

Manuel Utilisateur ESPERE

Version 2

Rapport final

BRGM/RP-69538-FR
Février 2020

Étude réalisée dans le cadre du projet
de Recherche du BRGM / RP17D3E002

S. Lanini
avec la collaboration de **Y. Caballero** et **P. Le Cointe**

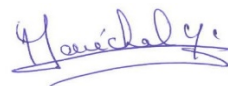
Vérificateur :

Nom : V. Bailly-Comte
Fonction : Hydrogéologue
Date : 04/02/2020
Signature :



Approbateur :

Nom : JC Marechal
Fonction : Responsable d'Unité NRE
Date : 19/02/2020
Signature :



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

Mots clés : ESPERE, Recharge, Pluie efficace, Microsoft Excel

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

Lanini S. (2020) – Manuel utilisateur ESPERE version 2. Rapport BRGM/RP-69538-FR, 27 p., 14 Ill., 2 Annexes

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

Synthèse

ESPERE est une feuille de calcul Microsoft Excel© permettant de mettre en œuvre rapidement et simultanément une dizaine de méthodes d'estimation de la pluie efficace ou de la recharge d'un aquifère. En fonction des données dont il dispose, l'utilisateur peut choisir les méthodes à appliquer parmi celles qui sont implémentées : trois méthodes empiriques (proposées par Guttman, Turc et Kessler), trois méthodes de bilan (d'après Thornthwaite, Dingman et Edijatno & Michel) exploitant les données météorologiques journalières, trois méthodes de filtre des chroniques de débits (BFI Wallingford, Chapman et Eckhardt) et une méthode d'analyse des variations piézométriques (Water Table Fluctuation).

La première version d'ESPERE (v1.52) diffusée à partir de 2016 a été enrichie et corrigée suite aux retours des utilisateurs, permettant de proposer cette version 2 (v2.4 disponible en janvier 2020). Les améliorations apportées à cette nouvelle version d'ESPERE portent essentiellement sur 4 aspects : 1) la prise en compte des récessions non réalisées dans l'implémentation de la méthode WTF, 2) l'estimation automatique des paramètres lorsque les données le permettent (Ratio d'Infiltration de la Pluie Efficace, porosité efficace et paramètres k et BFI_{max} des méthodes de filtre), 3) l'ajout de la méthode de bilan hydrique du sol d'Edijatno & Michel, 4) le comblement automatique des lacunes courtes dans les chroniques de débit et de niveau piézométrique.

Ce manuel utilisateur détaille ces nouveautés, et présente également un guide pas à pas pour mettre en œuvre un calcul de recharge avec ESPERE. La liste exhaustive des modifications et corrections apportées depuis la version 1.52 est fournie en annexe, ainsi qu'un rappel de toutes les méthodes implémentées.

Sommaire

1	Présentation d'ESPERE	7
2	ESPERE : Nouveautés de la version 2	9
2.1	AMELIORATION DE L'IMPLEMENTATION DE LA METHODE WTF	9
2.1.1	Recherche des récessions dans la chronique piézométrique	9
2.1.2	Durée des récessions prises en compte	10
2.1.3	Calcul des corrections	11
2.1.4	Evaluation des corrections apportées	12
2.2	ESTIMATION AUTOMATIQUE DES PARAMETRES	12
2.2.1	Porosité efficace (Sy)	12
2.2.2	Coefficient des lois de filtres de Chapman et d'Eckhardt (k)	14
2.2.3	BFI _{max}	14
2.2.4	Ratio d'Infiltration de la Pluie Efficace (RIPE)	14
2.3	AUTRES AMELIORATIONS INTRODUITES DANS LA VERSION 2 D'ESPERE	14
2.3.1	Ajout d'une méthode de bilan hydrique	14
2.3.2	Comblement automatique des lacunes dans les séries de données piézométriques et hydrométriques	16
3	Mode d'emploi	17
3.1	INSTALLATION ET PARAMETRAGE	17
3.1.1	A propos d'ESPERE	17
3.1.2	Installation d'ESPERE	17
3.1.3	Paramétrage d'Excel	17
3.2	DIDACTICIEL POUR EFFECTUER UN CALCUL DE RECHARGE	19
3.3	PRESENTATION DES RESULTATS	22
3.4	QUESTIONS FREQUENTES ET DETAILS UTILES	24
3.4.1	Formulaire « Couvert Végétal »	24
3.4.2	Onglet « Données »	24
3.4.3	Onglet « Modèles »	24
3.4.4	Onglet « Résultats »	24
4	Bibliographie	25
	Annexe 1 Mises à jour et corrections apportées depuis la version 1.52	29
	Annexe 2 Méthodes implémentées dans ESPERE	33

Liste des illustrations

Illustration 1 : Variation de la correction apportée à la recharge selon la durée des récessions prises en compte	10
Illustration 2 : Prise en compte des récessions non réalisées dans la méthode WTF	11
Illustration 3 : Principe du calcul de la porosité efficace.....	13
Illustration 4 : Schéma de principe du bilan hydrique du sol	15
Illustration 5 : Algorithme de la méthode d'Edijatno & Michel (1989).....	16
Illustration 6 : Message d'avertissement pour activer les macros d'ESPERE	17
Illustration 7 : Paramétrage des options avancées d'Excel.....	18
Illustration 8 : Fenêtre d'accueil ESPERE (onglet « Paramètres »)	19
Illustration 9 : Aperçu de l'onglet « Données » du classeur ESPERE	20
Illustration 10 : Aperçu de l'onglet « Modèles » du classeur ESPERE	20
Illustration 11 : Formulaire de saisie des paramètres du couvert végétal	21
Illustration 12 : Aperçu de l'onglet « Résultats »	22
Illustration 13 : Tableau de synthèse des recharges annuelles (onglet « résultats »)	23
Illustration 14 : Onglet « CumulData ».....	23

Illustration des annexes

Figure 1 : Affichage des débits et débits de base (onglet «Filtres »)	29
Figure 2 : Tableau de synthèse des recharges moyennes interannuelles (onglet «Résultats»)	31
Figure 3 : Affichage des paramètres de la MRC associés aux données de débit (onglet « Filtres »)	31
Figure 4 : Abaque de Kessler (1967).....	34
Figure 5 : Variation typique du Kc en fonction des stades phénologiques.....	36
Figure 6 : Courbe de variation du Kc dans ESPERE	36
Figure 7 : Valeurs particulières des BFI et recharge annuels pour les méthodes de Chapman et d'Eckhardt	39

1 Présentation d'ESPERE

ESPERE (Lanini et al., 2016) est un outil numérique qui permet de mettre en œuvre rapidement et simultanément plusieurs méthodes d'estimation de la pluie efficace et de la recharge d'un aquifère.

La recharge d'un aquifère peut être définie comme le flux d'eau qui percole au travers du sol et de la zone non saturée pour atteindre l'aquifère et constituer un apport au stock d'eau souterraine qu'il contient (De Vries et Simmers, 2002). Il s'agit essentiellement de la fraction des précipitations qui s'infiltré et alimente la nappe aquifère. Elle dépend du contexte météorologique, mais aussi des caractéristiques géomorphologiques (pente, rugosité,), de la superficie de l'impluvium, des propriétés des sols (couverture végétale, type de sol, épaisseur de la réserve utile) et des propriétés hydrodynamiques des formations du sous-sol. Sa connaissance est nécessaire pour réaliser le bilan hydrologique d'un aquifère, estimer sa réserve renouvelable ou bien encore mettre en œuvre un modèle hydrodynamique distribué, pour lequel elle constitue une condition limite.

De nombreuses méthodes permettant d'estimer la recharge d'un aquifère sont décrites dans la littérature scientifique (voir par exemple Scanlon et al., 2002, Xu et Beekman, 2003 ou Healy, 2010). Elles varient, d'une part par l'échelle de temps à laquelle elles opèrent (du pas journalier au pas annuel), et, d'autre part, par le type de données qu'elles exploitent (météorologiques ou hydrologiques). La comparaison des résultats fournis par différentes méthodes a fait l'objet de plusieurs études, notamment aux Etats-Unis dans les années 2000 (voir par exemple Flint et al. 2002 ou Coes et al. 2007). Ces travaux montrent que les méthodes ne présentent pas toutes la même efficacité selon le type d'aquifère sur lequel elles sont appliquées. De plus, elles présentent des incertitudes plus ou moins fortes, liées aux hypothèses sur lesquelles elles sont construites (Halford et Mayer, 2000). Pour obtenir une estimation réaliste de la recharge assortie d'un intervalle de confiance à l'échelle d'un bassin hydrogéologique, il est donc recommandé d'appliquer des approches variées qui se complètent (Scanlon et al., 2006), et de comparer leurs résultats.

L'outil numérique ESPERE (Estimation de la Pluie Efficace et de la Recharge) a été construit pour répondre à ce besoin. Il s'agit d'un classeur Microsoft Excel dans lequel l'utilisateur saisit les chroniques de données journalières et les paramètres relatifs à l'aquifère étudié. Les procédures implémentées permettent soit de calculer directement la recharge, soit de calculer la pluie efficace et de la convertir en recharge en lui appliquant un coefficient multiplicatif (ratio d'infiltration de la pluie efficace, permettant de répartir la pluie efficace entre ruissellement et infiltration). Les méthodes implémentées dans ESPERE appartiennent à différentes catégories : méthodes empiriques, méthodes de bilan hydrologique, méthode de traitement des niveaux piézométriques, ou méthodes de filtre des débits. Elles sont mises en œuvre au pas de temps journalier ou annuel. A l'issue des calculs, des tableaux de résultats et des graphiques à l'échelle mensuelle et annuelle sont automatiquement générés.

La première version d'ESPERE (v1.52) a été diffusée à partir de mars 2016 sur le site Internet du BRGM (<http://www.brgm.fr/espere> et <http://www.brgm.eu/espere> pour la version en anglais).

2 ESPERE : Nouveautés de la version 2

Les modifications et ajouts apportés à ESPERE répondent à des remarques et demandes des utilisateurs. Les deux principales évolutions concernent :

- la prise en compte des récessions non réalisées dans l'application de la méthode WTF ;
- l'estimation automatique des paramètres nécessaires à la mise en œuvre des méthodes de filtre (k et BFI_{max}), de la méthode WTF (porosité efficace S_y) et des méthodes de bilan hydrique pour estimer la recharge (ratio d'infiltration de la pluie efficace RIPE) lorsque les données le permettent.

2.1 AMELIORATION DE L'IMPLEMENTATION DE LA METHODE WTF

La méthode d'estimation de la recharge basée sur l'étude des variations de niveaux piézométriques (WTF) peut être implémentée de plusieurs façons :

- en négligeant les processus de dissipation ou vidange de la zone saturée, ce qui revient à considérer que la recharge est égale à l'élévation du niveau piézométrique au-dessus de l'état stationnaire multipliée par la porosité efficace : c'est la méthode RISE de l'USGS (décrite par Healy en 2002 et implémentée dans la version 1 d'ESPERE) ;
- en corrigeant l'élévation de niveau piézométrique pour tenir compte du volume d'eau infiltré n'induisant pas d'augmentation de niveau car dissipé par l'écoulement (souvent appelé « récession non réalisée ») pour chaque épisode de recharge. L'estimation de cette hauteur d'eau supplémentaire est obtenue en calant une fonction sur la récession précédant l'épisode de recharge, puis en extrapolant cette fonction. La mise en œuvre peut être graphique ou automatisée (voir par exemple la méthode Episodic Master Recession – EMR – proposée par Nimmo et al., 2015) ;
- en corrigeant l'élévation de niveau piézométrique pour tenir compte des récessions non réalisées à chaque pas de temps, en utilisant une unique fonction pour reproduire les récessions : la Master Recession Curve (MRC) (Delin et al., 2007).

La méthode implémentée dans la version 2 d'ESPERE est basée sur le calage d'une fonction exponentielle décroissante sur chaque période de récession. Il s'agit d'une version simplifiée de la méthode proposée par Nimmo et al. (2015).

2.1.1 Recherche des récessions dans la chronique piézométrique

Une procédure de recherche des récessions dans une chronique de données journalière $H(t)$ a été implémentée dans ESPERE. Elle reproduit les principes suivants :

- Début de récession à $t=t^0$ si le signe de la dérivée de la fonction H s'inverse :

$$\frac{dH}{dt}(t^0) \geq 0 \text{ et } \frac{dH}{dt}(t^0 + 1) < 0, \text{ soit } H(t^0) \geq H(t^0-1) \text{ et } H(t^0) > H(t^0+1)$$
 $(t^0 \text{ correspond donc au temps pour lequel la fonction } H \text{ atteint son maximum local}).$

- Récession tant que la dérivée est négative, en introduisant une tolérance α sur la variation : $\frac{dH}{dt}(t) < \alpha$, soit $H(t) < H(t-1) + \alpha$

L'introduction d'une tolérance permet de tenir compte de la précision des données dans l'identification des périodes de récession. Elle permet de filtrer le bruit et de ne retenir que les changements de tendances qui sont significatifs. Les exemples d'application aux chroniques piézométriques suggèrent un ordre de grandeur de l'ordre de la précision de l'appareil de mesure (valeurs de 2 à 19.5 cm/jours dans Nimmo et al. (2015), de 1 cm dans Delottier et al., 2018). Dans ESPERE, la valeur fixée par défaut est de 1 cm.

2.1.2 Durée des récessions prises en compte

La méthode EMR de Nimmo et al. (2015) s'applique sur chaque période de récession définie de façon à ce que la date de début soit suffisamment éloignée du dernier épisode pluvieux. Cette durée, appelée « storm recovery time », correspond au temps minimum nécessaire pour qu'il n'y ait plus d'influence de la dernière pluie sur la piézométrie. Sa valeur est généralement fixée par essai-erreur lors de l'application de la procédure. Nimmo et al. (2015) mentionnent une valeur de 1.75 jours (site de Masser) et Delottier et al. (2018) une valeur de 6 jours (site expérimental à Bordeaux).

Pour ne pas intégrer des corrections qui ne correspondraient pas à des récessions, mais à des perturbations rapides du niveau piézométrique liée à un épisode pluvieux, le choix a été fait dans ESPERE de ne considérer que les récessions d'une durée supérieure ou égale à 6 jours. Cette valeur a été fixée après une étude de sensibilité sur les résultats (Illustration 1) réalisée pour quelques cas d'étude. Elle est par ailleurs cohérente avec les valeurs de « storm recovery time » choisies par Nimmo et al. (2015) et Delottier et al. (2018), et moins restrictives que la valeur de 10 jours choisie par Delin et al. (2007) dans leur application de la méthode de MRC à pas fixe.

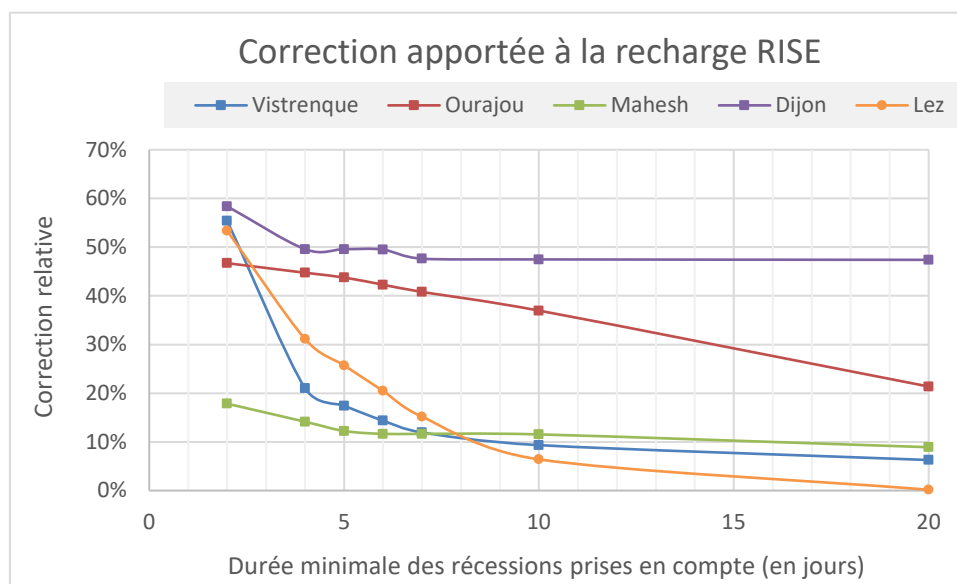


Illustration 1 : Variation de la correction apportée à la recharge selon la durée des récessions prises en compte

2.1.3 Calcul des corrections

Une fonction exponentielle décroissante est ajustée sur chaque récession de plus de 5 jours (6 jours ou plus) ayant été identifiée. Cette fonction exponentielle est prolongée jusqu'à la date du début de la récession suivante (quelle que soit la durée de cette récession suivante). La correction apportée à l'augmentation de charge est égale à la piézométrie le dernier jour de la récession, moins la valeur de la fonction exponentielle au début de la récession suivante (Illustration 2).

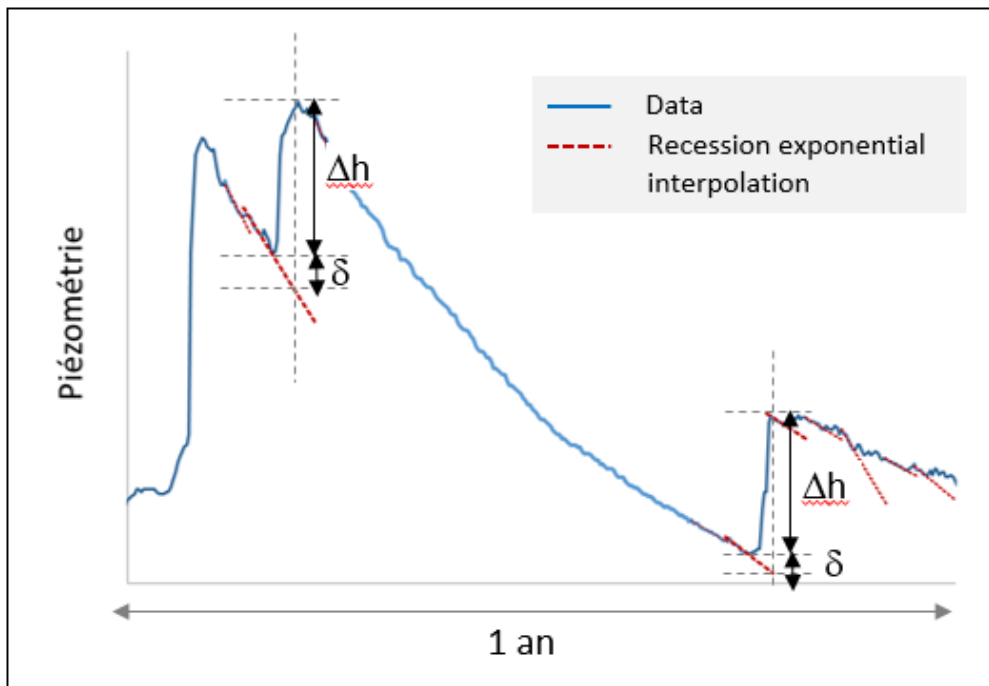


Illustration 2 : Prise en compte des récessions non réalisées dans la méthode WTF

La recharge annuelle est égale à la somme des élévations de niveau piézométrique au cours de l'année, plus la somme des corrections liées aux récessions non réalisées, multipliée par la porosité efficace : $R = S_y \cdot \sum (\Delta h + \delta)$.

Remarques :

Pour le calcul des corrections d'augmentation de niveau piézométrique (δ) et donc de recharge, chaque récession est prise en compte dans l'année où elle finit (une récession à cheval sur l'année N et N+1 apporte une correction sur la recharge de l'année N+1).

Les périodes identifiées comme des récessions par la procédure automatique, mais dont la baisse piézométrique est inférieure à deux fois la tolérance α , sont exclues du calcul de correction.

De même, il peut arriver que l'application de la procédure d'identification d'une récession et de calcul de correction fournisse une correction négative (dans le cas où la récession n'est pas correctement représentée par une loi exponentielle par exemple). Ces corrections négatives ne sont bien sûr pas prises en compte dans le calcul de la recharge.

2.1.4 Evaluation des corrections apportées

Les deux versions d'application de la méthode WTF sont conservées dans la version 2 d'ESPERE (avec et sans prise en compte des récessions non réalisées). Les recharges annuelles estimées par chacune des méthodes sont affichées dans l'onglet « WTF », permettant ainsi à l'utilisateur d'évaluer les résultats. Dans l'onglet « Résultats », seule la recharge WTF avec prise en compte des récessions non réalisées est reportée.

Les tests effectués sur quelques cas d'étude ont montré que la prise en compte des récessions non réalisées augmente la valeur de la recharge estimée par la méthode RISE de 12 à 50% selon les cas (voir sur l'illustration 1, les erreurs relatives pour une durée minimale des récessions prises en compte égale à 6 jours). Seguin (2016) a montré sur un exemple théorique que la recharge calculée par la méthode WTF-MRC était 14% supérieure à la recharge WTF-RISE.

2.2 ESTIMATION AUTOMATIQUE DES PARAMETRES

Le travail réalisé depuis 2015 sur la recharge des aquifères et l'exploration des différentes méthodes permettant de l'évaluer (voir Caballero et al. 2020, rapport BRGM/RP-69217-FR) a permis de mieux cerner les paramètres nécessaires à la mise en œuvre de ces méthodes. Ceci a permis de proposer dans la version 2 d'ESPERE, une estimation automatique de certains paramètres, qui peuvent être déduits ou approchés par l'analyse des données disponibles de débit et/ou de piézométrie. **Cette fonctionnalité ne remplace toutefois pas l'expertise de l'utilisateur sur son cas d'étude.** C'est pourquoi l'estimation des paramètres n'est proposée que si l'utilisateur ne fournit pas de valeur. Il faut noter que le temps de calcul est allongé si ESPERE doit estimer les paramètres plutôt qu'utiliser ceux qui lui sont fournis.

2.2.1 Porosité efficace (S_y)

Pour proposer une estimation de la porosité efficace, paramètre nécessaire à la mise en œuvre de la méthode WTF, on se place dans des hypothèses fortes d'un cours d'eau drainant un seul aquifère, supposé homogène. La chronique de niveau piézométrique utilisée est supposée représentative du niveau moyen dans l'aquifère (les variations spatiales de piézométrie, notamment en fonction de la distance au cours d'eau, sont négligées). On notera que le milieu étant supposé homogène, l'estimation de porosité efficace proposée ne s'applique pas aux milieux à double ou triple porosité (comme les aquifères karstiques par exemple). Sous ces hypothèses, pendant les périodes sans précipitation, si on exclut les échanges inter-bassins et la drainance verticale pour les aquifères multi-couches, les variations de stock d'eau dans l'aquifère ne sont liées qu'à sa vidange vers le cours d'eau, ce qui correspond au débit de base (Illustration 3). On a donc :

- Variation de volume d'eau stocké = $S_y \cdot \text{Surf} \cdot \Delta h$ (avec Surf la surface de l'impluvium et S_y la porosité efficace de l'aquifère libre)
- Volume écoulé vers le cours d'eau = $\sum(Qb \cdot \Delta t)$ (avec Δt le pas de temps des données)

d'où :

$$S_y = \frac{\sum Qb \cdot \Delta t}{\Delta h \cdot \text{Surf}}$$

Si une chronique de débit est disponible avec une période commune suffisante avec la chronique de niveaux piézométriques, ESPERE peut appliquer cette formule pour proposer une valeur de porosité efficace.

L'implémentation de cette fonctionnalité dans la version 2 d'ESPERE repose sur les principes suivants :

- Les périodes sans précipitations sont assimilées aux périodes de récession piézométrique de durée supérieure à 20 jours ;
- Le débit de base utilisé pour le calcul est celui qui est estimé par la méthode de Wallingford ;
- La valeur de S_y proposée en résultat final est la moyenne de tous les S_y calculés sur les récessions de plus de 20 jours. Dans l'onglet « Résultats », la valeur de S_y est affichée, ainsi que le nombre de récessions utilisées pour la calculer ainsi que l'écart type des valeurs.

Il est rappelé que cette estimation de la porosité efficace repose sur des approximations ou hypothèses fortes, et seul l'utilisateur peut juger si elles sont acceptables pour son cas d'étude.

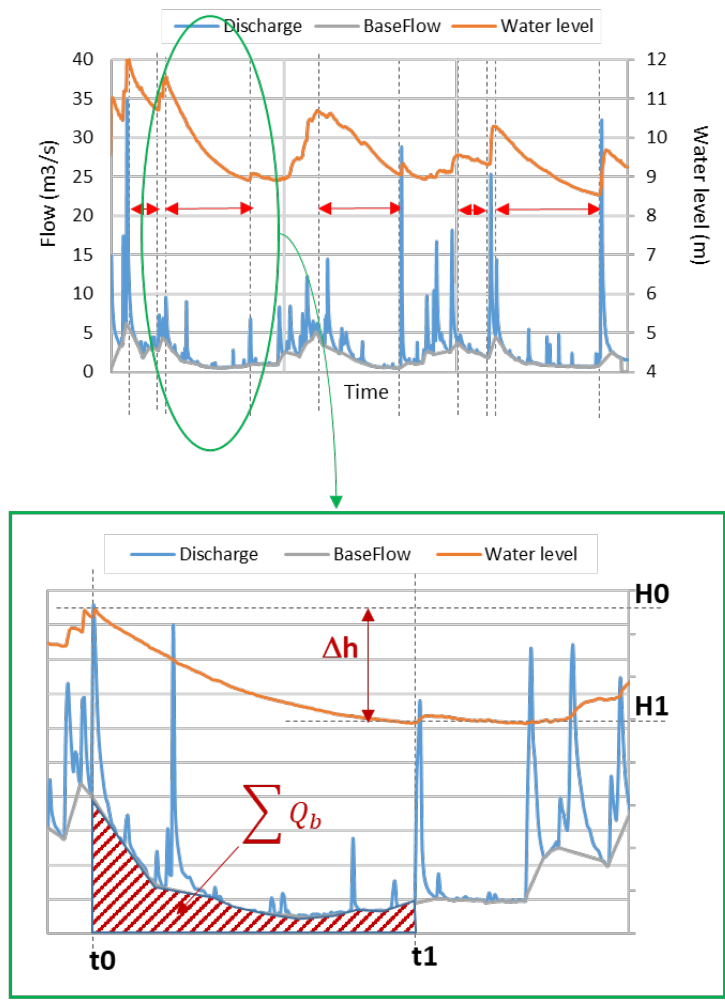


Illustration 3 : Principe du calcul de la porosité efficace

2.2.2 Coefficient des lois de filtres de Chapman et d'Eckhardt (k)

Si on suppose que les périodes de récession du débit suivent une loi de Maillet, on peut montrer (voir Annexe 2) que le paramètre k des méthodes de filtre de Chapman et d'Eckhardt est relié à α le coefficient de récession de la loi de Maillet par la relation suivante : $k = e^{-1/\alpha}$.

Une procédure de calcul de la Master Recession Curve (MRC) a donc été implémentée dans la version 2 d'ESPERE pour estimer le coefficient de récession « moyen » de la chronique de débit. Cette procédure reprend la méthodologie utilisée par Posavec et al. (2006), mais sans y inclure l'étape de pré-traitement de la chronique qui consiste à en supprimer les plateaux (trois valeurs successives identiques).

Pour appliquer cette procédure de calcul de MRC, il faut pouvoir auparavant identifier toutes les récessions dans la chronique. Ceci est fait automatiquement par appel à la même procédure que pour la mise en œuvre de WTF (2.1.1). La tolérance imposée pour la recherche des récessions sur la chronique de débits est de 0.001 m³/s.

Si l'utilisateur ne fournit pas de valeur pour le paramètre k, ESPERE détermine donc la MRC associée à la chronique de débits et en déduit une valeur pour le paramètre k.

2.2.3 BFImax

Si l'utilisateur ne fournit pas de valeur pour le paramètre BFImax, nécessaire à la mise en œuvre de la méthode de filtre d'Eckhardt, ESPERE utilise la valeur maximale du BFI annuel calculé par la méthode de Wallingford sur la période de disponibilité des données de débit.

2.2.4 Ratio d'Infiltration de la Pluie Efficace (RIPE)

Le RIPE peut être estimé à partir du BFI calculé par la méthode de filtre de Wallingford (voir Caballero et al., 2020). Dans la version 2 d'ESPERE, si l'utilisateur ne fournit pas de valeur pour le RIPE et qu'une chronique de débit est disponible, une valeur égale au BFI annuel minimal sur la période disponible est automatiquement proposée et utilisé pour la partition de la pluie efficace avec les méthodes de filtre.

2.3 AUTRES AMELIORATIONS INTRODUITES DANS LA VERSION 2 D'ESPERE

2.3.1 Ajout d'une méthode de bilan hydrique

Les méthodes de bilan hydrique permettent d'estimer l'évapotranspiration réelle et la pluie efficace journalières, en réalisant un bilan des entrées et sorties du sol, assimilé à un réservoir ayant une capacité de stockage, que l'on caractérise par sa valeur maximale (Illustration 4).

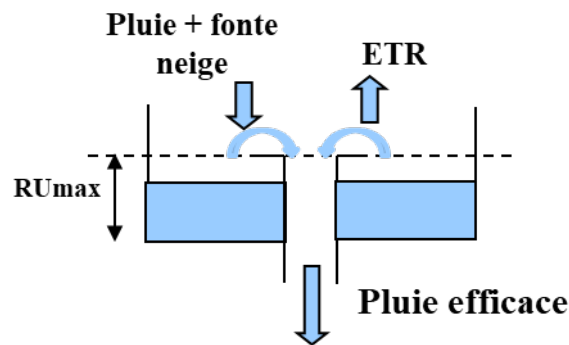


Illustration 4 : Schéma de principe du bilan hydrique du sol

La version 1 d'ESPERE inclut deux méthodes de bilan hydrique : celle de Thornthwaite (1948) et celle de Dingman (2008). Dans la version 2, une troisième méthode a été implémentée, celle proposée par Edijatno et Michel (1989). Les trois méthodes diffèrent par leur algorithme de calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) et du stock d'eau du sol (voir Le Coite et al., 2019 pour plus de détails). A chaque pas de temps, le bilan calcule la différence entre l'apport par les précipitations (pluie + fonte de la neige) et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Si cet écart est négatif, la pluie efficace est fixée à zéro, et toute l'eau disponible dans le système est mobilisée pour l'évapotranspiration. La différence ($ETP - Précipitations$) est prélevée sur le stock d'eau du sol :

- jusqu'à épuisement de celui-ci si nécessaire (méthode de Thornthwaite),
- selon une loi exponentielle décroissante (méthode de Dingman),
- selon une loi quadratique (méthode d'Edijatno&Michel).

A l'inverse, si l'écart est positif, la différence ($Précipitations - ETP$) :

- remplit d'abord le stock d'eau du sol. Quand celui-ci atteint sa valeur maximale, le surplus génère de la pluie efficace (méthodes de Thornthwaite et Dingman) ;
- se répartit entre pluie efficace et stockage dans le réservoir sol suivant une loi quadratique (méthode d'Edijatno&Michel).

Les données de température sont utilisées pour estimer la fonte du stock de neige à chaque pas de temps.

L'algorithme de calcul de la l'ETR et de la pluie efficace pour la méthode d'Edijatno et Michel est reproduit sur l'illustration 5.

Si $P > Kc.ETP$, alors $P_n = P - Kc.ETP$ et $E_n = 0$.

$$dRU = [1 - (RU/RU_{max})^2] \cdot dP_n$$

$$ETR = ETP$$

$$dP_{eff} = (RU/RU_{max})^2 \cdot dP_n$$

$$\text{En intégrant : } RU_{i+1} = [RU_i + RU_{max} \cdot \tanh(P_n/RU_{max})] / [1 + (RU_i/RU_{max}) \cdot \tanh(P_n/RU_{max})]$$

Si $P < Kc.ETP$, alors $P_n = 0$ et $E_n = Kc.ETP - P$.

$$dRU = [(RU/RU_{max})^2 - 2 \cdot RU/RU_{max}] \cdot dE_n$$

$$dETR = - dRU$$

$$P_{eff} = 0$$

$$\text{En intégrant : } RU_{i+1} = RU_i \cdot [1 - \tanh(E_n/RU_{max})] / [1 + (1 - RU_i/RU_{max}) \cdot \tanh(E_n/RU_{max})]$$

Définitions : P_n = pluie nette, E_n = restant d'ETP non satisfaite par pluie.

Illustration 5 : Algorithme de la méthode d'Edijatno & Michel (1989)

2.3.2 Comblement automatique des lacunes dans les séries de données piézométriques et hydrométriques

La version 2 d'ESPERE propose un comblement automatique des petites lacunes dans les chroniques de données piézométriques et hydrométriques (interpolation linéaire des deux valeurs encadrant la lacune). Néanmoins, seules les lacunes inférieures ou égales à 5 jours (dans les données piézométriques journalières) et à 3 jours (dans les données hydrométriques journalières) sont automatiquement comblées. Ces seuils ont été fixés arbitrairement¹.

Cette fonctionnalité permet d'obtenir des résultats corrects lors de la mise en œuvre des méthodes de filtre et WTF, même lorsqu'on ne dispose pas de chroniques complètes. Les valeurs interpolées sont ajoutées dans les chroniques de données (onglet « Données ») et y apparaissent en rouge.

Il convient de noter que si les données comportent des lacunes supérieures aux seuils de comblement qui ont été fixés, les calculs sont tout de même réalisés. Un message d'avertissement est affiché à la fin du calcul. Seul l'utilisateur peut juger de la pertinence ou non des résultats obtenus (débits de base, BFI et recharges associées).

¹ L'utilisateur averti qui en aurait besoin pour une application particulière peut changer ces valeurs directement dans le code VBA (dans le module TraiteData, subroutine Chargedata)

3 Mode d'emploi

3.1 INSTALLATION ET PARAMETRAGE

3.1.1 A propos d'ESPERE

ESPERE version 2 est développé en VBA pour Microsoft Excel Office 2016 et fonctionne sous Windows 10.

La version d'ESPERE disponible au 01/01/2020 est la version 2.4.

3.1.2 Installation d'ESPERE

Copier ESPERE_v2.4FR.xlsm ou ESPERE_v2.4EN.xlsm sur votre PC dans le répertoire de votre choix.

3.1.3 Paramétrage d'Excel

A priori, ESPERE fonctionne quel que soit le séparateur décimal défini sur votre PC (point ou virgule).

Dans les options d'Excel, il faut autoriser les macros ou « Désactiver les macros avec notifications » (Illustration 7). Ainsi, à l'ouverture d'ESPERE, si les macros nécessaires au fonctionnement d'ESPERE ne sont pas activées, un message Microsoft vous avertit et vous permet de les rendre opérationnelles (Illustration 6).

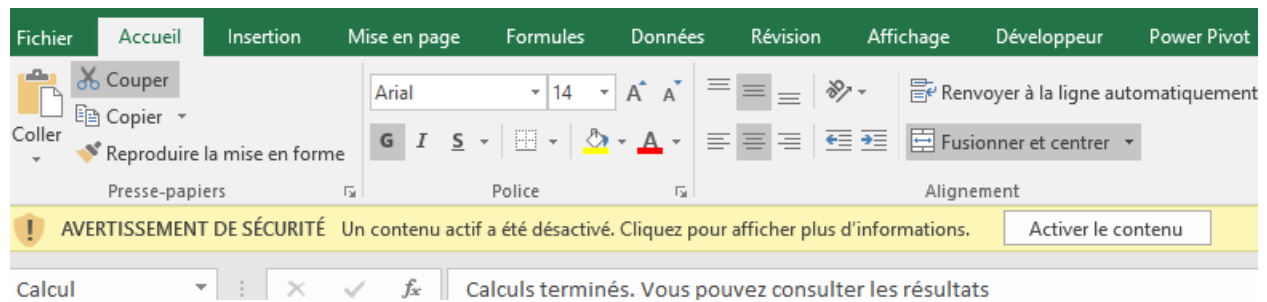


Illustration 6 : Message d'avertissement pour activer les macros d'ESPERE

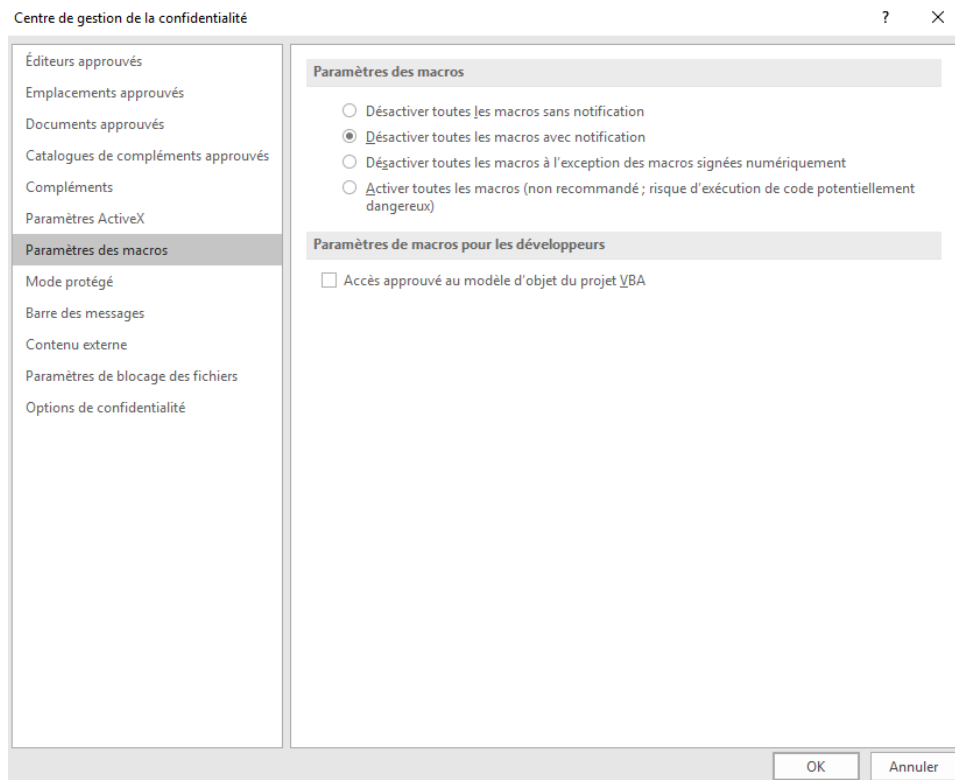
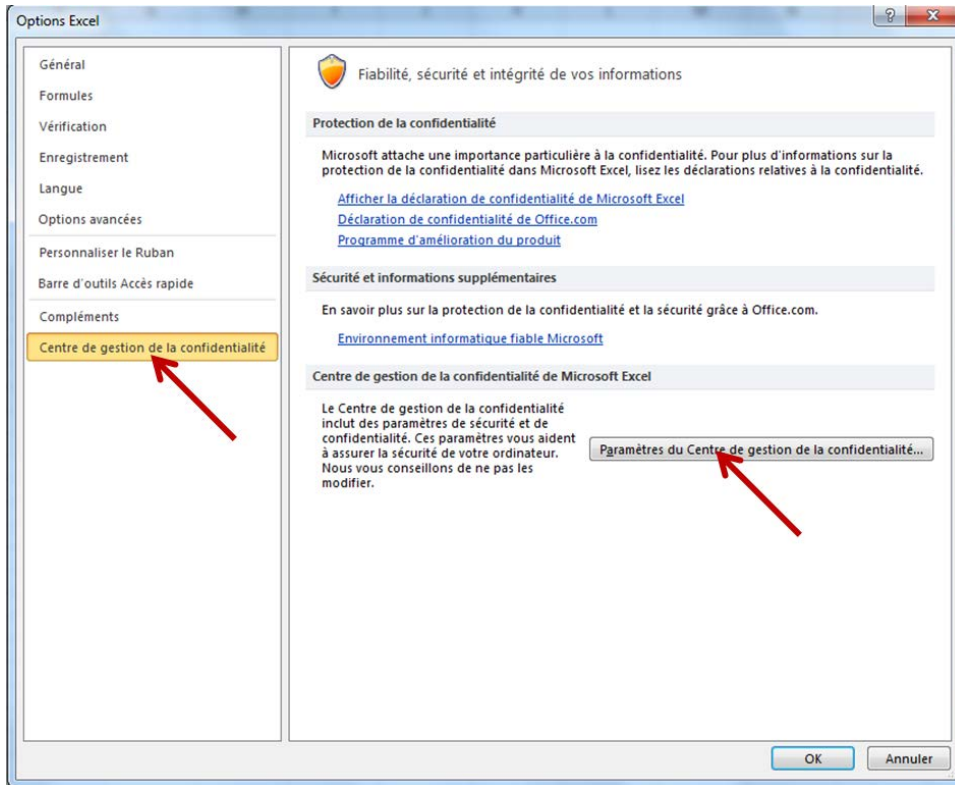


Illustration 7 : Paramétrage des options avancées d'Excel.

3.2 DIDACTICIEL POUR EFFECTUER UN CALCUL DE RECHARGE

1. Ouvrir le fichier ESPERE_v2.4FR.xlsm.

Estimation de la Pluie Efficace et de la REcharge selon différentes méthodes			
Mode d'emploi 1) Si vous souhaitez utiliser des nouvelles données, cliquer sur le bouton "Initialiser" ci-contre puis collez les nouvelles données dans l'onglet "Données" 2) Cochez les méthodes qui doivent être appliquées, et renseignez les paramètres du tableaux ci-dessous 3) Cochez la case ci-contre si vous souhaitez que les résultats soient exprimés par années hydrologiques plutôt que par années civiles 4) Lancez les calculs en cliquant sur le bouton "Lancer les calculs" 5) Lorsque les calculs sont terminés, vous pouvez enregistrer la simulation réalisée en cliquant sur le bouton "Sauvegarder".			<input type="button" value="Initialiser"/> <input type="checkbox"/> Année hydrologique
Propriétés	Unité	Valeur	Remarques
Surface de l'impluvium	km ²		Pour transformer la pluie efficace en volume infiltré (méthodes de bilan et Turc) et le débit de base en recharge
Ratio Infiltration / Pluie efficace (RIPE)	s.d.		Pour transformer la pluie efficace en recharge (méthodes de bilan et Turc). Vaut 0 si toute la pluie efficace ruisselle, vaut 1 si toute la pluie efficace s'infiltré.
Stock maximal d'eau dans le sol (RU max)	mm		Paramètre nécessaire pour les méthodes de Thornthwaite, Dingman et Edijatno&Michel
Latitude	°		Paramètre nécessaire pour le calcul de l'ETP par la formule de Hamon
Porosité efficace aquifère libre (Sy)	s.d.		Paramètre nécessaire pour la méthode Water Table Fluctuation
Surface du bassin hydrogéologique	km ²		Surface à considérer pour convertir la recharge calculée par WTF en volume infiltré
Paramètres spécifiques			
Végétation Prise en compte du couvert végétal pour le calcul de l'ETR. <input type="button" value="Pour activer cette option et définir les paramètres, cliquer ici"/>			
BFI - Filtre Chapman&Maxwell ou Eckardt		ESPERE v2 propose une estimation automatique des paramètres RIPE, Sy, BFI _{max} et k. Si vous fournissez une valeur à ces paramètres, l'estimation automatique sera désactivée et la valeur fournie sera utilisée dans les calculs.	
BFI _{max} (entre 0 et 1)			
k (entre 0 et 1)			
Méthodes à appliquer			
Estimation de la pluie efficace			
<input type="checkbox"/> Turc			
<input type="checkbox"/> Thornthwaite			
<input type="checkbox"/> Dingman			
<input type="checkbox"/> Dingman avec ETP Hamon			
<input type="checkbox"/> Edijatno & Michel			
Estimation directe de la recharge			
<input type="checkbox"/> Relation Empirique			
<input type="checkbox"/> Kessler			
<input type="checkbox"/> Water Table			
<input type="checkbox"/> Filtres et BFI			
<input type="button" value="Lancer les calculs"/>		<input type="button" value="Prêt pour un nouveau calcul"/>	
<input type="button" value="Sauvegarder la simulation"/>			

©BRGM - 2020 - ESPERE version 2.4

Contact : espera@brgm.fr

Illustration 8 : Fenêtre d'accueil ESPERE (onglet « Paramètres »)

2. Dans l'onglet « Données », coller les données journalières dont vous disposez. Au minimum, les colonnes « Dates » et « Précipitations » doivent être remplies pour qu'une méthode au moins puisse être appliquée. Les données doivent impérativement commencer le premier janvier et finir le 31 décembre. Les données météorologiques (pluie ou précipitations, ETP, neige et température) ne doivent pas comporter de lacune. Les lignes 3 et 4 (origine des données) sont des lignes de commentaire libre qu'il n'est pas obligatoire de remplir.

Si les précipitations liquides (pluie) et solides (neige) sont connues séparément, renseigner la pluie dans la colonne B (« Précipitations ») et la neige en colonne D (« Neige »). Si seules les précipitations totales sont connues, les coller en colonne B, et laisser vide la colonne D (entrer toutefois un texte quelconque, par exemple « Non Disponible », en cellule D6).

Coller ci-dessous les données journalières (dates et valeurs) à utiliser pour l'estimation de la pluie efficace et de la recharge.
Rappel : si Neige ou Température non disponible, indiquer "ND" dans la première cellule (D6 ou E6).

Les données doivent commencer au 1er janvier et finir au 31 décembre. Au minimum, précipitations et ETP doivent être renseignées.
 Les données météorologiques ne doivent pas comporter de lacunes. Les lacunes inférieures à 3j pour les débits, et 5j pour la piézométrie sont comblées automatiquement par interpolation linéaire.

Origine des données						
Date	PRECIPITATIONS ou PLUIE (mm)	ETP (mm)	NEIGE (mm)	Température (°C)	Débits (m3/s)	Piézométrie (m NGF)

Illustration 9 : Aperçu de l'onglet « Données » du classeur ESPERE

3. Si des résultats (pluie efficace et /ou recharge journalière) fournis par d'autres modèles sont disponibles, il est possible de les inclure dans les graphiques de comparaison en renseignant l'onglet « Modèles ». La colonne des dates est remplie automatiquement (copiée sur celle des données), il suffit de copier les résultats des autres modèles en face des dates pour lesquelles ils ont été calculés. Cette étape est totalement facultative.

Le remplissage de cette feuille est OPTIONNEL

Collez ci-dessous les résultats (pluie efficace et/ou recharge) obtenus avec d'autres modèles que vous souhaitez comparer aux résultats fournis par les méthodes implémentées dans ESPERE.
 La colonne "Date" commence à la même date que celle de la feuille "Données". Les colonnes de résultats des modèles peuvent être vides, ou n'être renseignées qu'à partir d'une année postérieure.
 Pour ne pas fausser les comparaisons, il est préférable de fournir des années complètes.

	Modèle 1		Modèle 2		Modèle 3	
Nom du modèle	Modèle1		Modèle2		Modèle3	
Commentaire libre						
Surface associée (km2)						
Date	Pluie efficace (mm)	Recharge (mm)	Pluie efficace (mm)	Recharge (mm)	Pluie efficace (mm)	Recharge (mm)
00/01/1900						
00/01/1900						
00/01/1900						
00/01/1900						
00/01/1900						
00/01/1900						
00/01/1900						
00/01/1900						
00/01/1900						
00/01/1900						
.....						

Illustration 10 : Aperçu de l'onglet « Modèles » du classeur ESPERE

4. Retour sur l'onglet « Paramètres ».
- 4.1. Sélectionner les méthodes à mettre en œuvre. Pour mémoire, les méthodes de filtre et la méthode WTF (Water Table Fluctuation) ne peuvent pas être appliquées si les données de débit, respectivement de piézométrie, sont indisponibles. S'il n'y a pas de données de température, les méthodes de Turc et de Dingman-Hamon seront automatiquement désactivées (même si elles sont cochées).
 - 4.2. Renseigner les propriétés et paramètres spécifiques nécessaires pour appliquer les méthodes sélectionnées. Si les champs ne sont pas remplis et que la disponibilité des données le permet, ESPERE proposera des valeurs pour la plupart des paramètres.
 - 4.3. Pour que les résultats annuels soient calculés par années hydrologiques (définies ici du 1^{er} septembre au 31 août) plutôt que par années civiles, cocher la case correspondante.

- 4.4. Pour tenir compte de l'influence du couvert végétal sur l'évapotranspiration dans les méthodes de bilan hydrologique, cliquer sur le bouton correspondant. Un formulaire dédié aux paramètres du coefficient cultural (K_c) s'ouvre alors (Illustration 11). Six paramètres sont à renseigner pour définir une courbe en trapèze supposée représenter la variation du coefficient cultural en fonction du stade phénologique du couvert végétal : $K_{c\min}$, $K_{c\max}$, M1, M2, M3 et M4. Par défaut, les paramètres sont fixés de façon à ce que $K_c=1$ tout le temps (pas de prise en compte de l'influence du couvert végétal).
5. Lancer le calcul. Lorsque le calcul est terminé, le message « Calculs terminés. Vous pouvez consulter les résultats » s'affiche en case E31. Il est alors possible de sauvegarder (dans un nouveau fichier Excel nommé par défaut RésultatsESPERE_v2.4.xslm) les feuilles d'ESPERE contenant les données, paramètres et résultats de la simulation réalisée en cliquant sur le bouton « Sauvegarder la simulation ».

Paramètres d'évolution du K_c au cours de l'année

Schéma descriptif des 6 variables de définition de la loi de variation du K_c

1.2
 K_c
 $K_c \max$ 1
0.8
0.6
0.4
 $K_c \min$ 0.2
0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
Mois
M1 M2 M3 M4

Pour imposer une valeur constante de K_c , choisir $M1=M2=M3=M4$ ou $K_{c\min} = K_{c\max}$.
 K_c sera alors égal à $K_{c\max}$ toute l'année.

Plantation (M1)	Début de la phase de maturité (M2)
janvier	janvier
février	février
mars	mars
avril	avril
mai	mai
juin	juin
juillet	juillet
août	août
septembre	septembre
octobre	octobre
novembre	novembre
décembre	décembre

Kc min
1

Kc max
1

Début de la phase de sénescence (M3)	Récolte (M4)
janvier	janvier
février	février
mars	mars
avril	avril
mai	mai
juin	juin
juillet	juillet
août	août
septembre	septembre
octobre	octobre
novembre	novembre
décembre	décembre

OK

Illustration 11 : Formulaire de saisie des paramètres du couvert végétal

3.3 PRESENTATION DES RESULTATS

L'onglet « Résultats » synthétise sous forme de tableaux tous les résultats calculés, au pas de temps initial imposé par la méthode (journalier à annuel), mais également cumulés au pas mensuel et annuel, et en moyenne mensuelle interannuelle lorsque cela est pertinent.

Les valeurs annuelles et les moyennes mensuelles interannuelles de pluie efficace et de recharge calculées par les différentes méthodes mises en œuvre, sont représentées sous forme de diagramme en barre pour une comparaison plus aisée (Illustration 12). Le cas échéant, les chroniques de pluie efficace et/ou de recharge obtenues par ailleurs et renseignées dans l'onglet « Modèles » sont également intégrées aux comparaisons.

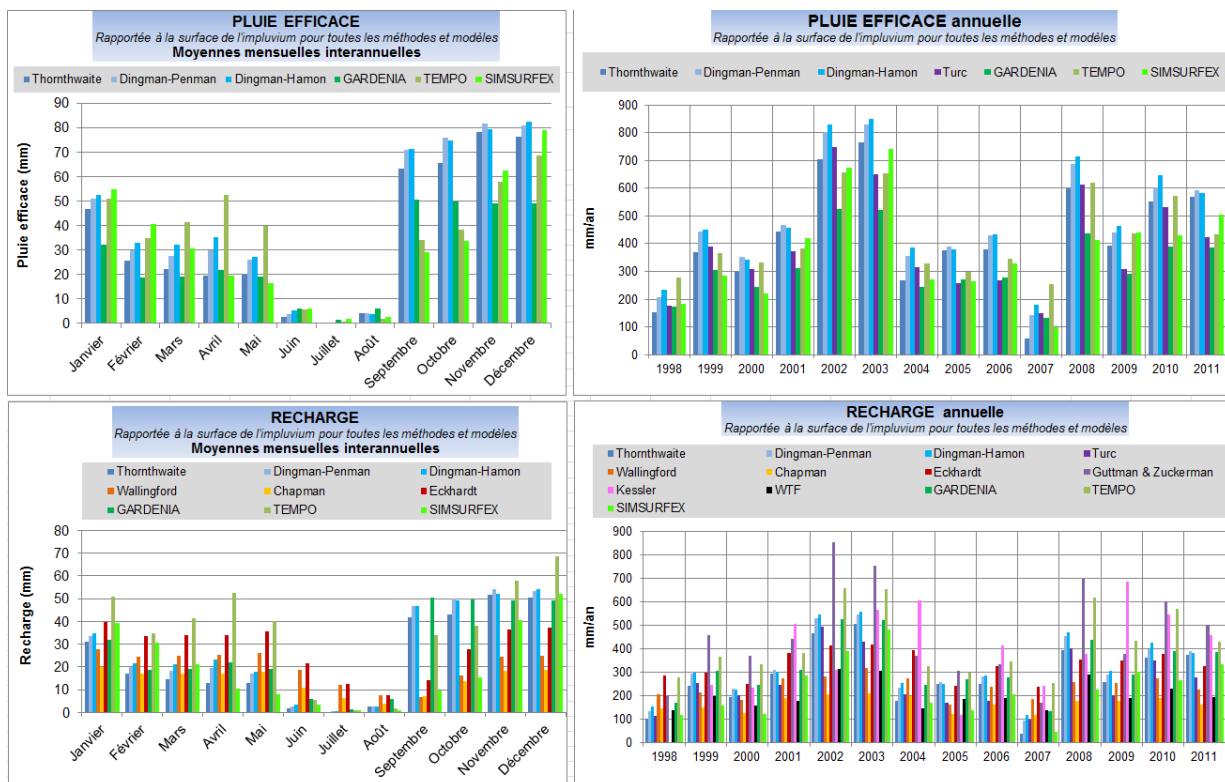


Illustration 12 : Aperçu de l'onglet « Résultats »

Un tableau de synthèse rappelle les différents paramètres des calculs, et fournit une comparaison des valeurs de recharge annuelle (moyenne interannuelle sur la période de disponibilité des données) estimées par les différentes méthodes. (à noter, que la valeur reportée dans ce tableau pour la méthode WTF est celle qui intègre les corrections de récessions non réalisées).

Rappel des PARAMETRES		
SURFACE du BASSIN (en km2)		
Méthodes de bilan	265	
Guttman&Zuckerman	265	
Kessler	265	
Turc	265	
WTF	265	
Modèle1	265	
Modèle2	265	
Modèle3	265	
Réserve Utile Maximale (mm)		
Méthodes de bilan	82	
Coefficient d'infiltration de la pluie efficace (RIPE)		
Méthodes de bilan et Turc	0.61	
Paramètres des filtres		
	BFI _{max}	k
Chapman	0.938	
Eckardt		
Porosité efficace (Sy)		
Moyenne	0.03	
Ecart type		
RECHARGE annuelle (mm/an) Moyenne interannuelle		
Thornthwaite	125	
Dingman avec ETP Hamon	175	
Dingman	158	
Edijatno & Michel	172	
Guttman&Zuckerman		
Kessler		
Turc	154	
WTF	117	
Wallingford	218	
Chapman	172	
Eckhardt	219	

Rappel des PARAMETRES		
SURFACE du BASSIN (en km2)		
Méthodes de bilan	265	
Guttman&Zuckerman	265	
Kessler	265	
Turc	265	
WTF	265	
Modèle1	265	
Modèle2	265	
Modèle3	265	
Réserve Utile Maximale (mm)		
Méthodes de bilan	82	
Coefficient d'infiltration de la pluie efficace (RIPE)		
Méthodes de bilan et Turc	0.61	Coefficient estimé, égal au minimum des BFI annuels
Paramètres des filtres		
	BFI _{max}	k
Chapman	0.938	
Eckardt		
Porosité efficace (Sy)		
Moyenne	0.0422	11 récessions de durée > 20 jours ont été utilisées pour estimer Sy
Ecart type	0.0165	
RECHARGE annuelle (mm/an) Moyenne interannuelle		
Thornthwaite	125	
Dingman avec ETP Hamon	175	
Dingman	158	
Edijatno & Michel	172	
Guttman&Zuckerman		
Kessler		
Turc	154	
WTF	165	
Wallingford	218	
Chapman	172	
Eckhardt	219	

Illustration 13 : Tableau de synthèse des recharges annuelles (onglet « résultats ») à gauche : si paramètres renseignés par l'utilisateur. à droite : si paramètres estimés par ESPERE.

Enfin, les données journalières cumulées au pas de temps mensuels et annuels (années civiles et année hydrologiques) sont affichées dans l'onglet « CumulData ».

Cumul mensuel (précipitations et ETP) et moyenne mensuelle (température et débits)							ANNÉE CIVILE Cumul annuel (précipitations et ETP) et Moyenne annuelle (température et débits)							
Année	Mois	Pluie (mm)	Neige (mm)	Précipitations (mm)	ETP (mm)	T (°C)	Q (m3/s)	Année	Pluie (mm)	Neige (mm)	Précipitations (mm)	ETP (mm)	T (°C)	Q (m3/s)
1998	1	38.9	0.0	38.9	37.3	6.4	3.8	1998	641.0	0.9	642.0	1043.5	13.4	1.6
1998	2	23.8	0.0	23.8	49.0	6.8	2.5	1999	930.5	0.2	930.7	1009.1	13.7	1.7
1998	3	7.2	0.0	7.2	81.7	9.5	1.4	2000	825.6	7.5	833.1	982.9	13.7	1.4
1998	4	165.1	0.0	165.1	66.5	10.8	2.7	2001	907.1	7.9	915.0	1050.0	13.8	2.1
1998	5	99.2	0.0	99.2	112.7	16.9	3.4	2002	1345.4	0.0	1345.4	1000.7	13.9	2.3
1998	6	9.9	0.0	9.9	129.6	20.5	2.3	2003	1231.4	9.4	1240.7	1053.8	14.1	2.4
1998	7	11.3	0.0	11.3	186.3	24.2	1.0	2004	830.7	2.1	832.8	1025.8	13.3	2.2
1998	8	21.3	0.0	21.3	154.9	22.8	0.6	2005	756.2	0.2	756.4	1131.9	13.1	1.4
1998	9	121.9	0.0	121.9	84.7	17.5	0.4	2006	771.7	16.4	788.1	1125.3	14.2	1.8
1998	10	29.3	0.0	29.3	59.7	13.3	0.3	2007	602.0	1.9	603.9	1092.9	13.7	1.3
1998	11	16.1	0.0	16.1	44.4	6.3	0.3	2008	1185.1	0.6	1185.6	1011.1	13.5	2.0
1998	12	96.2	0.0	96.2	36.9	5.2	0.5	2009	838.9	1.6	840.5	1099.5	14.2	2.0
1999	1	59.7	0.0	59.7	36.6	6.4	2.5	2010	1051.4	34.0	1085.4	1052.7	12.9	2.1
1999	2	1.2	0.2	1.4	57.0	5.8	1.1	2011	982.9	0.5	983.4	1075.4	14.2	1.8
1999	3	52.7	0.0	52.7	67.0	9.6	1.2							

Illustration 14 : Onglet « CumulData »

3.4 QUESTIONS FREQUENTES ET DETAILS UTILES

3.4.1 Formulaire « Couvert Végétal »

Le Kc varie au cours de l'année en fonction du stade phénologique du couvert végétal, selon une courbe en trapèze. Les différentes phases sont les suivantes :

- du premier jour du mois M4 (de l'année précédente) au premier jour du mois M1 : pas de couvert
- premier jour du mois M1 : plantation
- du premier jour du mois M1 au premier jour du mois M2 : phase de croissance
- du premier jour du mois M2 au premier jour du mois M3 : phase de maturité
- du premier jour du mois M3 au premier jour du mois M4 : phase de sénescence
- premier jour du mois M4 : récolte

A l'issue du calcul, les valeurs journalières de Kc utilisées dans les calculs sont affichées dans les colonnes résultats de l'onglet Thornthwaite. Cela permet de vérifier les valeurs (qui doivent être égales à 1 tout le temps si le couvert végétal n'est pas pris en compte).

3.4.2 Onglet « Données »

Si les données de neige sont disponibles, elles sont utilisées pour le calcul des méthodes de bilan. Si elles ne sont pas disponibles, la hauteur de neige est calculée à partir des données de précipitations et de température. Si les données de température ne sont pas non plus disponibles, les précipitations (colonne B) sont supposées liquides. Les méthodes empiriques (Turc, Kessler et Guttman) sont appliquées avec les données de précipitations totales fournies par l'utilisateur (colonne B « Précipitations » + colonne D « Neige »). La colonne « Neige » peut être vide. Si les données de température ne sont pas disponibles, les méthodes de Turc et de Dingman-Hamon sont automatiquement désactivées.

Lorsque les données de Neige et/ou température ne sont pas disponibles, il faut entrer un texte indicatif (ex : "Non disponible" ou "ND") sur la première ligne de la colonne prévue pour ces données (colonne D et/ou E).

3.4.3 Onglet « Modèles »

Les valeurs des modèles peuvent être fournies sur des périodes différentes de celles des données. Toutefois, elles doivent être fournies pour des années entières (du 1er janvier au 31 décembre) et consécutives. Les périodes peuvent être différentes pour chacun des 3 modèles. En revanche, pour chaque modèle la période sur laquelle la pluie efficace est fournie, et celle sur laquelle la recharge est fournie, doivent être identiques.

La colonne des dates, qui commence à la même date que celle des données, est automatiquement égale à la colonne des dates de l'onglet "Données".

3.4.4 Onglet « Résultats »

Les plages de données pour les graphes annuels (pluie efficace, recharge et volumes annuels) incluent automatiquement 60 années de données (au-delà, il faut redéfinir les plages manuellement).

4 Bibliographie

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998) Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56
- Andreo, B., J. Vías, J. J. Durán, P. Jiménez, J. A. López-Geta and F. Carrasco (2008), Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain , *Hydrogeol.J.*, 16(5), 911-925
- Caballero Y., Lanini S., Lechevalier J., (2020), Caractérisation de la recharge des aquifères et évolution future en contexte de changement climatique - Application au bassin Rhône Méditerranée Corse - Phase 2. Rapport final. BRGM/RP-69217-FR
- Chapman TG, Maxwell AI (1996) Baseflow separation – comparison of numerical methods with tracer experiments. Institute Engineers Australia National Conference. Publ. 96/05, 539-545.
- Coes, A. L., T. B. Spruill and M. J. Thomasson (2007), Multiple-method estimation of recharge rates at diverse locations in the North Carolina Coastal Plain, USA , *Hydrogeol.J.*, 15(4), 773-788
- De Vries, J. J. and I. Simmers (2002), Groundwater recharge: an overview of processes and challenges , *Hydrogeol.J.*, 10(1), 5-17
- Delin, G. N., R. W. Healy, D. L. Lorenz and J. R. Nimmo (2007), Comparison of local- to regional-scale estimates of ground-water recharge in Minnesota, USA, *J. of Hydr.*, 334(1–2), 231-249
- Delottier, H., Pryet, A., Lemieux, J.M. *et al.* (2018) Estimating groundwater recharge uncertainty from joint application of an aquifer test and the water-table fluctuation method. *Hydrogeol J* **26**, 2495–2505, doi:10.1007/s10040-018-1790-6
- Dingman S. L. (2008), *Physical Hydrology*, pp. 575, Waveland Press, 2nd edition, ISBN: 978-1-57766-561-8
- Eckhardt K., 2005 - How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrology Processes* 19(2), 507-515
- Edijatno et Michel C. (1989). Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, n°2, pp 113-122. doi:10.1051/lhb/1989007
- Flint A.L., Flint L.E. , Kwicklis E.M. and Fabryka-Martin J.T. (2002), Estimating recharge at Yucca Mountain, Nevada, USA: comparison of methods, *Hydrogeology J.* 10:180–204
- Forsythe W.C., Rykiel E.J., Stahl R.S., Wu H., Schoolfield R.M. (1995) A model comparison for daylength as a function of latitude and day of year, *Ecological Modelling*, Vol80, Issue 1, pp 87-95.
- Guttman, J., and H. Zuckerman. (1995). Flow model in the eastern basin of the Judea and Samaria hills. Report No. 01/95/ 66. Tel Aviv, Israel: Tahal Consulting Engineers Ltd. (in Hebrew)

Gustard A. & Demuth S. Editors, Manual on Low-Flow Estimation and Prediction, Operational Hydrology Report n°50 - WMO n°1029, 2008

Hamon R.W. (1963) Computation of direct runoff amounts from storm rainfall. Wallingford, Oxon, U.K.: International Association of Scientific Hydrology, Publication n°63.

Halford, K. J. and G. C. Mayer (2000), Problems Associated with Estimating Ground Water Discharge and Recharge from Stream-Discharge Records, *Ground Water*, 38(3), 331-342

Healy, R. W. and P. G. Cook (2002), Using groundwater levels to estimate recharge, *Hydrogeol.J.*, 10(1), 91-109, doi:10.1007/s10040-001-0178-0

Healy, R. W. (2010). Estimating groundwater recharge. Cambridge University Press.

Kessler, H. (1967), Water balance investigations in the karstic regions of Hungary. Red Book IASH n°73., Dubrovnik Symposium, Oct., 1965, 91-105, <http://ks360352.kimsufi.com/redbooks/073.htm>

Mouelhi, S. (2011), Existe-t-il une relation entre les modèles pluie-débit au pas de temps pluriannuel ? , *Rev. Sci. Eau*, 24(3), 193

Nimmo, J.R., Horowitz, C. and Mitchell, L. (2015), Discrete-Storm Water-Table Fluctuation Method to Estimate Episodic Recharge. *Groundwater*, 53: 282-292. doi:10.1111/gwat.12177

Lanini, S., Caballero, Y., Seguin, J.-J. and Maréchal, J.-C. (2016), ESPERE—A Multiple-Method Microsoft Excel Application for Estimating Aquifer Recharge. *Groundwater*, 54: 155–156. doi:10.1111/gwat.12390

Lanini S., Caballero Y. (2015) – Manuel utilisateur ESPERE version 1.5. Rapport BRGM/RP-65164-FR, 31 p., 14 fig.

Le Cointe P., Arnaud L., Beranger S., Caballero Y., Lanini S. (2019) – Réponse des Eaux souterraines au CHangement climatique dans le bassin AdouR-GaronnE (RECHARGE). Rapport final. BRGM/RP-67149-FR, 142 p., 52 ill., 12 tab., 7 ann.

Posavec, K., Bačani, A. and Nakić, Z. (2006), A Visual Basic Spreadsheet Macro for Recession Curve Analysis. *Groundwater*, 44: 764-767. doi:[10.1111/j.1745-6584.2006.00226.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00226.x)

Scanlon, B. R., R. W. Healy and P. G. Cook (2002), Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge, *Hydrogeol.J.*, 10(1), 18-39

Scanlon, B. R., K. E. Keese, A. L. Flint, L. E. Flint, C. B. Gaye, W. M. Edmunds and I. Simmers (2006), Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions, *Hydrol.Process.*, 20(15), 3335-3370

Seguin J.J. (2016) – Méthodes d'évaluation de la recharge des nappes. Complément d'étude pour la caractérisation des pressions et impacts sur les eaux souterraines. BRGM/RP-65635-FR, 219 p., 106 ill., 49 tabl., 7 ann.

Thornthwaite, C. W. (1948), An approach toward a rational classification of climate, *Geograph. Rev.*, 38, 55-94,

Tallaksen, L.M. & van Lanen, H.A.J. (Eds.) (2004) Hydrological Drought. Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. *Developments in Water Science*, 48,

Elsevier Science B.V., 579 pp. *BFI Software and User'Guide* (courtesy M.Morawietz) available at <http://www.geo.uio.no/edc/>

Turc, L. (1954), Le bilan d'eau des sols: Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement., *Annales Agronomiques*, 5, 491-595,

Weiss, M. and H. Gvirtzman (2007), Estimating Ground Water Recharge using Flow Models of Perched Karstic Aquifers, *Ground Water*, 45(6), 761-773

Xu Y. and H. Beekman (2003), Groundwater Recharge Estimation in Southern Africa UNESCO IHP Series No. 64, UNESCO Paris, unesdoc.unesco.org/images/0013/001324/132404e.pdf. ISBN 92-9220-000-3

Annexe 1

Mises à jour et corrections apportées depuis la version 1.52

Liste des modifications incluses dans la version 2.4 (janvier 2020).

CORRECTION DE BUGS DE LA VERSION 1.52

- Calcul du débit de base selon les formules de Eckhardt et de Chapman

Ajout de la condition $Q_b \leq Q_{total}$ (oubliée dans v1.52, ce qui entraînait parfois un débit de base supérieur au débit total).

- Onglet « Filtres »

Correction de l'affichage des débits (dans la version 1.52, les courbes affichées correspondaient à l'année N-1 du menu déroulant).

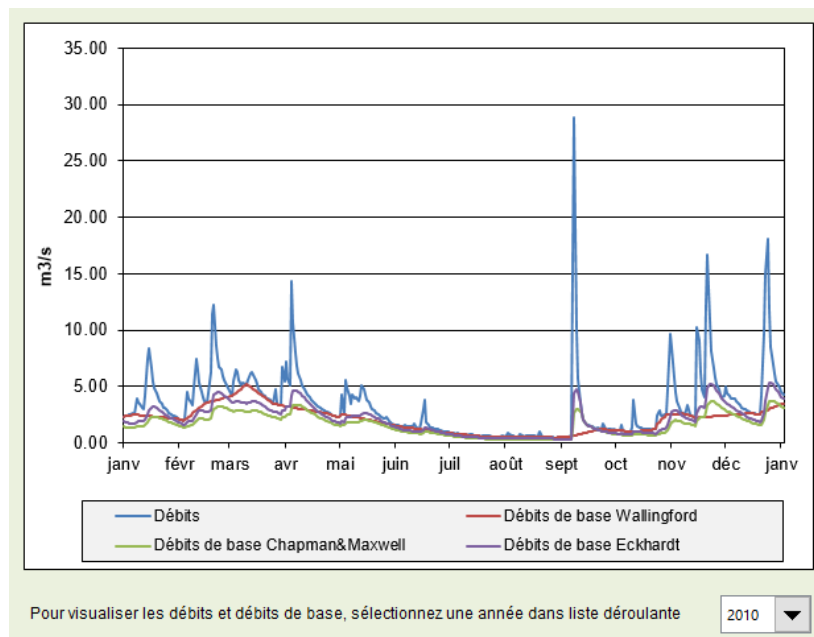


Figure 1 : Affichage des débits et débits de base (onglet « Filtres »)

- Calcul des moyennes mensuelles interannuelles de la recharge estimée par les méthodes de filtre

Dans le cas où les données de débit étaient disponibles sur une période plus courte que celle des données de précipitations, les moyennes mensuelles interannuelles étaient erronées (division par le nombre d'années de données météorologiques au lieu du nombre d'années de données hydrométriques). Calcul corrigé.

- Initialisation du Kc

Il pouvait arriver qu'après plusieurs utilisations successives sans fermer le fichier de la version 1 d'ESPERE, la valeur de Kc prenne automatiquement une valeur nulle (au lieu d'une valeur par défaut égale à 1), entraînant des évapotranspirations réelles nulles et des pluies efficaces calculées par les méthodes de bilan erronées. Ce problème d'initialisation a été a priori corrigé. Néanmoins, en cas de doute sur les résultats fournis par les méthodes de bilan, il convient de vérifier la valeur de Kc qui a réellement été utilisée (voir onglet « Thornthwaite », colonne G).

MODIFICATIONS

- Méthode de Dingman

La méthode de Dingman-Penman a été renommée en Dingman. Effectivement, cette méthode est appliquée dans ESPERE avec l'ETP fournie par l'utilisateur, sans a priori sur la méthode utilisée pour l'obtenir.

- Calcul de l'ETP par la formule de Hamon

D'après Hamon (1963), l'ETP peut être approchée par la formule suivante :

ETP = k.D.ρ_t avec k=0.0065 (empirique), D la longueur du jour (en périodes de 12h), ρ_t la densité de vapeur saturante (en g/m³) et l'ETP en inch. En assimilant la vapeur d'eau à un gaz parfait, on a $\rho_t = \frac{M}{R} \cdot \frac{e^*}{T+273.15}$ avec R=8.314 J./K⁻¹.mol⁻¹ et M=18,01 g/mol, T en °C, et e* la tension de vapeur saturante (en Pa). Finalement, l'ETP en mm/j est donnée par la formule de Hamon telle que citée par Dingman (2008) :

$$ETP = 29,8 \cdot D \cdot \frac{e^*}{T+273,2} \quad (\text{avec } D \text{ en heures, } e^* \text{ en Pa et } T \text{ en } ^\circ\text{C}).$$

Cette formule fait intervenir la longueur du jour. Celle-ci peut être calculée en fonction de la latitude et de la déclinaison solaire δ (et non déclinaison terrestre comme indiqué par erreur dans ESPERE v1.52). Les formules utilisées dans ESPERE v1.52 pour calculer D et δ imposaient une valeur de D nulle pour des latitudes > 66.5°N ou S. Elles sont dorénavant remplacées par des formules issues de Forsythe et al. (1995) :

$$D = 2 \cdot \text{acos}(\tan\delta \cdot \tan\lambda) / \left(\frac{2\pi}{24}\right)$$

$$D = 24 \text{ si } \tan\delta \cdot \tan\lambda > 1 \quad \text{et} \quad D = 0 \text{ si } \tan\delta \cdot \tan\lambda < -1$$

$$\delta = \text{asin}(0.39795 \cdot \cos(\theta))$$

$$\theta = 0.2163108 + 2 \cdot \text{atan}(0.9671396 \cdot \tan(0.00860 \cdot (J - 186)))$$

avec J le jour de l'année (compris entre 1 et 365) et δ comprise entre -23.5° et +23.5° selon le jour de l'année

AJOUT D'INFORMATIONS

- Onglet « Filtres »

Information sur la valeur du BFI (commentaire de la cellule H4) : les BFI obtenus à partir des débits de base calculés par les méthodes de Chapman ou d'Eckhardt sont quasiment constants. C'est pourquoi ils ne sont pas affichés en tant que résultat. La recharge est directement proportionnelle au module du débit annuel (voir Annexe 2), ce qui est également indiqué en commentaires dans l'Onglet « Résultats » (cellules EA38 et EA39).

- Onglet « Résultats »

Affichage d'un tableau synthétisant la recharge moyenne interannuelle calculée par chacune des méthodes mises en œuvre.

RECHARGE annuelle (mm/an)	
Moyenne interannuelle	
Thornthwaite	129
Dingman avec ETP Hamon	181
Dingman	163
Edijatno & Michel	177
Guttman&Zuckerman	
Kessler	
Turc	159
WTF	165
Wallingford	218
Chapman	172
Eckhardt	219

Figure 2 : Tableau de synthèse des recharges moyennes interannuelles (onglet « Résultats »)

- Onglet « Filtres »

Affichage des paramètres de la Master Recession Curve (uniquement dans le cas où celle-ci a été calculée pour fournir une estimation du paramètre k.)

Master Recession Curve	
$Q(t)=Q_0.exp(-t/alfa)$	
Q₀	6.78
1/alfa	0.0635

Figure 3 : Affichage des paramètres de la MRC associés aux données de débit (onglet « Filtres »)

- Onglet « Paramètres »

Lors de la phase d'initialisation du calcul, ouverture d'une fenêtre d'avertissement si les valeurs de k ou BFI_{max} entrées ne sont pas comprises entre 0 et 1. Idem si aucune valeur de RIPE n'est renseignée et qu'une estimation ne peut pas être proposée car il n'y a pas de données de débit.

SUPPRESSION

- XLSTAT

La version d'ESPERE faisant appel à XLSTAT n'est plus maintenue. Toute référence à XLSTAT est supprimée de l'interface et du code. Il n'existe que deux variantes pour la version 2 d'ESPERE : en français (ESPERE_v2.4FR.xlsx) et en anglais (ESPERE_v2.4EN.xlsx).

- Onglet « résultats »

Suppression des graphes de Volumes annuels infiltrés. Ces résultats sont néanmoins toujours calculés et affichés dans les tableaux de résultats sur la partie gauche de l'Onglet.

Annexe 2

Méthodes implémentées dans ESPERE

Cette description des méthodes implémentées dans ESPERE est essentiellement reproduite du Guide Utilisateur d'ESPERE v1.52 (Lanini et Caballero, Rapport BRGM/RP-65164-FR, 2015). Elle a été légèrement modifiée et complétée pour la méthode WTF et les méthodes de filtre.

LES METHODES EMPIRIQUES

Les méthodes empiriques implémentées dans ESPERE sont les méthodes de Turc (1954), de Kessler (1967) et de Guttman & Zuckerman (1995). Ces méthodes sont intéressantes car elles reposent uniquement sur l'exploitation de variables climatiques (précipitation et température) qui sont des données généralement accessibles. Elles peuvent donc être appliquées pour une première approximation de la recharge, tout en gardant à l'esprit qu'elles ont souvent été établies dans un contexte climatique, hydrogéologique et d'exploitation d'aquifère bien défini.

- La méthode dite de Turc résulte d'une recherche de corrélation entre les précipitations, les températures et les débits à l'exutoire de 254 bassins versants, aux caractéristiques hydro-climatiques variées et situés de par le monde (Mouelhi, 2011). Elle fournit une estimation de la pluie efficace annuelle connaissant les précipitations annuelles (P) et la température moyenne annuelle (T) à l'aide de l'équation suivante :

$$P_{efficace} = P - \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad \text{avec} \quad L = 300 + 25 \times T + 0,05 \times T^2.$$

- Kessler a étudié spécifiquement un système karstique de moyenne montagne en Hongrie. Il a constaté que la montée significative du niveau de la nappe avait toujours lieu durant les quatre premiers mois de l'année, après la fonte des neiges et avant la reprise vigoureuse de la poussée végétale. Ainsi, le débit annuel de la source karstique (et donc la recharge) n'était pas corrélé au total des précipitations annuelles, mais uniquement aux précipitations de l'automne précédent (année n-1) et à celles du début d'année. A partir de 22 années de données sur le site hongrois, Kessler a construit un abaque reliant le pourcentage d'infiltration (Infiltration Rate) des précipitations brutes (Figure 4) à ce qu'il appelle le taux de précipitation déterminant (DPR). Dans ESPERE, cette courbe est approximée par une fonction polynomiale. Le DPR dépend non linéairement du cumul des précipitations de septembre à décembre (année n-1), du cumul des précipitations du début d'année (janvier à avril, année n), du cumul annuel des précipitations (année n) et de la moyenne interannuelle des précipitations d'automne.

$$DPR = (\text{cum_deb}/\text{cum_annuel}) + k$$

Avec : cum_deb : cumul de pluie de janvier à avril de l'année n

cum_annuel : cumul annuel de pluie brute pour l'année n

k (constante de correction) est estimée par Kessler en fonction de la valeur du taux de précipitation corrigé (CPR) : $CPR = (\text{cum_aut}-m)/m$

m : moyenne interannuelle des cumuls de pluie sur la période septembre-décembre

cum_aut : cumul de pluie de septembre à décembre de l'année n-1

La recharge annuelle s'obtient en multipliant le taux d'infiltration (IR) par le cumul annuel de précipitations.

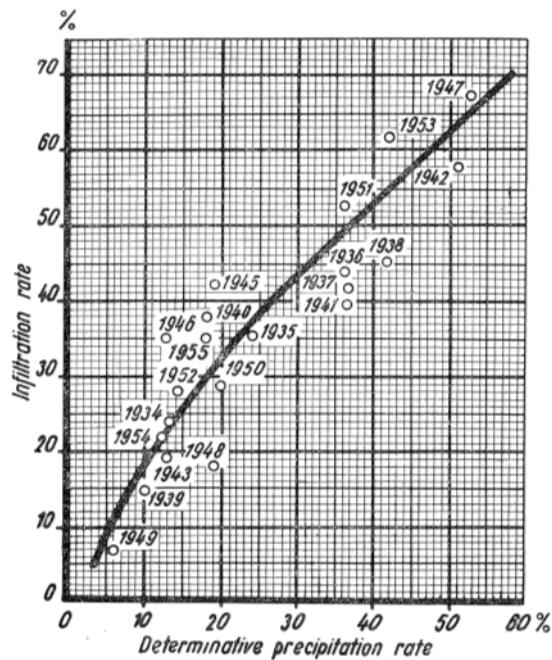


Figure 4 : Abaque de Kessler (1967)

Andreo (2008) précise que l'application de la formule de Kessler à d'autres aquifères que celui sur lequel elle a été établie, n'est justifiée que pour des aquifères en contexte climatique méditerranéen, présentant deux périodes annuelles de recharge.

- Beaucoup plus récemment, Guttman et Zuckerman (1995) (cités par Weiss and Gvirtzman, 2007) ont proposé un jeu de relations linéaires pour estimer la recharge à partir des précipitations annuelles (P). Leurs résultats ont été obtenus en combinant des calculs de bilans hydrologiques à l'échelle régionale et une modélisation hydrogéologique en régime transitoire. Ces formules empiriques ont été établies à partir d'un aquifère carbonaté en climat méditerranéen semi-aride. Leur validité pour estimer la recharge d'autres aquifères n'est pas documentée.

$$R = 0,45 \times (P - 180) ; P < 600 \text{ mm}$$

$$R = 0,88 \times (P - 410) ; 600 \text{ mm} < P < 1000 \text{ mm}$$

$$R = 0,97 \times (P - 463) ; P > 1000 \text{ mm}$$

LES METHODES DE BILAN HYDROLOGIQUE

A l'échelle d'une nappe, la pluie efficace, définie comme la somme du ruissellement et de l'infiltration, est égale aux précipitations moins l'évapotranspiration réelle moins la variation du stock d'eau dans la zone non saturée. La méthode de Thornthwaite (1948) permet de calculer la pluie efficace journalière à partir des précipitations, de l'ETP et d'un seul paramètre lié à la nature du sol et représentant sa capacité maximale de stockage de l'eau. Le principe est le suivant :

- si les précipitations sont supérieures à l'ETP, la différence comble d'abord le déficit en eau du sol. L'excédent constitue la pluie efficace qui se répartit entre ruissellement et alimentation de la nappe ;
- si les précipitations sont inférieures à l'ETP, la différence ETP-P est prélevée sur la réserve du sol jusqu'à épuisement de celle-ci.

Des améliorations successives ont été proposées au modèle de Thornthwaite, notamment pour introduire une vidange progressive de la réserve du sol. Dingman (2008) en propose une formulation aboutie. ESPERE inclut deux versions de la formule de Dingman : une première utilisant les valeurs d'ETP journalières fournies par l'utilisateur et une seconde calculant l'ETP journalière à l'aide de la formule de Hamon (1963) : $ETP = 29.8 * D * esat / (T + 273.2)$

Avec : $esat = 0.611 * \exp [17.3 * T / (T + 273.3)]$ (tension de vapeur saturante, en kPa, à la température moyenne du jour T en °C)

$D = 2 * \cos [(-\tan(\delta) * \tan(l)) / 0.2618]$ (longueur du jour en heure)

δ = déclinaison solaire (varie entre -23.5° et 23.5° selon le jour de l'année)

l : latitude (en radian) de la zone étudiée

Ces deux versions de la formule de Dingman permettent de mettre en œuvre la méthode même en cas d'absence de données d'ETP, et également de proposer une première approximation de l'influence de la méthode de calcul de l'ETP sur les résultats en termes de pluie efficace.

Pour obtenir une estimation de la recharge de la nappe à partir des méthodes de bilan, un paramètre de partition de la pluie efficace entre infiltration et ruissellement doit être renseigné (RIPE).

Prise en compte de la neige

Dans ESPERE, si les données de neige (journalières) sont fournies par l'utilisateur, elles sont utilisées pour le calcul dans les méthodes de bilan. Si elles ne sont pas disponibles, la hauteur de neige est calculée à partir des données de précipitations et de température à partir du facteur de fonte (F). Si les données de température ne sont pas non plus disponibles, les précipitations sont supposées uniquement liquides (pluie).

L'algorithme de calcul du stock de neige et de l'apport total d'eau journaliers est le suivant :

si data_T non disponibles : F=1

si data_T disponibles : si T ≤ 0 alors F=0
 sinon si 0 < T < 6°C alors F=T/6
 sinon F=1

si data_Neige non disponibles : Neige = (1-F).Précipitation et Pluie = F.Précipitation

StockNeige (i) = (1-F).(1-F)*Précipitation (i) + (1-F)*StockNeige (i-1)

FonteNeige (i) = F.[StockNeige (i-1) + Neige (i)]

Apport_EAU = Pluie + FonteNeige

Prise en compte du couvert végétal

L'évapotranspiration de référence (ET_o), calculée par la formule de Penman-Monteih (données MétéoFrance) ou par la formule de Hamon, suppose que le sol est recouvert de gazon. Pour prendre en compte l'effet d'une couverture végétale réelle, il est commode de recourir à l'approche du coefficient cultural (K_c) en posant : ETP = K_c*ET_o. (Allen et al., 1998).

Le coefficient cultural varie selon la culture (ou le couvert végétal), mais également selon la phase de croissance (Figure 5).

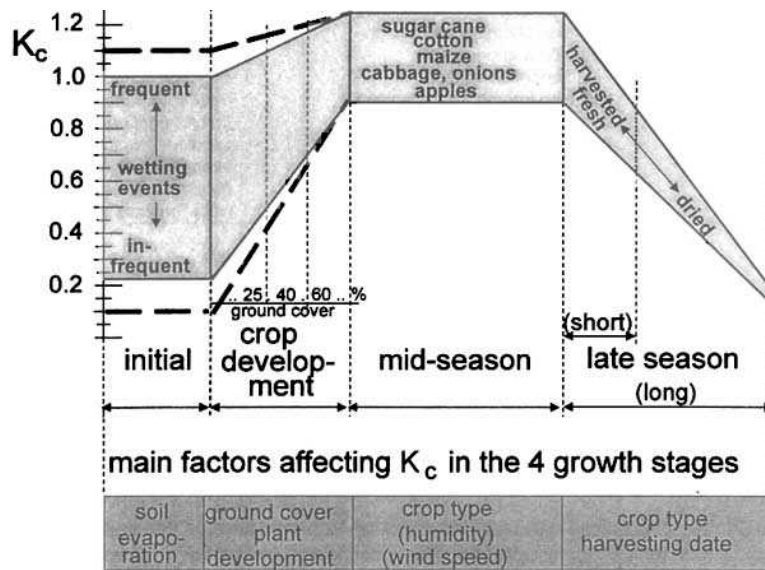


Figure 5 : Variation typique du K_c en fonction des stades phénologiques
 Source : FAO, Allen et al., 1998

Dans ESPERE, la variation de K_c au cours de l'année est approximée par une courbe en trapèze définie par 6 paramètres que l'utilisateur doit renseigner (Figure 6).

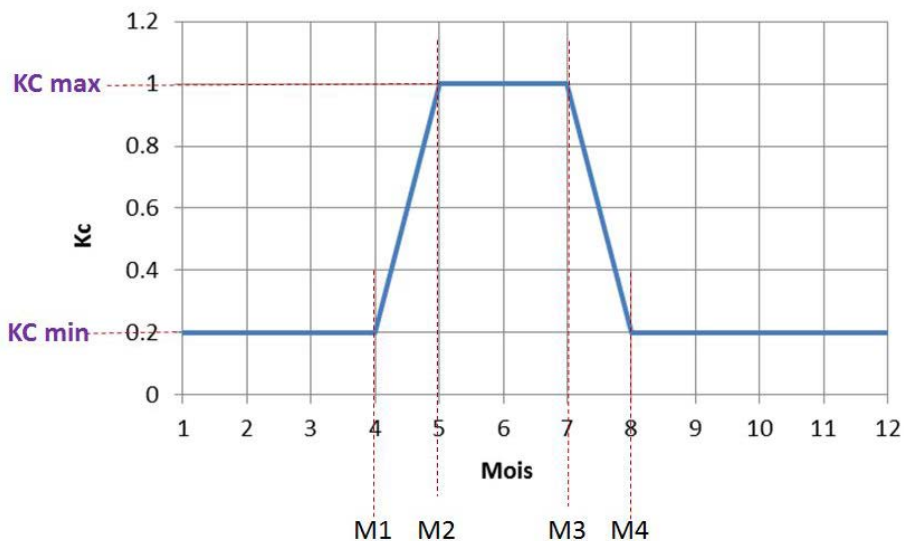


Figure 6 : Courbe de variation du K_c dans ESPERE

Algorithmes de Thornthwaite et Dingman

Les algorithmes de calcul de la pluie efficace implémentés dans ESPERE pour les méthodes de bilan tiennent compte de la fonte de la neige et du coefficient cultural. Si l'utilisateur n'a pas spécifié de valeurs pour les paramètres de la courbe définissant l'évolution du Kc au cours de l'année, celui-ci est par défaut constant et égal à 1.

Méthode de Thornthwaite :

$$ETR(i) = \min [Kc(i)*ETP(i) ; EntreeEAU(i)+RU(i)]$$

$$Peff(i) = EntreeEAU(i) - ETR(i) + RU(i) - RU_{max}$$

si $Peff(i) \leq 0$ alors $Peff(i) = 0$

$$RU(i+1) = \min [RU_{max} ; EntreeEAU(i) + RU(i) - ETR(i)]$$

Méthode de Dingman :

si $EntreeEAU(i) \geq Kc(i)*ETP(i)$

$$ETR(i) = Kc(i)*ETP(i)$$

$$RU(i) = \min [(EntreeEAU(i) - Kc(i)*ETP(i) + RU(i-1)) , RU_{max}]$$

si $EntreeEAU(i) < Kc(i)*ETP(i)$

$$ETR(i) = EntreeEAU(i) + RU(i-1) - RU(i)$$

$$RU(i) = RU(i-1).exp[-(Kc(i)*ETP(i) - (EntreeEAU(i) - RU(i-1)))/RU_{max}]$$

$$Peff(i) = EntreeEAU(i) - ETR(i) - [RU(i) - RU(i-1)]$$

si $Peff(i) \leq 0$ alors $Peff(i) = 0$

avec les notations suivantes :

- EntreeEAU(i) l'apport d'eau pour le jour i (pluie plus fonte du stock de neige)
- Kc(i) le coefficient cultural
- ETP(i) l'évapotranspiration de référence
- ETR(i) l'évapotranspiration réelle (ou calculée)
- RU(i) le stock d'eau dans le sol

LA METHODE WATER TABLE FLUCTUATION

Le troisième type de méthodes de calcul de la recharge implémenté dans ESPERE repose sur l'exploitation des chroniques piézométriques journalières, avec la méthode « Water Table Fluctuation » (WTF). Cette méthode suppose que les variations de niveau de la nappe sont provoquées essentiellement par la lame d'eau qui parvient à la surface libre de la nappe, toutes les autres composantes du bilan étant sans action (donc nulles) durant le laps de temps Δt .

On peut donc écrire le bilan hydrodynamique de la nappe sous cette forme (Healy et Cook, 2002) : $R = S_y \cdot \frac{\Delta H}{\Delta t}$

avec R la recharge pendant le pas de temps Δt , S_y la porosité efficace en nappe libre et ΔH l'élévation du niveau d'eau pendant le laps de temps Δt .

La procédure utilisée dans ESPERE version 1 pour mettre en œuvre la méthode WTF au pas de temps annuel a été suggérée par Delin et al. (2007). Elle consiste à faire la somme des élévations de niveau d'eau journalier pendant une année et à la multiplier par S_y (fourni par l'utilisateur). Si cette méthode est particulièrement simple dans sa formulation, elle peut être très imprécise lorsque S_y n'est pas connu. De plus, elle minimise l'évaluation de la recharge puisqu'elle les apports d'eau à la nappe nécessaires pour compenser les pertes liées à la vidange naturelle ne sont pas pris en compte.

LES MÉTHODES DE FILTRE DES DÉBITS

Le dernier type de méthodes implémentées dans ESPERE regroupe des procédures de traitement du signal appliquées à des chroniques de débits de rivières. Ces méthodes visent à isoler la partie des débits des cours d'eau provenant du ruissellement de surface ou des écoulements de subsurface, de la partie liée au drainage de la nappe (baseflow). Elles sont souvent associées au calcul du BFI (« Base Flow Index »), qui, pour une période donnée (mois, saison ou année), est le rapport entre le débit de base d'un cours d'eau et le débit total. La recharge annuelle est égale au cumul des débits de base annuels, divisé par la surface de l'impluvium. C'est aussi le BFI multiplié par le module annuel du débit, divisé par la surface de l'impluvium.

L'Institut d'Hydrologie de Wallingford a développé une procédure de calcul du débit de base et du BFI qui fait référence (voir par exemple Gustard et Demuth, 2008). Elle repose sur la recherche dans une chronique de débits journaliers des minimums sur des périodes glissantes de 5 jours et sur leur interpolation. Le code Visual Basic intégré dans ESPERE pour le calcul du débit de base Wallingford est adapté du code développé par l'European Drought Center (Tallaksen et al., 2004).

Deux autres filtres numériques des chroniques de débit sont implémentés dans ESPERE. Il s'agit de filtres numériques récurrents linéaires d'ordre 1.

En supposant que le débit de base Q_b à la date t peut être exprimé sous la forme d'une moyenne pondérée du débit de base à la date précédente et du débit de ruissellement à la date t , Chapman et Maxwell (1996) ont suggéré une formule pour son calcul, généralisée ensuite par Eckhardt (2005). Ces deux formules, qui font intervenir 1 ou 2 paramètres à fixer par l'utilisateur (k et BFI_{max}) sont implémentées dans ESPERE au pas de temps journalier.

- Chapman et Maxwell (1996) :

$$Q_b(t) = \frac{k}{2-k} \cdot Q_b(t-1) + \frac{(1-k)}{2-k} \cdot Q(t) \quad \text{avec } Q_b(t) \leq Q(t)$$

- Eckhardt (2005) :

$$Q_b(t) = \frac{k \cdot (1 - BFI_{max}) \cdot Q_b(t-1) + (1-k) \cdot Q(t)}{(1 - k \cdot BFI_{max})} \quad \text{et } Q_b(t) \leq Q(t)$$

Il convient de noter que la formule de Chapman & Maxwell est un cas particulier de celle d'Eckhardt, lorsque que la valeur du paramètre BFI_{max} est égale à 0.5.

Remarque sur le BFI calculé à partir du débit de base :

$$BFI = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} Q_b^i}{\sum_{i=1}^{i=N} Q^i} \quad \text{avec } N=365 \text{ jours pour le BFI annuel}$$

On peut montrer que le BFI calculé sur une période de N jours successifs est égal à :

$$BFI = \frac{k}{2 \cdot (1-k)} \cdot \frac{(Q_b^0 - Q_b^N)}{\sum_{i=1}^{i=N} Q^i} + 0.5 \quad (\text{Chapman \& Maxwell})$$

$$BFI = \frac{(1-k \cdot BFI_{max})}{(1-k)} \cdot \frac{(Q_b^0 - Q_b^N)}{\sum_{i=1}^{i=N} Q^i} + BFI_{max} \quad (\text{Eckhardt})$$

A l'échelle annuelle, le terme $\frac{(Q_b^0 - Q_b^N)}{\sum_{i=1}^{i=N} Q^i}$ est faible voire négligeable, puisque il s'agit de la

différence entre le débit de base de deux jours situés à un an d'écart, rapporté au débit total annuel.

Les BFI annuels calculés par ces deux méthodes sont donc fixes ou égaux au paramètre fourni par l'utilisateur. La recharge annuelle est quant à elle une fraction constante du débit total (Figure 7).

	BFI annuel	Recharge
Chapman & Maxwell	~ 0.5	$\sim 0.5 \cdot \frac{\sum Q}{S}$
Eckhardt	~ BFI _{max}	$\sim BFI_{max} \cdot \frac{\sum Q}{S}$

Figure 7 : Valeurs particulières des BFI et recharge annuels pour les méthodes de Chapman et d'Eckhardt

Relation entre les paramètres

Pendant les périodes sans précipitation, le ruissellement est nul et le débit du cours d'eau est égal au débit de base : $Q(t) = Q_b(t)$, ce qui pour les deux formules donne :

$$Q_b(t) = k \cdot Q_b(t - 1)$$

Si on suppose qu'en période de récession, le débit (égal au débit de base) suit une loi de Maillet : $Q_b(t) = Q_0 \cdot e^{(-t/\alpha)}$ avec α le coefficient de récession (dimension d'un temps) et Q_0 le débit initial, on a : $Q_b(t - 1) = Q_0 \cdot e^{(-(t-1)/\alpha)} = e^{1/\alpha} \cdot Q_b(t)$ et donc :

$$Q_b(t) = e^{-1/\alpha} \cdot Q_b(t - 1)$$

Si la récession du cours d'eau suit une loi de Maillet, on a donc : $k = e^{-1/\alpha}$

Le paramètre k des formules de filtre linéaires d'ordre 1, peut donc être fixé à partir de la constante de récession du débit (déduite de la Master Recession Curve).



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Unité DEPA/NRE

1039 rue de Pinville

34000 – Montpellier
Tél. : 04 67 15 79 90