### 6 ETUDE DE SENSIBILITÉ

La sensibilité est étudiée sur les différents paramètres d'entrée du modèle, à savoir :

- l'infiltration;
- la conductivité hydraulique ;
- les débits de prélèvement par pompage (historique) ;
- les niveaux d'eau imposés au droit des rivières ;
- la porosité;
- le coefficient d'emmagasinement ;
- les débits de prélèvement par pompage (fictif).

L'impact d'une variation imposée sur les quatre premiers paramètres listés ci-dessus est étudié en régime permanent. L'impact d'une variation imposée sur les trois derniers paramètres listés ci-dessus est étudié en régime transitoire.

Les variations imposées aux paramètres sont réalisées dans des gammes de valeurs jugées acceptables. Dans ce cadre, l'évolution de l'indicateur de calibration SRMS est évidemment suivie. Pour rappel, cet indicateur est de 1.26 % pour l'ensemble des piézomètres crépinés dans la *nappe du Landénien* de la zone modélisée dans le cadre de la calibration en régime permanent sur la période de mai 2013.

L'objectif est, à ce stade, de déterminer la sensibilité du modèle vis-à-vis des paramètres d'entrée.

A l'issue de la présente étude de sensibilité, les gammes de variations acceptables pour les différents paramètres pourront être évaluées. L'incertitude sur les différents paramètres d'entrée sera également quantifiée.

### 6.1 INFILTRATION ET CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE

L'influence de la variation de ces paramètres est étudiée en régime permanent sur la période de mai 2013. Sur ces deux paramètres, les coefficients multiplicateurs suivants sont imposés :

- 0.50;
- 0.75;
- 1.00;
- 1.25;
- 1.50.

Ces coefficients sont appliqués sur l'infiltration comme sur la conductivité hydraulique et selon toutes les combinaisons possibles. Dès lors, 25 simulations (5 x 5) sont réalisées. La **FIGURE 6-1** ci-dessous illustre l'évolution de l'indicateur de qualité de la calibration en régime permanent en fonction de l'évolution de l'infiltration et de la conductivité hydraulique. La zone de calibration acceptable est délimitée par la courbe de SRMS à 2.5 %. Les gammes de valeurs pour lesquelles le débit des rivières devient trop élevé ou trop faible sont également identifiées.

Sur cette figure, la zone en vert représente la zone de variation acceptable des paramètres. En dehors de cette zone :



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 6** 

IBGE - HYDROLAND

- soit les niveaux d'eau sont mal reproduits (en progressant vers la droite ou vers la gauche, le SRMS devient trop élevé) ;
- soit les débits sont mal reproduits (en progressant vers le bas ou vers le haut, les débits drainés par les différents exutoires sortent des marges acceptables).

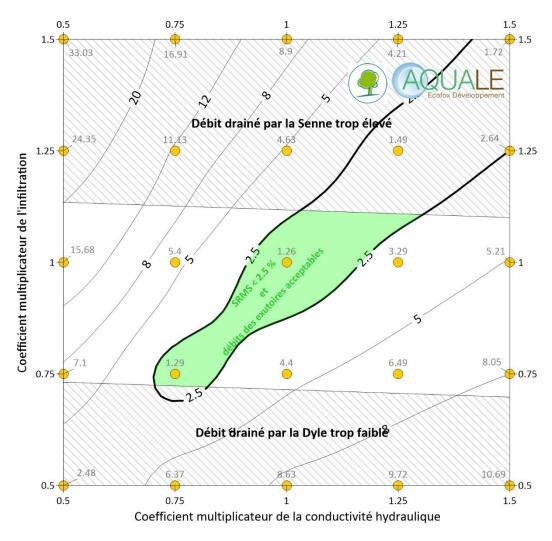


Figure 6-1 : Graphique de l'étude de sensibilité sur l'infiltration et la conductivité hydraulique

Les points jaunes sur cette figure représentent les différentes simulations réalisées dans le cadre de l'étude de sensibilité. Le chiffre grisé juste à côté représente le SRMS de la simulation correspondante. Il apparaît que la simulation de calibration, située au centre (coefficients multiplicateurs égaux à 1 pour les deux paramètres), est bien la simulation qui permet d'obtenir le SRMS le plus bas.

Il apparaît également sur cette figure que l'infiltration imposée au modèle se situe plutôt dans la partie haute des valeurs d'infiltration acceptable. En effet, la zone verte s'étend largement plus vers le bas, soit vers une réduction de l'infiltration.

Il peut être déduit de cette observation que l'infiltration imposée au modèle semble adéquate mais dans la tranche élevée des valeurs acceptables. Cette éventuelle surestimation serait cependant faible et ne peut être



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE		
DU LANDÉNIEN		
Rapport final (phase II)		

**Chapitre 6** 

IBGE - HYDROLAND

confirmée sur la base de l'ensemble des données à disposition. L'infiltration imposée au modèle est le meilleur ajustement possible en tenant compte des données disponibles et du processus de calibration.

Cette figure indique par ailleurs que la conductivité hydraulique imposée au modèle est du bon ordre de grandeur. En effet, à infiltration constante (selon les lignes horizontales 0.75, 1 ou 1.25), il apparaît que le SRMS devient rapidement trop élevé en cas d'augmentation (vers la droite) ou de diminution (vers la gauche) de la conductivité hydraulique.

Le modèle est assez sensible aux variations de ces paramètres et il conviendra d'évaluer l'incertitude sur les résultats liés à l'incertitude sur ces paramètres.

### 6.2 DÉBITS PRÉLEVÉS PAR POMPAGE (HISTORIQUE)

L'influence des débits prélevés par pompage devrait être plus faible d'un point de vue régional compte tenu du débit relativement faible prélevé par les puits. Toutefois, étant donné que l'aquifère est caractérisé par des conductivités hydrauliques relativement faibles (pour un aquifère), l'influence des puits peut avoir une certaine importance.

Localement, il est clair que les débits prélevés par pompage ont une influence importante sur le niveau de la nappe. Le modèle hydrogéologique n'a cependant pas été calibré pour représenter correctement ces effets locaux, compte tenu des nombreuses inconnues subsistant sur les débits prélevés et du caractère régional du modèle.

A titre indicatif, des simulations sont réalisées en considérant une variation de l'ensemble des débits prélevés par les points de pompage au sein de la *nappe du Landénien*. Les coefficients multiplicateurs suivants sont imposés :

- 0.3;
- 0.6;
- 2.0;
- 3.0.

L'impact sur les niveaux d'eau simulés et sur le SRMS est observé.

Le TABLEAU 6-1 ci-dessous reprend les SRMS calculés dans les différents cas de figure.

Cas	SRMS (%)
Débits x 0.3	2.47
Débits x 0.6	1.84
Référence	1.26
Débits x 2.0	2.48
Débits x 3.0	4.88

Tableau 6-1 : Sensibilité du modèle vis-à-vis des débits prélevés par pompage

Il apparaît que le SRMS est faiblement impacté en cas de diminution des débits prélevés. Cela est lié au fait que les débits mis en jeu sont faibles dans les zones couvertes par les piézomètres de références (et donc qui



REALISATION D'UNE ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE
DU LANDÉNIEN
Rapport final (phase II)

influencent le SRMS) et perturbent assez peu la calibration. L'impact est plus important pour les deux dernières simulations puisque la modification de débit prélevé est plus importante.

Les FIGURES 6-2 à 6-5 illustrent l'impact à la baisse ou à la hausse sur le niveau de la nappe étudiée.

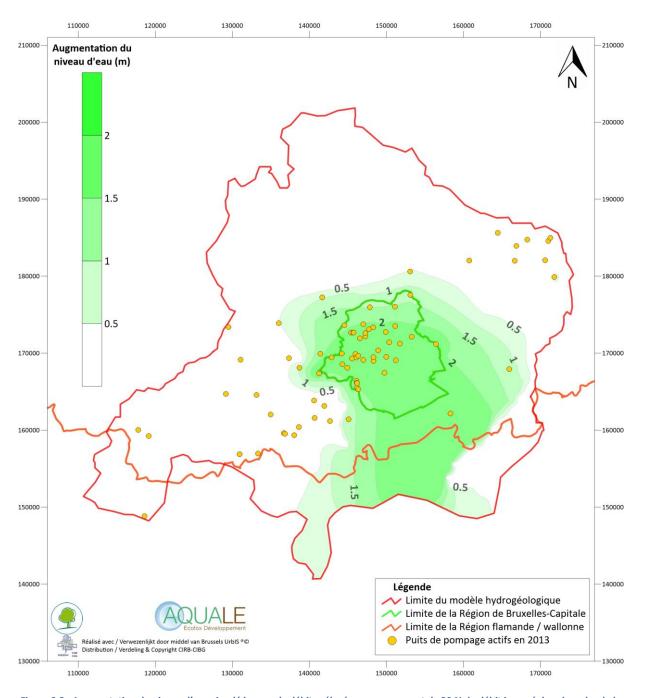


Figure 6-2 : Augmentation du niveau d'eau simulé lorsque le débit prélevé par pompage est de 30 % du débit imposé dans le cadre de la calibration en régime permanent



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

IBGE - HYDROLAND R-2016-043 DECEMBRE 2016

Page 137

**Chapitre 6** 

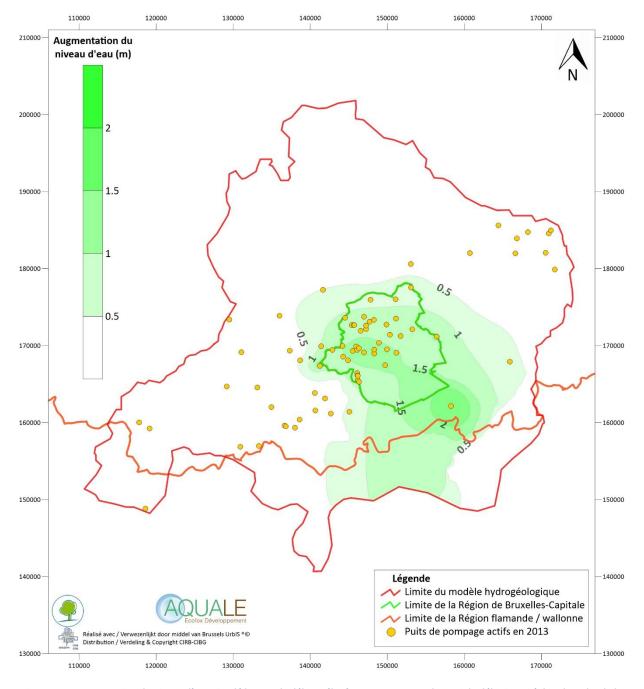


Figure 6-3 : Augmentation du niveau d'eau simulé lorsque le débit prélevé par pompage est de 60 % du débit imposé dans le cadre de la calibration en régime permanent



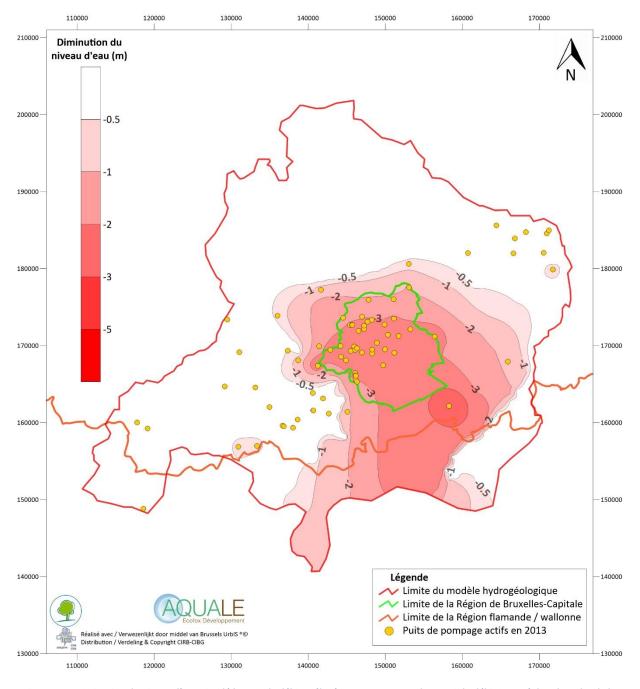


Figure 6-4 : Diminution du niveau d'eau simulé lorsque le débit prélevé par pompage est de 200 % du débit imposé dans le cadre de la calibration en régime permanent



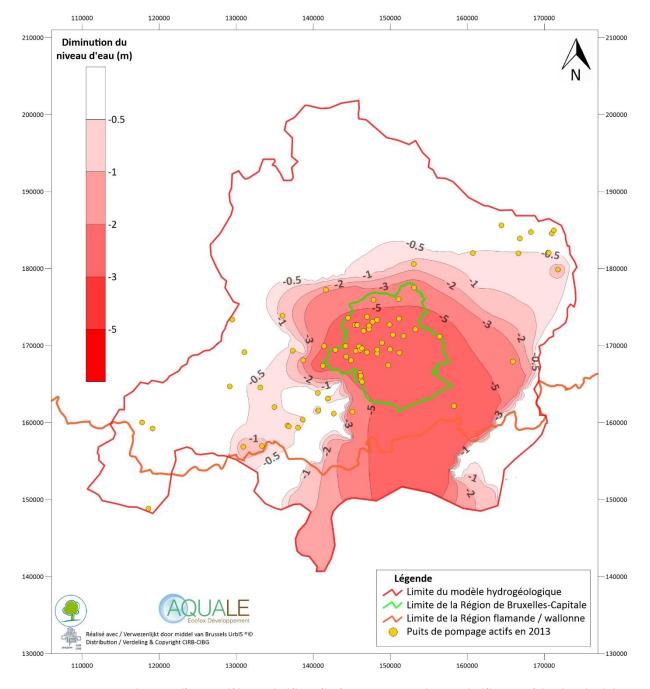


Figure 6-5 : Diminution du niveau d'eau simulé lorsque le débit prélevé par pompage est de 300 % du débit imposé dans le cadre de la calibration en régime permanent

Ces figures illustrent également l'impact plus important pour les deux dernières simulations. Cet impact est visible dans la partie Est du modèle, y inclus l'ensemble de la Région de Bruxelles-Capitale, là où des puits de pompage à débit élevé sont présents.

La sensibilité du modèle vis-à-vis des débits de prélèvement par pompage est plus faible que vis-à-vis de l'infiltration et de la conductivité hydraulique mais elle ne peut être considérée comme négligeable. Cela est lié au fait que la conductivité hydraulique qui caractérise l'aquifère est relativement faible en certains endroits.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

IBGE - HYDROLAND R-2016-043 DECEMBRE 2016

Page 140

**Chapitre 6** 

Localement, l'impact peut être très élevé. Une augmentation du débit de prélèvement dans les puits voire l'ajout de nouveaux puits aura un effet potentiellement important.

## 6.3 NIVEAUX D'EAU IMPOSÉS AU DROIT DES RIVIÈRES

Le niveau d'eau des rivières est connu avec une précision variable en fonction du contexte (rivière couverte ou à ciel ouvert), de l'encaissement propre de la rivière par rapport à la topographie environnante...

Des simulations sont réalisées en considérant une variation de l'ensemble des niveaux d'eau imposés au droit des rivières. Ces niveaux sont modifiés selon le protocole suivant :

- - 2 m;
- - 1 m;
- + 1 m;
- + 2 m.

Diminuer un niveau d'eau imposé revient à diminuer la hauteur absolue d'un exutoire. A l'inverse, augmenter un niveau d'eau imposé revient à augmenter la hauteur absolue d'un exutoire.

L'impact sur les niveaux d'eau simulés, les débits drainés par ces rivières ainsi que sur le SRMS est observé.

Le **TABLEAU 6-2** ci-dessous reprend les SRMS calculés dans les différents cas de figure. Il reprend aussi le débit drainé par la Senne en amont de Lot, indicateur de la qualité de la calibration à proximité de la Région de Bruxelles-Capitale.

Cas	SRMS (%)	Débit drainé par la Senne en amont de Lot (m³/j) [3 100 – 31 000 m³/j]
NEI - 2 m	1.37	28 000
NEI - 1 m	1.30	28 000
Référence	1.26	28 000
NEI + 1 m	1.31	28 000
NEI + 2 m	1.45	28 000

Tableau 6-2 : Sensibilité du modèle vis-à-vis des niveaux d'eau imposés au droit des rivières

Il apparaît dans ce tableau que le SRMS est assez peu impacté par les variations de niveaux d'eau imposés. Les débits évoluent très peu également (variations de 100 à 200 m³/j, masquées par l'arrondi).

Les **FIGURES** 6-6 à 6-9 illustrent l'impact à la baisse ou à la hausse sur le niveau de la nappe étudiée. Globalement, il apparaît que le niveau de la nappe monte ou descend de 1 à 2 m selon l'ampleur de la modification apportée aux niveaux d'eau imposés. Cette modification est visible sur la zone concernée par les tronçons de rivières drainants. Une modification de l'ensemble des niveaux d'eau imposés sur les frontières externes n'a pas été réalisée. Il est aisé de comprendre qu'une modification (à la hausse ou à la baisse) sur



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

Chapitre 6

DECEMBRE 2016

IBGE - HYDROLAND R-2016-043

Page 141

l'ensemble des niveaux d'eau imposés aux limites entraînerait une modification globale (respectivement à la hausse ou à la baisse) des niveaux d'eau sur l'ensemble du modèle.

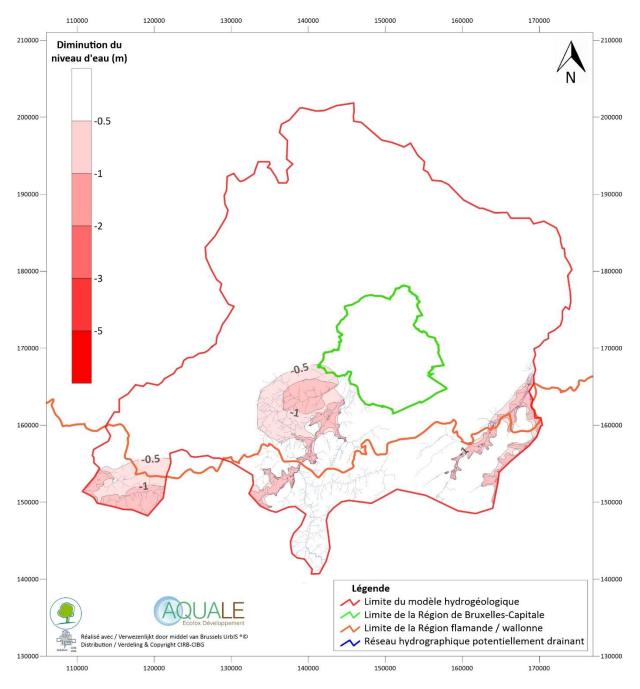


Figure 6-6 : Diminution du niveau d'eau simulé lorsque les niveaux d'eau imposés sont diminués de 2 m sur l'ensemble des rivières (Dendre, Senne, Dyle et Lasne - tronçons amonts) dans le cadre de la calibration en régime permanent



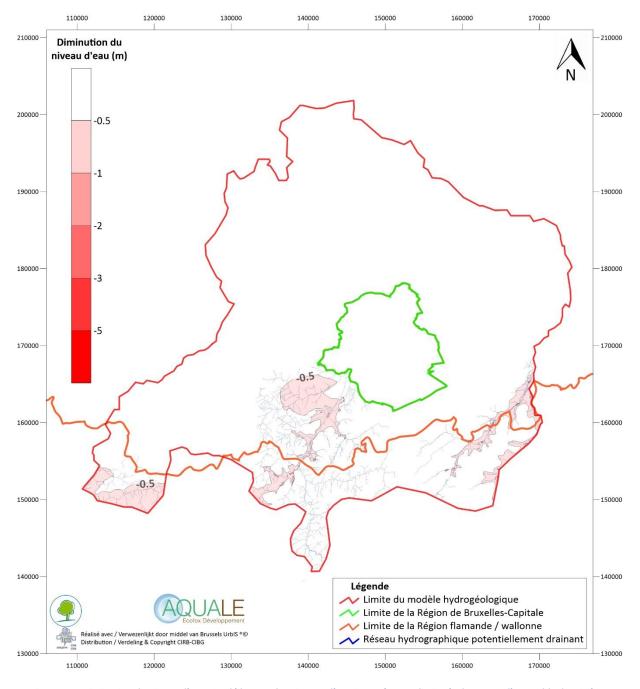


Figure 6-7 : Diminution du niveau d'eau simulé lorsque les niveaux d'eau imposés sont diminués de 1 m sur l'ensemble des rivières (Dendre, Senne, Dyle et Lasne – tronçons amonts) dans le cadre de la calibration en régime permanent



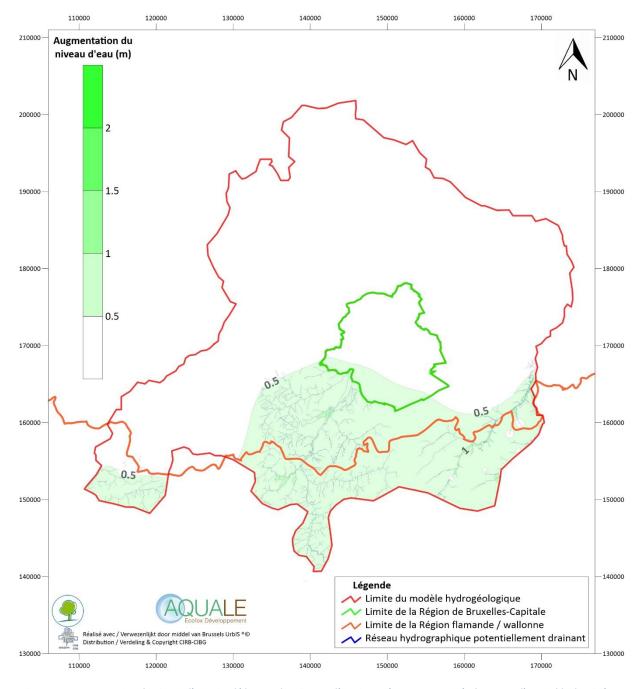


Figure 6-8 : Augmentation du niveau d'eau simulé lorsque les niveaux d'eau imposés sont augmentés de 1 m sur l'ensemble des rivières (Dendre, Senne, Dyle et Lasne - tronçons amonts) dans le cadre de la calibration en régime permanent



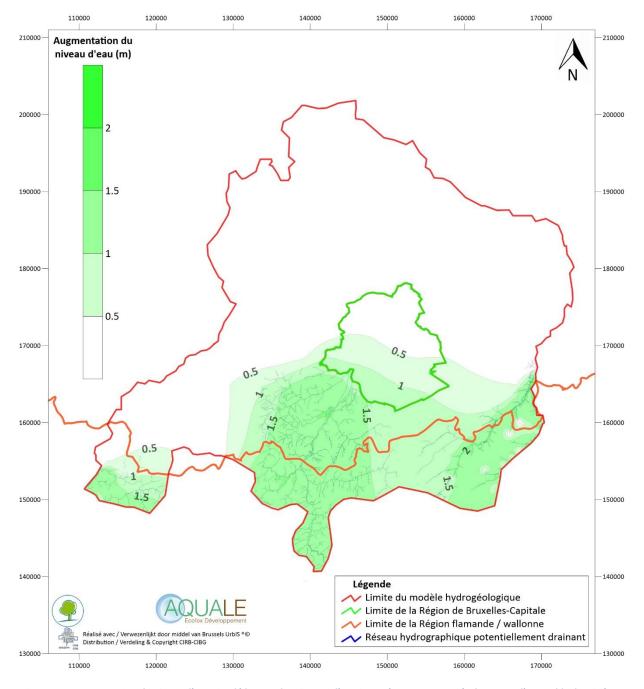


Figure 6-9 : Augmentation du niveau d'eau simulé lorsque les niveaux d'eau imposés sont augmentés de 2 m sur l'ensemble des rivières (Dendre, Senne, Dyle et Lasne - tronçons amonts) dans le cadre de la calibration en régime permanent



### 6.4 POROSITÉ

L'impact de la modification de la porosité doit être évalué en régime transitoire. Compte-tenu du contexte presqu'exclusivement captif, il est préssenti que le modèle sera très peu sensibile à des modifications de porosité. Les coefficients multiplicateurs suivants sont successivement imposés pour ce paramètre :

- 0.2;
- 0.5;
- 2;
- 5.

La simulation en régime transitoire est analysée sur la période 1970 – 2013. L'évolution de la piézométrie est observée pour l'ouvrage Lavallée (FIGURE 6-10), référence à long terme au sein de la Région de Bruxelles-Capitale.

La simulation avec une porosité multipliée par 0.2 n'a pu aboutir à des résultats car la porosité obtenue (0.02) est source d'instabilité numérique.

La figure confirme que la porosité influence très peu l'amplitude des variations temporelles de piézométrie.

Elle montre également que modifier la porosité permet de modifier légèrement les amplitudes de variations. Ainsi, augmenter la porosité atténue l'amplitude de la variation de la piézométrie et diminuer la porosité provoque l'effet inverse. En effet, l'augmentation de la porosité sous-entend une augmentation de l'espace disponible pour l'eau et dès lors une variation moins importante du niveau d'eau de la nappe suite à un apport ou un retrait d'eau. Inversément, une diminution de la porosité provoque une diminution de l'espace disponible pour l'eau et dès lors une variation plus grande du niveau d'eau de la nappe suite à une sollicitation.

Etant donné que la zone concernée par une nappe libre est très réduite, il est évident que c'est le coefficient d'emmagasinement qui jouera un rôle plus important au niveau de la variation temporelle de la piézométrie.

L'impact de la variation de la porosité a également été évalué sur le débit drainé par la Senne en amont de Lot (FIGURE 6-11).

Il apparaît très clairement sur cette figure que le débit est très peu impacté par les variations de porosité.

Le modèle est donc peu sensible vis-à-vis de ce paramètre, en comparaison notamment de la sensibilité élevée vis-à-vis de l'infiltration et de la conductivité hydraulique.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 6** 

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

DECEMBRE 2016

**Page 146** 

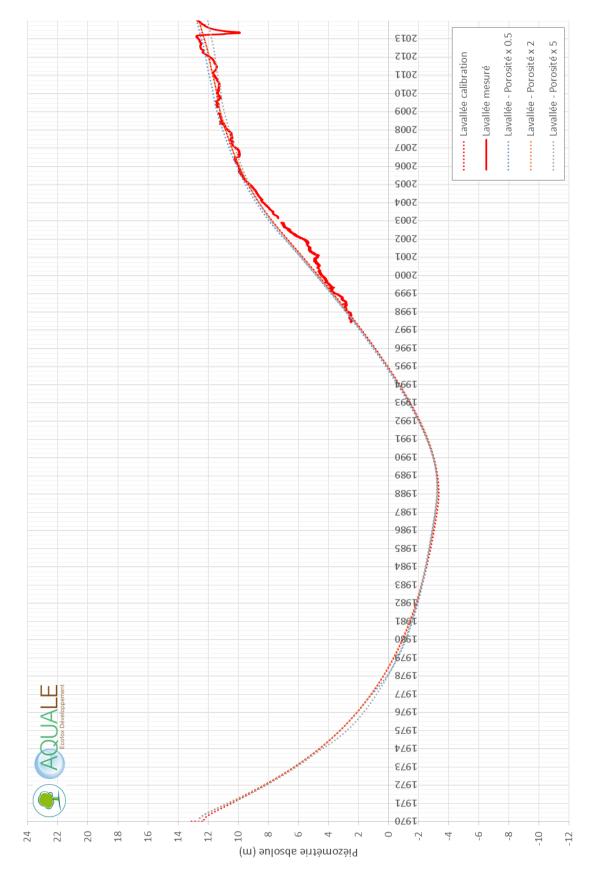


Figure 6-10 : Evolution de la piézométrie mesurée et simulée au droit de l'ouvrage Lavallée pour différentes valeurs de porosité



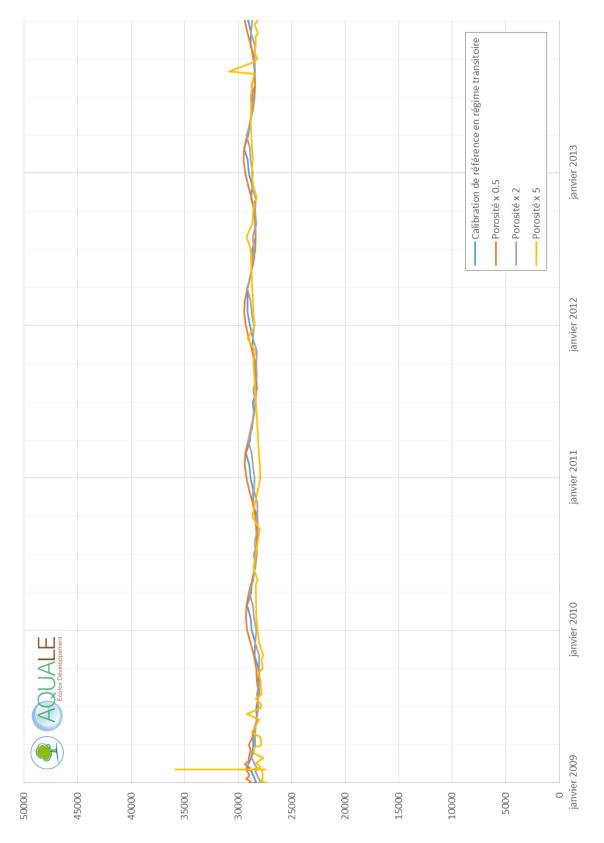
RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 6** 

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

DECEMBRE 2016 Page 147



Drainage simulé des eaux souterraines par la Senne en amont de Lot ( $m^3/J$ )

Figure 6-11 : Variation du débit drainé par la Senne en amont de Lot pour différentes valeurs de porosité



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 6** 

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

DECEMBRE 2016 Page 148

### 6.5 COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT

L'impact de la modification du coefficient d'emmagasinement doit être évalué en régime transitoire. Les coefficients multiplicateurs suivants sont successivement imposés pour ce paramètre :

- 0.2;
- 0.5;
- 2;
- 5.

La simulation en régime transitoire est analysée sur la période 1970 – 2013. L'évolution de la piézométrie est observée pour l'ouvrage Lavallée (FIGURE 6-12), référence à long terme au sein de la Région de Bruxelles-Capitale.

Cette figure illustre la sensibilité importante du modèle vis-à-vis du coefficient d'emmagasinement. Une augmentation du coefficient d'emmagasinement crée un applatissement des courbes. Une diminution du coefficient d'emmagasinement entraîne des variations plus rapides et plus fortes des niveaux d'eau.

Il apparaît, sur la base de cette figure, que le coefficient d'emmagasinement ne peut être modifié fortement sans compromettre la bonne reproduction de la piézométrie à long terme.

L'impact de la variation du coefficient d'emmagasinement a également été évalué sur le débit drainé par la Senne en amont de Lot (FIGURE 6-13). Il apparaît que l'influence sur le débit drainé (en zone libre) est très faible. L'augmentation de coefficient d'emmagasinement entraîne la disparition des variations saisonnières.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 6** 

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

DECEMBRE 2016

Page 149

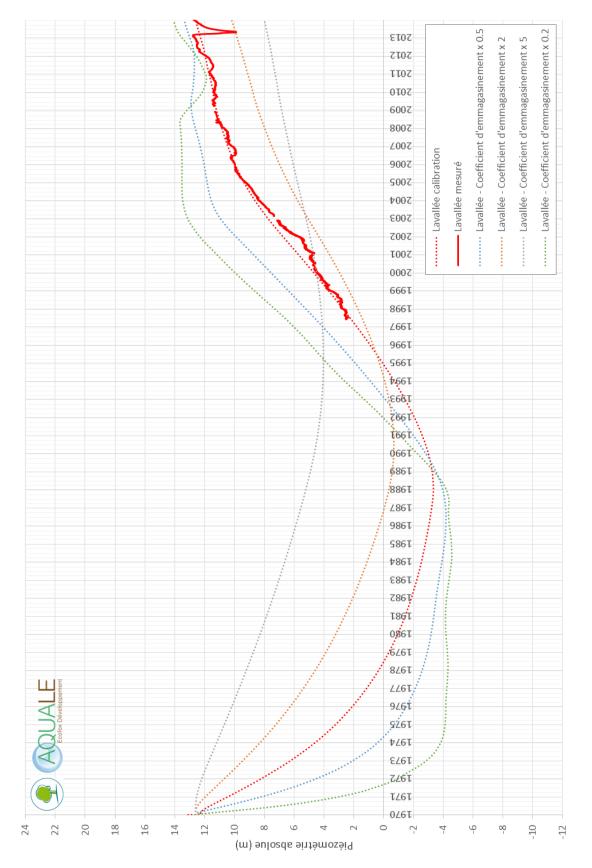


Figure 6-12 : Evolution de la piézométrie mesurée et simulée au droit de l'ouvrage Lavallée pour différentes valeurs de coefficient d'emmagasinement



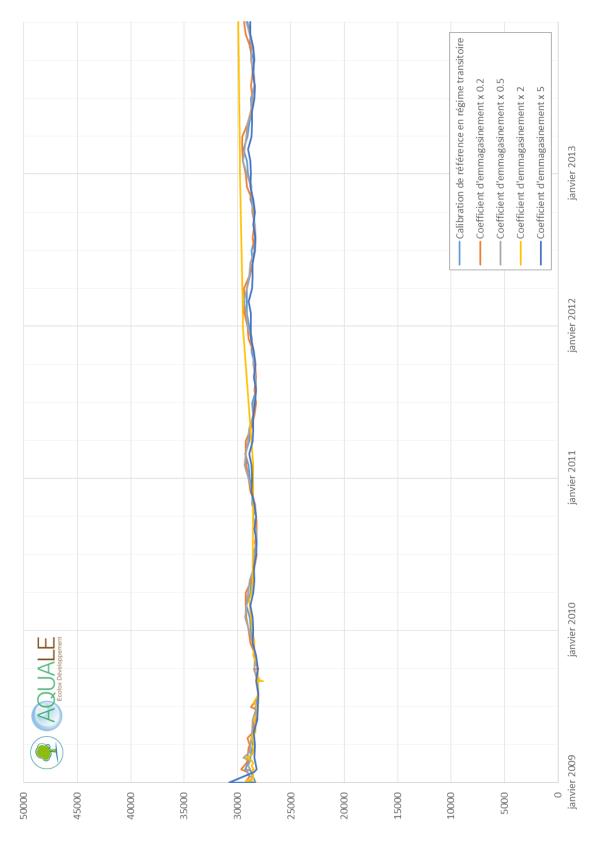
RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 6** 

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

DECEMBRE 2016 Page 150



Drainage simulé des eaux souterraines par la Senne en amont de Lot (m³/j)

Figure 6-13 : Variation du débit drainé par la Senne en amont de Lot pour différentes valeurs de coefficient d'emmagasinement



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 6** 

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

Page 151 DECEMBRE 2016

## 6.6 DÉBITS PRÉLEVÉS PAR POMPAGE (FICTIF)

L'impact de la modification des débits fictifs imposés en régime transitoire doit être évalué. Les coefficients multiplicateurs suivants sont imposés au débit de ces puits entre 1970 et 2002 :

- 0.3;
- 0.6;
- 2.0;
- 3.0.

La simulation en régime transitoire est analysée sur la période 1970 – 2013. L'évolution de la piézométrie est observée pour l'ouvrage Lavallée (FIGURE 6-14), référence à long terme au sein de la Région de Bruxelles-Capitale.

Il apparaît donc très clairement que l'évolution de la piézométrie est très sensible vis-à-vis des débits fictifs imposés. Vu l'incertitude qui existe sur ces débits historiques, cela entraîne une incertitude sur les résultats présentés dans le cadre de ce rapport.

Ainsi, en comparant les **FIGURES 6-12** et **6-14**, il apparaît probable que différentes combinaisons de coefficient d'emmagasinement et de débit fictif puissent permettre de reproduire l'évolution piézométrique observée dans le piézomètre Lavallée.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 6** 

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

DECEMBRE 2016

Page 152

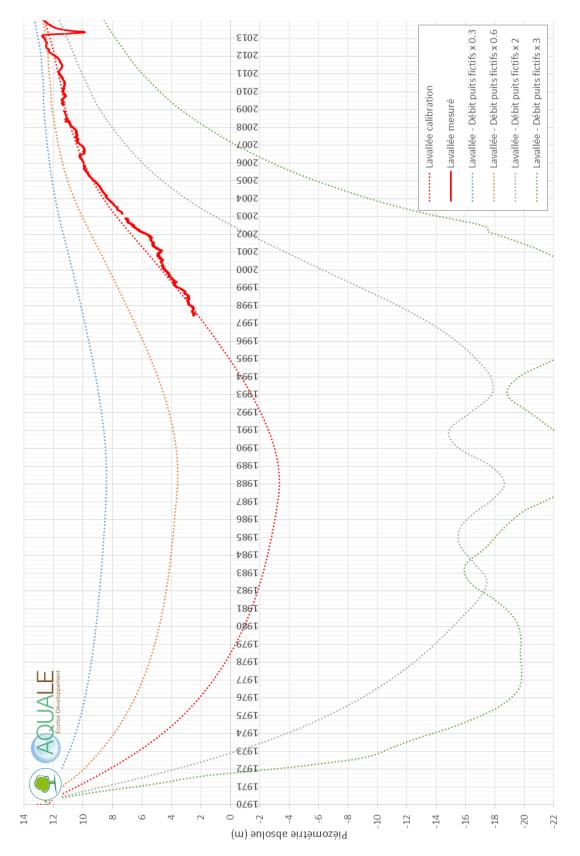


Figure 6-14 : Evolution de la piézométrie mesurée et simulée au droit de l'ouvrage Lavallée pour différentes valeurs de débit aux puits fictifs



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 6** 

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

### 6.7 CONCLUSION GÉNÉRALE DE L'ÉTUDE DE SENSIBILITÉ

L'étude de sensibilité a été réalisée sur bon nombre de paramètres d'entrée du modèle hydrogéologique, à savoir :

- l'infiltration;
- la conductivité hydraulique ;
- les débits prélevés par pompage (historique) ;
- les niveaux d'eau imposés aux rivières ;
- la porosité ;
- le coefficient d'emmagasinement ;
- les débits de prélèvement par pompage (fictif).

Les impacts de modifications de ces paramètres ont été évalués sur :

- la piézométrie ;
- les débits ;
- l'indicateur de qualité SRMS.

#### Cette étude de sensibilité a démontré que :

- la sensibilité à l'infiltration est élevée : une augmentation ou une diminution de l'infiltration provoque une augmentation assez rapide de l'indicateur de qualité SRMS (soit un impact prononcé sur la piézométrie) et provoque également une sortie rapide de la gamme acceptable des débits drainés par les rivières. Bien que ce paramètre soit relativement bien documenté, il reste très difficile d'évaluer précisément l'infiltration réelle. L'étude de sensibilité tend à prouver que l'infiltration réelle doit se situer dans une gamme de valeurs allant de 28 % à + 12 % de la valeur imposée au modèle hydrogéologique (de manière à rester dans la zone verte définie à la FIGURE 6-1). L'incertitude sur ce paramètre devra être prise en considération dans l'évaluation des résultats de l'étude au CHAPITRE 7.
- la sensibilité à la conductivité hydraulique est élevée : une augmentation ou une diminution de la conductivité hydraulique provoque une augmentation assez rapide de l'indicateur de qualité SRMS (soit un impact prononcé sur la piézométrie). Ce paramètre est relativement peu documenté comptetenu de la profondeur de l'aquifère étudié. Le champ de conductivité hydraulique finalement imposé au modèle hydrogéologique est le résultat du processus de calibration. L'étude de sensibilité tend à prouver que la conductivité hydraulique réelle doit se situer dans une gamme de valeurs allant de 30 % à + 30 % de la valeur imposée au modèle hydrogéologique (de manière à rester dans la zone verte définie à la **FIGURE 6-1**). L'incertitude sur ce paramètre devra être prise en considération dans l'évaluation des résultats de l'étude au **CHAPITRE 7**.
- la sensibilité au débit prélevé par pompage est modérée: une augmentation ou diminution importante des débits prélevés par pompage est nécessaire pour provoquer une augmentation importante de l'indicateur de qualité SRMS (soit un impact prononcé sur la piézométrie). Ce paramètre est relativement bien documenté au sein de la Région de Bruxelles-Capitale mais les volumes déclarés ne sont pas toujours connus en Flandres. L'influence des débits prélevés par pompage sur le modèle hydrogéologique et ses résultats présentés au CHAPITRE 7 est jugée nonnégligeable. Les scénarii réalisés dans le cadre de l'évaluation des résultats de l'étude prennent donc en considération des débits de prélèvement variables. Localement, la sensibilité est très élevée.
- la sensibilité aux niveaux d'eau imposés sur les rivières est faible : une augmentation ou diminution importante des niveaux d'eau imposés est nécessaire pour provoquer une augmentation importante de l'indicateur de qualité SRMS (soit un impact prononcé sur la piézométrie) ou un impact important sur les débits aux exutoires. Ce paramètre est susceptible d'être affecté d'une certaine erreur dès lors que la hauteur d'eau des rivières n'est pas toujours connue. L'influence des niveaux d'eau imposés au



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN

Rapport final (phase II)

Page 154

**Chapitre 6** 

IBGE - HYDROLAND

droit des rivières sur le modèle hydrogéologique et ses résultats présentés au **CHAPITRE 7** est jugée négligeable.

- la sensibilité à la porosité est très faible dès lors que l'aquifère modélisé est presqu'exclusivement captif. L'influence de la porosité sur le modèle hydrogéologique et ses résultats présentés au **CHAPITRE 7** est jugée négligeable.
- la sensibilité au coefficient d'emmagasinement est importante : une modification de ce paramètre impacte fortement la calibration du modèle. Ce paramètre est assez mal connu et documenté. L'influence du coefficient d'emmagasinement sur le modèle hydrogéologique et ses résultats présentés au CHAPITRE 7 est jugée potentiellement importante. Toutefois, il est supposé que la valeur de coefficient d'emmagasinement imposée ne peut être modifiée fortement dès lors que cette valeur permet de reproduire correctement les variations saisonnières observées entre 2009 et 2013.
- La sensibilité aux débits fictifs imposés afin de reproduire la remontée historique du niveau de la nappe est très importante également. Il n'est pas exclu que différentes combinaisons de valeurs de débit et coefficient d'emmagasinement permettent de reproduire la remontée piézométrique observée. Toutefois, dès lors que le coefficient d'emmagasinement est fixé par l'évolution récente saisonnière, il ne peut être envisagé de s'éloigner trop fortement du couple débit fictif/coefficient d'emmagasinement retenu.

De ces observations, il est conclu que les résultats présentés au CHAPITRE 7 ci-après doivent tenir compte de l'incertitude existant sur les paramètres d'entrée qui influencent la calibration et les débits des exutoires. L'influence des niveaux d'eau imposés aux rivières et de la porosité étant largement inférieure à celle de l'infiltration, de la conductivité hydraulique et des débits prélevés par pompage, il est clair que c'est l'incertitude existant sur ces trois derniers paramètres qui doit être prise en considération pour évaluer l'incertitude sur les résultats présentés au prochain chapitre.

L'incertitude liée au coefficient d'emmagasinement et aux débits fictifs ne peut être évaluée dès à présent. Il est toutefois fortement recommandé de poursuivre la collecte des données historiques afin de préciser la localisation, la durée et l'ampleur des débits historiques et ainsi avoir une validation supplémentaire sur le coefficient d'emmagasinement imposé au modèle.

Dès lors, tous les scénarii (toutes les évaluations quantitatives) présentés au **CHAPITRE 7** seront accompagnés d'une évaluation de l'incertitude vers le haut et vers le bas. Les simulations permettant d'évaluer l'incertitude sur les résultats sont matérialisées par les sommets de la zone verte telles que présentés à la **FIGURE 6-15** cidessous (A, B, C et D).

Les caractéristiques de ces différentes simulations seront donc les suivantes :

cas A: infiltration x 1.12 et conductivité hydraulique x 1.03;
 cas B: infiltration x 1.11 et conductivité hydraulique x 1.30;
 cas C: infiltration x 0.72 et conductivité hydraulique x 0.82;
 cas D: infiltration x 0.72 et conductivité hydraulique x 0.70.

L'effet de variation du débit des puits est quant à lui évalué par l'intermédiaire des différents scénarii qui envisagent une croissance des débits prélevés (voir **CHAPITRE 7.1.1**).



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

IBGE - HYDROLAND R-2016-043 DECEMBRE 2016

Page 155

**Chapitre 6** 

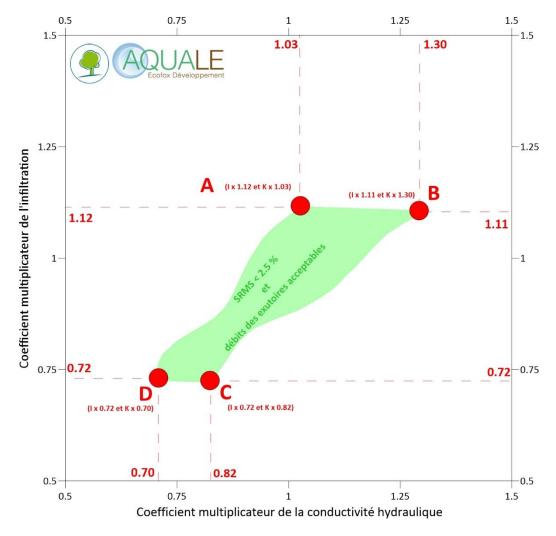


Figure 6-15 : Détermination des simulations à réaliser pour l'évaluation de l'incertitude sur les résultats



### SIMULATIONS ET RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

#### **INTRODUCTION** 7.1

Ce chapitre présente les résultats de l'étude.

Il est donc focalisé exclusivement sur la Région de Bruxelles-Capitale, zone d'intérêt de l'étude.

Les objectifs du modèle précédemment énoncés sont repris ci-dessous (avec indication du chapitre reprenant les résultats associés):

- estimer les ressources disponibles (CHAPITRE 7.2);
- quantifier les échanges d'eau souterraine avec la Région Flamande (CHAPITRE 7.3).

#### 7.1.1 DÉFINITION DES SCÉNARII

Pour répondre à ces objectifs, plusieurs scénarii sont réalisés dans les conditions suivantes :

- en régime permanent, avec une infiltration calculée sur la base de l'eau utile moyenne à très long terme et avec un volume prélevé par les puits en Région de Bruxelles-Capitale :
  - identique à celui de 2013 (SCÉNARIO N°1);
  - augmenté de 50 % par rapport à 2013 (SCÉNARIO N°2);
  - augmenté de 100 % par rapport à 2013 (SCÉNARIO N°3);
- en régime transitoire sur une période de cinq années, avec une infiltration représentative d'une alimentation faible et avec un volume prélevé par les puits en Région de Bruxelles-Capitale :
  - identique à celui de 2013 (SCÉNARIO N°4);
  - 0 augmenté de 50 % par rapport à 2013 (SCÉNARIO N°5);
  - augmenté de 100 % par rapport à 2013 (SCÉNARIO N°6);
- en régime transitoire sur une période de cinq années, avec une infiltration représentative d'une alimentation élevée et avec un volume prélevé par les puits en Région de Bruxelles-Capitale :
  - identique à celui de 2013 (SCÉNARIO N°7);
  - augmenté de 50 % par rapport à 2013 (SCÉNARIO N°8);
  - augmenté de 100 % par rapport à 2013 (SCÉNARIO N°9).

Chacun de ces scénarii sera accompagné de simulations visant à évaluer l'incertitude sur les résultats.

Ces différents scénarii sont présentés schématiquement à la FIGURE 7-1.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 7** 

**Page 157** 

IBGE - HYDROLAND R-2016-043 DECEMBRE 2016

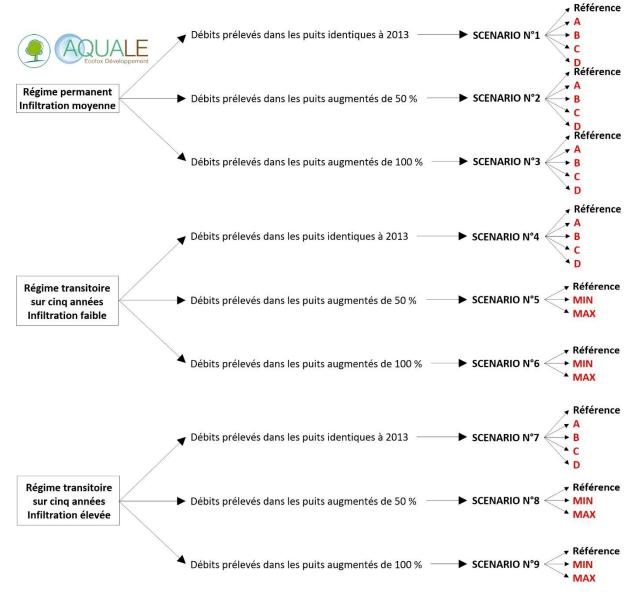


Figure 7-1 : Scénarii réalisés dans le cadre de la présente étude

# 7.1.2 ESTIMATION DE L'INFILTRATION DE RÉFÉRENCE POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARII

### 7.1.2.1 SCÉNARII N°1 À 3 – INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE SITUATION MOYENNE

Contrairement à ce qui avait pu être développé dans le cadre du projet HYDROBRUX, le taux d'infiltration imposé au modèle en régime permanent est principalement issu du processus de calibration, tout en vérifiant qu'il reste dans une gamme de valeur acceptable. L'infiltration imposée prend en considération également une composante d'infiltration depuis le Socle.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 7** 

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

DECEMBRE 2016 Page 1

Il est considéré que l'infiltration de référence utilisée pour la calibration est représentative de la situation moyenne.

# 7.1.2.2 SCÉNARII N°4 À 6 – INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE PÉRIODE DE RECHARGE FAIBLE

Dans ce cas de figure, le régime permanent ne peut être utilisé dès lors que ce niveau d'infiltration ne peut pas excéder quelques années.

Les scénarii considèrent donc une piézométrie initiale telle que celle simulée par le **SCÉNARIO** N°1, soit une piézométrie représentative d'une situation moyenne dans le contexte de prélèvement par captage de l'année 2013. Ensuite, une infiltration faible est imposée durant cinq années, période jugée longue mais réaliste pour évaluer les impacts de ce *worstcase* piézométrique.

Par analogie à ce qui avait été réalisé dans le cadre de l'étude HYDROBRUX et compte-tenu du fait que l'infiltration imposée dans le présent cas reprend également des contributions liées au transfert des aquifères plus profonds vers l'aquifère étudié (apports très lissés dans le temps étant donné le contexte très confiné) et que l'aquifère modélisé est caractérisé par des conductivités hydrauliques relativement faibles, le taux d'infiltration faible imposé pour ces scénarii est obtenu en diminuant de 10 % le taux d'infiltration représentatif d'une situation moyenne.

# 7.1.2.3 SCÉNARII N°7 À 9 — INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE PÉRIODE DE RECHARGE ÉLEVÉE

De la même manière et par symétrie autour de la moyenne, les **SCÉNARII N°7 à 9** sont réalisés en imposant une infiltration augmentée de 10 % par rapport à l'infiltration imposée pour les **SCÉNARII N°1 à 3**. Cette infiltration est considérée comme étant l'infiltration annuelle moyenne représentative de période de recharge très élevée et réaliste.

#### 7.2 ESTIMATION DES RESSOURCES DISPONIBLES

### 7.2.1 GÉNÉRALITÉS

### 7.2.1.1 LÉGISLATION EUROPÉENNE

La Directive 2000/60/CE du Parlement Européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau reprend une série de principes à respecter pour la bonne gestion des eaux de surface et des eaux souterraines.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 7** 

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

DECEMBRE 2016

Page 159

En particulier, les objectifs environnementaux définis à l'Article 4, pour les eaux souterraines, sont les suivants :

- les États membres mettent en œuvre les mesures nécessaires pour prévenir ou limiter le rejet de polluants dans les eaux souterraines et pour prévenir la détérioration de l'état de toutes les masses d'eau souterraines;
- les États membres protègent, améliorent et restaurent toutes les masses d'eau souterraines, assurent un équilibre entre les captages et le renouvellement des eaux souterraines afin d'obtenir un bon état des masses d'eau souterraines, conformément aux dispositions de l'annexe V, au plus tard quinze ans après la date d'entrée en vigueur de la présente directive ;
- les États membres mettent en œuvre les mesures nécessaires pour inverser toute tendance à la hausse, significative et durable, de la concentration de tout polluant résultant de l'impact de l'activité humaine afin de réduire progressivement la pollution des eaux souterraines.

La ressource disponible en eau souterraine est définie à l'Article 2 comme le taux moyen annuel à long terme de la recharge totale de la masse d'eau souterraine moins le taux annuel à long terme de l'écoulement requis pour atteindre les objectifs de qualité écologique des eaux de surface associées fixés à l'article 4, afin d'éviter toute diminution significative de l'état écologique de ces eaux et d'éviter toute dégradation significative des écosystèmes terrestres associés.

Le bon état quantitatif est défini au point 2.1.2 de l'Annexe V de la Directive :

Le niveau de l'eau souterraine dans la masse d'eau souterraine est tel que le taux annuel moyen de captage à long terme ne dépasse pas la ressource disponible de la masse souterraine.

En conséquence, le niveau de l'eau souterraine n'est pas soumis à des modifications anthropogéniques telles qu'elles:

- empêcheraient d'atteindre les objectifs environnementaux déterminés au titre de l'article 4 pour les eaux de surface associées,
- entraîneraient une détérioration importante de l'état de ces eaux,
- occasionneraient des dommages importants aux écosystèmes terrestres qui dépendent directement de la masse d'eau souterraine

et des modifications de la direction d'écoulement dues à des modifications du niveau peuvent se produire temporairement, ou continuellement dans une zone limitée, mais n'occasionnent pas d'invasion d'eau salée ou autre et ne montrent aucune tendance durable et clairement identifiée induite par une action anthropogénique dans la direction d'écoulement qui soit susceptible d'entraîner de telles invasions.

Les documents « Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC) » :

- Guidance Document N°15 Guidance on groundwater Monitoring;
- Guidance Document N°26 Guidance on risk assessment and the use of conceptuels models for groundwater;

servent également de référence dans le cadre de la gestion des eaux souterraines.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 7** 

IBGE - HYDROLAND

### 7.2.1.2 LÉGISLATION BRUXELLOISE

Les textes légaux suivants établissent les règles concernant les eaux souterraines en Région de Bruxelles-Capitale :

- l'Ordonnance du 20 octobre 2006 établissant un cadre pour la politique de l'eau transposant la Directive Cadre Eau (2000/60/EC) ;
- l'Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 10 juin 2010 relatif à la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration présentant la délimitation des masses d'eau souterraine.

L'Article 5 de l'Ordonnance du 20 octobre 2006 définit le bon état d'une eau souterraine comme *l'état atteint* par une masse d'eau souterraine lorsque son état quantitatif et son état chimique sont au moins « bons » au sens de l'annexe III de l'Ordonnance. Le bon état quantitatif des eaux souterraines est défini au point 2.1.2 de l'Annexe III. Cette définition est la même que celle proposée au niveau Européen.

La définition de la ressource disponible d'eau souterraine ne diffère pas de la définition reprise dans la Directive du Parlement Européen.

L'Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 10 juin 2010 se focalise sur le bon état chimique des eaux souterraines mais n'aborde pas leur bon état quantitatif.

#### 7.2.1.3 DÉMARCHE

Afin d'estimer les ressources disponibles, la démarche suivante est adoptée :

- analyse des données historiques : étude à long terme de l'évolution des niveaux d'eau mesurés dans les piézomètres de la Région de Bruxelles-Capitale et ce afin d'évaluer les niveaux d'exploitation récent et actuel de la masse d'eau ;
- utilisation du modèle hydrogéologique : simulations pour déterminer l'augmentation acceptable du débit des captages dans des conditions d'alimentation normale, faible et élevée.

# 7.2.2 ETUDE À LONG TERME DES NIVEAUX D'EAU MESURÉS DANS LES PIÉZOMÈTRES DE LA RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE

La **FIGURE 7-2** ci-dessous illustre l'évolution de la piézométrie mesurée dans la nappe des sables du Landénien en Région de Bruxelles-Capitale. La période couverte est longue pour deux des piézomètres (à savoir environ 15 ans pour les piézomètres Coca-Cola et Lavallée).

Il apparaît que les niveaux d'eau évoluent globalement de la même façon dans l'ensemble des piézomètres. A long terme, on observe toutefois une importante différence de comportement entre le piézomètre Coca-Cola et le piézomètre Lavallée.

Les six autres piézomètres semblent être caractérisés par une évolution piézométrique similaire à celle observée dans le piézomètre Lavallée.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 7** 

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

Ainsi, comme cela a déjà été maintes fois discuté au sein du présent rapport, la piézométrie est en remontée depuis de très nombreuses années. Depuis 1997 jusqu'à 2013, la remontée observée dans le piézomètre Lavallée est légèrement supérieure à 10 m.

Cette remontée est plus rapide entre 1997 et 2005 avec une remontée de 7.5 m et plus lente depuis 2005 avec une remontée de 2.5 m.

Dans le piézomètre Coca-Cola, les oscillations saisonnières sont nettement plus visibles. Il y a également une tendance à la remontée à long terme mais celle-ci est très faible, environ 1 m entre 1997 et 2013.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN

Rapport final (phase II)

Page 162

**Chapitre 7** 

IBGE - HYDROLAND

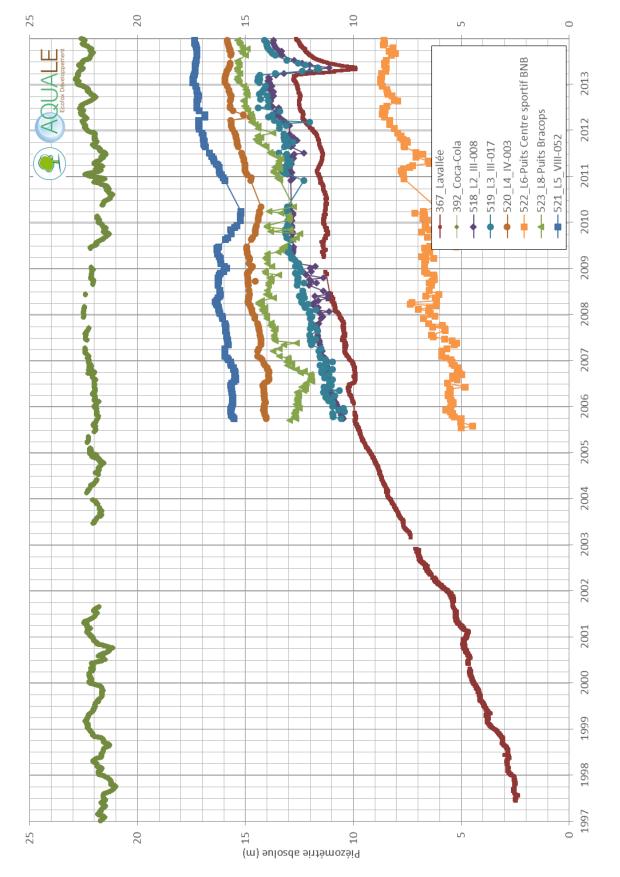


Figure 7-2 : Evolution de la piézométrie mesurée automatiquement à très long terme (1997 – 2013)



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 7** 

IBGE - HYDROLAND R-2016-043 DECEMBRE 2016

Page 163

Cette tendance importante ne concerne pas uniquement la Région de Bruxelles-Capitale mais est également visible en Flandre, en particulier dans la partie Nord-Ouest de la zone modélisée. Cette tendance est liée à la diminution historique des prélèvements au sein de la nappe.

Les volumes prélevés annuellement dans la *nappe du Landénien* sont connus en Région de Bruxelles-Capitale pour la période couvrant les années 2009 à 2013 :

```
    en 2009 : 228 000 m³;
    en 2010 : 226 000 m³;
    en 2011 : 227 000 m³;
    en 2012 : 214 000 m³;
    en 2013 : 155 000 m³.
```

A l'échelle de la zone modélisée, la variation est la suivante :

- en 2009, 823 000 m³ avec principalement :
  - o 334 000 m³ via le puits VLB-1/3109a situé à environ 2 km au Sud-Est de la Région de Bruxelles-Capitale;
  - 101 000 m³ via le puits VLB-kl1/3496 situé à l'extrémité Nord-Est de la zone modélisée, à environ 17 km de la Région de Bruxelles-Capitale;
  - 75 000 m³ via le puits 1446 situé à l'extrémité Nord-Est de la zone modélisée, à environ 13 km de la Région de Bruxelles-Capitale;
- en 2010, 538 000 m³ avec principalement :
  - 149 000 m³ via le puits VLB-kl1/3496 situé à l'extrémité Nord-Est de la zone modélisée, à environ 17 km de la Région de Bruxelles-Capitale;
  - 75 000 m³ via le puits 1446 situé à l'extrémité Nord-Est de la zone modélisée, à environ 13 km de la Région de Bruxelles-Capitale;
- en 2011, 578 000 m³ avec principalement :
  - 188 000 m³ via le puits VLB-kl1/3496 situé à l'extrémité Nord-Est de la zone modélisée, à environ 17 km de la Région de Bruxelles-Capitale;
  - o 75 000 m³ via le puits 1446 situé à l'extrémité Nord-Est de la zone modélisée, à environ 13 km de la Région de Bruxelles-Capitale ;
- en 2012, 604 000 m³ avec principalement :
  - 221 000 m³ via le puits VLB-kl1/3496 situé à l'extrémité Nord-Est de la zone modélisée, à environ 17 km de la Région de Bruxelles-Capitale;
  - 75 000 m³ via le puits 1446 situé à l'extrémité Nord-Est de la zone modélisée, à environ 13 km de la Région de Bruxelles-Capitale;
- en 2013, 771 000 m³ avec principalement :
  - o 259 000 m³ via le puits VLB-1/3109a situé à environ 2 km au Sud-Est de la Région de Bruxelles-Capitale;
  - 165 000 m³ via le puits VLB-kl1/3496 situé à l'extrémité Nord-Est de la zone modélisée, à environ 17 km de la Région de Bruxelles-Capitale;
  - 75 000 m³ via le puits 1446 situé à l'extrémité Nord-Est de la zone modélisée, à environ 13 km de la Région de Bruxelles-Capitale.

La diminution importante entre 2009 et 2010 est liée à l'arrêt du puits VLB-1/3109a. L'augmentation observée entre 2012 et 2013 est liée à sa réactivation.

Le volume total prélevé en Région de Bruxelles-Capitale varie assez faiblement durant les années 2009 à 2012 puis chute fortement en 2013 à cause de la diminution du volume prélevé dans le puits UCL Services Tec. 3 et de l'arrêt du captage 5374.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

IBGE - HYDROLAND R-2016-043

### 7.2.3 SIMULATIONS

Pour les différentes simulations, l'impact sur les niveaux d'eau en Région de Bruxelles-Capitale est observé.

Un tableau de synthèse des résultats est présenté au CHAPITRE 7.2.4.

# 7.2.3.1 SCÉNARII N°1 À 3 – RÉGIME PERMANENT, INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE SITUATION MOYENNE

# 7.2.3.1.1 SCÉNARIO 1 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE IDENTIQUE À CELUI DE 2013

La **FIGURE 7-3** présente la piézométrie absolue dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°1**.

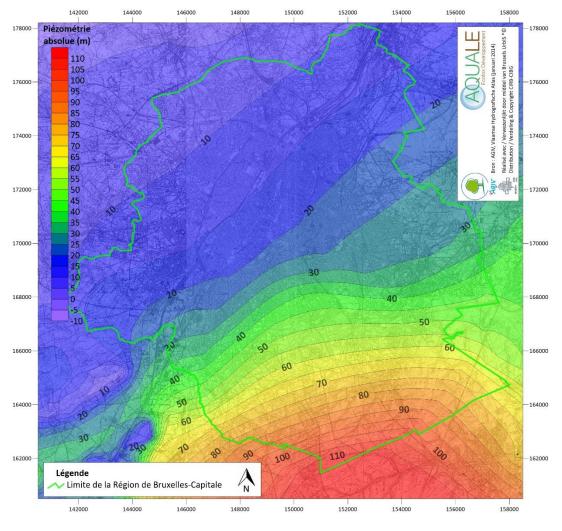


Figure 7-3 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°1



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

Chapitre 7

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

DECEMBRE 2016 Pa

Il apparaît sur la **FIGURE 7-3** que le niveau de la nappe diminue depuis le Sud-Est vers le Nord-Ouest, avec un gradient plus important dans la moitié Sud-Est de la Région.

Puisque ce **SCÉNARIO N°1** fait office de référence absolue pour la piézométrie moyenne attendue dans des conditions normales moyennes d'infiltration, les **SCÉNARII N°2** et 3 seront étudiés en comparant leurs résultats aux résultats du **SCÉNARIO N°1**. L'impact d'une augmentation des volumes prélevés par les puits de captage apparaîtra dès lors de manière évidente.

Puisque l'évaluation des ressources est réalisée de façon purement qualitative, l'évaluation de l'incertitude via les simulations des cas A, B, C et D telle que présentée au CHAPITRE 6.7 ne peut être réalisée.

# 7.2.3.1.2 SCÉNARIO 2 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE AUGMENTÉ DE 50 % PAR RAPPORT À CELUI DE 2013

La **FIGURE 7-4** présente la piézométrie absolue dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°2**.

La **FIGURE 7-5** présente la diminution du niveau piézométrique dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO** N°2 par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO** N°1.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 7** 

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

DECEMBRE 2016 Pa

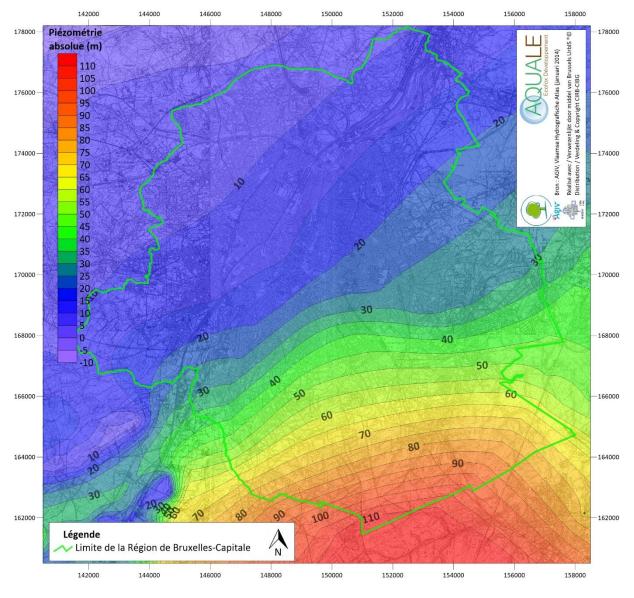


Figure 7-4 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°2



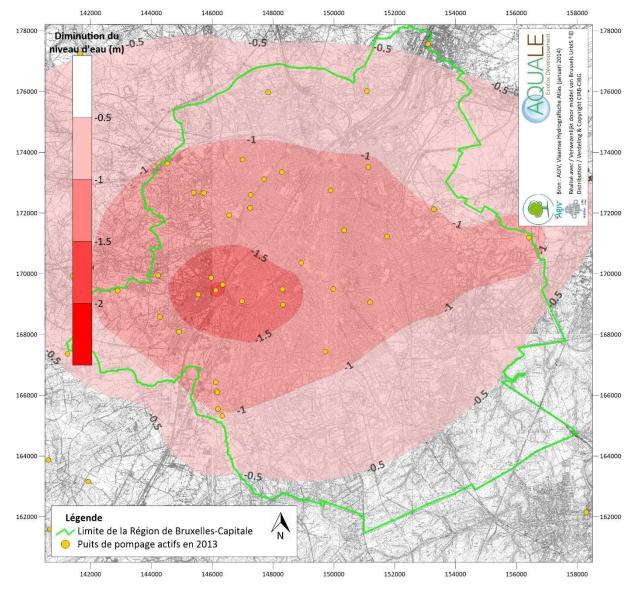


Figure 7-5 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Landénien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°2

Il apparaît sur la FIGURE 7-4 qu'il n'y a a priori pas de modifications visibles par rapport au SCÉNARIO N°1.

La FIGURE 7-5 est intéressante pour estimer l'impact de l'augmentation de 50 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale sur le niveau de la nappe. Cette figure indique que, par rapport au SCÉNARIO N°1, cette augmentation du débit prélevé aurait une incidence assez importante. En effet, dans le contexte de la nappe du Landénien, une augmentation de débit peut entraîner un rabattement sur une zone parfois relativement grande.

Ce SCÉNARIO N°2 tend à démontrer que dans des conditions d'infiltration normale (moyenne), le niveau d'eau général de la nappe serait assez fortement impacté en cas d'augmentation de 50 % des débits pompés dans la nappe du Landénien en Région de Bruxelles-Capitale.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 7** 

IBGE - HYDROLAND

# 7.2.3.1.3 SCÉNARIO 3 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE AUGMENTÉ DE 100 % PAR RAPPORT À CELUI DE 2013

La **FIGURE 7-6** présente la piézométrie absolue dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°3**.

La **FIGURE 7-7** présente la diminution du niveau piézométrique dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°3** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°1**.

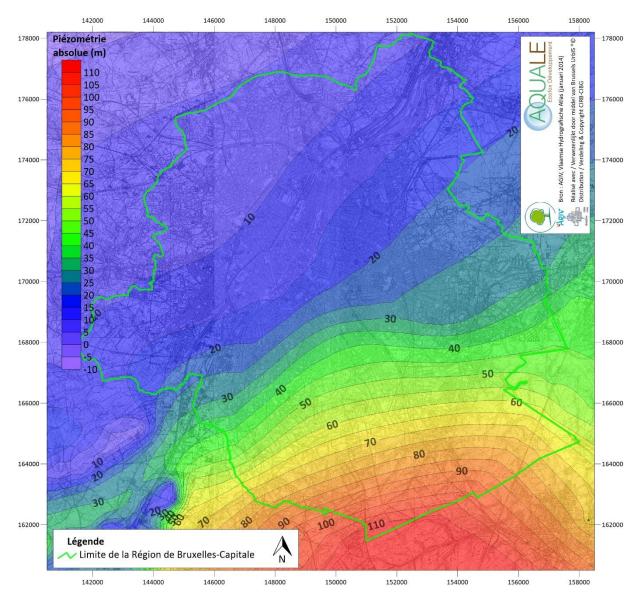


Figure 7-6 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°3



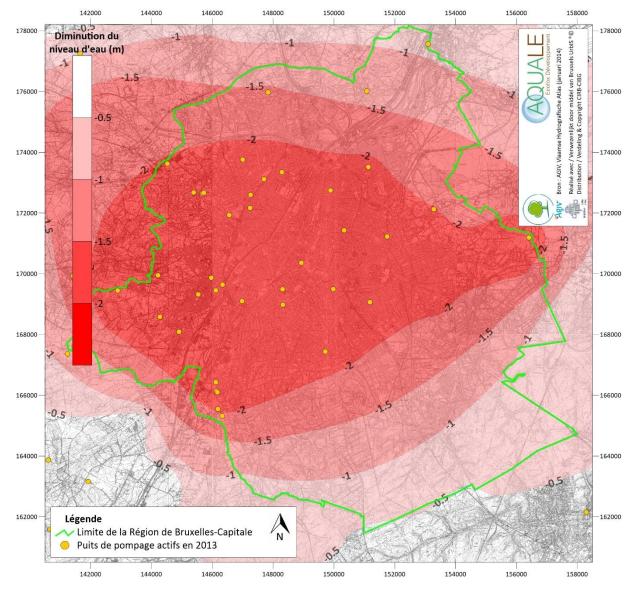


Figure 7-7 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Landénien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°3

Il apparaît sur la FIGURE 7-6 qu'il n'y a a priori pas de modifications visibles par rapport aux SCÉNARII N°1 et 2.

La FIGURE 7-7 est intéressante pour estimer l'impact de l'augmentation de 100 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale sur le niveau de la nappe. Cette figure indique que, par rapport au SCÉNARIO N°1, cette augmentation du débit prélevé aurait une incidence assez importante. En effet, dans le contexte de la nappe du Landénien, une augmentation de débit peut entraîner un rabattement sur une zone parfois relativement grande.

Ce SCÉNARIO N°3 tend à démontrer que dans des conditions d'infiltration normale (moyenne), le niveau d'eau général de la nappe serait assez fortement impacté en cas d'augmentation de 100 % des débits pompés dans la nappe du Landénien en Région de Bruxelles-Capitale.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 7** 

## 7.2.3.2 SCÉNARII N°4 À 6 – RÉGIME TRANSITOIRE, INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE PÉRIODE DE 5 ANNÉES DE RECHARGE FAIBLE

### 7.2.3.2.1 SCÉNARIO 4 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE IDENTIQUE À CELUI DE 2013

La **FIGURE 7-8** présente la piézométrie absolue dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°4**.

La **FIGURE 7-9** présente la diminution du niveau piézométrique dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°4** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°1**.

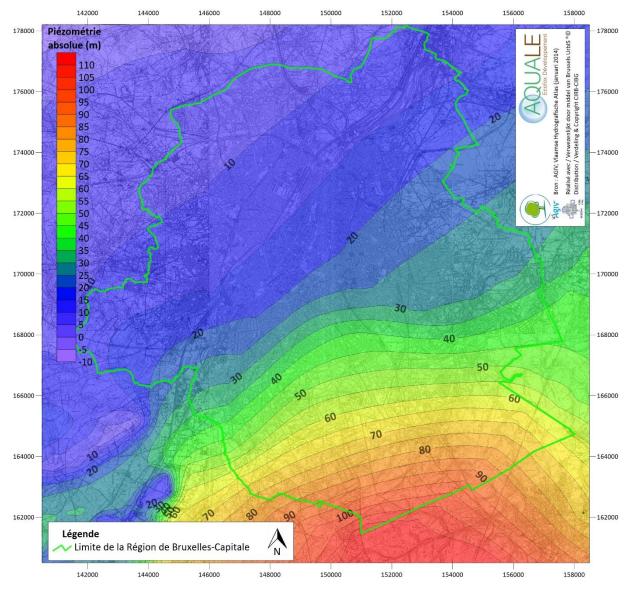


Figure 7-8 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°4



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE
DU LANDÉNIEN

Rapport final (phase II)

**Page 171** 

**Chapitre 7** 

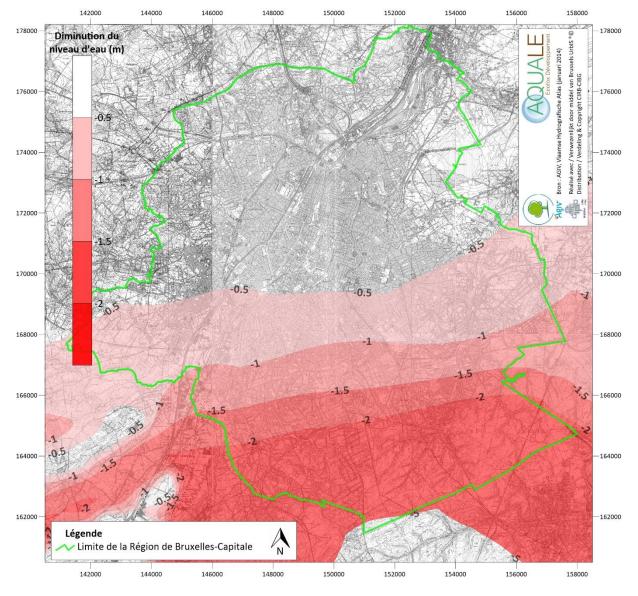


Figure 7-9 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Landénien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°4

Il apparaît sur la FIGURE 7-8 que le niveau de la nappe diminue depuis le Sud-Est vers le Nord-Ouest, avec un gradient plus important dans la moitié Sud-Est de la Région. Il n'y a a priori pas de modifications visibles par rapport au SCÉNARIO N°1.

La FIGURE 7-9 est intéressante pour estimer l'impact d'une diminution de l'infiltration sur le niveau de la nappe. Cette figure indique que, par rapport au SCÉNARIO N°1, une infiltration faible (diminuée de 10 %) entraîne une diminution des niveaux d'eau de la nappe depuis le Sud (zone d'alimentation). La descente est dès lors assez faible dans les deux tiers Nord de la Région de Bruxelles-Capitale. Elle atteint 2 m et plus dans le tier Sud. Compte-tenu de la remontée importante observée à long terme, il semble que cette situation ne génère pas de problème majeur pour les ressources de l'aquifère.



**Chapitre 7** 

Les **SCÉNARII N°5** et **N°6** seront étudiés en comparant leurs résultats aux résultats du **SCÉNARIO N°1**. L'impact cumulé d'une période de recharge très faible et de l'augmentation des volumes prélevés par les puits de captage apparaîtra dès lors de manière évidente.

### 7.2.3.2.2 SCÉNARIO 5 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE AUGMENTÉ DE 50 % PAR RAPPORT À CELUI DE 2013

La **FIGURE 7-10** présente la piézométrie absolue dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°5**.

La **FIGURE 7-11** présente la diminution du niveau piézométrique dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°5** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°1**. Elle illustre donc le rabattement total lié à la diminution importante de la recharge et à l'augmentation de 50 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale.

La **FIGURE 7-12** présente la diminution du niveau piézométrique dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°5** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°4**. Elle illustre donc le rabattement lié à l'augmentation de 50 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale dans ce contexte de recharge faible.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 7** 

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

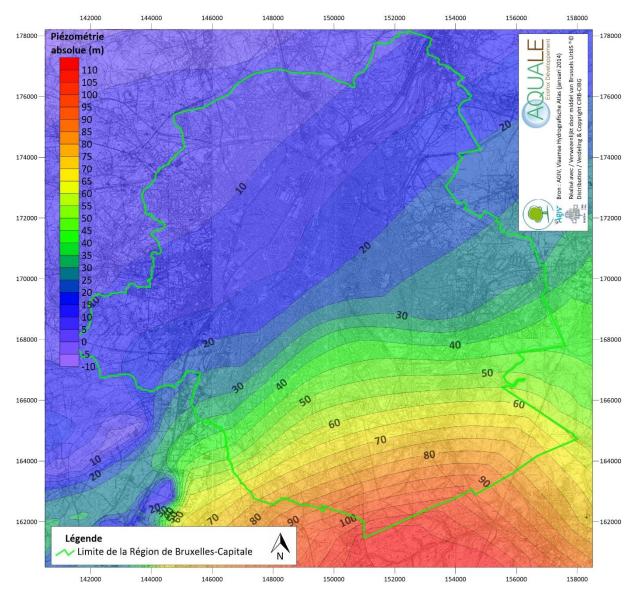


Figure 7-10 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°5



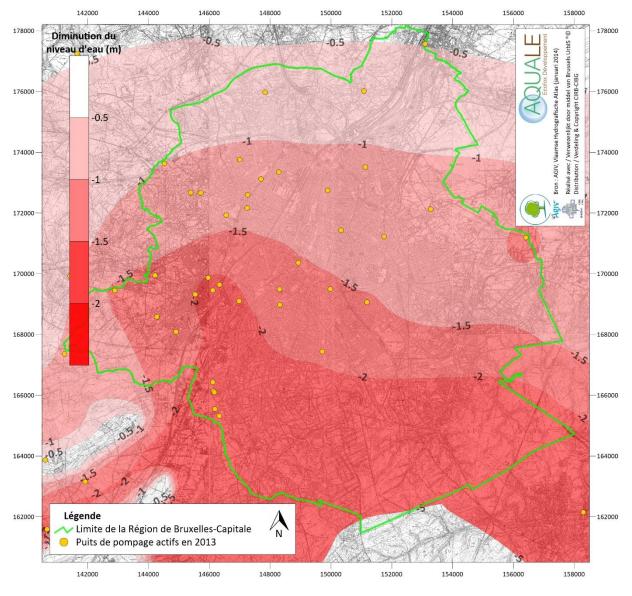


Figure 7-11 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Landénien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°5



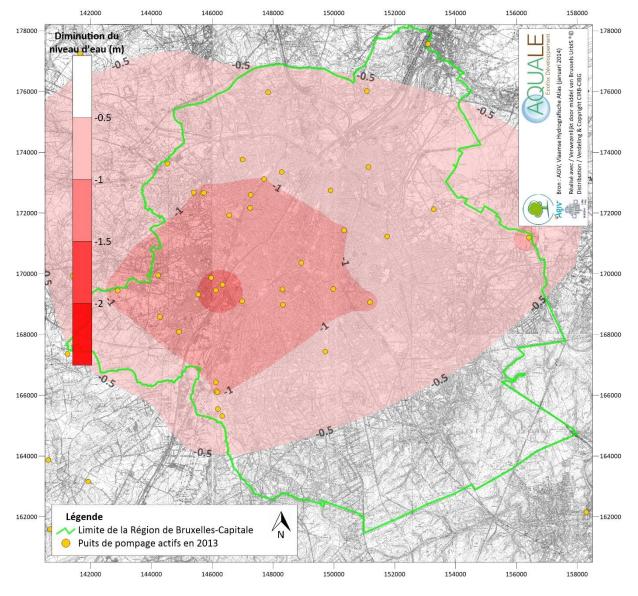


Figure 7-12 : Diminution du niveau d'eau de la *nappe du Landénien* par rapport au niveau de référence du scénario n°4 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°5

Il apparaît sur la FIGURE 7-10 qu'il n'y a a priori pas de modifications visibles par rapport au SCÉNARIO N°4.

Les **FIGURES 7-11** et **7-12** sont intéressantes pour estimer les impacts cumulés de l'infiltration faible et de l'augmentation de 50 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale sur le niveau de la nappe. Ces figures indiquent que, par rapport au **SCÉNARIO N°1**, cette augmentation du débit prélevé aurait une incidence assez importante. En effet, dans le contexte de la *nappe du Landénien*, une augmentation de débit peut entraîner un rabattement sur une zone parfois relativement grande. L'impact est globalement le même que dans le cas d'une infiltration moyenne (il est légèrement plus faible), soit un rabattement majeur autour du point de prélèvement principal qui se propage à grande distance compte-tenu de l'augmentation généralisée des prélèvements. Pour le reste, le rabattement lié à la diminution d'infiltration est également impactant.



Ce **SCÉNARIO** N°5 tend à démontrer que dans des conditions d'infiltration très faible, le niveau d'eau général de la nappe serait assez fortement impacté en cas d'augmentation de 50 % des débits pompés dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale.

## 7.2.3.2.3 SCÉNARIO 6 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE AUGMENTÉ DE 100 % PAR RAPPORT À CELUI DE 2013

La **FIGURE 7-13** présente la piézométrie absolue dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°6**.

La **FIGURE 7-14** présente la diminution du niveau piézométrique dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°6** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°1**. Elle illustre donc le rabattement total lié à la diminution importante de la recharge et à l'augmentation de 100 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale.

La **FIGURE 7-15** présente la diminution du niveau piézométrique dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°6** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°4**. Elle illustre donc le rabattement lié à l'augmentation de 100 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale dans ce contexte de recharge faible.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

IBGE - HYDROLAND R-2016-043 DECEMBRE 2016

Page 177

**Chapitre 7** 

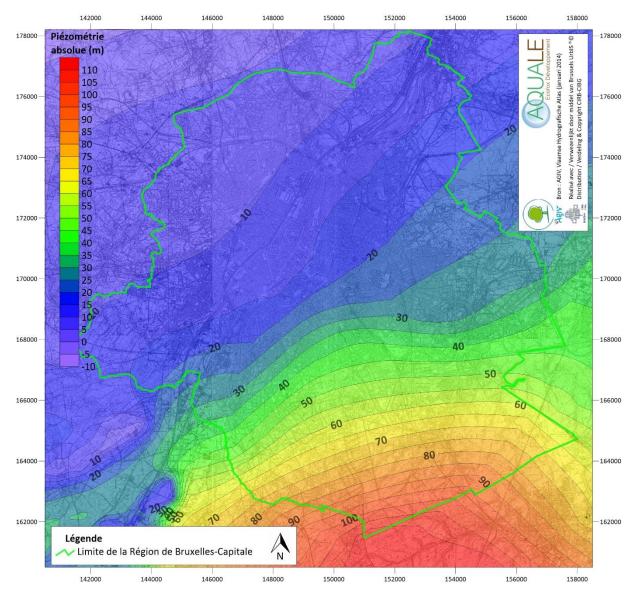


Figure 7-13 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°6



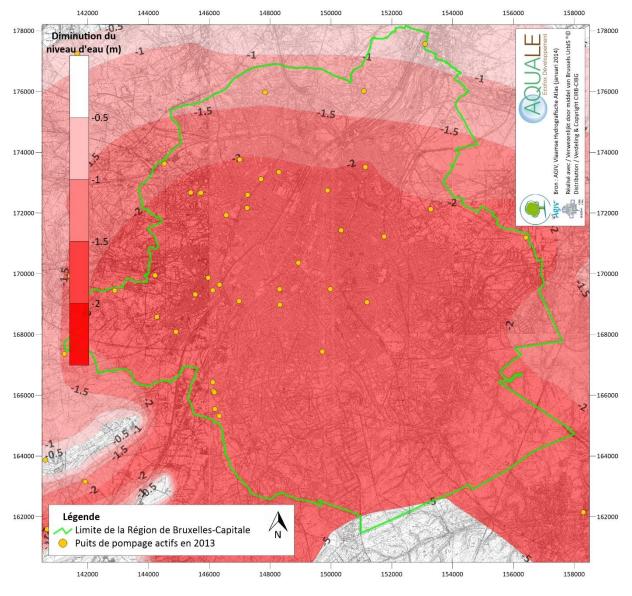


Figure 7-14 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Landénien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°6



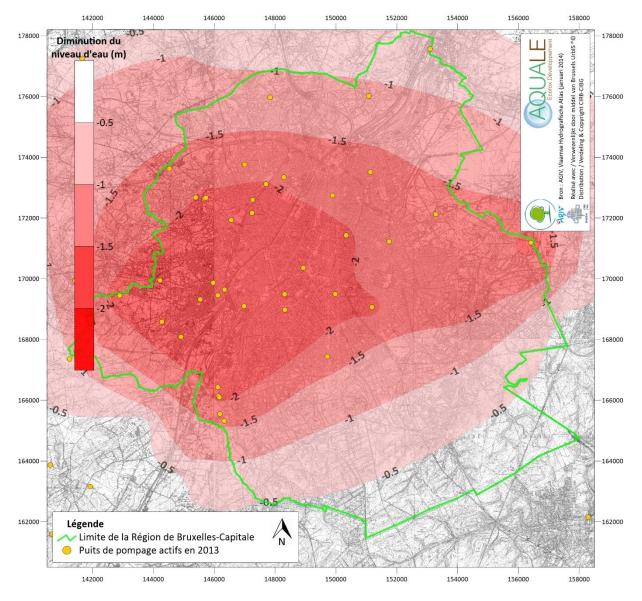


Figure 7-15 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Landénien par rapport au niveau de référence du scénario n°4 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°6

Il apparaît sur la FIGURE 7-13 qu'il n'y a a priori pas de modifications visibles par rapport aux SCÉNARII N°4 et 5.

Les FIGURES 7-14 et 7-15 sont intéressantes pour estimer les impacts cumulés de l'infiltration faible et de l'augmentation de 100 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale sur le niveau de la nappe. Ces figures indiquent que, par rapport au SCÉNARIO N°1, cette augmentation du débit prélevé aurait une incidence assez importante. En effet, dans le contexte de la nappe du Landénien, une augmentation de débit peut entraîner un rabattement sur une zone parfois relativement grande. L'impact est globalement le même que dans le cas d'une infiltration moyenne (il est légèrement plus faible), soit un rabattement majeur autour du point de prélèvement principal qui se propage à grande distance compte-tenu de l'augmentation généralisée des prélèvements. Pour le reste, le rabattement lié à la diminution d'infiltration est également impactant.



Ce **SCÉNARIO N°6** tend à démontrer que dans des conditions d'infiltration très faible, le niveau d'eau général de la nappe serait assez fortement impacté en cas d'augmentation de 100 % des débits pompés dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale.

## 7.2.3.3 SCÉNARII N°7 À 9 – RÉGIME TRANSITOIRE, INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE PÉRIODE DE 5 ANNÉES DE RECHARGE ÉLEVÉE

### 7.2.3.3.1 SCÉNARIO 7 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE IDENTIQUE À CELUI DE 2013

La **FIGURE 7-16** présente la piézométrie absolue dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°7**.

La **FIGURE 7-17** présente l'augmentation du niveau piézométrique dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°7** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°1**.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 7** 

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

DECEMBRE 2016 Page 181

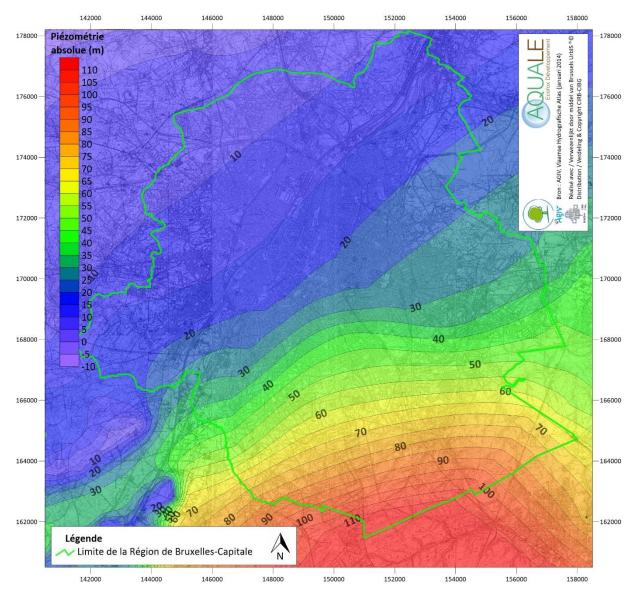


Figure 7-16 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°7



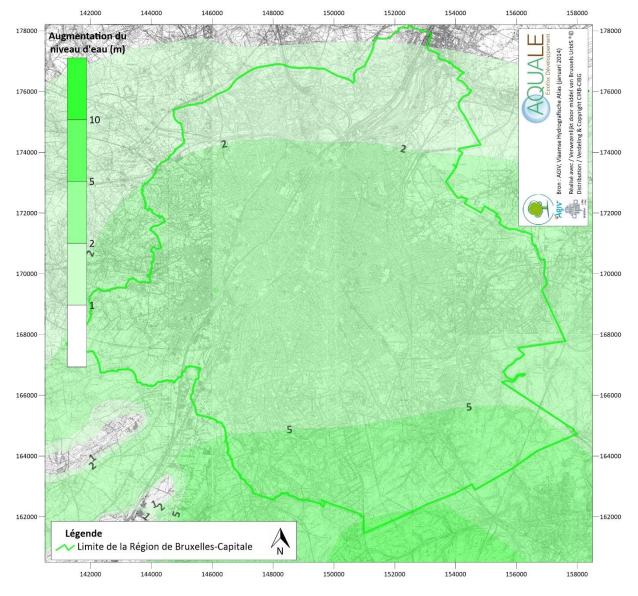


Figure 7-17 : Augmentation du niveau d'eau de la *nappe du Landénien* par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°7

Il apparaît sur la **FIGURE 7-16** que le niveau de la nappe diminue depuis le Sud-Est vers le Nord-Ouest, avec un gradient plus important dans la moitié Sud-Est de la Région. Il n'y a *a priori* pas de modifications visibles par rapport au **SCÉNARIO N°1**.

La **FIGURE 7-17** est intéressante pour estimer l'impact de l'infiltration sur le niveau de la nappe. Cette figure indique que, par rapport au **SCÉNARIO N°1**, une infiltration élevée (augmentée de 10 %) entraîne une augmentation très importante des niveaux d'eau de la nappe depuis le Sud (zone d'alimentation).

Les **SCÉNARII N°8 et N°9** seront étudiés en comparant leurs résultats aux résultats du **SCÉNARIO N°1**. L'impact cumulé d'une période de recharge très élevée et de l'augmentation des volumes prélevés par les puits de captage apparaîtra dès lors de manière évidente.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 7** 

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

DECEMBRE 2016 Page

## 7.2.3.3.2 SCÉNARIO 8 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE AUGMENTÉ DE 50 % PAR RAPPORT À CELUI DE 2013

La **FIGURE 7-18** présente la piézométrie absolue dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°8**.

La **FIGURE 7-19** présente la modification du niveau piézométrique dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°8** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°1**. Elle illustre donc la modification du niveau de la nappe liée à l'augmentation importante de la recharge et à l'augmentation de 50 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale.

La **FIGURE 7-20** présente la diminution du niveau piézométrique dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°8** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°7**. Elle illustre donc le rabattement lié à l'augmentation de 50 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale dans ce contexte de recharge élevée.

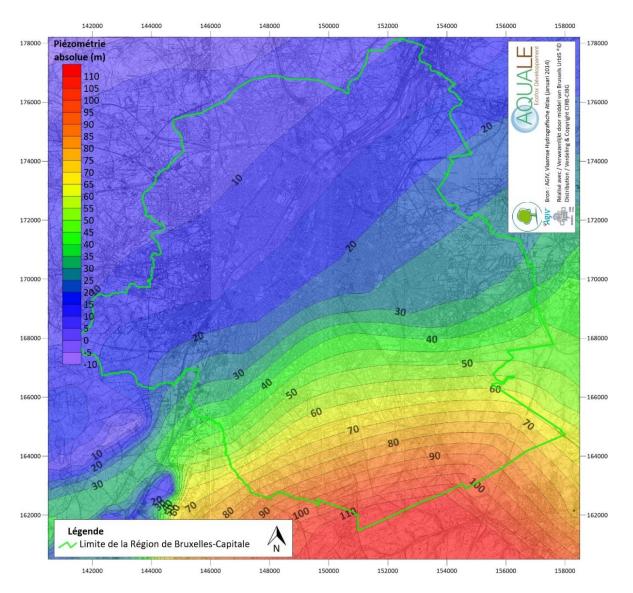


Figure 7-18 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°8



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE
DU LANDÉNIEN

Rapport final (phase II)

IBGE - HYDROLAND R-2016-043 DECEMBRE 2016

Chapitre 7

**Page 184** 

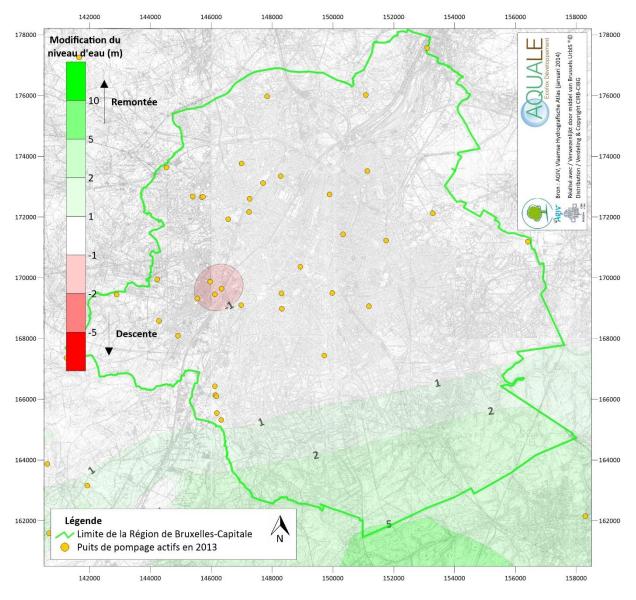


Figure 7-19 : Modification du niveau d'eau de la nappe du Landénien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°8



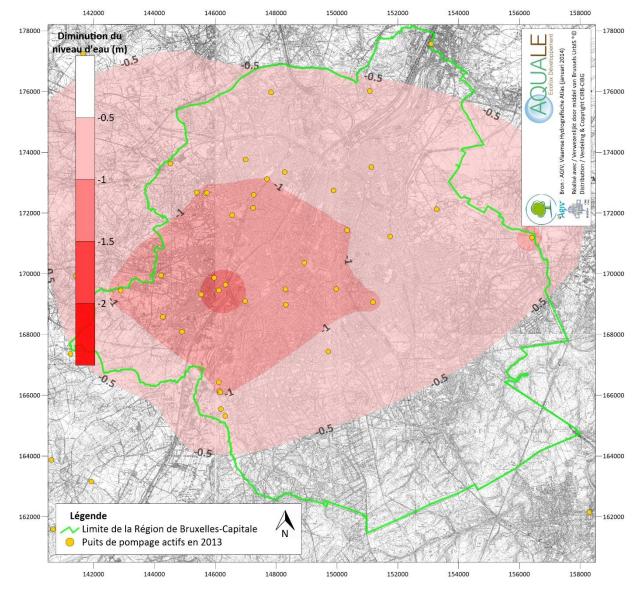


Figure 7-20 : Diminution du niveau d'eau de la *nappe du Landénien* par rapport au niveau de référence du scénario n°7 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°8

Il apparaît sur la FIGURE 7-18 qu'il n'y a a priori pas de modifications visibles par rapport au SCÉNARIO N°7.

Les FIGURES 7-19 et 7-20 sont intéressantes pour estimer les impacts cumulés de l'infiltration élevée et de l'augmentation de 50 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale sur le niveau de la nappe. Ces figures indiquent que, par rapport au SCÉNARIO N°1, cette augmentation du débit prélevé aurait une incidence assez importante. En effet, dans le contexte de la nappe du Landénien, une augmentation de débit peut entraîner un rabattement sur une zone parfois relativement grande. L'impact est globalement le même que dans le cas d'une infiltration moyenne (il est légèrement plus faible), soit un rabattement majeur autour du point de prélèvement principal qui se propage à grande distance compte-tenu de l'augmentation généralisée des prélèvements. La FIGURE 7-19 illustre toutefois que l'augmentation d'infiltration a une influence plus importante vu que la combinaison des deux modifications entraîne principalement une remontée du niveau piézométrique.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

IBGE - HYDROLAND R-2016-043 DECEMBRE 2016

**Chapitre 7** 

Ce SCÉNARIO N°8 tend à démontrer que dans des conditions d'infiltration très élevée, le niveau d'eau général de la nappe serait assez fortement impacté en cas d'augmentation de 50 % des débits pompés dans la nappe du Landénien en Région de Bruxelles-Capitale.

### 7.2.3.3.3 SCÉNARIO 9 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE AUGMENTÉ DE 100 % PAR RAPPORT À CELUI DE 2013

La FIGURE 7-21 présente la piézométrie absolue dans la nappe du Landénien en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du SCÉNARIO N°9.

La FIGURE 7-22 présente la modification du niveau piézométrique dans la nappe du Landénien en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du SCÉNARIO N°9 par rapport au niveau de la nappe dans le cas du SCÉNARIO N°1. Elle illustre donc la modification du niveau de la nappe liée à l'augmentation importante de la recharge et à l'augmentation de 100 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale.

La FIGURE 7-23 présente la diminution du niveau piézométrique dans la nappe du Landénien en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du SCÉNARIO N°9 par rapport au niveau de la nappe dans le cas du SCÉNARIO N°7. Elle illustre donc le rabattement lié à l'augmentation de 100 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale dans ce contexte de recharge élevée.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 7** 

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

**Page 187** 

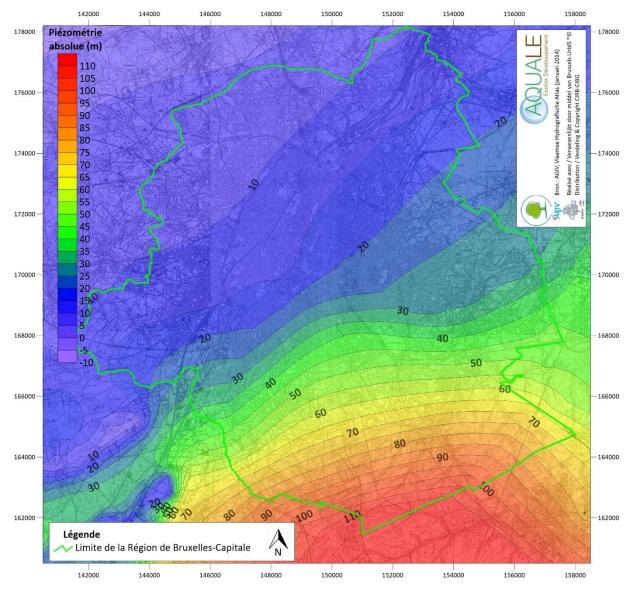


Figure 7-21 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°9



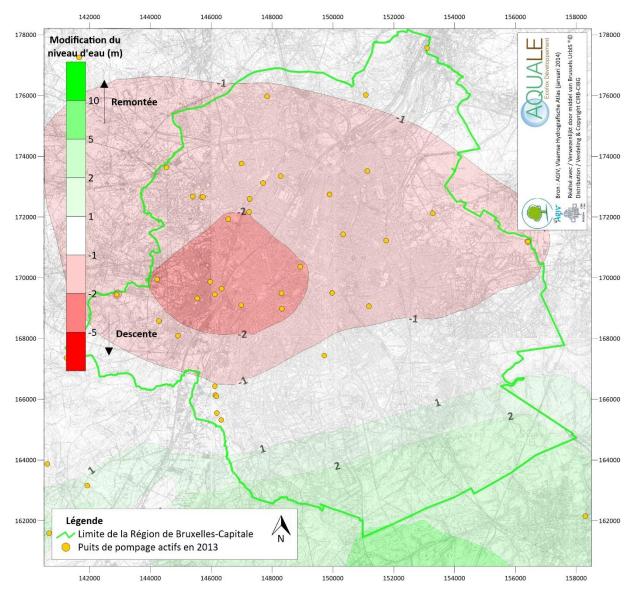


Figure 7-22 : Modification du niveau d'eau de la nappe du Landénien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°9



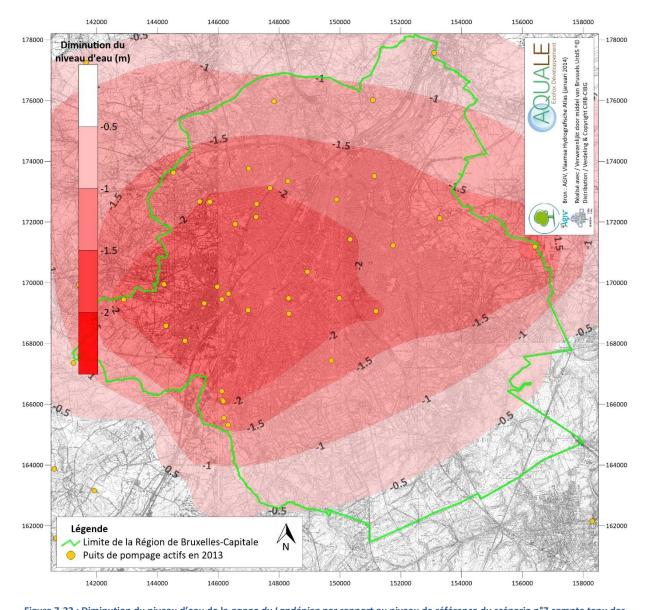


Figure 7-23 : Diminution du niveau d'eau de la *nappe du Landénien* par rapport au niveau de référence du scénario n°7 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°9

Il apparaît sur la FIGURE 7-21 qu'il n'y a a priori pas de modifications visibles par rapport au SCÉNARIO N°7.

Les FIGURES 7-22 et 7-23 sont intéressantes pour estimer les impacts cumulés de l'infiltration élevée et de l'augmentation de 100 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale sur le niveau de la nappe. Ces figures indiquent que, par rapport au SCÉNARIO N°1, cette augmentation du débit prélevé aurait une incidence assez importante. En effet, dans le contexte de la nappe du Landénien, une augmentation de débit peut entraîner un rabattement sur une zone parfois relativement grande. L'impact est globalement le même que dans le cas d'une infiltration moyenne (il est légèrement plus faible), soit un rabattement majeur autour du point de prélèvement principal qui se propage à grande distance compte-tenu de l'augmentation généralisée des prélèvements. La FIGURE 7-22 illustre que l'augmentation d'infiltration ne compense que partiellement l'augmentation des débits de prélèvement.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 7** 

Ce **SCÉNARIO N°9** tend à démontrer que dans des conditions d'infiltration très élevée, le niveau d'eau général de la nappe serait assez fortement impacté en cas d'augmentation de 100 % des débits pompés dans la *nappe du Landénien* en Région de Bruxelles-Capitale.

### 7.2.4 SYNTHÈSE

Pour estimer les ressources disponibles, l'évolution des niveaux d'eau de la *nappe du Landénien* a été étudiée pour différents scénarii. Ces scénarii considèrent une infiltration variable (faible, moyenne et élevée) ainsi qu'un prélèvement par puits de pompage variable (identique à 2013, augmenté de 50 % par rapport à 2013 et augmenté de 100 % par rapport à 2013).

Le TABLEAU 7-1 ci-après reprend une synthèse des estimations données au sein du CHAPITRE 7.2.

	Contexte
	piézométrique
SCÉNARIO N°1	Référence 2013
SCÉNARIO N°2	- 0.5 à - 1.5 m
SCÉNARIO N°3	- 1.0 à - 3.0 m
SCÉNARIO N°4	- 5.0 à 0.0 m
SCÉNARIO N°5	- 5.0 à - 0.5 m
SCÉNARIO N°6	- 5.0 à - 1.0 m
SCÉNARIO N°7	+ 1.0 à + 8.0 m
SCÉNARIO N°8	- 1.0 à + 5.0 m
SCÉNARIO N°9	- 2.0 à + 5.0 m

Tableau 7-1 : Synthèse des évaluations des ressources pour les 9 scénarii

En plus de ces scénarii et de leurs résultats, l'information majeure concernant l'évolution de la *nappe du Landénien* est que son niveau piézométrique est en croissance depuis maintenant de très nombreuses années. C'est principalement cette observation qui permet de conclure que les ressources disponibles de cet aquifère sont actuellement suffisantes et en adéquation avec le niveau d'exploitation.

Les différents scénarii l'ont montré, l'aquifère est assez sensible aux sollicitations par pompage. Ainsi, une augmentation importante des sollicitations créera un rabattement potentiellement important des niveaux d'eau au sein de la Région de Bruxelles-Capitale. Cela peut également être confirmé sur la base des données historiques. Le niveau d'eau très bas de la seconde moitié du vingtième siècle remonte progressivement, assez lentement, et sur une zone géographique très importante. Plus récemment, les pompages réalisés à proximité du bâtiment de Bruxelles Environnement pour tester les installations géothermiques ont provoqué des rabattements importants et sur des distances relativement grandes. La remontée des niveaux d'eau a pris plusieurs mois pour revenir à un état d'équilibre, suite à ces mêmes tests.

Il peut donc être conclu que le niveau actuel des ressources est suffisant compte-tenu du niveau d'exploitation actuel mais que cela ne sous-entend pas que l'exploitation peut-être fortement augmentée compte-tenu de la sensibilité de l'aquifère aux augmentations de prélèvement (cet aspect étant confirmé par l'historique des mesures et par les différents scénarii simulés).



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN

Rapport final (phase II)

Chapitre 7

### 7.3 QUANTIFICATION DES ÉCHANGES AVEC LA RÉGION FLAMANDE

Les 9 mêmes scénarii sont étudiés dans le cadre de la quantification des échanges avec la Région Flamande.

L'estimation concerne le flux d'eau souterraine passant entre la Région de Bruxelles-Capitale et la Région Flamande au sein de la *nappe du Landénien*.

Pour chaque scénario, le débit total entrant, le débit total sortant ainsi que la balance globale sont évalués. Les zones de flux entrant et sortant sont également identifiées.

### 7.3.1 SIMULATIONS

## 7.3.1.1 SCÉNARII N°1 À 3 – RÉGIME PERMANENT, INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE SITUATION MOYENNE

### 7.3.1.1.1 SCÉNARIO 1 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE IDENTIQUE À CELUI DE 2013

Selon le **SCÉNARIO N°1**, les flux estimés sont les suivants :

flux entrant : 1.59 Mm³/an ;
 flux sortant : 1.43 Mm³/an ;

- balance globale : 0.16 Mm³/an entrant dans la Région de Bruxelles-Capitale.

La balance globale représente le volume prélevé annuellement par les puits situés en Région de Bruxelles-Capitale.

La **FIGURE 7-24** illustre les lignes de flux à travers la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la *nappe du Landénien*. Sur cette figure, plus les lignes de flux sont longues, plus le chemin parcouru en 50 années est grand et plus la vitesse d'écoulement est grande.

Il apparaît très clairement que les flux entrants principaux sont situés :

- le long de la frontière Sud;
- le long de la frontière Est.

Les flux sortants principaux sont situés :

- le long de la frontière Nord ;
- le long de la frontière Ouest.

En termes de sensibilité, il convient à présent de comparer ces résultats en adaptant les paramètres infiltration et conductivité hydraulique comme précisé au **CHAPITRE 6.7**, à savoir :

- cas A: infiltration x 1.12 et conductivité hydraulique x 1.03;
- cas B: infiltration x 1.11 et conductivité hydraulique x 1.30;
- cas C: infiltration x 0.72 et conductivité hydraulique x 0.82;
- cas D: infiltration x 0.72 et conductivité hydraulique x 0.70.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN

Rapport final (phase II)

IBGE - HYDROLAND R-2016-043 DECEMBRE 2016

**Chapitre 7** 

Page 192

Le TABLEAU 7-2 ci-dessous reprend les variations des débits sortant et entrant et de la balance globale pour ces différents cas.

	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Synthèse
Flux entrant	+ 10 %	+ 16 %	- 25 %	- 29 %	[- 29 à + 16 %]
Flux sortant	+ 11 %	+ 18 %	- 28 %	- 32 %	[- 32 à + 18 %]
Balance globale	0 %	+1%	- 1 %	- 1 %	[-1à+1%]

Tableau 7-2: Evaluation de l'incertitude sur les estimations des flux entrant, sortant et de la balance globale dans le cadre du scénario n°1

Ainsi, compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°1**, les flux sont :

- compris entre 1.14 et 1.85 Mm³/an pour les flux entrants;
- compris entre 0.98 et 1.69 Mm³/an pour les flux sortants ;
- d'environ 0.16 Mm³/an pour la balance globale.



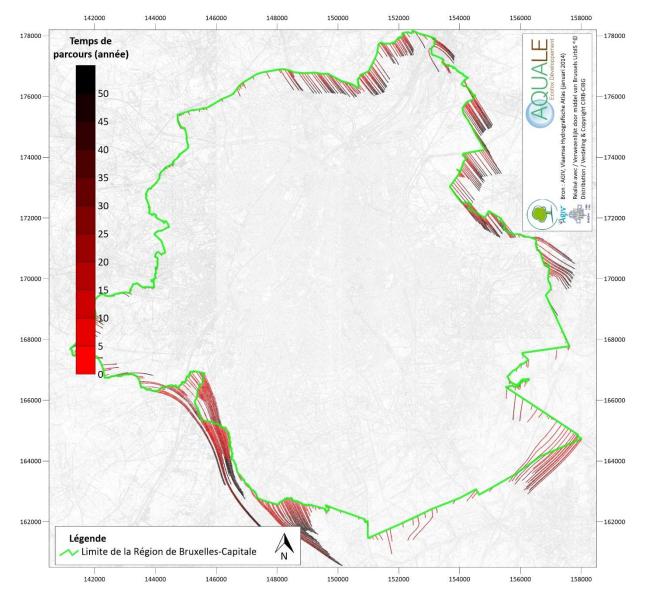


Figure 7-24 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la nappe du Landénien selon le scénario n°1

### 7.3.1.1.2 SCÉNARIO 2 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE AUGMENTÉ DE 50 % PAR RAPPORT À CELUI DE 2013

Selon le **SCÉNARIO N°2**, les flux estimés sont les suivants :

- flux entrant : 1.63 Mm³/an ;
   flux sortant : 1.39 Mm³/an ;
- balance globale : 0.24 Mm³/an entrant dans la Région de Bruxelles-Capitale.

La balance globale représente le volume prélevé annuellement par les puits situés en Région de Bruxelles-Capitale auquel on a rajouté 50 % conformément aux spécificités du **SCÉNARIO N°2**.

La **FIGURE 7-25** illustre les lignes de flux à travers la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la *nappe* du Landénien.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

Chapitre 7

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

Il apparaît très clairement que les flux principaux sont répartis comme dans le SCÉNARIO №1.

En termes de sensibilité, il convient à présent de comparer ces résultats en adaptant les paramètres infiltration et conductivité hydraulique comme précisé au CHAPITRE 6.7, à savoir :

cas A: infiltration x 1.12 et conductivité hydraulique x 1.03; cas B: infiltration x 1.11 et conductivité hydraulique x 1.30; cas C: infiltration x 0.72 et conductivité hydraulique x 0.82; cas D: infiltration x 0.72 et conductivité hydraulique x 0.70.

Le TABLEAU 7-3 ci-dessous reprend les variations des débits sortant et entrant et de la balance globale pour ces différents cas.

	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Synthèse
Flux entrant	+9%	+ 16 %	- 25 %	- 28 %	[- 28 à + 16 %]
Flux sortant	+ 11 %	+ 18 %	- 29 %	- 32 %	[- 32 à + 18 %]
Balance globale	0 %	+0%	- 1 %	- 1 %	[-1à0%]

Tableau 7-3: Evaluation de l'incertitude sur les estimations des flux entrant, sortant et de la balance globale dans le cadre du scénario

Ainsi, compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°2**, les flux sont :

- compris entre 1.17 et 1.88 Mm<sup>3</sup>/an pour les flux entrants;
- compris entre 0.94 et 1.64 Mm<sup>3</sup>/an pour les flux sortants;
- d'environ 0.24 Mm³/an pour la balance globale.



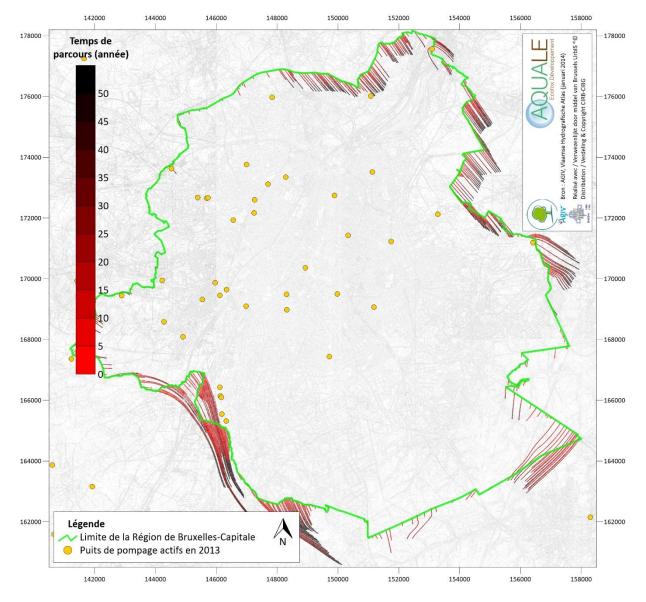


Figure 7-25 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la nappe du Landénien selon le scénario n°2

### 7.3.1.1.3 SCÉNARIO 3 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE AUGMENTÉ DE 100 % PAR RAPPORT À CELUI DE 2013

Selon le **SCÉNARIO N°3**, les flux estimés sont les suivants :

- flux entrant : 1.66 Mm³/an ;
   flux sortant : 1.34 Mm³/an ;
- balance globale : 0.32 Mm³/an entrant dans la Région de Bruxelles-Capitale.

La balance globale représente le volume prélevé annuellement par les puits situés en Région de Bruxelles-Capitale auquel on a rajouté 100 % conformément aux spécificités du **SCÉNARIO N°3**.

La **FIGURE 7-26** illustre les lignes de flux à travers la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la *nappe du Landénien*.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

Chapitre 7

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

Il apparaît très clairement que les flux principaux sont répartis comme dans le SCÉNARIO №1.

En termes de sensibilité, il convient à présent de comparer ces résultats en adaptant les paramètres infiltration et conductivité hydraulique comme précisé au **CHAPITRE 6.7**, à savoir :

cas A: infiltration x 1.12 et conductivité hydraulique x 1.03;
 cas B: infiltration x 1.11 et conductivité hydraulique x 1.30;
 cas C: infiltration x 0.72 et conductivité hydraulique x 0.82;
 cas D: infiltration x 0.72 et conductivité hydraulique x 0.70.

Le **TABLEAU 7-4** ci-dessous reprend les variations des débits sortant et entrant et de la balance globale pour ces différents cas.

	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Synthèse
Flux entrant	+9%	+ 15 %	- 24 %	- 27 %	[- 27 à + 15 %]
Flux sortant	+ 11 %	+ 19 %	- 30 %	- 33 %	[- 33 à + 19 %]
Balance globale	0 %	+0%	- 1 %	- 1 %	[-1à0%]

Tableau 7-4 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations des flux entrant, sortant et de la balance globale dans le cadre du scénario n°3

Ainsi, compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°3**, les flux sont :

- compris entre 1.21 et 1.91 Mm<sup>3</sup>/an pour les flux entrants;
- compris entre 0.89 et 1.60 Mm<sup>3</sup>/an pour les flux sortants;
- d'environ 0.32 Mm³/an pour la balance globale.



**Chapitre 7** 

IBGE - HYDROLAND R-2016-043

Page 197

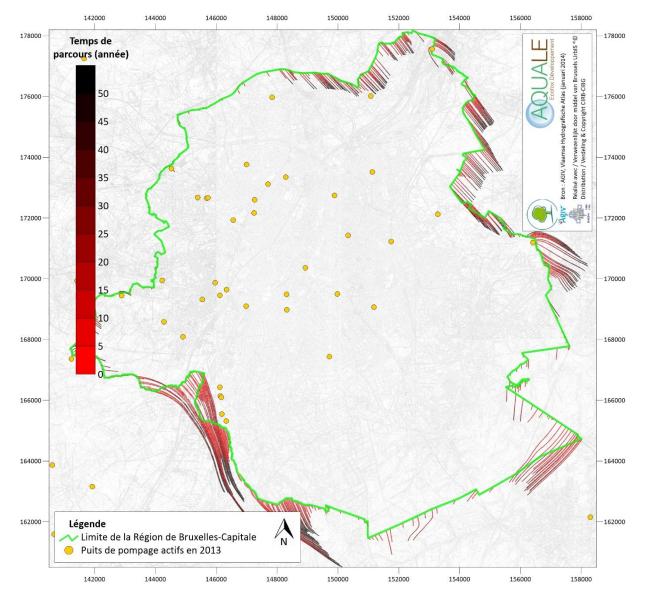


Figure 7-26 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la nappe du Landénien selon le scénario n°3

### 7.3.1.1.4 REMARQUE SUR LES SCÉNARII ET LA SENSIBILITÉ

Les résultats du SCÉNARIO N°1 peuvent être aisément transposés aux SCÉNARII N°2 et 3 dès lors que l'unique différence concerne le volume prélevé par les puits au sein de la Région de Bruxelles-Capitale.

Ainsi, une augmentation de 50 % du débit prélevé par les puits (SCÉNARIO N°2) induit une augmentation de 0.08 Mm³/an de la balance qui se répartissent plus ou moins équitablement entre une augmentation des flux entrants (+ 0.04 Mm<sup>3</sup>/an) et une diminution des flux sortants (- 0.04 Mm<sup>3</sup>/an).

De la même manière, une augmentation de 100 % du débit prélevé par les puits (SCÉNARIO N°3) induit une augmentation de 0.16 Mm<sup>3</sup>/an de la balance qui se répartissent plus ou moins équitablement entre une augmentation des flux entrants (+ 0.07 Mm<sup>3</sup>/an) et une diminution des flux sortants (- 0.09 Mm<sup>3</sup>/an).



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 7** 

Concernant la sensibilité, les **TABLEAUX 7-2**, **7-3** et **7-4** démontrent que l'incertitude reste à très peu de chose près la même pour les **SCÉNARII N°1**, **2 et 3**.

Pour toutes ces raisons, afin d'éviter de trop nombreuses répétitions, seuls les **SCÉNARII N°4 et 7** seront présentés dans la suite pour évaluer l'impact de recharges très faible et très élevée sur les flux à la frontière. Les résultats des **SCÉNARII N°5 et 6** peuvent être aisément déduits des résultats du **SCÉNARIO N°4**. Les résultats des **SCÉNARII N°8 et 9** peuvent être aisément déduits des résultats du **SCÉNARIO N°7**.

## 7.3.1.2 SCÉNARII N°4 À 6 – RÉGIME TRANSITOIRE, INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE PÉRIODE DE 5 ANNÉES DE RECHARGE FAIBLE

Comme expliqué précédemment, seul le **SCÉNARIO N°4** est réalisé. Ses résultats sont considérés comme aisément extrapolables aux **SCÉNARII N°5** et 6.

Selon le SCÉNARIO N°4, les flux estimés sont les suivants :

- flux entrant: 1.51 Mm³/an (soit une diminution d'environ 6 % par rapport au SCÉNARIO N°1);
- flux sortant: 1.37 Mm³/an (soit une diminution d'environ 4 % par rapport au SCÉNARIO N°1);
- balance globale: 0.13 Mm<sup>3</sup>/an (soit une diminution d'environ 18 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**).

La diminution de l'infiltration diminue logiquement les flux entrants et sortants. La balance globale a diminué également et ne correspond plus exactement au débit prélevé en Région de Bruxelles-Capitale (la correspondance ne doit plus être parfaite puisque l'on est à présent en régime transitoire).

La **FIGURE 7-27** illustre les lignes de flux à travers la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la *nappe* du Landénien.

Il apparaît très clairement que les flux principaux sont répartis comme dans le SCÉNARIO N°1.

En termes de sensibilité, il convient à présent de comparer ces résultats en adaptant les paramètres infiltration et conductivité hydraulique comme précisé au **CHAPITRE 6.7**, à savoir :

- cas A: infiltration x 1.12 et conductivité hydraulique x 1.03;
- cas B: infiltration x 1.11 et conductivité hydraulique x 1.30;
- cas C: infiltration x 0.72 et conductivité hydraulique x 0.82;
- cas D: infiltration x 0.72 et conductivité hydraulique x 0.70.

Le **TABLEAU 7-5** ci-dessous reprend les variations des débits sortant et entrant et de la balance globale pour ces différents cas.

	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Synthèse
Flux entrant	+ 11 %	+ 19 %	- 23 %	- 28 %	[- 28 à + 19 %]
Flux sortant	+9%	+ 23 %	- 22 %	- 30 %	[- 30 à + 23 %]
Balance globale	+ 30 %	- 24 %	- 27 %	-0%	[- 27 à + 30 %]

Tableau 7-5 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations des flux entrant, sortant et de la balance globale dans le cadre du scénario n°4



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE
DU LANDÉNIEN

Rapport final (phase II)

Chapitre 7

Ainsi, compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°4**, les flux sont :

- compris entre 1.09 et 1.79 Mm³/an pour les flux entrants ;
- compris entre 0.95 et 1.69 Mm<sup>3</sup>/an pour les flux sortants;
- compris entre 0.10 et 0.17 Mm<sup>3</sup>/an pour la balance globale.

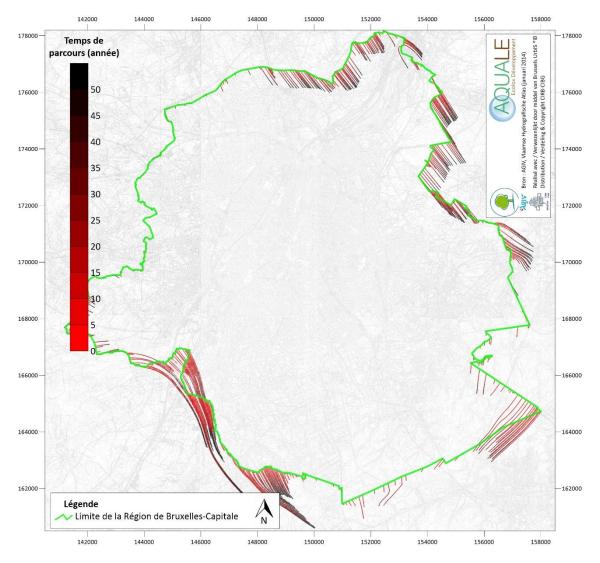


Figure 7-27 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la nappe du Landénien selon le scénario n°4

# 7.3.1.3 SCÉNARII N°7 À 9 – RÉGIME TRANSITOIRE, INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE PÉRIODE DE 5 ANNÉES DE RECHARGE ÉLEVÉE

Comme expliqué précédemment, seul le **SCÉNARIO N°7** est réalisé. Ses résultats sont considérés comme aisément extrapolables aux **SCÉNARII N°8** et 9.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE
DU LANDÉNIEN

Rapport final (phase II)

\_

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

DECEMBRE 2016

**Chapitre 7** 

Selon le **SCÉNARIO N°7**, les flux estimés sont les suivants :

- flux entrant: 1.68 Mm³/an (soit une augmentation d'environ 6 % par rapport au SCÉNARIO N°1);
- flux sortant: 1.49 Mm³/an (soit une augmentation d'environ 4 % par rapport au SCÉNARIO N°1);
- balance globale: 0.19 Mm³/an (soit une augmentation d'environ 18 % par rapport au SCÉNARIO N°1).

L'augmentation de l'infiltration provoque logiquement une augmentation des flux entrants et sortants. La balance globale a augmenté également et ne correspond plus exactement au débit prélevé en Région de Bruxelles-Capitale (la correspondance ne doit plus être parfaite puisque l'on est à présent en régime transitoire). L'augmentation de débit par rapport au **SCÉNARIO N°1** est symétrique par rapport à la diminution observée via le **SCÉNARIO N°4**.

La **FIGURE 7-28** illustre les lignes de flux à travers la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la *nappe* du Landénien.

Il apparaît très clairement que les flux principaux sont répartis comme dans le SCÉNARIO N°1.

En termes de sensibilité, il convient à présent de comparer ces résultats en adaptant les paramètres infiltration et conductivité hydraulique comme précisé au **CHAPITRE 6.7**, à savoir :

```
    cas A: infiltration x 1.12 et conductivité hydraulique x 1.03;
    cas B: infiltration x 1.11 et conductivité hydraulique x 1.30;
    cas C: infiltration x 0.72 et conductivité hydraulique x 0.82;
```

- cas D : infiltration x 0.72 et conductivité hydraulique x 0.70.

Le **TABLEAU 7-6** ci-dessous reprend les variations des débits sortant et entrant et de la balance globale pour ces différents cas.

	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Synthèse
Flux entrant	+8%	+ 19 %	- 24 %	- 29 %	[- 29 à + 19 %]
Flux sortant	+7%	+ 24 %	- 23 %	- 32 %	[- 32 à + 24 %]
Balance globale	+ 16 %	- 20 %	- 28 %	- 8 %	[- 28 à + 16 %]

Tableau 7-6 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations des flux entrant, sortant et de la balance globale dans le cadre du scénario n°7

Ainsi, compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°7**, les flux sont :

- compris entre 1.19 et 2.00 Mm<sup>3</sup>/an pour les flux entrants ;
- compris entre 1.01 et 1.85 Mm<sup>3</sup>/an pour les flux sortants;
- compris entre 0.14 et 0.22 Mm³/an pour la balance globale.

IBGE - HYDROLAND



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

R-2016-043

**Chapitre 7** 

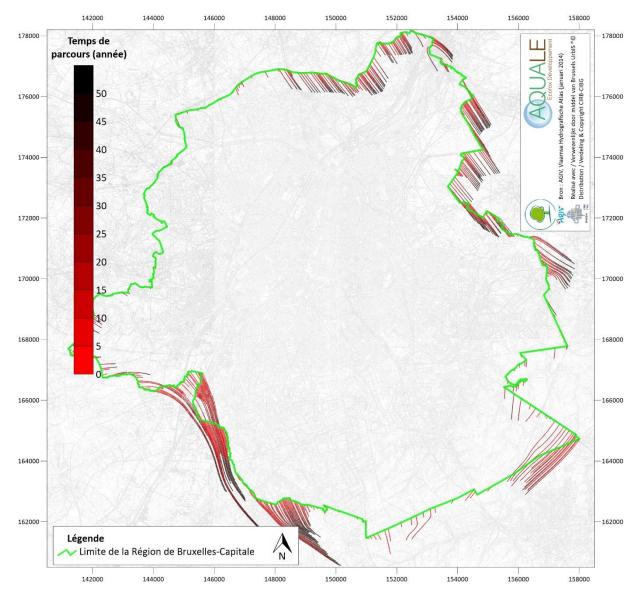


Figure 7-28 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la nappe du Landénien selon le scénario n°7

#### 7.3.2 SYNTHÈSE

Pour estimer les échanges à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale, différents scénarii ont été réalisés. Ces scénarii considèrent une infiltration variable (faible, moyenne et élevée) ainsi qu'un prélèvement par puits de pompage variable (identique à 2013, augmenté de 50 % par rapport à 2013 et augmenté de 100 % par rapport à 2013).

Le TABLEAU 7-7 ci-après reprend une synthèse des estimations données au sein du CHAPITRE 7.3.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 7** 

	Flux entrant (Mm³/an)	Flux sortant (Mm³/an)	Balance globale (Mm³/an)
SCÉNARIO N°1	1.14 à 1.85	0.98 à 1.69	0.16
SCÉNARIO N°2	1.17 à 1.88	0.94 à 1.64	0.24
SCÉNARIO N°3	1.21 à 1.91	0.89 à 1.60	0.32
SCÉNARIO N°4	1.09 à 1.79	0.95 à 1.69	0.10 à 0.17
SCÉNARIO N°7	1.19 à 2.00	1.01 à 1.85	0.14 à 0.22

Tableau 7-7 : Synthèse des évaluations des flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale pour les scénarii étudiés

Les flux varient quelque peu avec la variation de la recharge. Cette variation est d'environ 5 % à la baisse en cas de recharge très faible et de 5 % à la hausse en cas de recharge très élevée. Compte tenu des variations climatiques et de l'incertitude propre au modèle hydrogéologique, la balance globale entre la Région Flamande et la Région de Bruxelles-Capitale est comprise globalement entre 0.10 Mm³/an et 0.22 Mm³/an (en direction de la Région de Bruxelles-Capitale). Le flux entrant dans la Région de Bruxelles-Capitale est compris entre 1.09 et 2.00 Mm³/an. Le flux sortant de la Région de Bruxelles-Capitale est compris entre 0.89 et 1.85 Mm³/an.

Dans tous les cas, les flux entrants principaux sont situés :

- le long de la frontière Sud;
- le long de la frontière Est.

Les flux sortants principaux sont situés :

- le long de la frontière Nord ;
- le long de la frontière Ouest.

Cette balance positive vers la Région de Bruxelles-Capitale ne signifie pas qu'il y a une accumulation d'eau au sein de l'aquifère dans la Région. Elle compense uniquement les prélèvements anthropiques.



Chapitre 7

**Page 203** 

### **CONCLUSIONS, PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS**

Le présent rapport a pour objectif de présenter à l'IBGE le modèle hydrogéologique final pour la masse d'eau souterraine du Landénien (état du modèle au 19 novembre 2016) développé par AQUALE sprl.

Après une brève introduction (CHAPITRE 1) accompagnée d'une description succincte du logiciel de modélisation hydrogéologique utilisé (CHAPITRE 2), le rapport présente le modèle conceptuel (CHAPITRE 3) ainsi que la construction du modèle numérique (CHAPITRE 4). Ces CHAPITRES 3 et 4 définissent les limites du modèle et la manière de représenter le fonctionnement hydrogéologique global.

Le CHAPITRE 5 est ensuite consacré à la calibration du modèle hydrogéologique en régime permanent pour les périodes de mai – juin et de novembre 2013, puis en régime transitoire (calibration et validation) pour la période 1970 - 2013.

Il a été démontré que le modèle hydrogéologique est très bien calibré en régime permanent pour les deux périodes de référence et bien calibré en régime transitoire pour la période 1970 - 2013. En effet, les niveaux d'eau et les directions d'écoulement sont globalement très bien reproduits au sein de la Région de Bruxelles-Capitale et à proximité, comme en attestent les indicateurs de calibration repris ci-dessous (calculés sur la base des points de mesure situés en Région de Bruxelles-Capitale) :

- Pour la période de mai juin 2013 :
  - SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square): 2.37 %;
  - SRMS (Scaled Root Mean Square): 1.27 %;
  - CD (Coefficient of Determination): 0.77;
- Pour la période de novembre 2013 :
  - SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square): 2.35 %;
  - SRMS (Scaled Root Mean Square): 1.27 %;
  - CD (Coefficient of Determination): 0.77.

En ce qui concerne la reproduction des débits, celle-ci est considérée comme acceptable dès lors que tous les débits sont bien reproduits puisque la valeur simulée se situe dans la fourchette de valeurs acceptables.

En régime transitoire, la qualité de la calibration est jugée suffisante. Il est considéré que la calibration pourrait être améliorée à la condition d'améliorer la connaissance des données de base et ainsi accroître le degré de confiance. Sur la base des données actuellement à disposition, la calibration ne peut être améliorée sans qu'il ne s'agisse de fausse précision.

Sur cette base, les hypothèses ayant permis de construire le modèle conceptuel et a fortiori le modèle numérique sont validées.

Le CHAPITRE 6 concerne l'étude de sensibilité. Celle-ci a été réalisée sur bon nombre de paramètres d'entrée du modèle hydrogéologique, à savoir :

- l'infiltration;
- la conductivité hydraulique;
- les débits prélevés par pompage (historique);
- les niveaux d'eau imposés aux rivières ;
- la porosité ;
- le coefficient d'emmagasinement;
- les débits prélevés par pompage (fictif).



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN

Rapport final (phase II)

DECEMBRE 2016

Page 204

**Chapitre 8** 

Les impacts de modifications de ces paramètres ont été évalués sur :

- la piézométrie ;
- les débits ;
- l'indicateur de qualité SRMS.

Il a ainsi été démontré que l'influence de modifications des niveaux d'eau imposés aux rivières et de la porosité était largement inférieure à celle de l'infiltration, de la conductivité hydraulique et des débits prélevés par pompage. Pour cette raison, c'est l'incertitude existant sur ces trois derniers paramètres qui a été prise en considération pour évaluer l'incertitude sur les résultats présentés au **CHAPITRE 7**.

L'incertitude liée au coefficient d'emmagasinement et aux débits fictifs n'a pu être évaluée dès à présent. Il est toutefois fortement recommandé de poursuivre la collecte des données historiques afin de préciser la localisation, la durée et l'ampleur des débits historiques et ainsi valider le coefficient d'emmagasinement imposé au modèle.

Les objectifs du modèle sont repris ci-dessous (avec indication du chapitre reprenant les résultats associés) :

- estimer les ressources disponibles (CHAPITRE 7.2);
- quantifier les échanges d'eau souterraine avec la Région Flamande (CHAPITRE 7.3).

Pour répondre à ces objectifs, plusieurs scénarii ont été réalisés dans les conditions suivantes :

- en régime permanent, avec une infiltration calculée sur la base de l'eau utile moyenne à très long terme et avec un volume prélevé par les puits en Région de Bruxelles-Capitale :
  - o identique à celui de 2013 (SCÉNARIO N°1);
  - o augmenté de 50 % par rapport à 2013 (SCÉNARIO N°2);
  - augmenté de 100 % par rapport à 2013 (SCÉNARIO N°3);
- en régime transitoire sur une période de cinq années, avec une infiltration représentative d'une alimentation faible et avec un volume prélevé par les puits en Région de Bruxelles-Capitale :
  - o identique à celui de 2013 (SCÉNARIO N°4);
  - augmenté de 50 % par rapport à 2013 (SCÉNARIO N°5);
  - o augmenté de 100 % par rapport à 2013 (SCÉNARIO N°6);
- en régime transitoire sur une période de cinq années, avec une infiltration représentative d'une alimentation élevée et avec un volume prélevé par les puits en Région de Bruxelles-Capitale :
  - identique à celui de 2013 (SCÉNARIO N°7);
  - augmenté de 50 % par rapport à 2013 (SCÉNARIO N°8);
  - o augmenté de 100 % par rapport à 2013 (SCÉNARIO N°9).

Chacun de ces scénarii est accompagné de simulations visant à évaluer l'incertitude sur les résultats.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 8** 

#### **OBJECTIF 1 – ESTIMATION DES RESSOURCES DISPONIBLES**

Pour estimer les ressources disponibles, l'évolution des niveaux d'eau de la *nappe du Landénien* a été étudiée pour différents scénarii. Ces scénarii considèrent une infiltration variable (faible, moyenne et élevée) ainsi qu'un prélèvement par puits de pompage variable (identique à 2013, augmenté de 50 % par rapport à 2013 et augmenté de 100 % par rapport à 2013).

Le TABLEAU 8-1 ci-après reprend une synthèse des estimations.

	Contexte piézométrique
SCÉNARIO N°1	Référence 2013
SCÉNARIO N°2	- 0.5 à - 1.5 m
SCÉNARIO N°3	- 1.0 à - 3.0 m
SCÉNARIO N°4	- 5.0 à 0.0 m
SCÉNARIO N°5	- 5.0 à - 0.5 m
SCÉNARIO N°6	- 5.0 à - 1.0 m
SCÉNARIO N°7	+ 1.0 à + 8.0 m
SCÉNARIO N°8	- 1.0 à + 5.0 m
SCÉNARIO N°9	- 2.0 à + 5.0 m

Tableau 8-1: Synthèse des évaluations des ressources pour les 9 scénarii

En plus de ces scénarii et de leurs résultats, l'information majeure concernant l'évolution de la *nappe du Landénien* est que son niveau piézométrique est en croissance depuis maintenant de très nombreuses années. C'est principalement cette observation qui permet de conclure que les ressources disponibles de cet aquifère sont actuellement suffisantes et en adéquation avec le niveau d'exploitation.

Les différents scénarii l'ont montré, l'aquifère est assez sensible aux sollicitations par pompage. Ainsi, une augmentation importante des sollicitations créera un rabattement potentiellement important des niveaux d'eau au sein de la Région de Bruxelles-Capitale. Cela peut également être confirmé sur la base des données historiques. Le niveau d'eau très bas de la seconde moitié du vingtième siècle remonte progressivement, assez lentement, et sur une zone géographique très importante. Plus récemment, les pompages réalisés à proximité du bâtiment de Bruxelles Environnement pour tester les installations géothermiques ont provoqué des rabattements importants et sur des distances relativement grandes. La remontée des niveaux d'eau a pris plusieurs mois pour revenir à un état d'équilibre, suite à ces mêmes tests.

Il peut donc être conclu que le niveau actuel des ressources est suffisant compte-tenu du niveau d'exploitation actuel mais que cela ne sous-entend pas que l'exploitation peut-être fortement augmentée compte-tenu de la sensibilité de l'aquifère aux augmentations de prélèvement (cet aspect étant confirmé par l'historique des mesures et par les différents scénarii simulés).



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 8** 

IBGE - HYDROLAND R-2016-043 DECEMBRE 2016

**Page 206** 

#### **OBJECTIF 2 – QUANTIFICATION DES ÉCHANGES ENTRE RÉGIONS**

Pour estimer les échanges à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale, différents scénarii ont été réalisés. Ces scénarii considèrent une infiltration variable (faible, moyenne et élevée) ainsi qu'un prélèvement par puits de pompage variable (identique à 2013, augmenté de 50 % par rapport à 2013 et augmenté de 100 % par rapport à 2013).

Le TABLEAU 8-2 ci-après reprend une synthèse des estimations.

	Flux entrant (Mm³/an)	Flux sortant (Mm³/an)	Balance globale (Mm³/an)
SCÉNARIO N°1	1.14 à 1.85	0.98 à 1.69	0.16
SCÉNARIO N°2	1.17 à 1.88	0.94 à 1.64	0.24
SCÉNARIO N°3	1.21 à 1.91	0.89 à 1.60	0.32
SCÉNARIO N°4	1.09 à 1.79	0.95 à 1.69	0.10 à 0.17
SCÉNARIO N°7	1.19 à 2.00	1.01 à 1.85	0.14 à 0.22

Tableau 8-2 : Synthèse des évaluations des flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale pour les scénarii étudiés

Les flux varient quelque peu avec la variation de la recharge. Cette variation est d'environ 5 % à la baisse en cas de recharge très faible et de 5 % à la hausse en cas de recharge très élevée. Compte tenu des variations climatiques et de l'incertitude propre au modèle hydrogéologique, la balance globale entre la Région Flamande et la Région de Bruxelles-Capitale est comprise globalement entre 0.10 Mm³/an et 0.22 Mm³/an (en direction de la Région de Bruxelles-Capitale). Le flux entrant dans la Région de Bruxelles-Capitale est compris entre 1.09 et 2.00 Mm³/an. Le flux sortant de la Région de Bruxelles-Capitale est compris entre 0.89 et 1.85 Mm³/an.

Dans tous les cas, les flux entrants principaux sont situés :

- le long de la frontière Sud ;
- le long de la frontière Est.

Les flux sortants principaux sont situés :

- le long de la frontière Nord ;
- le long de la frontière Ouest.

Cette balance positive vers la Région de Bruxelles-Capitale ne signifie pas qu'il y a une accumulation d'eau au sein de l'aquifère dans la Région. Elle compense uniquement les prélèvements anthropiques.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 8** 

**Page 207** 

IBGE - HYDROLAND R-2016-043 DECEMBRE 2016

#### **CONCLUSION GÉNÉRALE**

La masse d'eau des Sables du Landénien s'écoule depuis le Sud-Est vers le Nord-Ouest en Région de Bruxelles-Capitale. Les flux entrants principaux sont localisés le long des frontières Sud et Est. Les flux sortant principaux sont localisés le long des frontières Nord et Ouest.

La piézométrie est principalement influencée par la variation de la recharge, et donc de la pluviométrie, de la température extérieure et de l'urbanisation (au niveau de la zone d'alimentation, donc hors de la Région de Bruxelles-Capitale). Les prélèvements par captage ont également une influence très importante sur la piézométrie. Cela est clair compte-tenu des données de piézométries historiques mais également par l'intermédiaire des résultats obtenus à l'aide des différents scénarii.

L'état actuel des ressources est satisfaisant et en progression importante depuis de nombreuses années. Il restera satisfaisant pour autant que l'exploitation de l'aquifère reste raisonnable compte-tenu du fait qu'il a été observé que ce dernier était très sensible aux variations des débits de prélèvement.

#### PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Le modèle hydrogéologique est très bien calibré et apte à reproduire une série de phénomènes hydrogéologiques complexes. L'outil, fourni à l'IBGE, pourra dès lors être utilisé à des fins prédictives pour la bonne gestion de la masse d'eau des Sables du Landénien en Région de Bruxelles-Capitale.

Dans le but d'améliorer davantage sa capacité prédictive et par le principe de précaution d'usage pour la protection de l'environnement, le performant outil développé serait idéalement enrichi par l'acquisition de nouvelles données afin de réduire les sources d'incertitudes sur les résultats identifiées et inhérentes à tout modèle. Il conviendrait par conséquent en priorité d'affiner les connaissances concernant :

- l'historique des débits prélevés au sein de la masse d'eau et à l'origine de la remontée piézométrique observée à long terme (cela inclut également des précisions à obtenir sur le(s) puits générant un rabattement important dans la partie Nord-Ouest du modèle et l'éventuel élargissement du modèle dans cette zone afin de prendre en considération les variations temporelles du débit de ce(s) puits) ;
- la piézométrie dans la moitié Sud de la Région de Bruxelles-Capitale par la mise en place de nouveaux piézomètres et la réalisation de campagnes piézométriques plus complètes ;
- l'estimation de l'infiltration, paramètre auquel le modèle est assez sensible.

En second lieu, il serait intéressant d'améliorer l'évaluation du débit drainé par les rivières et ruisseaux afin d'obtenir des débits plus contraignants pour calibrer le modèle hydrogéologique.

L'obtention de données plus précises en ce qui concerne les prélèvements par pompage semble également prioritaire eu égard à la sensibilité importante du modèle vis-à-vis de cette donnée, excepté pour des cas particuliers.

Ces nouvelles données sources et leur intégration dans le modèle hydrogéologique auraient pour conséquence directe une diminution des incertitudes sur les résultats.

Dans le cas d'une exploitation du modèle hydrogéologique pour répondre à des objectifs plus locaux ou différents de ceux définis pour la présente étude, l'utilisateur doit impérativement vérifier la validité du modèle conceptuel compte tenu du fait que le modèle a été construit pour répondre à des objectifs régionaux.



RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN Rapport final (phase II)

**Chapitre 8** 

IBGE - HYDROLAND

R-2016-043

DECEMBRE 2016

Rapport final rédigé à Noville-les-Bois le 15 décembre 2016.

O. BOUHON

Ir. Hydrogéologue Responsable Permitting AQUALE s.p.r.l.



# Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement

# RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN

Rapport final (phase II)

Annexe 1 : Présentation détaillée du logiciel FEFLOW®

R-2016-043

**DECEMBRE 2016** 





**FEFLOW**<sup>®</sup> is offered in *six* feature levels:

Symbol	Hierarchical level of feature extent	FEFLOW license ident
0	Flow 2D	F2
0	0 + Mass 2D	FM2
2	0 + Heat 2D + Flow 3D	F3
8	2 + Mass 3D	FM3
4	2 + Heat 3D	FH3
6	6 + Heat 3D	FMH3

Any level includes all the features of all lower levels. Accordingly, license pricing increases with feature level. Symbols indicate the lowest level at which the respective feature is available. For example, the symbol ② denotes features that are available at levels ②, ③, ③ and ⑤. Features available at *all* levels are indicated by the symbol ①.

### 1 Basics

	FEFLOW
Integrated pre- and postprocessing	0
Interactive graphics	0
Data interfacing to GIS	0
Data interfacing to CAD	0
Programming interface (C, C++)	0
No internal software limits	0
Microsoft windows platforms	0
LINUX/UNIX platforms	0
64-bit technology	0

# 2 Physics

	FEFLOW
Darcy fluid flow in porous media	0
Variably saturated porous media	0
Free surface (phreatic) flow	0
Single-species mass transport	0
Multi-species reactive mass transport	0
Multi-phase flow and transport	
Heat (nonisothermal) transport	2
Variable-density transport	0
Thermohaline flow	2
Multi-diffusive convection	0

### 2 Continued from Physics

	FEFLOW
Fracture flow	0
Fracture mass transport	0
Fracture heat transport	2
Transient problems	0
Steady problems	0

### 3 Mathematics

	FEFLOW
Finite element method (FEM)	0
Finite difference method (FDM)	
Finite volume method (FVM)	
Discrete feature elements (fracs)	0
Adaptive time stepping (ATS)	0
Adaptive mesh refinement (AMR)	0

### 4 Dimensions

	FEFLOW
Three dimensions (3D)	2
Quasi three dimensions (Q3)	
Two-dimensional vertical plane (2V)	0
Two-dimensional horizontal plane (2H)	0

### 4 Continued from Dimensions

	FEFLOW
Axisymmetric (meridional) plane (2X)	0
One dimension (1D)	

### 5 Meshing

	FEFLOW
Prismatic elements in 3D	2
Tetrahedral elements in 3D	
Unstructured triangular meshes	0
Structured quadrilateral meshes	0
Delaunay meshes	0
Using add-ins in mesh generation	0
Refinement techniques	0
Derefinement (encoarsening) techniques	0
Node movement	0
Element edge flipping	0
Element deletion	0
Mesh reflection	0
Mesh coordinates transformation	0
Moving mesh for 3D free-surface problems	2

## 6 Maps

	FEFLOW
Loading background maps	0
Use maps for mesh design	0
Joining maps for direct data assignment	0
Use maps in 3D drawings	0

## 7 Data Support

	FEFLOW
Direct Read of Vector Data	
ESRI Shapefiles	0
ESRI coverages	0
ASCII	0
Internal binary interchange format (PLX)	0
Direct Read of CAD Data	
AutoCAD DXF	0
Direct Read of Raster Data	
Tagged image file format (TIFF)	0
JPEG file interchange format (JFIF)	
Exporting Vector Data	
ESRI Shapefiles	0
ASCII	0

### 7 Continued from **Data Support**

	FEFLOW
Internal binary interchange format (PLX)	0
Exporting CAD Data	
AutoCAD DXF	0
Exporting Raster Data	
ESRI ASCII grids	0
Surfer grids	0

# 8 Data Management

	FEFLOW
Direct linkage to dBase IV tables	0
Direct linkage to ASCII tables	0
Direct linkage to ESRI INFO databases	0

# 9 Data Regionalization

	FEFLOW
Akima interpolation	0
Inverse distance weighting (IDW)	0
Kriging	0
Customized data mapping techniques	0
Polygon-related regionalization (joining)	0

### 9 Continued from **Data**

	FEFLOW
Interpolation of time-varying 1D functions	0
Interpolation of time-varying 2D functions	0

### 10 Editing

	FEFLOW
Geometry Construction Tools Including	
Point-and-click location with mouse	0
X, Y coordinate input with mouse	0
Snap to vertex, endpoint, or along the edge	0
Undo/redo operations	0
Assign edges as parabolic segments	0
Assign edges as circular segments	0
Move, rotate, split, delete, copy, and paste operations	0
Intersection of two segments	0
Auto-close for polygons	0
Attribute Data Assigning Tools for Initial, Boundary and Material Conditions Including	
Mouse selection	0
Data mapping (regionalization)	0
Tools for data exploring and retrieval	0

## 10 Continued from Editing

	FEFLOW
Time-varying databases for 1D curves and 2D distributions	0
Copy, joining and debug operations	0
Data inheritance in mesh enrichment and layer (re-)configuration	0
Trimming layer thicknesses and distances	0

## 11 Boundary Conditions

	FEFLOW
Dirichlet-type	0
Neumann-type	0
Cauchy-type (leakage)	0
Well-type	0
All boundary conditions can be transient	0
All boundary conditions can be constrained	0
Specific Boundary Conditions	,
Hydraulic head	0
Pressure	0
Seepage face	0
Saltwater head	1
Saturation	0
Moisture content	0

### 11 Continued from Boundary

	FEFLOW
Integral flux	2
Free drainage	0
Multi-layer well (well bore condition)	2
Borehole heat exchanger (BHE)	4
Total mass flux	0
Total heat flux	2
Dispersive mass flux	0
Conductive heat flux	2

### **12 Boundary Constraints**

	FEFLOW
Neumann constraint for Dirichlet-type	0
Dirichlet constraint for Neumann-type	0
Neumann constraint for Cauchy-type	0
Dirichlet constraint for Cauchy-type	0
Dirichlet constraint well-type	0
All constraints can be transient	0

## 13 Material Data (General)

	FEFLOW
Time-constant distributions	0
Time-variable distributions	0
User-defined formula for sink/source relationships	0
Anisotropy of hydraulic conductivity in 2D	0
Axis-parallel anisotropy of hydraulic conductivity in 3D	2
Layer-oriented anisotropy of hydraulic conductivity in 3D	2
General (full) anisotropy of hydraulic conductivity in 3D	2
Anisotropy factor of solid heat conductivity in 3D	4

### 14 Unsaturated Material Data

	FEFLOW
Empirical Laws for Capillary Pressure and Relative Conductivity Relations	
van Genuchten - Mualem (α-n params)	0
van Genuchten - modified ( $\alpha$ - $n$ - $m$ params) with regularization	0
Splines (cubic; monotonic, non-monotonic)	0
Brooks - Corey	0
Haverkamp	0
Exponential	0

### 14 Continued from Unsaturated

	FEFLOW
Linear	0
Hysteresis	0

# 15 Model Options for Variably Saturated Flow Problems

	FEFLOW
Standard Richards equation	0
Mixed (saturation-pressure) formulation	0
Primary variable substitution (switching)	0
Picard method	0
Newton method	0
Residual error control	0
Kirchhoff integral transformation in steady-state	0
Gravity direction setting	0

# 16 Free Surface (Phreatic) Conditions

	FEFLOW
Unconfined aquifers	0
Confined aquifers	0

# 16 Continued from Free Surface (Phreatic) Conditions

	FEFLOW
Moving (adaptive) mesh strategy	2
Fixed mesh strategy	2
Multiple free surfaces (perched water)	2
Control of partially-saturated cells/elements by a linear relation of the cell filling height	2
Control of dry cells/elements by a residual pseudo-saturation	2
Control of dry cells/elements by deletion	

### 17 Fracture Elements

	FEFLOW
Flow Laws	
Darcy	0
Hagen-Poiseuille	0
Manning-Strickler	0
Pipes (1D)	0
Faces (2D)	2
Horizontally placed	0
Vertically placed	2
Arbitrarily placed in 3D	
Variable-density flow and transport	0

### 17 Continued from Fracture Elements

	FEFLOW
Extended Oberbeck-Boussinesq approximation	0

### **18 Chemical Reactions**

	FEFLOW
Equilibrium reaction (sorption)	
Henry	0
Freundlich	0
Langmuir	0
Nonequilibrium reaction	
1st order linear decay	0
Michaelis-Menten	0
Decay chains	0
Multi-species reaction kinetics	
Degradation	0
Arrhenius	0
Monod	0
User-specified type with an interactive <b>reaction kinetics editor</b> FEMATHED: Freely editable reactions using a fast formula interpreter, including conditional expressions	0

## 19 Variable Fluid Density

	FEFLOW
Default Oberbeck-Boussinesq approximation	0
Extended Oberbeck-Boussinesq approximation	0
Constant expansion	0
Variable (higher-order) expansion	2
Gravity direction setting	0
Viscosity dependency	0
User-defined formula for viscosity relationships	0
Non-Fickian (high-concentration) mass flux	0
Consistent velocity approximation	0
Variable fluid density in fractures	0

### **20 Time Stepping Methods**

	FEFLOW
Constant time steps (user-predefined)	0
Variable time steps (user-predefined)	0
Adaptive error-controlled time steps	0
Implicit in time	0
Explicit in time	
Mixed, 2nd-order scheme (Crank-Nicolson)	0
Time step modifiers (maximum, increase limits)	0



### 21 Numerical Stabilization

	FEFLOW
Upstream weighting (unsaturated problems)	0
Streamline upwinding (SU)	0
Full upwinding (FU)	0
Shock capturing (SC)	0
Petrov-Galerkin least-square upwinding (PGLS)	0

# 22 Sparse Matrix Equation Solvers

	FEFLOW
Preconditioned conjugate gradient method (PCG)	0
Algebraic multigrid (AMG) with OMP extension	0
Restarted orthogonalization-minimization method (ORTHOMIN)	0
Restarted generalized minimal residual method (GMRES)	0
Conjugate gradient square method (CGS)	0
Bi-conjugate gradient stable method (BiCGSTAB)	0
Postconditioned bi-conjugate gradient stable method (BiCGSTABP)	0
Direct Gaussian equation solvers	0

# **22** Continued from **Sparse Matrix Equation Solvers**

	FEFLOW
Solver parameter settings (stop criteria, maximum iteration numbers, etc.)	0

### 23 Parallel Computing

	FEFLOW
Supports hyper-threading in processor units	0
Supports multiprocessor multicore hardware systems	0

# 24 Particle Tracking

	FEFLOW
Stationary	0
Transient	0
Isochrones	0
2D	0
3D	2
Forward	0
Backward	0
Methods	

### 24 Continued from Particle Tracking

	FEFLOW
Pollock	0
4th-order Runge-Kutta	0
Relevant area of influence (RAI)	2

# 25 Resulting Data Evaluation Tools

	FEFLOW
Diagrams for observation points and wells	0
Diagrams for balanced flux quantities	0
2D graphics	0
3D graphics	2
Budget analysis	0
Fluid flux analysis	0
Content analysis (volume, mass, energy)	0
Spatial operations (differences)	0
Temporal operations (difference, deviation, cumulative changes)	0
Creating 2D cross-sectional models from 3D	2
Reverse flow field analysis	0
Legend editing	0
Diagram editing	0

# **25** Continued from **Resulting Data Evaluation Tools**

	FEFLOW
Scatter plots for spatial and temporal data	0

## **26 Resulting Data Graphics**

	FEFLOW
Isoline contouring (2D)	0
Isoline contouring (3D)	2
Fringes (2D)	0
Fringes (3D)	2
Vector plotting (2D)	0
Vector plotting (3D)	2
Visualization of vector fields by texture transport (2D)	
Visualization of vector fields by texture transport (3D)	
Pathlines (2D)	0
Pathlines (3D)	2
Isochrones (2D)	0
Isochrones (3D)	2
Streamlines (2D)	0
Isosurfaces (3D)	2
Cutting (3D)	2

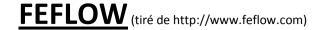
# 26 Continued from Resulting Data

	FEFLOW
Map overlay (3D)	2
Fences and cross-sections (3D)	2
Animation, video creation (2D)	0
Animation, video creation (3D)	2

### **27 Interface Modules**

	FEFLOW
Parameter estimator (PEST), steady and unsteady	0
Coupling with the surface water model MIKE11 <sup>†)</sup> (unsteady groundwater - river network simulation)	0

<sup>†)</sup> requires extra license



### **OVERVIEW**

#### 3D Groundwater Flow, Mass, and Heat Transport Finite Element Groundwater Modeling Software

FEFLOW FMH3 <sup>®</sup> ( Finite Element subsurface FLOW system) is one of the most sophisticated software packages available for the modeling of flow and transport processes in porous media under saturated and unsaturated conditions.

Integral components are interactive graphics, a GIS interface, data regionalization and visualization tools and powerful numeric techniques. These components ensure an efficient working process building the finite element mesh, assigning model properties and boundary conditions, running the simulation, and visualizing the results.

#### FEFLOW FMH3 major features are:

- Two or three dimensional modeling
- Stationary or instationary simulation
- Computation of saturated / variable saturated or unsaturated conditions
- Computation of mass and/or heat transport
- Integration of chemical reactions and degradation mechanisms
- Asorption using sorption isotherms by Henry, Freundlich or Langmuir
- Consideration of variable fluid density because of temperature or salt concentration
- One and two dimensional finite elements for flow and transport in fractures, channels or tubes
- FEFLOW FMH3 is handled exclusively by interactive graphical user interfaces.
- The complexity of problem design, problem generation and solution is completely kept in the background.
- The system is completely self-explaining
- The system is based on a hierarchical structure
- FEFLOW FMH3 is available for different operating systems of the UNIX as well as the Windows world.
- FEFLOW FMH3 contains more than 1.100.000 lines of code in ANSI C/C++.

FEFLOW is a registered trademark of WASY GmbH

### **APPLICATIONS**

FEFLOW FMH3 offers a virtually unlimited application area in the groundwater flow and transport processes simulation including:

- Study of pollutant dispersion in case of contaminated sites, waste sites or averages
- Evaluate remediation and decontamination strategies in case of contaminated groundwater
- Study of groundwater drawdown and rise in mining areas and reservoir construction
- Isotope computation for detection of groundwater age
- · Assessment of availability of groundwater resources
- · Estimation and control of strategies for groundwater management
- Design of well-head protection zones
- Studies for environmental impact assessments
- Design of groundwater monitoring programs
- Applications in research

#### **Groundwater Modeling**

Determine the spatial and temporal distribution of groundwater heads and contaminants.

#### **Contaminant Transport**

Estimate of duration and travel times of a pollutant in aguifers.

#### **Seawater Intrusion**

Evaluate the impact of sea water intrusion due to groundwater pumping and/or mining activities along coastal regions.

#### **Nuclear Waste Disposal**

Simulate the combined effects of geothermal gradients and saline groundwater flow for deep well injection of nuclear wastes.

#### **Mine Dewatering**

Design and optimize pumping well locations and pumping rates and determine the influence of dewatering activities on local and regional groundwater supplies.

#### **Groundwater Remediation**

Evaluate remediation alternatives, plan remediation strategies, and optimize groundwater remediation system designs.

#### **Dam Seepage**

Analyze moisture dynamics and seepage through the dam.

#### **Aquifer Recharge**

Predict rates of infiltration/aquifer recharge due to precipitation, storm water retention ponds or artificial aquifer recharge schemes.

### **DETAILS**

#### **PROBLEM CLASSES**

Analysis of both saturated (groundwater) and unsaturated aquifers is possible. For unsaturated conditions the nonlinear Richards equation is available as well as the van Genuchten-Mualem, Brooks-Corey and Haverkamp equations. Alternatively, for three dimensional regional unconfined aquifers a multiple free surface approach using moving meshes has been developed.

#### Transient or steady-flow conditions:

The flow and transport can be either transient or steady-state.

#### **Modeling of the Unsaturated Zone**

- Consideration of variable saturation
- Different paramter models:
  - o van Genuchten
  - Brooks-Corey
  - o van Genuchten modified
  - o Haverkamp
  - Exponential
  - o Linear
- Different forms of the Richards equation
- Consideration of capillary hysteresis
- Parameter fitting for different parameter models in FE-LM<sup>2</sup>

#### **Mass Transport Modeling**

- Consideration of sorption according to the:
  - Henry
  - o Freundlich
  - o Langmuir isotherms
- Decay processes:
  - o Reactions of 1. order
  - o Michaelis-Menten reactions
  - radioactive decay using an external module
- Parameter fitting for the sorption isotherms in FE-LM<sup>2</sup>
- Linear or nonlinear dispersion
- Galerkin-FEM, Streamline-, Shock-Capturing-, Least-Square- or Full-Upwinding
- Density coupled modeling for concentration-dependent fluid density and fluid viscosity
- Simultaneous modeling of heat and mass transport

#### Multi or single component Transport (species)

The conservation equation is solved for a single component governed by advection, diffusion, mechanical dispersion, retardation, zero and first-order reaction terms.

FEFLOW allows simulating multi-species transport with an arbitrary number of components. Besides an intuitive definition of arbitrary reaction terms in the new equation editor, Degradation, Arrhenius and Monod reactions are available as pre-defined equations.

Altogether, a reactive term can use an arbitrary number of components. The mass transport parameters, like diffusion, dispersion, sorption and reaction rate can be individually edited and spatially distributed.

#### **Heat Transport Modeling**

- Heat conductance and storage in the fluid phase
- Heat conductance and storage in the matrix
- User-defined heat transport parameters of fluid and matrix
- Censity-coupled modeling for temperature-dependent fluid density and fluid viscosity
- Simultaneous modeling of heat and mass transport

#### **IFM**

Under some circumstances it can be necessary to have more influence on the simulation, data regionalization, visualization, and more. In this case FEFLOW provides a tool called Interface Manager (IFM).

The IFM manages an arbitrary number of external modules. An installed, registered, and activated module can access FEFLOW's internal data store and method pool via a published programming interface (API).

Depending on the principle of integration with FEFLOW's internal methods two basic types of interfaces can be subdivided: (1) the external module replaces the FEFLOW-internal methods or (2) the external module extends the internal functionality.

Functions for the open programming interface IFM:

- 'Set' and 'Get' functions for fracture properties
- 'Set' and 'Get' functions for drying curve properties (hysteresis)
- Setting of predictor values for predictor/corrector time-stepping schemes
- Extended functions for boundary constraint conditions
- 'Get' and 'Set' functions for adaptive mesh refinement (AMR) estimators
- Various functions for time-step control parameters, solver types and specific options settings

#### **PEST**

The interface to the automatic parameter estimation program allows optimizing transient processes.

#### **MESH GENERATION**

#### Superelement mesh

The mesh editor allows to automatically close the actual superelement if you construct more than one, eliminating the laborious task of clicking on existing superelement nodes is no longer necessary.

#### Gridbuilder

For the generation of the finite element mesh, the mesh generator Gridbuilder is available. Gridbuilder has its main advantages in very flexible refinement along add-ins and polygon borders and in the handling of complex superelement meshes.

#### Additional options for Triangle mesh generator

Using the Triangle mesh generator, the mesh can be refined along specific sections of polygon borders or add-ins. A target element size can be specified to define the maximum edge length for elements at borders or add-ins.

#### Edge flipping for mesh improvement

The mesh geometry editor can flip edges for two neighboring elements in triangle meshes. This is useful for improving the mesh quality, and avoiding obtuse angles at specific locations.

#### **BOUNDARY CONDITIONS**

Dirichlet, Neumann and Cauchy-type boundary conditions can be specified for flow, mass and heat. A so-called 4th kind boundary condition exists for singular wells. These boundary conditions can be arbitrarily placed at nodal points of a two or three dimensional mesh. All boundary conditions can be specified either as steady-state or as transient conditions.

For each boundary condition constraint formulations can be combined. They represent limitations of boundary conditions and result from the requirement that boundary conditions should only be valid as long as minimum and maximum bounds are satisfied. The constraints can also be time-dependent

#### **Specified internal conditions**

There are no spatial and temporal limitations in prescribing boundary conditions and their corresponding constraints of a mesh. The boundary conditions are node-related while material parameters are element-related. Both nodal and elemental quantities can be transient if desired.

#### **Stresses**

Rainfall or evaporation are normally modeled by sink/source formulations. They may also be time-dependent. Pumping or injection conditions of singular wells are described by a boundary condition of 4th kind. Multi-layer pumping or injection wells are also accommodated in three dimensions.

#### Optional BC input: Pressure, Seepage Face, Saltwater Head, Saturation and Moisture Content

Instead of using values of hydraulic head, the Dirichlet boundary conditions can be done by using pressure values, setting a seepage face condition, automatically converting a saltwater head into a freshwater head or setting saturation or moisture content under unsaturated conditions.

#### **Multi-Layer Well Input Dialog**

Wells with screens in multiple layers can be input by specifying the top and bottom of the well screen(s), avoiding a manual selection of each slice in the range of the screening.

#### Layer-Related Evaluation of Fluid Flux for Multi-Layer Wells

For multi-layer wells, the flows into the well in the respective layers can be calculated by using the fluid flux analyzer.

#### **Natural Constraints**

FEFLOW allows setting natural constraints on the top and bottom slice to obviate a falling dry of the model or an increasing of the water table above the surface. Users can now set an additional constraint condition to the boundary condition either "water table" or "seepage face" types for the natural constraint.

#### **DISCRETE ELEMENTS**

#### User-defined reactions and source/sink terms in discrete elements

Arbitrary relationships for multi-species reactions and source/sink terms can also be specified in discrete elements using the formula editor.

#### Automatic switch-off of fracture elements in unsaturated soil

Discrete feature elements are automatically switched off if at one node of the element the pressure is below zero. This is done in both the unsaturated mode using Richards' equation and in phreatic

mode.

#### Mesh inspector for copying discrete feature data

Properties of an existing discrete element can be copied into the input boxes for new elements by hitting the left mouse button while using the Mesh inspector.

#### **Extended Oberbeck-Boussinesq approximation for fracture elements**

The extended Oberbeck-Boussinesg approximation is now also applied to discrete feature elements.

#### **PARAMETERS**

All parameters are handled on an elemental level, they can differ from element to element and it is possible to consider those as steady-state or transient quantities. Accordingly, parameter heterogenity, zoning or constant settings are arbitrarily possible.

The input and assignment of the parameter is done via a graphical problem attribute editor. This attribution encompasses different graphical assignment methods, and also interpolation techniques.

A more general programming interface is also available, which allows manipulation of parameters during simulation runs.

#### **Material and Physical Properties**

#### User-defined equations for source/sink and recharge

For the source/sink and in/outflow on top/bottom parameters in flow materials and for the source/sink parameters in mass and heat transport modeling an equation editor is available, so that user-defined relationships are possible.

#### Reactions in single-species transport can be limited to the fluid or solid phase only

For single-species transport, reactions can be limited to either the fluid or the liquid phase.

#### Additional parameters for user-defined reaction

The reaction kinetics editor provides additional parameters such as time, time-varying functions, and elemental reference distributions, for application in the user-defined chemical reactions.

#### Automatic generation of Euler angles for full 3D anisotropy

Using full 3D anisotropy with user-defined Euler angles, the initial Euler angles can be calculated automatically from the layer inclination.

#### Species-dependent density relationships

For each species a seperate ratio can be specified, considering different concentration-density relationships for the simulated species.

#### User-defined viscosity relationship

The built-in viscosity relationship can be replaced by user-defined relationships. The formula editor is used to specify an arbitrary equation.

#### Storage change is considered for time-varying storativity

In case of time-varying storativity, the change in storage due to changed storativity is now considered altered.

#### **Anisotropy**

Additional to the axis-parallel and layer-oriented systems of anisotropy, the Eulerian angles can freely be edited for representing complete 3D anisotropy.

#### **REFERENCE DATA**

#### Scatter plots for comparison of results and observation data

Scatter point plots are available for comparing both steady-state results with observation values and measured and calculated time curves. The locations of the compared points are indicated on the model domain, values are shown by tool tips.

#### **Elemental reference distributions**

Elemental reference distributions can be defined in the same way as the nodal parameter fields. These user-defined elemental parameter distributions can be used to incorporate arbitrary spatial parameter distributions in user-defined equations.

#### Import of observation points on multiple slices from shape files

In addition to the observation point names the slice number to put the observation point can also be imported from ESRI shape files.

#### **SOLVERS**

The solution of sparse equation systems can be solved either by iterative or direct techniques. As default and especially for large systems, the following, methods are available:

#### **Preconditioned Conjugate Gradient (PCG)**

Standard preconditioners such as the incomplete factorization (IF) technique and, alternatively, a modified incomplete factorization (MIF) technique based on the Gustafsson algorithm are used.

Alternatives for the CG-like solution of the unsymmetric transport equations include:

- Restarted ORTHOMIN (orthogonalization-minimization) method
- Restarted GMRES (generalized minimal residual) technique
- Lanczos-type methods such as CGS (conjugate gradient square), BiCGSTAB (bi-conjugate gradient stable) and BiCGSTABP (postconditioned bi-conjugate gradient stable)

#### **Crout Decomposition Scheme**

For small or ill-posed problems, direct Gaussian elimation techniques for symmetric and unsymmetric matrices are available. Here, the Reverse Cuthill-McKee (RCM) nodal reordering technique are used to minimize fill-in entries of the matrices.

#### New version of SAMG, supporting parallel computing

The OpenMP version of SAMG 2.2 supports parallel computing on machines with multiple processors and/or multiple-core processors. So now even the solution process itself can be done in parallel.

#### **SAMG**

The solver SAMG, especially approved for steady state problems, can be efficiently used for transient and mass transport models. The reduction of simulation time can be formidable with SAMG's parallel processing capabilities.

#### **NUMERICAL METHODS**

FEFLOW uses a Galerkin finite element numerical approach with a selection of numerical solvers and state-of-the-art tools for controlling and optimizing the solution process including:

- Fast and direct solvers such as the PCG and Restarted ORTHOMIN Methods with preconditioning
- Variable types of solution up-winding techniques are provided to minimize numerical dispersion
- Picard and Newton iterative techniques for non-linear flow problems and adaptive time stepping
- Contaminant transport processes include advection, hydrodynamic dispersion, linear and non-linear sorption isotherms, and first order chemical non-equilibrium
- Automated adaptive mesh refinement scheme to optimize the numerical solution in regions where steep gradients exist
- Real-time graphs of transient heads and concentrations at a number of points throughout

- the model domain are plotted during the solution process
- Simulation progress can be paused at any time to view intermediate results in three dimensions

#### **VISUALIZATION & POST PROCESSING**

Feflow supports a wide class of subsurface flow, mass and heat transport problems, provides an open data interface for importing, exporting (GIS interface) and programming (interface manager IFM) and also excompasses many graphical tools in the post processing analysis of the results.

#### **Transient particle tracking**

For an exact chase of particle tracks the new transient particle tracking can be used. The tracks can be computed for the simulated time range or a specific time period. Furthermore the particle start points or lines can be loaded and exported. In contrast to previous FEFLOW versions, the particle starting points around wells can be either distributed equally, spaced or corresponding to the flux distribution.

#### **Display and Analysis**

- Interactive 3D rotation and zoom
- 3D view of the model area (finite element mesh, material properties, computed distributions) with isolines, 3D isosurfaces, cross sections etc
- 2D view with isolines, velocity vectors, background maps, etc. as a vertical cross section or horizontal projection
- 3D and 2D particle tracking with isochrone markers
- Extensive export functions: vector graphics (ESRI Shape File, DXF, FEFLOW Plot File, ASCII), screendumps, data triplets/quads, diagram points, etc
- Creation of plot layouts with extensive additional features (background maps, legends, frames, text, etc) in FEPLOT for Windows (inclusive)
- Analysis of results in every time step as well as differential operations
- Comparison with reference data and distributions
- Creation of mass and energy balances for the model area or parts of it using the 'budget analyzer'
- Computation of flux through cross sections or single layers using the 'fluid flux analyzer'

FEFLOW comes with state-of-the-art visualization capabilities for creating high impact, three-dimensional graphics for displaying model results:

- Isolines and fringes
- Velocity vector fields
- Particle tracking (forward/reverse)
- Cross sections and fence diagrams
- 3D projections
- 3D Cut-Aways

All graphical editing is completed through FEPLOT, the Microsoft Windows based graphical design tool included with FEFLOW. Captured plots can be georeferenced to ensure exact overlay of the map

objects. File formats include FEPLOT \*.plx files, ESRI shape files, or ARC/INFO compatible ASCII files.

#### **Fence Diagrams**

FEFLOW creates cross sections and true fence diagrams to display mass concentrations, temperature distributions, computed hydraulic heads, streamline velocities, moisture & saturation distributions, and pressure distributions.

#### **Three Dimensional Projections**

Three-dimensional projections are helpful when describing computed hydraulic heads, streamline velocities, moisture & saturation distributions, and pressure distributions. The 3D projections options display these data overlaying the geo-referenced map objects for a better understanding of the simulation.

#### **Three-Dimensional Cut-Aways**

The Cut-Away-Viewer gives the user the ability to define a block portion of the model's body to be cut-away. It is a helpful tool to view parameter distributions in the inner part of the model. The cut-away can be defined by inserting screen related position coordinates in the menu or by moving the three-dimensional handlers on the models body via the mouse.

#### **Budget Analyzer**

The 'Budget' analyzer computes quantities of fluid masses and contaminant masses entering or exiting the simulated region, sub-regions or boundary sections. The balance computation takes into account only mesh nodes occupied by values for areal recharge or boundary conditions as listed below.

The computed quantities for the fluid and contaminant mass are:

- Fluxes along outer or inner boundaries, ie. borders occupied with Dirichlet, Neumann or Cauchy boundary conditions (1st, 2nd and 3rd kind) Injections and withdrawals through single wells (4th kind)
- Areal fluxes due to infiltration, recharge, leakage etc.
- Imbalance: Gain (+)/Loss(-)

#### **INCLUDED SOFTWARE**

#### **WGEO** map tool replaces FEMAP on Windows

On Windows systems, the georeferencing tool FEMAP, is replaced by the software WGEO for georeferencing, geoimaging and coordinate conversion. A license for WGEO Basis is delivered with FEFLOW.

#### **FEFLOW Explorer**

FEFLOW Explorer allows three dimensional visualizing of FEFLOW model properties and simulation results. Some of the features are automatic rotation, fly-over and video export. Alternatively hardware-accelerated or software-optimized OpenGL graphics can be used.

#### New bullets vector plot style

This style uses equal-sized line segments that are individually oriented and colored according to the local flow-vector orientation and magnitude, respectively. The vector direction of each line segment is illustrated by opacity, increasing from fully translucent to fully opaque along the segment. Compared to the arrow plot style, more detail of the flow field can be discerned especially in the slower-moving regions.

#### Wells and observation points can be shown

Wells and observation points can be displayed as emphasized "points". In addition, wells can also be displayed via surface flags and as pipes.

#### More supported image/map formats including 2D ESRI-shape files

In addition to the standard pixel image formats, vector images including 2D ESRI-shape files can be displayed as surface-mapped overlays. Multiple maps can be shown simultaneously.

#### Individual layers and slices accessible as plotting domains

Individual layers, slices, and the vertical hull can be used as plotting domains.

#### **Editable color sequences**

The color sequence associated with a data source can be individually edited via a convenient dialog. Color sequences are also easily inverted, exported, and imported. Several predefined sequences are available.

#### Animated clipping and dynamic plot-feature visibility with automatic cross-fading

Besides simulation time and object positioning, the autopilot now also controls clipping planes and plot-feature visibility over the duration of the presentation. The new dynamic clipping allows presentation (movie) effects such as a gradually extending cut-out section progressively exposing internal isosurfaces. Dynamic plot-feature visibility can be used to display multiple data sources in sequence, or to display features such as the finite-element mesh or a surface map during only a portion of the entire presentation, with smooth cross-fading at the beginning and end of the visibility period.

#### Off-screen (background) export rendering

During image (.bmp) or movie (.avi) export, graphics are rendered directly to the file without any screen capturing. This makes it possible to minimize the FEFLOW-Explorer window and to keep working while exporting a movie.

#### Redesigned memory layout permits loading of larger problems

All visible geometry vertices and their attributes are now managed in a way that permits direct, fast

drawing without having to use memory-expensive 'display lists' as in version 1.

#### **DOCUMENTATION**

FELOW includes a user's manual, (two) reference manuals, one dongle, and an installation CD-ROM. Technical support and upgrades are available for a duration of 30 days free of charge. An annual maintenance fee will be charged beyond the free 30 day period. Contact SWS for more information regarding the annual maintenance fee.

#### HARDWARE REQUIREMENTS

#### **Hardware Requirements (PC)**

- Pentium PC 133 or higher
- Exactly 256 color video mode with a resolution of 1280X1024 or higher
- 32 Mb RAM (64 or higher recommended for 3D models)
- 130 Mb free disk space
- Windows 98/NT/2000/XP/ME installed
- TCP/IP protocol installed
- X-Vision X Windows server (supplied w/ FEFLOW)

#### Hardware Requirements (UNIX)

- High resolution color graphics UNIX workstation, providing 8 Bit planes (25 simultaneous colors) and full 32-bit or 64-bit virtual memory architecture
- 32 Mb main memory
- 130 Mb free disk space
- recommended: RISC workstations with 1280 X1024 pixel
- UNIX System V or equivalent and optional NFS for networking

#### 64-bit technology for Windows and Linux

FEFLOW is now available for the 64-bit versions of Windows (XP X64 Edition, Server 2003 X64 Edition, and Vista X64 Edition) and Linux (SUSE 9.2, 9.3, 10.0, 10.1, Fedora Core 4 and 5, Ubuntu 6.06). 64-bit technology is essential for running large models requiring more than about 2 GB of RAM.

#### Parallel computing on Windows and Linux

Parallel computing on multi-processor machines or computers with multi-core processors is now supported on both Windows and Linux systems.

#### **Hummingbird Exceed as default X server**

The X server XVision is replaced by Hummingbird Exceed as the default X server on Windows systems.



### **DHI-WASY Software Training**

Modeling Subsurface Flow and Transport using

FEFLOW 6.0

DHI-WASY GmbH - Groundwater Modelling Centre in the DHI Group Introduction - 1



# DHI-WASY Software Training

Modeling Subsurface Flow and Transport using FEFLOW 6.0

Who we are ...

FEFLOW 6.0 Training

#### **DHI** Group



- DHI is an independent, self-governing research and consultancy organisation (non-profit)
- DHI builds competence and promotes technological development relevant to water, environment and health
- · DHI has ongoing activities world-wide
- DHI has a total staff of about 800



#### **DHI-WASY**

- Formerly
  - WASY
     Gesellschaft f
     ür Wasserwirtschaftliche Planungund Systemforschung mbH, founded 1990
  - DHI Wasser und Umwelt GmbH
     German subsidiary of DHI Group, founded 2004
- Merged to DHI-WASY GmbH in 2007
- About 70 permanent staff members in: Berlin (headquarter), Syke, Dresden, Bestensee Offices in Cologne, Stuttgart
- Areas
  - → Consulting
  - → Software Solutions
  - → Software Products



FEFLOW 6.0 Training

### DHI-WASY Groundwater Modelling Centre



- Focused groundwater competence within the DHI Group
- Staff: 10 people
- Three closely integrated main fields:
  - **FEFLOW Development**
  - **FEFLOW Services**
  - **Groundwater Consulting**

**FEFLOW 6.0 Training** 

Introduction - 5

### **FEFLOW Services Group**



### Our experienced staff assists you whenever needed by

- ... solving software problems
- ... giving advice on groundwater modeling
- ... analyzing sources of errors in your models
- ... additional explanation of functionality and providing background knowledge

### In addition, we offer

- Training courses
- Solutions and software customization
- Consulting in groundwater projects

#### **FEFLOW Services** Staff

- $\rightarrow$  Support
- → Training
- → IFM Solutions







FEFLOW 6.0 Training



# DHI-WASY Software Training

Modeling Subsurface Flow and Transport using FEFLOW 6.0

### Introduction

Introduction - 7

### FEFLOW - Subsurface Flow & Transport Model



Our Modeling Subject:

More than "just" Groundwater...

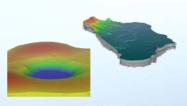
#### Subsurface Flow and Transport

The aim of the FEFLOW development is to cover not only the groundwater flow, but also to offer the complete package of related processes in one integrated model:

- Vadose (unsaturated) zone modeling
- Contaminant transport
- Heat transport
- Changing fluid properties (esp. density)
- Chemical reactions
- · and more ...



Our Top Development Goals: The software must be ...



Easy and Productive

to quickly master everyday groundwater projects



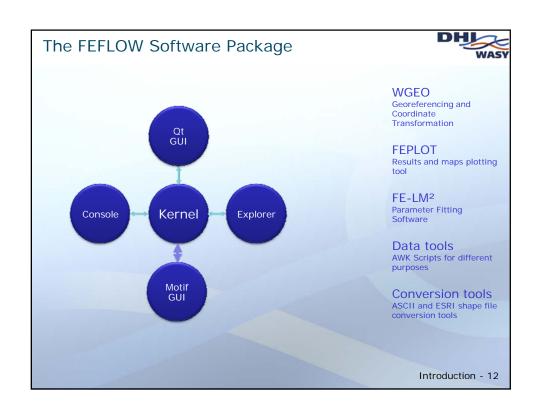
to model the complex subsurface processes

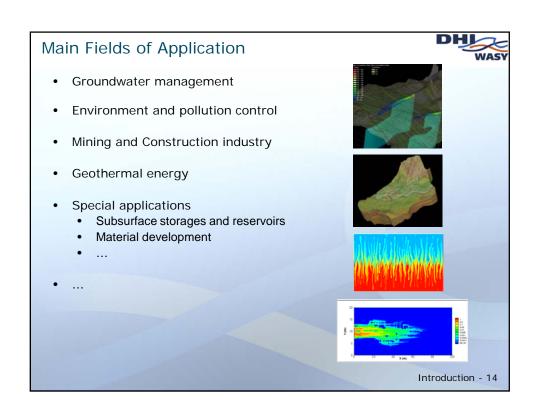
Introduction - 9

**Development History** 



1.x	FORTRAN user-oriented batch program; implementations for IBM 370, EC 1055, BESM-6; limited	8,000	VVAST
1979-1986	pre- and postprocessing;	(FORTRAN)	
2.x 1987-1990	First interactive prototype for Sun workstations; rewritten in C for SUN workstations	25,000 (C)	
3.x 1990-1992	$X-Windows \ and \ OSF/Motif implementation, \ multiple \ hardware \ (platform) \ installations, \ additional \ software \ tools$	140,000 (C)	
<b>4.0-4.2</b> 1992-1995	3D extensions and developments for flow, mass and heat (thermohaline) transport, 3D visual analysis tools, GIS interface extensions	250,000 (C)	
<b>4.5</b> 1996-1997	Extensions regarding numerical capabilities and data interfacing, introducing DSM (data store manager) and FEMAP (map assistant), automatic mesh adaptation in 2D	730,000 (C, C++)	
<b>4.6</b> 1997-1998	In stall attion on Windows~95/NT, new mesh generator~TMESH~including~add-ins, revision~of~budget~analyzing~tools	750,000 (C, C++)	
<b>4.7</b> 1998	Interface Manager (IFM) for coupling external code, unsaturated flow and transport modeling in 2D and 3D, extended interpolation techniques for time varying data, FEPLOT	850,000 (C, C++)	
<b>4.8</b> 2000	PEST for parameter estimation, legend editor, improved map manager, reference distributions, DAVIS for 3D visualization	900,000 (C, C++)	
<b>4.9</b> 2001	Extended zooming tools, improved coordinate handling, new mesh editor, non-linear dispersion, improved phreatic mode, new features in FEPLOT	1,000,000 (C, C++)	
<b>5.0</b> 2002	$Discrete\ feature\ elements\ (1D/2D), extended\ possibilities\ for\ unsaturated\ flow,\ parameter\ fitting\ tool\ FE-LM^2,\ true\ color\ implementation$	1,100,000 (C, C++)	
<b>5.1</b> 2003-2004	Extensions for density-variable transport (gravity-projected option), fast TRIANGLE mesh generator, algebraic multigrid (SAMG) equation solver	1,300,000 (C, C++)	
<b>5.2</b> 2005	Multispecies transport, parallel computing, reaction kinetics editor FEMATHED, transient pathline computations, FEFLOW Explorer for 3D visualization and animation	1,500,000 (C, C++)	
<b>5.3</b> 2006	64-bit technology, variable-density multispecies multidiffusive transport, new mesh generator GRIDBUILDER, scatter plots, formula editor for sink/sources, and others	1,700,000 (C, C++)	
5.4 2008	Borehole heat exchangers, SAMG as standard solver, splines parametric model for unsaturated properties, improved parallelization, parameter zones in Explorer, and others	1,700,000 (C, C++)	





### Capabilities – Groundwater Flow



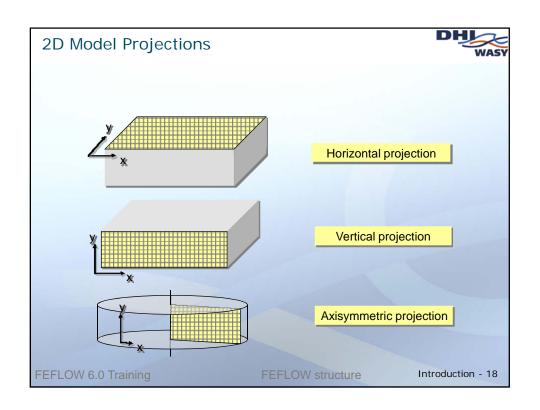
- · Flexible meshing using finite elements
  - Triangular or quad elements (2D)
  - Prisms or cuboids (3D)
- 3D or 2D horizontal/vertical/axisymmetric
- Mixed dimensions (1D, 2D and 3D finite elements) for fracture/pipe/borehole flow
- Groundwater flow model
  - "Classical" saturated flow (Darcy-law)
  - Different approaches for handling phreatic surfaces
  - · Unsaturated or variably saturated flow (Richards' equation)
- Transport model
  - Solutes (advection, dispersion, diffusion)
  - Heat (advection, dispersion, conduction)
  - Multi-component (several Solutes and/or heat)

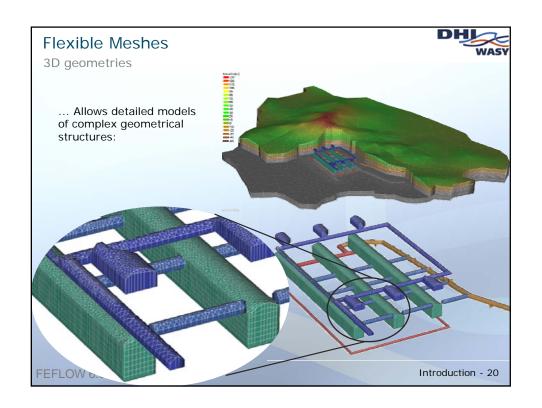
Introduction - 15

### Capabilities – Transport, Processes and More



- Chemical and physical processes
  - Sorption
  - · Chemical reaction systems
- Property dependencies
  - Density-dependent fFlow (temperature and/or concentration-driven)
  - Viscosity
- Advanced computational methods
  - Powerful mesh generators
  - Automatic time stepping scheme
  - · Algebraic multi-grid solver
  - Parallelization
- Text (ASCII)/GIS/CAD-file interfaces for data import and export
- Extensibility (IFM open programming interface)
- ...





### Documentation



- Demonstration Exercise
- User's Manual
- Reference Manual
- White Papers Vol. I
- White Papers Vol. II
- White Papers Vol. III
- White Papers Vol. IV
- Help System



All manuals are available printed and on the FEFLOW DVD (\*.pdf) and for download on <a href="https://www.feflow.info">www.feflow.info</a>

**FEFLOW 6.0 Training** 

Introduction - 21

### Licensing and Maintenance



• Licensed via HASP hardware dongle and license manager software



• License types:

• F2 2D flow

• FM2 2D flow and mass transport

• F3 2D/3D flow

FM3 2D/3D flow and mass transport
 FH3 (new) 2D/3D flow and heat transport
 FMH3 2D/3D flow, mass and heat transport

• FMHES Education starter kit (5 limited licenses) - for universities only

- Single seat or network licenses
- License includes 1 year maintenance contract

FEFLOW 6.0 Training

Introduction - 22

### The new Qt based GUI

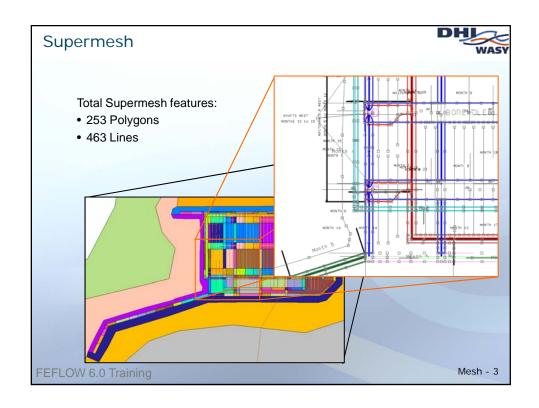


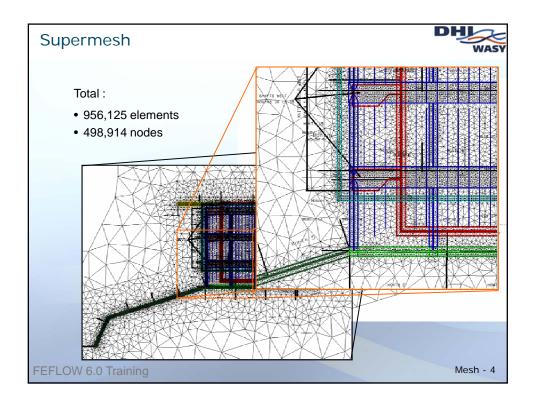
- Modern GUI elements such as tree views, list views, dock windows, combo boxes.
- Customizable workspace
- Multi-view architecture (MDI)
- Parallel visualization of multiple model properties
- No X-server required under MS Windows

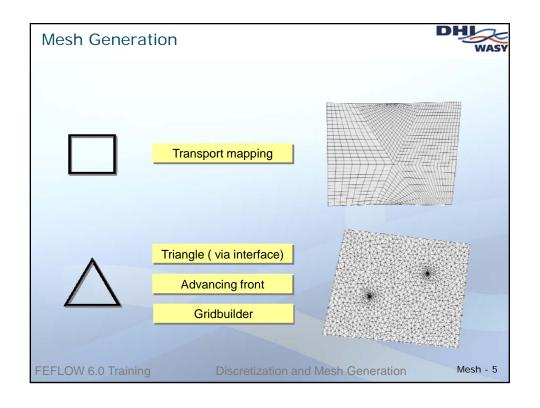
Introduction - 24

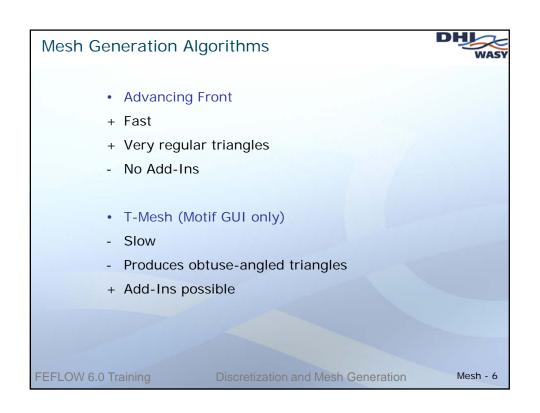


# Conceptual definition of the model geometry Areas Model area Subareas (e.g. lenses) Locations Lines (rivers, barriers, drainages) Points (wells, observation points) FEFLOW 6.0 Training









### Mesh Generation Algorithms



- Triangle
  - + Extremely fast
  - + Complex setups of polygons and add-ins
  - Angles slightly over 90°
  - Consider usage agreement
- Gridbuilder
  - + Fast
  - Can fail under certain circumstances (see online help and/or Users Manual)
  - + Regular Triangles
  - + Good gradation

FEFLOW 6.0 Training

Discretization and Mesh Generation

Mesh - 7

Mesh Gen	Mesh Generators in FEFLOW							
Triangul	ar Elements							
	Quality	Adaption	Speed	Overall				
Advancing front	<b>good</b> regular triangles	no points / lines!	fast	Recommended for geometries without lines / points				
Triangle	moderate angles slightly over 90°	handles complex geometries	extremely fast	Recommended for complex geometries license restrictions apply, see copyright, online-help!				
Gridbuilder	<b>good</b> regular triangles good gradation	lines may lead to failures (see online- help)	fast	Very good alternative for Triangle				
Tmesh* (* Motif GUI only)	produces obtuse-angled triangles		slow	Rudimentary generator, avoid usage				
Quadri	lateral Eleme	<u>nts</u>						
	Quality	Adaption	Speed	Overall				
Transport Mapping	very good regular quadrilaterals	no points / lines! limited to quadrilateral polygons!	extremely fast	Recommended for geometries with quadrilateral sub-regions				
FEFLOW 6.0 Tra	aining			Mesh - 8				

## FEFLOW (tiré de http://www.feflow.com)

### WHY USING FEFLOW?

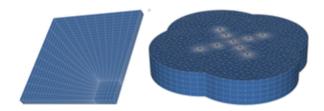
### **High-level support**



Dealing with an extensive modeling package like FEFLOW, even the most extensive documentation can never answer all the questions a user might have in a specific situation. Furthermore, a long trial-and error process in a commercial project means a considerable loss of time and money.

DHI-WASY offers high-level support given by experienced groundwater modelers to clients with a current maintenance contract for FEFLOW.

### Flexible mesh generators



Finite-element discretization allows to use complex unstructured meshes that closely match natural structures while obeying requirements such as element size, element angles, etc. For large modeling areas, generation is supported by sophisticated automation algorithms to ensure efficient work. Automatically generated meshes also have to be adapted to internal geographical structures, like rivers or well locations.

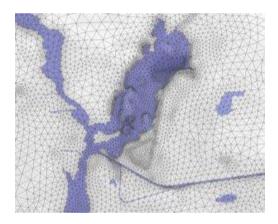
As any single mesh generation approach cannot be expected to perform optimally under all conditions, FEFLOW offers a number of different mesh-generation algorithms and different options of user influence on the generation process.

### **Parallel computing**



Transient calculations of complex regional models for long time periods require significant computational effort. Long simulation times can occur, even using the latest hardware available. Parallel processing allows a significant reduction in CPU times on multiple-processor platforms. In FEFLOW tasks of parallel structure as matrix assembly are processed in parallel on the different CPUs.

### Finite-element method

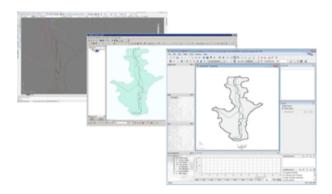


Spatial discretization of the study area is a prerequisite for any numerical modeling. Classic groundwater simulation codes use finite difference discretization. In contrast, FEFLOW is based on the finite-element technique.

Major advantages of finite-element modeling include:

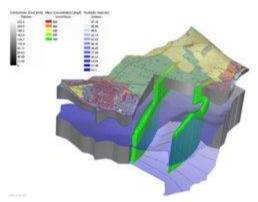
- Unstructured meshing, thus much better representation of features like rivers, fractures, well locations by adaptation of the mesh
- Better representation of sloping layers and anisotropy
- Local mesh refinement without having to refine the whole column/row
- Moving meshes for free-surface calculations
- Automatic mesh refinement and coarsening
- Less computational effort due to reduced element numbers for large regional models
- Broad range of small-scale and large-scale applications

### **GIS/CAD** interface



In most practical applications, the basic spatial data are available either in GIS (e.g., ESRI formats) file format or in a CAD-like format (e.g., AutoCAD exchange format). Direct import of these data formats helps to avoid intermediate conversion routines for transferring the basic data to the groundwater model. In the post processing step, data are easily transferred back to the GIS or CAD system to provide the results in data formats compliant to the project framework. FEFLOW can handle GIS as well as CAD data for import and export at all stages of modeling, e.g., to provide geographical input for mesh generation, parameter distribution, etc. Where appropriate, different regionalization methods are provided to transfer the basic data to the finite elements or mesh nodes. Using GIS files, attribute data can be directly transferred to the groundwater model. Alternatively, all data input can be performed manually or by importing ASCII files.

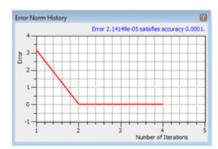
### **Up-to-date visualization tools**



The days of presenting modeling results in large tables of figures are long gone. Today's customers expect elaborate isoline maps, pathline diagrams, cross-sectional and 3D views and animations, which can also be used to present complex hydrogeologic conditions to the public.

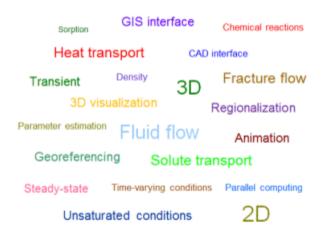
FEFLOW addresses that need by its planar, cross-sectional and 3D visualization features. Using FEFLOW three-dimensional visualizations of all model parameters and modeling results (like movements of contaminant plumes, etc.) can be produced.

### Sophisticated solvers



The equation systems for solving advanced groundwater models result in large matrix systems. To guarantee both stability and effectiveness of the solution, highly sophisticated solvers are required. In FEFLOW, sparse-matrix PCG-type solvers as well as an algebraic multigrid solver are available. There are no internal limitations in the numbers of nodes and elements.

### Advanced modeling package



At first glance, it might seem that you won't need some of the features FEFLOW provides for your every-day work. Nevertheless it is a good decision to choose a scalable sophisticated system with many modeling options.

On the one hand you will be able to work with the same system also for your future applications, which might be quite different from your current modeling tasks. In such a case, it will save time and money if you won't need additional software and training.

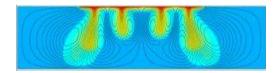
On the other hand, FEFLOW provides many of its easy-to-use high-level modeling features from the inexpensive 2D flow modeling package on. So even if you only deal with relatively simple tasks, you will benefit from the functionality designed to meet the most challenging needs in groundwater simulation.

### **Commercial software**



Companies developing commercial software depend on the satisfaction of their clients: To remain successful, they have to be eager to develop software and documentation according to the client's needs, to provide a stable and easy-to-use graphical interface, to fix bugs within the shortest time frame possible and to support their clients in software application. The FEFLOW development team at DHI-WASY has been working on FEFLOW for many years, ensuring the permanent good quality of the product. Close contact between user and developer and latest experiences out of DHI-WASY's own consulting and research activities are the main basis for successful further development of FEFLOW.

### **Benchmark simulations**



The user of a complex simulation software like FEFLOW requires reliability, accuracy and effectiveness. Physical and mathematical correctness within the limits posed by discretization is essential. All parts of the FEFLOW simulation engine have passed an extensive benchmarking process where results are compared to those of other well-known simulation systems, to analytical solutions or to observations from lab experiments whenever possible. The results of numerous important benchmark tests are published in the documentation, along with a detailed description of the corresponding model setups and an extensive discussion of the results. The related files are available, too. All benchmark examples can be loaded and executed without a license.

### **Open Programming Interface**



FEFLOW covers a broad variety of processes in the subsurface, but still there are very specific applications where its capabilities are not sufficient and the user wishes to modify parts of the system.

For such cases FEFLOW provides an open programming interface to interact with user-specific additional plug-ins. Parameters can be changed at any time, boundary conditions can be varied using external dependencies, time stepping can be influenced, even other programs (like hydrodynamic simulation or parameter estimation software) can be directly linked to FEFLOW. A developer framework provides the basis for designing specific plug-ins. The plug-in can be coded in C/C++ or, using mixed-language programming, in other languages such as Fortran.

### So why FEFLOW?

If you still doubt that FEFLOW should be the groundwater modeling package of your choice, try out the free demo version or ask for it at one of the DHI offices, your local distributor or directly at DHI-WASY.

### You will understand why.

# Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement

# RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU LANDÉNIEN

Rapport final (phase II)

Annexe 2 : Bilans de Thornthwaite sur les années 1999 à 2013 pour la station pluviométrique d'Uccle (IRM)

R-2016-043

**DECEMBRE 2016** 





L'évaluation de l'eau utile est réalisée sur la base du bilan de Thornthwaite.

Les abréviations utilisées dans les tableaux suivants sont détaillées ci-dessous :

- P: Précipitation mensuelle en mm;
- ETP: Evapotranspiration mensuelle potentielle en mm calculée selon l'équation suivante:

$$ETP = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot T}{I}\right)^a$$

οù

- o T: Température moyenne mensuelle en °C;
- o I : somme des indices thermiques mensuels calculés selon l'équation suivante :

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$$

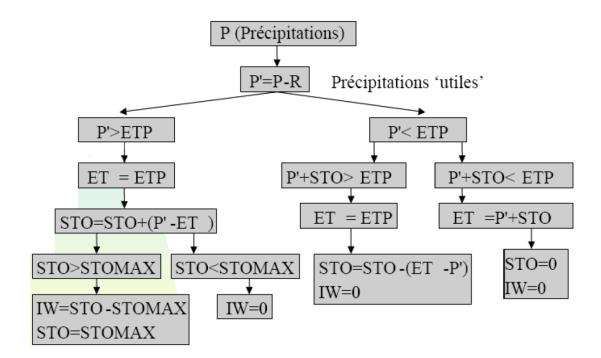
o a est un indice calculé selon l'équation suivante :

$$a = 0.016 \cdot I + 0.5$$

- P-ETP est la différence entre les précipitations mensuelles et l'évapotranspiration mensuelle potentielle ;
- DEF est le déficit en mm considéré comme étant nul si les précipitations mensuelles sont supérieures à l'évapotranspiration mensuelle potentielle et comme égal à la différence entre ces deux paramètres dans le cas inverse ;
- DEF cum est le déficit cumulé en mm, il est calculé en prenant la somme des déficits mensuels depuis le début de l'année ;
- STOCK fin de mois en mm est la quantité d'eau restant dans le stock du sol à la fin du mois. Elle est considérée comme étant égale à 100 en début d'année. Lorsqu'il y a un déficit durant un mois, ce stock se réduit d'une quantité égale au déficit. Lorsqu'il n'y a pas de déficit (précipitations supérieures à l'évapotranspiration potentielle), le stock se rempli de l'excès de précipitations par rapport à l'évapotranspiration potentielle. Le stock est considéré comme compris entre 0 et 100. Il ne sera donc jamais négatif ni supérieur à 100;
- Var STOCK en mm est la variation du STOCK entre deux mois consécutifs. Il est négatif si le stock diminue et positif si le stock augmente ;
- EVT réelle en mm est l'évapotranspiration mensuelle réelle. Elle est égale :
  - Soit à l'évapotranspiration mensuelle potentielle si celle-ci est :
    - inférieure ou égale aux précipitations mensuelles ou
    - inférieure ou égale à la somme des précipitations mensuelles et du stock de la fin du mois précédent ;
  - soit à la somme du stock de la fin du mois précédent et des précipitations mensuelles dans les autres cas;
- EU en mm est l'eau utile mensuelle. Elle est égale :

- Soit aux précipitations mensuelles dont on retranche l'évapotranspiration mensuelle réelle dans le cas où cette différence est positive et que le stock à la fin du mois précédent est rempli;
- Soit aux précipitations mensuelles dont on retranche l'évapotranspiration mensuelle réelle et la variation du stock dans le cas où le résultat est positif et que le stock à la fin du mois précédent n'est pas rempli;
- Soit à zéro dans les autres cas (évapotranspiration mensuelle réelle supérieure aux précipitations mensuelles ou encore dans le cas où la somme de l'évapotranspiration mensuelle réelle et de la variation du stock est supérieure aux précipitations mensuelles).

A toutes fins utiles, le schéma suivant reprend la logique de calcul exposée ci-dessus.



AQUA Booker Dis	ALE veloppement					100 100	stock maximal estim	·	
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
Janvier	129.2	21	108	0	0	100	0	21.3	107.9
Février	74.3	11	63	0	0	100	0	11.1	63.2
Mars	81.1	31	50	0	0	100	0	31.3	49.8
Avril	70.1	43	27	0	0	100	0	42.9	27.2
Mai	39.6	69	-29	-29	-29	71	-29	68.7	0.0
Juin	81.1	71	10	0	-29	81	10	71.5	0.0
Juillet	36.8	95	-59	-59	-88	22	-59	95.4	0.0
Août	93.3	86	8	0	-88	30	8	85.6	0.0
Septembre	36.7	85	-48	-48	-136	0	-30	66.3	0.0
Octobre	56.2	47	9	0	-136	9	9	47.1	0.0
Novembre	33.4	25	9	0	-136	18	9	24.6	0.0
Décembre	186.2	16	170	0	-136	100	82	16.3	87.9
Total	918.0	601						582	335.9
								918.0	
	T (°C)	Indice thermique				Calcul de l'eau	utile pour la station d'Uccl	le (IRM) - année 1999	
Janvier	5.4	1.1224					■ P (mm) ■ EVT réelle (mm) ■ EV	U (mm)	
Février	3.1	0.4882		140					
mars	7.5	1.8371							
Avril	9.8	2.7440		120					
Mai	14.6	4.9897		100					
Juin	15.1	5.2482							
Juillet	19.3	7.5837		Quantité (mm)				_	
Août	17.6	6.6041		n tit					
Septembre	17.5	6.5479		<b>On</b> 60					
Octobre	10.6	3.0868							
Novembre	6.1	1.3475		40					
Décembre	4.3	0.7975							

Février

Mars

Avril

Mai

Juillet

Août

Septembre

Octobre

Novembre

Décembre

a = 1.178354

I = 42.3971

AQUA						100 100	stock maximal estim stock en fin d'année	·	
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
Janvier	51.6	15	37	0	0	100	0	14.6	37.0
Février	82.2	24	58	0	0	100	0	23.8	58.4
Mars	65.5	30	36	0	0	100	0	29.6	35.9
Avril	65.3	45	20	0	0	100	0	45.2	20.1
Mai	89.1	70	19	0	0	100	0	70.0	19.1
Juin	34.6	80	-45	-45	-45	55	-45	80.1	0.0
Juillet	137.2	72	66	0	-45	100	45	71.6	20.1
Août	36.5	89	-52	-52	-98	48	-52	88.6	0.0
Septembre	76.6	76	0	0	-98	48	0	76.1	0.0
Octobre	70.9	50	20	0	-98	69	20	50.5	0.0
Novembre	92.2	34	59	0	-98	100	31	33.5	27.5
Décembre	62.7	23	40	0	-98	100	0	22.8	39.9
Total	864.4	606						606	258.0
			_					864.4	
	T (°C)	Indice thermique				Calcul de l'eau util	e pour la station d'Ucc	le (IRM) - année 2000	
Janvier	3.9	0.6889				■ P (ı	mm) ■EVT réelle (mm) ■E	U (mm)	
Février	5.9	1.2818		140	)				
mars	7.1	1.6921							
Avril	10.2	2.9137		120	)				
Mai	14.8	5.0926		100	,				
Juin	16.6	6.0493	Ì			_		_	
Juillet	15.1	5.2482		Quantité (mm)	, —				
Août	18.1	6.8875		ntité					
Septembre	15.9	5.6708		Ogna 60					
Octobre	11.2	3.3525	Ì						
Novembre	7.9	1.9860		40	)				
Décembre	5.7	1.2172							
-	l =	42.0806		20	'The state of the				

Février

Janvier

Mars

Avril

Mai

Juin

Juillet

Août

Septembre

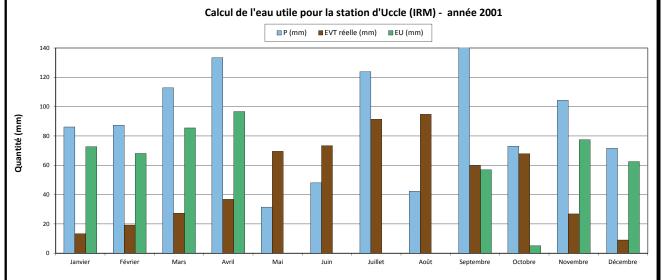
Octobre

Décembre

Novembre

AQUA Bookse Die	ALE relegionent					100 100	stock maximal estimé (f stock en fin d'année pré		
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
Janvier	86.1	13	73	0	0	100	0	13.4	72.7
Février	87.3	19	68	0	0	100	0	19.3	68.0
Mars	112.8	27	85	0	0	100	0	27.3	85.5
Avril	133.4	37	97	0	0	100	0	36.8	96.6
Mai	31.5	70	-38	-38	-38	62	-38	69.5	0.0
Juin	48.0	73	-25	-25	-63	37	-25	73.4	0.0
Juillet	123.8	91	32	0	-63	69	32	91.4	0.0
Août	42.3	95	-53	-53	-116	16	-53	94.8	0.0
Septembre	200.2	60	140	0	-116	100	84	59.8	56.9
Octobre	73.0	68	5	0	-116	100	0	67.9	5.1
Novembre	104.3	27	77	0	-116	100	0	26.9	77.4
Décembre	71.6	9	63	0	-116	100	0	9.1	62.5
Total	1114.3	589						589	524.8
								1114.3	
	T (°C)	Indice thermique				Calcul de l'eau uti	le pour la station d'Uccle (I	RM) - année 2001	
Janvier	3.5	0.5857	]			<b>■</b> P	(mm) ■EVT réelle (mm) ■EU (mr	m)	
Février	4.8	0.9406		140					
mars	6.5	1.4822	]						
Avril	8.4	2.1775		120					
					1				

Janvier	3.5	0.5857
Février	4.8	0.9406
mars	6.5	1.4822
Avril	8.4	2.1775
Mai	14.6	4.9897
Juin	15.3	5.3528
Juillet	18.5	7.1171
Août	19.1	7.4661
Septembre	12.8	4.0960
Octobre	14.3	4.8367
Novembre	6.4	1.4482
Décembre	2.5	0.3536
	I=	40.8462



AQUA Bridge Day	ALE relaporent					100 100	stock maximal estimé stock en fin d'année p	·	
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
Janvier	78.7	18	61	0	0	100	0	18.0	60.7
Février	172.4	30	142	0	0	100	0	30.3	142.1
Mars	67.5	32	35	0	0	100	0	32.2	35.3
Avril	34.5	42	-8	-8	-8	92	-8	42.3	0.0
Mai	68.0	61	7	0	-8	99	7	61.5	0.0
Juin	69.9	81	-11	-11	-19	88	-11	81.0	0.0
Juillet	86.2	85	1	0	-19	89	1	85.0	0.0
Août	193.1	90	104	0	-19	100	11	89.6	92.3
Septembre	30.8	68	-37	-37	-56	63	-37	68.1	0.0
Octobre	109.0	47	62	0	-56	100	37	47.0	24.7
Novembre	95.8	37	59	0	-56	100	0	37.2	58.6
Décembre	115.9	18	98	0	-56	100	0	17.5	98.4
Total	1121.8	610						610	512.1
								1121.8	
	T (°C)	Indice thermique				Calcul de l'eau uti	le pour la station d'Uccle	(IRM) - année 2002	
Janvier	T (°C)						ile pour la station d'Uccle		
Janvier Février		thermique		140	,				
	4.7	thermique 0.9114							
Février	4.7 7.3	0.9114 1.7641		140					
Février mars	4.7 7.3 7.7	thermique 0.9114 1.7641 1.9111		120	,				
Février mars Avril	4.7 7.3 7.7 9.7	thermique 0.9114 1.7641 1.9111 2.7021		120	,				
Février mars Avril Mai	4.7 7.3 7.7 9.7 13.3	thermique 0.9114 1.7641 1.9111 2.7021 4.3383		120	,				
Février mars Avril Mai Juin	4.7 7.3 7.7 9.7 13.3 16.8	thermique 0.9114 1.7641 1.9111 2.7021 4.3383 6.1590		120	,				
Février mars Avril Mai Juin Juillet	4.7 7.3 7.7 9.7 13.3 16.8 17.5	thermique 0.9114 1.7641 1.9111 2.7021 4.3383 6.1590 6.5479		120 100 E					
Février mars Avril Mai Juin Juillet Août	4.7 7.3 7.7 9.7 13.3 16.8 17.5 18.3	thermique 0.9114 1.7641 1.9111 2.7021 4.3383 6.1590 6.5479 7.0020		120					
Février mars Avril Mai Juin Juillet Août Septembre	4.7 7.3 7.7 9.7 13.3 16.8 17.5 18.3 14.5	thermique 0.9114 1.7641 1.9111 2.7021 4.3383 6.1590 6.5479 7.0020 4.9385		120					
Février mars Avril Mai Juin Juillet Août Septembre Octobre	4.7 7.3 7.7 9.7 13.3 16.8 17.5 18.3 14.5 10.6	thermique 0.9114 1.7641 1.9111 2.7021 4.3383 6.1590 6.5479 7.0020 4.9385 3.0868		Odnantite (mm) 80 80 60					
Février mars Avril Mai Juin Juillet Août Septembre Octobre Novembre	4.7 7.3 7.7 9.7 13.3 16.8 17.5 18.3 14.5 10.6 8.7	thermique 0.9114 1.7641 1.9111 2.7021 4.3383 6.1590 6.5479 7.0020 4.9385 3.0868 2.2952 0.8824		Quantité (mm) 80 80 80					

AQUA						100 100	stock maximal estime stock en fin d'année		
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
Janvier	110.2	8	102	0	0	100	0	7.8	102.4
Février	26.8	10	17	0	0	100	0	10.2	16.6
Mars	44.5	37	7	0	0	100	0	37.1	7.4
Avril	49.7	45	5	0	0	100	0	44.8	4.9
Mai	86.5	63	24	0	0	100	0	62.5	24.0
Juin	34.5	92	-58	-58	-58	42	-58	92.1	0.0
Juillet	74.7	94	-19	-19	-77	23	-19	93.9	0.0
Août	44.5	99	-55	-55	-131	0	-23	67.7	0.0
Septembre	32.3	70	-38	-38	-169	0	0	32.3	0.0
Octobre	65.6	32	33	0	-169	33	33	32.1	0.0
Novembre	60.9	35	26	0	-169	59	26	35.1	0.0
Décembre	63.3	17	46	0	-169	100	41	17.1	5.4
Total	693.5	602						533	160.5
								693.5	
			_					055.5	
	T (°C)	Indice				Calcul de l'eau util	e pour la station d'Uccle		
Janvier	T (°C)	Indice thermique 0.3326					e pour la station d'Uccle	e (IRM) - année 2003	
Janvier Février		thermique		140	) [		<u> </u>	e (IRM) - année 2003	
	2.4	thermique 0.3326		140			<u> </u>	e (IRM) - année 2003	
Février	2.4 3.0	0.3326 0.4648		140			<u> </u>	e (IRM) - année 2003	
Février mars	2.4 3.0 8.8	thermique 0.3326 0.4648 2.3349		120			<u> </u>	e (IRM) - année 2003	
Février mars Avril	2.4 3.0 8.8 10.3	thermique 0.3326 0.4648 2.3349 2.9567		120			<u> </u>	e (IRM) - année 2003	
Février mars Avril Mai	2.4 3.0 8.8 10.3 13.6	thermique 0.3326 0.4648 2.3349 2.9567 4.4859		120			<u> </u>	e (IRM) - année 2003	
Février mars Avril Mai Juin	2.4 3.0 8.8 10.3 13.6 18.8	thermique 0.3326 0.4648 2.3349 2.9567 4.4859 7.2909		120			<u> </u>	e (IRM) - année 2003	
Février mars Avril Mai Juin Juillet Août	2.4 3.0 8.8 10.3 13.6 18.8 19.1	thermique 0.3326 0.4648 2.3349 2.9567 4.4859 7.2909 7.4661		120 100 E			<u> </u>	e (IRM) - année 2003	
Février mars Avril Mai Juin Juillet Août	2.4 3.0 8.8 10.3 13.6 18.8 19.1 20.0	thermique 0.3326 0.4648 2.3349 2.9567 4.4859 7.2909 7.4661 8.0000		120			<u> </u>	e (IRM) - année 2003	
Février mars Avril Mai Juin Juillet Août Septembre	2.4 3.0 8.8 10.3 13.6 18.8 19.1 20.0 15.0	thermique 0.3326 0.4648 2.3349 2.9567 4.4859 7.2909 7.4661 8.0000 5.1962		120			<u> </u>	e (IRM) - année 2003	
Février mars Avril Mai Juin Juillet Août Septembre Octobre	2.4 3.0 8.8 10.3 13.6 18.8 19.1 20.0 15.0 7.8	thermique 0.3326 0.4648 2.3349 2.9567 4.4859 7.2909 7.4661 8.0000 5.1962 1.9484		Quantité (mm) 808 809 909			<u> </u>	e (IRM) - année 2003	

Janvier

Février

Mars

Avril

Mai

Juin

Juillet

Août

Septembre

Octobre

Décembre

14 20 28 49 58 78 84 94 77 55	P (mm)  154.0  34.6  25.5  36.6  51.8  82.2  115.1  120.2  78.3	20 15 28 -2 49 -13 58 -7 78 4 84 31	0 0 -2 -13 -7 0 0	DEF cum (mm)  0  0  -2  -15  -22	STOCK fin de mois (mm)  100  100  98  85	stock en fin d'année var STOCK (mm)  0 0 -2 -13	EVT réelle (mm)  13.6  19.9  28.0	EU (mm) 140.4 14.7 0.0
20 28 49 58 78 84 94 77 55	34.6 25.5 36.6 51.8 82.2 115.1 120.2	20 15 28 -2 49 -13 58 -7 78 4 84 31	0 -2 -13 -7 0	0 -2 -15 -22	100 98 85	0 -2	19.9	14.7
28 49 58 78 84 94 77 55	25.5 36.6 51.8 82.2 115.1 120.2	28 -2 49 -13 58 -7 78 4 84 31	-2 -13 -7 0	-2 -15 -22	98 85	-2		
49 58 78 84 94 77 55	36.6 51.8 82.2 115.1 120.2	49 -13 58 -7 78 4 84 31	-13 -7 0	-15 -22	85	_	28.0	0.0
58 78 84 94 77 55	51.8 82.2 115.1 120.2	58 -7 78 4 84 31	-7 0	-22		_12		J 0.0
78 84 94 77 55	82.2 115.1 120.2	78 4 84 31	0			-13	49.3	0.0
84 94 77 55	115.1 120.2	84 31		2.2	78	-7	58.3	0.0
94 77 55	120.2		0	-22	82	4	78.1	0.0
77 55		94 26		-22	100	18	84.3	13.1
55	78.3		0	-22	100	0	94.0	26.2
		77 1	0	-22	100	0	77.0	1.3
27	62.6	55 8	0	-22	100	0	54.6	8.0
	64.7	27 38	0	-22	100	0	27.0	37.7
11	54.5	11 43	0	-22	100	0	11.4	43.1
596	880.1	596					596	284.5
							880.1	
Indice thermique	T (°C)	Indice thermique			Calcul de l'eau u	ile pour la station d'Ucc	le (IRM) - année 2004	
0.6109	3.6	0.6109				P (mm) ■EVT réelle (mm) ■E	U (mm)	
1.0000	5.0	1.0000	140					
1.5512	6.7	1.5512						
3.2187	10.9	3.2187	120					
4.0004	12.6	4.0004	100					
5.8320	16.2	5.8320						
6.4360	17.3	6.4360	Quantité (mm)					
7.4076	19.0	7.4076	l ţi					
5.7243	16.0	5.7243	Ong 60		_			
3.6717	11.9	3.6717						
	6.5	1.4822	40					
	3.1	0.4882	20					
1.4822	1 =	41.4232						
	11.9 6.5 3.1		3.6717 1.4822 0.4882	3.6717 1.4822 0.4882	3.6717 1.4822 0.4882 41.4232	3.6717 1.4822 0.4882 41.4232	3.6717 1.4822 0.4882 41.4232	3.6717 1.4822 0.4882 41.4232

AQUA	ALE veloppement					100 100	stock maximal estimé stock en fin d'année p	· ·	
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
Janvier	43.3	19	24	0	0	100	0	18.9	24.4
Février	73.5	8	65	0	0	100	0	8.2	65.3
Mars	37.0	30	7	0	0	100	0	29.7	7.3
Avril	45.5	46	-1	-1	-1	99	-1	46.4	0.0
Mai	59.3	61	-2	-2	-2	98	-2	60.9	0.0
Juin	50.0	89	-39	-39	-41	59	-39	88.6	0.0
Juillet	118.8	89	30	0	-41	89	30	89.2	0.0
Août	68.0	81	-13	-13	-54	76	-13	80.5	0.0
Septembre	68.8	79	-11	-11	-64	65	-11	79.4	0.0
Octobre	44.7	66	-21	-21	-85	44	-21	65.8	0.0
Novembre	61.5	25	37	0	-85	81	37	24.9	0.0
Décembre	43.3	13	30	0	-85	100	19	13.2	11.0
Total	713.7	606						606	108.0
Total	713.7	606						606 <b>713.7</b>	108.0
Total	713.7 T (°C)	606 Indice thermique				Calcul de l'eau uti	le pour la station d'Uccle	713.7	108.0
Total Janvier		Indice					le pour la station d'Uccle	713.7 (IRM) - année 2005	108.0
	T (°C)	Indice thermique		140	2			713.7 (IRM) - année 2005	108.0
Janvier	T (°C)	Indice thermique 1.0000						713.7 (IRM) - année 2005	108.0
Janvier Février	T (°C) 5.0 2.5	Indice thermique 1.0000 0.3536		140				713.7 (IRM) - année 2005	108.0
Janvier Février mars	T (°C) 5.0 2.5 7.3	Indice thermique 1.0000 0.3536 1.7641		120	)			713.7 (IRM) - année 2005	108.0
Janvier Février mars Avril	T (°C) 5.0 2.5 7.3 10.6	Indice thermique 1.0000 0.3536 1.7641 3.0868		120	)			713.7 (IRM) - année 2005	108.0
Janvier Février mars Avril Mai	T (°C) 5.0 2.5 7.3 10.6 13.3	Indice thermique 1.0000 0.3536 1.7641 3.0868 4.3383		120				713.7 (IRM) - année 2005	108.0
Janvier Février mars Avril Mai Juin	T (°C) 5.0 2.5 7.3 10.6 13.3 18.2	Indice thermique 1.0000 0.3536 1.7641 3.0868 4.3383 6.9447		120				713.7 (IRM) - année 2005	108.0
Janvier Février mars Avril Mai Juin	T (°C) 5.0 2.5 7.3 10.6 13.3 18.2 18.3	Indice thermique 1.0000 0.3536 1.7641 3.0868 4.3383 6.9447 7.0020		120 100 E E				713.7 (IRM) - année 2005	108.0
Janvier Février mars Avril Mai Juin Juillet Août	T (°C) 5.0 2.5 7.3 10.6 13.3 18.2 18.3 16.8	Indice thermique 1.0000 0.3536 1.7641 3.0868 4.3383 6.9447 7.0020 6.1590		120				713.7 (IRM) - année 2005	108.0
Janvier Février mars Avril Mai Juin Juillet Août Septembre	T (°C) 5.0 2.5 7.3 10.6 13.3 18.2 18.3 16.8 16.6	Indice thermique 1.0000 0.3536 1.7641 3.0868 4.3383 6.9447 7.0020 6.1590 6.0493		120				713.7 (IRM) - année 2005	108.0

Février

Mars

Avril

Mai

Juillet

Août

Septembre

Octobre

Novembre

Décembre

a = 1.196556

I = 43.5347

AQUA	ALE relaga promient					100 100	stock maximal estin	•	
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
Janvier	15.7	5	11	0	0	100	0	4.9	10.8
Février	61.1	7	54	0	0	100	0	7.4	53.7
Mars	57.8	16	42	0	0	100	0	15.8	42.0
Avril	40.5	37	3	0	0	100	0	37.5	3.0
Mai	92.6	64	29	0	0	100	0	63.7	28.9
Juin	22.9	81	-59	-59	-59	41	-59	81.5	0.0
Juillet	44.6	117	-72	-72	-131	0	-41	86.0	0.0
Août	183.9	76	108	0	-131	100	100	75.6	8.3
Septembre	7.2	89	-81	-81	-212	19	-81	88.6	0.0
Octobre	50.2	64	-14	-14	-226	5	-14	64.2	0.0
Novembre	63.4	37	26	0	-226	31	26	37.5	0.0
Décembre	71.7	22	50	0	-226	81	50	21.6	0.0
Total	711.6	615						584	146.6
_								731.0	
	T (°C)	Indice thermique				Calcul de l'eau	utile pour la station d'Ucc	cle (IRM) - année 2006	
Janvier	1.8	0.2160				1	■ P (mm) ■ EVT réelle (mm) ■	EU (mm)	
Février	2.5	0.3536		140					
mars	4.6	0.8824							
Avril	9.2	2.4959		120	1				
Mai	14.1	4.7356		100					
Juin	17.2	6.3802						_	
Juillet	23.0	9.8659		Quantité (mm)				_	
Août	16.2	5.8320		n tịt					
Septembre	18.4	7.0595		on 60					
Octobre	14.2	4.7861							
Novembre	9.2	2.4959		40					
Décembre	5.9	1.2818		20					
	I=	46.3848		20					
	4 242457				Janvier Février	Mars Avril M	ai Juin Juillet	Août Septembre Octobre Novem	bre Décembre

AQUA	ALE relappement					100 81	stock maximal estimé (f stock en fin d'année pré		
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
Janvier	72.5	29	44	0	0	100	19	28.6	24.9
Février	74.2	27	47	0	0	100	0	26.7	47.5
Mars	56.1	33	24	0	0	100	0	32.6	23.5
Avril	0.1	66	-66	-66	-66	34	-66	65.8	0.0
Mai	89.5	68	22	0	-66	56	22	67.5	0.0
Juin	89.9	84	6	0	-66	62	6	84.1	0.0
Juillet	88.3	82	6	0	-66	68	6	82.4	0.0
Août	49.3	82	-33	-33	-99	35	-33	82.4	0.0
Septembre	49.3	65	-15	-15	-114	20	-15	64.7	0.0
Octobre	63.4	45	19	0	-114	38	19	44.7	0.0
Novembre	47.4	27	21	0	-114	59	21	26.7	0.0
Décembre	80.2	14	66	0	-114	100	41	14.5	24.6
Total	760.2	621						621	120.5
								741.2	
	T (°C)	Indice thermique	]			Calcul de l'eau uti	ile pour la station d'Uccle (II	RM) - année 2007	
Janvier	7.2	1.7280				■ P	(mm) ■EVT réelle (mm) ■EU (mn	m)	
Février	6.8	1.5860	1	140	)			<del></del>	
marc	۰ ۵	2.0220							

	T (°C)	inaice
	i ( C)	thermique
Janvier	7.2	1.7280
Février	6.8	1.5860
mars	8.0	2.0239
Avril	14.3	4.8367
Mai	14.6	4.9897
Juin	17.5	6.5479
Juillet	17.2	6.3802
Août	17.2	6.3802
Septembre	14.1	4.7356
Octobre	10.4	2.9998
Novembre	6.8	1.5860
Décembre	4.1	0.7425
	l=	44.5366

Calcul de l'eau utile pour la station d'Uccle (IRM) - année 2007

P (mm) EVT réelle (mm) EU (mm)

Au Juin Juillet Août Septembre Octobre Novembre Décembre

AQUA						100 100	stock maximal estimé (fonction du sol) stock en fin d'année précédente				
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)		
Janvier	50.7	27	24	0	0	100	0	26.9	23.8		
Février	26.8	25	2	0	0	100	0	25.0	1.8		
Mars	119.0	26	93	0	0	100	0	25.9	93.1		
Avril	40.5	41	0	0	0	100	0	40.8	0.0		
Mai	44.8	80	-35	-35	-35	65	-35	79.7	0.0		
Juin	57.9	77	-20	-20	-55	45	-20	77.5	0.0		
Juillet	86.9	88	-1	-1	-56	44	-1	88.2	0.0		
Août	80.0	85	-5	-5	-61	39	-5	85.4	0.0		
Septembre	45.4	66	-20	-20	-82	18	-20	65.8	0.0		
Octobre	69.5	47	23	0	-82	41	23	46.5	0.0		
Novembre	50.2	29	21	0	-82	63	21	28.8	0.0		
Décembre	30.4	10	20	0	-82	83	20	10.1	0.0		
Total	702.1	601						601	118.7		
			_					719.3			
	T (°C)	Indice thermique				Calcul de l'eau ut	ile pour la station d'Uccl	e (IRM) - année 2008			
Janvier	6.5	1.4822	]				P (mm) ■EVT réelle (mm) ■EU	J (mm)			
Février	6.1	1.3475	]	140	)						
mars	6.3	1.4143									
Avril	9.3	2.5367	1	120	) -						
Mai	16.5	5.9947	]	100	,						
Juin	16.1	5.7781	]				_				
Juillet	18.0	6.8305	]	Quantité (mm)	,						
Août	17.5	6.5479	]	ntité							
Septembre	14.0	4.6853	]	Ogual 60	)						
Octobre	10.4	2.9998	]								
Novembre	6.9	1.6211	1	40	)						
Décembre	2.8	0.4191	1								
-	l =	41.6574		20							

Janvier

Février

Mars

Avril

Mai

Juillet

Août

Septembre

Octobre

Décembre

AQUA	ALE veloppement					100 83	stock maximal estimé (fonction du sol) stock en fin d'année précédente			
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)	
Janvier	49.4	1	48	0	0	100	17	1.5	30.9	
Février	57.0	13	44	0	0	100	0	12.6	44.4	
Mars	100.4	27	74	0	0	100	0	26.6	73.8	
Avril	69.0	56	13	0	0	100	0	56.3	12.7	
Mai	62.7	67	-4	-4	-4	96	-4	66.7	0.0	
Juin	96.3	79	18	0	-4	100	4	78.6	13.7	
Juillet	69.3	91	-22	-22	-26	78	-22	91.4	0.0	
Août	33.1	95	-62	-62	-88	16	-62	94.9	0.0	
Septembre	28.4	75	-46	-46	-134	0	-16	44.5	0.0	
Octobre	102.7	50	53	0	-134	53	53	49.8	0.0	
Novembre	88.5	42	47	0	-134	99	47	42.0	0.0	
Décembre	69.2	8	61	0	-134	100	1	7.7	60.8	
Total	826.0	603						573	236.4	
								809.0		
	T (°C)	Indice thermique		Calcul de l'eau utile pour la station d'Uccle (IRM) - année 2009						
Janvier	0.6	0.0416				■ P	(mm) ■EVT réelle (mm) ■EU (mr	n)		

	T (°C)	Indice			
	1 ( C)	thermique			
Janvier	0.6	0.0416			
Février	3.6	0.6109			
mars	6.7	1.5512			
Avril	12.5	3.9528			
Mai	14.4	4.8875			
Juin	16.5	5.9947			
Juillet	18.7	7.2328			
Août	19.3	7.5837			
Septembre	15.8	5.6173			
Octobre	11.3	3.3975			
Novembre	9.8	2.7440			
Décembre	2.4	0.3326			
	l =	43.9467			

Calcul de l'eau utile pour la station d'Uccle (IRM) - année 2009

P (mm) EVT réelle (mm) EU (mm)

Avril Mai Juin Juillet Août Septembre Octobre Novembre Décembre

AQUA	ALE relappement					100 100	stock maximal estimé (fonction du sol) stock en fin d'année précédente				
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)		
Janvier	44.4	0	44	0	0	100	0	0.3	44.1		
Février	70.9	10	61	0	0	100	0	9.9	61.0		
Mars	53.1	30	23	0	0	100	0	29.7	23.4		
Avril	15.3	48	-33	-33	-33	67	-33	47.9	0.0		
Mai	67.0	53	14	0	-33	82	14	52.6	0.0		
Juin	28.7	86	-57	-57	-90	24	-57	86.1	0.0		
Juillet	62.9	103	-41	-41	-131	0	-24	87.2	0.0		
Août	178.8	84	94	0	-131	94	94	84.5	0.0		
Septembre	104.8	69	36	0	-131	100	6	68.6	30.5		
Octobre	68.2	50	19	0	-131	100	0	49.5	18.7		
Novembre	120.7	27	94	0	-131	100	0	26.7	94.0		
Décembre	77.9	0	78	0	-131	100	0	0.0	77.9		
Total	892.7	559						543	349.7		
								892.7			
	T (°C)	Indice thermique				Calcul de l'eau util	e pour la station d'Ucc	le (IRM) - année 2010			
Janvier	0.1	0.0028				■ P (	mm) ■EVT réelle (mm) ■E	U (mm)			
Février	2.5	0.3536		140	·						
mars	6.7	1.5512									
Avril	10.3	2.9567		120	) -						
Mai	11.2	3.3525		100	,						
Juin	17.4	6.4919									
Juillet	20.5	8.3019		<u>Ē</u> 80							
					/						
Août	17.1	6.3247		ntité		_					
				Quantité (mm)							
Août Septembre Octobre	17.1	6.3247		Quantité			+				
Septembre	17.1 14.2	6.3247 4.7861		Quantité 90			#				
Septembre Octobre	17.1 14.2 10.6	6.3247 4.7861 3.0868					#	Had			

Décembre

Janvier

AQUA Broken Dev	ALE releasement					100 100	stock maximal estimé (fonction du sol) stock en fin d'année précédente				
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)		
Janvier	89.0	14	75	0	0	100	0	13.8	75.2		
Février	41.9	20	22	0	0	100	0	19.9	22.0		
Mars	21.9	31	-9	-9	-9	91	-9	30.7	0.0		
Avril	26.1	64	-38	-38	-47	53	-38	64.3	0.0		
Mai	23.7	68	-45	-45	-92	8	-45	68.2	0.0		
Juin	71.7	80	-8	-8	-99	1	-8	79.7	0.0		
Juillet	53.7	75	-21	-21	-121	0	-1	54.2	0.0		
Août	180.9	83	98	0	-121	98	98	82.6	0.0		
Septembre	78.1	78	0	0	-121	98	0	78.0	0.0		
Octobre	49.3	53	-4	-4	-125	94	-4	53.3	0.0		
Novembre	6.7	35	-28	-28	-153	66	-28	35.1	0.0		
Décembre	150.0	23	127	0	-153	100	34	23.1	93.0		
Total	793.0	624						603	190.2		
								793.0			
	T (°C)	Indice thermique				Calcul de l'eau util	le pour la station d'Uccle	(IRM) - année 2011			
Janvier	4.0	0.7155				■ P (	(mm) ■EVT réelle (mm) ■EU	(mm)			
Février	5.4	1.1224		140							
mars	7.7	1.9111									
Avril	14.1	4.7356		120	1						
Mai	14.8	5.0926		100							
Juin	16.8	6.1590									
Juillet	16.0	5.7243		<u>E</u> 80	H						
Août	17.3	6.4360		Quantité (mm)		_					
Septembre	16.5	5.9947		Ona 60	+		_				
Octobre	12.1	3.7646									
Novembre	8.6	2.2558		40							
Décembre	6.1	1.3475									
-	I=	45.2591		20							
				•	Janvier Février	Mars Avril Mai	Juin Juillet	Août Septembre Octobre No	ovembre Décembre		

AQUA	ALE velogi pernent					100 100	stock maximal estimé (fonction du sol) stock en fin d'année précédente				
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)		
Janvier	82.5	21	62	0	0	100	0	20.7	61.8		
Février	30.0	2	28	0	0	100	0	2.1	27.9		
Mars	31.9	39	-7	-7	-7	93	-7	39.3	0.0		
Avril	84.2	37	47	0	-7	100	7	36.7	40.1		
Mai	73.2	68	5	0	-7	100	0	68.4	4.8		
Juin	130.6	74	57	0	-7	100	0	74.0	56.6		
Juillet	109.2	85	25	0	-7	100	0	84.6	24.6		
Août	21.7	95	-74	-74	-81	26	-74	95.4	0.0		
Septembre	49.8	69	-19	-19	-100	7	-19	69.0	0.0		
Octobre	115.3	51	65	0	-100	72	65	50.7	0.0		
Novembre	43.6	30	13	0	-100	85	13	30.3	0.0		
Décembre	158.0	21	137	0	-100	100	15	20.7	122.4		
Total	930.0	592						592	338.3		
								930.0			
	T (°C)	Indice thermique				Calcul de l'eau util	e pour la station d'Ucc	le (IRM) - année 2012			
Janvier	5.1	1.0301				■ P (	mm) EVT réelle (mm) EE	U (mm)			
Février	0.7	0.0524		140	·						
mars	8.9	2.3748									
Avril	8.4	2.1775		120	) †						
Mai	14.4	4.8875		100	,						
Juin	15.4	5.4054									
Juillet	17.3	6.4360		Quantité (mm)	· <del> </del>			_			
Août	19.2	7.5248		n tit							
Septembre	14.5	4.9385		Ong 60	· <del>                                    </del>						
Octobre	11.1	3.3077									
Novembre	7.1	1.6921		40	·						
Décembre	5.1	1.0301									
	I =	40.8571		20							

Février

Janvier

Mars

Avril

Mai

Juin

Juillet

Août

Septembre

Octobre

Novembre

Décembre

AQUA		100 100		stock maximal estimé (fonction du sol) stock en fin d'année précédente									
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (n	nm)	var STOCK (mm)		EVT réelle	(mm)		EU (mm)
Janvier	59.6	8	52	0	0	100		0		7.7			51.9
Février	57.6	5	53	0	0	100		0		4.9			52.7
Mars	55.0	12	43	0	0	100		0		12.0	)		43.0
Avril	25.0	41	-16	-16	-16	84		-16		40.9	)		0.0
Mai	125.9	52	74	0	-16	100		16		51.8	3		58.1
Juin	52.9	77	-24	-24	-40	76		-24		77.2	2		0.0
Juillet	65.3	103	-37	-37	-77	38		-37		102.	5		0.0
Août	46.3	93	-47	-47	-124	0		-38		84.7			0.0
Septembre	54.2	71	-17	-17	-141	0		0		54.2	2		0.0
Octobre	72.4	61	12	0	-141	12	<b>12</b> 12			60.8			0.0
Novembre	97.8	28	70	0	-141	81		70		27.9			0.0
Décembre	74.5	26	49	0	-141	100		19		25.9	)		30.1
Total	786.4	576								551			235.8
											786.4		
	T (°C)	Indice thermique				Calcul de l'e	eau utile	pour la station d'U	ccle (IRM) -	- année 2013	3		
Janvier	2.1	0.2722					■ P (m	m) EVT réelle (mm)	■EU (mm)				
Février	1.4	0.1482		14	)								
mars	3.1	0.4882											
Avril	9.1	2.4553		12	)								
Mai	11.2	3.3525		10				_					
Juin	15.9	5.6708			<u> </u>								
Juillet	20.4	8.2412		∞ ق									
Août	18.7	7.2328		Quantité (mm)									
Septembre	14.8	5.0926		onal 6									_
Octobre	12.9	4.1441											
Novembre	6.5	1.4822		4									
Décembre	6.1   =	1.3475 <b>39.9276</b>		2				╂	-	╢			
	1 =	33.32/0			Janvier Février	Mars Avril	Mai	Juin Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre