

# Méthodologie d'élaboration du plan d'échantillonnage de la deuxième campagne du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France par intégration multi-critères

## Capacité à détecter une évolution temporelle, évaluation du réservoir en eau utilisable et contraintes logistiques

C. Swiderski<sup>(1)</sup>, N. Saby<sup>(1\*)</sup>, L. Boulonne<sup>(1)</sup>, C. Jolivet<sup>(1)</sup> et I. Cousin<sup>(2)</sup>

- 1) INRA Centre Val de Loire, US1106, INFOSOL, 45075 Orléans Cedex 2  
 2) INRA Centre Val de Loire, UR0272, SOLS, 45075 Orléans Cedex 2

\* : Auteur correspondant : Nicolas.Saby@orleans.inra.fr

### RÉSUMÉ

La première campagne de mesures (2001 - 2009) du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) a permis d'acquérir des références sur des propriétés chimiques des sols sur 2170 points en France métropolitaine. La deuxième campagne (2016 - 2027) a pour objectif premier la mise en évidence, avec un protocole d'échantillonnage adapté, d'éventuelles évolutions dans les propriétés du sol. Elle constitue également une opportunité pour acquérir des données de référence sur des propriétés physiques des sols, parmi lesquelles le RU (Réservoir Utilisable par les plantes). Le coût de la mesure du RU étant élevé, nous proposons pour l'évaluer une méthodologie qui s'appuie sur la connaissance des caractéristiques des sols à l'échelle de l'horizon. Il s'agit de classer l'ensemble des horizons du RMQS selon une typologie pertinente au regard de l'évaluation du RU, puis de proposer une valeur mesurée du RU pour chaque type d'horizon selon un principe d'appariement. Cette valeur mesurée sera issue soit d'une mesure réalisée en laboratoire sur un échantillon prélevé lors de la deuxième campagne, soit d'une mesure réalisée antérieurement et stockée dans la base de données des propriétés hydriques des sols SOLHYDRO. La méthodologie mise en œuvre s'organise en 3 étapes:

1 - l'élaboration d'une typologie d'horizons permettant d'identifier des horizons aux propriétés hydriques contrastées; cette typologie s'appuie sur le nom de l'horizon (69 possibilités), sur la texture dominante de l'horizon (en 3 classes) et sur la teneur en éléments grossiers de l'horizon (en 3 classes). Nous définissons ainsi 335 types d'horizons.

Comment citer cet article:  
 Swiderski C., Saby N., Boulonne L., Jolivet C., Cousin I. - 2017 - Méthodologie d'élaboration du plan d'échantillonnage de la deuxième campagne du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France par intégration multi-critères : capacité à détecter une évolution temporelle, évaluation du réservoir en eau utilisable et contraintes logistiques. *Etude et Gestion des Sols*, 24, 83-98

Comment télécharger cet article:  
[http://www.afes.fr/wp-content/uploads/2017/09/EGS\\_24\\_1\\_swiderski.pdf](http://www.afes.fr/wp-content/uploads/2017/09/EGS_24_1_swiderski.pdf)

Comment consulter/télécharger tous les articles de la revue EGS:  
[www.afes/egs/](http://www.afes/egs/)

2 - Le recensement des horizons de chaque type dans le RMQS et dans la base de données SOLHYDRO rassemblant des valeurs de propriétés hydriques des sols. On montre que 48 types d'horizons identifiés dans le RMQS (soit 2223 horizons) sont présents dans la base SOLHYDRO et ont donc un RU déjà mesuré; on montre, de façon corollaire, que 287 types d'horizons (soit 2535 horizons) ont un RU actuellement non mesuré.

3 - La réalisation du plan d'échantillonnage du RMQS permettant i) d'analyser chaque année des évolutions temporelles de propriétés chimiques de sol déjà mesurées lors de la première campagne du RMQS, et ii) de prélever prioritairement ces 287 types d'horizons sur lesquels il convient de réaliser une mesure de RU.

La méthodologie mise en œuvre s'appuie sur la génération de panels annuels et sur la méthode du recuit simulé, et répond à des contraintes scientifiques, financières et logistiques. Au final, elle permet la constitution de deux plans d'échantillonnage emboîtés: un plan d'échantillonnage général de la deuxième campagne du RMQS, et un plan d'échantillonnage spécifique dédié à l'évaluation du RU sur la grille RMQS.

### Mots clés

Sol, stratégie d'échantillonnage, réserve utile, recuit simulé.

### SUMMARY

#### **ELABORATING THE SAMPLING SCHEME OF THE SECOND CAMPAIGN OF THE FRENCH SOIL MONITORING NETWORK (RMQS) BY USING MULTICRITERIA:**

##### **Ability to detect temporal evolutions, evaluation of Available Water Content, and logistic constraints**

The first campaign of the French Soil Monitoring Network (RMQS for « Réseau de Mesures de la Qualité des Sols »), from 2001 to 2009, has enabled to record soil chemical characteristics over the whole French territory, on a 2170 points network. The main objective of the second campaign (2016-2027) intends to evidence potential time evolutions of soil characteristics, by using an ad-hoc sampling scheme. An alternative objective is to record some physical soil characteristics, including especially the Available Water Content (AWC). The cost of measuring being high, we propose here to develop an alternative methodology based on the knowledge of some soil characteristics at the horizon scale. It consists in classifying all the RMQS horizons according to a specific typology dedicated to evaluate AWC, and then to propose a measured AWC value for each horizon type by using a matching principle. This value will be either measured on an undisturbed soil core of the RMQS network, sampled during the second campaign, or extracted from the SOLHYDRO database, which stores soil hydric properties of French soil horizons. The methodology developed here consists in 3 steps:

1 - to elaborate a typology of soil horizons dedicated to the evaluation of soil hydric properties. It is based on 3 soil characteristics, say i) the name of the horizon (69 classes), ii) the texture of the soil horizon (3 classes), and iii) the rock content of the horizon (3 classes). On the RMQS, this typology enables to describe 335 horizon types.

2 - to inventory all the horizons type both in the RMQS and in the SOLHYDRO databases. 48 horizon types from the RMQS are present in the SOLHYDRO database, with a measured AWC value; 287 horizon types from the RMQS are not represented in the SOLHYDRO database and need an evaluation of the AWC.

3 - to realise the sampling scheme of RMQS enabling i) to analyse time evolutions of soil chemical properties already measured during the first RMQS campaign, and ii) to priority sample in these 287 horizon types on which AWC has to be measured.

The methodology is based on the optimization, using simulated annealing, of the determination of annual serial panels and, and obeys to scientific, financial and logistic constraints. Finally, it gives a general sampling scheme for the second RMQS campaign, and an associated sampling scheme dedicated to the evaluation of the AWC on the RMQS network.

### Key-words

Soil, sampling strategy, AWC, simulated annealing.

### RESUMEN

#### **METODOLOGÍA DE ELABORACIÓN DE UN PLAN DE MUESTREO DE LA SEGUNDA CAMPAÑA DE LA RED DE MEDIDAS DE LA CALIDAD DE LOS SUELOS DE FRANCIA POR INTEGRACIÓN MULTICRITERIOS:**

##### **Capacidad para detectar una evolución temporal, evaluación del reservorio en agua disponible y limitaciones logísticas**

La primera campaña de medidas (2001-2009) de la Red de Medidas de la Calidad de los Suelos (RMQS) permitió adquirir referencias sobre propiedades químicas de los suelos en 2170 puntos en Francia metropolitana. La segunda campaña (2016 - 2027) tiene como

primer objetivo destacar, con un protocolo de muestreo adaptado, eventuales evoluciones de las propiedades del suelo. Constituye igualmente una oportunidad para adquirir datos de referencia sobre propiedades físicas de los suelos, entre las cuales el RU (Reservorio Utilizable para las plantas). Siendo que el costo de la medida del RU es elevado, proponemos para evaluarlo una metodología que se apoya sobre el conocimiento de las características de los suelos a escala del horizonte. Se trata de clasificar el conjunto de los horizontes del RMQS según una tipología pertinente en cuanto a la evaluación del RU, luego proponer un valor medido del RU para cada tipo de horizonte según un principio de contratación. Este valor medido procederá sea de una medición realizada en laboratorio sobre una muestra recogida durante la segunda campaña, sea de una medición realizada anteriormente y almacenada en la base de datos de las propiedades hídricas de los suelos SOLHYDRO. La metodología aplicada se organiza en 3 etapas.

1 - la elaboración de una tipología de horizontes permitiendo identificar horizontes con propiedades hídricas contrastadas; esta tipología se apoya sobre el nombre del horizonte (69 posibilidades), sobre la textura dominante del horizonte (en 3 clases) y sobre el contenido en elementos gruesos del horizonte (3 clases). Definimos así 335 tipos de horizontes.

2 - el censo de los horizontes de cada tipo en el RMQS y en la base de datos SOLHYDRO que junta valores de propiedades hídricas de suelos. Se muestro que 48 tipos de horizontes identificados en el RMQS (sea 2223 horizontes) son presentes en la base SOLHYDRO y tienen entonces un RU ya medido; se muestro, de modo corolario, que 287 tipos de horizontes (sea 2535 horizontes) tienen un RU actualmente no medido.

3 - la realización del plan de muestreo del RMQS permite i) analizar cada año evoluciones temporales de propiedades químicas de los suelos ya medidas durante la primera campaña del RMQS, y ii) recoger prioramente estos 287 tipos de horizontes en los cuales conviene realizar una medición de RU.

La metodología aplicada se apoya sobre la generación de paneles anuales y sobre el método de recocido simulado, y satisface limitaciones científicas, financieras y logísticas. Al final, permite la constitución de dos planes de muestreos encajados: un plan de muestreo general de la segunda campaña del RMQS, y un plan de muestreo específico dedicado a la evaluación del RU en la rejilla RMQS.

#### **Palabras clave**

Suelo, estrategia de muestreo, reservorio utilizable, recocido simulado.

De nombreux modèles de cultures et modèles agro-environnementaux décrivant les échanges sol-plante-atmosphère-nappe-cours d'eau utilisent un formalisme dit de bilan hydrique pour décrire les transferts et la rétention de l'eau dans le sol. Ce bilan hydrique est renseigné par le RU (Réserve en eau Utilisable), utilisé comme paramètre synthétique de description des propriétés hydriques des sols. En particulier, dès lors qu'il s'agit de fournir des sorties de modèles sur de vastes territoires, de la région au globe, ce sont des modèles de bilan hydrique qui sont employés, et donc une connaissance du RU qui est requise.

On recense actuellement deux cartes qui proposent une évaluation du RU sur l'ensemble du territoire métropolitain :

- l'une a été élaborée par Le Bas *et al.* (1997 ; 2015) à l'aide de la Base de Données Géographique des Sols de France (BDGSF) au 1/ 1 000 000 (INRA, 1988). Cette dernière ne contient ni valeurs du RU, ni teneurs en eau au point de flétrissement permanent et à la capacité au champ, mais uniquement des noms de types de sol avec leurs profondeurs. Des règles expertes permettent d'estimer le RU pour chaque type de sol (Le Bas *et al.*, 2015).

- L'autre a été établie à partir d'évaluation du RU par les fonctions de pédotransfert d'Al Majou *et al.* (2008) sur un grand nombre de placettes forestières (Piedallu *et al.*, 2011). De façon

générale, on peut employer des fonctions de pédotransfert développées sur de grands territoires (par exemple celles de Wösten *et al.*, 1999 ou Bruand *et al.*, 2004) et les appliquer sur une base de données nationale, telle que la base de données DONESOL (Grolleau *et al.*, 2004) pour les déployer à l'échelle nationale.

Dans ces démarches, le RU n'est jamais mesuré, et l'application de règles ou fonctions de pédotransfert entache l'évaluation du RU d'incertitudes dont l'ordre de grandeur n'est pas connu. C'est donc un enjeu fort que de proposer une valeur plus fiable, du RU sur l'ensemble du territoire national, à partir d'un ensemble de données mesurées ponctuellement.

La mise en place du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) constitue un cadre national pour l'observation de l'évolution de la qualité des sols en France. Il est le fruit d'une opération multi-institutionnelle dans le cadre du Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (Ministères en charge de l'agriculture et de l'environnement, ADEME, INRA, IRD et IGN). Ce réseau systématique de mesures et de suivi des paramètres des sols a pour objectif de détecter de façon précoce l'apparition et les tendances d'évolution de l'état des sols en France en mesurant un grand nombre de paramètres physiques, chimiques et biologiques. La première campagne de collecte d'échantillons et de mesures s'est déroulée sur 10 ans entre 2000 et 2009. Une nouvelle campagne démarre début 2016 pour 12 ans.

Dans le cadre de cette deuxième campagne, nous proposons de mesurer le RU sur un grand nombre de points de la grille du RMQS. De telles mesures fourniraient à la fois des données d'entrée pour des modèles de bilan hydrique appliqués au RMQS, mais également des valeurs de référence (valeurs mesurées) pour l'évaluation de modèles utilisés sur d'autres bases de données Sol.

La mesure du RU s'appuie sur des prélèvements d'échantillons non déstructurés et non séchés, prélèvements qui n'ont pas été réalisés lors de la première campagne du RMQS car ils nécessitent une technicité particulière et parce que la mesure au laboratoire est longue et coûteuse. Cet article présente ainsi une méthodologie proposée pour évaluer le RU sur l'ensemble du réseau RMQS dans le contexte de la nouvelle campagne qui se déroulera sur 12 ans entre 2016 et 2027. Cette méthodologie, associée à des travaux antérieurs (Bourgeois et al., 2014, par exemple), permet l'élaboration du plan d'échantillonnage de la deuxième campagne du RMQS, plan d'échantillonnage présenté et discuté ici.

## MATÉRIEL ET MÉTHODE

### Démarche de l'étude

On évalue le RU d'un sol en déterminant, pour chaque horizon, sa teneur en eau à la capacité au champ, sa teneur en eau au point de flétrissement permanent et sa masse volumique (Bruand et al, 1996). La valeur du RU sur le profil de sol correspond à l'intégration des valeurs du RU évalué sur chaque horizon qui constitue le profil. L'horizon de sol constitue donc l'échelle élémentaire d'évaluation du RU.

Mesurer le RU sur chaque horizon de l'ensemble des profils du RMQS serait cependant très coûteux. Nous proposons donc de réaliser la mesure du RU sur une portion seulement des profils du RMQS et d'élaborer une démarche pour évaluer ce RU sur les sites où les mesures ne seront pas réalisées. Nous postulons que cette démarche conduira à des évaluations plus fiables que celles qui seraient produites par la simple application de fonctions de pédotransfert en tout point du réseau.

La démarche fondatrice de ce travail est de capitaliser une valeur mesurée du RU pour un (ou quelques) horizon(s) d'un type donné, et d'extrapoler cette valeur à l'ensemble des horizons de même type rencontrés sur la grille RMQS, selon un principe d'appariement. Nous pourrions alors fournir une valeur de RU évaluée sur chaque point de la grille RMQS tout en minimisant les prélèvements sur le terrain. Cette proposition repose sur deux hypothèses :

- la première est que des horizons de caractéristiques identiques ont un RU identique. Cette hypothèse est réaliste à condition que la typologie employée pour caractériser les horizons du

RMQS soit pertinente au regard de leur comportement vis-à-vis de l'eau. L'établissement de la typologie, garante de la qualité de l'évaluation du RU, est donc un point essentiel de ce travail.

- la deuxième est que le nombre d'horizons et leur type soient identiques pour chaque site RMQS pour les deux campagnes. Cette hypothèse nous semble très réaliste et permet que notre travail se fonde sur l'analyse des informations disponibles dans la base construite avec les données de la première campagne.

Par ailleurs, des valeurs de RU mesurées sur des horizons de sol n'appartenant pas à la grille RMQS sont déjà disponibles dans la base de données SOLHYDRO (Bruand et al, 2004). Nous proposons de recenser les types d'horizons pour lesquels des valeurs sont déjà disponibles afin d'identifier les horizons pour lesquels nous ne disposons pas de référence et pour lesquels une mesure s'avère nécessaire.

La démarche de cette étude s'organise donc en quatre étapes :

- 1- élaborer une typologie d'horizons, simplifiée par rapport aux référentiels couramment utilisés (Classification CPCPS, Référentiel Pédologique 95, Référentiel Pédologique 2008) ;
- 2- appliquer cette typologie :
  - a. sur le réseau RMQS, pour recenser les types d'horizons existant sur la grille RMQS ;
  - b. sur la base SOLHYDRO, pour identifier les horizons (du RMQS) pour lesquels une donnée RU est déjà disponible ;
- 3- croiser les informations pour identifier les horizons pour lesquels aucune donnée de RU n'est actuellement disponible et serait nécessaire ;
- 4- proposer un plan d'échantillonnage permettant de prélever prioritairement les horizons sur lesquels il convient de réaliser une mesure de RU tout en respectant les contraintes du plan général d'échantillonnage de la deuxième campagne du RMQS.

### Bases de données utilisées dans l'étude

#### Base de données du RMQS

Cette base de données provient de la mise en place du programme de surveillance Réseau de Mesures de la Qualité des Sols dont l'objectif est de dresser un bilan de l'état des sols français et de suivre son évolution à long terme (Arrouays et al., 2002). Ce programme de surveillance s'appuie sur un réseau de 2 170 sites, répartis sur le territoire national métropolitain selon un maillage systématique de 16km de côté et représentatifs des principales combinaisons-types de sols X occupation des sols rencontrées au niveau national (Arrouays et al, 2001). Au centre de chaque maille, des observations et des prélèvements d'échantillons de sol sont réalisés et renouvelés tous les dix à vingt ans. Pour ce faire, le programme s'appuie sur un ensemble de partenaires, implantés sur l'ensemble du territoire, qui réa-

lisent les prélèvements conformément au manuel RMQS (Jolivet *et al.*, 2006). Des analyses des propriétés physiques, chimiques et biologiques sont réalisées, puis capitalisées au sein de la base de données nationale DoneSol (Grolleau *et al.*, 2004). Des échantillons sont archivés de façon systématique au Conservatoire des sols, sur le site de l'Inra d'Orléans (Ratié *et al.*, 2010). Témoins de l'état des sols au moment où ils ont été prélevés, ils peuvent être remobilisés et analysés de façon rétrospective (Bardy *et al.* 2014). La qualité des prélèvements, des mesures et de l'archivage est assurée par un suivi qualité mené par l'Unité Infosol de l'INRA.

Les observations pédologiques et analyses physico-chimiques sur un site RMQS proviennent de deux éléments:

- d'une part, d'un profil (décrit à partir d'une fosse) qui permet de mettre en évidence la succession des horizons et leur structure naturelle. Les horizons sont décrits un-à-un selon les critères de la fiche STIPA (Falipou et Legros, 2002) tels que profondeur, texture, couleur, enracinement, etc. Des prélèvements nécessitant la conservation de la structure du sol sont réalisés sur ce profil (mesures de la masse volumique apparente, par exemple) ;
- d'autre part, d'une surface d'échantillonnage permettant le prélèvement d'échantillons élémentaires sur lesquels sont réalisées des analyses physico-chimiques (Jolivet *et al.*, 2006).

A l'issue de la première campagne du RMQS (2000-2009), 2 170 profils contenant 8 491 horizons de sol ont été décrits en métropole.

### Base de données SOLHYDRO

Suite à de nombreux travaux de cartographie des sols du département de l'Aisne, Jamagne *et al.* publient en 1977 une synthèse permettant l'estimation des teneurs en eau massiques à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent en fonction du triangle des textures. Dans les années 1990, l'Unité Science du Sol de l'INRA d'Orléans lance un vaste programme de mesures de propriétés physiques et hydriques du sol afin d'améliorer les évaluations du RU proposées par Jamagne *et al.* (1977). Les résultats de ce programme sont compilés pour alimenter la base de données SOLHYDRO (Bastet, 1999 ; Bruand *et al.*, 2004). Outre leurs teneurs en eau massiques à différents potentiels mesurés au laboratoire, les échantillons sont renseignés en termes de type d'horizons, de classes de texture et de masse volumique. La base de données SOLHYDRO est alimentée en continu depuis une vingtaine d'années et rassemble actuellement des mesures de rétention en eau sur 702 horizons de sol, tous non caillouteux.

### Elaboration d'une typologie d'horizons en lien avec la caractérisation du RU

L'objectif de la typologie que nous souhaitons élaborer est de définir des groupes d'horizons ayant des propriétés hydriques

comparables. Nous proposons donc une typologie selon les 3 critères suivants :

- 1- Le nom de l'horizon qui peut renseigner sur les caractères morphologiques du sol, ses constituants, sa structure, ses traits pédologiques, ses propriétés physiques, sa composition chimique et sa place dans le profil. Nous faisons l'hypothèse qu'il contient une information synthétique sur le fonctionnement hydrique de l'horizon.

Compte tenu de la grande diversité de noms d'horizon présents dans les bases de données RMQS (près de 800 codes différents selon le Référentiel Pédologique) et SOLHYDRO, liée à la diversité réelle des horizons et à leur description selon différentes classifications (Classification CPCS, Référentiel Pédologique 1995, Référentiel Pédologique 2008), nous avons procédé, par expertise croisée de plusieurs pédologues, à des regroupements de nom d'horizons. Cette opération est réalisée en plusieurs étapes : dans un premier temps, on procède à une harmonisation ou à une normalisation des noms d'horizons par rapport au Référentiel Pédologique 1995, utilisé lors de la première campagne RMQS. Par exemple, les horizons nommés « LA1 » et « LA2 » ont été rattachés à « LA » ou encore un horizon nommé Sgca devient Scag. Nous avons également identifié et écarté les horizons correspondant à des horizons de transition ou à des horizons intergrades. Le nombre de noms d'horizons obtenus étant encore conséquent (plus d'une centaine), nous avons regroupé certains groupes en fonction de leur proximité sur le plan morphologique et également en fonction du nombre d'occurrences. Par exemple les horizons identifiés comme LAcah sont regroupés avec le groupe des LAca, les horizons Scak avec les horizons Sca, les horizons Goca avec les horizons Go. Enfin nous avons écarté de l'ensemble sélectionnable les horizons considérés comme imprélevables tels que Xp ou Xc, R, Km. Nous avons conservé cependant dans la sélection des occurrences rares comme les horizons des sols volcaniques ou dolomitiques (Snd, Ado,...). Notre typologie permet ainsi de décrire 69 noms d'horizons, nommés selon la classification du Référentiel Pédologique 2008 (AFES, 1995).

13 horizons diagnostiques du Référentiel Pédologique 1995 ne sont pas couverts par le RMQS.

- 2- La texture dominante de l'horizon définie selon les trois classes suivantes: Argileuse Limoneuse et Sableuse. Concrètement, l'appartenance à une classe a été définie en conservant la première lettre de la classification texturale des sols selon le triangle de l'Aisne (Jamagne, 1967) ou le triangle du GEPPA (GEPPA, 1963) On rappelle que le choix d'une classe texturale est une estimation tactile par le pédologue de la composition granulométrique en lien avec des propriétés physiques. Cette donnée est la seule disponible pour l'ensemble des horizons des profils des sites RMQS, en absence d'analyse granulométrique.

3- La teneur en éléments grossiers de l'horizon définie selon les trois classes suivantes:

- comprise entre 0 et 10 %, soit la limite en deçà de laquelle la teneur en cailloux n'affecte pas ou affecte peu les propriétés physiques des sols, ainsi que l'ont démontré Tétégan *et al.* (2011 et 2012),
- comprise entre 10 et 35 %,
- supérieure à 35 %, ce qui correspond à la limite proposée par la FAO pour définir un sol caillouteux (FAO, 2006).

## Méthodologie mise en œuvre pour constituer le plan d'échantillonnage

### Stratégie générale de l'échantillonnage de la deuxième campagne du RMQS.

La stratégie d'échantillonnage à mettre en œuvre lors de la deuxième campagne du RMQS doit répondre à un double objectif : i) les observations nouvellement collectées doivent permettre la mise en évidence d'éventuelles évolutions temporelles en comparaison avec les résultats de la première campagne et ii) des cartographies de caractéristiques doivent pouvoir être produites annuellement. En conséquence, il ne s'agit pas d'échantillonner préférentiellement une région particulière une année donnée, mais de couvrir chaque année l'ensemble du territoire. Plusieurs solutions permettant d'atteindre cet objectif ont été étudiées (Bourgeois *et al.*, 2012) et leur comparaison a conduit à la sélection d'une stratégie d'échantillonnage annualisée sur 12 ans à l'aide de panels successifs (serial alternative panel selon de Gruitjer *et al.*, 2006) : un panel est défini comme un ensemble de 180 sites (2 170 sites / 12 années) répartis sur le territoire et qui représente les localisations des points du RMQS à échantillonner pour une année donnée. Les panels sont construits à l'aide de 180 rectangles comprenant chacun 12 sites, au sein desquels l'ordre d'échantillonnage des 12 sites est à tirer au hasard et sans remise. Le choix des panels provenant d'un tirage aléatoire au sein des 180 rectangles, il est très facilement possible de produire différentes configurations des panels. Une réalisation possible est fournie dans la *figure 1* mais la solution finale retenue dépendra des résultats de ce travail.

### Contraintes pour la sélection des sites avec des mesures RU

Les contraintes pour la sélection des sites pour lesquels des mesures de RU sont proposées, sont de trois ordres : scientifiques, financières et logistiques.

#### Contraintes scientifiques

La stratégie de sélection des sites doit aux critères scientifiques suivants:

1- Choisir principalement des sites où les profils présentent des

types d'horizons dont la valeur du RU n'est pas disponible dans la base SOLHYDRO,

2- Choisir quelques sites présentant des types d'horizons dont la valeur du RU est disponible dans SOLHYDRO, pour permettre une validation de la méthode d'appariement par horizon proposée dans ce projet. Cette seconde contrainte suppose a fortiori que les profils RMQS échantillonnés ne soient pas, par malchance, positionnés sur un site de prélèvement de la base SOLHYDRO. Une analyse spécifique de la répartition des profils SOLHYDRO par rapport à la grille RMQS a montré que cette situation ne se produit jamais.

#### Contraintes financières

Pour des raisons de coût de prélèvement et de temps de mesure en laboratoire, les prélèvements spécifiques liés à la mesure du RU devront concerner au maximum 40 sites parmi les 180 d'un panel annuel du RMQS.

#### Contraintes logistiques

Les contraintes logistiques sont de deux natures :

- la répartition des sites sur lesquels seront réalisés des prélèvements en vue d'une mesure du RU doit être optimale entre partenaires opérateurs du RMQS. En effet, l'ajout de prélèvement pour la mesure du RU engage, pour chaque site, d'importants investissements humains et augmente le temps de travail par site. Nous veillerons donc à ne pas surcharger nos partenaires certaines années plus que d'autres, et nous nous assurerons que, pour chaque partenaire et chacune des 12 années de campagne, le nombre de sites «RU» à prélever reste faible.
- la répartition des sites caillouteux sur lesquels seront réalisés les prélèvements en vue d'une mesure du RU doit être régulière au cours du temps. En effet, le transport, le stockage et surtout le traitement des échantillons caillouteux entraînent une charge de travail supplémentaire pour le Conservatoire Européen d'Echantillons de Sols où sont réceptionnés, préparés, traités puis stockés les échantillons. Il convient donc de répartir le plus régulièrement possible le prélèvement de sites caillouteux au cours des 12 années de la campagne.

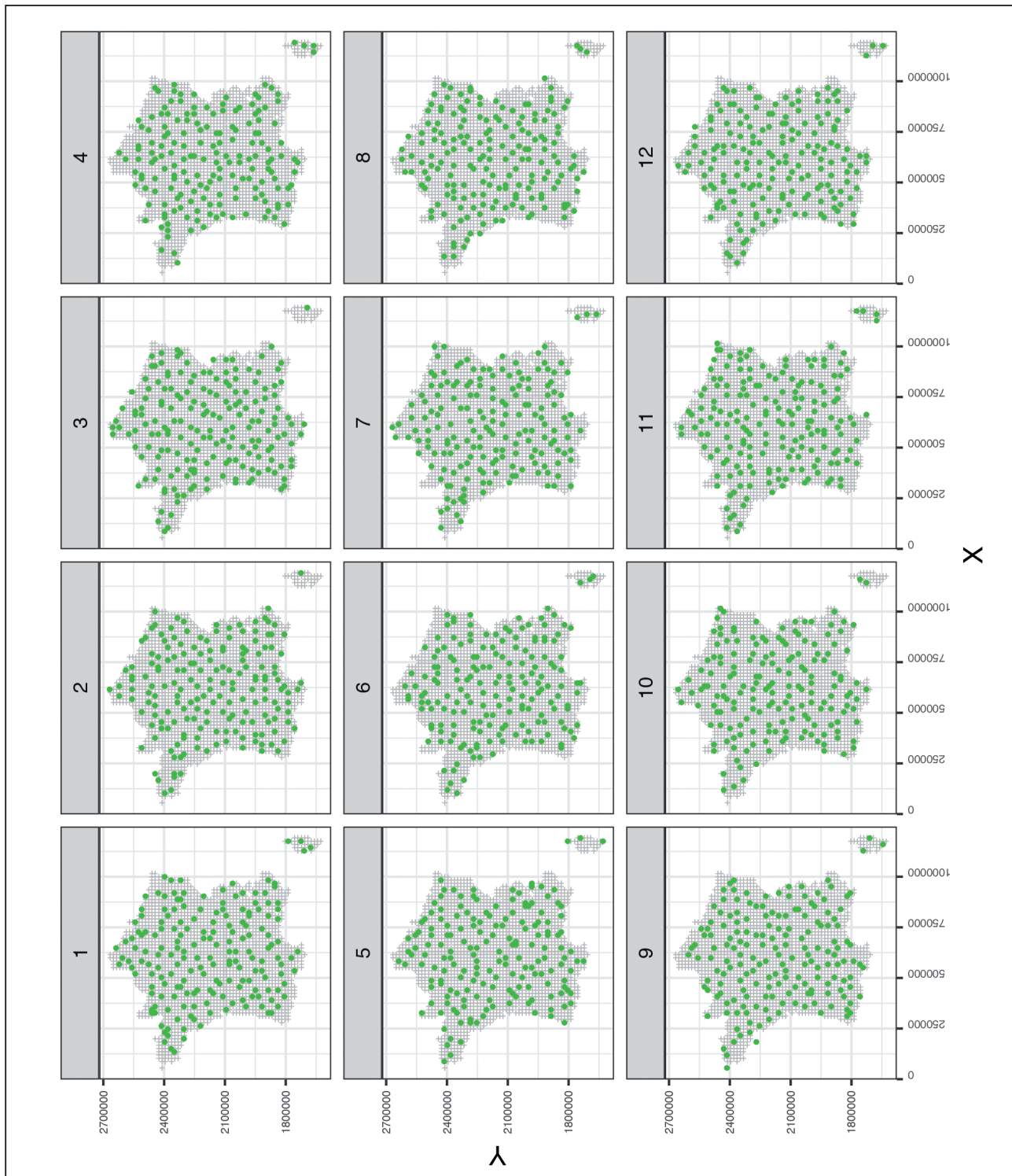
### Algorithme général

Pour garantir la cohérence entre les contraintes générales d'échantillonnage des sites RMQS (échantillonnage selon des panels) et les contraintes d'échantillonnage spécifiques à l'estimation du RU telles que nous venons de les présenter, la méthodologie proposée est divisée en trois grandes étapes:

- 1- Tirages au sort des sites constituant les panels, soit les listes de 180 sites à échantillonner par an sur 12 ans.;
- 2- Sélections, en maximisant les critères de qualité, des 40 sites sur lesquels sera mesuré le RU.
- 3- Choix d'une solution optimale du point de vue logistique.

**Figure1** - Exemple de 12 panels successifs pour 12 années d'échantillonnage de la deuxième campagne du RMQS. (Les sites à prélever chaque année sont représentés en vert. Les points rouges représentent les localisations de sites où aucun prélèvement n'aura lieu lors de la deuxième campagne indépendamment des contraintes imposées par l'évaluation du RU).

**Figure1** - Notional example of the 12 rotational panels corresponding to 12 years of sampling for the second campaign of the RMQS. The selected sites to sample are represented in green. The red crosses correspond to the sites where the sampling is impossible due to reasons not in relation with the assessment of Available Water Content.



### Optimisation par un algorithme de recuit simulé de la sélection des 40 sites par panel annuel sur lesquels seront réalisées les mesures de RU

Déterminer les 40 sites annuels répondant aux contraintes d'échantillonnage spécifiques à l'estimation du RU parmi les panels annuels du RMQS nécessite de maximiser les critères 1 et 2 en rapport avec SOLHYDRO présentés précédemment. La méthodologie employée suppose donc le recours à un algorithme d'optimisation. Nous avons retenu la méthode d'optimisation dite du recuit simulé (Metropolis et al, 1953 ; Aarts et al., 1985).

L'algorithme du recuit simulé est une méthode empirique (métaheuristique) inspirée d'un processus utilisé en métallurgie. On alterne dans cette dernière des cycles de refroidissement lent et de réchauffage (recuit) qui ont pour effet de minimiser l'énergie du matériau. Cette méthode est transposée en optimisation pour trouver les extrema d'une fonction. Elle consiste notamment à accepter lors du processus de recherche une solution moins satisfaisante avec une probabilité  $p$  qui décroît progressivement en fonction d'un paramètre  $T$  appelé température du système. Partant d'une solution donnée, en la modifiant, on en obtient une seconde. Soit celle-ci améliore le critère que l'on cherche à optimiser, on dit alors qu'on a fait baisser l'énergie du système, soit celle-ci le dégrade. Si on accepte une solution améliorant le critère, on tend ainsi à chercher l'optimum dans le voisinage de la solution de départ. L'acceptation d'une « mauvaise » solution permet alors d'explorer une plus grande partie de l'espace de solution et tend à éviter de s'enfermer trop vite dans la recherche d'un optimum local. La qualité des solutions est jugée en évaluant la fonction Objectif suivante:

$$O_i = (\omega_1 \cdot A_i + \omega_2 \cdot B_i) / K \quad [1]$$

avec:

$O_i$ , la valeur de la fonction objectif à l'itération  $i$ ;  $A_i$ , le nombre de types d'horizons différents échantillonnés à l'itération  $i$ ;  $B_i$ , le nombre de type d'horizons différents non contenus dans SOL-

HYDRO échantillonnés à l'itération  $i$ ;  $\omega_1$  et  $\omega_2$ , des vecteurs de poids;  $K$  un facteur de normalisation pour que  $O_i$  soit compris entre 0 et 1.

La définition des panels (répartition des visites des sites sur 12 ans) contraint les résultats de l'échantillonnage des sites à prélever pour la mesure du RU et conditionne la valeur optimale que la fonction Objectif pourrait atteindre. Pour s'affranchir de cette limite, on applique la méthode du recuit simulé pour le choix des sites RU sur 10 tirages aléatoires de panels simulés et on garde la meilleure combinaison permettant d'atteindre la fonction Objectif la plus optimisée.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Analyse des bases de données en fonction de la typologie établie et proposition d'une évaluation du RU à l'aide des données disponibles

Parmi les horizons contenus dans les deux bases de données, certains ont été écartés de l'étude pour deux raisons :

- soit des informations nécessaires à leur affectation selon la typologie établie sont inexistantes ou insuffisantes (pas d'information sur leur texture, leur proportion d'éléments grossiers ou leur nom)
- soit ils sont difficilement prélevables sans que leur structure soit altérée ou non prélevables (horizons R, X, holorganiques, etc.).

### Analyse des horizons contenus dans la base RMQS

Parmi les 8 491 horizons du RMQS (soit 2 170 profils), 4 758 (soit 1 966 profils) présentent les informations permettant l'application de la typologie (tableau 1).

Parmi les noms d'horizons que nous avons définis lors de l'élaboration de notre typologie, on recense 69 noms d'horizons dans la base RMQS, à des fréquences très variables : les horizons LA, S, C, A, LAca sont courants (de 5 à 12 % du nombre total d'horizons) alors que des horizons tels que ScAh, Na, Mca, LS, LAv représentent moins de 0.03 %. On note que 57 % des horizons sont limoneux, 25 % sont argileux et 18 % sont sableux. On note également que 63 % des horizons possèdent une teneur en éléments grossiers inférieure à 10 %, 24 % des horizons ont une teneur en éléments grossiers comprise entre 10 et 35 %, enfin 13 % des horizons sont très caillouteux (figure 2).

Avec 69 noms d'horizons, 3 valeurs de texture et 3 valeurs de teneurs en éléments grossiers, nous pourrions définir théoriquement  $69 \times 3 \times 3 = 621$  types d'horizons. Cependant, toutes les combinaisons ne se réalisent pas sur le terrain et la base de données RMQS se compose ainsi de 335 types d'horizons différents. Certains types sont très fréquents (un type comprenant

**Tableau 1** - Synthèse des données disponibles dans la base RMQS.

**Table 1** - Number of data available in the RMQS database.

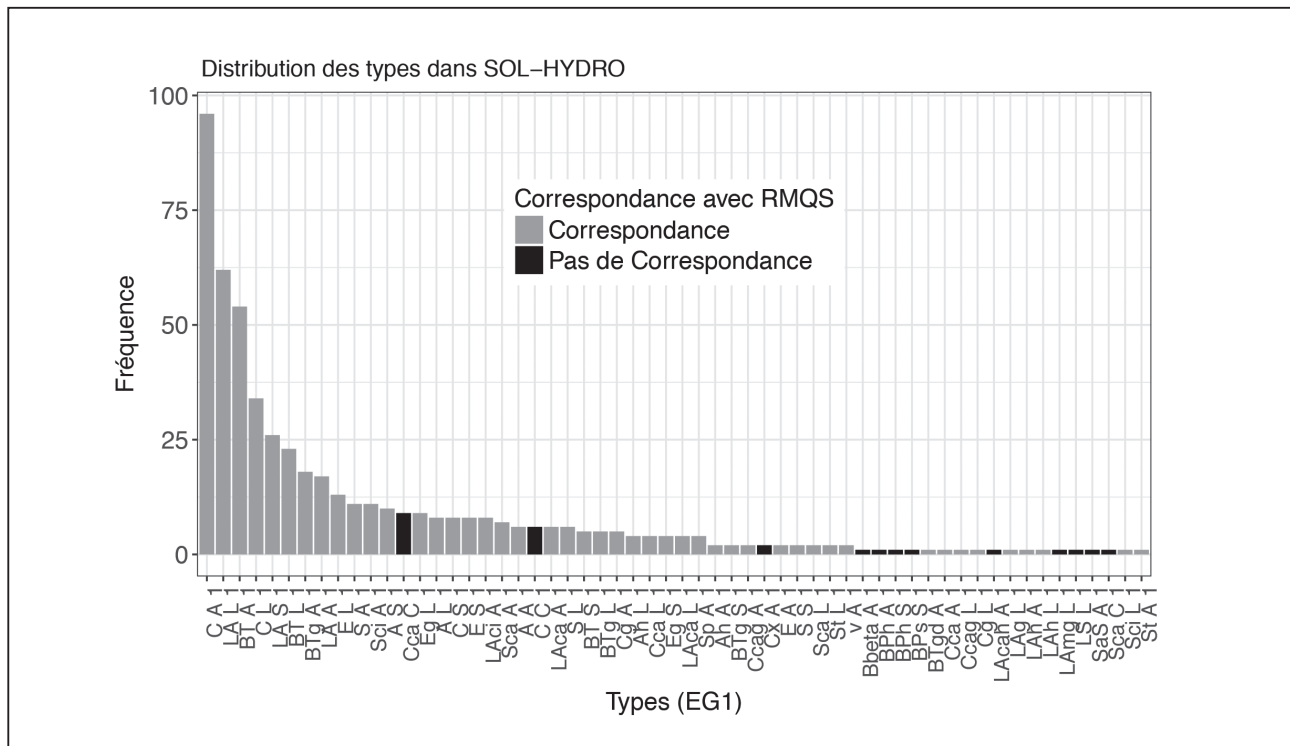
	base RMQS
Analyse générale	
Nombre de profils	2170
Nombre d'horizons	8 491
Profils et horizons éligibles dans ce projet	
Nombre de profils	1 966
Nombre d'horizons	4 758
Nombre de types d'horizons	335





**Figure 3** - Fréquence d'apparition des types de sols dans la base de données SOLHYDRO.

**Figure 3** - Occurrence of the soil types as listed in the SOLHYDRO database.



un horizon LA, de texture dominante limoneuse et de classe de teneur en éléments grossiers 0-10 % rassemble 329 horizons) et doivent être échantillonnés. Pour autant, nous n'excluons pas les types faiblement représentés, puisqu'un type peut être représenté par un unique horizon dans la base RMQS.

### Analyse du contenu de la base SOLHYDRO

Parmi les 702 horizons de la base de SOLHYDRO, 527 horizons présentent des informations suffisantes pour que l'on puisse les classer selon la typologie que nous avons établie. Ils se classent selon 58 types d'horizons différents (tableau 1). Les horizons majoritairement présents dans la base sont de types CA-Argileux, LA-Limoneux, BT-Argileux alors que d'autres ne sont rencontrés que très rarement comme les horizons Sca-C, Sci-L, St-A. On note 10 types (en noir sur la figure 3) qui sont présents dans SOLHYDRO mais non présents dans la base RM

### Synthèse de l'analyse des données disponibles et conséquences pour l'échantillonnage

En appliquant la typologie sur les deux bases, il nous est possible d'identifier les types d'horizons du RMQS pour lesquels nous disposons déjà de données de RU issues de SOLHYDRO (à savoir les valeurs de teneurs en eau massique à la capacité au

champ et au point de flétrissement permanent). Avec 48 types d'horizons en commun dans les deux bases, on constate que les propriétés de rétention en eau des types d'horizons décrites dans SOLHYDRO peuvent renseigner 2 223 horizons du RMQS (tableau 2).

En analysant la succession des horizons sur l'ensemble des 1 966 profils du RMQS éligibles à une évaluation du RU, nous pouvons estimer la quantité d'information déjà disponible. On constate que :

- pour 516 profils du RMQS, le RU de tous les horizons du profil peut être évalué à partir de données disponibles dans SOLHYDRO ; pour ces cas, on peut donc évaluer le RU du profil de sol complet ;
- pour 637 profils du RMQS, le RU de certains horizons du profil peut être évalué à partir de données disponibles dans SOLHYDRO ;
- pour 813 profils du RMQS, le RU d'aucun horizon ne peut être évalué à partir de données disponibles dans SOLHYDRO.

La figure 4 présente la répartition géographique de ces différents profils. Nous constatons que les profils dont l'évaluation du RU peut être réalisée à partir de données déjà disponibles dans SOLHYDRO se trouvent dans le grand Bassin Parisien, le nord de la Bretagne, dans la Jura et le quart Sud-Ouest de la

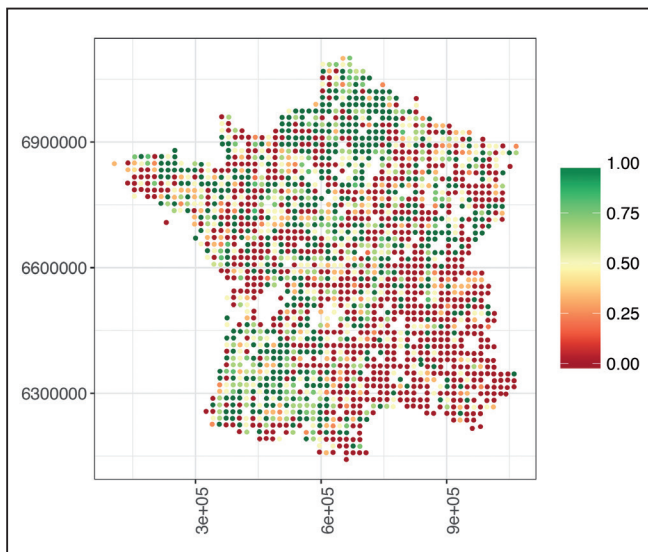
**Tableau 2** - Synthèse des données disponibles dans la base SolHydro.

**Table 2** - Summary report of the number of data available in the SolHydro database.

	SOLHYDRO
Analyse générale	
Nombre de profils	-
Nombre d'horizons	702
Profils et horizons éligibles dans ce projet	
Nombre de profils	-
Nombre d'horizons	527
Nombre de types d'horizons	58

**Figure 4** - Etat du renseignement des profils RMQS par la base de données SOLHYDRO pour l'évaluation du RU.

**Figure 4** - Level of completeness of the RMQS profiles regarding the assessment of the available water capacity using the SOLHYDRO database.



France. Ils représentent 28 % des profils du RMQS. Les profils dont l'évaluation du RU nécessite des mesures complémentaires sont localisés dans le quart Sud-Est principalement, ainsi que dans la région Nantaise et la pointe du Finistère. Ils correspondent à 287 types d'horizons différents et recouvrent 2 535 horizons du RMQS. Le plan d'échantillonnage que nous proposons maintenant doit permettre d'optimiser le prélèvement de ces horizons dont les valeurs du RU ne sont pas connues.

## Définition d'un plan d'échantillonnage du RMQS permettant la mesure du RU sur 40 sites par an

### Choix de la solution optimale

Pour satisfaire aux critères scientifiques que nous avons définis et répondre aux contraintes logistiques, nous avons simulé 10 plans d'échantillonnage optimisés (nous avons ainsi répété 10 fois les étapes 1 et 2 de l'algorithme général). Parmi ceux-ci, nous considérons uniquement les trois plans pour lesquels la fonction Objective est maximale, ce qui permet de répondre de façon satisfaisante à nos critères scientifiques.

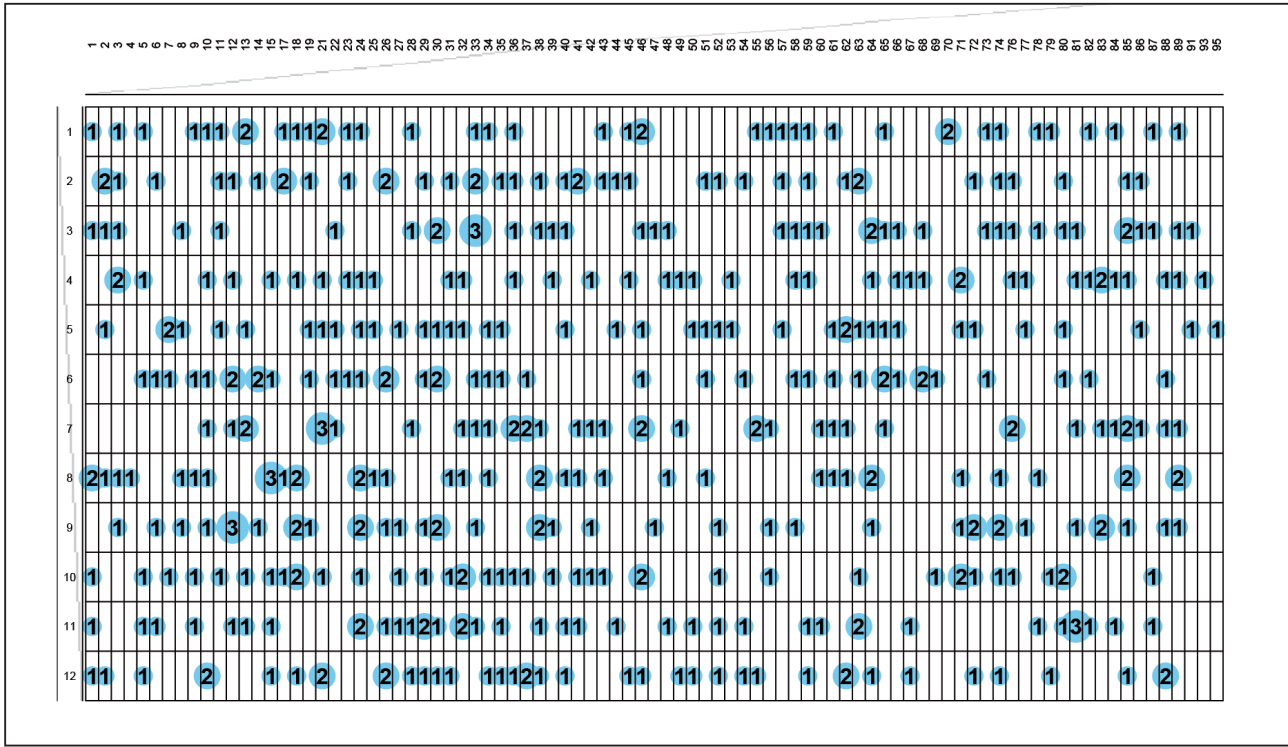
Nous analysons ensuite ces trois plans pour évaluer leur faisabilité logistique par expertise (cette étape correspond à l'étape 3 de l'algorithme général). La *figure 5* présente le nombre d'horizons caillouteux prélevés par an pour deux plans d'échantillonnage, l'un que l'on retient et l'un que l'on élimine. Pour le plan d'échantillonnage non retenu, le nombre d'horizons caillouteux prélevés par an est très hétérogène, surtout en début de campagne: une cinquantaine d'horizons caillouteux seront à stocker les première, troisième et quatrième années, alors qu'une trentaine sera à stocker la deuxième année. Pour le plan d'échantillonnage retenu, les sites possédant des horizons caillouteux se répartissent bien sur l'ensemble de la campagne, et, en dehors de la dernière année, le nombre d'horizons caillouteux est relativement stable dans le temps (entre 30 et 44).

La *figure 6* indique le nombre de sites visités par département et par année pour le plan d'échantillonnage retenu. On constate que les sites sur lesquels on réalisera des prélèvements pour l'évaluation du RU sont bien répartis dans le temps et ne concernent qu'un à trois sites par an. Les deux autres plans d'échantillonnage présentaient des situations avec quatre sites à prélever pour un même département et une année donnée, ce qui est trop lourd à gérer pour une équipe.

### Analyse du plan d'échantillonnage sélectionné

La *figure 7* présente le plan d'échantillonnage définitif pour la deuxième campagne du RMQS. Ce plan d'échantillonnage permettra d'acquérir des données sur les propriétés chimiques des sols qui pourront être comparées à celles de la première campagne, dès la première année grâce au principe de l'échantillonnage par panel. De plus, il permettra, à terme, d'évaluer le RU sur 224 types d'horizons du RMQS sur lesquels nous n'avons actuellement pas de connaissance, ce qui correspond à 1 135 horizons au total. Pour 45 types d'horizons, nous pourrions également confronter les mesures du RU réalisées sur des échantillons du RMQS avec des données disponibles dans la base SOLHYDRO. Comme le montre le *tableau 3*, ce plan d'échantillonnage nous a permis de sélectionner des types d'horizons fréquents dans la base RMQS et largement représentés dans les sols français, mais aussi des types faiblement représentés (14.87 % à 0.04 %

**Figure 5 -** Nombre de sites échantillonnés pour une mesure du RU, par an et par département, pour l'essai n°2.  
**Figure 5 -** Number of sites selected for measuring the AWC, by year and by department, for the replicate 2.



des horizons). Au final et à l'issue de la deuxième campagne, le RU restera inconnu pour quelques types d'horizons, faiblement représentés dans le RMQS, et qui représentent seulement 2.27 % des horizons présents dans le RMQS.

### Quelques éléments de discussion sur l'approche proposée

#### Sur le choix d'une approche par appariement

L'approche que nous proposons pour évaluer le RU sur l'ensemble du territoire national se fonde sur le principe d'appariement, par lequel on postule qu'un ensemble d'horizons possédant des caractéristiques communes ont des propriétés communes. Cette approche est classique dans toute démarche cartographique où l'on ne peut réaliser des mesures de façon exhaustive ; elle sous-tend également tous les travaux qui concernent l'évaluation de paramètres physiques ou physico-chimiques par des fonctions de pédotransfert. Pour un type d'horizon donné, une classe granulométrique donnée et une gamme de teneur en cailloux donnée, les horizons appartenant à cette classe présenteront des valeurs de RU proches. Pour les classes de la typologie pour lesquelles des

**Tableau 3 -** Synthèse des données disponibles dans la base SolHydro.

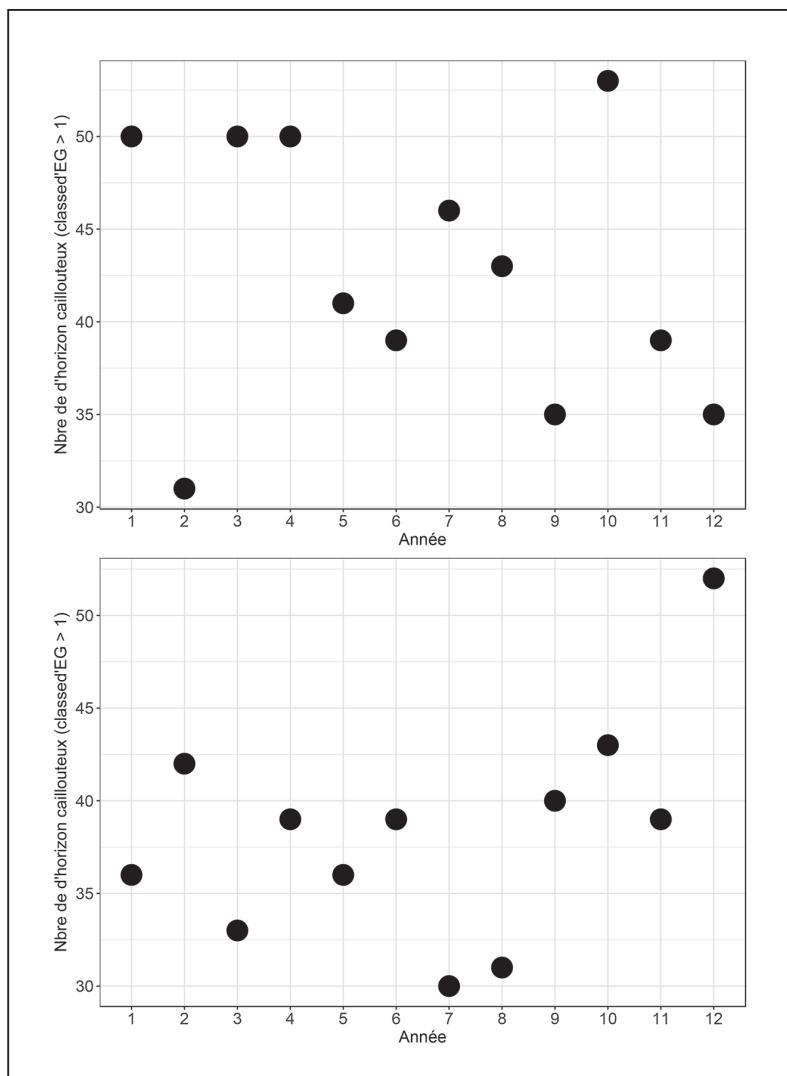
**Table 3 -** Summary report of the number of data available in the SolHydro database.

	Avec une correspondance dans SOLHYDRO	Sans correspondance dans SOLHYDRO
Nombre de profils	516	813
Nombre d'horizons	2 223	2 535
Nombre de types d'horizon	48	287

données sont déjà disponibles dans la base SOLHYDRO, la valeur du RU sera la valeur moyenne de cette classe, à laquelle nous pourrons également attacher une incertitude sous forme de variance. Pour les classes de la typologie pour lesquelles aucune donnée n'est disponible, et pour lesquelles une mesure du RU est réalisée spécifiquement dans ce projet, cette valeur mesurée sera considérée comme une valeur de référence pour tous les horizons de cette classe. Il sera cependant possible,

**Figure 6** - Nombre de sites devant subir un menu RU et étant quantifiés caillouteux (classe EG >1) par année pour l'essai 1 et l'essai 2.

**Figure 6** - Number of sites selected to be sampled for the measurement of the AWC and qualified as stony soil, for the replicate 1 and 2.



au cours de la deuxième campagne du RMQS, de rediscuter les limites de classes pour permettre que plusieurs valeurs mesurées - et non une seule - soient mobilisables dans une classe, afin qu'une variance puisse être associée à une valeur moyenne.

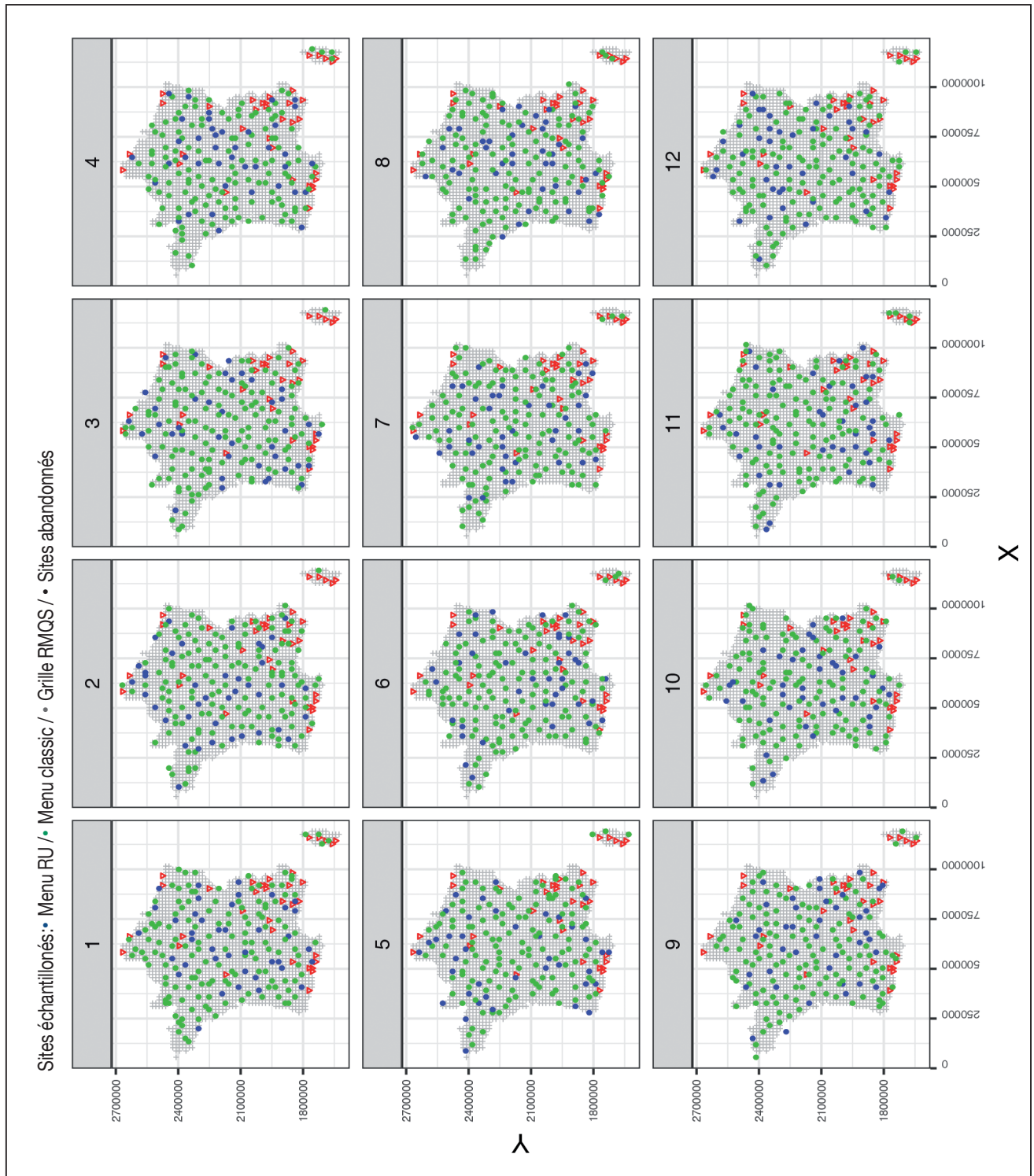
### Sur le choix de la typologie retenue

La typologie que nous avons retenue s'appuie sur les trois éléments essentiels suivants : i) le nom de l'horizon, ii) sa texture en 3 classes et iii) sa pierrosité en 3 classes. Elle présente l'originalité - par rapport aux typologies qui sont couramment retenues pour évaluer le RU à partir de fonctions de pédotransfert - d'intégrer le nom de l'horizon, et donc de tenir compte implicitement de l'histoire pédogénétique de l'horizon dans l'évaluation de son RU. En revanche - et contrairement aux démarches employées par

les concepteurs de fonctions de pédotransfert - elle n'intègre pas la position de l'horizon dans le profil de sol, c'est-à-dire qu'elle ne distingue pas les horizons de surface des horizons sous-jacents. Pourtant, les horizons de surface, en contact direct avec l'atmosphère, et plus ou moins travaillés en contextes agricoles et forestiers, sont reconnus pour avoir des propriétés physiques différentes de celles des horizons profonds ; on évalue fréquemment leur RU à l'aide de fonctions de pédotransfert spécifiques, tenant compte généralement de la masse volumique du sol (Bruand *et al.*, 1996). Nous n'avons pas intégré cette contrainte de position de l'horizon dans notre plan d'échantillonnage, car elle aurait pris du sens si nous avions pu anticiper une valeur de masse volumique sur les sites du RMQS ce qui, bien sûr, est irréaliste. Il n'en reste pas moins que, a posteriori, il sera possible de rediscuter les classes de notre typologie pour y inclure cette contrainte complémentaire.

**Figure 7** - Plan d'échantillonnage des 12 années de la deuxième campagne du RMQS. En bleu sont représentés les sites pour lesquels seront réalisées des mesures du RU. En vert sont représentés les sites présentant des prélèvements classiques et, en rouge sont présentés les sites sans prélèvement.

**Figure 7** - Sampling design of the second RMQS campaign for the 12 years. The blue dots represent the sites selected for the assessment of the AWC. The green dots represent the sites selected for the classical sampling protocol. The red dots represents the sites where the sampling is impossible.



**Tableau 4** - Bilan de l'acquisition de type d'horizons à l'issue de l'échantillonnage des sites RU pour la deuxième campagne du RMQS.**Table 4** - Results of the horizon types that will be present in the RMQS database after the sampling of the second RMQS campaign.

Types présents dans SOLHYDRO	Types Echantillonné		Types Non Echantillonné	
	Eff = 45	Freq moy = 49,2	Eff = 3	Freq moy = 3,7
		Freq min = 1	Freq min = 2	
		Freq max = 329	Freq max = 6	
Types non présents dans SOLHYDRO	Eff = 224	Freq moy = 10,8	Eff = 63	Freq moy = 1,7
		Freq min = 1	Freq min = 1	
		Freq max = 112	Freq max = 15	

### Sur le choix de la méthode statistique mise en œuvre

L'objectif d'un échantillonnage est de pouvoir obtenir un jeu de données qui permette l'estimation d'un ensemble de paramètres statistiques ou de prédictions d'une variable sur un domaine donné, comme des prédictions spatiales sur une zone d'étude (de Guitjer *et al.*, 2008). Il est en général recommandé d'utiliser toute l'information disponible a priori pour optimiser les coûts de prélèvement. En effet, la mise en œuvre d'une campagne d'échantillonnage est fortement contrainte par les aspects financiers et humains de telle sorte que les protocoles de sélection des sites à échantillonner doivent être optimisés. Dans notre étude, il était essentiel de répondre aux contraintes imposées par le suivi dans le temps des propriétés du sol mesurées dans le cadre du RMQS. Nous avons voulu également tirer parti des informations déjà collectées sur le RU dans le cadre d'études antérieures. Nous avons mis en œuvre pour cela un algorithme d'optimisation dit du recuit simulé permettant ainsi de respecter les différentes contraintes. Cet algorithme est largement utilisé dans de nombreux domaines et notamment en statistique ((Minasny and McBratney, 2006). Il permet de s'assurer que la solution trouvée est proche de la solution optimale.

## SYNTHÈSE ET CONCLUSION

Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols est un outil national pour l'observation de l'évolution de la qualité des sols. Lors de la première campagne, ont été récoltées des données caractérisant l'état initial des sols principalement à partir d'un ensemble de propriétés chimiques. A l'occasion de la deuxième campagne, la caractérisation de certaines propriétés physiques, dont le RU (Réservoir en eau Utilisable) va être réalisée.

Pour réaliser le plan d'échantillonnage de la deuxième campagne du RMQS permettant l'évaluation du RU sur un nombre optimal d'horizons de sol, nous avons développé une démarche méthodologique en 4 étapes:

1- l'élaboration d'une typologie d'horizons permettant d'identifier des horizons aux propriétés hydriques contrastées; cette

typologie s'appuie sur le nom de l'horizon (69 possibilités), sur la texture dominante de l'horizon (en 3 classes) et sur la teneur en éléments grossiers de l'horizon (en 3 classes). Nous définissons ainsi 335 types d'horizons.

- 2- le recensement des horizons de chaque type dans le RMQS et dans la base de données SOLHYDRO rassemblant des valeurs de propriétés hydriques des sols. On montre ainsi que, sur 8491 horizons du RMQS, 4 758 horizons de 1 966 profils sont éligibles à une évaluation du RU. De plus, 48 types d'horizons identifiés dans le RMQS sont présents dans la base SOLHYDRO et peuvent être déjà caractérisés par une valeur du RU.
- 3- l'identification des types d'horizons pour lesquels aucune connaissance n'est actuellement disponible; ces types d'horizons sont au nombre de 287 et correspondent à 2 535 horizons.
- 4- La réalisation du plan d'échantillonnage du RMQS permettant à la fois i) de réaliser une cartographie annuelle de l'évolution des propriétés des sols par rapport à la première campagne grâce à une stratégie basée sur la sélection de panels, et ii) de prélever prioritairement les 287 types d'horizons sur lesquels il convient de réaliser une mesure de RU. Ce plan d'échantillonnage est réalisé par la méthode du recuit simulé, un algorithme d'optimisation sous contrainte. Il génère un plan d'échantillonnage permettant d'acquérir de la connaissance du RU sur 224 types d'horizons, soit 1 135 horizons du RMQS et d'enrichir de 80 % la connaissance des propriétés hydriques par type d'horizon

Nous avons également défini une stratégie d'évaluation du RU sur les points pour lesquels la mesure ne sera pas réalisée, sur la base d'un principe d'appariement. Au final et à l'issue de la deuxième campagne du RMQS, nous pourrions produire un cartogramme du Réservoir en eau Utilisable par les plantes sur l'ensemble du territoire métropolitain. Ces données enrichiront le panel des données de RU déjà disponibles dans la base de données SOLHYDRO et dans plusieurs instituts techniques et de recherche, en focalisant la mesure sur des sols ou des hori-

zons de sol pour lesquels nous ne disposons pas actuellement de références. Grâce à la stratégie basée sur la mise en œuvre de panels, nous pourrions également produire, dès la fin de la première année d'échantillonnage et dès que seront disponibles les mesures ad hoc, des cartogrammes d'évolution de certains paramètres du sol (teneurs en éléments chimiques, stocks de carbone, par exemple).

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol, qui réunit les ministères en charge de l'environnement et de l'agriculture, l'ADEME, l'INRA, l'IRD et l'IGN, et par l'ONEMA dans le cadre de son action « Caractérisation des propriétés hydriques des sols dans le cadre du programme Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) ».

## BIBLIOGRAPHIE

- Aarts E. H. L., Laarhoven V., 1985 - Statistical cooling: A general approach to combinatorial optimization problems. *Philips J. Res.*, 40, 4, pp. 193-226.
- AFES, 1995. *Référentiel Pédologique 1995*. Editions QUAE, 332 pages.
- Al Majou H., Bruand A., Duval O., Le Bas C., Vautier A., 2008 - Prediction of soil water retention properties after stratification by combining texture, bulk density and the type of horizon. *Soil Use and Management*, 24, pp. 383-391.
- Arrouays D., Thorette J., Daroussin J., King D., 2001 - Analyse de représentativité de différentes configurations d'un réseau de sites de surveillance des sols. *Etude et Gestion des Sols*, 8,1, pp. 7-17.
- Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Bodineau G., Saby N. et Grolleau E., 2002. Une initiative nouvelle en France : la mise en place d'un réseau multi-institutionnel de mesure de la qualité des sols (RMQS). *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 88, 5, pp. 93-103.
- Bardy M., Cousin I., Arrouays D., Richard G., 2014 - La qualité des sols et son évolution. *In Agriculture et foncier - Concurrences entre usages des sols et entre usagers des sols: la question foncière renouvelée*. Cahier Demeter, pp. 69-82.
- 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, 215 pages.
- Bourgeois A., Allard D., Saby N., Martin M., Arrouays D., 2012 - Optimisation d'un échantillonnage annualisé d'un réseau national de surveillance de la qualité des sols: Application aux teneurs en carbone du RMQS. *Rapport de contrat GIS Sol*, 52 pages.
- Bruand A., Duval O., Gaillard, H., Darhout, R. & Jamagne, M., 1996 - Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols: importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*, 3, pp. 27-40.
- 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. *Etude et Gestion des Sols*, 11, 3, pp. 323-332.
- de Gruijter, J., Brus, D.J., Bierkens, M.F.P., Knotters, M., 2006. *Sampling for Natural Resource Monitoring*. Springer-Verlag.
- Falipou P., Legros J.P., 2002 - Le système STIPA-2000 d'entrée et édition des données pour la base nationale de sols DONESOL II. *Etude et Gestion des Sols*, 9,1, pp. 55-74.
- FAO, 2006. *Guidelines for soil description*. Rome, 109 pages.
- Grolleau E., Bargeot L., Chafchafi A., Hardy R., Doux J., Beaudou A., Le Martret H., Lacassin J.C., Fort J.L., Falipou P., Arrouays D., 2004 - Le système d'information national sur les sols: DONESOL et les outils associés. *Etude et Gestion des Sols*, 11, 3, pp. 255-269
- INRA, 1988 - Base de données Géographique des Sols de France à l'échelle du 1/1.000.000, version 1 du 21/12/1998. IINRA, US 1106 Infosol, Orléans, France.
- Jamagne M., 1967 - Bases et techniques d'une cartographie des sols. *Annales Agronomiques*, 18 n° hors série, 142 pages.
- 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*, 324-325, pp. 627-641.
- Jolivet C., Boulonne L., Ratié C., 2006 - Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols. Inra Infosol Orléans, 190 pages.
- Le Bas C., King D., Daroussin J., 1997 - A Tool for Estimating Soil Water Available for Plants Using the 1:1,000,000 Scale Soil Geographical Data Base of Europe. *ITC journal*. 3-4. ITC, Enschede, Pays-Bas.
- Le Bas C., Coquet Y., Bardy M., Fèvre R., Guéris M., Habets F., Buis S., Cousin I., 2015 - Etude méthodologique de l'impact des incertitudes liées à l'estimation spatialisée des paramètres sols du modèle Stics à partir de la Base de Données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000. *In: Parnaudeau, V., Derrien, K., Pertué, M., Beudoin, N., Ripoche, D. (Eds.), Xe séminaire des utilisateurs et concepteurs du modèle STICS, 1er séminaire du réseau scientifique STICS*. INRA, Rennes, France.
- Metropolis N., Rosenbluth A., Rosenbluth M., Teller A., Teller E., 1953 - Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics*, 21, pp. 1087-1092.
- Minasny, B., McBratney, A.B., 2006. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Comput. Geosci.* 32, 1378-1388.
- Piedallu C., Gégout J. C., Bruand A., Seynave I. 2011 - Mapping soil water holding capacity over large areas to predict potential production of forest stands. *Geoderma*, 160, 3, pp. 355-366.
- Ratié C., Richer de Forges A., Berché P., Boulonne L., Toutain B., Saby N., Chenu J.-P., Laloua D., Ortolland B., Tientcheu Nguenkam M.-E., Soler-Dominguez N., Jolivet C., Arrouays D., 2010 - Le Conservatoire des Sols : la mémoire des sols de France. *Etude et Gestion des Sols*, 17, 3, pp. 263-273.
- Tétégan 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, pp. 40-49.
- Tétégan M., Pasquier C., Besson A., Nicoullaud B., Bouthier A., Bourennane H., Cousin, I., 2012 - Field-scale estimation of the volume percentage of rock fragments in stony soils by electrical resistivity. *Catena*, 92, pp. 67-74.
- Wösten J.H.M., Lilly A., Nemes A., Le Bas C., 1999 - Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90, pp. 169-185.