

Prise en compte de la pierrosité dans les calculs de réserve utile et du besoin en eau pour une culture de maïs

Cas du Loiret

M. Tetegan^(1, 2, 3*), A. C. Richer de Forges⁽³⁾, B. Nicoulaud⁽¹⁾, C. Desbourdes⁽⁴⁾, N. Schnebelen⁽³⁾, A. Bouthier⁽²⁾, D. Arrouays⁽³⁾ et I. Cousin⁽¹⁾

1) INRA, UR0272, F-45075 Orléans, France

2) ARVALIS - Institut du Végétal, F-17700 Saint Pierre d'Amilly, France

3) INRA, US1106, F-45075 Orléans, France

4) ARVALIS - Institut du Végétal, F-41240 Ouzouer le Marché, France

*: Auteur correspondant: dtetegan@gmail.com

RÉSUMÉ

Lors de la caractérisation des propriétés de rétention en eau des sols caillouteux, les éléments grossiers sont souvent, soit totalement négligés, soit considérés comme ne participant pas à la réserve utile des sols. Pourtant l'estimation du fonctionnement hydrique des sols caillouteux nécessite la prise en compte des propriétés hydriques de chacune des phases constituant ce type de sol. Basée sur la carte des sols du Loiret, cette étude a pour objectif de proposer un calcul de la réserve utile des sols tenant compte des capacités de rétention en eau des éléments grossiers. La réserve utile des sols a été calculée via le couplage des classes de pédotransfert proposées par Bruand *et al.* (2004) pour la terre fine et Tetegan *et al.* (2011) pour les éléments grossiers. Les résultats obtenus ont démontré que la non prise en compte de la phase caillouteuse dans le calcul de la réserve utile de sols à pierrosités variables pouvait induire parfois près de 50 % d'erreur. Pour une culture de maïs, le déficit hydrique moyen annuel évalué sur 21 ans par un modèle de bilan hydrique, est mal estimé sur 80 % de la surface étudiée. Les besoins en eau sont ainsi souvent surestimés, car les éléments grossiers peuvent servir d'apport hydrique non négligeable aux cultures. Ces travaux montrent que les pratiques d'irrigation à l'échelle régionale peuvent être améliorées pour optimiser l'efficacité de l'utilisation de l'eau.

Mots clés

Sols caillouteux, Loiret, réserve utile, fonctions de pédotransfert, déficit hydrique, cartographie, modèle de bilan hydrique.

SUMMARY**CONSIDERATION OF STONINESS IN CALCULATIONS OF AVAILABLE WATER CONTENT AND WATER REQUIREMENTS FOR CORN PRODUCTION: case of Loiret**

For the characterization of water retention properties of stony soils, the rock fragments are usually neglected or considered as useless for the available water content of soils. Yet estimating the hydric properties of stony soils requires knowledge of water properties of each phase constituting the soil. Based on the soil map of Loiret, our study aims at proposing a new method of calculation for the available water content, by taking into account the water retention capacities of the stony phase. The soil available water content was calculated by coupling pedotransfer classes proposed by Bruand et al. (2004) for the fine earth and Tetegan et al. (2011) for the rock fragments. The results showed that the neglect of the stony phase in the calculation of the soil available water content could induce an error of about 50 %. For a maize crop, the average annual water deficit for 21 years calculated by a water balance model is not correctly estimated for 80 % of the studied area. The water requirements are thus often overestimated, because rock fragments can provide a significant water reserve for crops. This study demonstrates that the irrigation practices at the regional scale should be improved to optimize the efficiency of the use of water.

Key-words

Stony soils, Loiret, available water content, pedotransfer functions, water deficit, digital soil mapping, water balance model.

RESUMEN**CONSIDERACIÓN DE LA PEDREGOSIDAD EN LOS CÁLCULOS DE RESERVA DE AGUA Y DE LAS NECESIDADES DE AGUA PARA EL MAÍZ: el caso de Loiret**

Para la caracterización de las propiedades de retención de agua de suelos pedregosos, las piedras han sido a menudo consideradas como inertes. Sin embargo, la estimación de las propiedades hídricas de los suelos heterogéneos requiere el conocimiento de las propiedades del agua de cada componente de este tipo de suelo. Basando en el mapa de suelos de Loiret, este estudio tiene por objeto de proponer un nuevo cálculo corregido utilizando las capacidades de retención de agua de las piedras. La reserva hídrica útil por suelos se calcula a través del acoplamiento de las clases de pedotransferencia de Bruand et al. (2004) por la tierra fina y de Tetegan et al. (2011) por las piedras. Para el maíz, los resultados mostraron que el hecho de tener en cuenta la fase de piedra en el cálculo de la reserva hídrica útil podría inducir casi 50 % de error. Por la misma cultura, la estimación de la media anual del déficit de agua para 21 años mostró que los requerimientos de agua son a menudo sobre estimado, mostrando que las piedras pueden ser utilizadas como una importante ingesta hídrica para algunos cultivos. Más del 80 % en proporción de área de Loiret se refiere a un error de estimación de déficit de agua, mostrando que las prácticas de riego en el plano regional se deben ajustar para optimizar la eficiencia del uso de agua.

Palabras clave

Suelos pedregosos, Loiret, contenido de agua disponible, pedotransferencia funciones, déficit de agua, cartografía.

Pour estimer la capacité des sols à fournir de l'eau aux plantes pour leur croissance, les pédologues et les agronomes ont pour habitude de déterminer la réserve utile du sol. Celle-ci, exprimée en millimètres d'eau ou millimètres d'eau par centimètre de sol, est la différence entre l'humidité du sol à la capacité au champ et celle au point de flétrissement (Lozet et Mathieu, 1997). Cette différence de quantité d'eau est susceptible d'être exploitée par les racines. La réserve utile est donc un paramètre important pour les calculs agronomiques de bilan hydrique du sol et pour la gestion de l'irrigation des sols cultivés. En effet, une bonne gestion de l'irrigation permet aux agriculteurs d'adapter l'approvisionnement en eau à des niveaux optimaux pour les besoins hydriques des cultures, ce qui favorise une meilleure gestion des eaux souterraines et superficielles. À l'échelle mondiale, les changements climatiques peuvent induire des modifications au niveau des intrants et de la gestion des réservoirs d'eau, provoquant une réduction de l'approvisionnement en eau dans certaines zones irriguées (Garcia-Ruiz *et al.*, 2011). Ainsi, il apparaît nécessaire de bien définir les caractéristiques hydriques des sols afin de maximiser la croissance des cultures et de réduire les pertes en eau au-delà du système racinaire en cas d'irrigation excessive.

La cartographie de la réserve utile des sols à diverses échelles est donc un facteur clé i) dans la détermination des aptitudes hydriques des sols et ii) pour la mise en œuvre de modèles permettant de prévoir les besoins en irrigation ainsi que les risques pour la qualité des eaux souterraines (Paydar *et al.*, 2009). L'estimation de la réserve utile, assez simple à l'échelle de la motte de sol, devient ardue pour des échelles plus petites (parcelle agricole, régions de plusieurs milliers d'hectares), et lorsque les sols sont très hétérogènes, ce qui est le cas des sols caillouteux. En effet, pour ces derniers, l'estimation de leur réserve utile nécessite une connaissance précise des propriétés hydriques et du volume des principales phases les constituant: la phase fine - particules de sol de moins de 2 mm de diamètre - composée de terre fine, et la phase caillouteuse constituée d'éléments grossiers de taille supérieure à 2 mm, tels que les graviers ($2 < \varnothing < 20$ mm), les cailloux ($20 < \varnothing < 50$ mm), les pierres ($50 < \varnothing < 200$ mm) et les blocs ($\varnothing > 200$ mm).

Depuis maintenant plusieurs années, il existe des outils et méthodes permettant de calculer la réserve utile de la terre fine *via* diverses classes et fonctions de pédotransfert utilisant comme paramètres la masse volumique apparente et la texture de la terre fine (Bastet, 1999; Wösten *et al.*, 2001; Morvan *et al.*, 2006; Al Majou, 2008). Cependant, les capacités de rétention en eau de la phase caillouteuse ont souvent été négligées dans le calcul de la réserve utile des sols caillouteux, bien que plusieurs études aient montré que les éléments grossiers peuvent constituer une réserve en eau importante pour les sols (Gras et Monnier, 1963; Poesen et Lavee, 1994). Récemment, Tétégan *et al.* (2011) ont montré que certains éléments grossiers étaient

capables de contenir de l'eau sur plus de 50 % de leur masse. Ils ont en conséquence proposé de nouvelles classes et fonctions de pédotransfert pour estimer la réserve utile d'éléments grossiers issus de sols caillouteux d'origine sédimentaire.

L'objectif de cette étude est ainsi de prendre en compte les capacités de rétention en eau des éléments grossiers pour améliorer l'estimation de la réserve utile des sols caillouteux cultivés et donc améliorer les apports hydriques aux plantes à l'échelle régionale. L'étude a porté sur la carte des sols du Loiret comprenant diverses zones d'agriculture intensive et des sols de pierrosités variables. Pour chaque type de sol, la réserve utile a été calculée en utilisant trois hypothèses tenant compte ou non du volume et des propriétés hydriques des éléments grossiers. Le déficit hydrique du sol a ensuite été estimé par un modèle de bilan hydrique, puis interprété en fonction des besoins en irrigation pour une culture de maïs.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

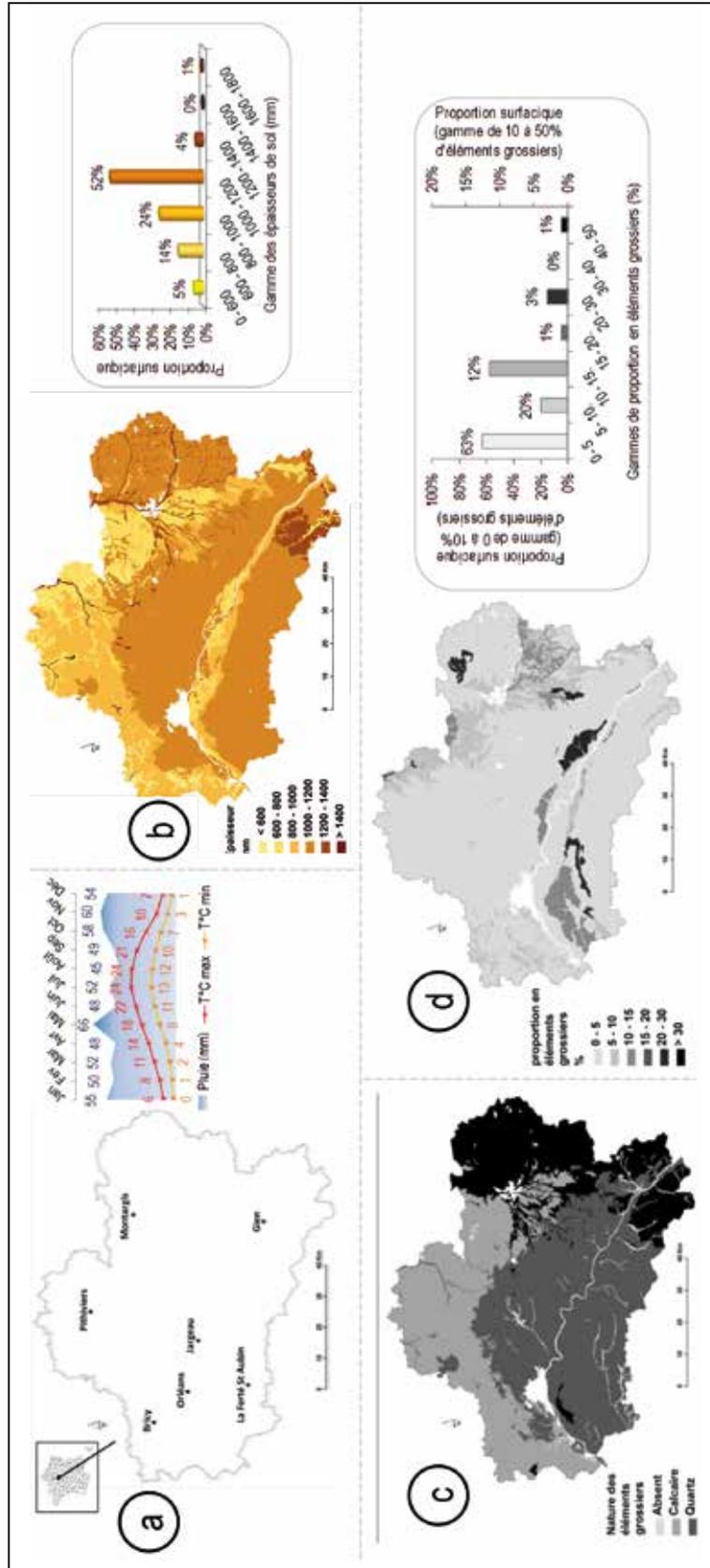
La zone d'étude: localisation et description

L'étude a été menée dans le département français du Loiret, situé en région Centre (*figure 1a*). Le Loiret s'étend sur 681326 hectares dont 67 % supporte une agriculture intensive souvent irriguée (Richer de Forges *et al.*, 2008a). Avec des hivers doux et pluvieux, et des étés frais et humides, le climat du Loiret est tempéré de type océanique dégradé. Il se caractérise par une température moyenne annuelle de 10,6 °C et une pluviométrie d'environ 637 mm (valeur moyenne sur la période 1961-1990) (*figure 1a*), ce qui en fait un département déficitaire sur le plan pluviométrique et explique le fréquent recours à l'irrigation pour les cultures d'été.

En 2008, une carte des sols à l'échelle 1/250000 a été réalisée à partir des travaux antérieurs de Arrouays *et al.*, (1989) et de l'interprétation de photographies aériennes, d'analyses d'échantillons de sols issus de profils du sol et de sondages à la tarière (densité minimale: 1 sondage pour 47 ha et 1 profil pour 734 ha). Ces travaux ont permis le découpage du Loiret en 13 principaux pédocpaysages (Richer de Forges *et al.*, 2008a; Richer de Forges *et al.*, 2008b). Dans le Loiret, l'épaisseur des sols est très variable allant de moins de 600 mm à plus de 1400 mm (*figure 1b*). 19 % des sols du Loiret présentent une épaisseur inférieure à 800 mm, et 59 % ont une épaisseur supérieure à 1000 mm. Les principales lithologies observées sont les sables (quartz et silice), les carbonates (craies et calcaires) et les argiles. Dans les sols, les phases caillouteuses prépondérantes sont les calcaires, le quartz et les silice, en proportions volumiques variables (*figure 1c*): 25 % des sols du Loiret ont une pierrosité inférieure à 1 %; un deuxième quart de la carte montre une pierrosité comprise entre 1 % et 4 %; et un troisième quart est occupée par des sols dont la gamme de pierrosité se situe entre 4 % et 7 % (*figure 1d*). Les

Figure 1 - a) Localisation de la zone d'étude. b) Profondeur des sols du Loiret. c) Nature lithologique des éléments grossiers présents dans les sols du Loiret. d) Proportion volumique des éléments grossiers dans les sols du Loiret.

Figure 1 - a) Location of the study area. b) Thickness of soils of Loiret. c) Lithological nature of the rock fragments present in soils of Loiret. d) The volume proportion of the rock fragments in soils of Loiret.



sols dont la pierrosité est supérieure ou égale à 10 % constituent 17 % de la proportion surfacique de la carte du Loiret (figure 1d). 1 % de la carte excède les 30 % en proportion volumique d'éléments grossiers dans le sol. De par la diversité des propriétés des sols et en raison de la disparité de leurs aptitudes agricoles, les pédopaysages du Loiret sont très différents les uns des autres. Ainsi, selon i) la variabilité spatiale des pédopaysages, ii) la profondeur et le type de lithologie à partir de laquelle les horizons du sol se sont développés, et iii) l'épaisseur des horizons de sols, la carte des sols du Loiret a été classée en 95 principales unités cartographiques de sols (Richer de Forges et al., 2008a; Richer de Forges et al., 2008b). Les sols non caillouteux qui dominent dans le Loiret sont des luvisols, des brunisols, des planosols et des fluvisols (AFES, 2008). Parmi les sols caillouteux on observe principalement des peyrosols, des rendosols, des calcisols et des calcosols, avec des proportions en éléments grossiers variables allant des graviers aux blocs (AFES, 2008). Les unités cartographiques de la carte des sols sont composées d'une ou de plusieurs unités typologiques de sols, dont les caractéristiques pédologiques, observées sur le terrain, sont stockées dans la base de données DoneSol (Grolleau et al., 2004). Pour les calculs de réserve utile et de déficit hydrique, nous avons utilisé les caractéristiques suivantes:

- les proportions volumiques de la terre fine et des éléments grossiers,
- la classe lithologique et la masse volumique apparente des éléments grossiers,
- la texture de la terre fine,
- l'épaisseur des horizons; la somme des épaisseurs des horizons donne la profondeur du sol, pour chaque type de sol.

Calculs de la réserve utile

Le calcul de la réserve utile à l'échelle du Loiret a été réalisé en quatre étapes. Ont été estimées dans l'ordre suivant les réserves utiles aux échelles: d'une phase - terre fine ou élément grossier - (RU_i), d'un horizon (RU_h), d'une unité typologique (RU_t) et d'une unité cartographique (RU_c).

La réserve utile de chaque phase a été calculée en appliquant l'équation suivante:

$$RU_i = \theta_{cc} - \theta_{pf} \quad (1)$$

Où RU_i représente la réserve utile de la phase i (fine ou caillouteuse), θ_{cc} symbolise la teneur en eau volumique à la capacité au champ, et θ_{pf} est la teneur en eau volumique au point de flétrissement permanent. La teneur en eau volumique à la capacité au champ a été fixée à la teneur en eau au potentiel matriciel de -100 hPa. La teneur en eau volumique au point de flétrissement permanent a été fixée à la teneur en eau au potentiel matriciel de -15840 hPa.

Pour la phase fine, la RU_i est choisie dans les classes de pédotransfert de Bruand *et al.* (2004), en fonction du type d'horizon (cf. position de l'horizon dans le profil de sol) et de sa texture, définie via le triangle de texture de Jamagne (1967). Pour notre étude, la texture dominante de la terre fine pour chaque horizon de chaque unité typologique a été collectée depuis la base de données DoneSol (Gaultier *et al.*, 1993; Grolleau *et al.*, 2004).

Pour les éléments grossiers, les teneurs en eau volumiques à -100 hPa et à -15840 hPa ont été calculées en utilisant les fonctions de pédotransfert proposées par Tetegan *et al.* (2011). Ces fonctions sont basées à la fois sur la masse volumique apparente et la classe lithologique des éléments grossiers. Dans notre étude, la classe lithologique dominante des éléments grossiers a été fournie par la base de données DoneSol pour chaque horizon du sol. La masse volumique apparente des éléments grossiers de chaque catégorie lithologique a été obtenue à partir des travaux de Tetegan *et al.* (2011). Le *tableau 1* présente la RU_i pour la phase fine puis pour la phase caillouteuse. On notera que les fonctions de pédotransfert de Tetegan *et al.* (2011) ont été développées sur des éléments grossiers de type cailloux, mais que Tetegan (2011) a montré que ces fonctions pouvaient être appliquées sur des éléments grossiers de sol de taille supérieure ou inférieure.

A partir de la RU_i des deux phases (fine et caillouteuse) calculée via l'équation 1, la réserve utile d'un horizon h (RU_h) a été calculée en appliquant l'équation 2 proposée par Cousin *et al.* (2003) :

$$RU_h = \left(\sum_{i=1}^2 RU_i \times p_i \right) \times E_h \quad (2)$$

Où p_i représente la proportion volumique de la phase i (fine ou caillouteuse) dans l'horizon h et E_h représente l'épaisseur de

l'horizon. La valeur de p_i a été obtenue par la base de données DoneSol.

La réserve utile d'une unité typologique t (RU_t) correspond à la somme des réserves utiles (RU_h) des horizons le constituant (équation 3).

$$RU_t = \sum_{h=1}^n RU_{h,t} \quad (3)$$

Où n représente le nombre d'horizons constituant l'unité typologique t .

A partir des valeurs de RU_t , la réserve utile de chaque unité cartographique a été calculée selon l'équation 4.

$$RU_c = \sum_{t=1}^N (RU_t \times S_t) \quad (4)$$

Où S_t représente la proportion surfacique de l'unité typologique t et N , le nombre d'unités typologiques composant l'unité cartographique c .

On notera que le calcul de la réserve utile n'est pas réalisé pour une profondeur constante de sol, mais, pour chaque unité typologique, pour la profondeur de sol renseignée dans la base de données DONESOL.

Calcul du déficit hydrique

Pour analyser l'effet des éléments grossiers sur le fonctionnement hydrique des sols du Loiret, nous avons calculé le déficit hydrique annuel pour une récolte de maïs. Le déficit hydrique est défini comme étant la quantité d'eau à fournir à une culture pour son développement optimal. Il correspond à la quantité d'eau obtenue en calculant la différence entre la valeur de l'évapotranspiration réelle (ETR) et celle de l'évapotranspiration maximale (ETM) (Itier *et al.*, 1996). ETR correspond à la quantité d'eau perdue par une culture, tandis que ETM représente la quantité maximale de l'eau évaporée du sol et des plantes. ETM s'exprime en fonction de l'évapotranspiration de référence (ET_{ref}) dont la valeur varie en fonction du stade de croissance de la plante considérée. Ainsi, ET_{ref} et ETM sont liées par un coefficient culturel Kc dépendant à la fois de la teneur en eau du sol et de l'espèce végétale cultivée (équation 5).

$$ETM = Kc \times ET_{ref} \quad (5)$$

La *figure 2a* montre l'évolution des valeurs du coefficient culturel Kc en fonction du stade phénologique du maïs.

ETM et ETR sont également reliés par un coefficient dit coefficient de sécheresse Ks (équation 6).

$$ETR = Ks \times ETM \quad (6)$$

Les valeurs de Ks sont dépendantes de la réserve utile du sol (RU). Pour leur approvisionnement en eau, les plantes puisent

Tableau 1 - Classes de pédotransfert utilisées dans l'équation 1 pour le calcul de la réserve utile (RU_i) des phases fine et caillouteuse. (Modifié de Bruand et al., 2004 et Tetegan et al., 2011).

Table 1 - Pedotransfer classes used in Equation 1 to calculate the available water content (RU_i) for fine and stony phases. (Modified from Bruand et al., 2004 and Tetegan et al., 2011).

	Classe de texture de la terre fine	RU _i pour la phase fine (mm.cm ⁻³)	
Horizon de surface (A)	Argile limoneuse	0,136	
	Argile sableuse	0,173	
	Limon argileux	0,173	
	Limon argilo - sableux	0,167	
	Limon sablo - argileux	0,143	
	Limon moyen	0,213	
	Limon moyen sableux	0,183	
	Limon sableux	0,162	
	Sable argileux	0,128	
	Sable limoneux	0,131	
	Sable	0,060	
Horizons sous-jacents (E, B, C)	Argile limoneuse	0,113	
	Argile sableuse	0,095	
	Argile	0,093	
	Limon argileux	0,149	
	Limon argilo - sableux	0,148	
	Limon sablo-argileux	0,127	
	Limon moyen	0,207	
	Limon moyen sableux	0,196	
	Sable argileux	0,103	
	Sable limoneux	0,116	
	Sable	0,073	
Nature lithologique de la phase caillouteuse	Masse volumique apparente moyenne (g.cm ⁻³)	RU _i pour la phase caillouteuse (cm. cm ⁻³)	
	Quartz	2,650	0,000
	Silex	2,229	0,014
	Calcaire	2,180	0,030

dans la RU pouvant être divisée en deux compartiments : une réserve utile « facilement » utilisable (RFU), où l'évapotranspiration des plantes est maximale, et une réserve utile « critique » difficilement utilisable (RDU), où l'évapotranspiration des plantes commence à diminuer (Itier et al., 1996). La figure 2b montre l'évolution des valeurs du coefficient de sécheresse K_s en fonction de la RU.

La valeur de l'évapotranspiration de référence (ET_{ref}) a été calculée avec la formule de Penman-Monteith à l'aide des données météorologiques obtenues à la station météorologique de Bricy. Cette station est la plus proche de la zone d'étude et constitue une station météorologique synoptique de niveau 0 (observations quotidiennes et régulières par un personnel spécialisé). A partir de toutes les données précédentes, le déficit hydrique (DH) a donc été calculé en appliquant l'équation suivante :

$$DH = ETM - ETR \quad (7)$$

Le modèle utilisé pour le calcul du bilan hydrique est un modèle simple à deux réservoirs basé sur le rapport RFU/RU. Ce ratio peut varier selon le type de sol, le climat et la culture considérée. Pour estimer le déficit en eau, le modèle de bilan hydrique a été exécuté pour chaque unité typologique. La résolution temporelle du modèle est la journée. La simulation débute le 1^{er} janvier, lorsque le stock d'eau du sol est censé être égal à la réserve utile du sol (RU_i), et se termine le 31 août, lorsque le maïs est censé ne plus recevoir d'irrigation et est prêt à être récolté. Le déficit hydrique a été calculé sur 21 ans, de 1990 à 2010. Les valeurs de déficit hydrique ainsi obtenues peuvent être interprétées comme les besoins en eau d'irrigation d'une culture, conduite de façon à assurer une évapotranspiration maximale. Dans l'optique de répondre aux besoins des agriculteurs français en termes d'investissements dans du matériel d'irrigation, l'analyse des données a été focalisée sur les résultats obtenus pour le huitième décile du déficit hydrique, selon le mode de calcul en vigueur chez Arvalis-Institut du Végétal pour les recommandations en irrigation.

Influence des éléments grossiers sur les estimations de la réserve utile et du bilan hydrique

La réserve utile et le déficit hydrique ont été calculés selon trois scénarios :

- 1^{er} scénario (S_{TFCGa}): les proportions volumiques et les capacités de rétention en eau des éléments grossiers sont prises en compte. Ce scénario est considéré comme le scénario de référence, censé reproduire au plus juste le comportement hydrique réel du sol.
- 2^e scénario (S_{TF}): ni les proportions volumiques ni les capacités de rétention en eau des éléments grossiers ne sont

prises en compte. On considère donc ici que tous les sols ne sont composés que de terre fine, même pour les sols ayant une phase caillouteuse. Ce scénario a longtemps été la méthode classique de calcul de la réserve utile du sol, lorsque l'on ne savait pas comment tenir compte des propriétés de rétention de la phase caillouteuse.

- 3^e scénario (S_{TFEGi}): les proportions volumiques des éléments grossiers sont prises en compte, mais on considère qu'ils ne peuvent stocker d'eau. Ce scénario est un scénario intermédiaire entre les deux précédents, puisque l'on tient compte du volume de la phase caillouteuse, mais pas de ses propriétés hydriques.

Pour comparer les valeurs de RU et DH obtenues par application des 2^e (S_{TF}) et 3^e (S_{TFEGi}) scénarios à celles obtenues par le scénario de référence (S_{TFEGa}), deux critères d'erreurs ont été utilisés: l'erreur moyenne (EM) et l'erreur quadratique moyenne (EQM) définies par les équations 8 et 9.

$$EM = \left(\frac{1}{n} \right) \times \left(\sum_{j=1}^n (V_j - V_{jref}) \right) \quad (8)$$

$$EQM = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \right) \times \left(\sum_{j=1}^n (V_j - V_{jref})^2 \right)} \quad (9)$$

Où V_j représente la valeur obtenue par application du 2^e (S_{TF}) ou du 3^e (S_{TFEGi}) scénario, et V_{jref} correspond à la valeur obtenue en appliquant le scénario de référence.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'épaisseur et la pierrosité des sols du Loiret

Contrairement à ce que l'on aurait pu penser, il n'existe pas de corrélation forte entre la pierrosité et l'épaisseur des sols sur la carte des sols du Loiret (figure 3). Par exemple, certains sols d'une épaisseur de 600 mm peuvent avoir une pierrosité nulle ou une proportion en éléments grossiers pouvant aller jusqu'à 10 %. De même, on note la présence de plusieurs sols ayant une épaisseur de 1200 mm avec des pierrosités variant de 0 à près de 30 %.

Détermination de la réserve utile des sols du Loiret

La réserve utile a été calculée pour chaque unité typologique selon les trois scénarios présentés précédemment (tableau 2 et figures 4a et 4b). Les valeurs les plus faibles sont observées pour le scénario 3 lorsque la phase caillouteuse est supposée absente. Au regard des valeurs moyennes, pour le scénario 3, on obtient une RU égale à 1,1 mm d'eau par cm de sol, ce qui très proche de la valeur habituellement estimée pour les loess (1 mm/cm) par Jamagne *et al.* (1977) et Itier *et al.* (1996).

La variabilité spatiale de la réserve utile du Loiret est présentée à la figure 4. Les fréquences de distribution des valeurs présentent les mêmes allures pour les trois scénarios, avec plus de 50 % des valeurs dans la gamme de valeurs de RU entre 50 et 150 mm. Pour le scénario 1, la RU varie entre 100 et 150 mm pour 46 % de la surface du sol du Loiret (figures 4a et 4b). Pour les scénarios 2 et 3, la variabilité spatiale est

Figure 2 - a) Évolution du coefficient cultural (K_c) en fonction du stade phénologique du maïs. b) Évolution du coefficient de sécheresse (K_s) en fonction de la réserve utile du sol. (a) et b) modifiés de Doorenbos et Pruitt, 1977).

Figure 2 - a) Evolution of crop coefficient (K_c) in function of the phenological stage of corn. b) Change in drought coefficient (K_s) based on the soil available water content. (a and b modified from Doorenbos and Pruitt, 1977).

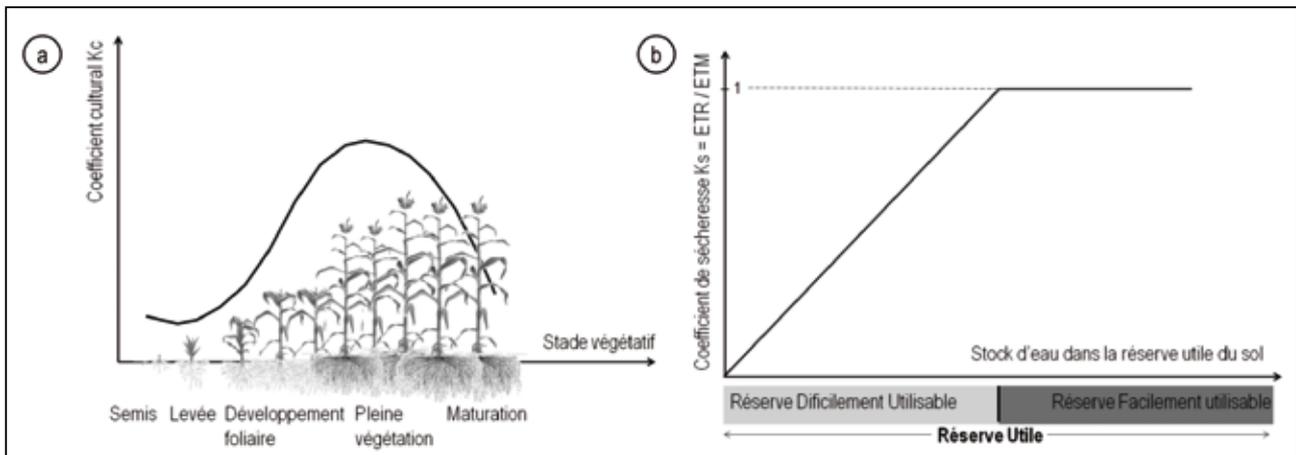
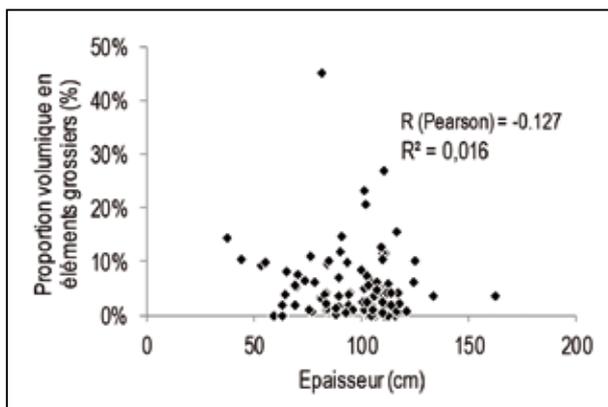


Figure 3 - Relation entre la proportion en éléments grossiers et l'épaisseur des sols du Loiret. R est le coefficient de corrélation. R^2 est le coefficient de détermination.

Figure 3 - Relationship between the volume proportion of rock fragments and the thickness of soils of Loiret. R is the coefficient of correlation. R^2 is the coefficient of determination.



quelque peu différente de celle du scénario 1 (tableau 2 et figure 4b). Mais, quelle que soit la situation géographique sur la carte du Loiret, la RU calculée en supposant que la phase caillouteuse est inerte, est systématiquement inférieure ou égale à la RU estimée en considérant que les sols sont exclusivement composés de phase fine (tableau 2).

Les figures 4c et 4d présentent la différence de valeurs de réserve utile pour les scénarios 2 et 3 comparativement au scénario 1. En tenant compte des valeurs moyennes, on constate que le scénario 2 surestime la réserve utile de 4 % avec une erreur moyenne de 5 mm et une erreur quadratique moyenne de 8,52 mm. Le scénario 3, quant à lui, sous-estime systématiquement la RU, avec une erreur moyenne de - 0,91 mm et une erreur quadratique moyenne de 1,98 mm. Les sous-estimations les plus importantes sont localisées dans les zones aux pierrosités les plus élevées (figure 4d), dont les éléments grossiers sont constitués de calcaire ou de quartz. En effet dans ces zones là, plus la pierrosité est élevée et plus la sous-estimation de la RU est importante (figure 5a). Par contre, la sous-estimation de la RU par le scénario 3 n'est pas systématique dans les zones où les éléments grossiers sont constitués de

silex, en particulier dans la partie est de la carte. Dans les milieux à silex, il existe des zones où la proportion en éléments grossiers est élevée (entre 20 et 30 %, par exemple dans la partie nord-est de la carte) mais où les erreurs d'estimation par le scénario 3 sont faibles (de 0 à -2 %). Cela s'explique par le fait que les silex – ayant une capacité de rétention quasi nulle – engendrent peu d'erreur d'estimation en dépit de leur proportion volumique élevée.

Dans le cas où l'on considère la phase caillouteuse absente (scénario 2), on constate une surestimation systématique de la RU car, pour les types de sol rencontrés sur la carte, la phase fine a des capacités de rétention hydrique plus élevées que celles de la phase caillouteuse. Les surestimations les moins importantes sont localisées dans les zones aux pierrosités les moins élevées (figure 5b). Sur plus de 80 % de la carte, les erreurs d'estimation par le scénario 2 sont comprises entre 0 et 10 %; sur 8 % de la carte, les surestimations sont comprises entre 10 et 20 %. Pour le scénario 2, on note une plus grande variabilité spatiale de l'estimation de la réserve utile dans la zone à silex, en raison de la forte variabilité de pierrosité dans cette zone. On note également que le lien entre la pierrosité des sols et les erreurs d'estimation de la RU est plus fort pour le scénario 2 que pour le scénario 3 (figure 5).

Évaluation du déficit hydrique des sols du Loiret pour une culture de maïs

Pour analyser l'effet du mode de calcul de la réserve utile sur le fonctionnement hydrique du sol à l'échelle d'une petite région, nous avons calculé le déficit hydrique pour une culture de maïs avec un modèle de bilan hydrique. Notre hypothèse de travail est qu'une estimation correcte de la réserve utile des sols peut améliorer l'estimation du déficit hydrique. La culture de maïs a été sélectionnée pour plusieurs raisons:

- Elle est connue pour ses forts besoins hydriques. En effet pour obtenir une production maximale de biomasse, cette culture nécessite entre 500 et 800 mm d'eau selon le climat (Doorenbos et al., 1978).
- Le maïs est largement cultivé en France. En 30 ans, les surfaces irriguées en France ont été multipliées par trois (figure 6). Le maïs requiert régulièrement une bonne irrigation,

Tableau 2 - Statistiques descriptives des valeurs en millimètres de la réserve utile (RU) calculée pour les trois scénarii.

Table 2 - Descriptive statistics of the values in millimeters of the available water content (AWC) calculated for the three scenarii..

	Minimum	Moyenne	Médiane	Maximum
Scénario 1	49,91	111,26	107,51	207,42
Scénario 2	56,40	116,26	114,07	208,95
Scénario 3	48,31	110,35	107,09	207,42

Figure 4 - a) Réserve utile des sols du Loiret calculée pour le scénario de référence. **b)** Répartitions des gammes de valeurs de réserve utile obtenue pour les trois scénarii en fonction de leur proportion surfacique. TFEGa = scénario 1, TF = scénario 2, TFEGi = scénario 3. **c)** Carte des erreurs d'estimation de la réserve utile en appliquant le scénario 2. **d)** Carte des erreurs d'estimation de la réserve utile en appliquant le scénario 3. EM = erreur moyenne. EQM = erreur quadratique moyenne.

Figure 4 - a) Available water content of the soils of Loiret calculated for the reference scenario. **b)** Histograms of the available water content for the three scenarii according to their areal proportion. TFEGa = scenario 1, TF = Scenario 2, Scenario 3 = TFEGi. **c)** Map of errors in the estimation of the available water content applying the scenario 2. **d)** Map of errors in the estimation of the available water content applying the scenario 3. EM = mean error. EQM = root mean square error.

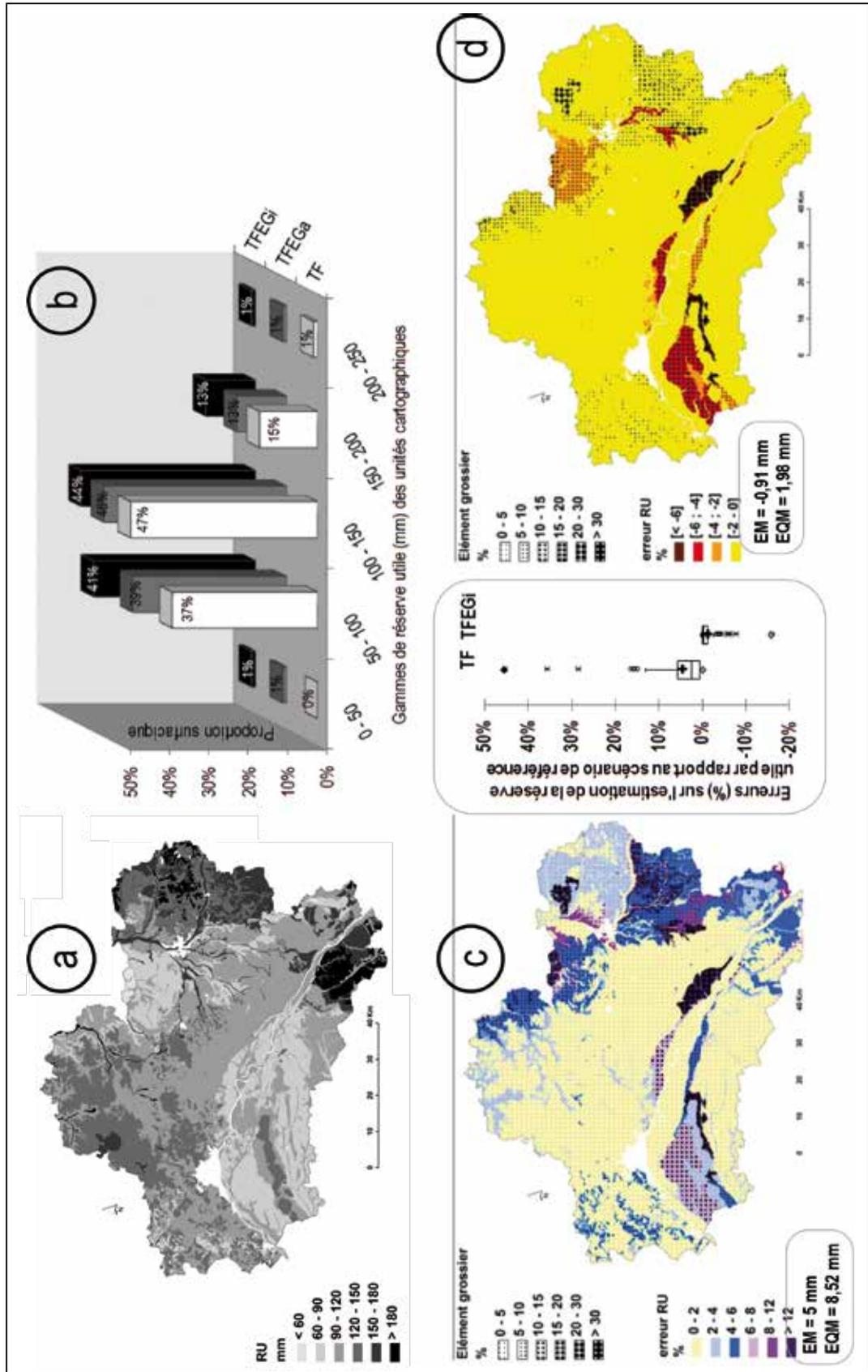


Figure 5 - Relations entre les erreurs d'estimation de la réserve utile en cas de non application du scénario de référence et la proportion en éléments grossiers: a) le scénario 2 par rapport au scénario de référence, b) le scénario 3 par rapport au scénario de référence.

Figure 5 - Relationship between the errors in estimating the available water content in case of non-application of the reference scenario and the stoniness: a) Scenario 2 compared to reference scenario, b) Scenario 3 compared to reference scenario.

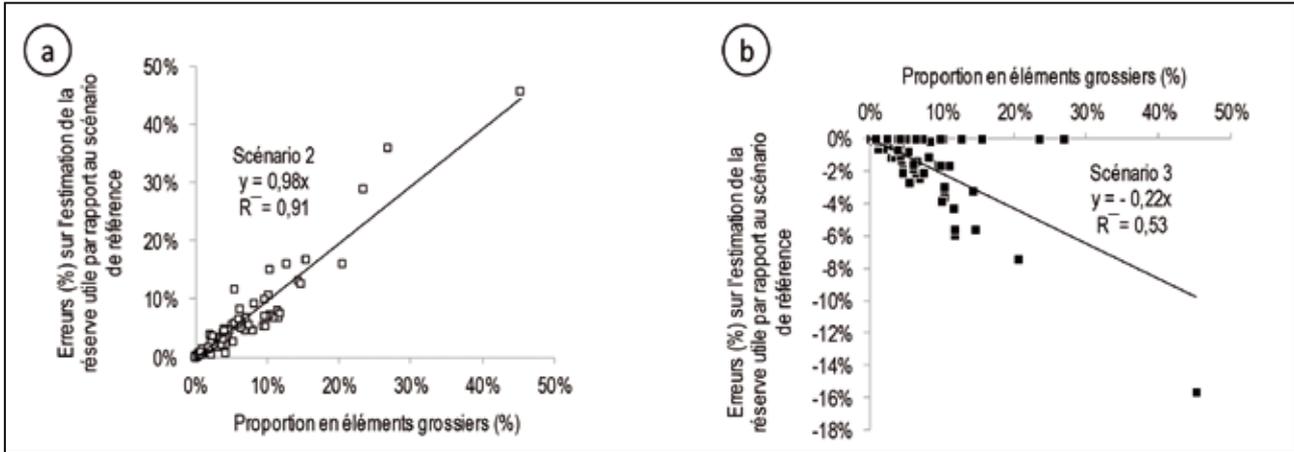
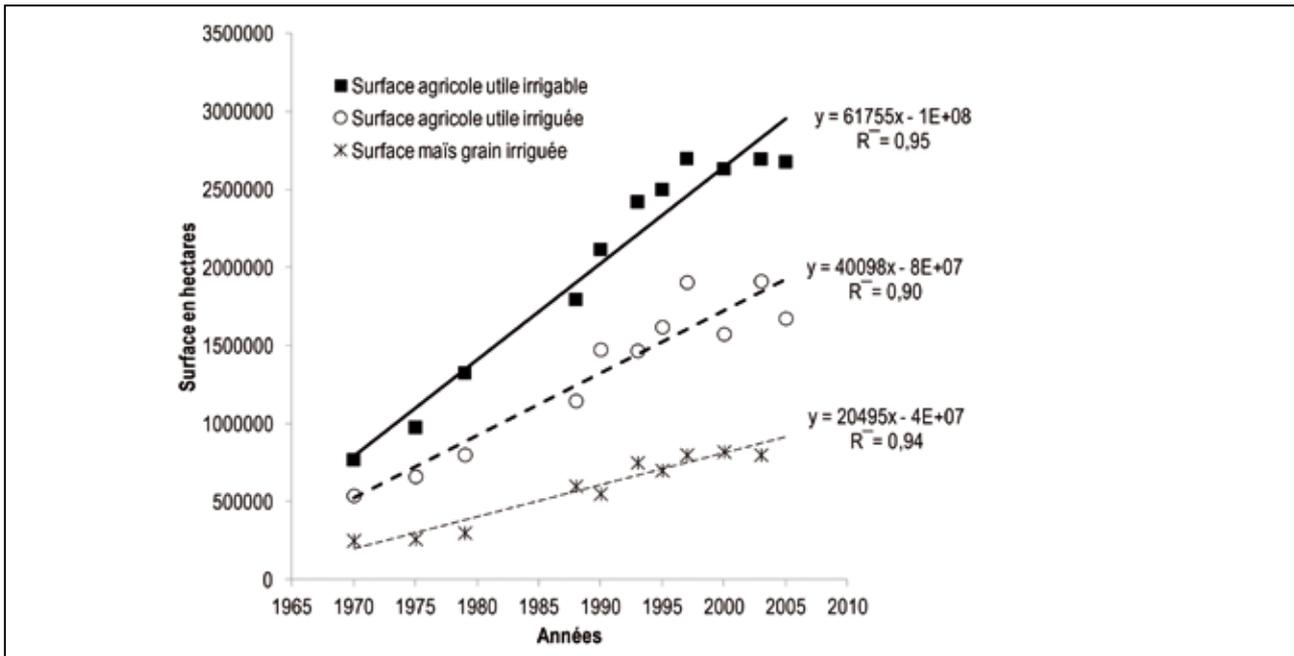


Figure 6 - Évolution de la quantité de surface irriguée en France au cours du temps. (Modifié de Bergez et Lacroix, 2008).

Figure 6 - Changes in the areal proportion of irrigated area in France over time. (Modified from Bergez and Lacroix, 2008).



en particulier en Beauce, dans le Nord et l'Ouest du Loiret, où il est largement cultivé.

La valeur moyenne la plus élevée, estimée pour le déficit hydrique des sols du Loiret est égale à 191 mm, et a été obtenue pour le scénario 3, cas de figure où la phase caillouteuse est supposée inerte. La valeur moyenne la plus faible, est égale à 185 mm, a été obtenue pour le scénario 2, cas de figure où la phase caillouteuse est supposée absente (tableau 3). Les

valeurs de déficit hydrique les plus faibles (minimum, moyenne et maximum) concernent le scénario 2.

Pour les trois scénarios, le déficit hydrique du sol calculé pour une année est élevé et est toujours supérieur à 100 mm, démontrant ainsi que la culture de maïs requiert une irrigation substantielle dans le département du Loiret (tableau 3 et figure 7a). Le déficit hydrique des sols du Loiret montre aussi une variabilité spatiale différente selon le scénario considéré

Figure 7 - a) Déficit hydrique des sols du Loiret calculée pour le scénario de référence dans le cas d'une culture de maïs. b) Répartitions des gammes de valeurs de déficit hydrique obtenue pour les trois scénarii en fonction de leur proportion surfacique. TFEga = scénario 1, TF = scénario 2, TFEgi = scénario 3. c) Carte des erreurs d'estimation du déficit hydrique en appliquant le scénario 2. d) Carte des erreurs d'estimation du déficit hydrique en appliquant le scénario 3. EM = erreur moyenne.

Figure 7 - a) The water deficit of the soils of Loiret calculated for the reference scenario in the case of maize crop. b) Histograms of water deficit obtained for the three according to their areal proportion. TFEga = scenario 1, TF = Scenario 2, Scenario 3 = TFEgi. c) Map of errors in the estimation of the soil water deficit using scenario 2. d) Map of errors in the estimation of the soil water deficit using scenario 3. EM = mean error.

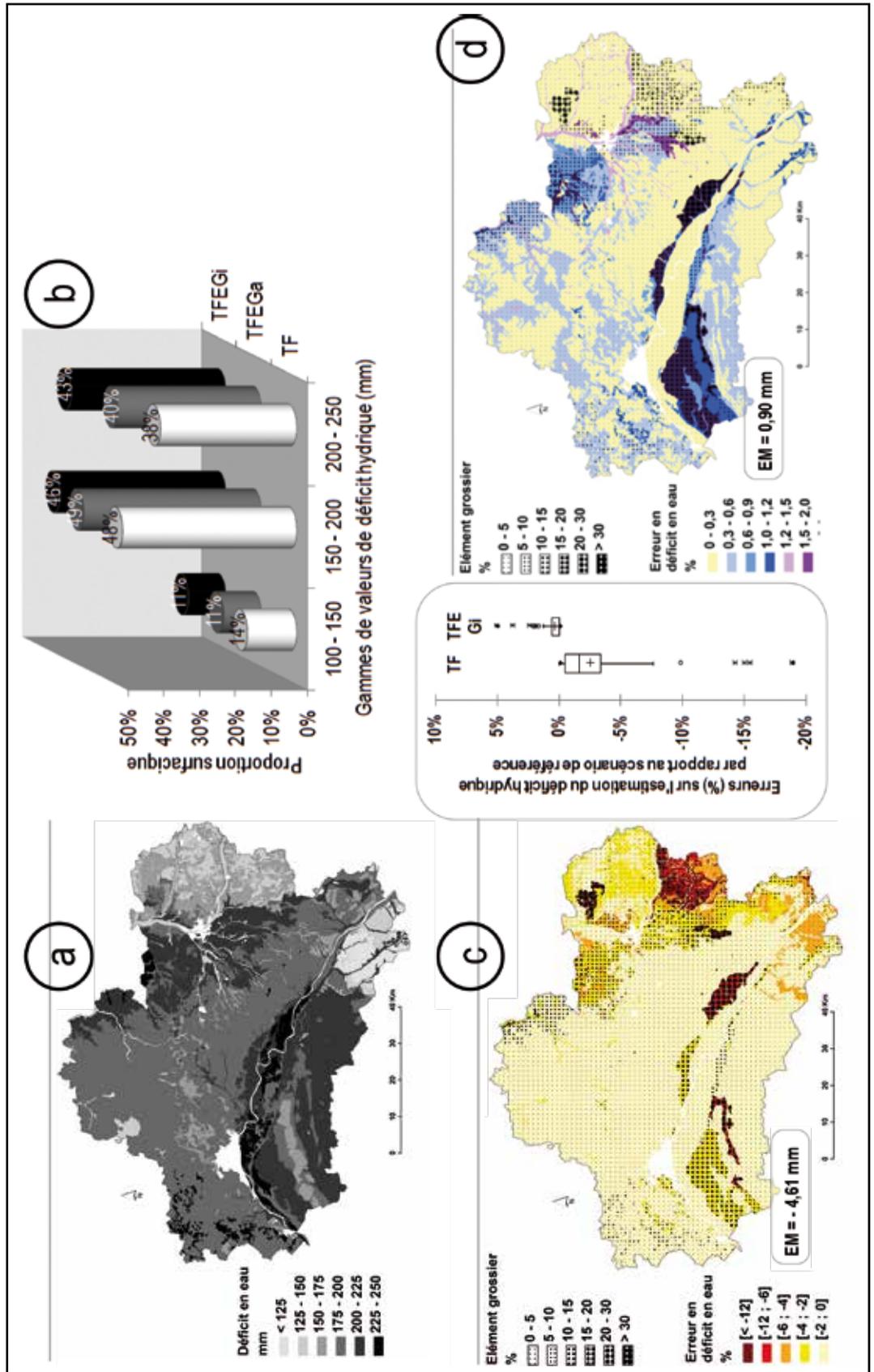


Figure 8 - Relations entre les erreurs d'estimation du déficit hydrique en cas de non application du scénario de référence et la proportion en éléments grossiers des sols du Loiret.

Figure 8 - Relationship between the errors in estimating the water deficit in the case of non-application of the reference scenario and the stoniness of soils of Loiret.

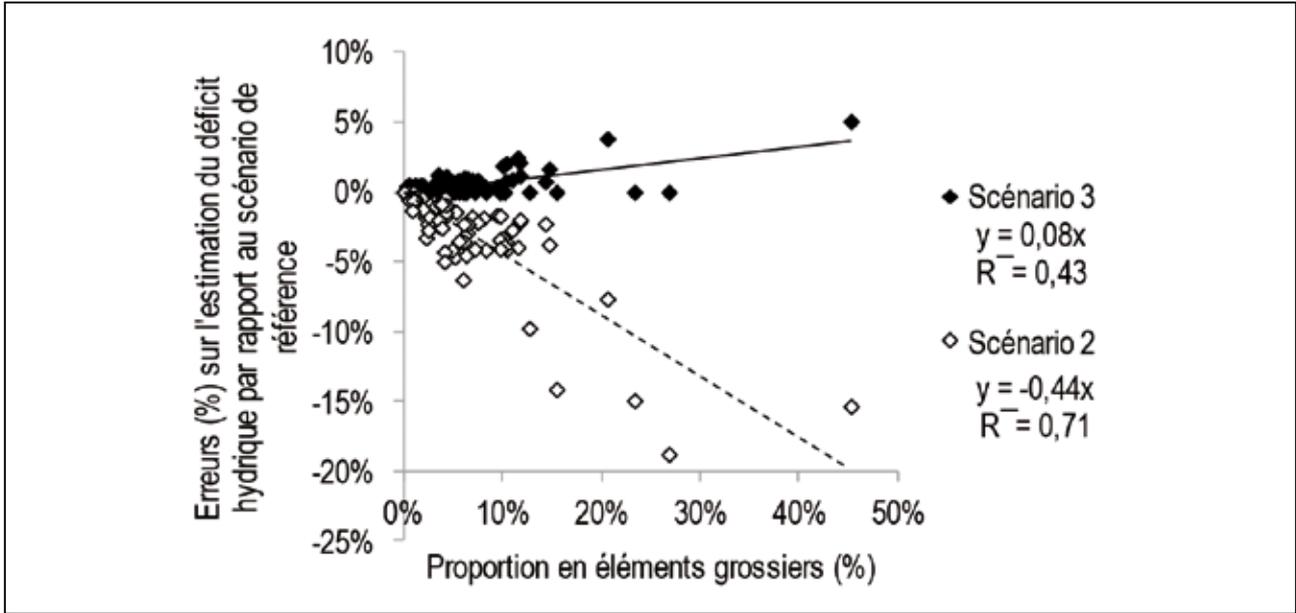
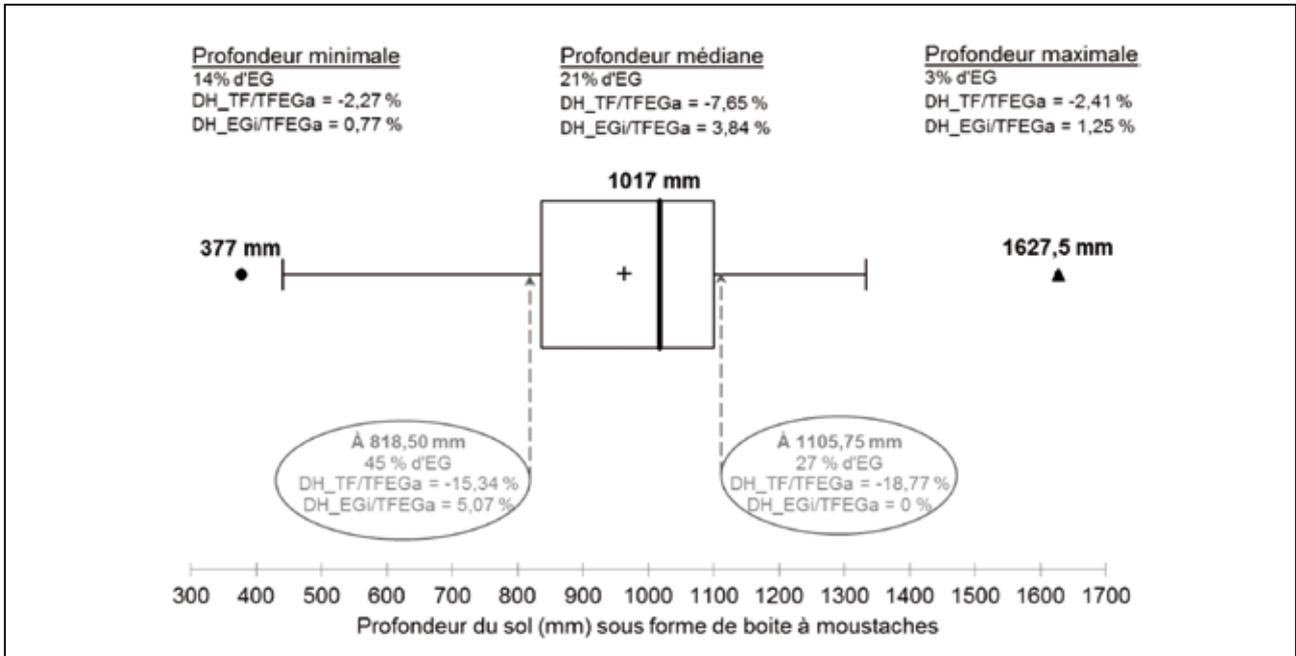


Figure 9 - Pierrosité et erreurs d'estimation du déficit hydrique à différentes profondeurs du sol.

Figure 9 - Stoniness and errors of estimation of the hydric deficit at different soil depths.



(figure 7b). Pour le scénario 1, les valeurs de déficit hydrique sont comprises entre 150 et 250 mm pour pratiquement 90 % de la carte. Pour les scénarios 2 et 3 un peu plus du tiers de la carte est concernée par un déficit hydrique supérieur à 200 mm.

Similairement aux calculs réalisés pour les valeurs de RU, nous avons comparé les valeurs de DH des scénarios 2 et 3 à celles obtenues pour le scénario de référence (le scénario 1). On observe que le scénario 2 sous-estime les valeurs de DH tandis que le scénario 3 les surestime (figures. 7c et 7d). Comme on pouvait s'y attendre, certaines valeurs d'erreur d'estimation du déficit hydrique les plus élevées sont souvent localisées au niveau de sols minces à forte pierrosité. Dans le cas du scénario 2, quelle que soit la nature lithologique de la phase caillouteuse, on remarque que les erreurs d'estimation du DH sont d'autant plus élevées que la proportion volumique de la phase caillouteuse est importante (figure 8). Les zones à silex présentent encore une fois une grande variabilité spatiale liée à la variabilité spatiale de la pierrosité des sols à silex dans la partie est de la carte. Dans le cas du scénario 3, pour les sols caillouteux contenant des éléments grossiers calcaires avec une pierrosité de l'ordre de 10 à 15 %, on constate que les erreurs d'estimation du déficit hydrique sont d'autant plus faibles que les sols sont minces (d'épaisseur inférieure à 60 cm).

L'ensemble de ces résultats montre que, lorsque le sol est considéré uniquement constitué de terre fine, les besoins en irrigation peuvent être sous-estimés et la culture de maïs pourrait ne pas atteindre son maximum de productivité. Par contre, en supposant que les éléments grossiers sont inertes – mais tout de même présents – les besoins hydriques sont surestimés et la culture de maïs est sur-irriguée, ce qui présente à la fois un désagrément économique pour l'agriculteur qui ne dispose pas des éléments optimums pour raisonner son investissement en équipement d'irrigation, et une nuisance environnementale avérée puisque l'eau prélevée en surplus en période estivale est évaporée; le niveau de la nappe baisse donc par pompage et n'est pas réalimentée par drainage.

CONCLUSIONS

L'objectif principal de cette étude était: 1) de proposer une meilleure estimation de la réserve utile de sols du Loiret en tenant compte de la variabilité de leur pierrosité et de la nature lithologique des éléments grossiers en présence sur cette échelle régionale et 2) d'analyser l'impact du calcul de la réserve utile sur l'estimation du déficit hydrique qui serait compensé par irrigation pour une culture de maïs. La réserve utile des sols du Loiret a été calculée en couplant les fonctions de pédotransfert proposées par Bruand *et al.* (2004) pour la phase fine et celles de Tetegan *et al.* (2011) estimées pour la phase caillouteuse. Le déficit hydrique des sols du Loiret a été calculé sur une période de 21 années pour une culture de maïs. Nous avons démontré que la réserve utile calculée en supposant que le sol serait exclusivement constitué de terre fine conduisait systématiquement à des surévaluations de la réserve utile réelle des sols caillouteux et à des sous-estimations du déficit hydrique de ces sols pour une culture de maïs. Inversement, en considérant la présence de la phase caillouteuse dans le sol et en négligeant ses capacités de rétention en eau, la réserve utile était automatiquement sous-évaluée et le déficit hydrique surestimé.

Dans cette étude de cas, on remarque que les erreurs moyennes et erreurs quadratiques moyennes calculées entre des scénarios simplifiés - tenant compte ou non de la proportion de la phase caillouteuse et de leurs propriétés hydriques – et un scénario de référence - tenant compte à la fois de la proportion et des propriétés des éléments grossiers - semblent faibles, ce qui ne milite pas pour une prise en compte systématique des éléments grossiers dans les calculs de réserve utile à cette échelle. Cependant, il convient de noter que les éléments grossiers de type quartz et silex, qui présentent de faibles capacités de rétention en eau, sont présents sur plus de 60 % des sols de la zone étudiée. Dans d'autres régions, ou à des échelles d'étude plus grandes (petite région, parcelle), ces paramètres statistiques sont plus élevés (Tetegan *et al.*, 2013), et il est indéniable qu'il convient de tenir compte de la phase caillouteuse dans le calcul de la réserve hydrique et du déficit hydrique. Dans le contexte de changement climatique, où les périodes de sécheresse et les besoins en irrigation auront tendance à augmenter, une optimisation du calcul du besoin en

Tableau 3 - Statistiques descriptives des valeurs du déficit hydrique (DH) calculées en millimètres pour les trois scénarios, dans le cas d'une culture de maïs.

Table 3 - Descriptive statistics of the values of the water deficit (DH) calculated in millimeters for the three scenarii, in the case of maize.

	Minimum	Moyenne	Médiane	Maximum
Scénario 1	107,34	189,90	192,64	246,96
Scénario 2	105,93	185,29	187,00	241,36
Scénario 3	107,34	190,80	193,58	248,85

irrigation par la prise en compte du volume et des propriétés de la phase caillouteuse, sera d'un intérêt primordial pour les agriculteurs.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES, 2008. Référentiel pédologique. Eds QUAE, 435 pages.
- Al Majou H., 2008 - Étude et prédiction des propriétés de rétention en eau des sols: Prise en compte de la composition et de l'état structural du sol. Thèse de l'Université d'Orléans, 265 pp.
- Arrouays D., Duval O., Renaux B., 1989 - Esquisse des paysages pédologiques du Loiret (échelle 1/250000), INRA – SESCOF, Chambre d'agriculture du Loiret. 1 carte + 1 notice explicative de 184 p.
- Baize D., Girard M-C., Jabiol B., Rossignol J-P., Eimberck M., Beaudou A., 2009 - Référentiel pédologique 2008. Association Française pour l'Etude des sols. Coll. Savoir Faire. Quae Editions. France. 435 p.
- Bastet G., 1999 - Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert: développement de nouvelles approches. Thèse de l'Université d'Orléans, 214 pp.
- Bergez J-C., Lacroix B., 2008 - Gestion de l'irrigation: du stratégique au tactique. Quelques apports de la recherche. Innovations Agronomiques, 2, 53-63.
- Bruand A., Duval O., Cousin I., 2004 - Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO: Une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. Étude et Gestion des Sols, 11 (3), 323-334.
- Cousin I., Nicoullaud B., Coutadeur C., 2003 - Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil. Catena, 53 (2), 97-114.
- Doorenbos J., Kassam A.H., Bentvelder C., Uittenboogaard G., 1978 - Yield response to water. *In*: FAO irrigation and drainage, 33, FAO, Rome, 144 p.
- Doorenbos J., Pruitt W.O., 1977 - Crop water requirements. Irrigation and Drainage, 24, FAO, Rome, 179 p.
- Gaultier J.P., Legros J.P., Bornand M., King D., Favrot J.C. et Hardy R., 1993 - L'organisation et la gestion des données pédologiques spatialisées: le projet DONESOL. Revue de Géomatique, 3, 235-253.
- Garcia-Ruiz J.M., Lopez-Moreno J.I., Vicente-Serrano S.M., Lasanta-Martinez T., Begueria S., 2011 - Mediterranean water resources in a global change scenario. Earth - Science Reviews, 105 (3-4), 121-139.
- Gras R., et Monnier G., 1963 - Contribution de certains éléments grossiers à l'alimentation en eau des végétaux. Science du Sol, 1, 13-20.
- Grolleau E., Bargeot L., Chafchafi A., Hardy R., Doux J., Beaudou A., Le Martret H., Lacassin J-Cl., Fort J-L., Falipou P., Arrouays D., 2004 - Le système d'information national sur les sols: DONESOL et les outils associés. Étude et gestion des sols, 11 (3), 255-270.
- Itier B., Brisson N., Doussan C., Tournebize R., 1996 - Bilan hydrique en agrometeorologie. *In*: Actes de l'Ecole – Chercheurs en Bioclimatologie, Tome 2: Du couvert végétal à la région, (eds INRA), Le Croisic France, 383 - 397.
- Jamagne M., 1967 - Bases et techniques d'une cartographie des sols. Annales Agronomiques, 18, 142 p.
- Jamagne M., Bétrémieux R., Bégon J.C., Mori A., 1977 - Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. Bulletin Technique d'Information, 324, 627-641.
- Lozet J., et Mathieu C., 1997 - Dictionnaire de science du sol. Eds. Lavoisier. 3^e édition. 488 p.
- Morvan X., Mouvet C., Baran N., Gutierrez A., 2006 - Pesticides in the groundwater of a spring draining a sandy aquifer: Temporal variability of concentrations and fluxes. Journal of contaminant hydrology, 87 (3), 176-190.
- Paydar Z., Gaydon D., Chen Y., 2009 - A methodology for up-scaling irrigation losses. Irrigation Science, 27,347-356.
- Poesen J., et Lavee H., 1994 - Rock fragments in top soils: significance and processes. Catena, 23, 1-28.
- Richer de Forges A., et Verbèqne B., 2003a - Notice explicative de la carte des sols de Patay. 143 p.
- Richer de Forges A., et Verbèqne B., 2003b - Carte des sols du Loiret (1/50000). Feuille de Patay. Carte et notice explicative. Chambre d'Agriculture du Loiret.
- Tetegan M., 2011 - Modélisation des propriétés de rétention en eau des sols caillouteux. Application à l'estimation spatialisée de la réserve utile, Thèse de l'Université d'Orléans, 165 p.
- Tetegan M., Nicoullaud B., Baize D., Bouthier A., Cousin I., 2011 - The contribution of rock fragments to the available water content of stony soils: proposition of new pedotransfer functions. Geoderma 165, 40-49.
- Tetegan M., Richer de Forges A.C., Verbèqne B., Nicoullaud B., Desbourdes C., Bouthier A., Arrouays D., Cousin I., 2015. The effect of soil stoniness on the estimation of water retention properties of soils: A case study from central France. Catena, 129, 95-102.
- Wösten J.H.M., Pachepsky Y.A., Rawls W.J., 2001 - Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. Journal of hydrology. 251, 123-150.