

## **Cartographie régionale au 1/250 000 de l'épaisseur des altérites et de l'horizon fissuré utile (projet SILURES Bretagne)**

### **1:250,000 regional mapping of the saprolite and the useful fissured horizon (SILURES project, Brittany)**

**B. Mougín <sup>(1)</sup>, A. Dheilly <sup>(1)</sup>, E. Thomas <sup>(1)</sup>, R. Blanchin <sup>(2)</sup>, N. Courtois <sup>(3)</sup>,  
P. Lachassagne <sup>(3)</sup>, R. Wyns <sup>(2)</sup>, D. Allier <sup>(2)</sup> et E. Putot <sup>(2)</sup>**

(1) BRGM - Direction des Actions Territoriales - Direction Régionale Bretagne - Rennes Atalante  
Beaulieu - 2, rue de Jouanet - 35700 Rennes – France - [b.mougin@brgm.fr](mailto:b.mougin@brgm.fr)

(2) BRGM - Centre scientifique et technique - 3, avenue Claude Guillemin - BP 36009 - 45060  
Orléans - France

(3) BRGM - Direction Eau, Environnement et Ecotechnologies - 1039, rue de Pinville - 34000  
Montpellier - France

#### **I. Le projet SILURES Bretagne**

La gestion des ressources en eau implique la prise en compte des eaux souterraines. Celles-ci interviennent de façon non négligeable, voire prépondérante en période d'étiage, dans l'alimentation des rivières, le transfert des éléments dissous et la satisfaction des besoins en eau. En milieu de socle tel que la Bretagne, la prise en compte de la variabilité spatiale des caractéristiques du sous-sol et des paramètres qui régissent l'emmagasinement et l'écoulement des eaux souterraines reste difficile.

Des données existent (forages recensés, régime des cours d'eau...), des méthodologies ont été mises au point et testées (typologie des bassins versants, modélisation des écoulements...), et des outils d'acquisition des paramètres de terrain tels que la porosité sont disponibles (géophysique par résonance magnétique protonique - RMP). De plus, une campagne de prospection géophysique aéroportée a été réalisée au cours de l'été 1998 par le BRGM pour le compte du Ministère de l'Industrie. L'ensemble constitue une importante source d'informations sur la constitution et la nature du sous-sol.

Compte-tenu de ces différents constats, le programme SILURES (Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eaux Souterraines) a été mis en place par le BRGM Bretagne en collaboration avec l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, le Conseil Régional Bretagne, les Conseils Généraux des Côtes d'Armor, du Finistère, d'Ille-et-Vilaine et du Morbihan, la Direction Régionale de l'Environnement Bretagne, le Syndicat Mixte de Gestion du fonds pour l'eau potable en Ille-et-Vilaine, et le BRGM.

Une des étapes du projet « SILURES Bretagne » (module régional), mené de 2002 à 2008, a consisté à représenter à l'échelle régionale du 1/250 000 la géométrie des réservoirs aquifères (épaisseur des milieux altérés et fissurés).

Ce travail a été mené suite à l'interprétation des données de 12 122 forages recensés dans la Banque du Sous-Sol du BRGM et disposant des informations suivantes : débit instantané en fin de foration, profondeur finale de l'ouvrage, géologie du terrain rencontré. Les ouvrages ont des profondeurs variant de 1 à 330 m (moyenne 55.7 m, médiane 50 m, écart-type 27.6 m) et ont des débits instantanés variant de 0 à 250 m<sup>3</sup>/h (moyenne 8.6 m<sup>3</sup>/h, médiane 5 m<sup>3</sup>/h, écart-type 12.1 m<sup>3</sup>/h). Après analyse des classes de distribution des profondeurs et débits, on peut préciser que la population des forages renseigne majoritairement la tranche 0-100 m de profondeur, et que la majorité des débits se situe dans la gamme 0-30 m<sup>3</sup>/h.

## II. Cartographie de l'épaisseur des altérites

La surface de base des altérites a été construite par krigeage, après étude géostatistique, d'une population de 6 089 points d'observation de l'interface altérites/milieu fissuré. L'écart-type de krigeage, quantifiant l'erreur associée à la variable interpolée, varie entre 4 et 30 m, avec une moyenne de 12.3 m (cf. encart de la Figure 1). La modélisation a été menée sur toute la région Bretagne. Pour ce travail régional, il n'a pas été nécessaire d'utiliser des failles pour le krigeage de la base des altérites (celles-ci peuvent décaler localement l'altitude de la base des altérites).

La carte de l'extension et de l'épaisseur des altérites en place (cf. Figure 1) a été réalisée par différence entre le Modèle Numérique de Terrain (MNT au pas de 125 m, obtenu par ré-échantillonnage du MNT de l'IGN au pas de 50 m) et l'altitude de la base des altérites, dans les secteurs où les pentes du MNT étaient inférieures à 2 % (limite communément admise par les géologues du massif Armoricaïn comme permettant le maintien en place des formations altérées sur les plateaux). Il a été décidé, lors du calcul de l'épaisseur des altérites, d'effacer les résultats dans deux types de secteurs : les formations géologiques qui ne sont pas du socle (alluvions, sables, bassins d'âge Tertiaire) et les formations qui ne s'altèrent pas (quartzites). Les contours géologiques utilisés proviennent de la carte géologique synthétique de la Bretagne à l'échelle du 1/250 000 (Rabu et al. 2001).

L'épaisseur des altérites varie entre 0 et 40 m. Les épaisseurs supérieures à 40 m, incohérentes avec le modèle conceptuel des altérations supergènes en domaine de socle (Wyns et al. 2004), ont été mises en zones non renseignées. Ces secteurs, représentant moins de 0.8 % de la superficie bretonne, correspondent à : des zones peu renseignées, des contacts géologiques, et des limites de formations quartzitiques.

Une comparaison de la Figure 1 avec les quelques cartes géologiques du BRGM à 1/50 000 où le recouvrement des altérites est mentionné, montre la bonne cohérence de cette représentation régionale (exemples : plateformes du Trégor et du Léon, Sud Bretagne, région de Scaër, Est du Morbihan et majorité de l'Ille-et-Vilaine).

Vingtièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie  
de l'Association Internationale des Hydrogéologues.  
« Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles » La Roche-sur-Yon, juin 2015

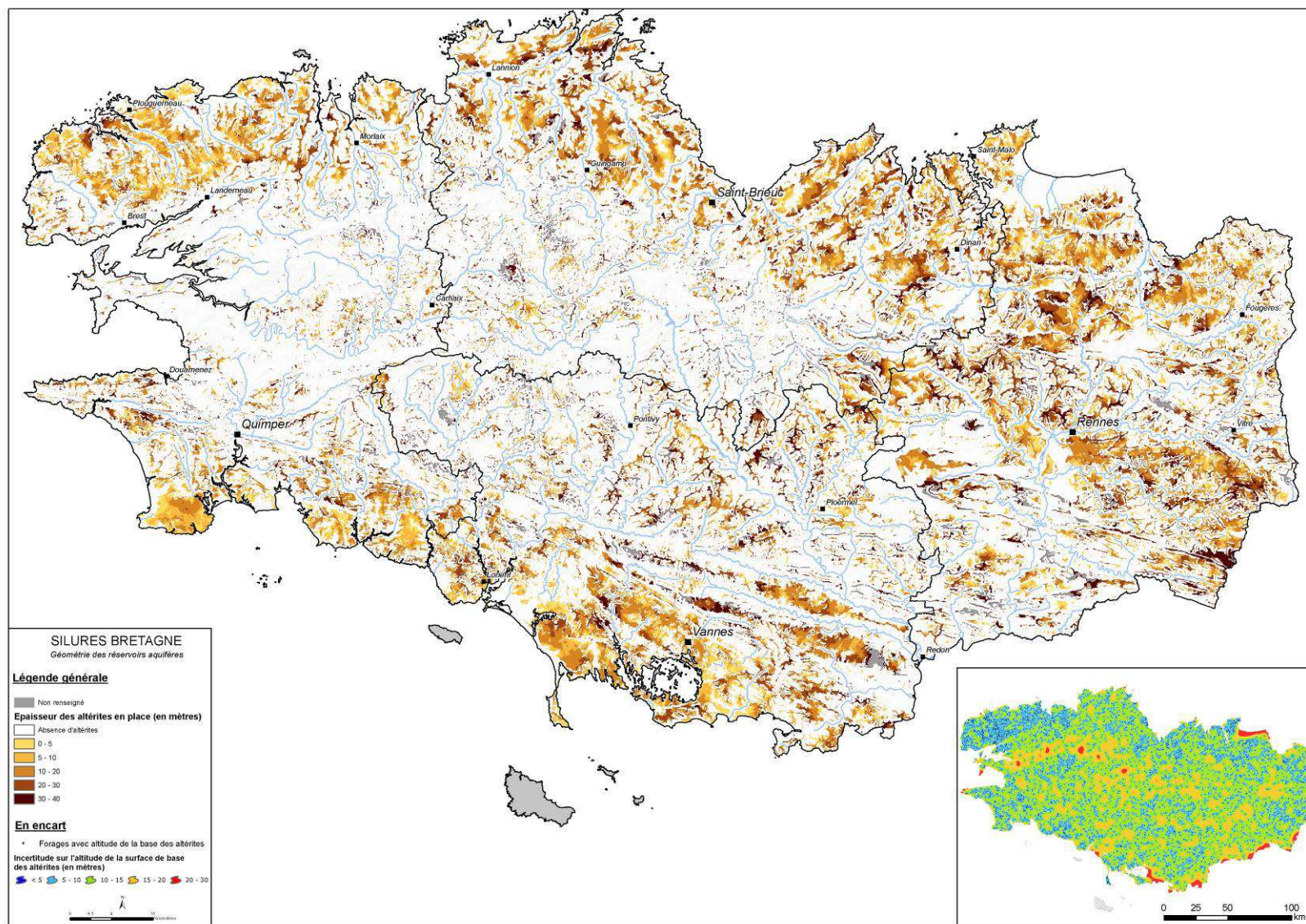


Figure 1 – Épaisseur des altérites en place calculée à partir de l'interprétation des données de forages, échelle 1/250 000 (Mougin et al. 2008)

### III. Cartographie de l'épaisseur de l'horizon fissuré utile

Cette cartographie correspond à l'épaisseur du sous-sol riche en fissures (provenant de l'altération des roches) qui apporte la meilleure productivité en termes de débits instantanés. Suites à deux régressions linéaires (débit moyen du quartile supérieur / débit du milieu fissuré utile ; krigeage du débit instantané obtenu en foration rapporté à la profondeur du forage sous la base des altérites meubles / calcul du débit linéaire du milieu fissuré utile), l'épaisseur du fissuré utile a été déduite à partir du rapport des deux paramètres : débit du milieu fissuré utile (en  $\text{m}^3/\text{h}$ ), et débit linéaire du milieu fissuré utile (en  $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ ).

#### III. 1 Notion de milieu fissuré utile et débit associé

Les 6 089 forages traversant la base des altérites ont été utilisés pour étudier les résultats de débits instantanés (débit noté Q) par mètre foré, en fonction de la profondeur du forage en-dessous de la base des altérites meubles (valeur notée P').

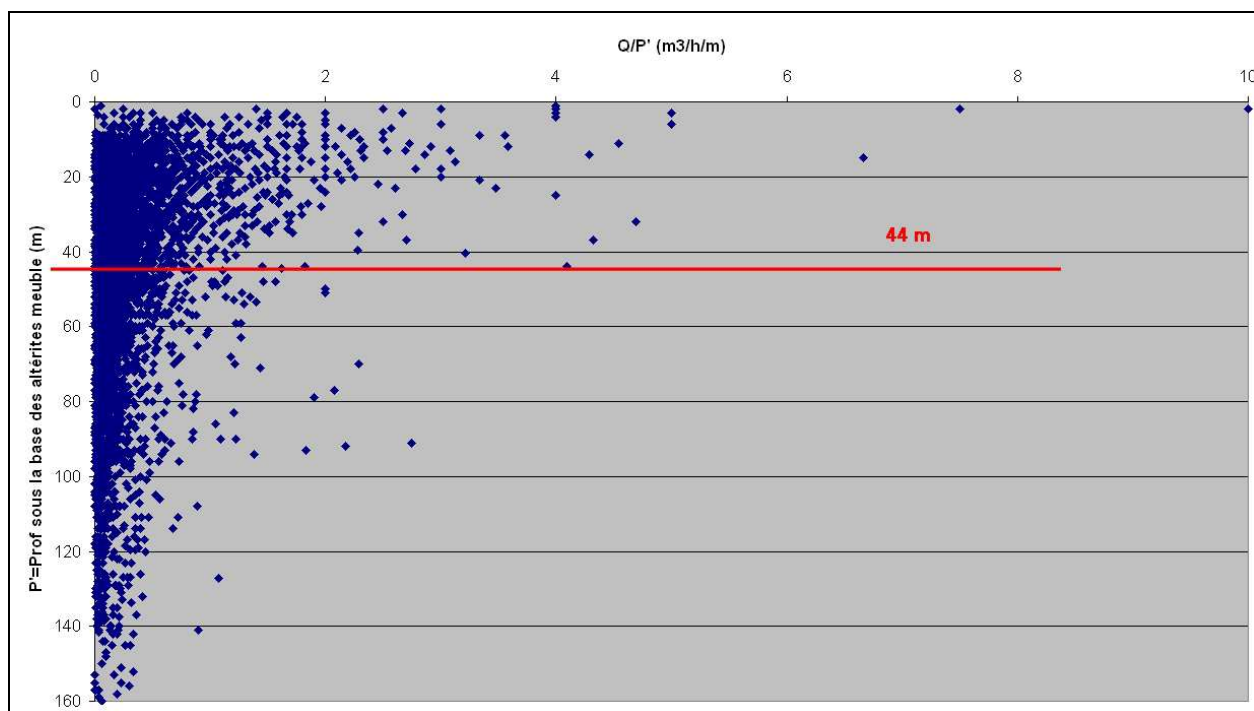


Figure 2 – Débits instantanés par mètre en fonction de la profondeur du forage en-dessous de la base des altérites meubles (Mougin et al. 2008)

Le graphique de la Figure 2 montre que le débit linéaire ( $Q/P'$ ) a tendance à décroître en fonction de la profondeur : ceci est lié à la diminution du nombre de fissures en profondeur. On remarque également que les meilleurs débits linéaires sont obtenus dans les 40 premiers mètres environ sous la base des altérites. Ceci est cohérent avec les connaissances des hydrogéologues de socle qui ont montré que l'horizon fissuré, situé sous les altérites, est le milieu fournissant la meilleure perméabilité du sous-sol et par conséquent les meilleurs débits instantanés (Cho et al. 2003 ; Dewandel et al. 2006). Afin de déterminer l'épaisseur du milieu fissuré produisant les meilleurs débits, une méthode a été mise au point (Courtois et al. 2008). Elle

consiste à calculer un pourcentage cumulé de débit linéaire. Ce pourcentage permet de déduire deux valeurs : (i) l'épaisseur de l'horizon fissuré utile qui correspond à l'épaisseur définie par le seuil de 80 % du pourcentage cumulé de débit linéaire, (ii) le débit de cet horizon fissuré utile obtenu en multipliant 2 paramètres : le débit du milieu fissuré utile rapporté à l'épaisseur de l'horizon fissuré utile (= débit linéaire), et l'épaisseur de l'horizon fissuré utile. En utilisant les résultats des 6 089 forages bretons (cf. Figure 2), on obtient une épaisseur de 44 m et un débit de 16.9 m<sup>3</sup>/h (0.384 m<sup>3</sup>/h/m x 44 m).

### III. 2 Débit du milieu fissuré utile et débit linéaire

Les paramètres définis ci-dessus (épaisseur, débit linéaire et débit du milieu fissuré utile) ont pu être calculés sur 42 formations géologiques bretonnes. Ces formations développent un horizon fissuré d'altération (différenciation de Q/P' en fonction de la profondeur P') et elles sont suffisamment renseignées par des forages recoupant la base des altérites (au moins 20 forages en-dessous du seuil de 80 %). Pour ces 42 formations renseignées, qui représentent 59 % de la superficie totale de la Bretagne, l'épaisseur de l'horizon fissuré varie de 19 à 59 m (moyenne 36.1 m), le débit linéaire est quant à lui compris entre 0.17 et 0.95 m<sup>3</sup>/h/m (moyenne 0.38 m<sup>3</sup>/h/m), tandis que le débit du milieu fissuré utile évolue entre 3.8 et 33.5 m<sup>3</sup>/h (moyenne 13.5 m<sup>3</sup>/h).

Pour les autres formations géologiques, les paramètres ont dû être extrapolés avec deux régressions linéaires :

- débit moyen du quartile supérieur / débit du milieu fissuré utile,
- krigeage du débit instantané obtenu en foration rapporté à la profondeur du forage sous la base des altérites meubles / calcul du débit linéaire du milieu fissuré utile.

Le débit moyen du quartile supérieur calculé avec la moyenne des débits des 25 % « meilleurs forages » est assez corrélé avec le débit du milieu fissuré utile (coefficient de corrélation R<sup>2</sup>=0.740).

Le Q/P' moyen\* est assez corrélé avec le débit linéaire du milieu fissuré utile (coefficient de corrélation R<sup>2</sup>=0.736). (\*) Le paramètre Q/P' (débit instantané obtenu en foration rapporté à la profondeur du forage sous la base des altérites meubles) a été modélisé par krigeage sur toute la Bretagne, puis le Q/P' moyen a été obtenu suite à un travail sous SIG sur chaque formation géologique bretonne (moyenne des valeurs des mailles d'une grille pour chaque contour géologique).

### III. 3 Epaisseur du milieu fissuré utile

Les paramètres débit du milieu fissuré utile et débit linéaire ont été calculés sur les formations géologiques de socle bretonnes. Le rapport de ces deux valeurs fourni l'épaisseur reconstituée du milieu fissuré utile (épaisseur=Q / Q/P'). Ce calcul fournit des résultats trop élevés sur 2 formations ; ces épaisseurs supérieures à 75 m, incohérentes avec le modèle conceptuel des altérations supergènes en domaine de socle (Wyns et al. 2004), ont été mises en zones non renseignées.

La carte d'épaisseur du milieu fissuré utile est représentée sur la Figure 3.

Sur cette carte, chaque formation géologique est associée soit à la valeur calculée par les méthodes décrites au début du chapitre III. 2 (42 formations), soit à la valeur déduite suite aux deux régressions successives (83 formations).

Cette Figure 3 comporte également un encart qui permet de localiser les formations géologiques extrapolées, ainsi que l'écart-type associé à chaque prédiction (8.3 à 10.5 m, moyenne 8.7 m).

Sur toute la Bretagne, l'épaisseur du milieu fissuré utile varie de 19 à 65.7 m, respectivement le Massif de Lannilis composée de diorites au Nord du Finistère, et le Groupe de la Roche-Maurice comportant des roches schisto-gréseuses au Nord du Finistère, avec en moyenne 39.2 m.

Vingtièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie  
de l'Association Internationale des Hydrogéologues.  
« Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles » La Roche-sur-Yon, juin 2015

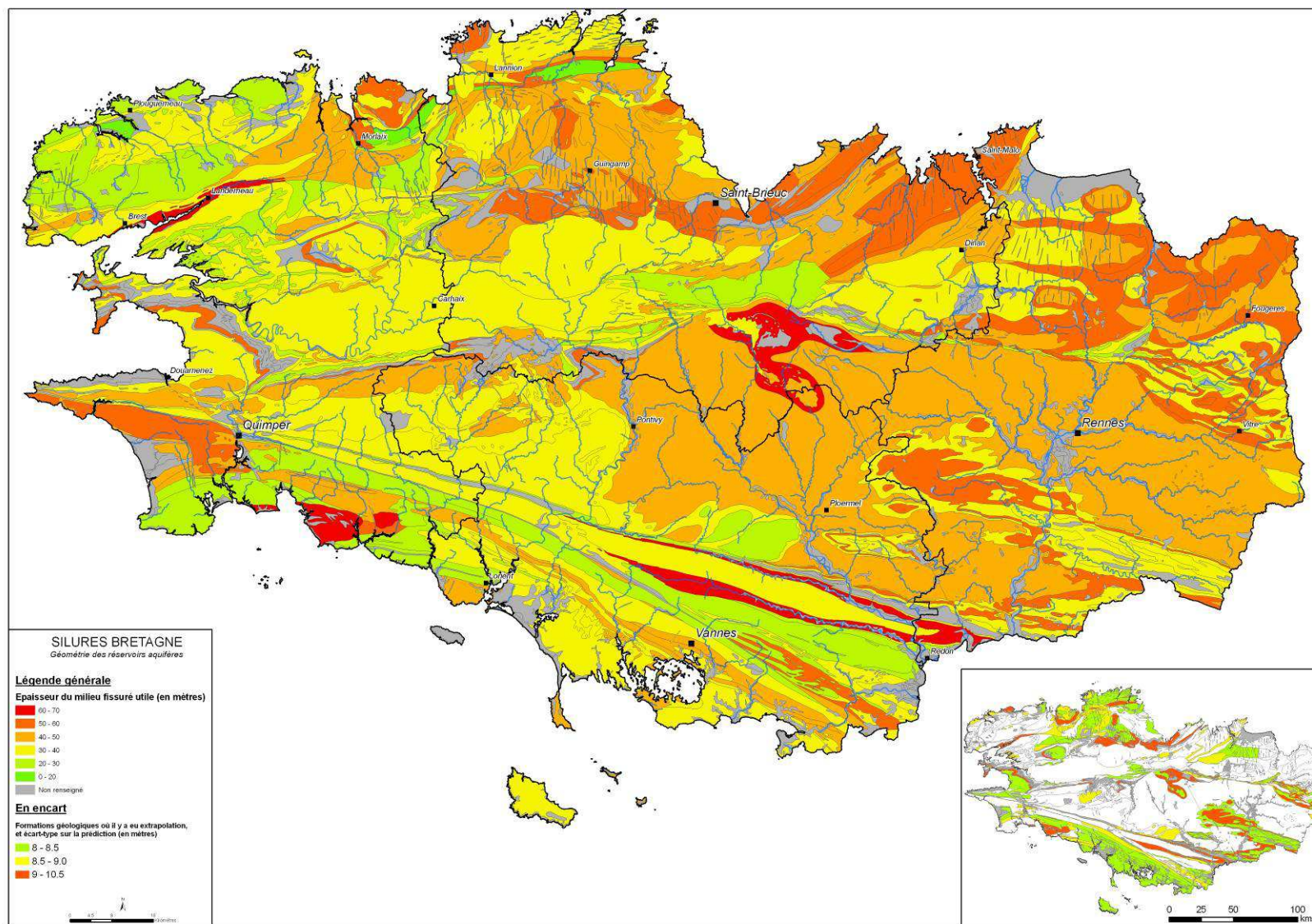


Figure 3 – Épaisseur du milieu fissuré utile calculée par régressions successives, échelle 1/250 000 (Mougin et al. 2008)

#### IV. Perspectives et utilisation des données

Les cartes régionales au 1/250 000 permettent de visualiser la répartition géographique et en profondeur des deux aquifères de socle (altérites et horizon fissuré) qui contraignent la vitesse de circulation des eaux de pluies infiltrées dans le sous-sol puis des eaux souterraines jusqu'aux rivières bretonnes. Ces cartes fournissent donc des indices pour comparer au niveau régional le temps de réaction des bassins versants bretons. En effet, un bassin dénué d'altérites et composé d'un sous-sol à débit du fissuré utile élevé réagira plus vite qu'un bassin avec des altérites épaisses et un horizon fissuré utile à débit faible.

La carte de l'épaisseur du milieu fissuré utile associée à celle de son débit constituent des données préalables à la prospection des eaux souterraines. Elles fournissent des informations sur la capacité d'une formation géologique à fournir un débit souhaité (exemple : débit d'au moins 15 m<sup>3</sup>/h).

On peut ajouter que ces cartes du projet SILURES Bretagne ont été utilisées au cours des études suivantes :

- projet « Sols de Bretagne » (Agrocampus Ouest),
- modélisations réalisées sur les bassins versants bretons en contentieux européen « nitrates eaux brutes » (BRGM et INRA, pour la Préfecture de la Région Bretagne),
- modélisations réalisées sur les bassins versants bretons du plan gouvernemental « algues vertes » (INRA),
- référentiel hydrogéologique français BD-LISA (BRGM),
- aléa retrait-gonflement des argiles (BRGM).

Un CD-Rom a été conçu pour rassembler et mettre à disposition les données de l'ensemble du programme SILURES (projets : SILURES Bretagne, SILURES Bassins versants et SILURES Suivi). Il est téléchargeable dans sa totalité à ce lien : <http://sigesbre.brgm.fr/Le-programme-SILURES.html>.

#### Références bibliographiques :

M. CHO, K-M. HA, Y-S. CHOI, W-S. KEE, P. LACHASSAGNE, and R. WYNS. 2003. Relationship between the permeability of hard-rock aquifers and their weathered cover based on geological and hydrogeological observation in South Korea. IAH Conference on "Groundwater in fractured rocks", Prague 15-19 September 2003, Prague.

N. COURTOIS, P. LACHASSAGNE, R. WYNS, R. BLANCHIN, F. D. BOUGAÏRÉ, S. SOMÉ, A. TAPSOBA (2008) - Country-scale hydrogeological mapping of hard-rock aquifers and its application to Burkina Faso – Groundwater, Volume 48, Issue 2, pages 269–283

B. DEWANDEL, P. LACHASSAGNE, R. WYNS, J.C. MARÉCHAL, and N.S. KRISHNAMURTHY. 2006. A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. Journal of Hydrology, no. 330: 260-284.

B. MOUGIN, D. ALLIER, R. BLANCHIN, A. CARN, N. COURTOIS, C. GATEAU, E. PUTOT, collaboration J-P. JEGOU, P. LACHASSAGNE, P. STOLLSTEINER et R. WYNS (2008) - SILURES Bretagne - Rapport final - Année 5 - BRGM/RP-56457-FR

RABU D., CHANTRAINE J. et BECHENNEC F., 2001. Carte géologique du Massif Armoricaïn à 1/ 250 000. BRGM.

WYNS, R., J. M. BALTASSAT, P. LACHASSAGNE, A. LEGCHENKO, J. VAIRON and F. MATHIEU, Application of Magnetic Resonance Soundings for groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France), Bulletin de la Société Géologique de France t. 175 (1) (2004) 21-34.