importées dans OUAIP

NB : dans le cas où, malgré l'exhaustivité des unités proposées, vous ne trouveriez pas l'unité dont vous avez besoin (notamment pour les débits anglo-saxons) nous avons prévu de permettre à l'utilisateur d'ajouter de nouvelles unités de temps, de rabattement et de débit, ce point est décrit dans la section « 4.5.4 Unites.ini ».

Les boutons suivants permettent de :



Filtrer (Illustration 37) les données (afin d'alléger le graphique ou de réaliser une optimisation efficace) en fonction du temps, du rabattement, du débit ou selon l'ensemble de ces paramètres (Choisir « Toutes les conditions demandées doivent être réunies pour le même point). Il est possible de cocher « Masquer les points filtrés » pour alléger le graphique.

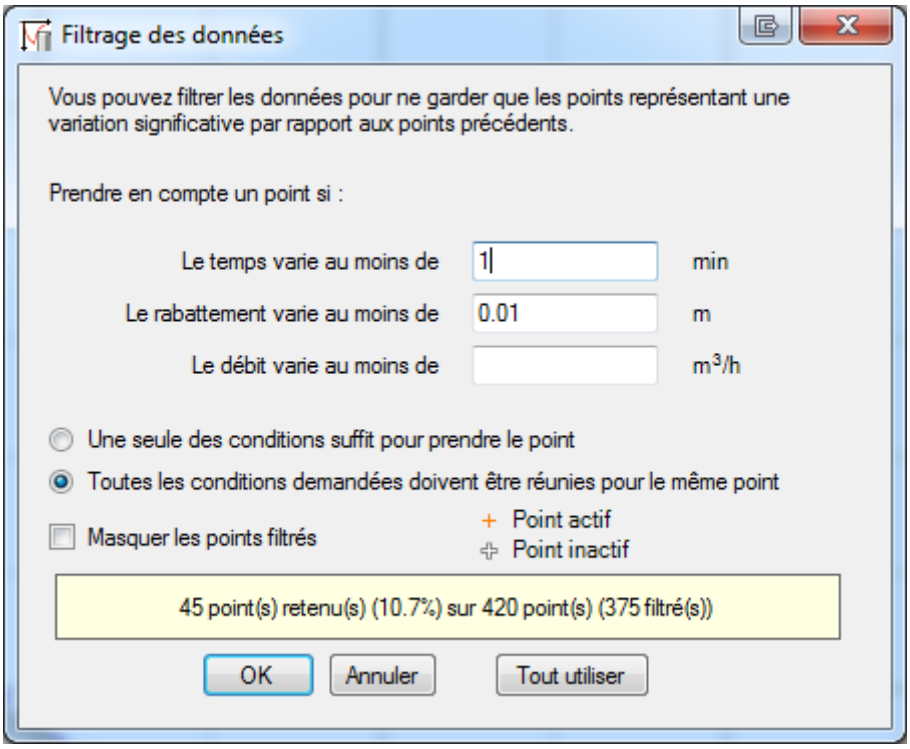
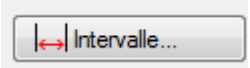


Illustration 37 : Filtrage des données de temps, rabattement et débit

NB : Si les données proviennent d'un appareil d'acquisition automatique à fréquence élevée et régulière, il est conseillé de filtrer le fichier avant importation dans OUAIP. Un fichier avec des milliers de points devient très lourd à gérer et ralentit les calculs.

En effet, le filtrage OUAIP n'efface pas les données filtrées. Le filtrage dans OUAIP n'accélère pas significativement les calculs.

Il est possible d'utiliser le filtre intelligent de OUAIP pour créer un fichier de données sur lequel travailler. Pour cela, il faudra utiliser le tableau de la barre de courbe (cf. 4.3.4) pour exporter les données expérimentales filtrées, puis importer ce nouveau fichier.



Sélectionner un intervalle (Illustration 38) de temps dans lequel les données seront affichées, les données en dehors de l'intervalle seront masquées. En cas d'optimisation des paramètres d'une solution, celle-ci se fera sur les données affichées (dites « actives » dans Saisir / Editer).

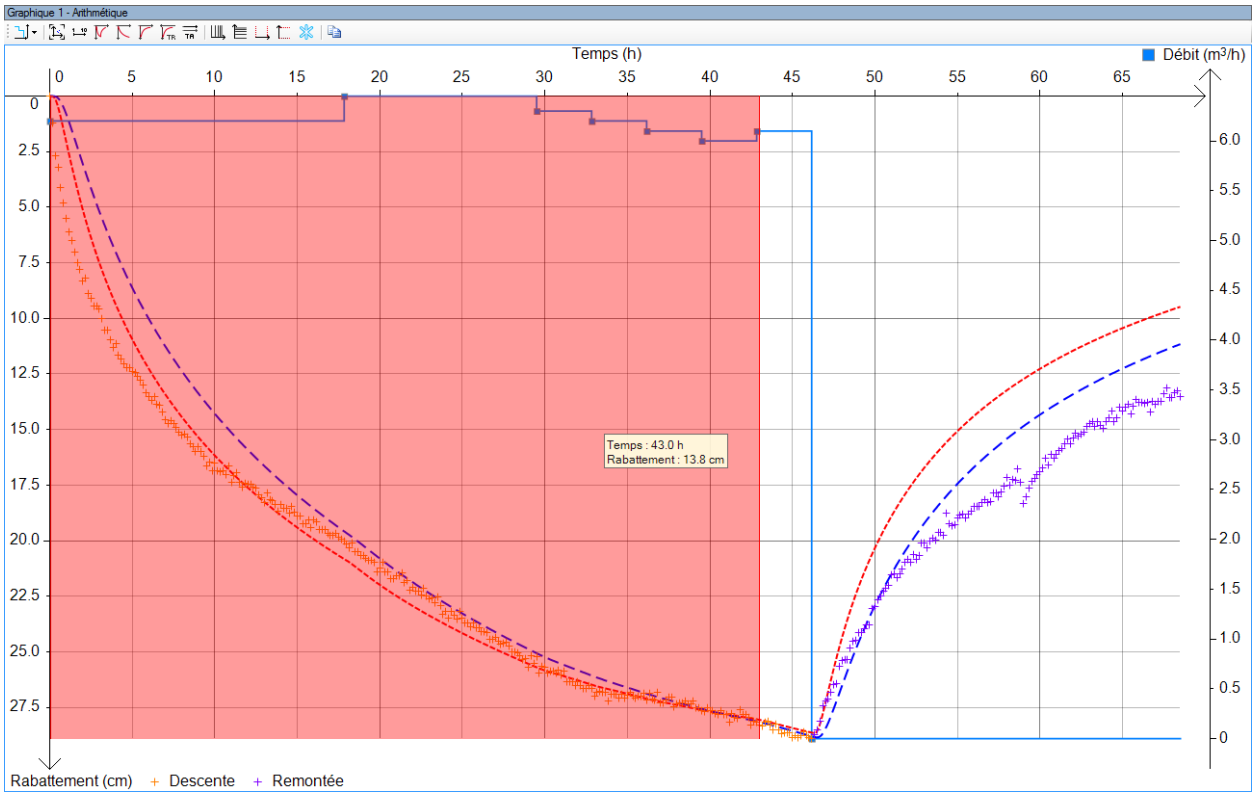
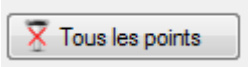


Illustration 38 : Sélection d'un intervalle de rabattement (en rouge)



Annule l'effet des filtres, rend visibles (actives) toutes les données.

Enfin, l'encart situé dans la partie inférieure de l'onglet (Illustration 39) indique le nombre de données importées, actives et inactives (par filtrage ou sélection par intervalle) ainsi que les minimum et maximum.

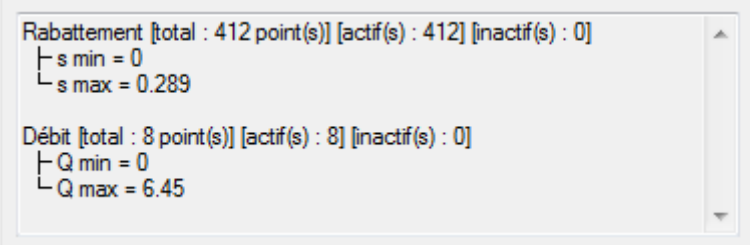


Illustration 39 : Informations synthétiques sur les données importées

En mode simulation d'un pompage d'essai

La seule différence avec le mode interprétation d'un essai de nappe tient au fait qu'en mode simulation, par définition, il n'y a pas de données mesurées (rabattement). Seul les débits de pompage sont à définir par l'utilisateur afin de pouvoir rendre actif ensuite l'onglet « Formule » (Illustration 40).

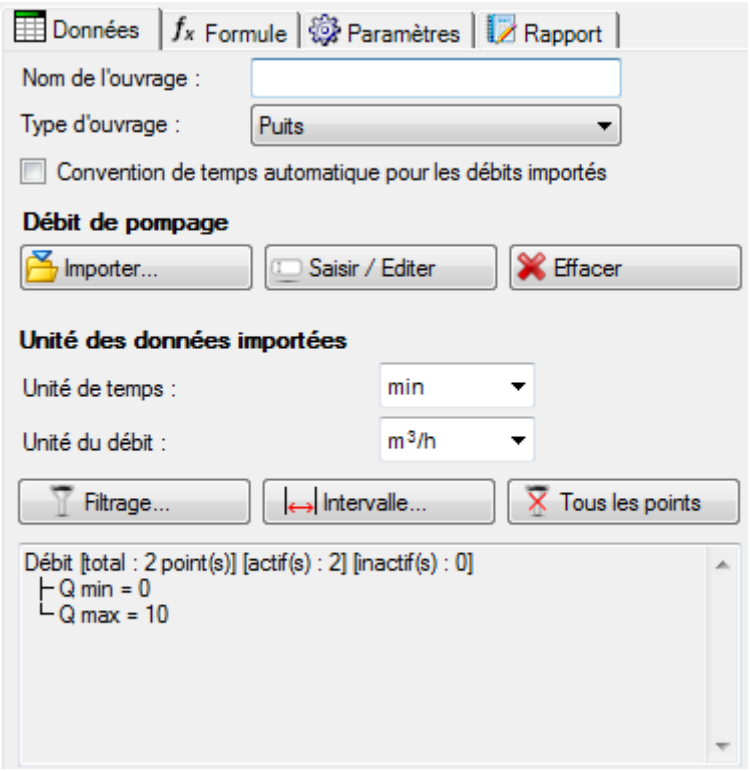


Illustration 40 : Onglet Données (en mode simulation d'un pompage d'essai)

4.1.2. Onglet Formule

En mode interprétation d'un essai de puits

Il n'y a pas d'onglet « Formule » (Illustration 30) dans ce mode étant donné que la seule solution utilisée pour interpréter un essai de puits par paliers de débits non enchainés est la méthode de dite de Jacob (1947), ou sa version dérivée (Rorabaugh, 1953).

En mode interprétation d'un essai de nappe

L'onglet « Formule » permet de sélectionner une solution analytique pour interpréter l'essai de nappe (Illustration 41).

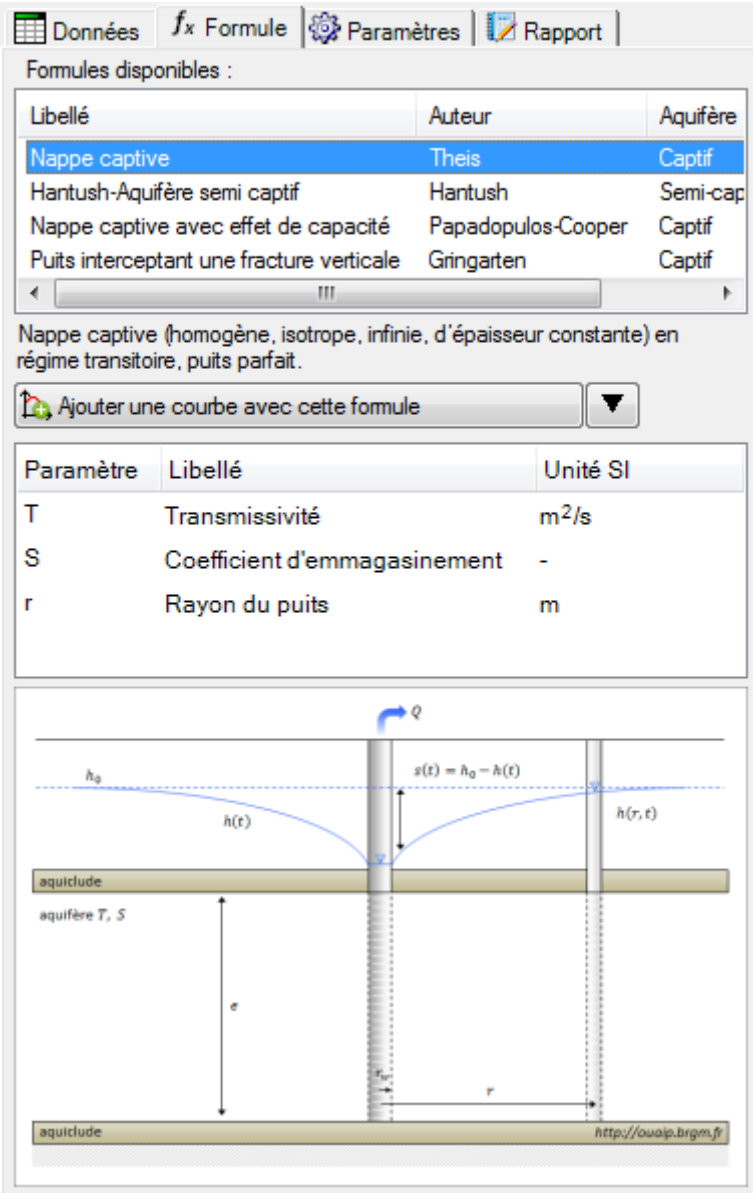


Illustration 41 : Onglet Formule

Chaque solution proposée intègre différentes hypothèses conceptuelles sur le milieu (milieu poreux, milieu fracturé), la configuration des ouvrages (puits parfait, puits incomplet) ainsi que les différents effets perturbateurs qui peuvent s'y produire. Ces hypothèses sont rappelées au chapitre « 2 Principes ».

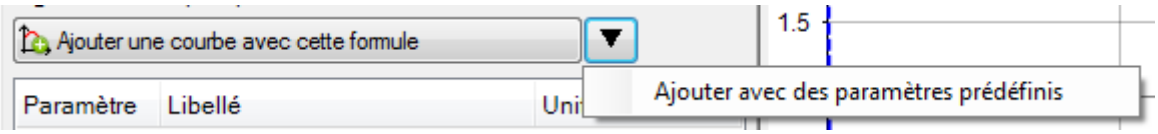
Formules disponibles :

Libellé	Auteur	Aquifère
Nappe captive	Theis	Captif
Hantush-Aquifère semi captif	Hantush	Semi-cap
Nappe captive avec effet de capacité	Papadopulos-Cooper	Captif
Puits interceptant une fracture verticale	Gringarten	Captif

Nappe captive (homogène, isotrope, infinie, d'épaisseur constante) en régime transitoire, puits parfait.

Le bouton « Ajouter une courbe avec cette formule » permet d'ajouter la courbe puis d'ajuster ses paramètres dans l'onglet suivant « Paramètres » (ce dernier devient actif une fois que la courbe a été ajoutée).

Il est également possible d'ajouter une courbe avec des paramètres par défaut en cliquant sur la flèche vers le bas :



Lorsqu'une solution est sélectionnée, les paramètres hydrodynamiques nécessaires à son ajustement, leurs unités et symboles associés sont synthétisés (Illustration 42). Un schéma conceptuel du système est aussi présenté.

Paramètre	Libellé	Unité SI
T	Transmissivité	m^2/s
S	Coefficient d'emmagasinement	-
r	Rayon du puits	m

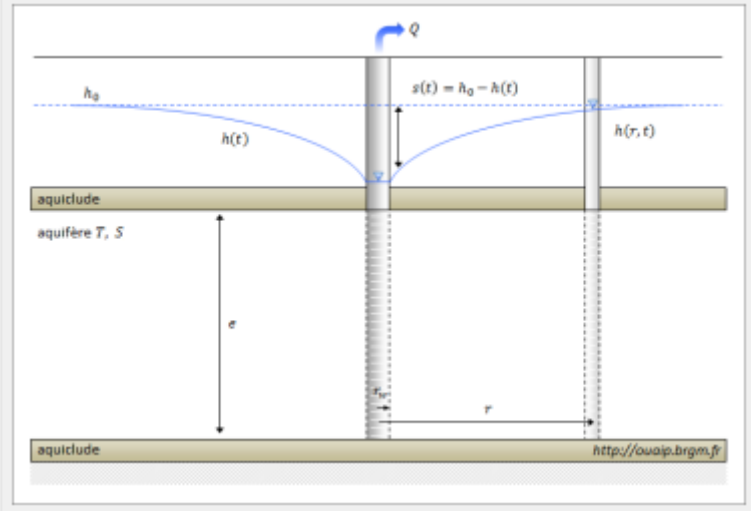


Illustration 42 : Description des paramètres de la solution analytique et schéma conceptuel associé

Lorsque les paramètres de la solution sont saisis, la courbe théorique se dessine dans la zone des graphiques. L'encart « Liste des courbes », situé en bas à droite sous la zone des graphiques, permet d'ajouter d'autres courbes afin de comparer d'autres jeux de paramètres ou d'autres solutions analytiques. La barre d'outils de la liste des courbes est présentée au chapitre « 4.3.4 Barre d'outils Courbe ».

En mode simulation d'un pompage d'essai

L'onglet « Formule » est identique en tout point au mode interprétation d'un essai de nappe.

4.1.3. Onglet Paramètres

L'onglet « Paramètres » ne devient actif qu'à certaines conditions :

- en mode interprétation d'un essai de puits, **les données** de l'essai doivent avoir été saisies ;
- en mode interprétation d'un essai de nappe **une solution analytique** doit avoir été choisie et ajoutée ;
- en mode simulation d'un pompage d'essai, **une solution analytique** doit avoir été choisie et ajoutée.

En mode interprétation d'un essai de puits

L'onglet « Paramètres » (Illustration 44) permet de saisir et d'ajuster les coefficients de pertes de charges linéaire (B) et quadratique (C) ainsi que l'exposant « n », par défaut défini à 2. Au-dessous des paramètres, un graphique rappelle la signification de la courbe caractéristique. Il est possible d'agrandir le graphique en cliquant dessus.

Les options de modifications des paramètres, des unités, des bornes et d'ajustement sont analogues quel que soit le mode de OUAIP. Pour éviter toute redite, elles sont décrites de manière complète dans la section suivante « En mode interprétation d'un essai de nappe ».

L'encart « Résolution du débit critique » permet de calculer, **si cette méthode se justifie**, le point d'égalité entre les pertes de charge linéaires et quadratiques (selon la norme AFNOR NF-X-10-999) ou bien de définir manuellement un débit critique et de calculer le rabattement quadratique correspondant ou l'inverse. Il est également possible de ne rien afficher si la détermination du débit critique est impossible.

Selon le cas, le débit critique et le rabattement associé sont affichés sur le graphique de la courbe caractéristique (Illustration 43).

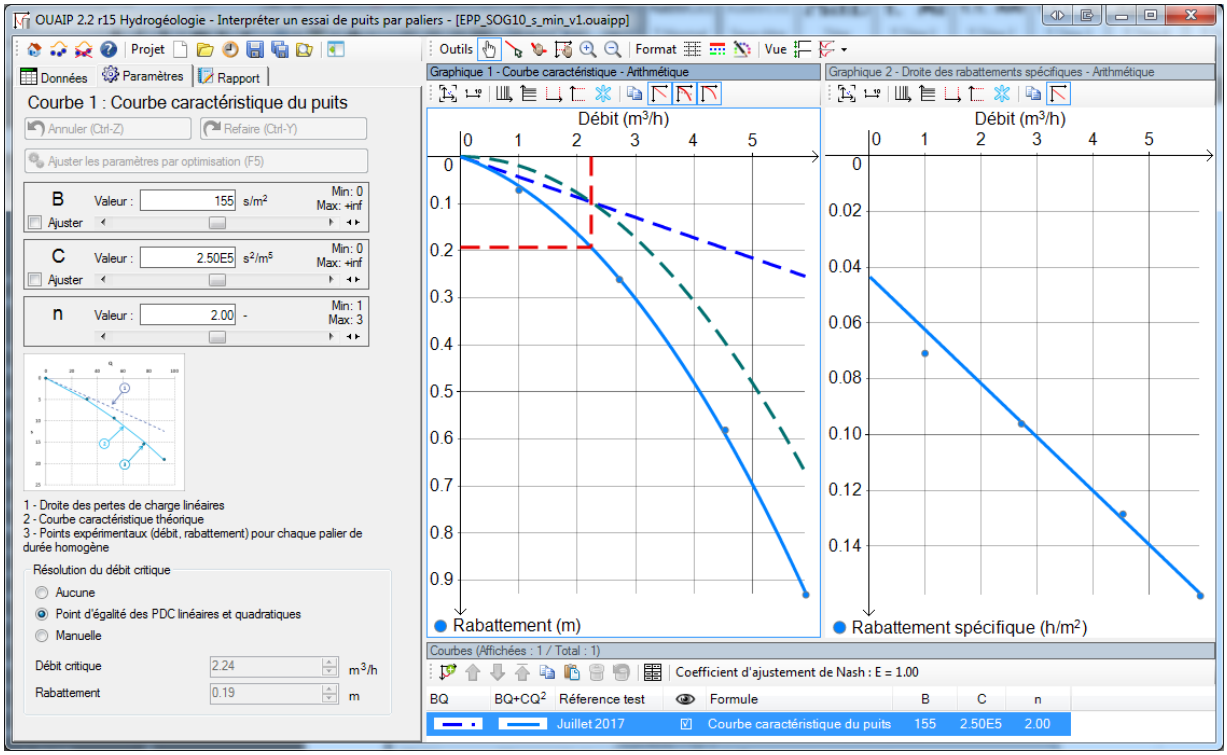


Illustration 43 : Calcul d'un débit critique selon OUAIP

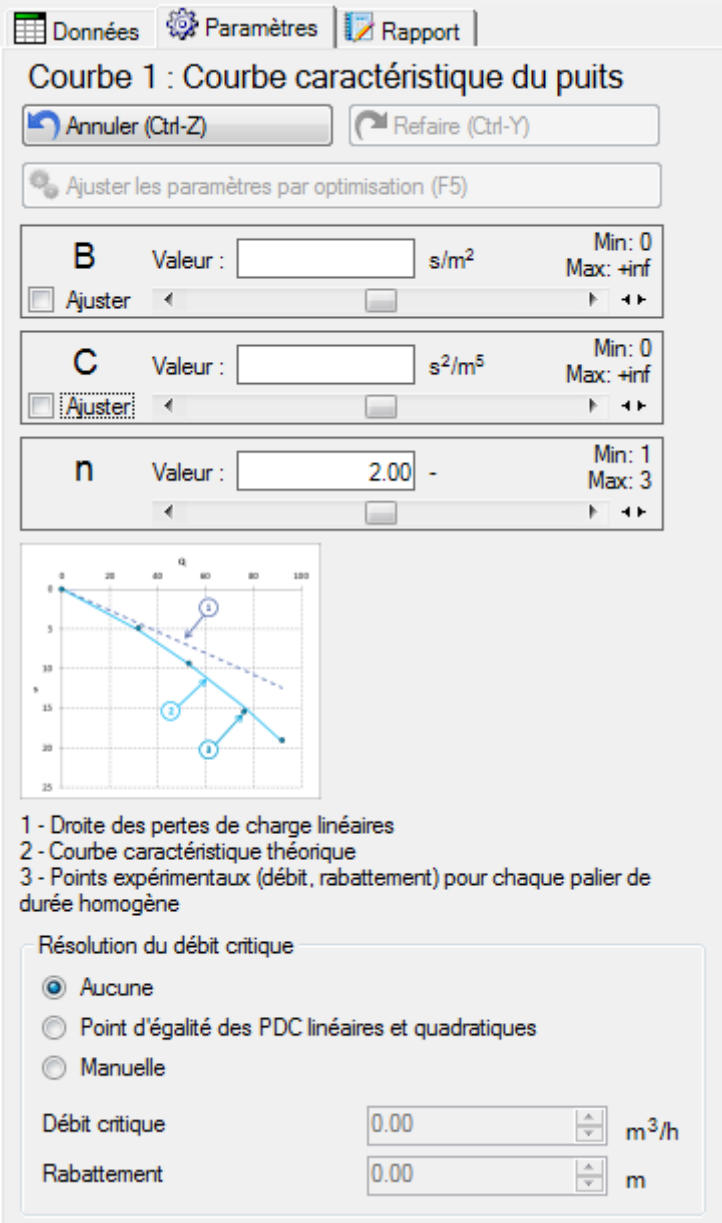


Illustration 44 : Onglet Paramètres en mode interprétation d'un essai de puits par paliers de débit non enchainés

En mode interprétation d'un essai de nappe

En mode interprétation d'un essai de nappe, l'onglet « Paramètres » permet de saisir les paramètres de la solution analytique choisie ainsi que les effets additionnels (Illustration 45).

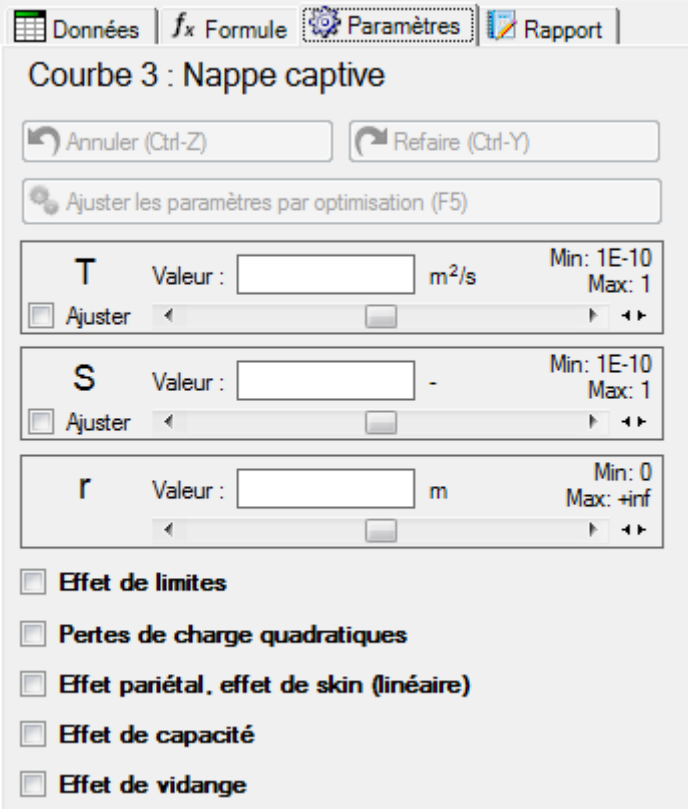


Illustration 45 : Onglet Paramètres en mode interprétation d'un essai de nappe

En survolant le symbole d'un paramètre, une info-bulle rappelle son nom. Les valeurs numériques des paramètres peuvent être saisies de la façon suivante :

- 1.25E-5 ou 1,25e-5.
- 0.0000125 ou 0,0000125.
- Le séparateur de décimale virgule ou point dépend de la configuration de votre système d'exploitation, OUAIP choisit automatiquement le séparateur par défaut de votre système que vous appuyiez sur la touche « , » ou sur « . ».

Après saisie d'une valeur, l'ascenseur horizontal peut être utilisé pour faire varier la valeur initiale du paramètre. Pour faire varier le paramètre de différentes manières et plus rapidement, associer l'utilisation de la touche Ctrl ou Shift tout en déplaçant l'ascenseur horizontal vers la gauche (diminution de la valeur) ou vers la droite (augmentation de la valeur).

Lorsque la souris pointe à droite de l'ascenseur sur « < > », un rappel est indiqué sur la modification des paramètres (Illustration 46) :

Notez que la présentation des paramètres a changé entre la version de OUAIP 1.9.3 et 2.3. Dans ce manuel on trouve la précédente présentation et la nouvelle (sur cette page).

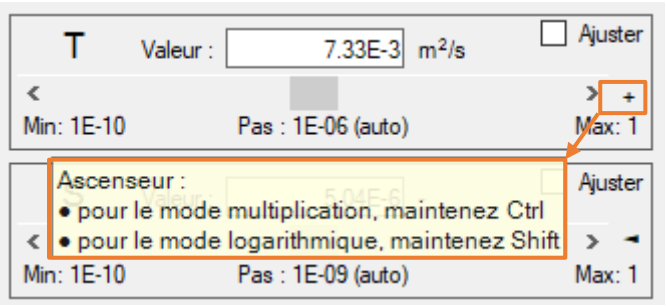


Illustration 46 : Modification des paramètres à l'aide des raccourcis clavier Ctrl ou Shift

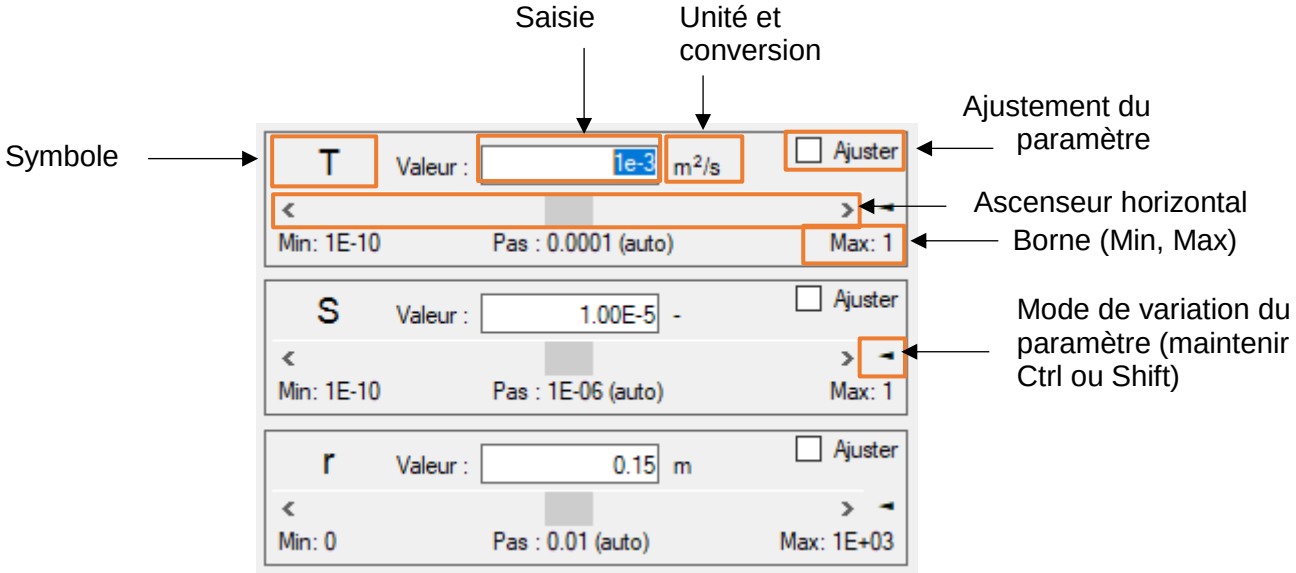


Illustration 47 : Description des paramètres de la solution de Theis

Un clic gauche sur l'unité permet de (Illustration 48) :

- Réaliser une conversion (Illustration 49) sans modifier l'unité.
- Modifier l'unité par défaut d'un paramètre.

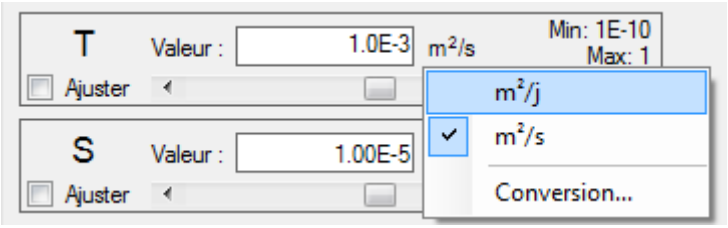


Illustration 48 : Menu déroulant des unités

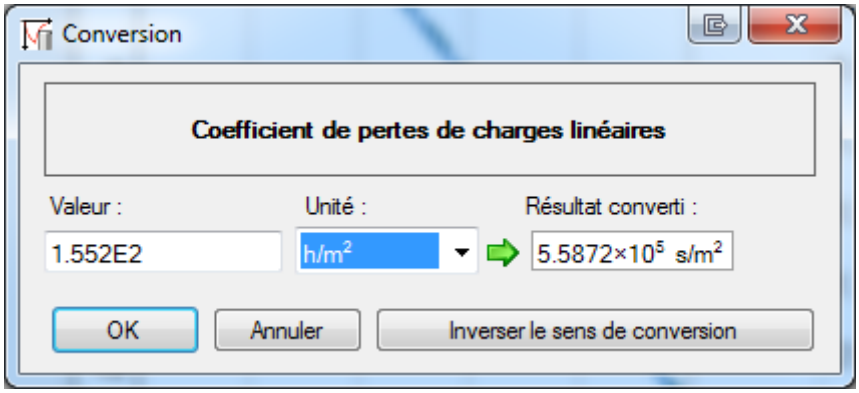


Illustration 49 : Utilisation du convertisseur d'unité de OUAIP

En cliquant sur les bornes d'un paramètre (Illustration 47, représentée par Min : 1E-10 Max : 1) il est possible de modifier les plages de valeurs minimale et maximale que peut prendre le paramètre pour restreindre le champ des solutions possibles (Illustration 50) :

- Bornes relatives : les bornes min et max correspondent à un pourcentage du paramètre saisi (ne pas dépasser 100 %).
- Bornes fixes : il s'agit des bornes choisies par défaut par OUAIP, l'utilisateur peut modifier la valeur minimale et maximale du paramètre.
- Bornes automatiques.

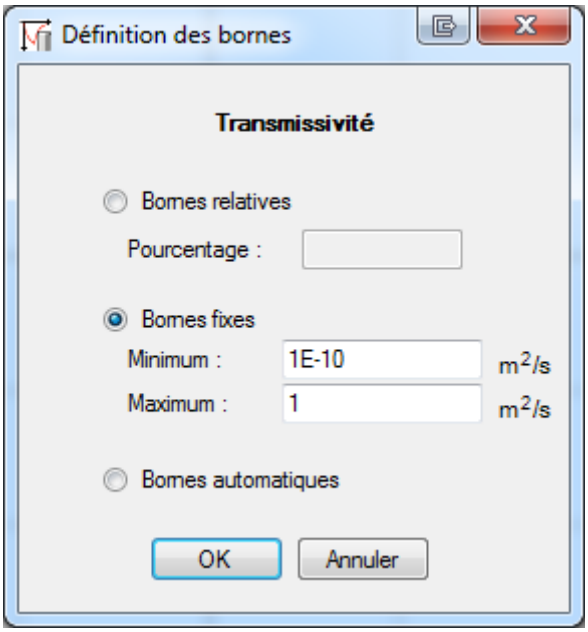


Illustration 50 : Bornes d'un paramètre (Transmissivité)

En mode simulation d'un pompage d'essai

En mode simulation d'un pompage d'essai, les paramètres disponibles pour la simulation sont par définitions les mêmes qu'en mode interprétation d'un essai de nappe (Illustration 51).

Toutefois, une fonction supplémentaire a été ajoutée dans la liste des effets, il s'agit de « Optimisation du débit » (Illustration 52).

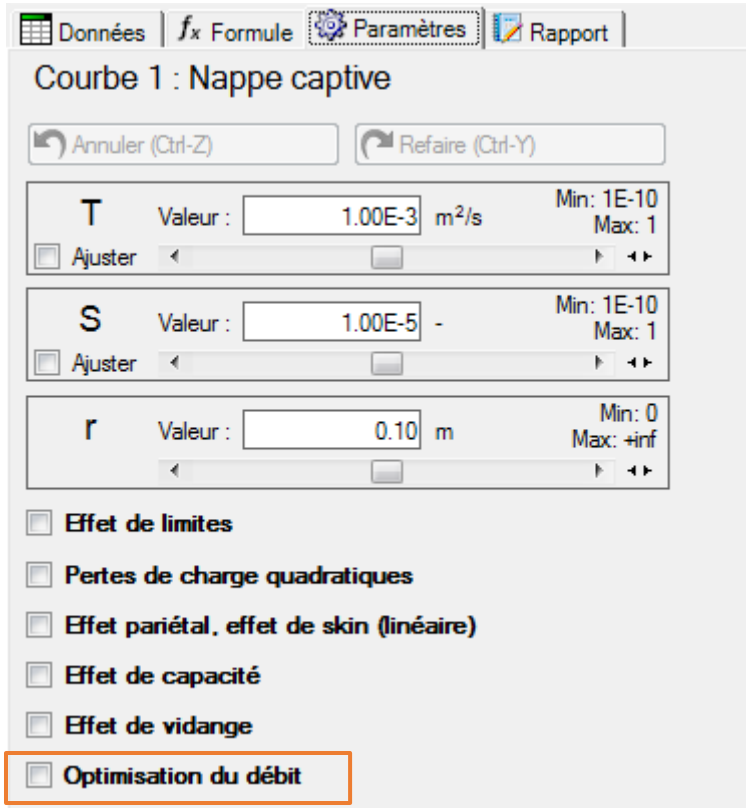


Illustration 51 : Onglet Paramètres en mode simulation d'un pompage d'essai

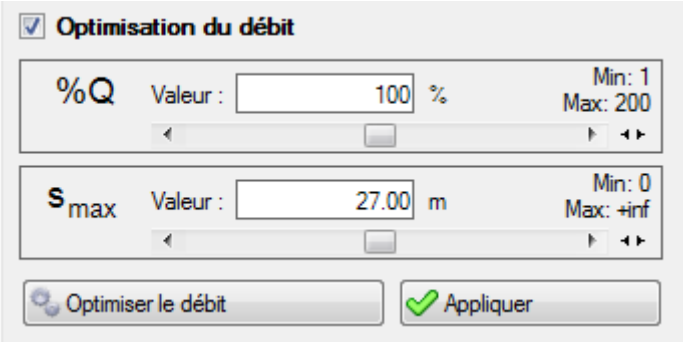
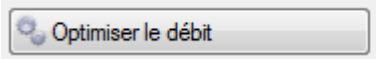
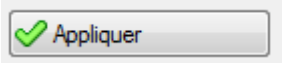


Illustration 52 : Fonctionnalité Optimisation du débit en mode simulation d'un pompage d'essai

Cette fonctionnalité permet de définir un rabattement maximal (s_{max}) que l'on souhaite ne pas dépasser (ou que l'on souhaite atteindre) dans le cadre de la simulation d'un pompage d'essai.



Le bouton « Optimiser le débit » permet de calculer le débit pour respecter ce rabattement maximal. Pour cela, une valeur de débit doit avoir été définie. La modification de débit qui doit être appliquée pour respecter s_{max} est indiqué dans « %Q » (pourcentage du débit nominal). Cette modification est globale. L'optimisation est pertinente pour tester un débit unique (pompage continu ou non) et définir ainsi un régime d'exploitation.



Il suffit de cliquer ensuite sur « Appliquer » pour que OUAIP modifie la chronique de débit initiale.

Il est aussi possible de modifier directement le champ %Q pour simuler l'effet d'une augmentation ou la diminution du débit sur le rabattement **(par défaut les bornes du paramètre %Q sont de 1 % à 200 %). Il est bien sûr recommandé de modifier ces bornes selon vos besoins.**

NB : il est recommandé de terminer sa chronique de débit par un arrêt des pompages (débit nul), sinon, OUAIP considère que le pompage est infini ce qui peut produire des résultats irréalistes. En pratique, une simulation de débit d'exploitation se fait sur un cycle hydrologique, une durée d'étiage, une période d'irrigation ...

4.1.4. Onglet Rapport

En mode interprétation d'un essai de puits

L'onglet « Rapport » (Illustration 55) permet de saisir des informations relatives à la réalisation de l'essai pour compléter l'édition du rapport.

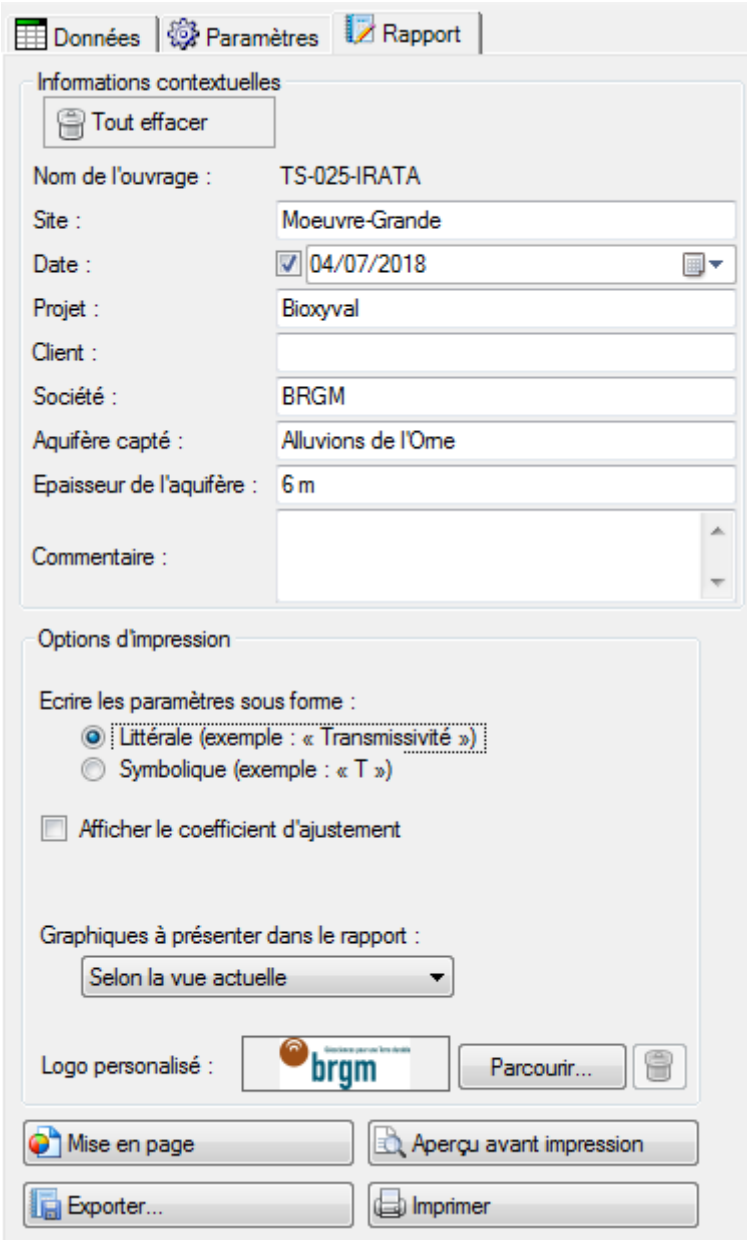


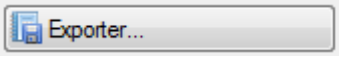
Illustration 53 : Onglet Rapport en mode interprétation d'un essai de puits

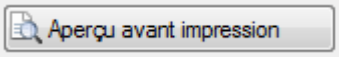
Dans les options d'impression il est possible :

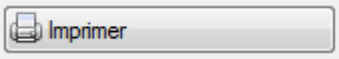
- De choisir une mise en forme littérale des paramètres hydrodynamiques (Transmissivité) ou concise (T).
- D'afficher ou masquer le coefficient d'ajustement de Nash (E).
- De choisir le ou les graphiques (graphique n°1, n°2) à afficher dans le rapport.
- De définir un logo personnalisé qui apparaîtra sur le rapport.

Les boutons situés en bas permettent :

-

De choisir la format et l'orientation d'impression.
- 

D'exporter le rapport au format PDF et/ou HTML ;
- 

D'ouvrir l'aperçu avant impression du rapport ;
- 

D'imprimer le rapport.

La fonction « Exporter » (Illustration 54) permet de définir les options suivantes :

- La destination des fichiers à exporter et si un sous-répertoire doit être créé pour stocker le rapport (recommandé pour éviter de mélanger les fichiers du rapport avec d'autres).
- Si l'on souhaite exporter au format PDF et/ou en HTML.
- La résolution des graphiques.
- Les marges des fichiers.

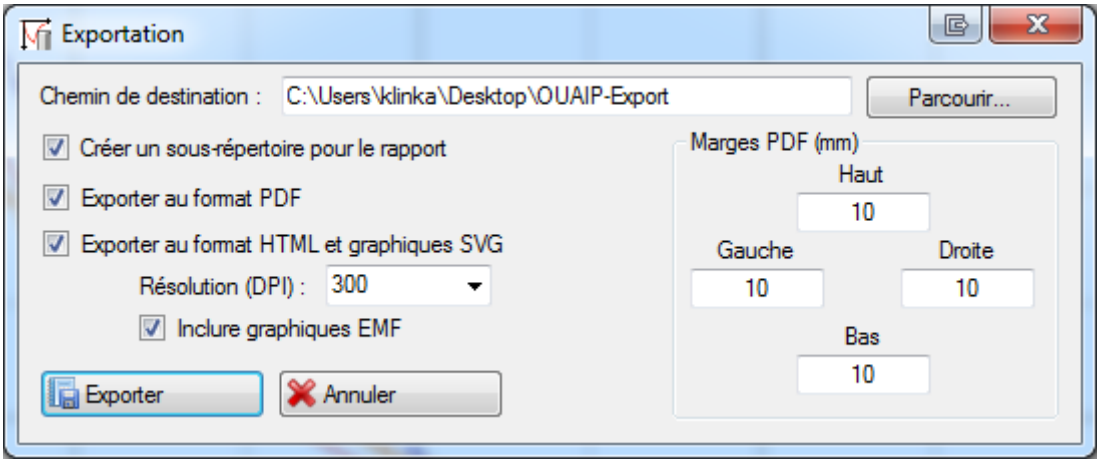


Illustration 54 : Fenêtre d'exportation du rapport en PDF et/ou HTML

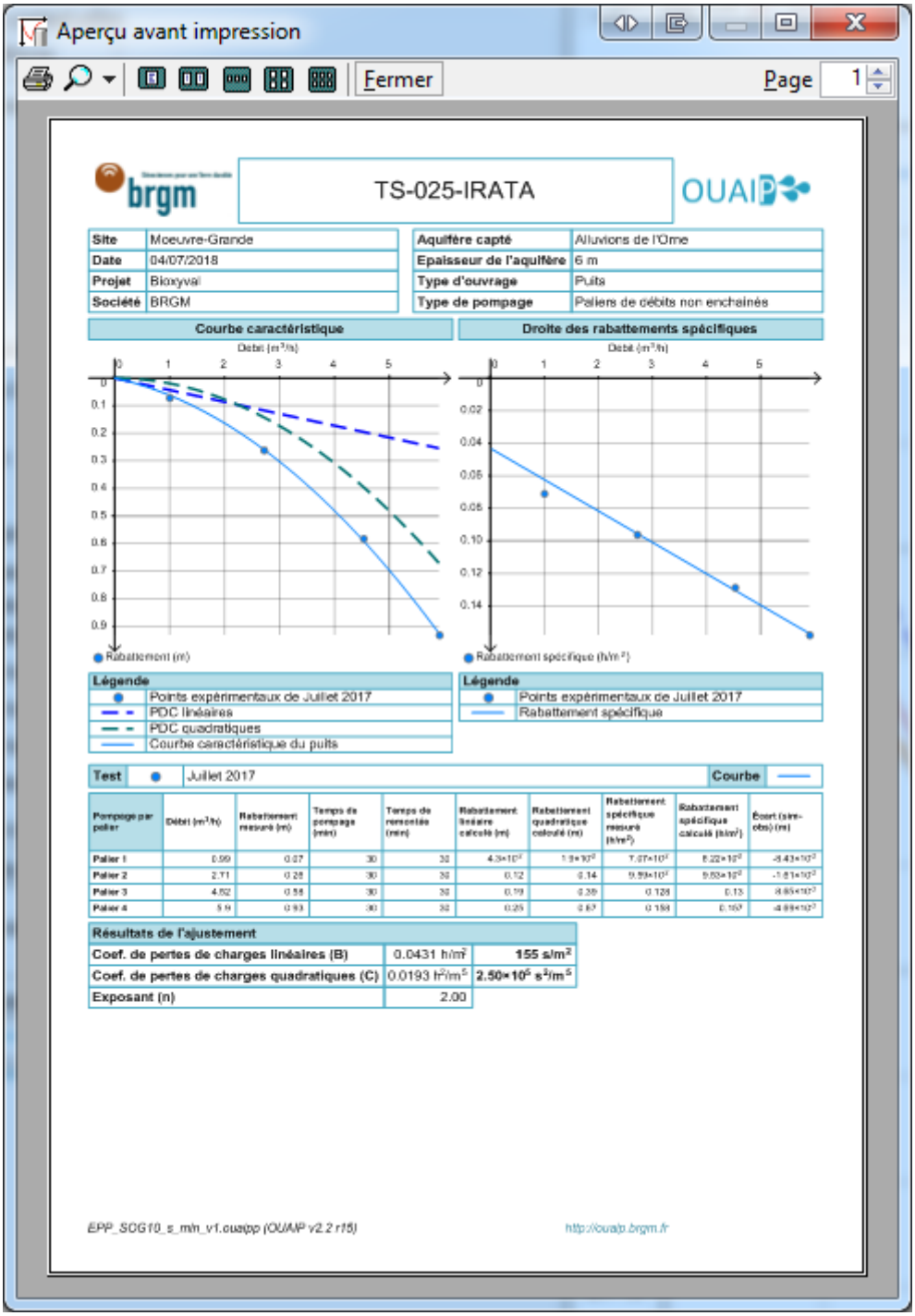


Illustration 55 : Aperçu avant impression du rapport

En mode interprétation d'un essai de nappe

En mode interprétation d'un essai de nappe (Illustration 56), deux options supplémentaires permettent d'afficher les points filtrés et d'inclure les données de l'essai sous forme de tableau dans le rapport.

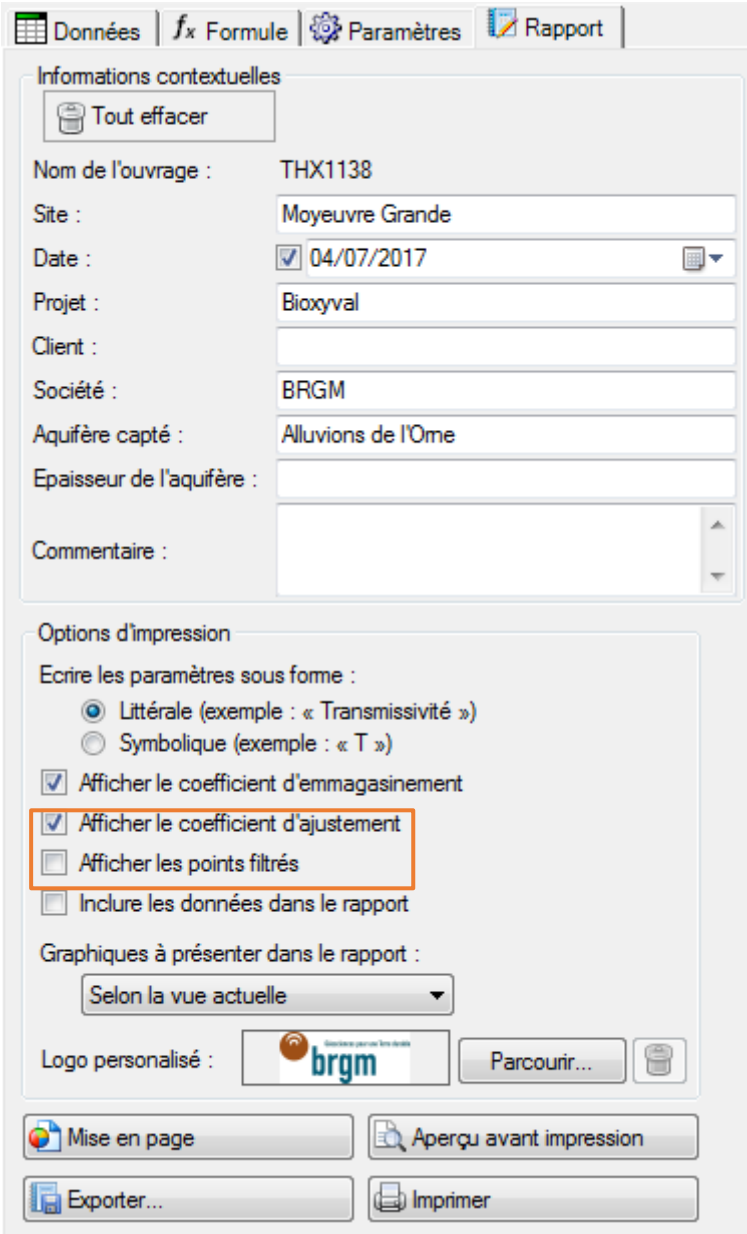


Illustration 56 : Onglet Rapport en mode interprétation d'un essai de nappe

En mode simulation d'un pompage d'essai

L'onglet « Rapport » est identique au mode simulation d'un essai de nappe.

4.2. RÉSULTATS EN TEMPS RÉEL : LES GRAPHIQUES

Les graphiques permettent de visualiser en temps réel le calage obtenu en fonction des paramètres saisis.

En mode interprétation d'un essai de puits

Deux graphiques permettent d'achever l'interprétation (Illustration 57). Le graphique n°1 affiche la courbe caractéristique de l'essai, c'est-à-dire :

- Les données expérimentales : débit et rabattement correspondant pour des durées identiques de pompage.
- La courbe caractéristique continue suite à l'interprétation, soit la perte de charge totale, somme des pertes de charges linéaires et quadratiques.

Il est possible d'afficher la perte de charge linéaire et la perte de charge quadratique.

Le graphique n°2 affiche la droite des rabattements spécifiques, soit :

- Les données expérimentales : débit et rabattement spécifique correspondant.
- La droite des rabattements spécifiques continue suite à l'interprétation.

Ce graphique permet d'ajuster notamment les coefficients :

- de perte de charge linéaire B (ordonnée à l'origine) et
- de perte de charge quadratique C (pente de la droite).

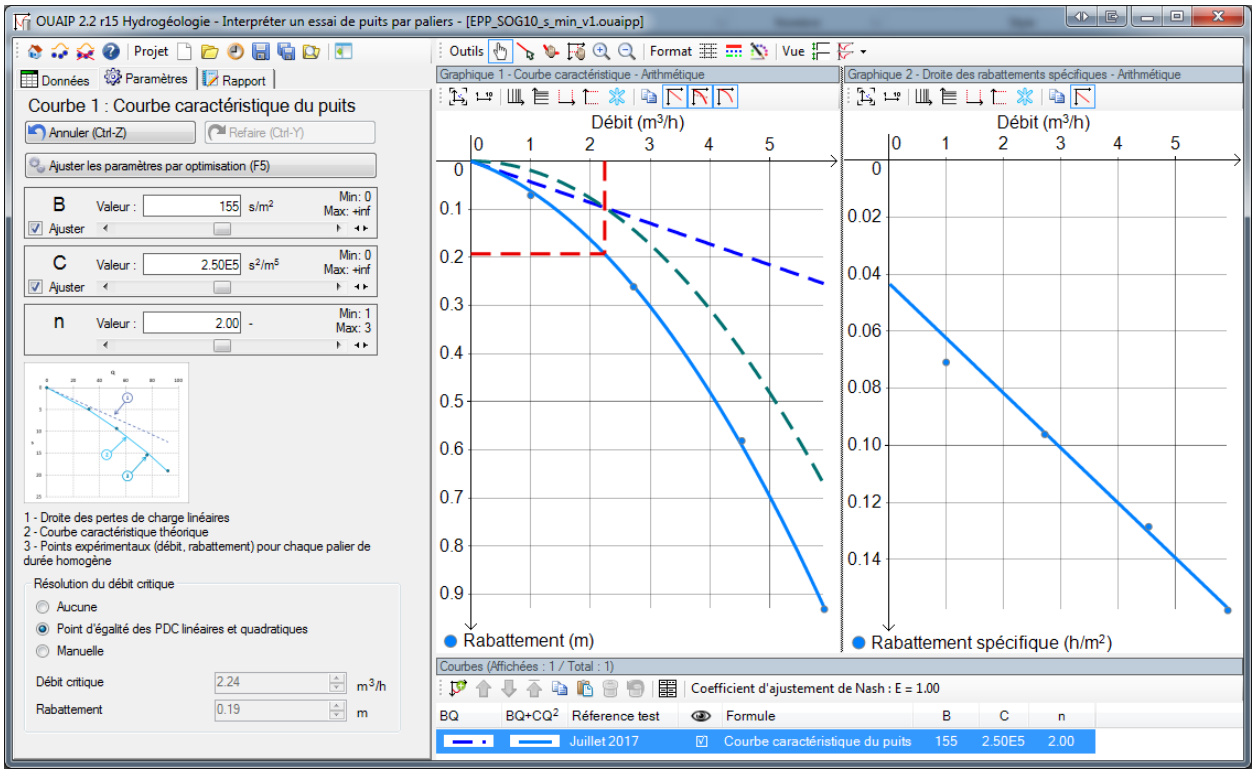


Illustration 57 : Graphiques affichés en mode interprétation d'un essai de puits

En mode interprétation d'un essai de nappe

Deux graphiques superposés verticalement permettent d'achever l'interprétation d'un essai de nappe (Illustration 58), par défaut un seul graphique s'affiche au démarrage de OUAIP. Toutefois il suffit de cliquer sur la barre de séparation en bas du graphique 1 pour élargir le graphique numéro 2. Un double clic sur cette séparation optimise le partage de la fenêtre graphique.

Les graphiques présentent :

- Le débit de pompage mesuré.
- Le rabattement mesuré.
- La ou les solutions analytiques simulées.

Les graphiques peuvent être personnalisés et l'échelle des axes modifiée (arithmétique ou logarithmique, semi-logarithmique) à l'aide des barres d'outils Graphique décrits au chapitre « 4.3.3 Barre d'outils Graphique ».

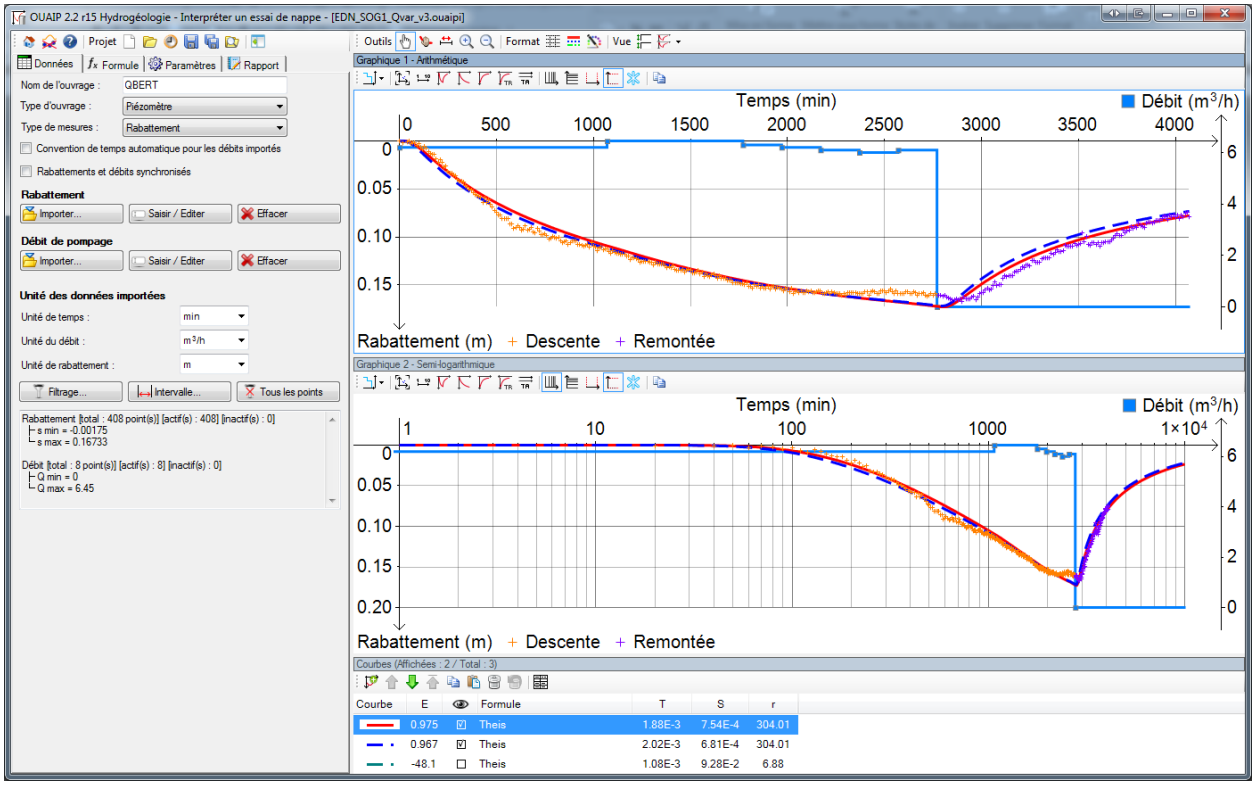


Illustration 58 : Graphiques affichés en mode interprétation d'un essai de nappe

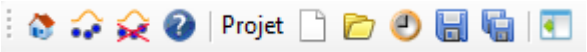
En mode simulation d'un pompage d'essai

En mode simulation d'un pompage d'essai, les graphiques sont identiques au mode interprétation d'un essai de nappe si ce n'est qu'il n'existe pas, par définition, de rabattement mesuré.

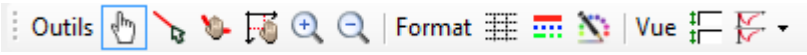
4.3. LES BARRES D'OUTILS

Les 4 barres d'outils de OUAIP se répartissent de la façon suivante dans l'interface :

- la barre d'outils « **Projet** », située en haut à gauche de l'interface :



- la barre d'outils « **Ajustement** », située à droite, au-dessus des graphiques :



- la barre d'outils « **Graphique** », située au-dessus de chaque graphique :

(mode interprétation d'un essai de puits)

(mode interprétation d'un essai de nappe)

- la barre d'outils « **Courbe** », située au-dessus de la liste des courbes :

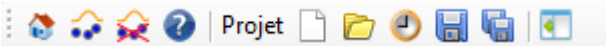
Il est à noter que le contenu des barres d'outils s'adapte selon le mode d'utilisation de OUAIP (essai de puits, essai de nappe, simulation).

4.3.1. Barre d'outils Projet

La barre d'outils Projet est présente sur l'ensemble des modules de OUAIP (Illustration 59).

En mode interprétation d'un essai de nappe, après avoir achevé votre interprétation, une icône supplémentaire dans la barre d'outils permet de passer directement en mode simulation d'un pompage d'essai en conservant tous les paramètres de l'interprétation (il n'est donc pas nécessaire de les ressaisir).

Cette option (icône) est accessible lors de l'interprétation d'un essai de puits ou de la simulation d'un pompage d'essai.



: Mode interprétation d'un essai de puits

: Mode interprétation d'un essai de nappe

: Mode simulation d'un pompage d'essai

Illustration 59 : Barres d'outils Projet

Les icônes permettent respectivement de gauche à droite de :

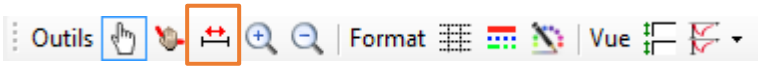
- Revenir à l'invite de OUAIP (Ctrl+Q).
- Basculer en mode « Simulation » tout en conservant les paramètres actuels (pertes de charge quadratiques par exemple).
- Basculer en mode « Interprétation » en conservant les paramètres actuels (transmissivité, coefficient d'emmagasinement par exemple).
- Ouvrir le manuel de OUAIP (F1).
- Créer un nouveau projet (Ctrl+N).
- Ouvrir un projet (Ctrl+O).
- Enregistrer le projet (Ctrl+S).
- Enregistrer le projet sous (Ctrl+E).
- Afficher la liste des projets récemment ouverts (Ctrl+L).
- Masquer en partie le panneau de gauche pour maximiser la taille des graphiques (Alt+R).

4.3.2. Barre d'outils Ajustement

La barre d'outils Ajustement permet de modifier l'ajustement des courbes théoriques/simulées aux données expérimentales ainsi que modifier l'apparence des graphiques. Elle varie selon le mode d'utilisation de OUAIP :

- Mode interprétation d'un essai de puits :

- Mode interprétation d'un essai de nappe :



De gauche à droite pour les icônes spécifiques au mode interprétation d'un essai de puits :

- Se déplacer sur le graphique (M).
- Permet de tracer la droite d'ajustement des rabattements spécifiques (graphique de droite).
- Ajuster les paramètres de la solution analytique (L) en déplaçant la courbe à la main. Pour cela, au moins un paramètre doit avoir la case « Ajuster » cochée. Très pratique, cette option permet plutôt que de modifier les paramètres de la solution à la main pour ajuster la courbe théorique sur les données expérimentales, de modifier la courbe théorique à la main pour ajuster les paramètres de la solution.
- Déplacer la valeur du débit critique.

Commun aux modules « interprétation d'un essai de nappe » et « simulation d'un pompage d'essai » :

- Permet de sélectionner un intervalle de données expérimentales (I) afin de réaliser un ajustement automatique uniquement sur les données sélectionnées.

De gauche à droite, les icônes communes aux trois modules :

- Zoomer sur le graphique (l'utilisation de la molette fonctionne également ou bien les touches plus (+) et moins (-) du pavé numérique).
- Réduire le zoom sur le graphique. Astuce : Maintenir la touche **Ctrl** appuyée en même temps que la molette permet de zoomer/dézoomer uniquement sur l'axe des temps sans dilater/modifier l'axe des rabattements.
- Afficher/Masquer le quadrillage (G).
- Modifier le style des courbes (épaisseur, couleur, type de trait) (K).
- Modifier le style des points (rabattement, débit) (P).
- Égaliser la hauteur des graphiques n°1 et 2 (Alt+D).
- Enregistrer/Charger une vue pour le projet en cours (disposition et échelle des graphiques).

4.3.3. Barre d'outils Graphique

La barre d'outils « Graphique » permet de modifier l'apparence des graphiques. En mode interprétation d'un essai de puits, sur le graphique n°1 « Courbe caractéristique » :

- Afficher / masquer la droite des pertes de charge linéaire.
- Afficher / masquer la courbe des pertes de charge quadratique.
- Afficher / masquer la droite caractéristique théorique (somme des pertes de charges linéaires et quadratiques).

En mode interprétation d'un essai de puits, sur le graphique n°2 « Droite des rabattements spécifiques » :

- Afficher / masquer la droite des rabattements spécifiques.

En mode interprétation d'un essai de nappe :

- Affiche l'axe des débits / Ne pas afficher l'axe des débits.
- Ajuster le zoom sur le graphique (Orig. ou « Home »).
- Ajuster l'échelle aux cycles logarithmiques.
- Afficher la descente et la remontée (du rabattement).
- Afficher la descente.
- Afficher la remontée.
- Afficher la remontée en temps réduit.
- Axe des abscisses en échelle arithmétique ou logarithmique.
- Axe des ordonnées en échelle arithmétique ou logarithmique.
- Figer l'axe des abscisses. Permet de figer l'axe des temps, en temps normal l'axe des temps s'ajuste automatiquement à un certain pourcentage de la remontée lors d'un ajustement de paramètres ou d'une simulation par exemple.
- Figer l'axe des ordonnées. Permet de figer l'axe du rabattement qui s'ajuste automatiquement aux rabattements simulés, pratique dans le cas d'un calage.
- Figer complètement le graphique (Xmin, Xmax, Ymin, Ymax invariants).
- Copier le graphique dans le presse-papier (Ctrl-C).

4.3.4. Barre d'outils Courbe

La barre d'outils « Courbe » située dans la partie inférieure de l'interface au niveau de la liste des courbes permet de dupliquer, supprimer, organiser les courbes simulées et d'en extraire les données (simulées et expérimentales) :

Illustration 60 : Barre d'outils Courbe

Les fonctionnalités disponibles sont les suivantes :

- Ajouter une nouvelle courbe (solution analytique) en dupliquant la courbe sélectionnée (Ctrl+A).
- Remonter une courbe (modifier l'ordre d'affichage de la courbe).
- Descendre une courbe.
- Remonter une courbe tout en haut de la liste (première position).
- Copier les paramètres hydrodynamiques d'une courbe (Ctrl+C).
- Coller les paramètres hydrodynamiques d'une courbe vers une autre (Ctrl+V).
- Supprimer une courbe (Suppr.).
- Annuler la suppression d'une courbe.

- **Tableau de valeurs** : permet de générer et d'exporter sous forme numérique les données simulées (utile pour tracer les données sur un autre tableur, Excel, OpenOffice) et de les comparer avec les données expérimentales.

Exporter des données théoriques et expérimentales

La fonction Tableau de valeurs de la barre d'outils « Courbe » permet d'exporter les données théoriques **de la courbe actuellement sélectionnée** et les données expérimentales (Illustration 61).

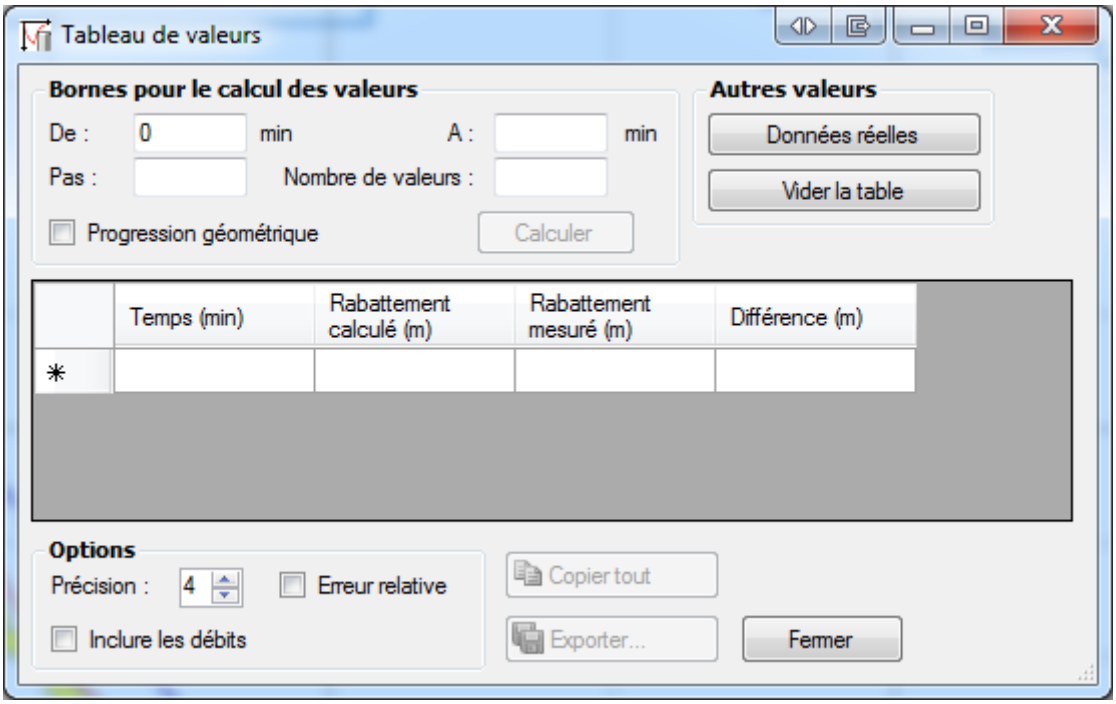


Illustration 61 : Tableau de valeurs

Pour cela, il est nécessaire de saisir le temps minimum (De) et maximum (A) souhaité pour l'export des données ainsi que le pas de discrétisation du temps. Le nombre de valeurs résultant sera automatiquement calculé.

Il est à noter que les unités de temps, rabattement et débit du « Tableau de valeurs » correspondent aux unités du graphique. Vous pouvez donc modifier les unités du graphique pour modifier les unités d'export, sans avoir à modifier les unités des données importées.

Il suffit ensuite de cliquer sur « Calculer » pour calculer les valeurs puis sur « Copier tout » Copier tout pour copier en mémoire les données et les coller sur un tableur (avec coller ou Ctrl+V). Il est possible d'exporter directement le tableau de valeur vers un fichier CSV ou TXT avec « Exporter » Exporter... .

Il est également possible de définir le « Nombre de valeurs » désiré pour que OUAIP calcule automatiquement le pas adéquat.

Le bouton « Données réelles » Données réelles permet d'exporter les données simulées aux temps où il existe des données expérimentales.

Pour effacer le tableau de valeur cliquer sur « Vider la table » Vider la table.

L'option « Progression géométrique » ☑ Progression géométrique permet de calculer un pas de temps adaptatif étant donné que le rabattement n'est pas une fonction linéaire du temps (il varie fortement au début, puis de plus en plus lentement).

Le tableau de valeur présente par défaut les colonnes suivantes :

- Temps des données.
- Rabattement calculé par la courbe (solution analytique) sélectionnée.
- Rabattement mesuré (données expérimentales).
- Différence, correspond à la différence absolue entre rabattement mesuré et rabattement calculé.
- Il est possible de calculer une erreur relative (en %) en cochant « Erreur relative » ☑ Erreur relative, il s'agit de la différence absolue entre rabattement mesuré et rabattement calculé divisée par le rabattement mesuré, exprimée en pourcent.
- Il est possible d'ajouter une colonne pour exporter les débits en cochant « Inclure les débits » ☑ Inclure les débits

L'option précision Précision : 4 permet de modifier le nombre de décimales (de 2 à 8) après la virgule dans les colonnes du tableau.

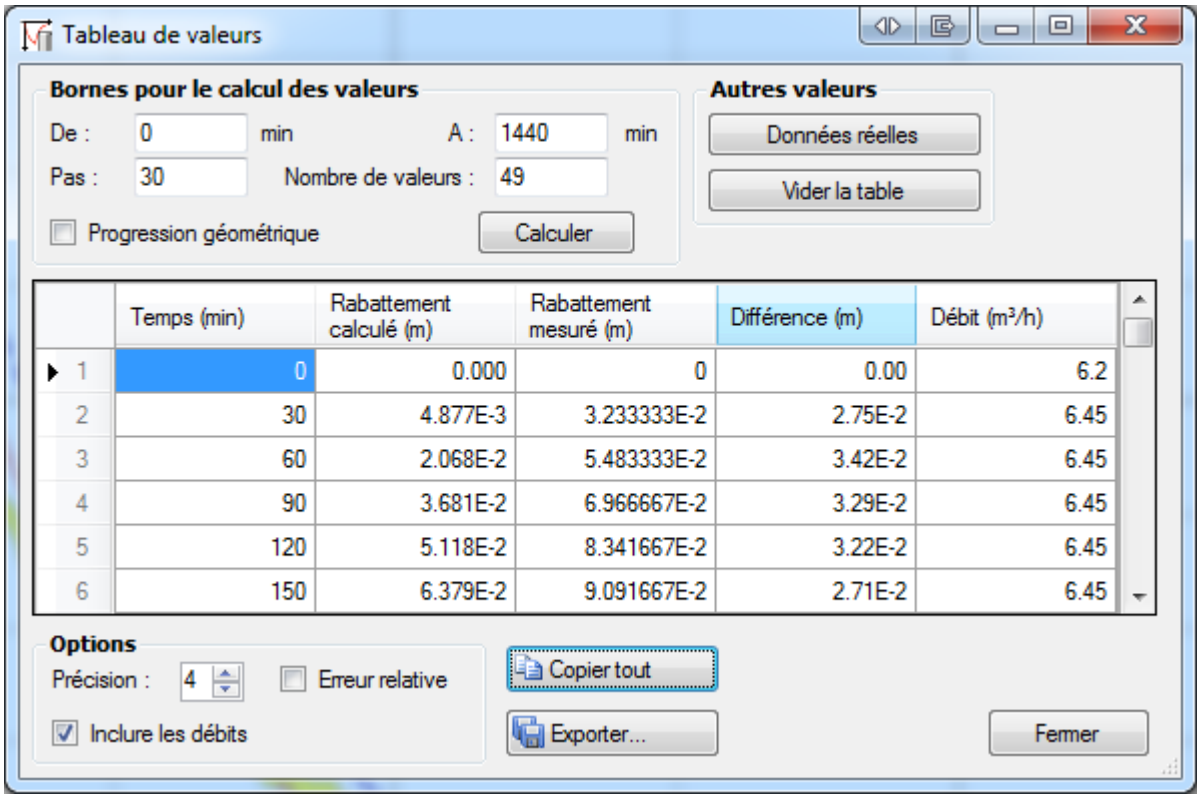


Illustration 62 : Tableau de valeurs – Exemple de calcul des valeurs

4.4. LES OPTIONS DU GRAPHIQUE

L'interface de OUAIP propose deux fenêtres graphiques personnalisables (Illustration 63). L'idée est de permettre à l'utilisateur d'afficher simultanément le rabattement en échelle arithmétique sur un graphique et en échelle semi-logarithmique sur l'autre afin d'améliorer la visualisation et le calage des données sur différentes échelles de temps.

Pour accéder aux options du graphique, cliquer droit sur le graphique à modifier, un menu contextuel apparaît, choisir « Graphique » pour accéder aux « Options du graphique » (Illustration 64).

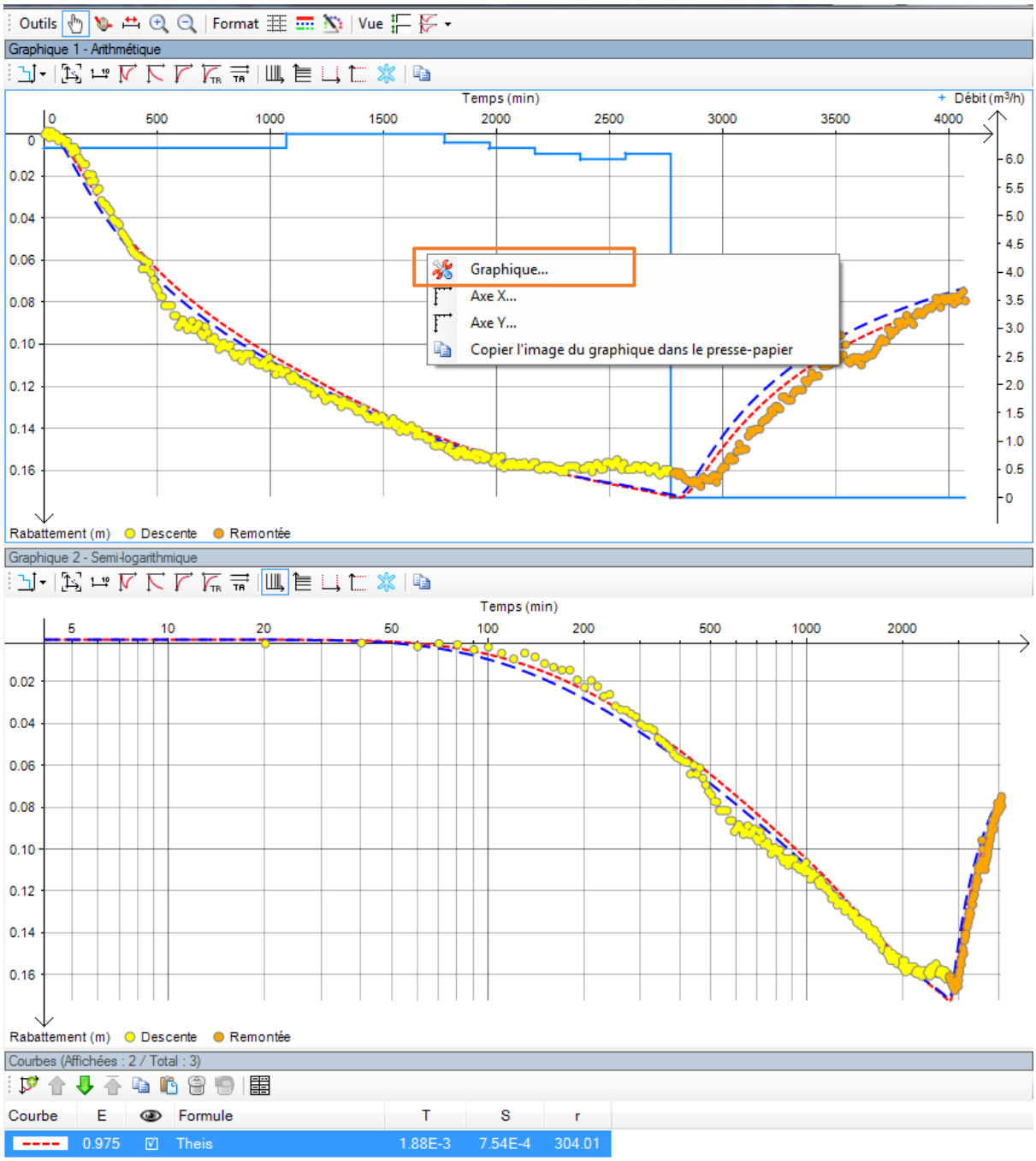


Illustration 63 : Graphiques de OUAIP et options du graphique

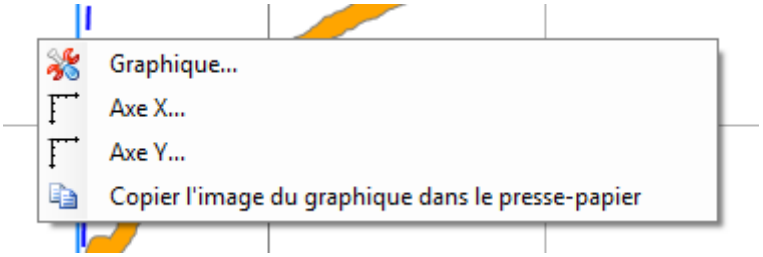


Illustration 64 : Menu contextuel des graphiques via clic droit

La fenêtre « Options du graphique » (Illustration 65) propose plusieurs onglets décrits ci-après.

4.4.1. Onglet Général

L'onglet « Général » (Illustration 65) permet de **modifier les unités du graphique indépendamment des unités données importées**. À titre d'exemple si les données temps/débit sont importées en minute et m3/h, vous pouvez afficher les temps en heure et les débits en m3/j sans modifier les unités des données d'origine.

Le quadrillage horizontal et/ou vertical peut-être affiché ou masqué ainsi que les graduations principales (et secondaires en échelle logarithmique).

L'option « Figer le graphique » permet de bloquer les axes X et Y du graphique (minimum et maximum invariants). Cela est utile lorsque l'utilisateur souhaite modifier les paramètres d'une solution mais ne souhaite pas que la fenêtre s'adapte automatiquement aux changements d'échelle.

Il est possible d'afficher ou non les valeurs du graphique au passage de la souris sur le graphique.

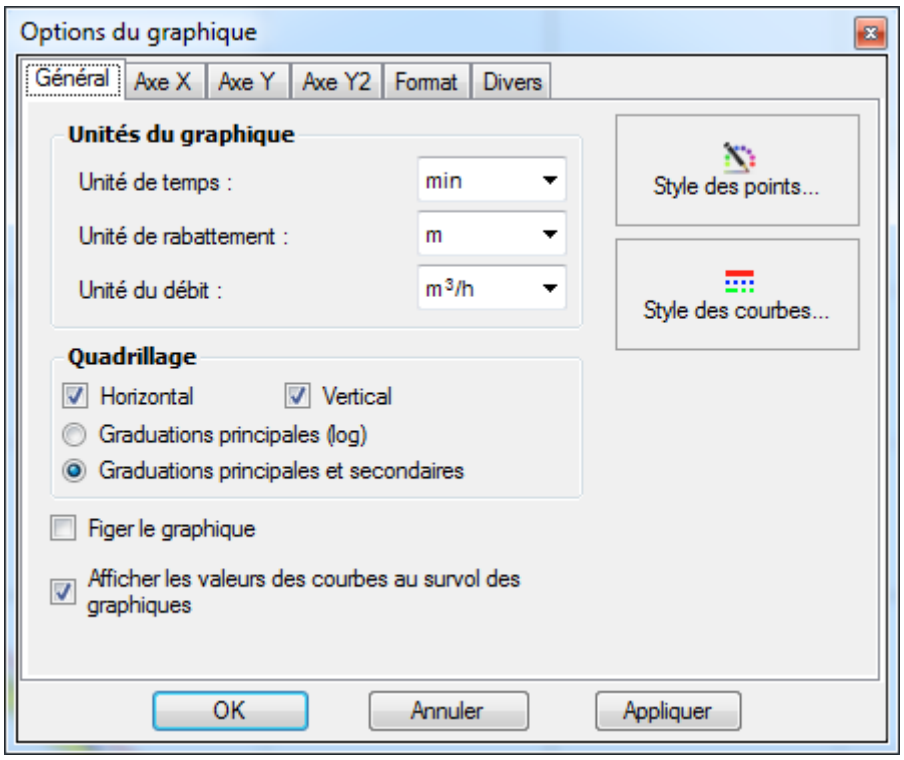


Illustration 65 : Fenêtre Options du graphique – Onglet Général

Le style (couleur, taille et forme) des points (données importées : débit, rabattement) peut être modifié tel que présenté à l'Illustration 66 :

- Il est possible de joindre par une courbe les points expérimentaux (rabattement, débit) *via* « Afficher une courbe ».
- D'afficher la/les solution(s) analytique(s) au-dessus des points expérimentaux pour faciliter le calage « Au-dessus de la courbe théorique ».

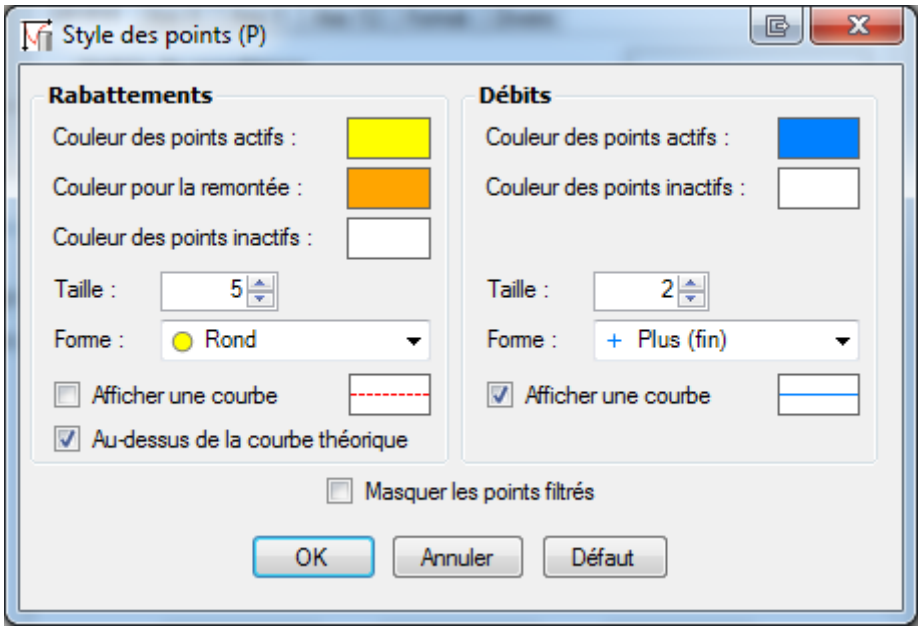


Illustration 66 : Fenêtre style des points

Le style (épaisseur et couleur) des courbes (rabattement simulé/mesuré, débit mesuré/simulé) peut être modifié tel que présenté à l'Illustration 67 :

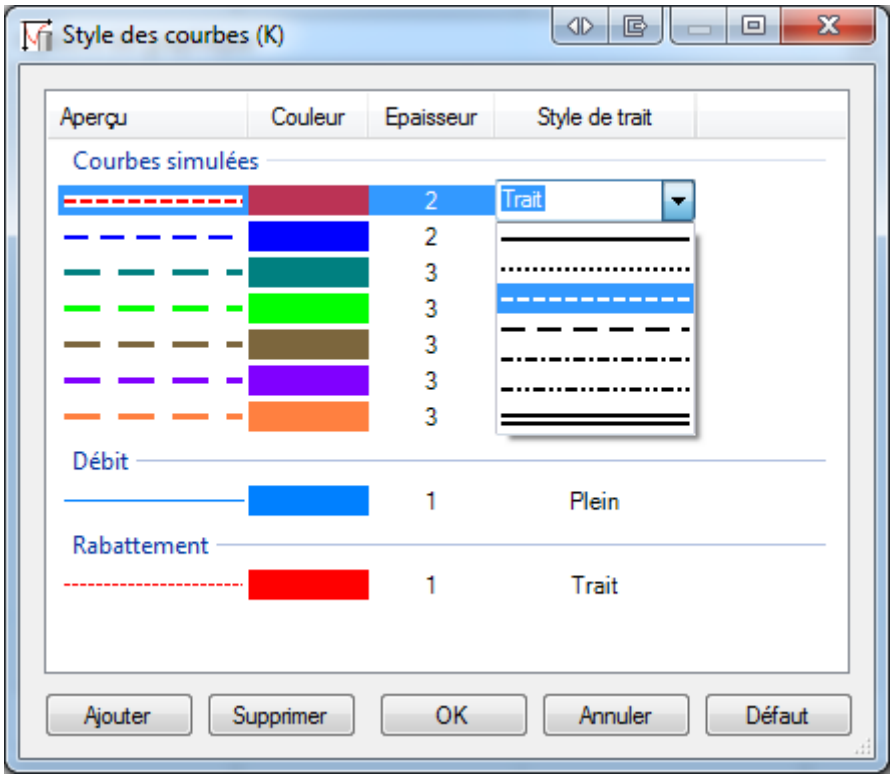


Illustration 67 : Fenêtre style des courbes

4.4.2. Onglet Axe X

L'onglet Axe X (Illustration 68) permet de définir une ou des bornes minimum et maximum de l'axe horizontal lorsque « Limites manuelles » est sélectionné. Si l'option « Automatique » est cochée, les bornes s'ajustent automatiquement.

Il est possible de modifier le « Pas des graduations » de l'axe en saisissant la valeur désirée. Si le pas des graduations est trop faible, OUAIP définit automatiquement le pas (il n'est pas possible de descendre en deçà d'un certain pas).

Il est possible de centrer ou non la légende de l'axe X sur le graphique.

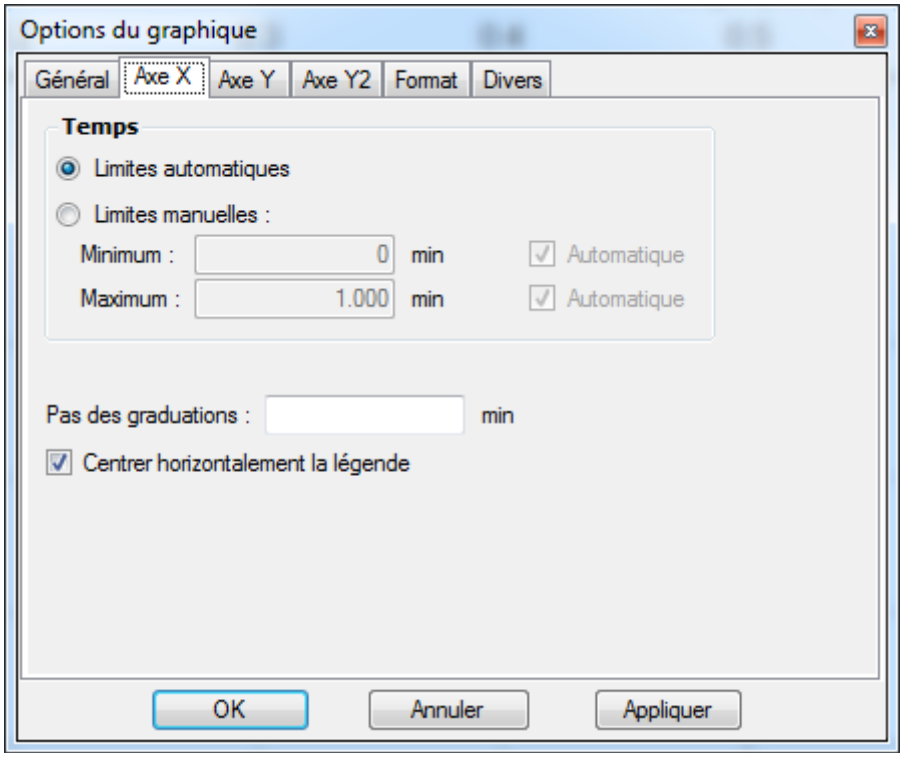


Illustration 68 : Options du graphique – Axe X

4.4.3. Onglet Axe Y

L'onglet Axe Y (Illustration 69) propose les mêmes options que l'onglet Axe X, toutefois il est possible d'inverser l'axe des rabattements. Par convention, il est présenté positivement vers le bas (le rabattement augmente vers le bas), ce qui représente l'évolution naturelle des niveaux dynamiques souterrains (lorsque l'on pompe, le niveau baisse).

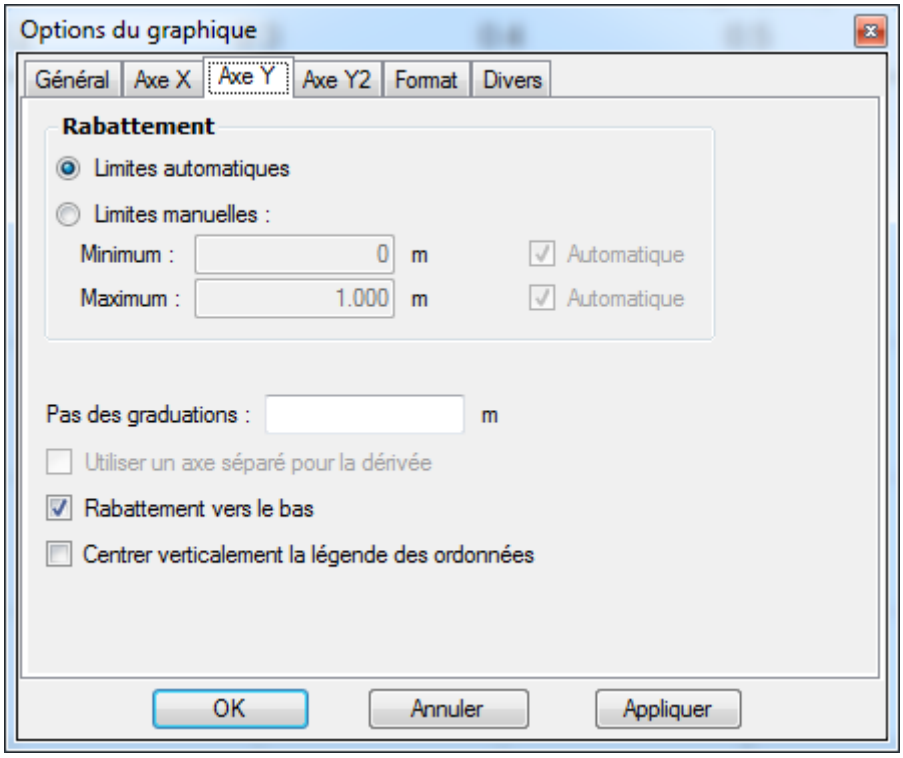


Illustration 69 : Fenêtre Axe Y

4.4.4. Onglet Axe Y2

L'onglet Axe Y2 (Illustration 70), spécifique au débit, présente le même fonctionnement que l'onglet Axe X ou Axe Y.

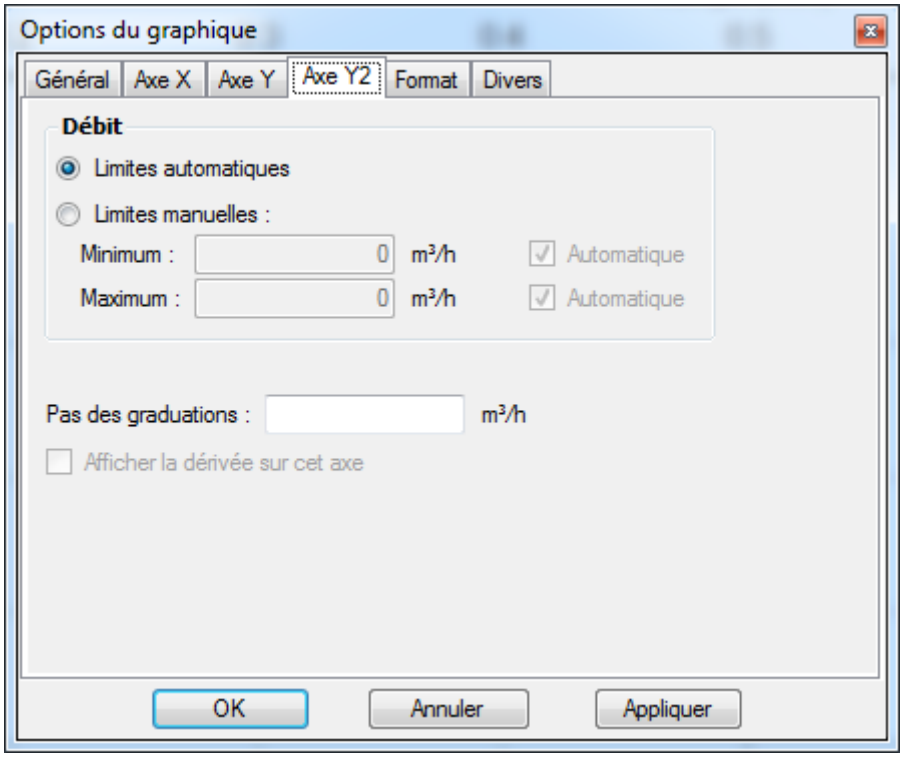


Illustration 70 : Fenêtre Axe Y2

4.4.5. Onglet Format

L'onglet Format ci-dessous à l'Illustration 71 permet de modifier l'apparence des graphiques, du point de vue de la police utilisée (Illustration 72), sa couleur (Illustration 73), sa taille ainsi que la couleur du fond des graphiques (couleur foncée pour travailler dans un environnement peu lumineux) ainsi que la couleur du quadrillage.

Il est possible de modifier également le format des libellés (normal : Temps, Rabattement ou concis : t et s) des axes X et Y ainsi que le format des nombres des axes (utilisation de la notation exponentielle à partir de seuil de valeur).

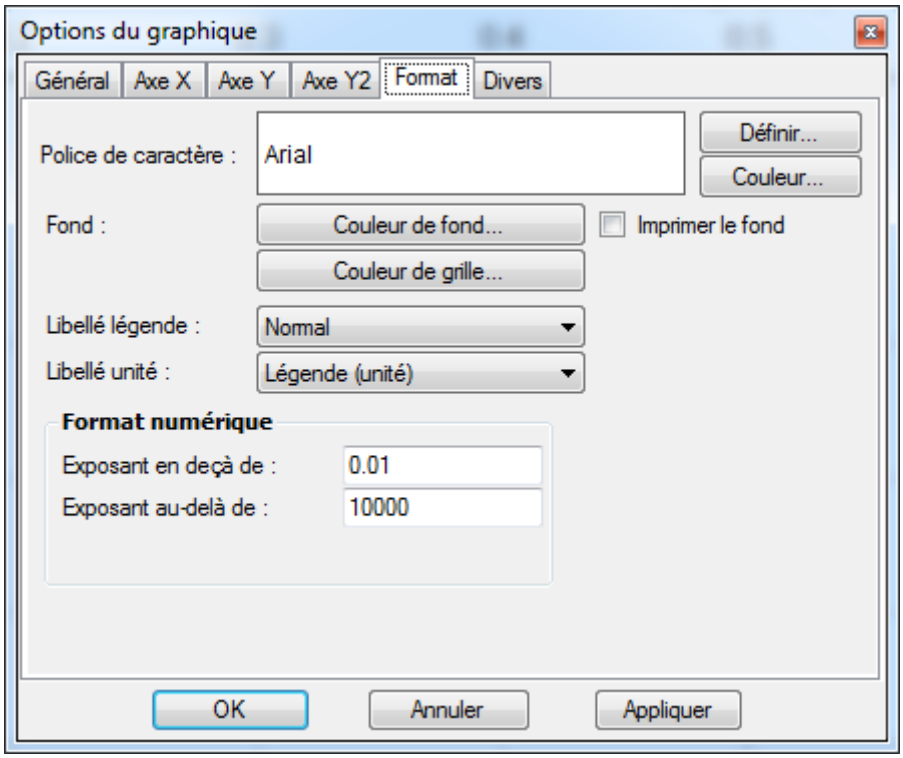


Illustration 71 : Fenêtre Format

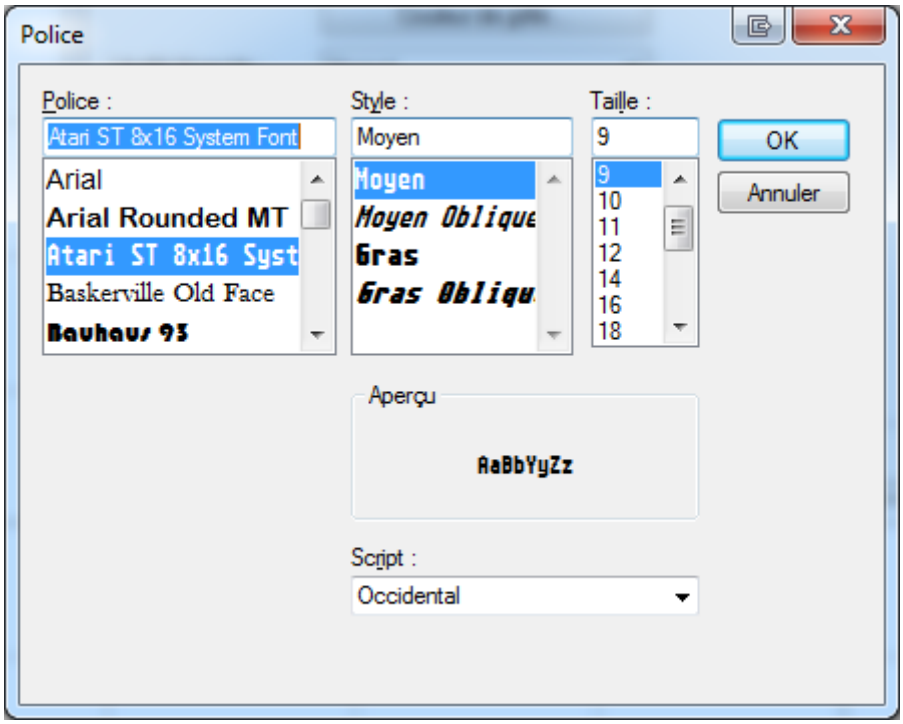


Illustration 72 : Fenêtre Définir … (la police)

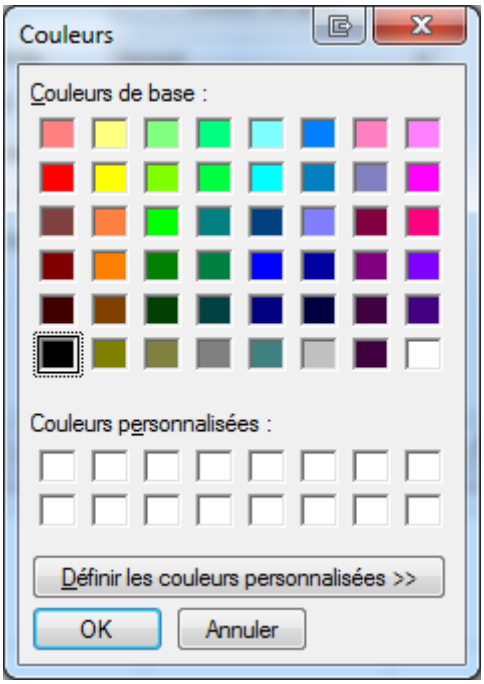


Illustration 73 : Fenêtre Couleur

4.4.6. Onglet Divers

L'onglet « Divers » (Illustration 74) permet de modifier :

- La taille par défaut des graphiques copiés dans le presse-papier (facteur de taille égal à 2 par défaut, soit deux fois la taille actuelle du graphique).
- Le temps maximal d'affichage par défaut d'une courbe de remontée du rabattement (93 % par défaut, 100 % correspondant à un temps infini).
- La précision pour l'effet de vidange (décrit au « 2.3.2 Effet de vidange ») permet d'ajuster le calcul de cet effet au besoin.

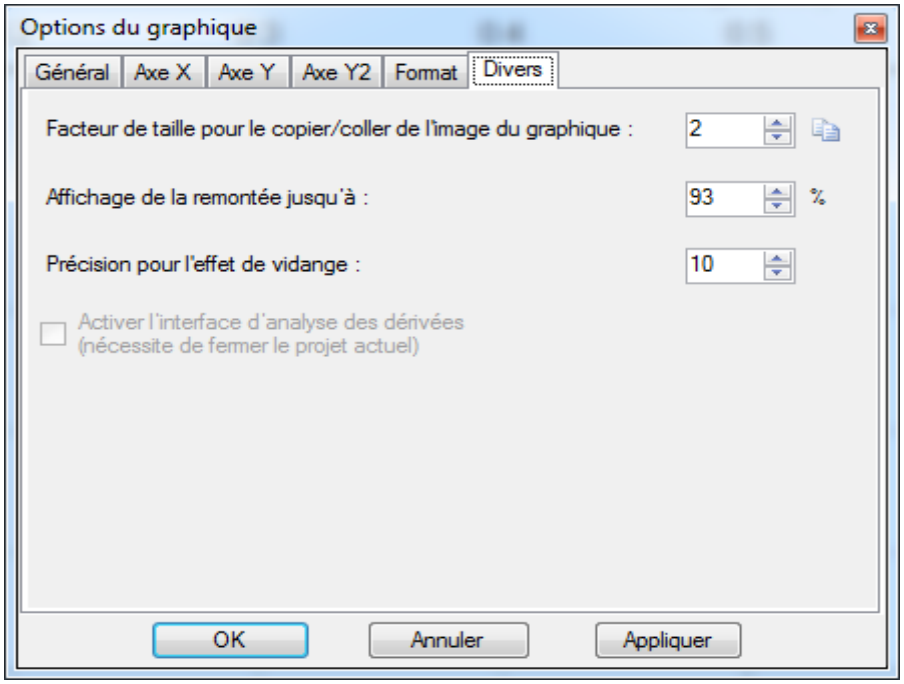


Illustration 74 : Fenêtre Divers

4.5. OPTIONS AVANCÉES DE OUAIP – FICHIERS *.INI

Des options avancées de OUAIP sont accessibles en modifiant certains fichiers *.ini qui se trouvent dans le répertoire de OUAIP (Illustration 75).

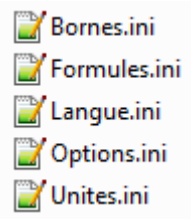


*Illustration 75 : Fichiers *.ini dans le répertoire de OUAIP*

L'objectif est de permettre la modification du logiciel par les utilisateurs afin d'enrichir ses fonctionnalités. La modification de ces fichiers est détaillée dans ce chapitre, il s'agit des fichiers suivants :

- Options.ini : permet de modifier des options de l'interface de OUAIP.
- Formules.ini : permet d'ajouter de nouvelles solutions analytiques à OUAIP.
- Bornes.ini : permet de modifier les bornes par défaut des paramètres de OUAIP.
- Unites.ini : permet de modifier / d'ajouter de nouvelles unités à OUAIP.
- Langue.ini : permet de modifier la traduction de OUAIP en d'autres langues.

Pour modifier les fichiers *.ini il suffit d'utiliser un éditeur de fichier texte tel que Notepad sur Windows ou bien un éditeur de texte avancé tel que Notepad++, téléchargeable gratuitement à cette adresse : https://notepad-plus-plus.org/fr/

Les fichiers *.ini sont organisés en section qui figurent entre crochets **[Section]**, dans chaque section les paramètres et leur(s) valeur(s) sont spécifiés de la façon suivante : **Parametre=Valeur**

L'utilisation des points virgules « ; » permet d'ajouter des commentaires.

4.5.1. Options.ini

Le fichier Options.ini permet de modifier quelques paramètres de OUAIP et son interface, seuls les paramètres modifiables par l'utilisateur sont décrits.

4.5.2. Formules.ini

Le fichier Formules.ini permet de définir les **solutions analytiques (écrit SA ci-après)** actuellement implémentées dans OUAIP ainsi que d'ajouter d'autres solutions. Il est constitué des sections :

- [Général] : définit les unités SI des axes des graphiques.
- [Attributs] : définit les attributs des SA.
- [Paramètres] : définit les paramètres des SA (symboles, traduction, expression, s'ils sont ajustables par optimisation).
- [Expressions] : définit quelques conversions d'unités.
- [TheisCaptive] : Solution de Theis.
- Puis les SA suivantes

À titre d'exemple, la solution de Theis :
`[TheisCaptive]` // Nom unique de la solution

`NuméroSolution=1` // Numéro unique de la solution
`Attributs=Aquifère captif` // Attributs de la solution
`Libellé=Nappe captive` // Nom de la solution dans OUAIP en français
`Libellé.English=Confined aquifer` // Nom de la solution en anglais
`Libellé.Espagnol=Acuifero confinado` // Nom de la solution en espagnol (langue non disponible à ce jour dans OUAIP)
`Formule=Q/(4*Pi*T)*W(Pow(r,2)*S/(4*T*t))` // Expression mathématique de la SA
`EffetsInaccessibles=PénétrationPartielle` // Effets non disponibles pour cette SA
`Auteur=Theis` // Nom de l'auteur de la SA
`Valide|Hydro=Oui` // Filtre pour faire apparaître ou non la SA dans OUAIP Hydrogéologie
`Valide|Geothermie=Oui` // Filtre pour faire apparaître ou non la SA dans OUAIP Géothermie
`Description=Nappe captive (homogène, isotrope, infinie, d'épaisseur constante) en régime transitoire, puits parfait.` // Descriptif littérale de la SA dans OUAIP
`Description.English=Confined aquifer (homogeneous, isotrope, infinite, constant thickness) in transient state, full penetration well.` // Descriptif littéral de la SA dans OUAIP en anglais

Pour ajouter une nouvelle solution, fermer OUAIP, il est recommandé de copier-coller la section d'une solution puis de modifier les valeurs associées aux paramètres. Certains paramètres sont uniques et ne doivent pas coexister en doublons dans le fichier Formules.ini, il s'agit de :

- [NomDeLaSolution] : unique, sans espace ni caractère spéciaux.
- NuméroSolution=X : unique, démarrer à 20 par exemple.

Vous noterez que certaines SA existent dans le fichier Formules.ini mais ne sont pas visibles dans OUAIP. Cela est normal, ces solutions n'ont pas été intégralement validées numériquement (dans ce cas elles sont annotées « Valide|Hydro=Non »).

4.5.3. Bornes.ini

S'il est possible de modifier les bornes (Illustration 76) par défaut d'un projet OUAIP, celles-ci sont réinitialisées à chaque fois qu'un nouveau projet est créé. Le fichier Bornes.ini permet de modifier durablement les bornes proposées par défaut dans OUAIP pour les paramètres des solutions analytiques.

Par exemple pour la solution de Theis au puits les bornes figurent à l'Illustration 76 à droite de chaque paramètre, *via* « Min: » et « Max : ».

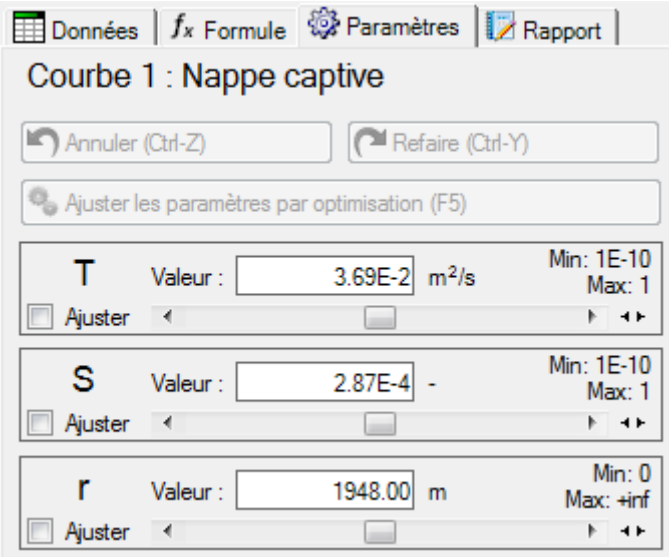


Illustration 76 : Définition des bornes

Dans le fichier Bornes.ini, la section [Defaut] établit les bornes, par exemple :
`S|Hydro=1e-10;1` // S correspond au coefficient d'emmagasinement, la barre verticale « | » indique que ce paramètre s'adresse à la version Hydrogéologie de OUAIP, les bornes min et max sont séparées par un point-virgule « ; ».
`S|Geothermie=1e-16;1e-4`
`S.Format=0.00E0` // Correspond au format d'affichage du paramètre dans le champ de saisie
`T|Hydro=1e-10;1`// T correspond à la transmissivité, la barre verticale « | » indique que ce paramètre s'adresse à la version Hydrogéologie de OUAIP, les bornes min et max sont séparées par un point-virgule « ; ».
`T|Geothermie=1e-12;1`

Pour les bornes, la syntaxe suivante est possible :

- **pourcent%** : signifie qu'il n'y a pas de bornes fixes mais qu'elle est relative à la valeur définie initialement, la valeur de pourcentage indique la marge de variation du paramètre.
- **pourcent%+** : même définition, mais la valeur doit rester positive (donc dans le sens d'une augmentation de la valeur).
- **min**;**max** : signifie que la valeur doit être comprise entre min et max.
- **min**;**max**;**défaut** : même signification, mais en plus il y a une valeur par défaut spécifiée.

S'il y a un astérisque « * » à la fin du **min** ou du **max**, cela signifie que la valeur est exclue de l'intervalle. Quelques exemples de bornes (P=Paramètre quelconque) :

- P=10% : le paramètre peut être ajusté autour de 10% de sa valeur initiale.
- P=10%+ : le paramètre est positif et peut être ajusté jusqu'à +10% de sa valeur initiale.
- P=0*; : le paramètre est strictement positif.
- P=10;20 : le paramètre est compris entre 10 et 20.
- P=; : le paramètre peut être positif, négatif ou nul (aucune contrainte).
- P= ; ; 0 : idem mais sa valeur initiale est zéro.
- P=5E-5;2E-3;1E-3 : le paramètre est compris entre $5x10^{-5}$ et $2x10^{-3}$, par défaut il vaut $1x10^{-3}$.

À titre d'exemple, pour modifier les bornes minimum ($1x10^{-12}$) et maximum (1) de la transmissivité en $1x10^{-8}$ et 0.1 il suffit de modifier :

`T=1e-12;1 en T=1e-12;1` devient `T=1e-8;0.1`

4.5.4. Unites.ini

Le fichier Unites.ini permet d'ajouter de nouvelles unités, il est constitué de plusieurs sections selon la dimension des unités, par exemple :

- [Temps]
- [Débit]
- [Distance]
- [Transmissivité]
- Etc.

À titre d'exemple, si l'on souhaite ajouter une nouvelle unité de débit qui serait le pied cube par heure (cubic feet per hour, soit ft^3/h) on procédera de la façon suivante :

1°) Vérifier que l'unité de distance pied (feet) existe dans la section [Distance], autrement l'ajouter dans la section [Distance].

2°) Dans la section [Débit], écrire la correspondance entre la nouvelle unité et une unité déjà définie, soit :

- `ft3/h=0.028316846 m3/h`

Supposons que l'on veuille ajouter l'unité kilomètre, dans la section [Distance], il suffit d'ajouter :

- `km = 1000 m`

À titre d'exemple, on propose d'ajouter l'unité de transmissivité « m2/min », il suffit de saisir dans la section [Transmissivité] :

- `m2/min = 1440 m2/j`

4.5.5. Langue.ini

Le fichier Langue.ini permet de modifier la traduction de OUAIP, il contient par défaut deux sections : [Fran**\x00e7**ais] (pour Fran**ç**ais) et [English] (pour anglais).

Chaque texte affiché dans OUAIP existe dans chacune des deux langues. Des caractères spéciaux sont utilisés pour affichés certains caractères en français, comme le **é** (codé « \x00e9 »), **è** (\x00e8), **ç** (\x00e7), **à** (\x00e0), **ê** (\x00ea), etc.

Par exemple, le bouton importer sera écrit en français (section [Fran**\x00e7**ais]) et en anglais (section [English]):

- Button_ImporterDonnees=Importer...
- Button_ImporterDonnees=Import...

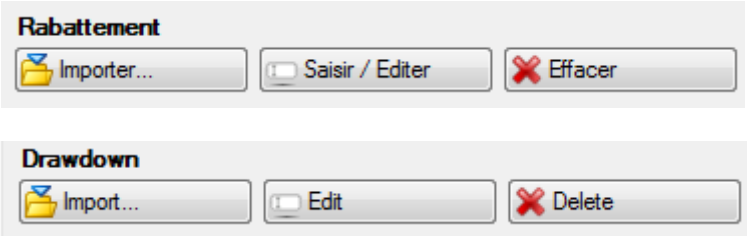


Illustration 77 : Traduction des libellés

Modifier une traduction

OUAIP propose une interface graphique pour modifier la traduction, à l'invite de OUAIP cliquer sur la langue en cours et choisir « <Traduction…> » (Illustration 78).

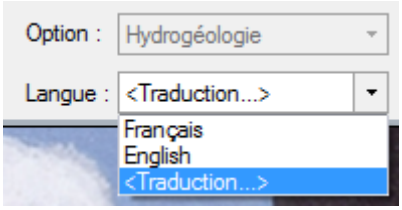


Illustration 78 : Système de traduction de OUAIP dans d'autres langues

La fenêtre de traduction permet de filtrer les libellés à traduire par catégorie (boutons, questions posées à l'utilisateurs, message d'erreur, etc.). Pour modifier une traduction, il suffit de cliquer sur l'élément à traduire et de le saisir dans le champ en haut à droite.

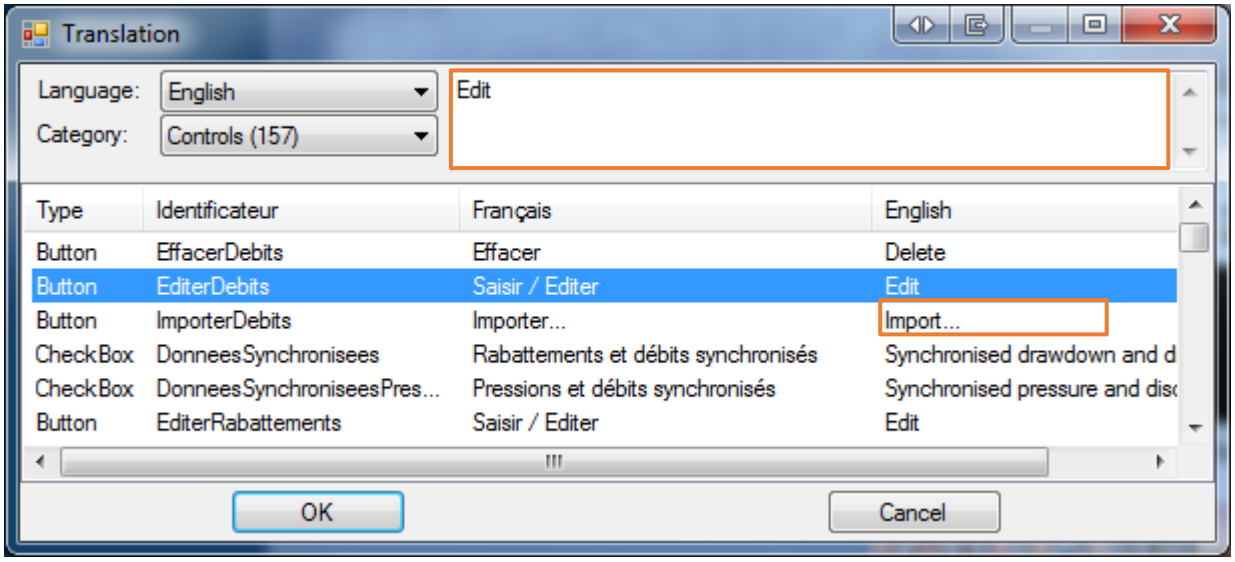


Illustration 79 : Système de traduction de OUAIP

Ajouter une langue

Pour ajouter une langue, fermez OUAIP. Dans le fichiers Langue.ini, à la fin du fichier ajouter la section correspondant à la langue, par exemple, pour ajouter la traduction espagnole on ajoutera : [Spanish]

Lancer OUAIP, la nouvelle langue apparaît dans le menu des langues (Illustration 80) :

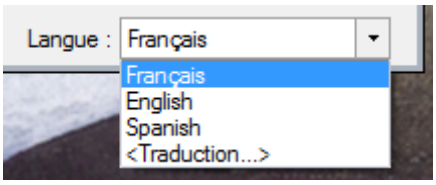


Illustration 80 : Menu traduction

Utilisez la méthode présentée ci-avant pour traduire les libellés. Vous pouvez faire profiter de votre traduction à la communauté des utilisateurs de OUAIP en nous l'envoyant afin que nous la diffusions.

5. Exemples d'utilisation

5.1. ESSAIS DE PUITS

L'exemple utilisé pour ce tutorial est tiré du rapport public : « Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des alluvions de la Gravone sur le site de Piataniccia, Corse du sud ». Ce document est disponible au téléchargement au format PDF sur InfoTerre, code ISBN/ISRN : BRGM/RP-60905-FR.

5.1.1. Tutoriel n°1 - Interprétation unique

Contexte

L'exemple utilisé pour ce tutorial est tiré du rapport public : « Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des alluvions de la Gravone sur le site de Piataniccia, Corse du sud ». Ce document est disponible au téléchargement au format PDF sur InfoTerre, code ISBN/ISRN : BRGM/RP-60905-FR.

L'aquifère testé est une nappe libre de faible épaisseur dans les alluvions de la Gravone.

L'essai de puits consiste en la réalisation de 4 paliers sur le forage F1. Chaque palier (non enchainé) comportait au moins 1 heure de pompage (à débit constant sur la durée d'un palier) et au moins 1 heure de remontée (arrêt du pompage).

Les paliers de débits varient de 60 m^3/h à 120 m^3/h, avec un incrément de l'ordre de 20 m^3/h entre chaque palier. L'Illustration 81 présente l'évolution du rabattement pour chaque palier de débit.

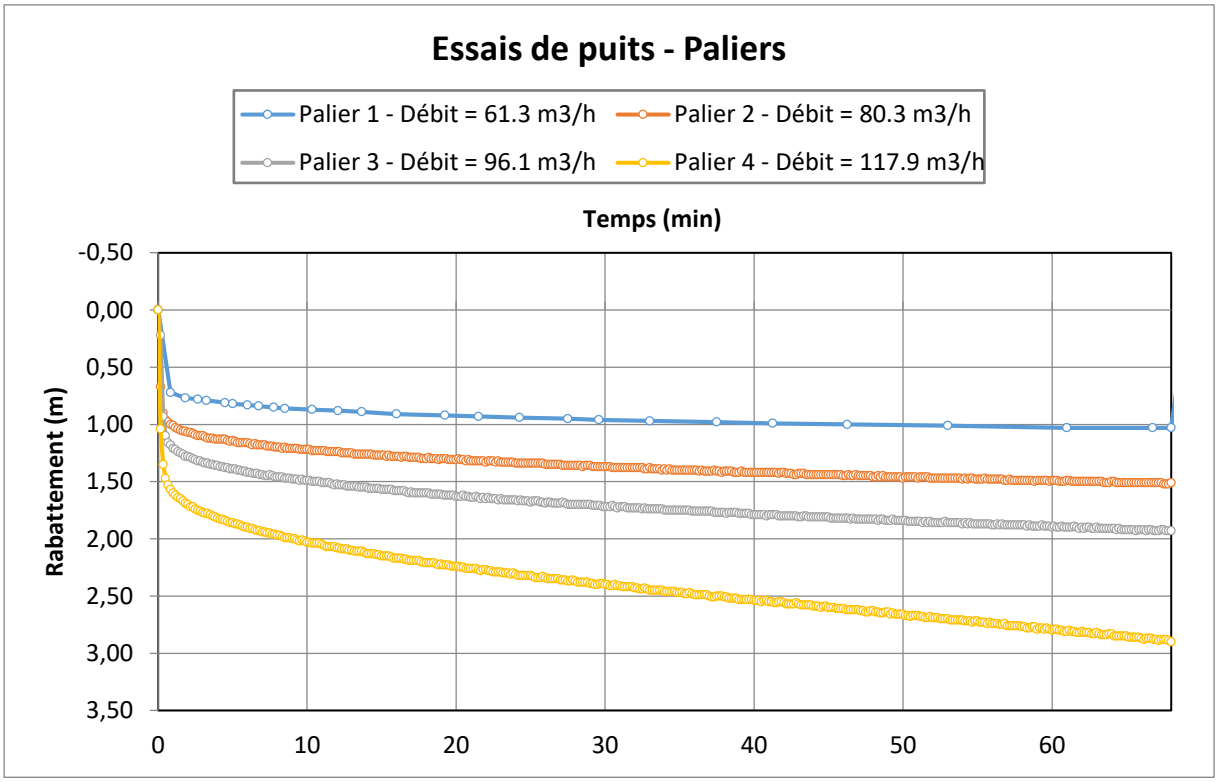


Illustration 81 : Évolution des rabattements en fonction du débit de pompage

Les résultats de l'essai (rabattement au bout d'une heure de pompage en fonction du débit) sont synthétisés dans l'Illustration 82 ci-dessous :

Palier	***Débit moyen de pompage***	***Rabattement à t=1h***
n°	***(m3/h)***	***(m)***
1	61.12	0.96
2	78.81	1.42
3	96.06	1.95
4	117.63	2.78

Illustration 82 : Synthèse des données de l'essai par paliers

Interprétation

Exécuter OUAIP et sélectionner « Interpréter un essai de puits ». La partie gauche de l'interface est dédiée à la saisie des données d'entrée, elle est constituée de trois onglets à utiliser progressivement de la gauche vers la droite (Illustration 83) :

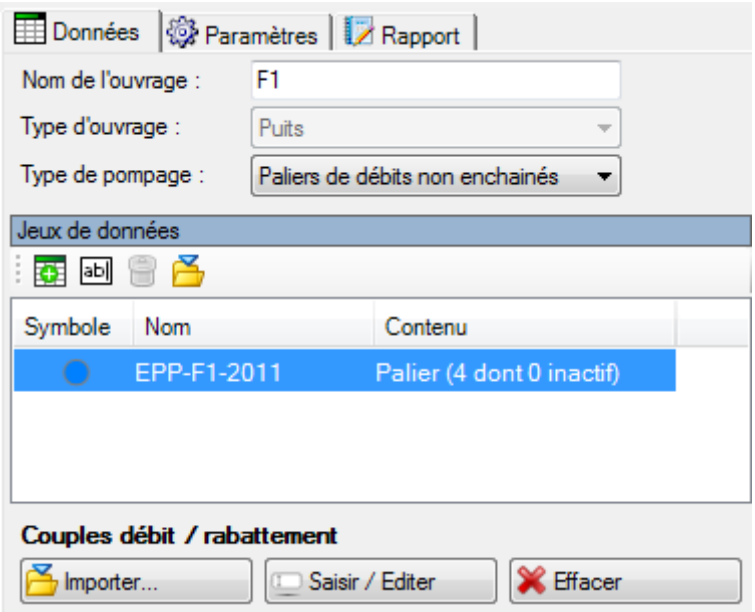
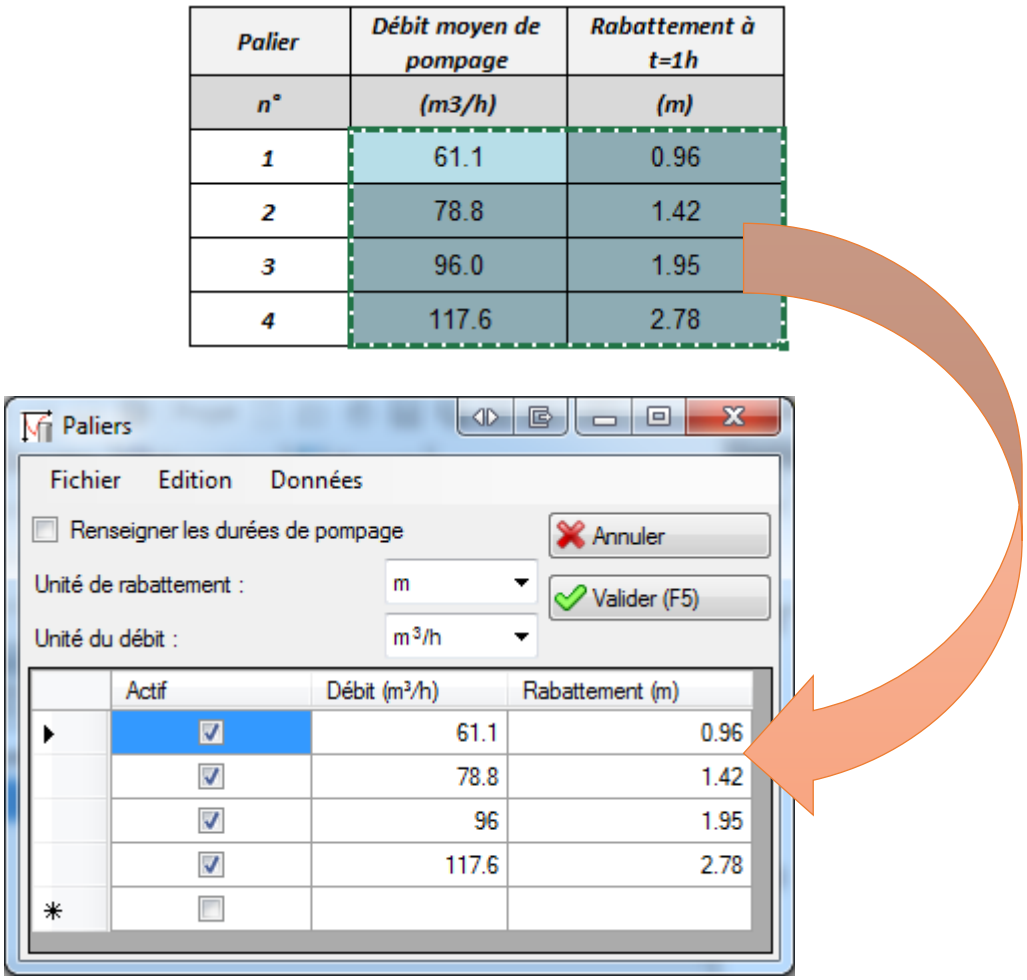


Illustration 83 : Onglet Données

- Saisir le nom de l'ouvrage « F1 », il sera repris dans le rapport d'interprétation.
- Choisir « Paliers de débits non enchainés ».
- Double cliquer sur « <Sans nom> » pour définir le nom « EPP-F1-2011 » du jeu de données.
- Cliquer sur « Saisir / Editer » pour saisir les débits et rabattements correspondant de l'Illustration 82 . Il est possible de copier-coller directement les données numériques de l'Illustration 82, en ne sélectionnant que les lignes et colonnes contenant les valeurs numériques ou de copier-coller les informations depuis un tableur (voir le fichier Excel « Essais de puits - Tutoriel n°1 Données.xlsx » dans \Tutoriel\Tutoriel n°1 - Essai de puits) directement dans le tableau (Illustration 84).
- Vérifier les unités de débit (m3/h) et de rabattement (m) puis valider (F5).
- Optionnellement, il est possible de saisir les durées de pompage et de remontée entre chaque palier (afin de faire apparaitre ces informations dans le rapport).



Palier	Débit moyen de pompage	Rabattement à t=1h
n°	(m3/h)	(m)
1	61.1	0.96
2	78.8	1.42
3	96.0	1.95
4	117.6	2.78

Illustration 84 : Copier-coller des données depuis un tableur vers OUAIP

Une fois les données validées, les graphiques n°1 « Courbe caractéristique » et n°2 « Droite des rabattements spécifiques » se mettent à jour, affichant les points (Illustration 85).

Dans la grande majorité des cas, l'équation de la courbe caractéristique est donnée par $s=BQ+CQ^2$ (Jacob), avec s, le rabattement, Q, le débit, B et C les coefficients de pertes de charges linéaires et quadratiques. En conséquence, le graphique de droite qui représente le rabattement spécifique s/Q en fonction du débit Q, doit afficher des points alignés. Dans le cas contraire, sauf cas particuliers (exposant n différent de 2), des points non alignés invalident l'essai par paliers. Il peut arriver par exemple, qu'un développement du forage se poursuive au moment du pompage par paliers parce que la phase de développement n'était pas terminée, ou bien qu'un colmatage par des fines se produise au niveau du massif filtrant et des crépines suite à un palier au débit excessif. Dans ces cas, l'essai ne peut pas être interprété correctement et le test doit être refait pour tenir compte du nouvel état du forage, le cas échéant après une nouvelle phase de développement.

L'interprétation d'un essai par paliers consiste à déterminer les paramètres B et C qui caractérisent respectivement les pertes de charges linéaires et quadratiques (également appelées singulières).

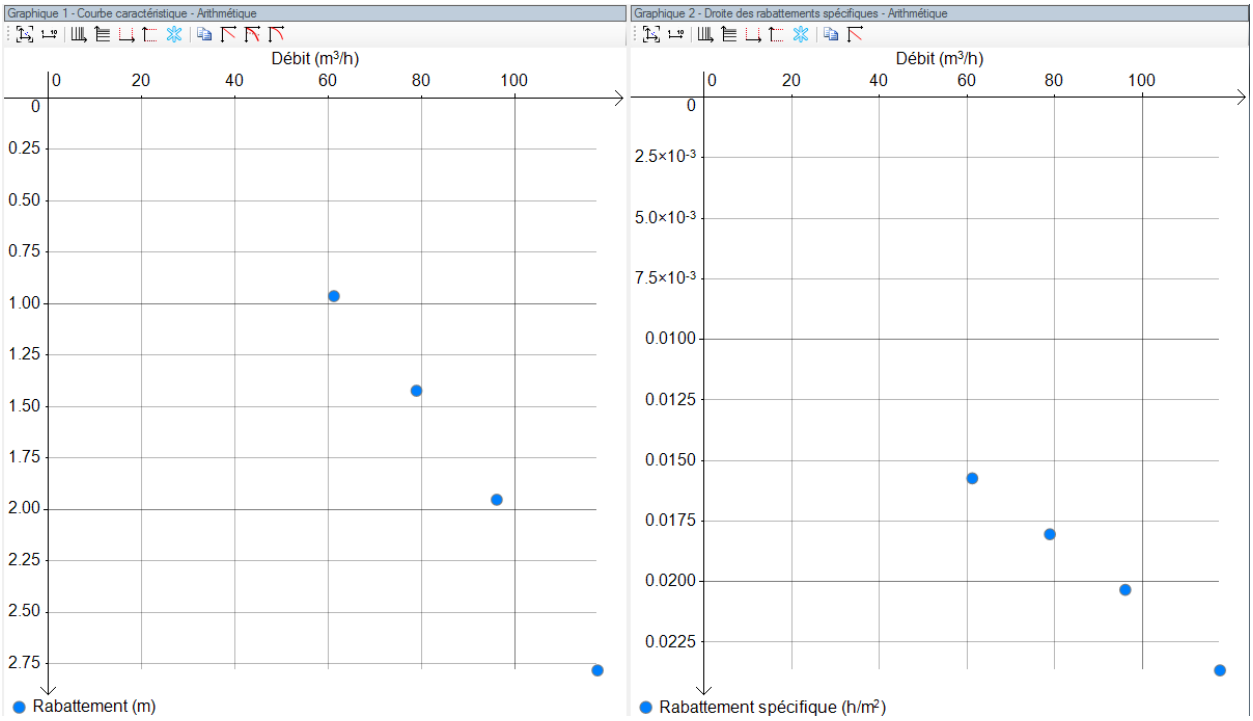


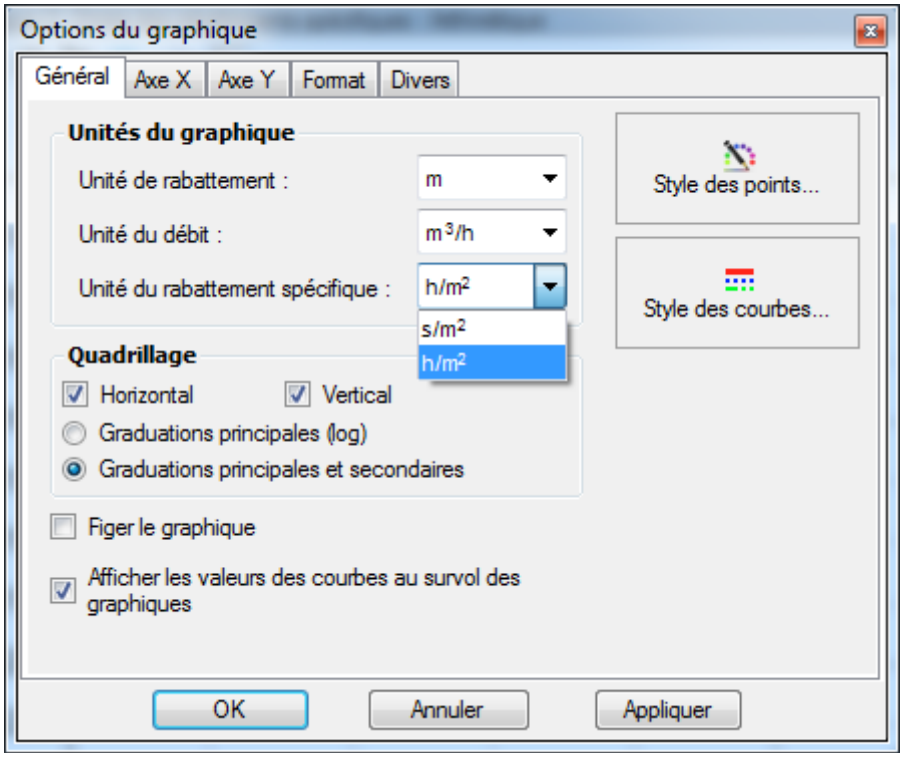
Illustration 85 : Graphiques Courbe caractéristique et Droite des rabattements spécifiques

Cliquer ensuite sur l'onglet « Paramètres » pour définir les paramètres de la solution. Commençons par ajuster « B » : le coefficient de pertes de charges linéaires. Ce dernier correspond au prolongement de la droite imaginaire passant par les points du graphique « Droite des rabattements spécifiques » interceptant l'axe des ordonnées s/Q.

Pour une meilleure précision il est conseillé d'exprimer B en s/m². En effet, l'unité h/m^2 conduit à utiliser des valeurs faibles qui sont souvent arrondis, tandis que les s/m^2 sont des valeurs entières faciles à manipuler. De même, le paramètre C est plus parlant lorsqu'il est exprimé dans les unités S.I.

Il est donc conseillé de modifier l'unité du graphique 2, en cliquant avec le bouton droit de la souris sur le graphique, dans le menu, sélectionner l'item « Graphique », dans l'onglet « Général », modifier l'unité du « Rabattement spécifique » de h/m² à s/m². Il n'y a pas lieu de modifier l'unité du débit (garder celle utilisée durant les essais).

Alternativement, en cliquant avec le bouton gauche de la souris sur l'unité du paramètre « B », il est possible de convertir une valeur dans une autre unité (par exemple de s/m² en h/m² ou inversement). La modification de l'unité impacte le graphique. L'utilisation du convertisseur d'unité est présentée au chapitre 4.1.3.



Cliquer éventuellement sur le bouton « Ajuster le zoom » (ou presser la touche du clavier « Orig. » ou « Home ») pour mettre à jour l'affichage du graphique.

La valeur approximative de B peut être estimée par la projection sur l'axe Y de la droite passant par les points du graphique des rabattements spécifiques en fonction du débit (graphique de droite). OUAIP propose un outil pour tracer cette droite. Il s'agit du bouton « Tracer la droite des rabattements spécifiques ». Avec cet outil, la valeur de B est automatiquement renseignée dans l'onglet paramètres (Illustration 87).

Dans l'exemple de ce tutoriel : B = 25 s/m².

NB : le tracé de cette droite est temporaire, pour aider l'utilisateur à choisir la meilleure valeur de B à ses yeux. Celle-ci peut également être saisie manuellement dans l'onglet paramètres.

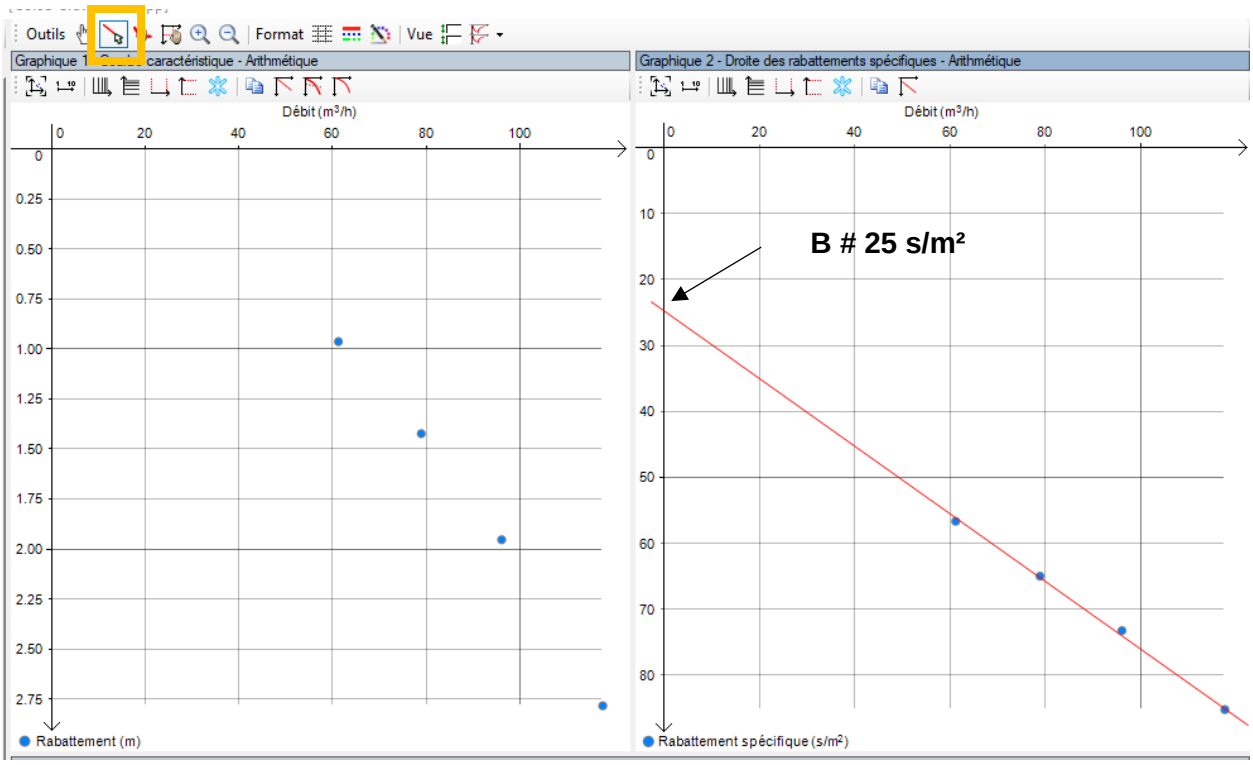


Illustration 86 : Tracé manuel de la droite des rabattements spécifiques

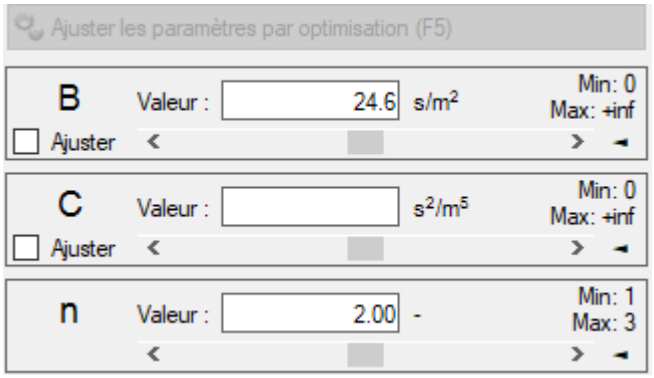


Illustration 87 : Estimation du coefficient de perte de charge linéaire

Saisir maintenant la valeur de « C » : « Coefficient de pertes de charge quadratiques ». Conservons l'unité proposée par défaut s^2/m^5, définir une valeur initiale de 1000 s^2m^5. La valeur de l'exposant égale à 2 demeure inchangée. Ajuster maintenant la valeur des paramètres B et C en utilisant les ascenseurs horizontaux, de gauche à droite. Lorsque l'ascenseur arrive en butée, relâcher le bouton de la souris pour qu'il se replace en position centrale et recommencer l'opération (Illustration 89).

Si vous voulez faire varier les paramètres en utilisant les ascenseurs, OUAIP propose également 2 méthodes pour faire varier les valeurs prises par les paramètres, de manière à permettre à l'utilisateur de modifier un paramètre d'une façon plus ou moins fine.

Shift : maintenez la touche « Shift » (touche « Maj », « Majuscule ») du clavier tout en déplaçant l'ascenseur horizontal :

- Vers la gauche, la mantisse est arrondie à l'entier et diminuée de 1, si la mantisse est inférieure à 1, l'exposant est diminué de 1 et ainsi de suite.
- Vers la droite, la mantisse est arrondie à l'entier et augmentée de 1, si la mantisse est supérieure à 9, l'exposant est augmenté de 1, et ainsi de suite.

Exemple : pour le cas de la transmissivité T = 4.53×10^{-4} m²/s est modifiée à la baisse (touche Shift enfoncée + ascenseur vers la gauche) et prend les valeurs successives suivantes : 4.0×10^{-4}, 3.0×10^{-4}, 2.0×10^{-4}, 1.0×10^{-4}, 9.0×10^{-5}, 8.0×10^{-5}, …

Ctrl : maintenez la touche « Ctrl » (touche « Control », « Ctl ») du clavier tout en déplaçant l'ascenseur horizontal :

- vers la gauche (÷2, ÷2.5, ÷2), dans ce cas cela divise la valeur actuelle par 2, puis 2.5, puis 2, et ainsi de suite.
- Vers la droite (x2, x2.5, x2), dans ce cas cela multiplie la valeur actuelle par 2, puis 2.5, puis 2, et ainsi de suite.

Une info bulle rappelle ces astuces lorsque l'utilisateur passe la souris sur la zone indiquée en rouge ci-dessous (Illustration 88) :

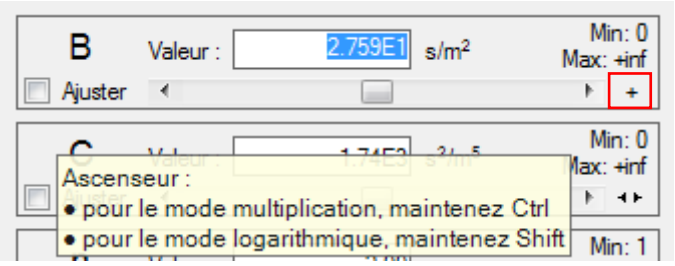


Illustration 88 : Info bulle pour la modification des paramètres

Exemple : C = 1×10^{3} s²/m⁵ est modifiée à la hausse (touche Ctrl enfoncée + ascenseur vers la droite) et prend les valeurs successives suivantes : 2.00×10^{3} (x2), 5×10^{3} (x2.5), 10.00×10^{3} (x2), 20.00×10^{3} (x2), 50×10^{3} (x2.5), …

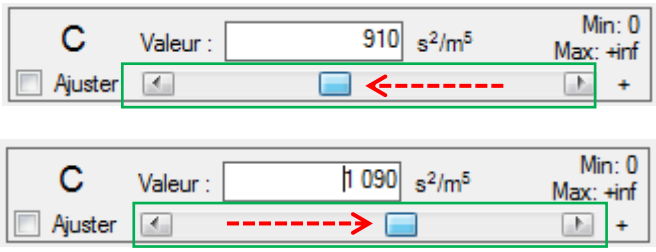


Illustration 89 : Modification des paramètres

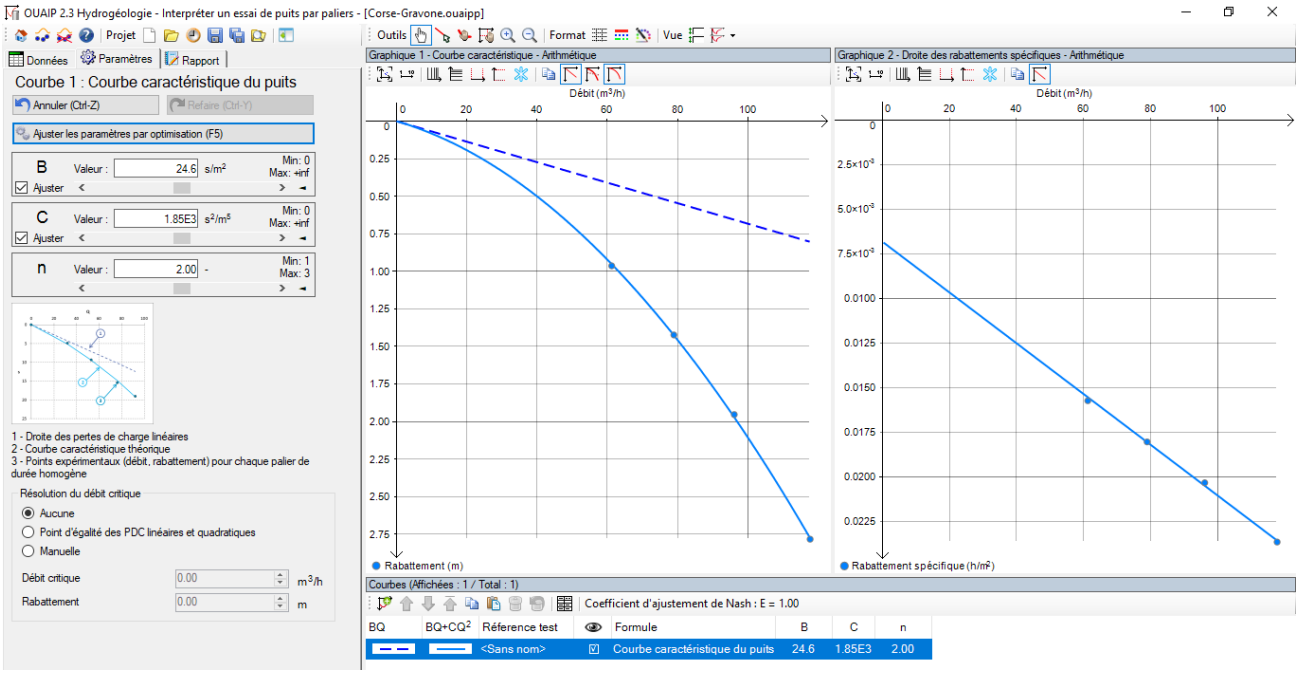


Illustration 90 : Résultat après calage

Après calage, on obtient une valeur de B = 24.6 s/m² et C = 1 8450 s²/m^5 (Illustration 90).

Avec les boutons de la barre d'outils du graphique de gauche il est possible d'afficher plusieurs courbes :

- La courbe caractéristique.
- La courbe des pertes de charges linéaires.
- La courbe des pertes de charges quadratiques.

Il est classique d'afficher la courbe caractéristique et celle des pertes de charges linéaires pour mettre en évidence la « chute » de la première par rapport à la seconde.

La détermination du débit critique au sens des pertes de charge quadratiques peut se faire de deux manières : soit en dessinant toutes les courbes (le point critique est alors l'intersection entre la courbe des pertes de charge quadratiques et linéaires), soit en sélectionnant le bouton point d'égalité des PDC linéaires et quadratiques.

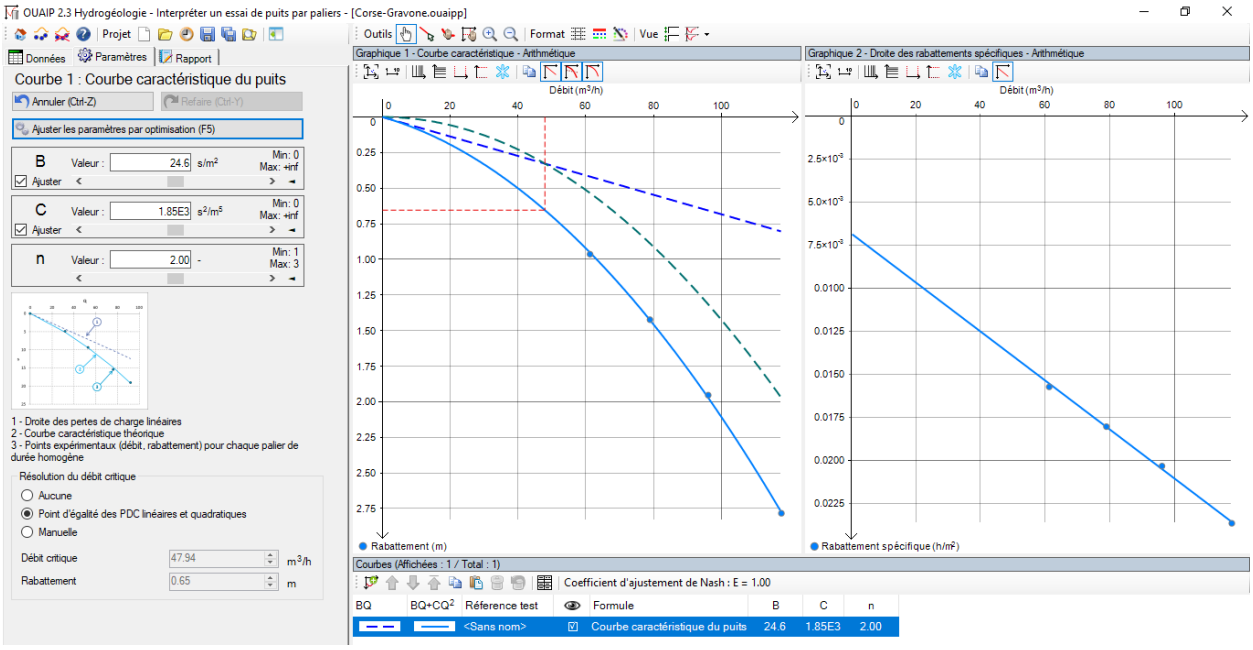


Illustration 91 : Détermination du débit critique

L'onglet rapport permet d'éditer un rapport de synthèse présentant l'ensemble des informations issues de l'essai. Saisir les données contextuelles à l'essai afin qu'elles paraissent dans le rapport (Illustration 92) :

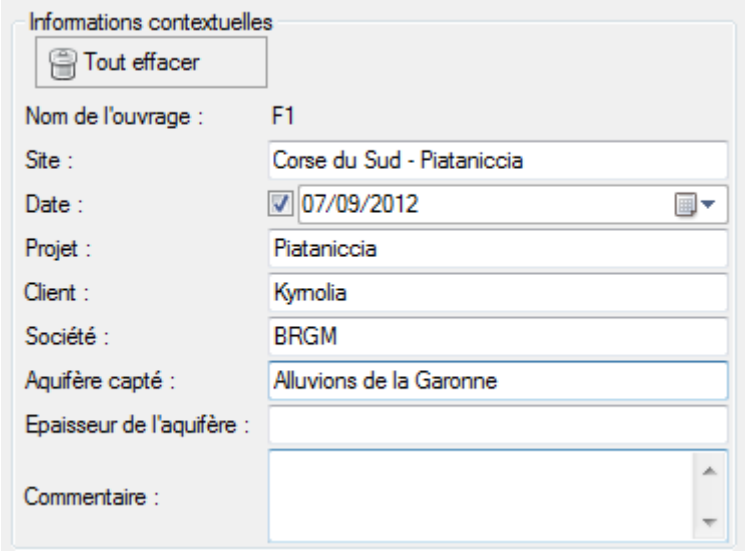


Illustration 92 : Onglet Rapport

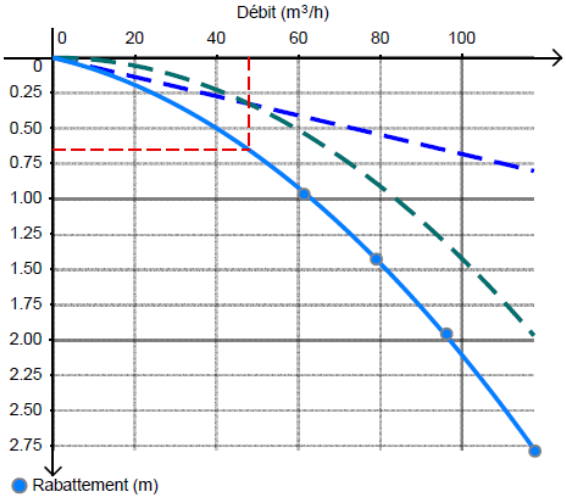
Le rapport peut être exporté au format PDF ou HTML, les images et graphiques sont exportés au format vectoriel (EMF pour Word et SVG pour le web). L'Illustration 93 ci-dessous présente un exemple de rapport.

Essai par paliers

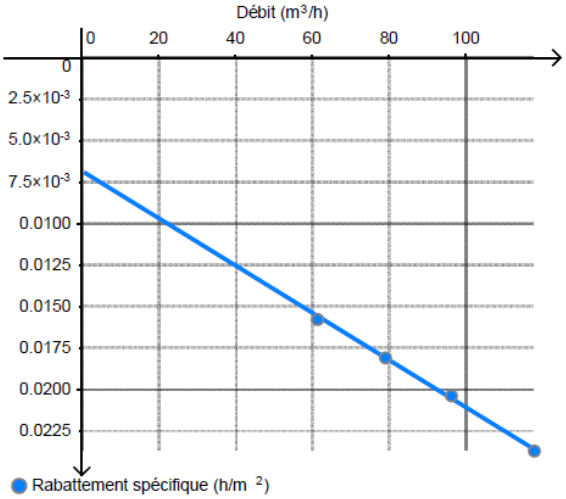
OUAIP

Site	La Gravone - Lecture à 60 minutes	**Aquifère capté**	Alluvions
Projet	Piataniccia	**Epaisseur de l'aquifère**	10 m
Client	Kyrnolia	**Type d'ouvrage**	Puits
Société	BRGM	**Type de pompage**	Indéterminé

Courbe caractéristique



Droite des rabattements spécifiques



Légende	
– – –	Débit critique
●	Points expérimentaux
– –	PDC linéaires
– –	PDC quadratiques
———	Courbe caractéristique du puits

Légende	
●	Points expérimentaux
———	Rabattement spécifique

Commentaire

Valeurs à 1h, lues sur fichiers d'origines + corrections

Pompage par palier	Débit (m³/h)	Rabattement mesuré (m)	Temps de pompage (min)	Temps de remontée (min)	Rabattement linéaire calculé (m)	Rabattement quadratique calculé (m)	Rabattement spécifique mesuré (h/m²)	Rabattement spécifique calculé (h/m²)	Écart (sim-obs) (m)
Palier 1	61.1	0.96	-	-	0.42	0.53	1.57×10^{-2}	1.55×10^{-2}	-1.15×10^{-2}
Palier 2	78.8	1.42	-	-	0.54	0.88	1.8×10^{-2}	1.8×10^{-2}	1.79×10^{-3}
Palier 3	96	1.95	-	-	0.66	1.3	2.03×10^{-2}	2.05×10^{-2}	1.72×10^{-2}
Palier 4	117.6	2.78	-	-	0.8	2	2.36×10^{-2}	2.36×10^{-2}	-8.56×10^{-3}

Résultats de l'ajustement		
Coef. de pertes de charges linéaires (B)	0.00683 h/m²	**24.6 s/m²**
Coef. de pertes de charges quadratiques (C)	1.42×10^{-4} h²/m⁵	**1.85×10^{3} s²/m⁵**
Exposant (n)	2.00	

Débit critique	47.9 m³/h

Corse-Gravone.ouaipp (OUAIP v2.3) *http://ouaip.brgm.fr*

Illustration 93 : Rapport d'interprétation de l'essai de puits

Pour terminer, sauvegardez votre projet OUAIP, il prendra l'extension ouaip**p** (« **p** » pour « **p**alier »). Pour vérifier votre résultat vous pouvez charger la solution en ouvrant le fichier « Essais de puits - Solution Tutoriel n°1.ouaipp ».

5.1.2. Tutoriel n°2 - Interprétation comparée

OUAIP v2 permet de saisir et d'interpréter dans un même fichier OUAIP plusieurs essais de puits, notamment à titre de comparaison. Dans le répertoire de OUAIP, dans \Tutoriels\Tutoriels n°2 - Essai de puits\ ouvrir le fichier « Essais de puits – Tutoriel n°2.ouaipp ».

Un premier essai de puits dont les données ont été saisies « Avant acidification » a été interprété. La PDC quadratiques de l'ordre de 3900 s^2/m^5.

Suite à ce premier essai de puits, une acidification a été réalisée afin d'améliorer la productivité de l'ouvrage, il s'agit maintenant d'interpréter le second essai de puits afin d'évaluer si les performances de l'ouvrage ont été améliorées.

Dans l'onglet « Données », cliquer sur l'icône « Ajouter un jeu de données » (Illustration 94), saisir le nom du jeu de données « Après acidification », puis cliquer sur « Saisir/Editer » et saisir les valeurs du tableau ci-après :

N° du palier	Q (m3/h)	s (m)
1	60	2.95
2	120	6.95
3	180	12.05
4	240	18.25

Les icônes ci-dessous permettent, dans l'ordre :

- D'ajouter un nouveau jeu de données.
- De renommer un jeu de données.
- De supprimer un jeu de données.
- D'importer un jeu de donnée/interprétation provenant d'un fichier *.ouaipp.

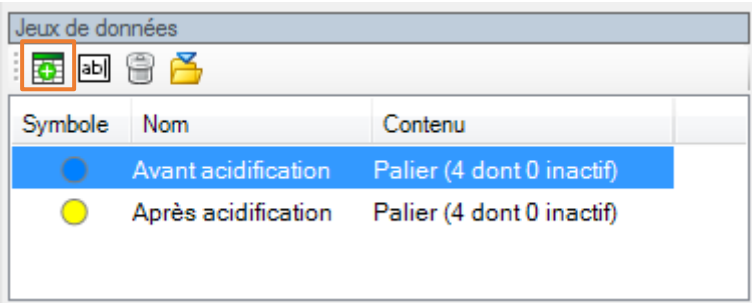


Illustration 94 : Ajout d'un nouveau jeu de données

Ensuite, dans la liste des courbes, cliquer sur « Dupliquer la courbe sélectionnée » afin de créer une nouvelle interprétation. Puis, dans la colonne « Référence test » (Illustration 95), cliquer sur « Avant acidification » de la nouvelle courbe créer pour associer le jeu de données « Après acidification » (Illustration 96).

Pour éviter de surcharger temporairement le graphique, il est possible de masquer la première interprétation en cliquant sur la case à cocher dans la colonne avec le symbole (Illustration 96).

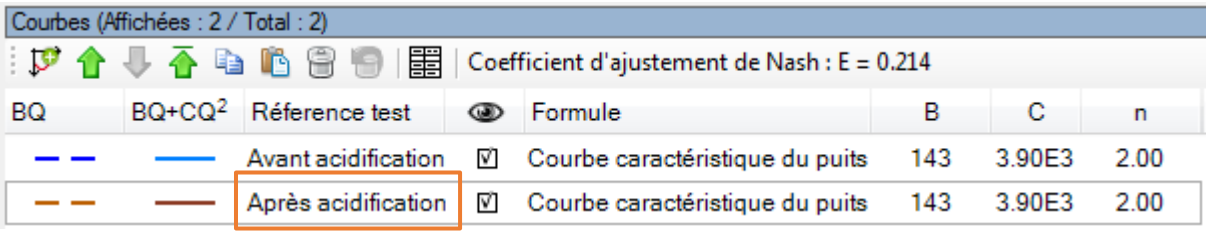


Illustration 95 : Liste des courbes et association d'un jeu de données (colonne « Référence test »)

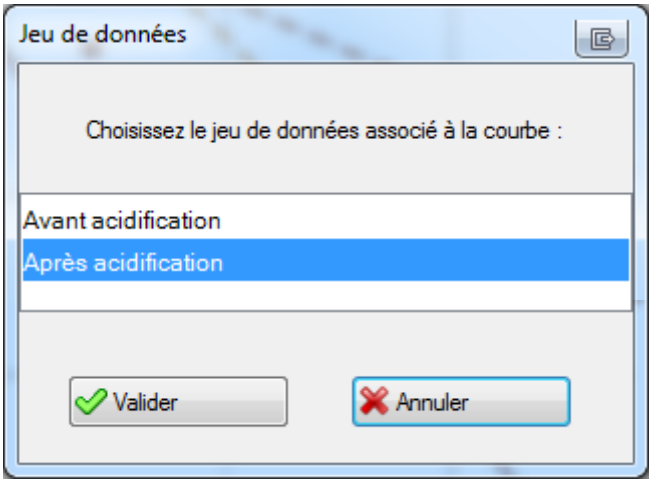


Illustration 96 : Associer un jeu de données

Vous pouvez maintenant procéder à l'interprétation dans l'onglet « Paramètres ». On constate que C#1950 s^2/m^5. Les performances de l'ouvrage ont été améliorées suite à l'acidification, les PDC quadratiques étant plus faibles. À 240 m^3/h, les PDC quadratiques passent de 17.34 m à 8.67 m.

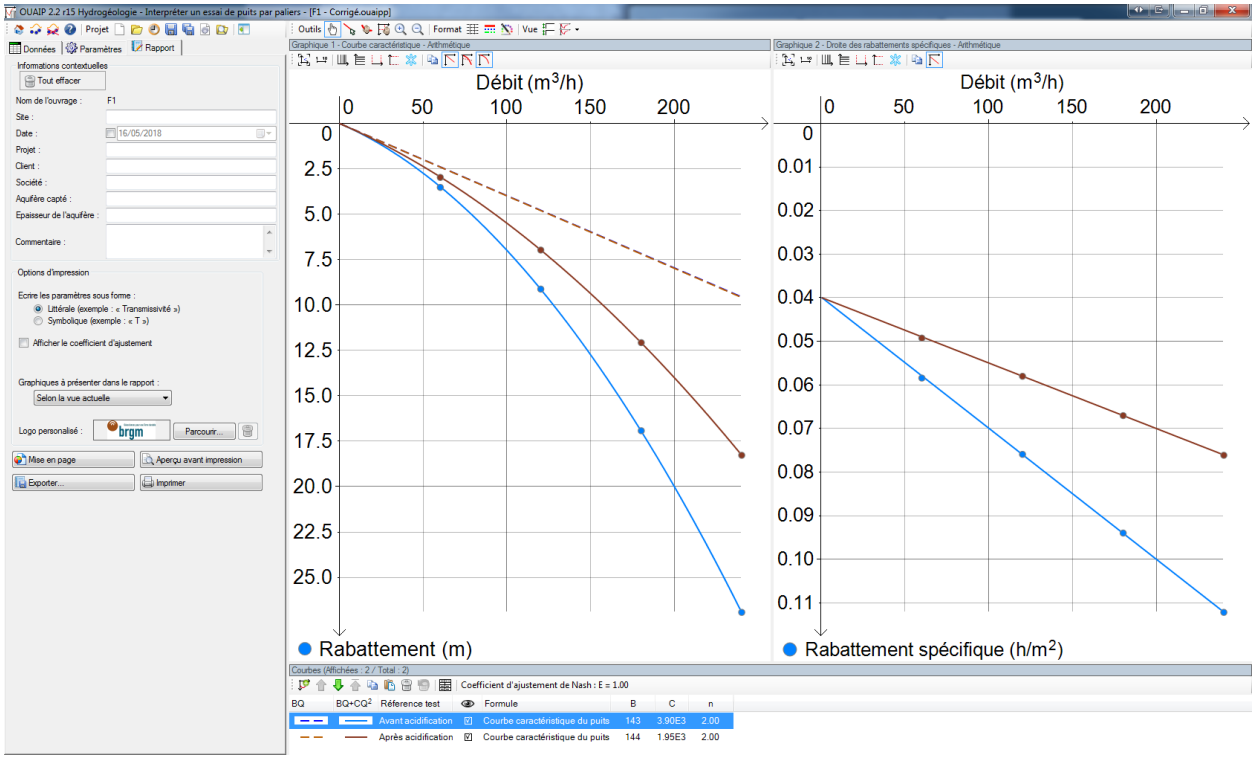


Illustration 97 : Comparaison des interprétations des deux essais de puits

5.1.3. Autres tutoriels

Vous pouvez vous exercer sur les **9 jeux de données** suivants pour interpréter d'autres essais de puits, dans le répertoire :

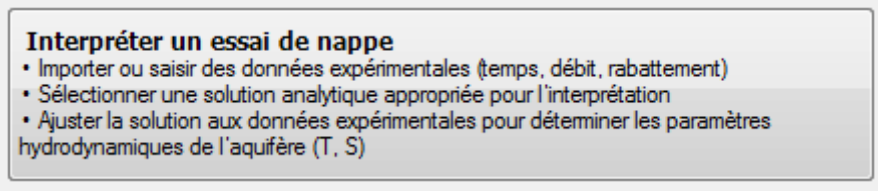
- Tutoriel n°3 - Essai de puits : cet exemple propose 8 jeux de données sur des ouvrages différents. Ouvrir le fichier Excel (« *.xls » ou « *.xlsx »), la feuille « Données », contient les informations (colonne débit et rabattement) à importer en faisant un copier-coller de ces colonnes vers le tableau de la fenêtre « Saisir / Éditer ». Le dossier « Exercice » intègre les fichiers OUAIP avec les données déjà importées, le répertoire « Solution » intègre les fichiers *.ouaipp avec la solution.

Les jeux de données présentés dans le tutoriel n°3 sont tirés du rapport public « Suivi géologique et hydrogéologique de 3 forages de reconnaissance sur le site de Tivoli, Fort de France (Martinique). Rapport final », disponible au téléchargement au format PDF sur InfoTerre, code ISBN/ISRN : BRGM/RP-60339-FR.

- Tutoriel n°4 - Essai de puits : cet exemple est extrait du rapport « Prospection hydrogéologique du socle fracturé du Bourg de Roura » BRGM/RP-67440-FR (en ligne). Dans le fichier « Essais de puits - Tutoriel n°4 Données.xlsx », le détail du calcul des rabattements pour chaque palier est donné à titre informatif (feuille « Essai de puits »). La feuille « Tableau de synthèse » récapitule les informations nécessaires à l'interprétation. Le répertoire contient également la coupe technique du forage, le projet OUAIP, sa solution et le rapport d'interprétation OUAIP en PDF.

5.2. INTERPRÉTER UN ESSAI DE NAPPE

L'essai de nappe a pour objectif de déterminer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (transmissivité : T, coefficient d'emmagasinement : S) qui constituent la base des calculs en hydrogéologie, tels que ceux destinés à estimer l'impact d'un pompage sur son voisinage, la mise en place des périmètres de protection, l'assèchement d'une fouille de chantier ou la modélisation de nappes. L'essai de nappe est plus long que l'essai par paliers de manière à embrasser un volume aquifère important (plusieurs centaines de mètres autour du forage).



5.2.1. Tutoriel n°5 - Solution de Theis (1936)

Contexte

L'essai de nappe consiste en un pompage en nappe alluviale d'une (courte) durée de 2h et dont le suivi est assuré dans un piézomètre distant de 10 m par rapport au puits de pompage. Le puits de pompage est complet, l'épaisseur saturée est de l'ordre de 30 mètres. Les niveaux d'eau dans l'ouvrage d'observation ont été suivis à la descente ainsi qu'à la remontée. Le rabattement maximal mesuré est de 0.3 m.

Interprétation

Lancer OUAIP et sélectionner « Interpréter un essai de nappe ». La partie gauche de l'interface est dédiée à la saisie des données d'entrée, elle est constituée de quatre onglets à utiliser progressivement de la gauche vers la droite (Illustration 98) :

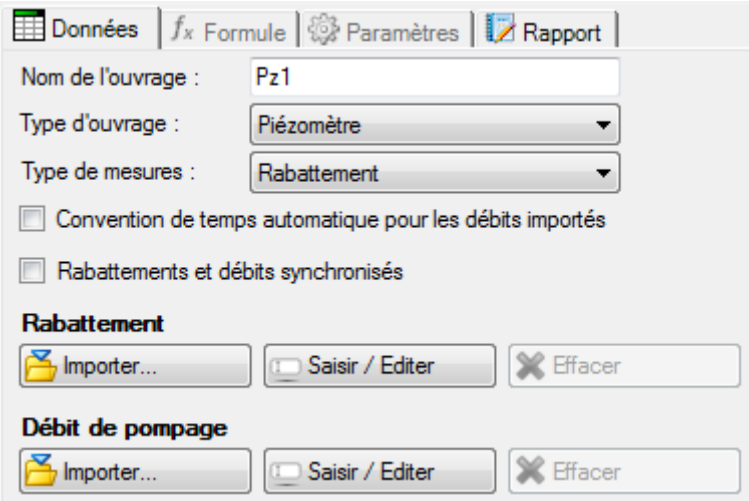


Illustration 98 : Onglet Données

Dans l'onglet « Données » :

- Définir le nom de l'ouvrage suivi : « Pz1 ».
- Dans « Type d'ouvrage », sélectionner le type d'ouvrage suivi : « Piézomètre ».
- Les données de rabattement et de suivi du débit à importer sont synchrones, **cocher** la case « Rabattements et débits synchronisés » (par défaut on considère que la plupart du temps elles ne le sont pas).

« **Données synchrones** » signifie que les mesures du rabattement et du débit ont été faites aux mêmes temps. Ainsi, chaque ligne du tableau de données contient l'information : temps, rabattement et débit.

Si le rabattement et le débit ont été mesurés à des temps différents (donc de manière indépendante), décocher la case, ainsi il est possible de saisir d'un côté un tableau de valeur avec le temps et le rabattement et de l'autre le temps et le débit.

- Cliquer sur « Importer » puis sélectionner le fichier « Essais de nappe - Données Tutoriel n°4.csv » dans le répertoire « Tutoriels**Tutoriel n°5 - Essai de nappe – Theis** », ce fichier contient les données de temps, rabattement et débit, une ligne par mesure. Les données sont également accessibles sous différents formats (Essais de nappe - Tutoriel n°5 Données.xlsx), cependant OUAIP ne permet pas d'importer un fichier Excel, il est nécessaire, soit de copier les données du fichier Excel dans un fichier texte (*.txt, *.csv), soit de copier-coller directement depuis Excel les données vers le tableur de OUAIP.
- Lors du chargement du fichier, la fenêtre ci-dessous demande à l'utilisateur comment les débits doivent être pris en compte (Illustration 99), sélectionner la première option et cliquer « Ok » :
    - par défaut, le couple temps / débit correspond au début du palier ou,
    - le couple temps / débit correspond à la fin d'un palier.

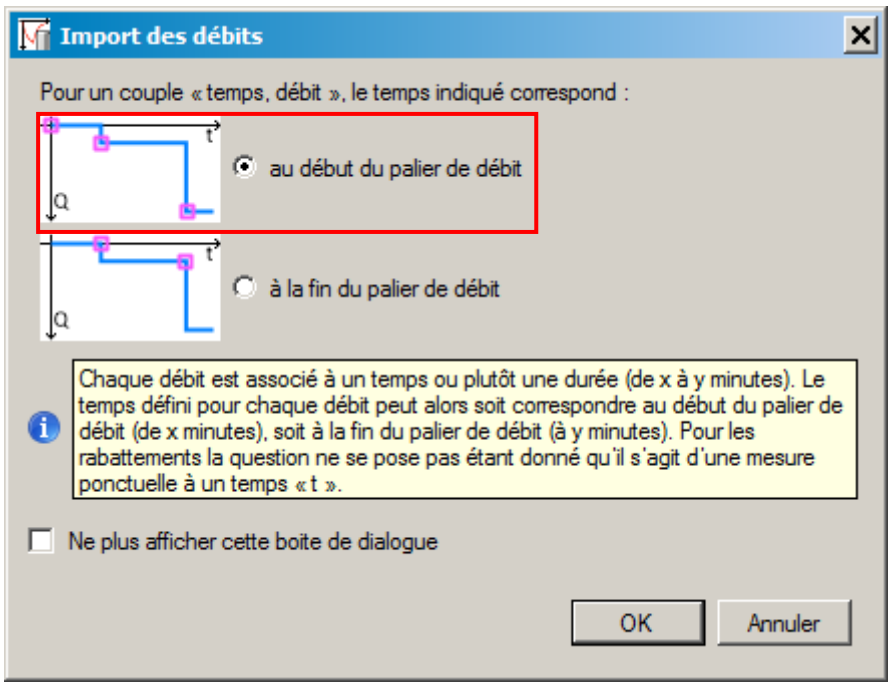


Illustration 99 : Import des débits

L'encart « Unités des données importées » permet de modifier l'unité des données de temps, de rabattement et de débit. En l'occurrence, les unités sont spécifiées dans le fichier *.csv importé, OUAIP les a ainsi automatiquement reconnues.

Si les **données importées** (rabattement, débit) **sont nombreuses**, il est recommandé d'utiliser les options de filtrage (Illustration 100) pour simplifier les chroniques. Le filtrage permet de s'affranchir des données aux temps où elles sont stationnaires et permettent d'alléger la visualisation et d'améliorer l'efficacité des processus d'optimisation des paramètres lorsqu'ils sont utilisés.

À titre d'exemple si l'on dispose d'un enregistreur de niveau dans un ouvrage avec un pas d'acquisition fin (inférieur à la minute), dans la pratique pour l'interprétation de l'essai seules les variations du rabattement nous intéressent. Le filtrage permet ainsi de s'affranchir des données invariantes et permet d'améliorer la vitesse d'exécution pour l'optimisation des paramètres, en particulier si un nouveau fichier avec les données filtrées est constitué.

Dans la mesure où le débit varie peu au court de votre essai, la chronique de débit doit être la plus simple possible afin d'améliorer la performance des calculs (le principe de superposition peut ralentir drastiquement certains calculs et l'optimisation des paramètres).

Illustration 100 : Options de filtrage des données

Cliquer sur « Filtrage » pour choisir une méthode de filtrage (Illustration 101). À titre d'exemple on filtre sur une condition, lorsque le rabattement varie d'au moins 0.01 m, ce qui élimine 11 points de mesure (Illustration 102). Les points filtrés ne sont pas pris en compte dans le processus d'optimisation des paramètres. La quantité de données durant cet essai n'étant pas importante, on peut cliquer sur « Tous les points » pour activer à nouveau l'ensemble des données disponibles.

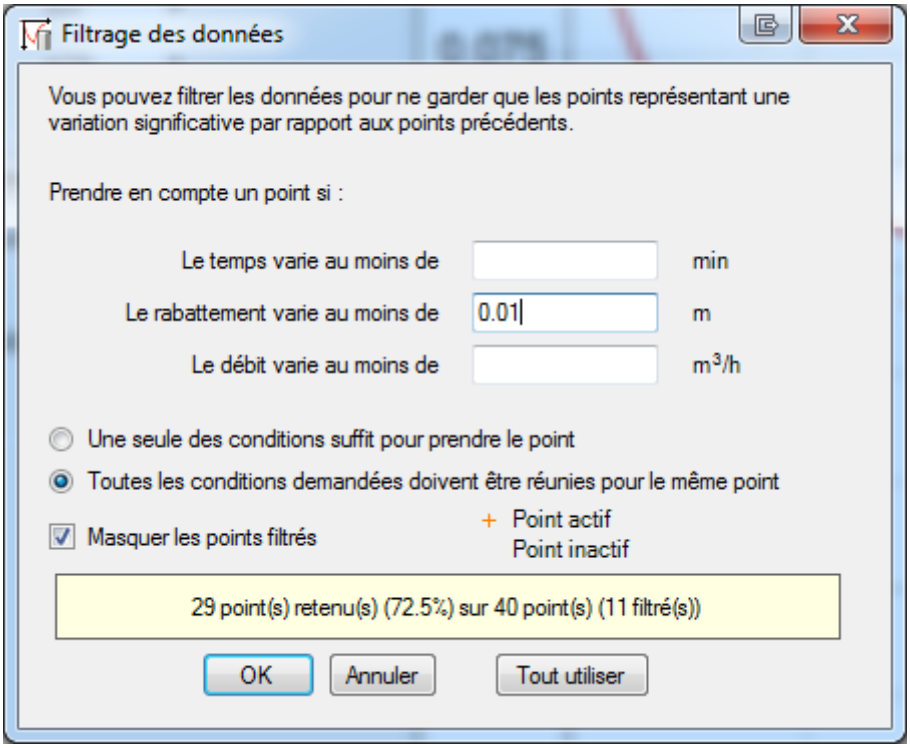


Illustration 101 : Filtrage des données

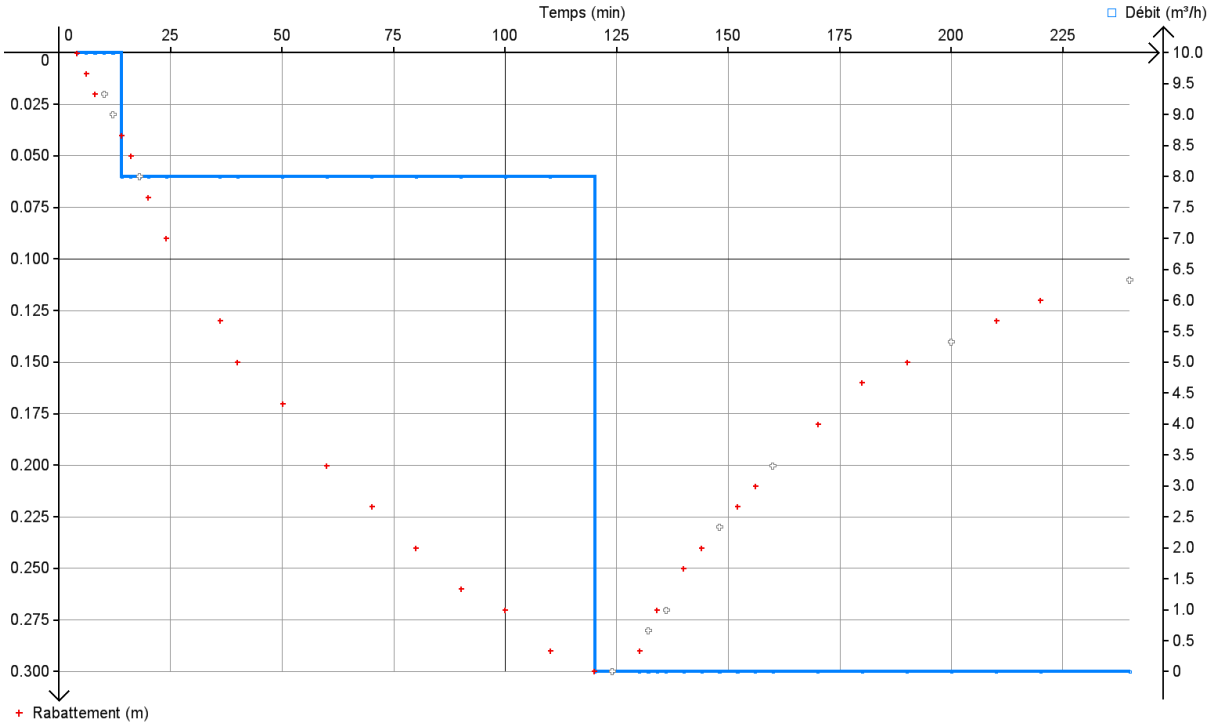


Illustration 102 : Conséquence du filtrage des données sur le rabattement (points blancs filtrés)

Une fois les données importées, le graphique temps, rabattement et débit permet de constater la présence de deux paliers de débit (courbe bleu, axe droit orienté vers le haut) et une remontée (débit nul), et l'évolution du rabattement (descente et remontée, point rouge, axe gauche orienté vers le bas). Le changement de débit est légèrement visible sur le piézomètre.

Les différentes barres d'outils disponibles encadrées en orange sont présentés au chapitre « 4.3 Les barres d'outils ».

Notez qu'il est possible d'**afficher un deuxième graphique** en cliquant/étirant la zone encadrée en vert permettant (Illustration 103) :

- D'afficher les courbes avec une autre échelle (semi-logarithmique ou bi-logarithmique).
- De zoomer sur une partie des données disponible (descente, remontée).

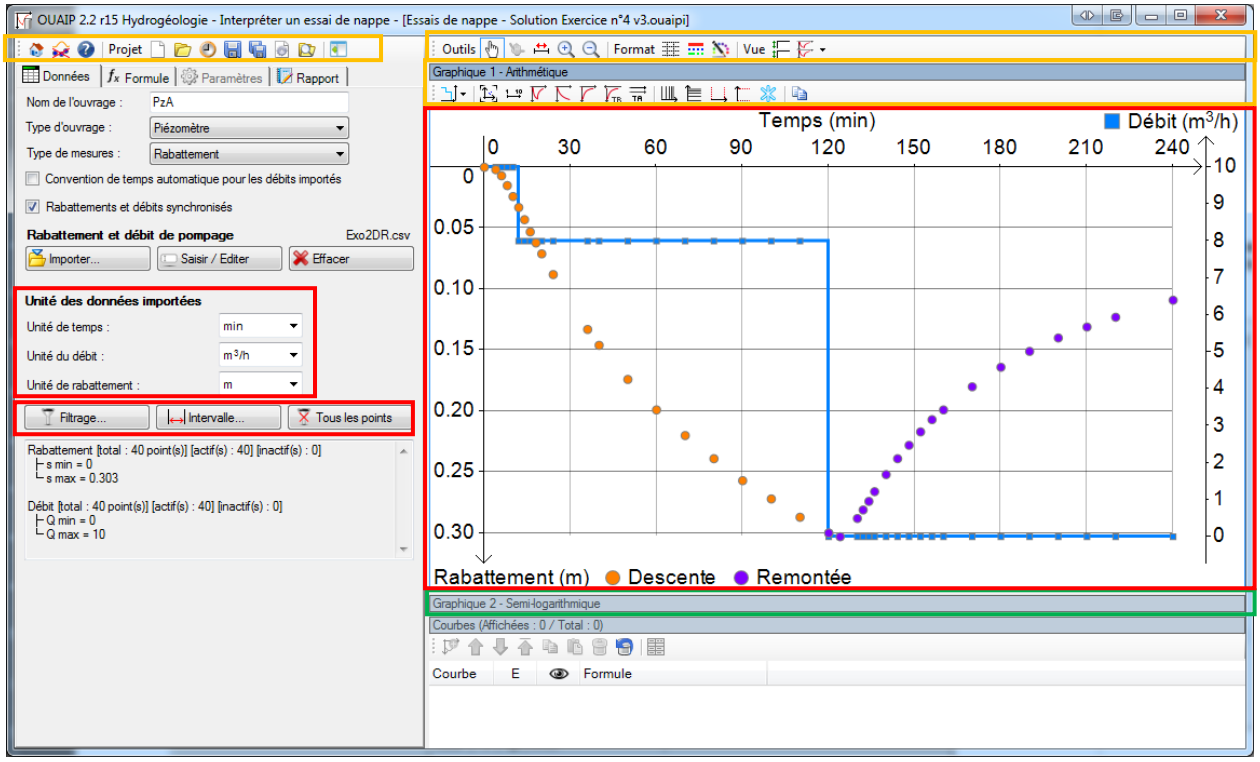


Illustration 103 : Saisie et visualisation directe des données

Utilisez la barre d'outils OUAIP pour sauvegarder dès maintenant votre projet au format *.ouaipi (« **i** » pour « **i**nterprétation »).

Une fois que les données ont été saisies, on constate que l'onglet « Formule » est maintenant accessible (Illustration 104).

Illustration 104 : Activation de l'onglet Formule

Dans l'onglet « Formule », une liste de solutions analytiques répondant à différentes typologies de nappe et de milieux est proposée. Sélectionnez la solution de Theis, à titre informatif, un schéma de la configuration d'écoulement s'affiche. Cliquez sur « Ajouter une courbe avec cette formule » pour interpréter l'essai avec cette solution (Illustration 105).

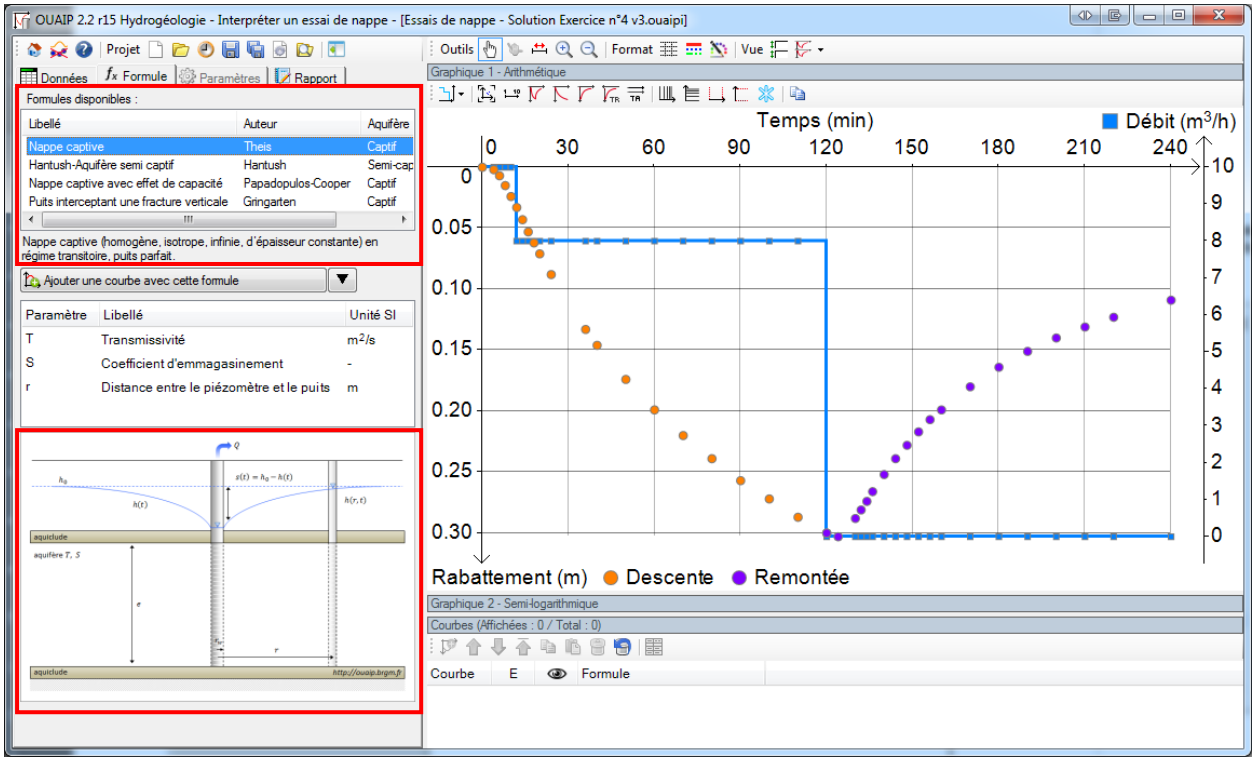


Illustration 105 : Onglet Formule

L'onglet « Paramètres » étant accessible, cliquer dessus. La page affiche les différents paramètres de la solution analytique sélectionnée. Initialiser les paramètres pour pouvoir calculer/afficher la courbe simulée (Illustration 106) :

- Transmissivité : $5x10^{-3}$ m²/s (saisir 5.0e-3).
- Coefficient d'emmagasinement : $1x10^{-2}$ (saisir 1.0e-2).
- Distance puits de pompage – point d'observation : 10 m.

Une fois les paramètres saisis, la courbe simulée sur la base des débits spécifiés est calculée (Illustration 107). À l'aide de l'ascenseur horizontal, modifier la valeur de la transmissivité à la baisse pour obtenir un rabattement maximal de l'ordre de 0.3 m. Puis ajuster le coefficient d'emmagasinement à la hausse afin de représenter correctement la pente de la descente et de la remontée et enfin baisse de nouveau la transmissivité pour terminer le calage (Illustration 108).

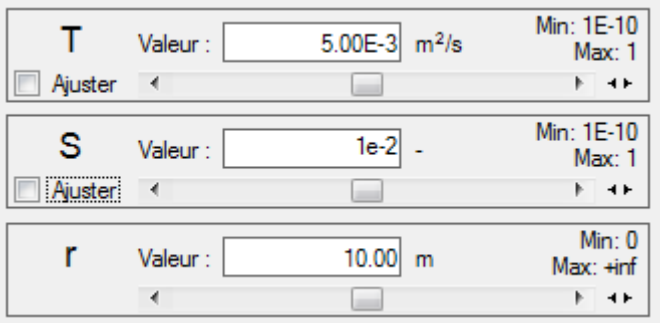


Illustration 106 : Modification des paramètres

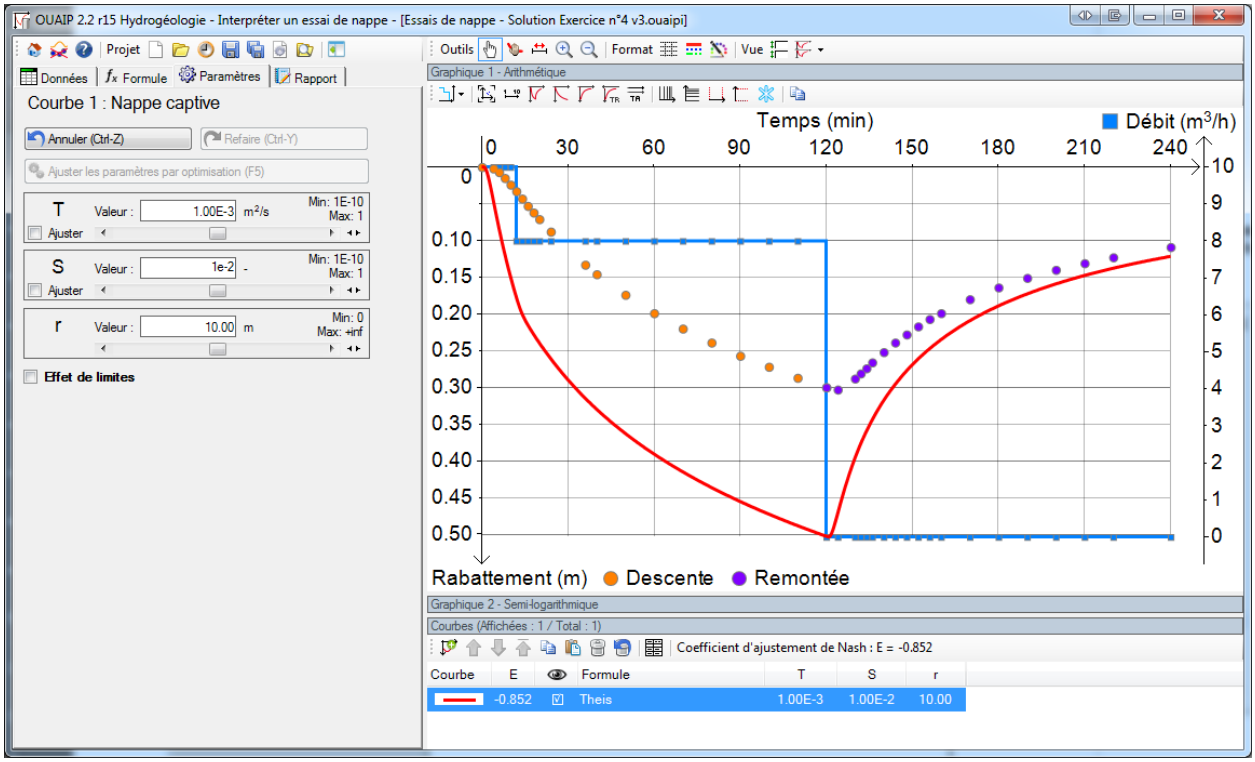


Illustration 107 : Initialisation des paramètres

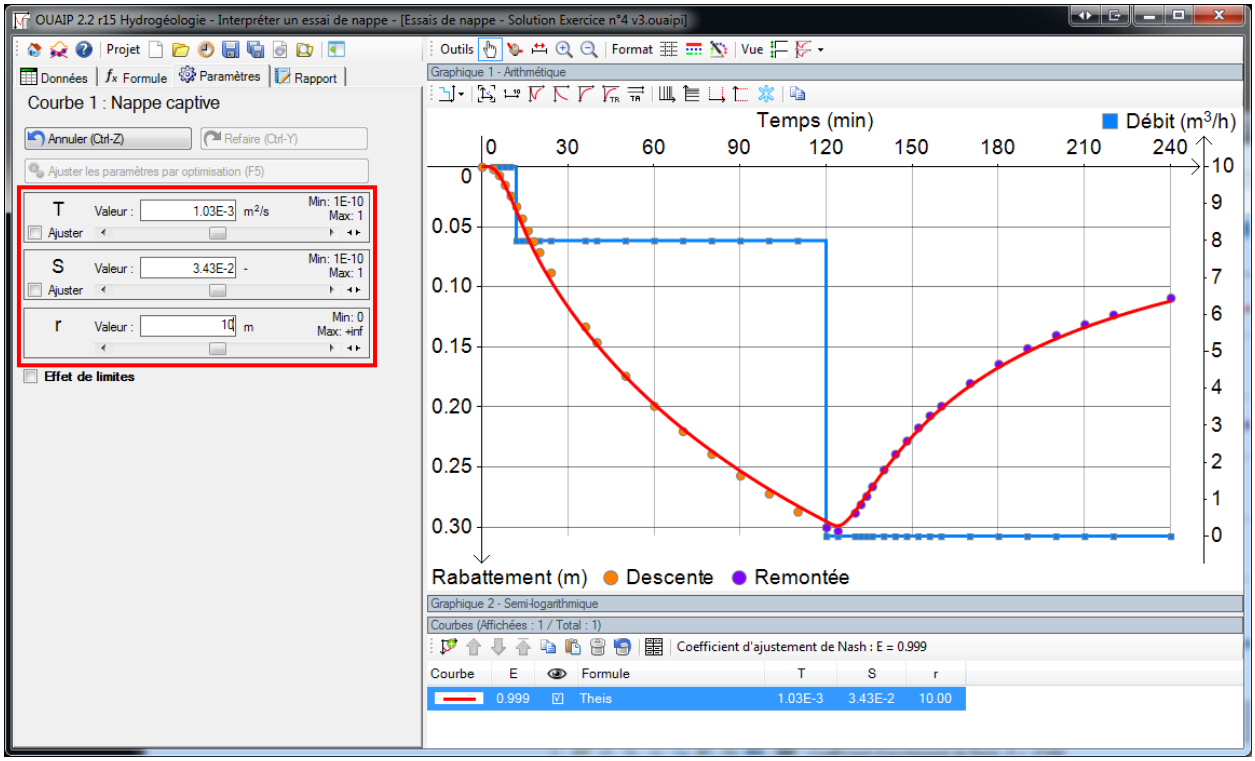


Illustration 108 : Ajustement des paramètres

Il est également possible d'ajuster les paramètres hydrodynamiques en déplaçant la courbe à la main. Pour cela :

- Cocher « Ajuster » sur le (ou les) paramètre(s) que vous souhaitez ajuster (T par exemple).
- Dans la barre d'outils Ajustement, l'icône est maintenant active, sélectionnez-la.
- Puis, saisir la courbe avec la souris et déplacez-la horizontalement et/ou verticalement, notez que les paramètres sont modifiés en temps réel.
- Décocher T et cocher éventuellement S pour recommencer l'opération. Bien que l'ajustement simultané de plusieurs paramètres soit possible il est conseillé de travailler sur chaque paramètre indépendamment pour mieux se rendre compte de la sensibilité de chacun d'entre eux. En outre, le calcul est ainsi plus rapide et l'ajustement de la courbe plus fluide.

Pour finaliser l'ajustement vous pouvez également utilisez un ajustement automatique. Pour bien faire, cocher « Ajuster » pour les paramètres à optimiser. L'optimisation consiste à minimiser l'écart entre les données de rabattement observé (mesuré) et le rabattement simulé.

La qualité du calage peut être appréciée :

- Soit visuellement, le calage est jugé selon que la courbe théorique est plus ou moins bien ajustée aux points d'observations à la descente et/ou à la remontée.
- Soit par l'intermédiaire d'un critère mathématique, le coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe visible dans la liste des courbes (Illustration 111) calculé et affiché pour la courbe sélectionnée et exprimé par :

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X_{obs}^{i} - X_{sim}^{i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(X_{obs}^{i} - \overline{X_{obs}}\right)^2}$$

Ce qui correspond à l'écart moyen au carré, entre l'observation et le modèle, divisé par la variance des observations. **L'ajustement est d'autant meilleur que le critère tend vers 1**.

Définissez ensuite les bornes de variations des paramètres en cliquant sur les bornes, encadrées en rouge sur la Illustration 109 :

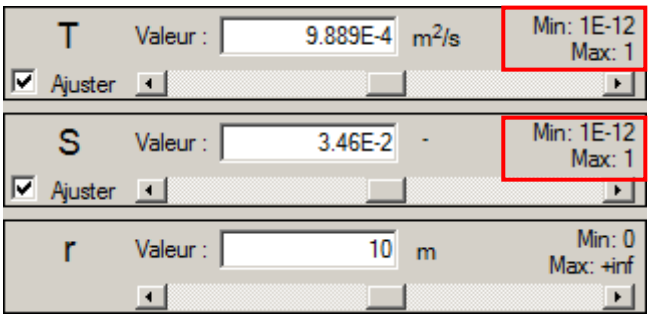


Illustration 109 : Modification des bornes des paramètres

Modifier les bornes fixes par défaut afin de contraindre la plage des valeurs prises lors de l'optimisation (Illustration 110) :

- Minimum : $1x10^{-4}$ m²/s
- Maximum : $1x10^{-2}$ m²/s

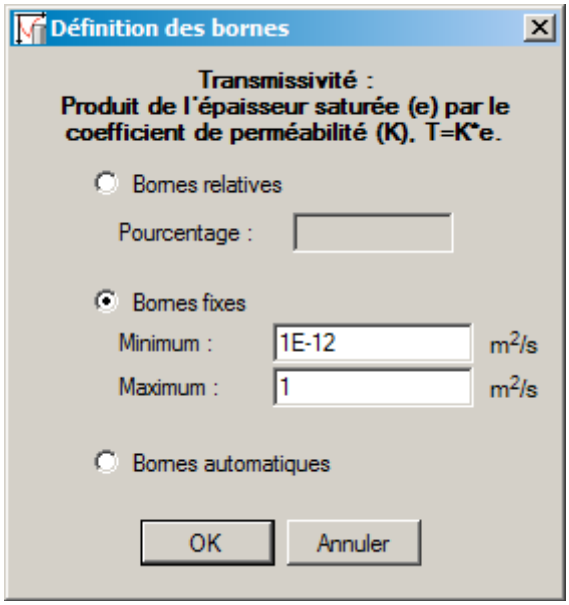


Illustration 110 : Définition des bornes des paramètres

Enfin, cliquez sur le bouton « Ajuster les paramètres par optimisation ». Par défaut l'optimisation se fait sur l'ensemble des données, si vous souhaitez optimiser les paramètres en ne considérant qu'une partie des points (remontée par exemple), utilisez l'icône « Sélectionner un intervalle » et cliquer une fois pour définir le premier point et une deuxième fois pour définir le dernier point de l'intervalle. Cliquer à nouveau sur « Ajuster les paramètres par optimisation » pour renouveler l'optimisation sur cette partie de la courbe.

Il est possible de tester différents jeux de paramètres, ou différentes formules en ajoutant autant de nouvelles courbes que désiré (Illustration 111, Illustration 112).

OUAIP permet également d'ajouter des effets perturbateurs (effet de capacité, effet de vidange, effet de skin, effet de limite), non présentés dans ce tutoriel.

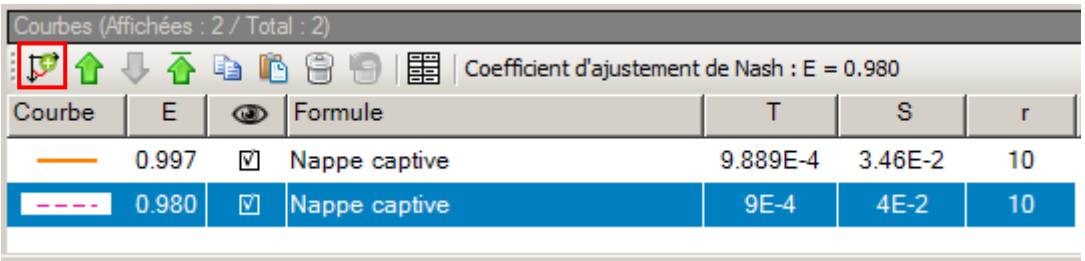


Illustration 111 : Ajout d'une nouvelle courbe

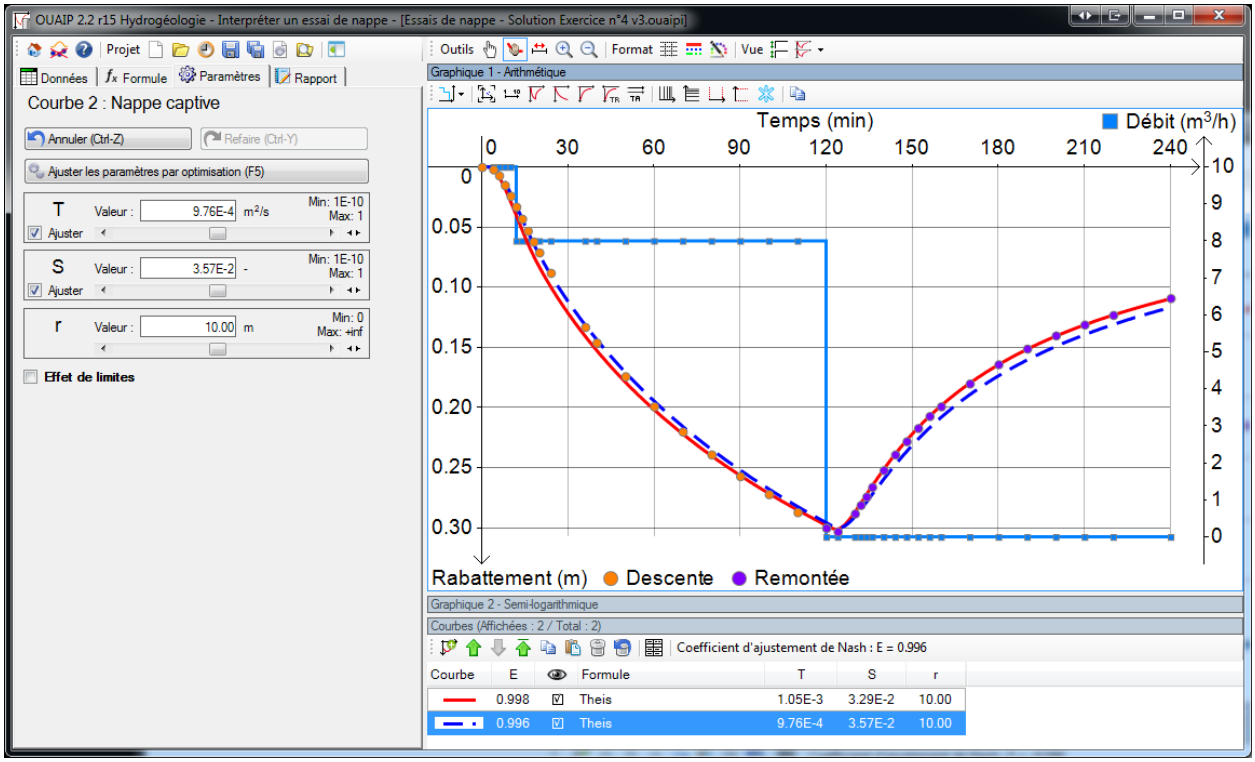


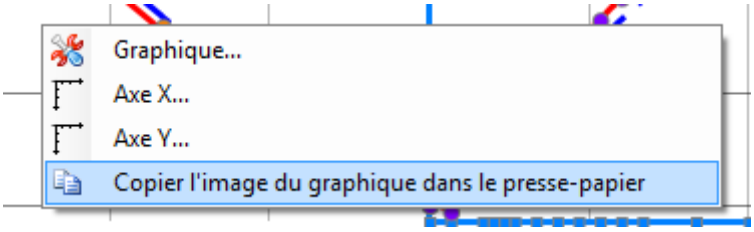
Illustration 112 : Ajustement de deux courbes

Vous pouvez vous exercer sur les jeux de données suivants pour interpréter les essais de nappe fournis :

- Tutoriel n°5 - Essai de nappe : interprétation avec la solution de Papadopulos.
- Tutoriel n°6 - Essai de nappe : interprétation avec la solution de Hantush.

Sauvegardez votre projet OUAIP en cliquant sur l'icône « Enregistrer », ou « Enregistrer sous ». Par défaut, l'extension du nom de fichier s'écrit *.ouaipi (« **i** » pour **I**nterprétation)

Notez qu'il est possible de **copier les graphiques pour le coller dans un document par les combinaisons classiques CTRL+C et CTRL+V (ou clic droit sur le graphique : Copier l'image)**.



L'onglet Rapport permet aussi de présenter les résultats de manière synthétique et d'éditer un rapport en PDF et/ou en HTML.

5.2.2. Tutoriel n°6 - Solution de Papadopulos-Cooper (1967)

Contexte

Le pompage d'essai suivant a été réalisé dans un puits de grand diamètre (2.40 m) en nappe captive. Le puits est situé à 26 m d'un cours d'eau. L'interprétation de l'essai par paliers donne un coefficient de pertes de charge quadratiques égal à 351 s^2/m^5.

L'essai consiste en un pompage de 72 heures et du suivi de la remontée pendant 5 heures. Les mesures du niveau d'eau sont mesurées dans le puits de pompage, le rabattement maximal mesuré est de 4.03 m au bout de 72 heures.

Le puits de pompage est complet. La solution de Papadopulos-Cooper tient compte de l'effet de capacité induit par le grand diamètre de l'ouvrage, qui induit un retard dans l'évolution du rabattement de la nappe, une partie du débit prélevé étant soutenu aux temps courts par le volume d'eau disponible dans le puits.

Interprétation

Le cheminement pour l'interprétation de cet essai est similaire au précédent, pour éviter les redondances, le lecteur peut se référer aux étapes présentées au chapitre « 5.2.1 Tutoriel n°5 - Solution de Theis (1936) ».

Lancer OUAIP et sélectionner « Interpréter un essai de nappe ».

Dans l'onglet « Données » :

- Définir le nom de l'ouvrage suivi : « F4 ».
- Dans « Type d'ouvrage », sélectionner le type d'ouvrage suivi : « Puits ».
- Dans « Type de mesure », sélectionner « Rabattement ».
- Les données de rabattement et de suivi du débit à importer ne sont pas synchrones, vérifier que la case « Rabattements et débits synchronisés » n'est pas cochée.
- Pour accéder aux données de rabattement et du suivi du débit de pompage ouvrir le fichier « Essais de nappe - Tutoriel n°6 Données.xlsx » dans le répertoire « Tutoriels\Tutoriel n°6 - Essai de nappe - Papadopulos-Cooper ».
- Dans le fichier Excel, copier les colonnes temps et rabattement (sans les en-têtes), puis dans OUAIP, cliquer sur « Saisir/Éditer » et coller les données, puis cliquer sur « Valider ». Le graphique se met à jour des données importées. Vérifier la cohérence entre les unités des données et celles proposées par OUAIP.
- Effectuer la même opération pour les données de débit de pompage.

- Après ces opérations, vous obtenez le graphique suivant (Illustration 113 : Rabattement et débit de pompage) :

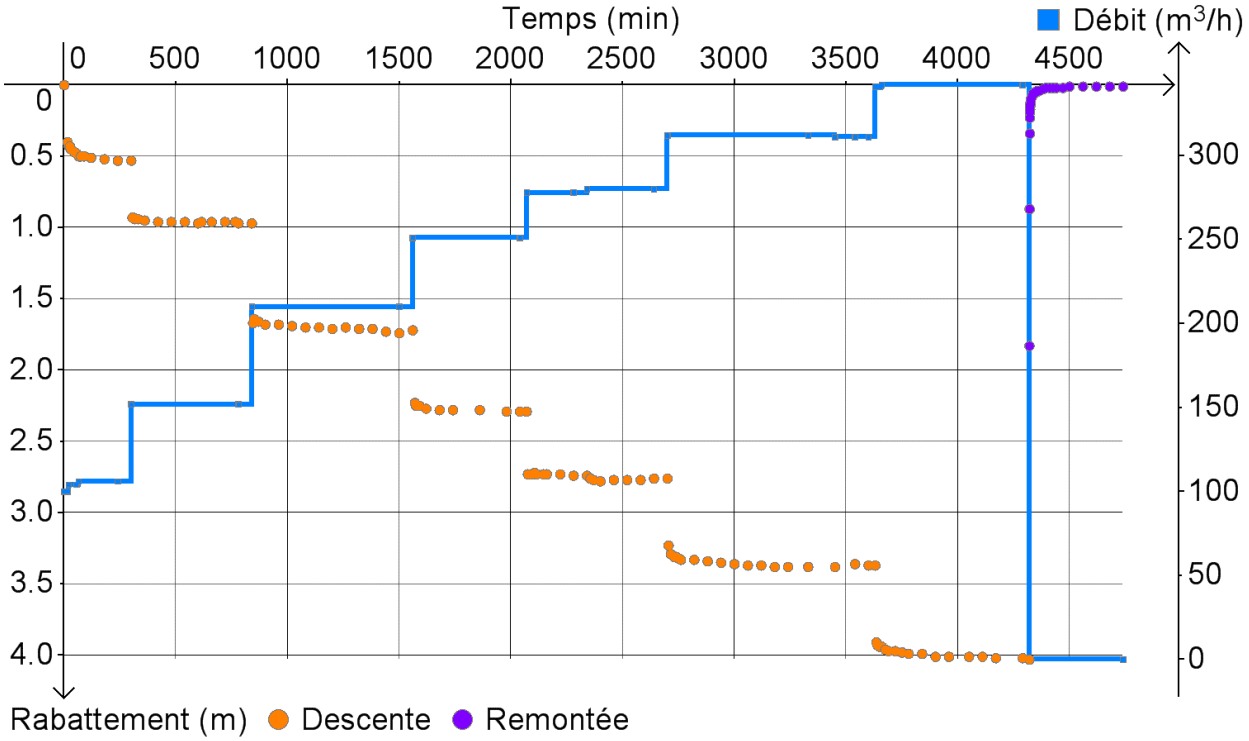


Illustration 113 : Rabattement et débit de pompage

Dans l'onglet « Formule » sélectionnez la solution de Papadopulos-Cooper qui permet de tenir compte de l'effet de capacité pour les ouvrages de grand diamètre, et cliquez sur « Ajouter une courbe avec cette formule » pour interpréter l'essai avec cette solution.

L'onglet « Paramètres » devient actif, cliquer dessus. La page affiche les différents paramètres de la solution analytique sélectionnée. Initialiser les paramètres pour afficher la courbe simulée :

- Transmissivité T : $1x10^{-3}$ m²/s.
- Coefficient d'emmagasinement S : $1x10^{-3.}$
- Distance puits de pompage – point d'observation r : 1.2 m.
- Rayon de l'effet de capacité r_c : 1.2 m.

Ajouter :

- Le coefficient des pertes de charge quadratiques : 351 s^2/m^5.
- Un effet de limite alimentée à une distance de 26 m.

Ajuster T et S pour faire correspondre la courbe simulée avec les points d'observation. Vous pouvez également utiliser la fonctionnalité d'ajustement des paramètres par optimisation sur T puis sur S pour approcher de la solution finale (Illustration 114) : fichier « Essais de nappe – Tutoriel n°6 Solution.ouaipi » ($T=7x10^{-2}$ m^2/s et $S=1x10^{-2}$).

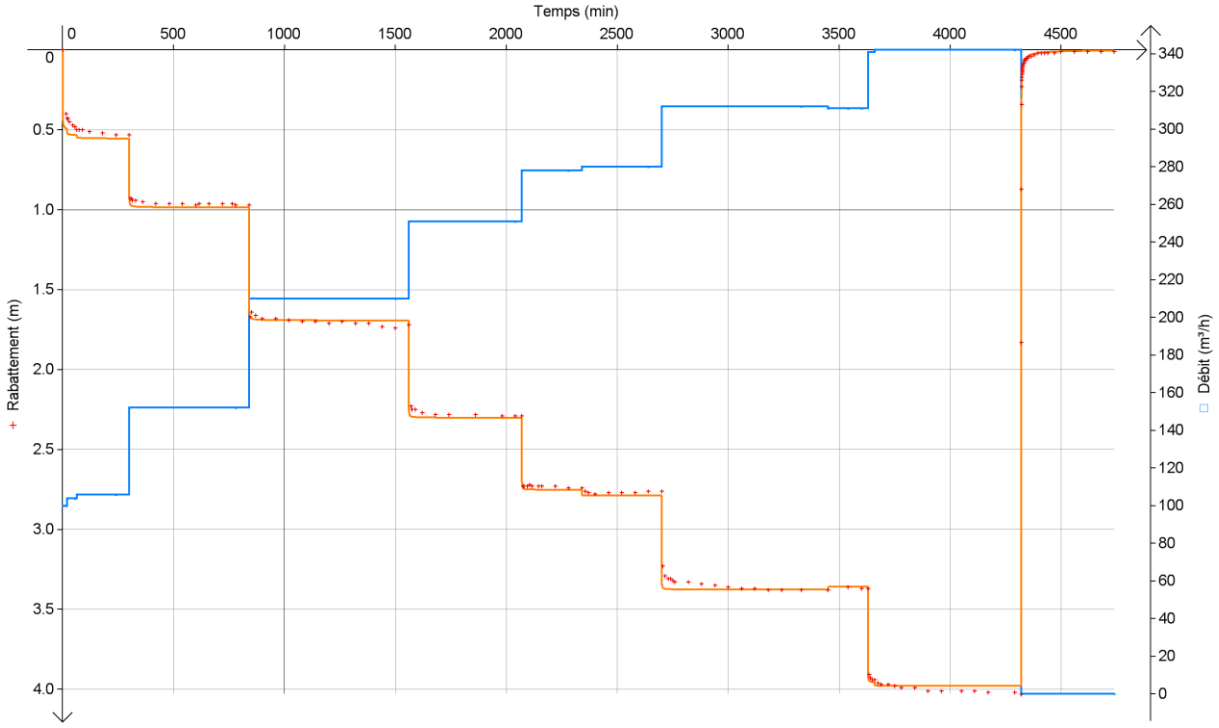


Illustration 114 : Rabattement simulé avec la solution de Papadopulos-Cooper (effet de limite alimentée et pertes de charge quadratiques)

5.2.3. Tutoriel n°7 - Solution de Hantush (1964)

Contexte

Kruseman et De Ridder (1990) présentent des données provenant d'un pompage d'essai réalisé dans un aquifère captif près de Dalem aux Pays-Bas. L'aquifère est, d'une part, recouvert par un aquitard de nature tourbeuse et, d'autre part, situé au-dessus d'une formation considérée aquiclude. L'interprétation de cet essai sera conduite avec la solution de Hantush.

L'ouvrage testé (M77) a été pompé pendant 8 heures à un débit constant de 761 m^3/j (diamètre du l'ouvrage : 0.2 m). Le rabattement a été mesuré au droit d'un piézomètre distant de 90 m du puits de pompage. Les données à interpréter ont été corrigées des fluctuations de la marée et de la pénétration partielle de l'ouvrage. La puissance de l'aquifère est de 40 m, les données de rabattement et du débit sont asynchrones. La remontée des niveaux n'a pas été suivie.

Interprétation

Le cheminement pour l'interprétation de cet essai est similaire au précédent, pour éviter les redondances, le lecteur peut se référer aux étapes présentées au chapitre « 5.2.1 Tutoriel n°5 - Solution de Theis (1936) ».

Lancer OUAIP et sélectionner « Interpréter un essai de nappe ».

Dans l'onglet « Données » :

- Définir le nom de l'ouvrage suivi : « M77 ».
- Dans « Type d'ouvrage », sélectionner le type d'ouvrage suivi : « Piézomètre ».
- Dans « Type de mesures », sélectionner « Rabattement ».
- Les données de rabattement et de suivi du débit à importer sont asynchrones, vérifiez que la case « Rabattements et débits synchronisés » est décochée.
- Pour accéder aux données de rabattement et du suivi du débit de pompage ouvrir le fichier « Essais de nappe - Tutoriel n°7 Données.xlsx » dans le répertoire « Tutoriels\Tutoriel n°7 - Essai de nappe - Hantush-Jacob ».
- Dans le fichier Excel, copier (Ctrl+C) les colonnes temps et rabattement (sans les en-têtes), puis dans OUAIP, cliquer sur « Saisir/Éditer », vérifier les unités des données et les coller (Ctrl+V), puis cliquer sur « Valider ». Le graphique se met à jour des données importées.
- Pour les données de débit de pompage, cliquer sur « Saisir/Éditer », puis définir un débit de 761 **m^3/j** (**choisir l'unité m^3/j**) de 0 à 479.52 minutes, et un débit nul à partir de 479.52 minutes.

- Après ces opérations, vous obtenez le graphique suivant (Illustration 113) :

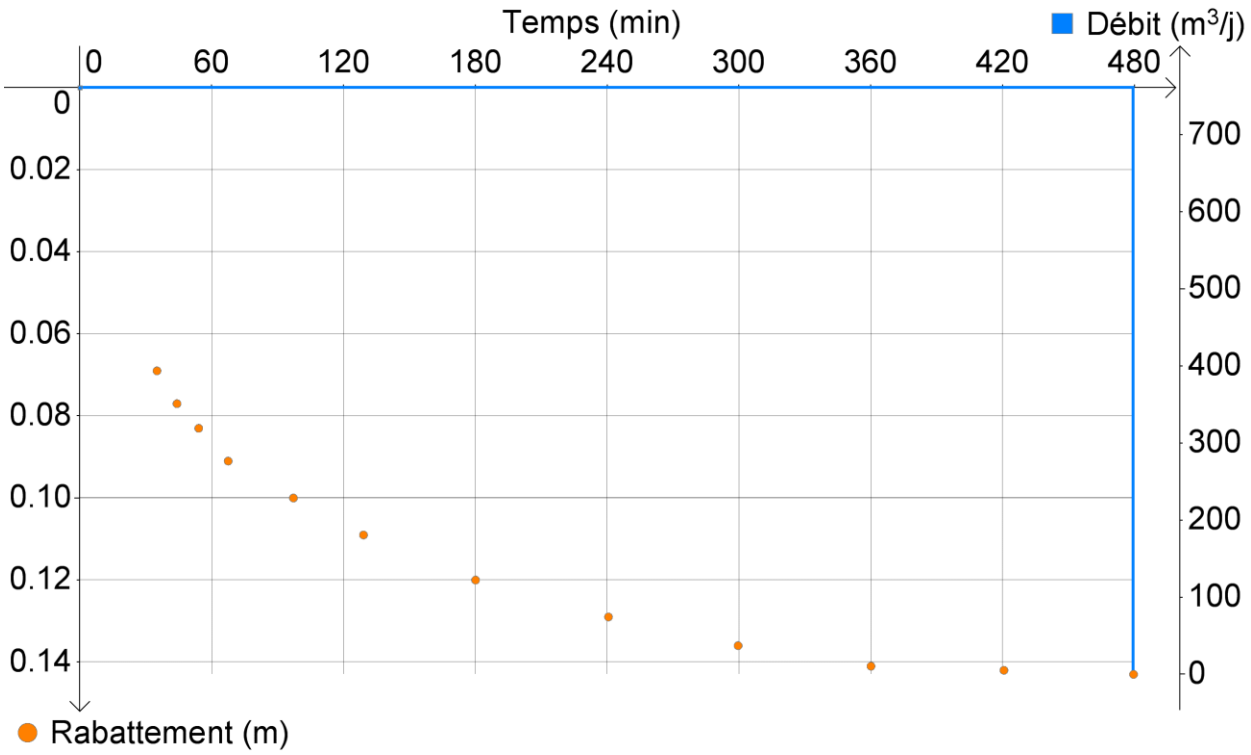


Illustration 115 : Rabattement et débit de pompage

Dans l'onglet « Formule » sélectionnez la solution de Hantush qui permet de tenir compte de l'effet de drainance d'un aquitard sus-jacent (et de la pénétration partielle du puits de pompage ou d'un piézomètre) puis cliquez sur « Ajouter une courbe avec cette formule » pour interpréter l'essai avec cette solution.

L'onglet « Paramètres » devient actif, cliquer dessus. La page affiche les différents paramètres de la solution analytique sélectionnée. Initialiser les paramètres pour afficher la courbe simulée :

- Transmissivité T : $1x10^{-3}$ m²/s
- Coefficient d'emmagasinement S : $1x10^{-3}$
- Distance puits de pompage – point d'observation r : 90 m
- Drainance, cliquer sur le « + » pour afficher les paramètres qui permettent de calculer le facteur de drainance, $L = \sqrt{\frac{T*e'}{K'}}$ (m) :
    - Soit e' l'épaisseur de l'aquitard, e =1 m
    - Soit K', la perméabilité de l'aquitard, K'= $1x10^{-8}$ m/s
    - Soit L= 316.20 m

Ajuster successivement la transmissivité, puis le coefficient d'emmagasinement pour reproduire l'allure de la courbe, puis ajuster la perméabilité de l'aquitard. Il est possible de faire varier directement le facteur de drainance. Soit les paramètres finaux et le résultat du calage à l'Illustration 116 :

- T = $1.92x10^{-2}$ m²/s.
- S = $1.79x10^{-3}$.

- L = 733.33 m
  - e’ = 1 m
  - K’ = 5.1x10^{-8} m/s

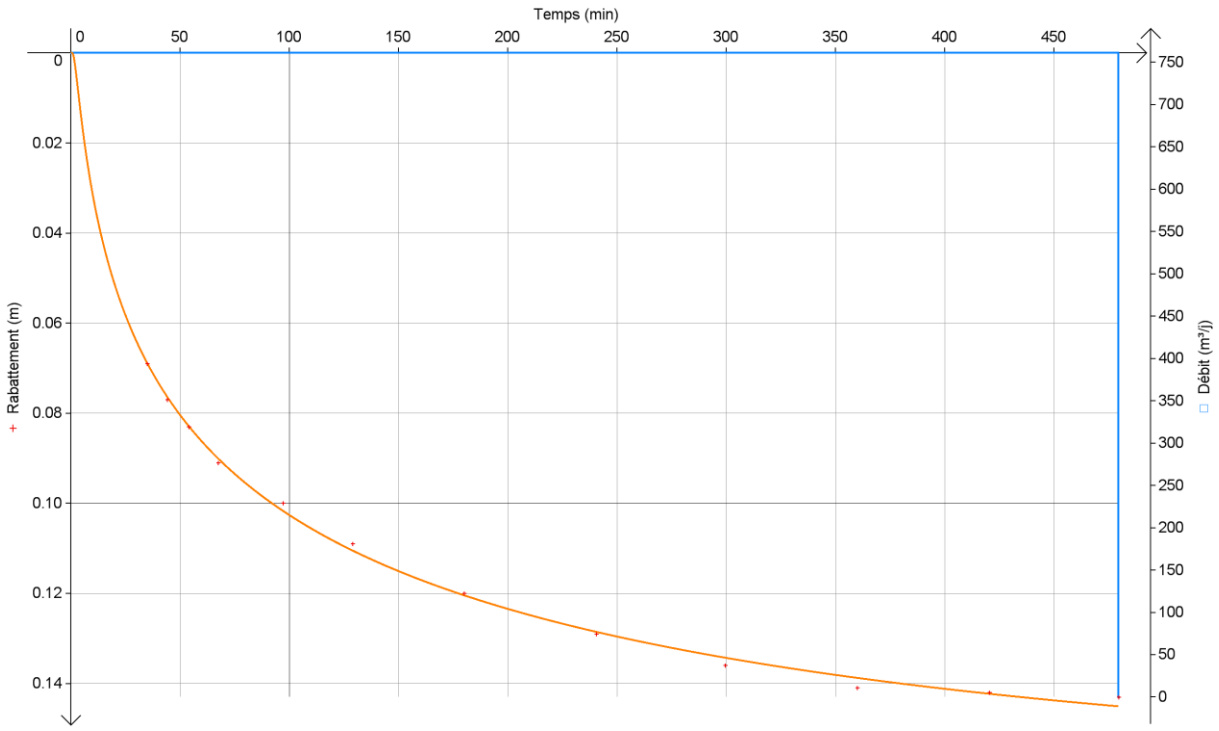


Illustration 116 : Ajustement de la solution analytique de Hantush aux données expérimentales

5.2.4. Tutoriel n°8 - Solution de Gringarten-Witherspoon (1972)

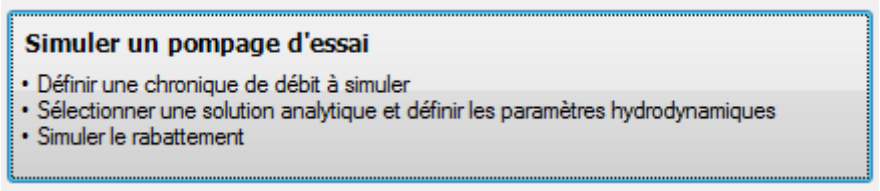
Le tutoriel n°8 sur la solution de Gringarten-Witherspoon n’est pas implémenté dans ce manuel, il sera intégré dans une prochaine version de OUAIP.

Le lecteur peut toutefois se référer au rapport BRGM dont l’exemple d’interprétation se réfère :

> Klinka T., Vittecoq B., Arnaud L., Lhotelin M. (2011) Suivi géologique et hydrogéologique de 3 forages de reconnaissance sur le site de Tivoli, Fort de France (Martinique). Rapport BRGM/RP-60339-FR, 105 p., 48 ill., 6 ann. [en ligne]

5.3. SIMULER UN POMPAGE D'ESSAI

OUAIP permet le calcul prévisionnel des rabattements induits par une chronique de pompage quelconque. Le calcul peut être réalisé selon une ou plusieurs solutions analytiques ainsi qu'en fonction des effets additionnels (au puits, aux piézomètres, au droit de l'aquifère) pouvant impacter la réponse du milieu. En général, les paramètres utilisés pour la simulation sont ceux issus de l'essai de puits pour ce qui concerne la performance de l'ouvrage et de l'essai de nappe pour les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère.



Deux exemples sont proposés ci-après, le premier correspond à une simulation prévisionnelle des rabattements, le second consiste à utiliser la fonction d'optimisation afin de respecter un critère de rabattement maximum.

5.3.1. Tutoriel n°9 - Simulation de l'exploitation des eaux souterraines

Contexte

L'exemple utilisé pour ce tutoriel est tiré du rapport public :

- « Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des alluvions de la Gravone sur le site de Piataniccia, Corse du sud ». Ce document est disponible au téléchargement au format PDF sur InfoTerre, code ISBN/ISRN : BRGM/RP-60905-FR.

On propose de simuler un scénario d'exploitation d'un forage AEP dont on a préalablement évalué les caractéristiques par un essai de puits et un essai de nappe.

Le scénario à simuler concerne l'exploitation d'un ouvrage (F1). Ce scénario consiste à estimer le débit d'exploitation sur le forage F1 hors période de pointe où la production est de l'ordre de 1000 m^3/j, les prélèvements sont répartis 12h/j sur une durée de 10 jours consécutifs. Plusieurs débits d'exploitation ont été testés parmi lesquels 60, 80 et 100 et 120 m^3/h (respectivement 720, 960, 1200 et 1440 m^3/j) avec trois cas de figure :

- soit une limite d'alimentation (rivière),
- soit une limite d'alimentation (rivière) et une limite étanche (limite de l'aquifère),
- soit une limite étanche (limite de l'aquifère).

Les rabattements simulés intègrent les pertes de charge quadratiques déduites de l'essai de puits (résultats présentés à l'Illustration 90).

Simulation

Lancer OUAIP et sélectionner « Simuler un pompage d'essai ». La partie gauche de l'interface est dédiée à la saisie des données d'entrée, elle est constituée de quatre onglets s'utilisant progressivement de la gauche vers la droite (Figure 1) :

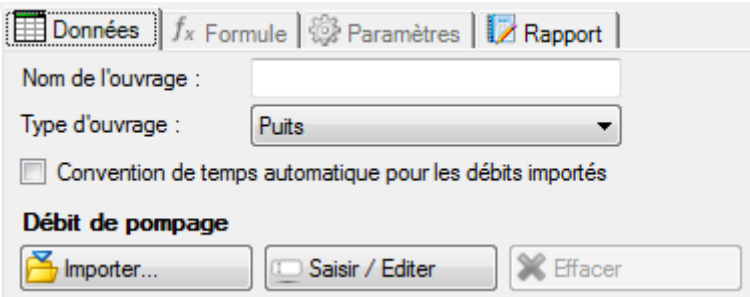


Figure 1 : Onglets du mode simulation

Dans l'onglet « Données » :

- Définir le nom de l'ouvrage suivi « F1 ».
- Dans « Type d'ouvrage », sélectionner le type d'ouvrage pour la simulation « Puits ».
- Cliquer sur « Saisir / Éditer » pour générer la chronique des débits de pompage (Illustration 117) :

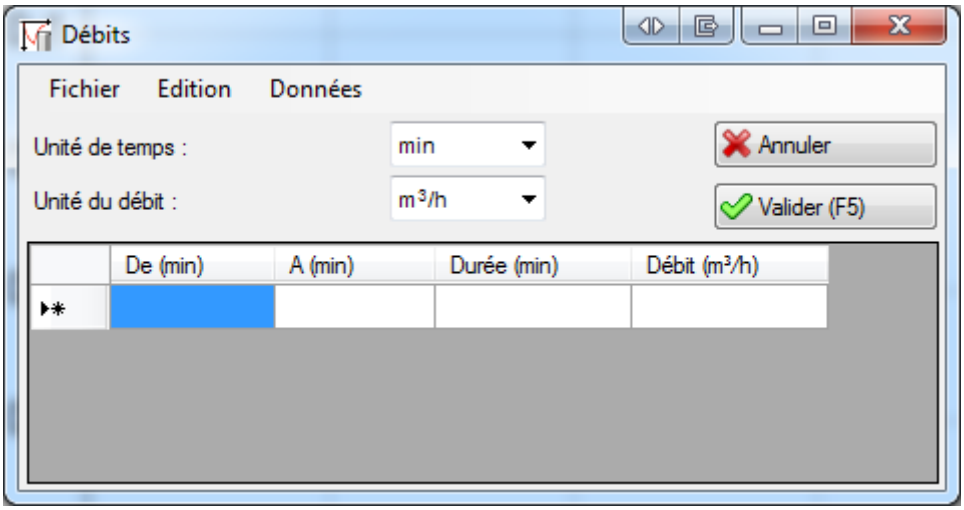


Illustration 117 : Saisir / Éditer les débits de pompage

- Définir les unités de temps (j pour jours) et de débit (m^3/h).
- Pour définir la chronique d'exploitation, 12 h de pompage par jour, pendant 10 jours, nous allons définir un modèle de chronique puis le répéter autant de fois que nécessaire.
- Pour la première ligne, saisir De 0 A 0.5 j (noter que la durée est automatiquement complétée de la différence de temps entre De et A et le débit correspondant 60 m^3/h.
- Pour la deuxième ligne, nous simulons l'arrêt du pompage pendant 12h, saisir De 0.5 A 1 j, débit 0 m^3/h (Illustration 117).

- Si une troisième ligne s'incrémente automatiquement, la sélectionner et la supprimer. Une fois ces deux paliers définis (2 lignes), **sélectionner** ces deux lignes, puis, dans le menu « Edition », cliquer sur « Répéter la sélection en incrémentant n fois », une fenêtre s'affiche demandant le nombre de répétition (Illustration 120), définir 9 puis cliquer sur OK.

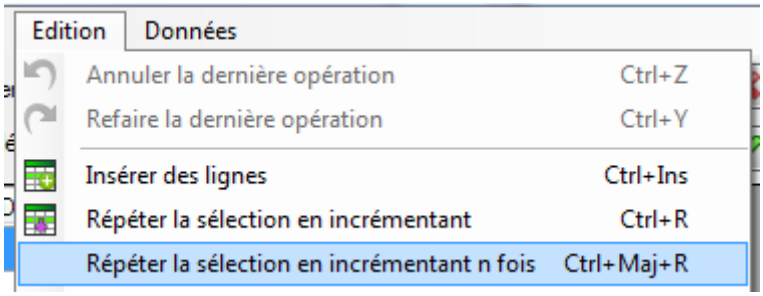


Illustration 118 : Menu Edition – Répéter la sélection en incrémentant n fois

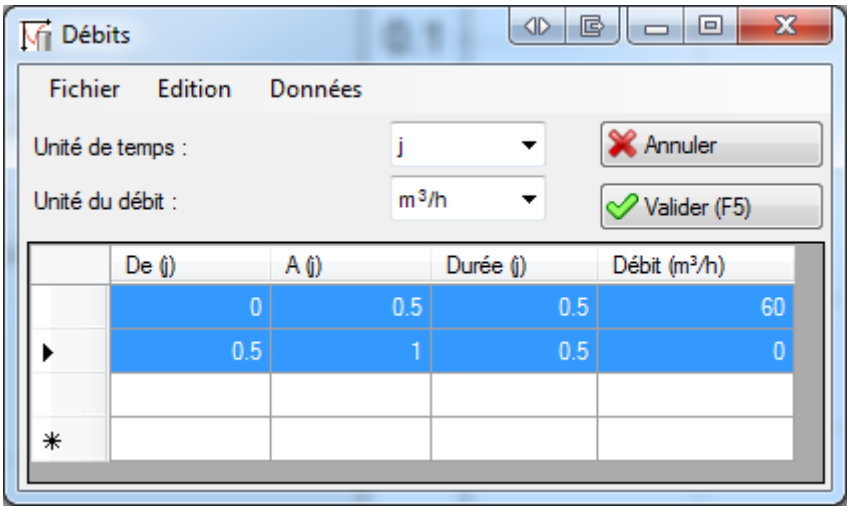


Illustration 119 : Paliers de débit

- Noter que le tableau des débits a été complété 9 fois sur la base du modèle sélectionné. Cliquer sur « Valider » et vérifier la chronique de pompage générée sur le graphique (Illustration 121 et Illustration 122).

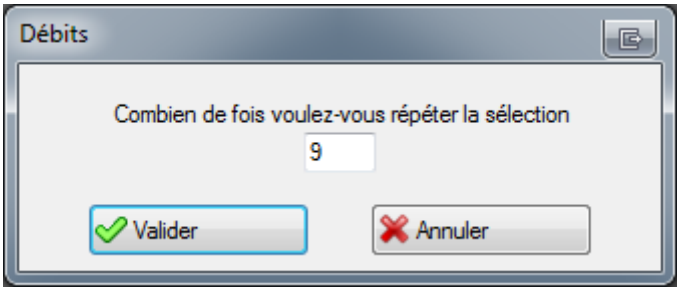
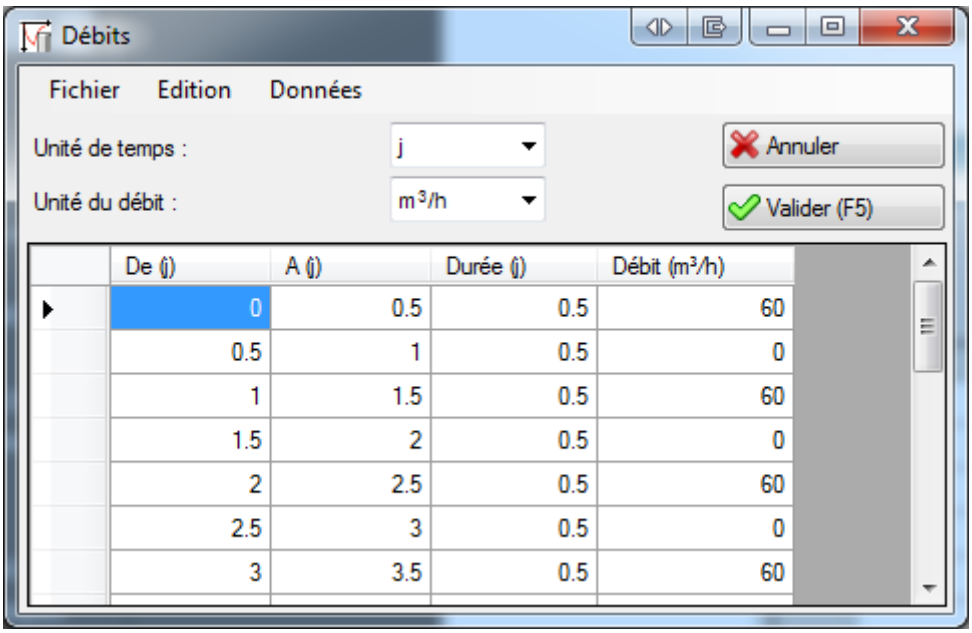


Illustration 120 : Répéter les paliers de débit



De (j)	A (j)	Durée (j)	Débit (m³/h)
0	0.5	0.5	60
0.5	1	0.5	0
1	1.5	0.5	60
1.5	2	0.5	0
2	2.5	0.5	60
2.5	3	0.5	0
3	3.5	0.5	60

Illustration 121 : Chronique de pompage générée

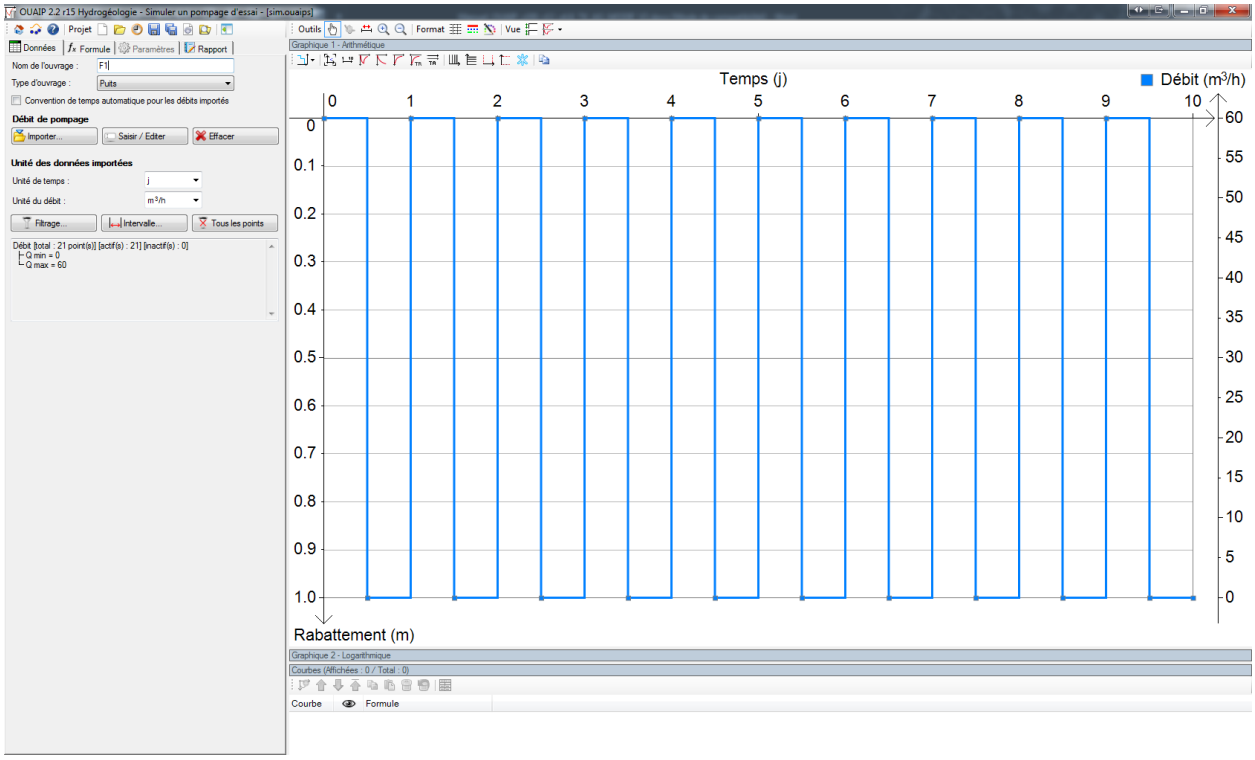


Illustration 122 : Visualisation de la chronique de pompage

Une fois la chronique de débit construite, cliquer sur l'onglet « Formule », sélectionner la solution analytique de « Theis ».

Définir les paramètres hydrodynamiques :

- Transmissivité : 7.95×10^{-3} m²/s
- Coefficient d'emmagasinement : 4.79×10^{-2}
- Rayon de l'ouvrage : 0.1 m

Une fois les paramètres saisis, la courbe simulée s'affiche. Sous les paramètres cocher :

- Pertes de charge quadratiques : 1 741 s^2/m^5
- Effet de limite :
    - Alimentée : distance 60 m

Ajouter une courbe et modifier l'actuelle limite alimentée en limite étanche en conservant la même distance.

Ajouter une autre courbe en définissant une limite étanche et une limite alimentée (distantes toutes les deux de 60 m). Le graphique actuel présente l'évolution des courbes de rabattement selon 3 contextes, avec limite alimentée, limite étanche avec ces deux limites équidistantes de part et d'autres de l'ouvrage (Illustration 123).

Le rabattement maximum est de l'ordre de 3.35 m après 10 jours de pompage à 60 m^3/h 12h/24 en considérant une limite étanche à 60 m du puits de pompage.

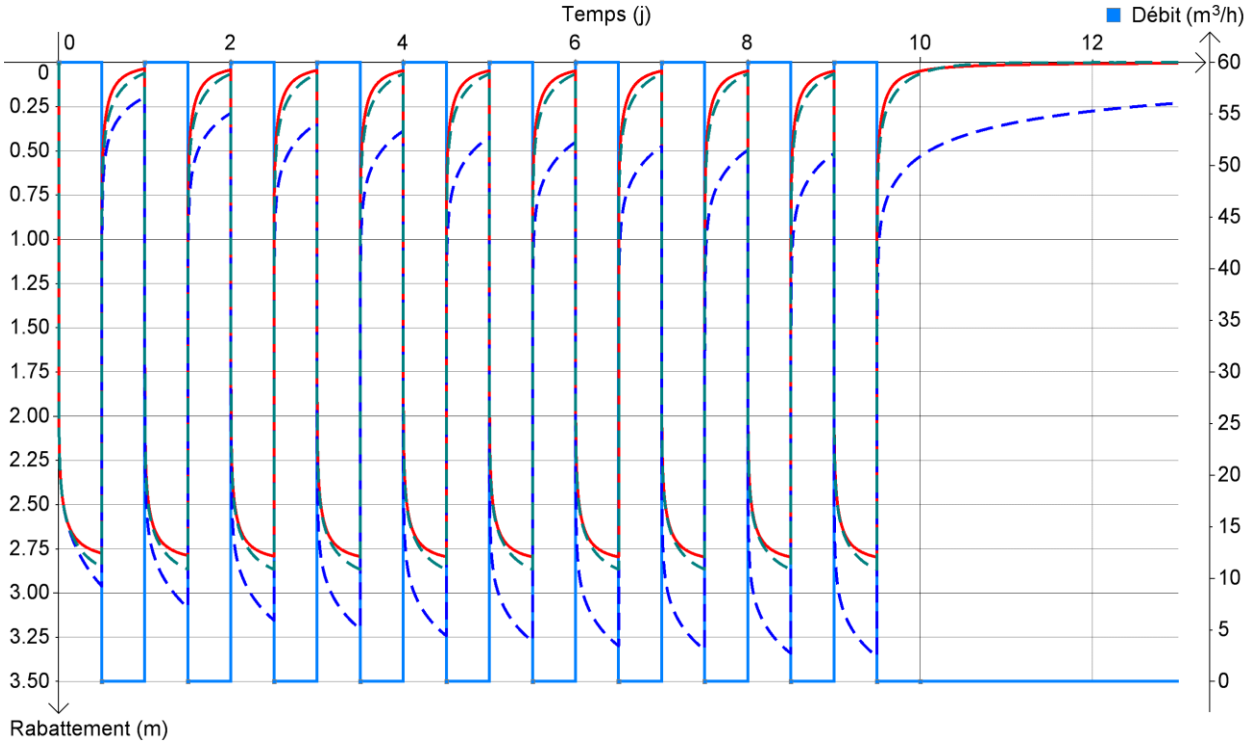


Illustration 123 : Évolution des rabattements simulés en fonction de différentes configurations de l'aquifère

Il est possible d'exporter les valeurs numériques de la courbe actuellement sélectionnée en cliquant sur l'icône dans la barre d'outils Courbes, dans la partie inférieure de l'interface. Définir les bornes en temps de l'export, de 0 à 20 jours, l'incrément 0.05 j, puis cliquer sur calculer. Pour exporter ces données utiliser soit le bouton « Copier tout » et coller les valeurs dans un tableur ou bien exporter sous forme d'un fichier *.csv (Illustration 124).

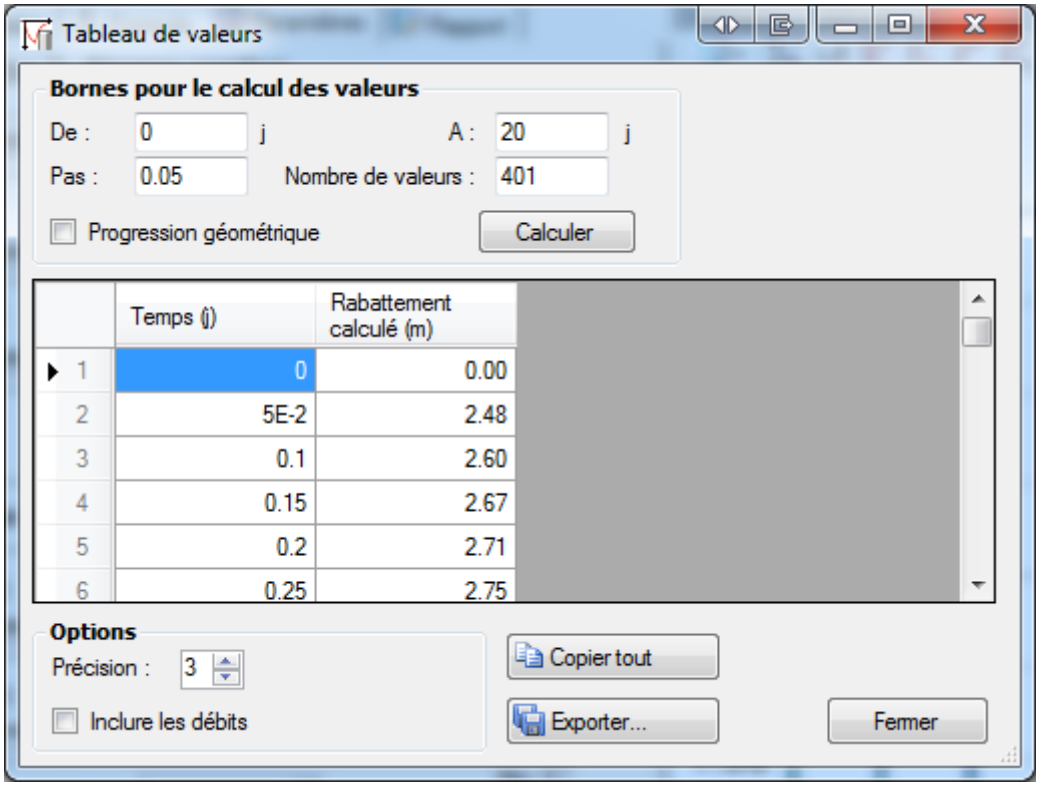


Illustration 124 : Tableau de valeurs

Sauvegardez votre projet OUAIP. Par défaut, l'extension du fichier OUAIP est *.ouaip**s** (« **s** » pour « **s**imulation »).

Vous pouvez vous exercer sur les autres scénarios de simulations mises en œuvre dans le rapport (débit : 80, 100 et 120 m^3/h, durée : 16h/24 en modulant les débits de prélèvement afin de respecter le volume désiré, la distance des conditions aux limites).

Il est également possible de simuler le rabattement induit par le pompage dans un piézomètre de surveillance distance de 20 mètres du puits de pompage par exemple.

5.3.2. Tutoriel n°10 - Optimisation du débit de pompage sous contrainte de rabattement

Simuler un pompage 12h/j pendant 1 an, avec optimisation du débit

L'exemple utilisé pour ce tutoriel est tiré du rapport public :

- « Prospection hydrogéologique du socle fracturé du Bourg de Roura, Guyane (décembre 2017). ». Ce document est disponible au téléchargement au format PDF sur InfoTerre, code ISBN/ISRN : BRGM/RP-67440-FR.

La partie concernant les pompages d'essai se trouve de la page 53 à la page 83 (pagination du rapport).

À la suite d'un essai de puits et d'un essai de nappe, plusieurs scénarios (page 82) d'exploitation du forage ont été testés. Ce tutoriel consiste à estimer le débit d'exploitation du forage ROU1 dans le cas d'une utilisation de l'aquifère, 20h/j sur une durée de 30 jours consécutifs. Le débit d'exploitation recherché consiste à respecter le rabattement maximum admissible de 33 m.

Démarrer OUAIP en mode simulation, saisir le nom de l'ouvrage « ROU1 », choisir « Puits » comme type d'ouvrage. Puis définir la chronique de pompage via « Saisir / Editer » :

- Modifier l'unité de temps (heure) et vérifier l'unité de débit (m^3/h).
- Sur la première ligne saisir : De 0 (h) à 20 (h), la durée s'incrémente automatiquement, débit 10 (m^3/h)
- Sur la deuxième ligne : De 20 (h) A 24 (h), on simule l'arrêt du pompage 0 (m^3/h).
- Si une troisième ligne s'affiche automatiquement, la supprimer après l'avoir sélectionnée.
- Sélectionner les deux premières lignes puis dans le menu « Edition » choisir « Répéter la sélection en incrémentant n fois », la valeur de répétition est 29 (afin de totaliser 30 cycles de pompage, soit 30 jours).
- Enfin, pour faciliter la lecture du graphique, cliquer droit sur le graphique, « Graphique », dans l'onglet « Général », choisir l'unité d'affichage du temps « j » pour jours.
- Dans l'onglet Axe X, définir un pas des graduations de 5 j.

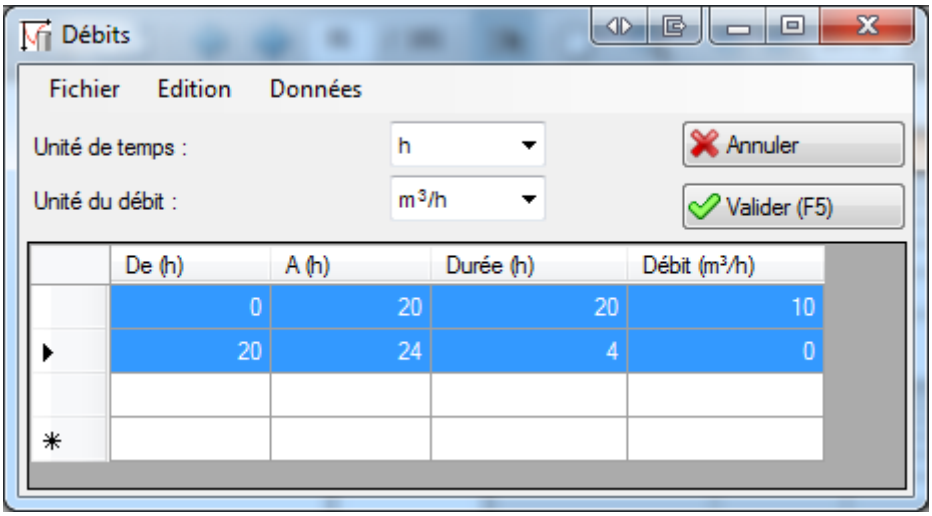


Illustration 125 : Saisie du motif de débit à répéter pour constituer la chronique de pompage de 30 jorus

Dans l'onglet Formule :

- Choisir la solution de Theis

Dans l'onglet Paramètres :

- T (m^2/s) = 3.87×10^{-5}
- S (-) = 1.42×10^{-3}
- r (m) = 0.11 (rayon du puits)
- Ajouter le coefficient des pertes de charges quadratiques C (s^2/m^5) =1.85×10^6.

Lorsque ces paramètres ont été saisis, le rabattement simulé s'affiche, il est au maximum de l'ordre de 90 m. Nous recherchons le débit de pompage qui satisfait un rabattement maximum de 33 m. Il s'agit d'une fraction de ce débit.

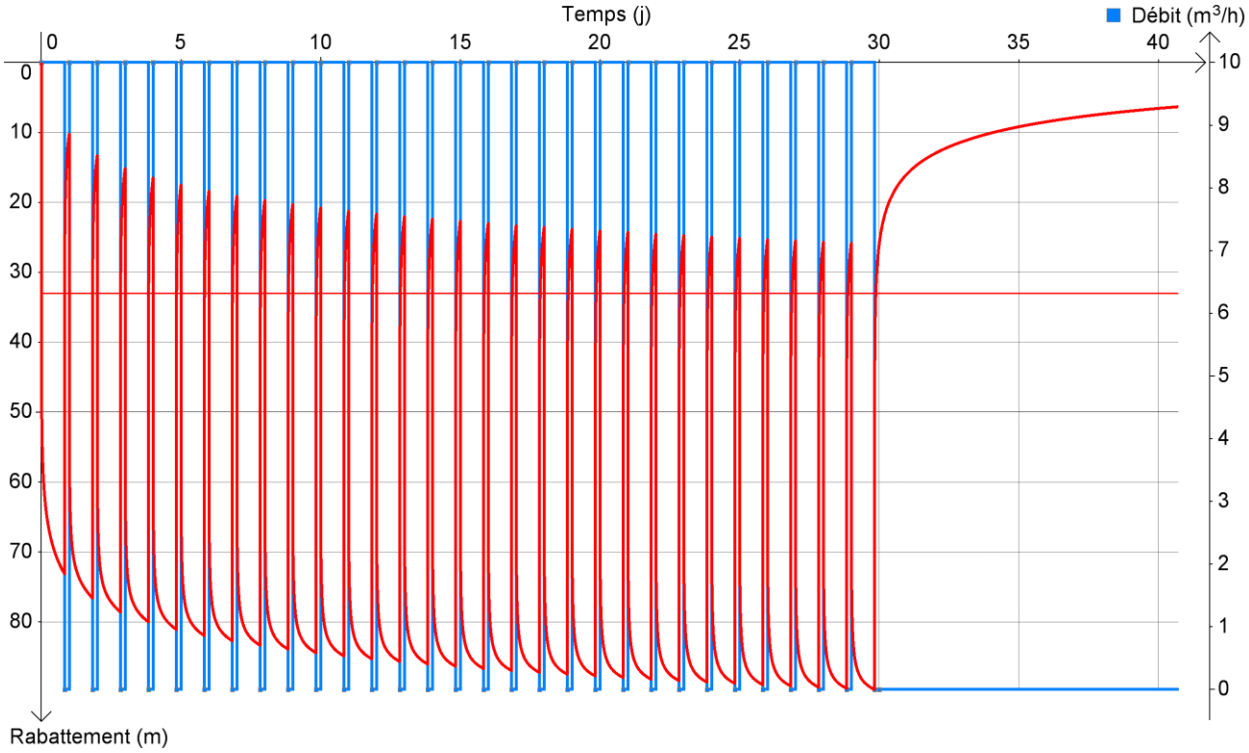


Illustration 126 : Cycles de pompages, rabattement simulé et rabattement maximal souhaité (ligne rouge horitonzale à s=33 m)

Pour identifier ce débit, cocher la case « Optimisation du débit » sous les paramètres hydrodynamiques et les effets additionnels :

- s_{max} (m) correspond au rabattement à atteindre (ou ne pas dépasser) : saisir 33.
- Cliquer ensuite sur le bouton « Optimiser le débit », le programme affiche dans la case pourcentage du débit à conserver (%Q) la valeur de 37 %. Afin d'atteindre un rabattement maximal de 33 m, il faut conserver 33 % du débit défini initialement (soit une réduction du débit de 63 %). Pour appliquer ce changement de manière définitive à la chronique de pompage, cliquer sur « Appliquer ».
- Il est aussi possible de faire varier %Q (par défaut de 1 à 200 %) pour mesurer instantanément l'impact de la variation de débit, qu'elle soit à l'augmentation ou à la diminution, sur le rabattement.
- Le processus d'optimisation fonctionne aussi dans le sens où l'on souhaite que le pompage induise un rabattement minimum, tant sur un puits, que sur un piézomètre à distance du puits de pompage.

Si l'on retourne dans l'onglet « Données », dans « Saisir / Editer », on constate la nouvelle valeur du débit de 3.68 m^3/h correspond à une réduction de 63 % du débit défini initialement (10 m^3/h), Illustration 127.

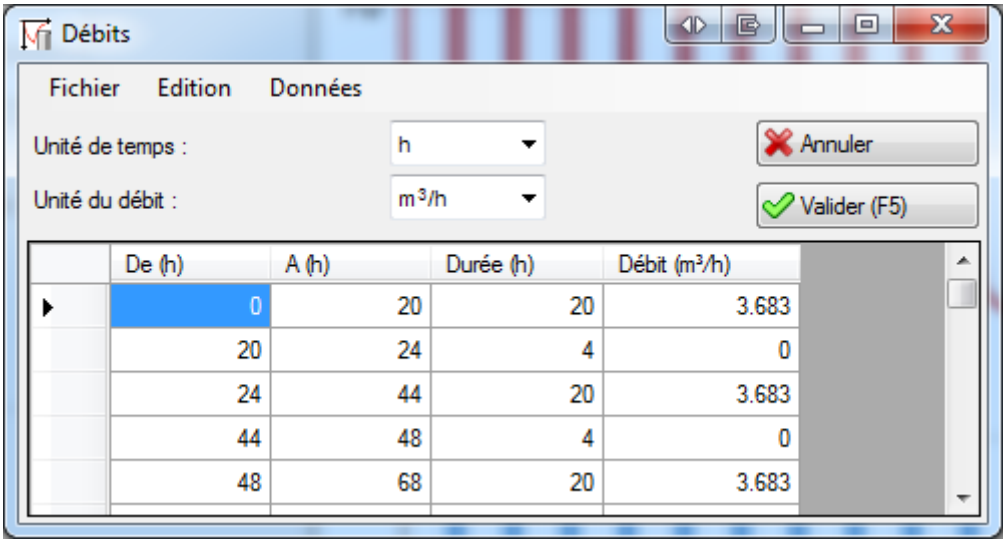


Illustration 127 : Application de l'optimisation du débit

6. Conclusion et perspectives

Le logiciel OUAIP, Outil d'Aide à l'Interprétation des Pompages d'essai, continue d'évoluer depuis sa première version distribuée gratuitement en mai 2013. Fin 2019 il est utilisé par plus de 4500 utilisateurs en France et à l'étranger. Dans cette nouvelle version, le logiciel propose l'interprétation comparée des essais de puits, une amélioration de l'interface graphique, la gestion étendue des unités. L'édition des rapports d'interprétation ou de simulation a été perfectionnée. La procédure d'enregistrement a été simplifiée.

Les solutions analytiques telles que celles implémentées dans OUAIP[1] sont complémentaires des modèles numériques des écoulements souterrains. Au niveau de grands bassins versants où sont présents de nombreux forages d'exploitation, l'utilisation de modèles numériques maillés permet de prendre en compte des aspects plus complexes de la réalité que ne le peuvent les solutions analytiques : géométrie des cours d'eau, géométrie des aquifères, occupation des sols, modalités de recharge des aquifères, etc., et d'évaluer les phénomènes de transport de polluants.

Toutefois, l'utilisation de solutions analytiques sur ces secteurs reste primordiale car d'une part elle permet de caractériser les propriétés des aquifères qui alimenteront par la suite la modélisation numérique, et d'autre part, car ces solutions peuvent servir à réaliser une première estimation de ces impacts (cartes d'incidence des pompages sur d'autres ouvrages d'exploitation par exemple). À plus petite échelle, au niveau d'un captage ou d'un champ captant, les données sont la plupart du temps insuffisantes pour permettre l'élaboration d'un modèle numérique maillé, laissant alors place aux solutions analytiques tant pour l'estimation des débits d'exploitation des ouvrages que pour celle des éventuels impacts quantitatifs sur les eaux souterraines. Ainsi, que ce soit à l'échelle d'un ouvrage ou à l'échelle d'un grand bassin versant, l'utilisation de ces solutions est largement répandue. (Dewandel B., 2018).

Ce manuel utilisateur de OUAIP v2 regroupe et recense les diverses fonctionnalités actuellement existantes dans le logiciel. Sa **traduction en anglais** achevée en 2019 participera à favoriser sa diffusion et son utilisation à l'étranger.

L'objectif de l'outil demeure invariable : **améliorer l'interprétation** qui découle de la réalisation des différents types d'essais (essai de puits, essai de nappe), afin de **mieux caractériser les eaux souterraines** et simuler l'évolution du niveau piézométrique dans les aquifères. Les futures évolutions du logiciel sont multiples.

Une version intégrant un module d'impact des pompages en nappe sur un cours d'eau implémentera une dizaine de nouvelles solutions analytiques permettant à l'hydrogéologue praticien de se familiariser avec les **problèmes d'échanges « rivière-nappe »** au cours d'un pompage et de mettre à sa disposition une série de solutions adaptées permettant un calcul des débits soustraits à la rivière ou de façon plus générale aux eaux de surface.

Une version dédiée à la **géothermie**, afin de tenir compte des propriétés de l'eau à haute température, la viscosité du fluide, sa pression, sa salinité, la possibilité de travailler en pression et d'évaluer la perméabilité intrinsèque du réservoir est à l'étude.

[1] Voir aussi l'offre logicielle du BRGM sur http://www.brgm.fr/logiciels qui contient d'autres outils basés sur des solutions analytiques tels que **TRAC** pour l'interprétation des traçages ou **Conexmin**.

Une version intégrant le **diagnostic** des essais de nappe, basé sur **l'analyse de la dérivée** des rabattements et permettant par comparaison aux courbes types proposées d'identifier le modèle analytique le plus approprié, et donc de faire une meilleure estimation des paramètres hydrodynamiques est en cours de validation.

De **nouvelles solutions analytiques** (milieux à doubles porosité notamment) pourront être implémentées afin d'enrichir les interprétations répondant à ces cas particuliers.

Les utilisateurs peuvent également faire connaître leurs besoins ou leurs remarques quant à l'utilisation de OUAIP à l'adresse : ouaip@brgm.fr

7. Bibliographie

AFNOR (2014) Forage d'eau et de géothermie Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages. NF-X-10-999 ; 30 Août 2014.

Bourdarot G., (1996), Essais de puits : Méthodes d'interprétation, édition Technip, 350p.

Bourdet, D., (2002). Well Test Analysis: The Use of Advanced Interpretation Models, Elsevier, New York, 426p.

Bierschenk, W. H. 1963. Determining well efficiency by multiple step-drawdown tests. International. Association of Scientific Hydrology 64: 493-507

Cotinet R., Klinka T., Mathieu F. et Brisset N, avec la collaboration de Joseph B., Bechelen L., Ouerghi Y. (2017) – Prospection hydrogéologique du socle fracturé du Bourg de Roura. Résultats de la campagne de sondages. Rapport de fin de travaux. BRGM/RP-67440-FR, 78 p., 58 ill., 17 tab., 8 ann.

Dewandel B. (2018) – Méthodes analytiques d'estimation de l'impact quantitatif d'un prélèvement en nappe sur un cours d'eau – Problématique et solutions mathématiques. Rapport final. BRGM/RP-67566-FR, 106 p., 43 fig., 2 tabl., 1 ann.

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

Hantush, M.S., 1961. Aquifer tests on partially penetrating wells, Jour. of the Hyd. Div., Proc. of the Am. Soc. of Civil

Hantush, M.S., 1964. Hydraulics of wells, in: Advances in Hydroscience, V.T. Chow (editor), Academic Press, New York,

Jacob, C.E., 1947. Drawdown test to determine effective radius of artesian well, Trans. Amer. Soc. of Civil Engrs., vol. 112, paper 2321, pp. 1047-1064.

Klinka T., Genevier M., 2012. Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des alluvions de la Gravone sur le site de Piataniccia, Corse du sud. Rapport BRGM/RP-60905-FR .36 ill., 3 ann.

Kruseman, G.P.& de Ridder, N.A. (1990). Analysis and evaluation of pumping test data. Publication Series no 47.

Leblanc Philippe (1987). Utilisation des données de pompage d'essai pour la connaissance de la structure et des propriétés hydrodynamiques des milieux fracturés. Élaboration d'un logiciel d'interprétation. Thèse de l'Université de Bordeaux III.

Papadopulos, I.S. and H.H. Cooper, 1967. Drawdown in a well of large diameter, Water Resources Research, vol. 3, no. 1, pp. 241-244.

Renard, P., Glenz, D. and M. Mejias, 2009. Understanding diagnostic plots for well-test interpretation, Hydrogeology Journal, vol. 17, pp. 589-600, doi:10.1007/s10040-008-0392-0.

Rorabaugh, M.J. 1953. Graphical and theoretical analysis of drawdown step-test of artesian well. ASCE Proc., 79, 362 :23.

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, pp. 519-524

Theis, C.V., and Brown, R.H.,(1954) Drawdown in wells responding to cyclic pumping. U.S. Geol. Surv. Ground Water Note 23

Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement et Ecotechnologies
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr