



Document public



# Atlas hydrogéologique numérique du Calvados

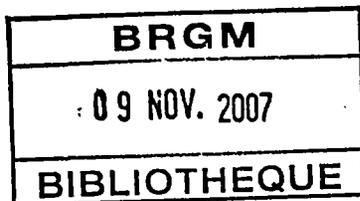
Volet relatif aux aquifères de socle

BRGM/RP-55671-FR

Octobre 2007

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM 06 EAU A05

Petit V., Lachassagne P., Arnaud L., Coueffé R., Tourlière B.



**Vérificateur :**

Nom : Pointet T.

Date : 20 août 2007

Signature : p/o Pasquet J. -F.

**Approbateur :**

Nom : Pasquet J.-F.

Date : 20 août 2007

Signature :

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Géosciences pour une Terre durable  
**brgm**

**Mots clés :** Altérites, Briovérien, Cambrien, Débit, Forage, GDM, Granite, Grès, Massif Armoricaïn, Milieu fissuré, Modélisation géométrique, MultiLayer, Paléozoïque, Schiste, Socle, Calvados, Basse-Normandie.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Petit V., Lachassagne P., Arnaud L., Coueffé R, Tourlière B. (2007) - Atlas hydrogéologique numérique du Calvados. Volet relatif aux aquifères de socle. Rapport BRGM/RP-55671-FR, 78 p., 33 illustrations, 2 annexes.

## Synthèse

Le Conseil Général du Calvados, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN), la DIREN Basse-Normandie et le brgm se sont associés pour la réalisation d'un Atlas hydrogéologique numérique du Calvados. La nouvelle version de l'Atlas se décline en trois volets :

- un volet cartographique (Rapport BRGM/RP-55670-FR) ;
- un volet quantitatif avec modélisation hydrologique globale des bassins versants de la Seulles, de la Mue et de la Dives amont (Rapport BRGM/RP-55672-FR) ;
- un volet relatif aux aquifères de socle, objet du présent rapport.

Dans un premier temps, **une étude sur les débits de forage** a permis de dresser le bilan des données disponibles pour le département du Calvados et d'en tirer les enseignements suivants :

- les débits totaux par forage sont conformes aux valeurs observables dans les contextes de socle avec une valeur médiane de  $9 \text{ m}^3/\text{h}$  ;
- les débits linéaires sont *a priori* sensiblement supérieurs à ceux qui s'observent dans d'autres régions du socle proche (Bretagne et Pays de Loire). Le débit linéaire décroît avec la longueur du forage sous les altérites, et plus particulièrement à partir de 25-30 m sous les altérites ;
- il ne semble pas y avoir de relation entre le débit total de l'ouvrage et sa profondeur ;
- en moyenne, les valeurs de débits instantanés les plus faibles ont été observées au niveau des granodiorites et des cornéennes ;
- enfin, en première analyse, l'épaisseur des altérites ne semble pas influencer le débit total par forage.

Il est recommandé d'étendre l'étude aux départements de la Manche et de l'Orne et d'approfondir l'analyse des forages les plus productifs.

Dans un deuxième temps, **une carte de l'épaisseur actuelle des altérites de socle** a été proposée par le brgm. Son objectif est de mettre en évidence les principales tendances régionales, en particulier les zones à plus forte épaisseur d'altérites.

La mise à jour de ce document cartographique apparaît indispensable avec l'acquisition de nouvelles données.



## Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	<b>9</b>
<b>2. Les aquifères en contexte de socle</b> .....	<b>11</b>
2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE.....	11
2.2. PROBLEMATIQUE .....	15
<b>3. Etude des débits de forage</b> .....	<b>19</b>
3.1. DONNEES COLLECTEES .....	19
3.1.1. Source et nature des données .....	19
3.1.2. Situation des forages .....	22
3.2. ANALYSE DES DONNEES.....	24
3.2.1. Statistiques générales.....	24
3.2.2. Relation entre débits et profondeur .....	27
3.2.3. Débit en cours de foration .....	30
3.2.4. Débit des venues d'eau ponctuelles.....	32
3.2.5. Relation entre débit et lithologie .....	35
3.2.6. Relation entre débit et profondeur d'altération.....	37
3.2.7. Relation entre débits et distance aux failles.....	38
3.2.8. Débit unitaire / longueur des forages sous les altérites .....	39
3.3. DETERMINATION DE L'EPAISSEUR UTILE.....	41
3.4. CONCLUSIONS / PERSPECTIVES.....	43
<b>4. Cartographie de l'épaisseur actuelle des altérites</b> .....	<b>45</b>
4.1. DONNEES COLLECTEES .....	45
4.1.1. Source et nature des données .....	45
4.1.2. Analyse statistique générale .....	47
4.1.3. Relation altération / lithologie .....	49
4.2. MODELISATION DE L'EPAISSEUR DES ALTERITES.....	50
4.2.1. Structure du modèle géologique.....	51
4.2.2. Hypothèses de calcul.....	53
4.2.3. Contrôle de cohérence.....	54
4.2.4. Calcul des contraintes d'inégalités .....	54

4.2.5. Interpolation des surfaces .....	55
<b>4.3. LIMITES DE LA MODELISATION .....</b>	<b>57</b>
4.3.1. Données disponibles et échelle de travail.....	57
4.3.2. Interprétation des logs géologiques.....	57
4.3.3. Maille de calcul.....	58
4.3.4. Conclusion .....	58
<b>4.4. PRESENTATION DES RESULTATS .....</b>	<b>59</b>
4.4.1. Clefs de lecture de la carte.....	59
4.4.2. Résultats cartographiques.....	59
<b>5. Conclusions.....</b>	<b>61</b>
<b>6. Références bibliographiques .....</b>	<b>63</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 : Carte géologique simplifiée du Massif Armoricaïn dans le Calvados (brgm) .....	12
Illustration 2 : Coupe synthétique des séries paléozoïques de Basse-Normandie (Dupret et Le Gall, 1998) .....	14
Illustration 3 : Schéma conceptuel des aquifères de socle (Wyns, 1999).....	16
Illustration 4 : Liste des informations disponibles pour le traitement.....	20
Illustration 5 : Liste et description des codes lithologiques (brgm).....	21
Illustration 6 : Liste des formations géologiques du Calvados en domaine de socle (brgm) .....	22
Illustration 7 : Situation géographique des forages avec indication du débit instantané .....	23
Illustration 8 : Statistiques sur le paramètre « profondeur des forages ».....	24
Illustration 9 : Histogramme des profondeurs de forages et des débits.....	25
Illustration 10 : Statistiques sur le paramètre « débit » des forages .....	26
Illustration 11 : Profondeur moyenne des forages par classe de débit. ....	27
Illustration 12 : Relation entre le débit total et la longueur du forage sous les altérites.....	29
Illustration 13 : Venues d'eau en fonction de la profondeur.....	31
Illustration 14 : Distribution du débit des venues d'eau en fonction de la profondeur (1) .....	33
Illustration 15 : Distribution du débit des venues d'eau en fonction de la profondeur (2) .....	34
Illustration 16 : Relation entre débit et lithologie .....	35
Illustration 17 : Distribution des débits mesurés au soufflage pour les lithologies à dominante gréseuse et celles à dominante schisteuse.....	36
Illustration 18 : Relation entre débit total et épaisseur des altérites.....	37
Illustration 19 : Relation entre débit total et distance à la faille la plus proche.....	38
Illustration 20 : Relation entre "débit unitaire" et longueur des forages sous altérites.....	40
Illustration 21 : Relation entre le « débit unitaire » et la longueur des forages sous les altérations (forages de la région Bretagne). Le débit cumulé des forages de moins de 59 m de profondeur (80% de l'échantillon) correspond à 90% de la productivité de l'ensemble des forages.....	41
Illustration 22 : Détermination de l'épaisseur utile.....	42
Illustration 23 : Représentation du log géologique validé de l'ouvrage n° 01748X0011 (commune de Bernières-le-Patry) .....	46
Illustration 24 : Répartition des logs géologiques utilisés pour la modélisation des altérites .....	47
Illustration 25 : Statistiques sur l'épaisseur des altérites décrites en forage.....	48

Illustration 26 : Distribution des épaisseurs d'altérites sur l'échantillon de sondages disponibles .....	48
Illustration 27 : Epaisseur des altérites et altitude des sondages .....	49
Illustration 28 : Epaisseur des altérites en fonction de la lithologie .....	50
Illustration 29 : Exemple d'une coupe géologique et de la pile stratigraphique associée sous MultiLayer .....	51
Illustration 30 : Définition des couches du modèle géologique.....	52
Illustration 31 : Carte géologique du Calvados au 1 / 50 000 codée selon la "pile stratigraphique" retenue.....	53
Illustration 32 : Les principales données d'inégalités pour un forage .....	55
Illustration 33 : Seuil de fusion et conséquence sur l'interpolation .....	56

## Liste des annexes

Annexe 1 - Représentation des degrés d'altération par forage .....	65
Annexe 2 - Cartographie de l'épaisseur actuelle des altérites de socle .....	73

## 1. Introduction

Le Conseil Général du Calvados, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN), la DIREN Basse-Normandie et le brgm se sont associés pour la réalisation d'un Atlas hydrogéologique numérique du Calvados. Chaque organisme est représenté dans le Comité de Pilotage du projet.

La dernière version de l'Atlas hydrogéologique du Calvados, sur support papier, date de 1991. Cette version est épuisée et n'a pas été accompagnée d'une notice explicative. Elle méritait, par conséquent, d'être mise à jour au format numérique.

La nouvelle version de l'Atlas se décline en trois volets :

- un volet cartographique avec caractérisation géométrique des principaux aquifères départementaux, élaboration des cartes piézométriques pour les nappes du Cénomaniens, du Bathonien et du Bajocien et de la carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines du Calvados (Rapport BRGM/RP-55670-FR) ;
- un volet relatif aux aquifères de socle du Calvados, objet du présent rapport ;
- un volet quantitatif avec modélisation hydrologique globale des bassins versants de la Seulles, de la Mue et de la Dives amont.

L'objectif de la présente étude est d'abord de dresser un bilan le plus exhaustif possible des données de forages disponibles en domaine de socle pour le département du Calvados. Cette ressource en eau a, en effet, jusqu'à présent été peu étudiée en Basse-Normandie. Ce rapport fait suite à une première phase de collecte et de mise en forme des données (Rapport BRGM/RP-54791-FR, 2006). Dans un deuxième temps, l'objectif est de valoriser les données selon deux approches :

- étude statistique des débits de forage selon une méthodologie développée par le brgm et notamment mise en œuvre dans les régions Bretagne et Pays de la Loire ;
- cartographie de l'épaisseur actuelle des altérites de socle.

Enfin, sur la base des résultats obtenus, des propositions d'études complémentaires seront faites dans le but d'approfondir la connaissance régionale des aquifères de socle.



## 2. Les aquifères en contexte de socle

### 2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le Calvados est localisé à la limite de deux grands ensembles géologiques qui influencent largement la morphologie et les paysages :

- le Massif Armoricaïn à l'W-SW du département, composé de terrains plissés précambriens et paléozoïques et caractérisé par des paysages vallonnés de bocage (Illustration 1) ;
- la bordure occidentale du Bassin Parisien dans la partie centrale et orientale du département, composée de terrains carbonatés jurassiques et crétacés et correspondant à un ensemble de plaines et de plateaux.

La présente étude s'intéresse exclusivement aux ressources en eau souterraine en domaine de socle. Dans le Calvados, les roches les plus anciennes du Massif Armoricaïn appartiennent au Précambrien (série schisto-gréseuse briovérienne). Cette série, épaisse de plusieurs milliers de mètres a été replissée en plis orientés WSW-ENE liés à l'érection de la chaîne de montagne cadomienne puis métamorphisée lors de la montée du pluton granitique d'Athis (vers 540 Ma). Ce dernier est entouré d'une ceinture métamorphique.

La série briovérienne peut se décomposer en deux ensembles :

- le Briovérien inférieur (Formation de Saint-Lô) : puissante série sédimentaire composée d'une alternance de niveaux de siltites, siltites ardoisières, argilites, grès fins, grauwackes, pouvant elle-même être subdivisée en trois niveaux distincts :
  - ✓ des horizons massifs à dominante de siltite-siltite ardoisière-argilite, à veinules de quartz. Les niveaux gréseux y sont accessoires ;
  - ✓ des niveaux massifs de grès tufacé et grès fin, à veinules de quartz : nette prédominance des termes gréseux, mais la présence de fines intercalations de siltites n'est pas exclue ;
  - ✓ des bancs de phtanites : roches silico-carbonées, très dures, bréchifiées (reconnues notamment dans les régions de Saint-Lô et Balleroy).
- le Briovérien supérieur (Formation de Granville) composé de siltites, siltites ardoisières, argilites, grauwackes et grès fins et s'organisant autour de deux pôles :
  - ✓ un pôle à nette dominance silto-argilitique ;
  - ✓ un pôle à nette dominance grauwackeuse.

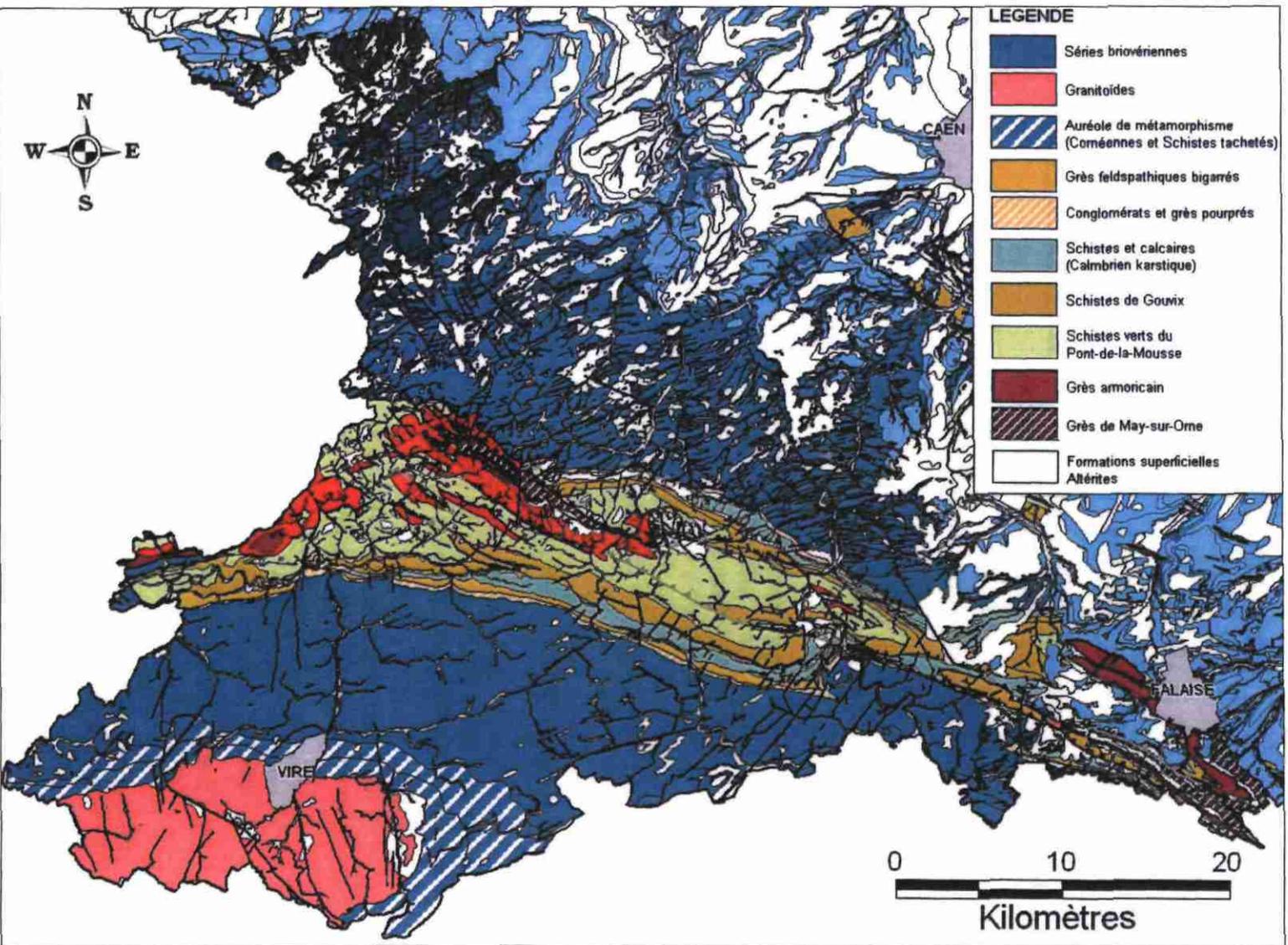


Illustration 1 : Carte géologique simplifiée du Massif Armoricain dans le Calvados (brgm)

L'auréole de métamorphisme peut se subdiviser en deux zones concentriques :

- la limite externe coïncide avec l'apparition de tâches visibles à l'œil nu (formation des Schistes tachetés), à ce stade, la structure et la dureté des roches préexistantes ne sont pas affectées ;
- à proximité du pluton, on se trouve en présence de roches très dures, massives, presque entièrement recristallisées : les cornéennes.

Dans le département du Calvados, les granites dits de la Mancellia (vaste bassin ouvert lors de la phase cadomienne) correspondent essentiellement au massif de Vire (Illustration 1). Il s'agit en fait plus précisément d'un massif granodioritique. Deux autres types pétrographiques ont été mis en évidence : diorite quartzitique sombre et leucogranodiorite formant la butte du Bois-du-Gast. Par ailleurs, quelques pointements de leucogranite ont été reconnus à l'est de Vire. Ils affleurent soit en bordure du massif granodioritique soit dans les cornéennes.

Au-dessus de la chaîne cadomienne arasée s'est déposée, en discordance, une série primaire (jusqu'à 2 000 m d'épaisseur) constituée de sédiments essentiellement gréseux et argileux, d'âge cambrien, ordovicien et silurien (540 à 400 Ma). A la fin de l'ère primaire, ces terrains ont été à leur tour plissés lors de l'orogénèse varisque (plis WNW-ESE), comme en témoigne le grand synclinorium de la Zone bocaine (d'extension régionale). Au cœur des synclinaux, les grès ordoviciens, plus résistants à l'érosion, dessinent de longues lignes de crêtes.

Les principales formations de la série paléozoïque dans notre zone d'étude sont (Illustration 2) :

- les Conglomérats et grès pourprés (Cambrien) : formation détritique grossière jalonnant le pourtour des synclinaux paléozoïques. Ces roches dures forment des lignes de relief orientées WNW-SSE ;
- les Schistes et Calcaires (Cambrien) : cette formation affleure principalement en zone bocaine, elle est composée d'alternances silto-gréseuses dans lesquelles s'intercalent des niveaux carbonatés. Les calcaires cambriens ont subi une karstification et une silicification importante ;
- les Grès feldspathiques (Cambrien) ;
- les Schistes violacés de Gouvix (Cambrien) : alternances silto-gréseuses avec dominance de la fraction gréseuse sur la fraction pélitique ;
- les Schistes et grès verts du Pont-de-la-Mousse (Cambrien) : essentiellement composés de très fines alternances d'argilites et de siltites. Quelques bancs de grès feldspathiques s'intercalent dans la succession ;
- les Schistes et grès rouges de Saint-Rémy (Cambrien) : alternance de grès rouges à rosés et de petites straticules plus silteuses ;

- les Grès armoricains (Ordovicien) : grès et quartzites blancs, très résistants, formant notamment les crêtes du paysage de la région de Falaise (orientées NW-SE) ;
- les Schistes d'Urville (Ordovicien) : argilites, siltites noires, grès micacés, minéral de fer. Cette formation de roches tendres apparaît au niveau de dépressions topographiques généralement allongées NW-SE. Ces dernières sont le plus souvent comblées de loess et de dépôts de solifluxion provenant des crêtes de grès des séries ordoviciennes encaissantes ;
- les Grès de May-sur-Orne (Ordovicien) : grès quartzeux micacés à intercalations de siltites noires (résistance importante à l'érosion).

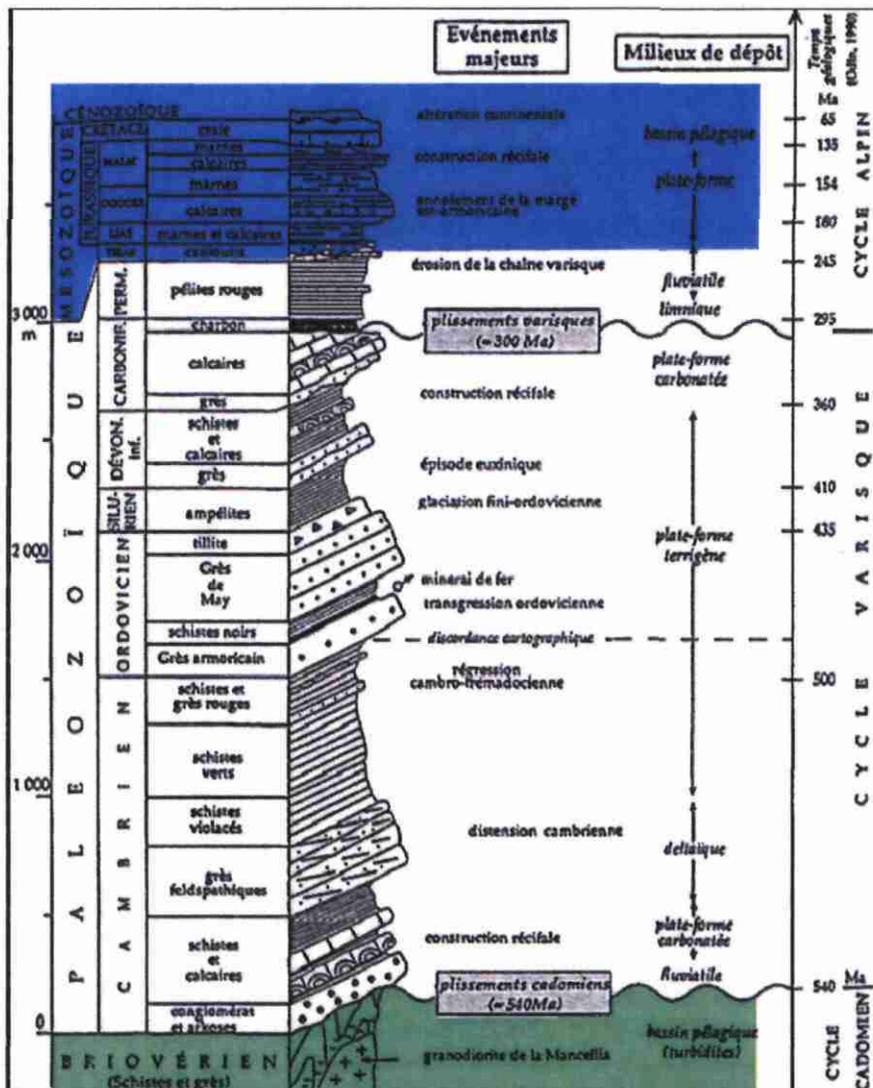


Illustration 2 : Coupe synthétique des séries paléozoïques de Basse-Normandie (Source : site internet de La Lithotèque de Normandie, Dupret et Le Gall, 1998)

## 2.2. PROBLEMATIQUE

Comme vu précédemment, dans les **régions de socle**, le sous-sol est constitué de roches plutoniques (granites s.l.) et métamorphiques (schistes, gneiss, ...) qui, à l'origine, sont massives et très peu perméables.

Postérieurement à leur formation, ces roches ont cependant subi différents types de modifications physiques : fracturation d'origine tectonique, altération météorique, altération hydrothermale, etc... Certaines de ces modifications ont eu pour conséquence une amélioration de leurs propriétés hydrodynamiques et elles expliquent l'existence de **ressources en eau** au sein de ces roches à **faible profondeur** (tranche 0-100 m) et la possibilité de l'existence d'autres types de ressources, à plus grande profondeur.

L'état des connaissances actuelles sur la **frange superficielle (0-100 m) altérée des aquifères de socle** est présenté schématiquement dans l'illustration 3. Ce modèle conceptuel comporte deux horizons distincts :

- *un horizon superficiel composé de formations d'altération meubles* (les altérites), de porosité relativement importante, lui permettant de jouer le rôle de réservoir capacitif (notamment via sa recharge par infiltration des eaux de pluie), mais dont la perméabilité reste en général assez faible et, en tout état de cause, insuffisante pour que l'eau qu'il renferme puisse être captée au moyen de forages en petit diamètre (inférieur à 1 m) ;
- *un horizon inférieur fissuré*, dont la fissuration est principalement induite par les processus d'altération. Il comporte en général plusieurs dizaines de fractures, en majorité subhorizontales dans les granites, d'orientation variée au sein des roches non équantes, foliées ou montrant une schistosité, au sein desquels quelques fractures (de 0 à 4 ou 5, selon les forages) présentent une perméabilité significative. Ces fractures perméables sont captées par forage (débits instantanés compris entre 1 et 5 à 20 m<sup>3</sup>/h selon les ouvrages). Le débit exploitable à long terme au sein d'un forage dépend de la perméabilité et du nombre de fractures recoupées par celui-ci, de leur connexion au réseau de fissures/fractures voisines ainsi qu'aux altérites meubles sus-jacentes.

Les discontinuités présentes au sein du sous-sol (discontinuités lithologiques, fractures ou diaclases, filons, etc...) constituent des **lieux privilégiés d'approfondissement du profil d'altération** décrit ci-dessus (Illustration 3). Elles présentent fréquemment :

- des faciès peu perméables (argiles) à proximité immédiate de leur axe ;
- des fissures perméables à leur périphérie.

Ces zones perméables d'origine superficielle peuvent ainsi s'étendre jusqu'à plusieurs centaines de mètres de profondeur sous la base du profil d'altération (horizon fissuré). Elles sont assez mal décrites et caractérisées jusqu'à présent, le lien entre les travaux de recherche portant sur le domaine profond (études relatives au stockage de déchets radioactifs par exemple) et ceux réalisés en subsurface (au sein des 100 premiers mètres, principalement pour des problématiques de type « ressources en eau ») n'étant pas établi pour les « moyennes profondeurs » (100 - 500 m environ).

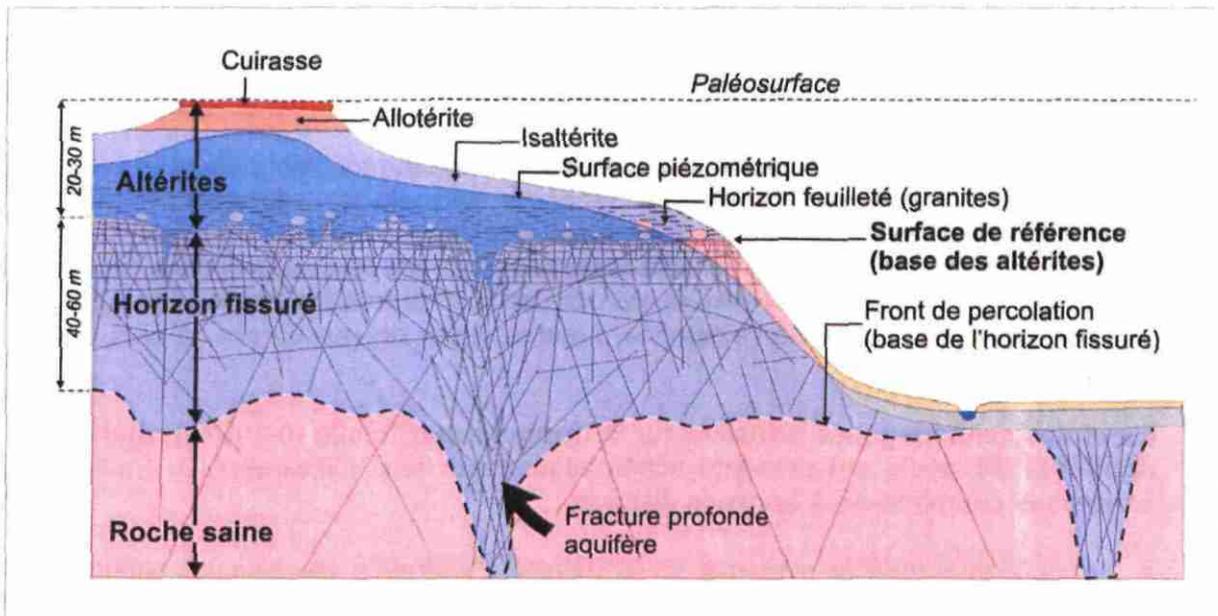


Illustration 3 : Schéma conceptuel des aquifères de socle (Wyns, 1999)

Enfin, bien que le département du Calvados n'appartienne pas à une zone sismiquement active, il ne peut être exclu que leur sous-sol comporte aussi des fractures de type tectonique, réactivées suffisamment régulièrement à l'échelle des temps géologiques pour qu'elles puissent disposer et conserver une perméabilité significative. Les travaux des tectoniciens (Burlet, 1991 ; Cornet et Burlet, 1992) montrent néanmoins que les contraintes tectoniques qui s'exercent à l'échelle des plaques ne sont que peu ou pas perceptibles à faible profondeur (jusqu'à 500 m environ) et que les contraintes qui règnent donc au sein de ce domaine, considéré par eux comme « superficiel », sont fortement influencées par les conditions de surface (topographie notamment).

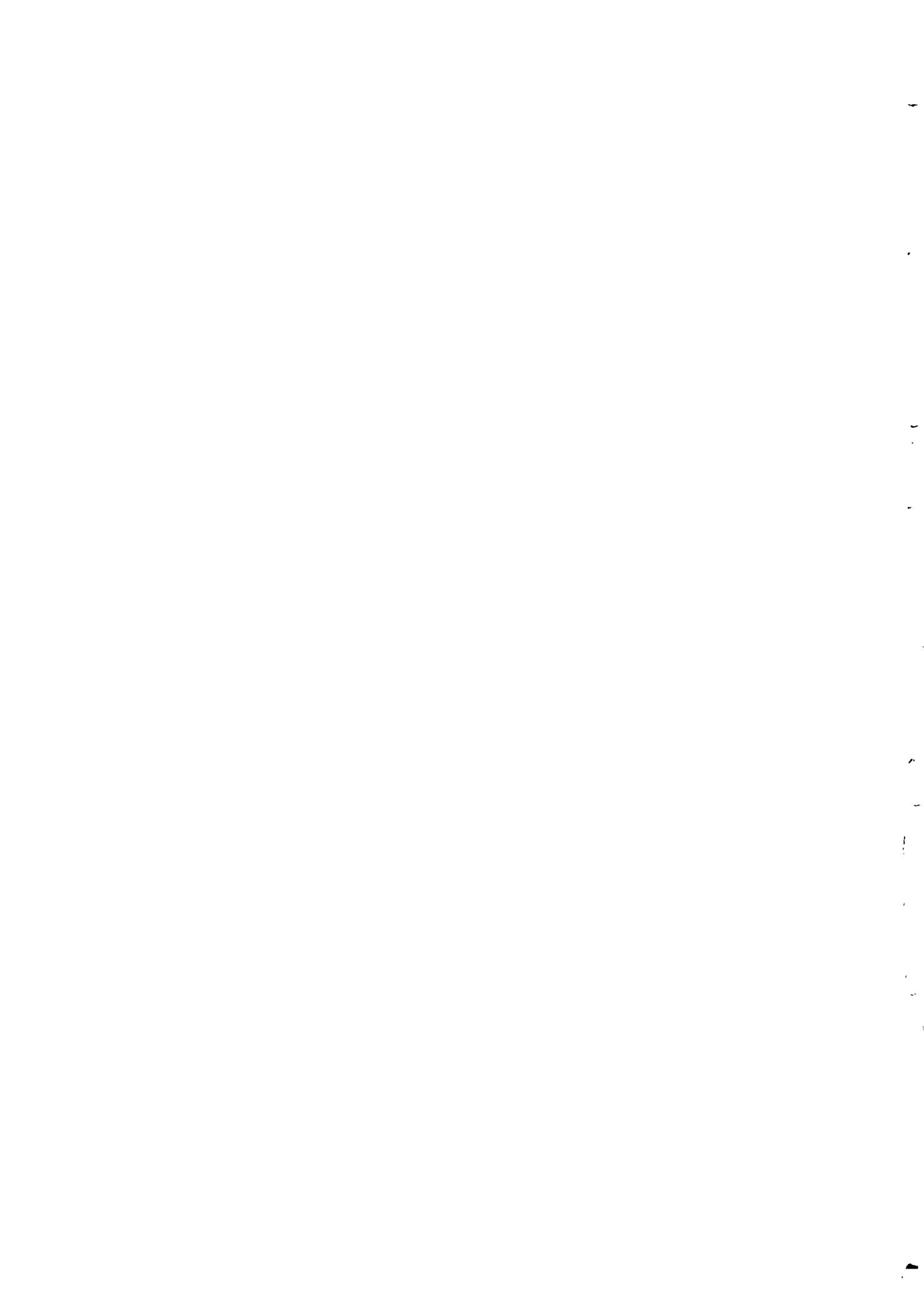
**Ces deux derniers types de configurations géologiques (fractures d'origine tectonique et partie profonde des profils d'altération, se développant préférentiellement le long de discontinuités préexistantes) peuvent constituer des structures perméables à moyenne profondeur (débit instantané significatif en forage) dont l'exploitabilité à long terme, tant du point de vue quantitatif (débit exploitable) que qualitatif (qualité des eaux souterraines et pérennité de cette qualité), doit être démontrée.**

De par leur mode de formation, les aquifères en contexte de socle présentent donc une structure discontinue et compartimentée, étroitement liée à l'histoire géologique, tant du point de vue de la nature de la roche mère (plus ou moins favorable vis-à-vis des processus d'altération ou de fracturation), que des modifications physiques subies.

En profondeur (au-delà de 100 m ; on distingue ainsi le domaine « semi-profond » - 100 - 500 m - et le domaine « profond » situé au delà), les contextes propices à la présence de ressources en eau exploitables, les mécanismes d'alimentation, les circulations en eau sont mal connus et encore peu étudiés.

Compte tenu du modèle conceptuel proposé, il a été décidé, dans le cadre de l'Atlas hydrogéologique numérique du Calvados, de réaliser les traitements suivants :

- analyse statistique des débits instantanés des forages d'eau avec pour finalités l'inventaire détaillé des données disponibles et la mise en évidence de facteurs favorables à l'obtention de débits significatifs (§ 3) ;
- cartographie de l'épaisseur actuelle des altérites sur socle, notamment pour tenter de mettre en avant les secteurs où l'altération est la plus développée (potentiel réservoir capacitif + impact sur la fissuration du substratum sous-jacent) (§ 4).



## 3. Etude des débits de forage

Une analyse sur les débits instantanés de forages implantés en domaine de socle, du même type que celle proposée dans ce chapitre, a été menée en Pays de Loire.

Par ailleurs, le brgm mène actuellement un projet de recherche d'aquifères semi-profonds dans le socle dans le département de l'Ille et Vilaine. Ce projet, qui a débuté fin 2006 est en cours (les premiers forages étaient prévus pour juin 2007).

Ainsi, à titre indicatif, les résultats obtenus pour le Calvados seront, dans la mesure du possible, confrontés à ceux obtenus en Bretagne et Pays de Loire.

A ce stade, le contexte morfo-structural des forages n'a pas été pris en compte dans l'analyse statistique. Une des limites de l'approche proposée est donc de comparer entre eux des objets aux contextes bien différents.

### 3.1. DONNEES COLLECTEES

#### 3.1.1. Source et nature des données

Les données traitées sont celles des forages recoupant des formations de socle (roches plutoniques et métamorphiques) pour lesquels les valeurs de débit sont connues. L'étude s'étend sur le département du Calvados, quelques forages étudiés sont toutefois implantés dans les départements de la Manche et de l'Orne, à proximité des frontières départementales.

Une base de données, au format Excel®, a été élaborée à partir de la compilation de données issues de la BSS (Banque des données du sous-sol du BRGM), du RGF (Référentiel Géologique Français) et des descriptions fournies par les foreurs. **En définitive, un total de 190 forages a pu être exploité.**

Les données utilisées pour les traitements, les différentes lithologies et stratigraphies sont listées dans les tableaux ci-dessous (Illustration 4 à Illustration 6) :

Colonne	Signification
Num Forage BSS	indice national BSS
Commentaire	identification du foreur, objet du forage
XXXX	coordonnée X en Lambert II (m)
YYYY	coordonnée Y en Lambert II (m)
ZZZZ	Altitude (m NGF)
Cote eau	Niveau piézométrique à la date des travaux
Date sondage	
Pi	Profondeur fin de passe i (m)
Ei	Epaisseur de la passe i (m)
Code Litho	Code issu du RGF pour la lithologie de la passe i
Lithologie	Libellé de la lithologie de la passe i (standard RGF)
Code Strati	Code issu du RGF pour la stratigraphie de la passe i
Stratigraphie	Libellé de la stratigraphie de la passe i (standard RGF)
Code formation	Code issu du RGF pour la formation de la passe i
Formation	Libellé de la formation de la passe i (standard RGF)
Description lithologique	Coupe géologique issue du dossier BSS ("coupe foreur" pour la grande majorité)
Ai	Code altération (0 = nul, 1= légère altération, 2 = altéré, 3 = très altéré)
Débit total	Débit total en fin de foration (m3/h)
Mesure i	Profondeur de la mesure de débit (m)
Débit i	Débit de la venue d'eau en cours de foration (m3/h)

*Illustration 4 : Liste des informations disponibles pour le traitement*

**Code altération Ai :** l'évaluation de l'altération (code altération) a été réalisée sur la base des descriptions foreurs (vocabulaire propre à un foreur, texture, couleur, ...), des épaisseurs de passe (pour contrôle de cohérence sur l'épaisseur annoncé par le foreur), de la lithologie ou encore des indications de venues d'eau (en général première arrivée d'eau à l'interface altération-fissuré). Cette méthodologie a notamment été inspirée des travaux menés par le Service Géologique Régional (SGR) de Bretagne (Mougin et al., 2004).

**Code lithologique :** les codes sont renseignés sur l'illustration 5.

REMB	remblais
TV	terre végétale
LIM	limon
QTZT	quartzite
ARGI	arène argileuse
AB	argile à galets
ABLO	argile à blocs
GRAR	grès ; argile
SA	sable argileux
SAGB	sable argileux à graviers et galets
AL	altérite
AREN	arène meuble
CALC	calcaire
quar	schiste et calcaire
CORN	coméenne
GR	granite
GRD	granodiorite
GRES	grès
GRF	grès fin
GRFI	grès très fin
SCGR	schistes ; grès
RALT	Roche d'altération s.l.
SABL	sable
SBLU	schiste bleu
SCAR	schiste ardoisier
SCGR	schiste ; grès
SCHI	schiste
SN	schiste noir

*Illustration 5 : Liste et description des codes lithologiques (brgm)*

### **Codes Stratigraphie et Formation :**

Comme vu précédemment, on distingue trois grands domaines pour le socle dans le Calvados : le Paléozoïque, le Briovérien et les massifs granitiques. Pour chacun de ces domaines, les différentes formations recensées au niveau des logs géologiques sont rassemblées dans le tableau de l'illustration 6. Ces informations ont été renseignées à partir de la carte géologique harmonisée au 1/50.000.

Les codes relatifs à la stratigraphie sont : BRIOINF, BRIOSUP et BRIOVE pour le Briovérien, CAMBR pour le Cambrien, ORDOV pour Ordovicien, CENOZ pour Cénozoïque et enfin QUAT pour Quaternaire.

Code Formation (RGF)		Libellé Formation
Ordovicien	65315	Grès de May
Ordovicien	65350	Grès armoricain
Ordovicien	65380	Schistes et grès rouges de Saint-Rémy
Cambrien	65460	Schistes violets cambriens
Cambrien	65470	Schistes verts cambriens
Cambrien	65490	Pélites et grès du Pont-de-la-Mousse
Cambrien	65500	Grès et pélites de Gouvix
Cambrien	65510	Grès de Caumont
Cambrien	65520	Schistes et calcaires
Cambrien	65540	Membre des Calcaires à Rosnaiella
Cambrien	65560	Grès feldspathiques bigarrés
Cambrien	65570	Conglomérats et grès pourprés
Briovénien	69010	Alternances de grauwackes, siltites, argilites et conglomérats de La Laize et de Granville
Briovénien supérieur	69020	Conglomérats et schistes à galets de Granville
Briovénien supérieur	69030	Grauwackes de Granville et de La Laize
Briovénien	69040	Siltites et argilites de Granville et de La Laize
Briovénien	69060	Grès, siltites, argilites et phanites de Saint-Lô
Briovénien	69070	Siltites, argilites de Saint-Lô
Briovénien	69190	Schistes tachetés briovériens
Briovénien	69200	Schistes et grès cornéifiés briovériens
Briovénien	69260	Granites cadomiens

Illustration 6 : Liste des formations géologiques du Calvados en domaine de socle (brgm)

### Débits :

Il s'agit du débit au soufflage (« instantané ») mesuré en fin de foration. Rappelons que le débit mesuré en fin de foration est en général obtenu sur la base d'un essai de pompage de courte durée (quelques dizaines de minutes en général) et qu'il n'est à ce titre pas représentatif du débit qui pourrait être exploité à long terme au sein du forage considéré, ce dernier étant en général significativement plus faible. Néanmoins, de nombreuses publications ont démontré, tout particulièrement en contexte de socle, la représentativité de cette variable et l'intérêt des statistiques qui peuvent être réalisées avec elle.

Pour de nombreux forages, on dispose aussi de l'évolution du débit avec la profondeur ; il s'agit en règle générale de mesures du débit au soufflage réalisées à l'avancement ; de 1 à 19 mesures de débit ont ainsi pu être réalisées selon les forages.

Pour quelques forages, le débit nul correspond à une productivité nulle telle que l'indiquait le compte rendu des travaux.

### **3.1.2. Situation des forages**

L'illustration 7 présente la localisation des forages traités avec indication des débits instantanés. Ils se répartissent de la façon suivante :

- 161 forages dans le Calvados ;
- 14 forages dans l'Orne ;
- 15 forages dans la Manche.

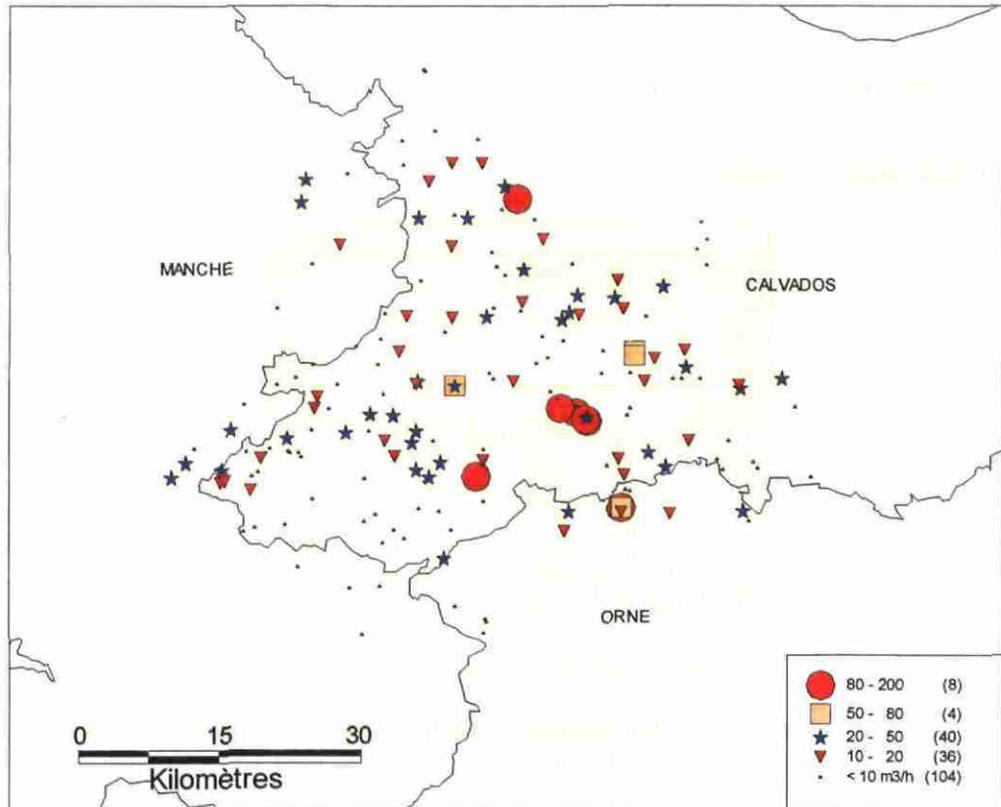


Illustration 7 : Situation géographique des forages avec indication du débit instantané

## 3.2. ANALYSE DES DONNEES

### 3.2.1. Statistiques générales

#### *Profondeur des forages*

	P forage
Nb de valeurs utilisées	190
Minimum	17
Médiane	58
Maximum	157
Moyenne	64.5
CV (écart-type / moyenne)	0.4
Varaince d'échantillon	779.1
Ecart-type d'échantillon	27.9
Ecart absolu moyen	22.1
Ecart absolu médian	18
Ecart-type de la moyenne	2

*Illustration 8 : Statistiques sur le paramètre « profondeur des forages »*

Globalement, les forages sont peu profonds (médiane de la profondeur : 58 m), ce qui est classique en contexte de socle (Illustrations 8 et 9).

Par conséquent, l'échantillon comprend peu de forages profonds : seuls 23 (12 % de l'échantillon) dépassent 100 m de profondeur ; le plus profond atteint 157 m.

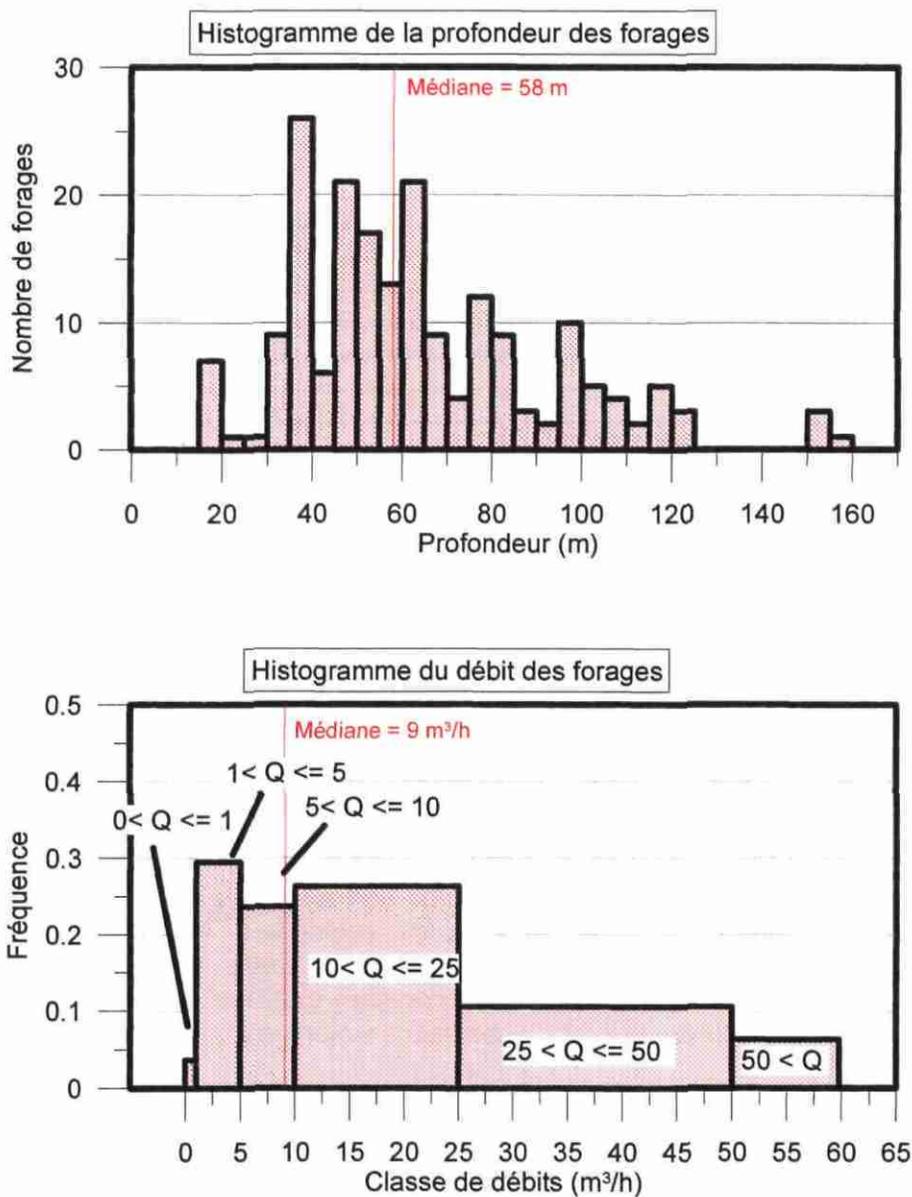


Illustration 9 : Histogramme des profondeurs de forages et des débits

**Débits en fin de foration**

Les principales caractéristiques statistiques des débits disponibles (débits en fin de foration) sont résumées dans le tableau suivant :

	Débit total (m <sup>3</sup> /h)
Nbr. de valeurs utilisées	191
Minimum	0
Médiane	9
Maximum	200
Moyenne	17.7
CV (écart-type/moyenne)	1.6
Variance d'échantillon	809.6
Ecart-type d'échantillon	28.5
Ecart absolu moyen	15.8
Ecart absolu médian	6.3
Ecart-type de la moyenne	2.1

*Illustration 10 : Statistiques sur le paramètre « débit » des forages*

La plupart des forages présentent de faibles débits (Illustration 9) : 33 % sont inférieurs à 5 m<sup>3</sup>/h, 57 % sont inférieurs à 10 m<sup>3</sup>/h. Cependant, une proportion significative de forages présente un débit important : 17 % des forages ont, en effet, un débit supérieur à 25 m<sup>3</sup>/h.

A titre comparatif, l'étude réalisée par le BRGM en Pays de la Loire sur un échantillon de 363 forages de plus de 100 mètres de profondeur indique une plus forte représentation des classes de faible débit : 62 % sont, en effet, inférieurs à 5 m<sup>3</sup>/h avec un débit médian de 4 m<sup>3</sup>/h. En revanche, un nombre significatif de forages présentent également des débits élevés avec 12 % de débits supérieurs à 25 m<sup>3</sup>/h.

### 3.2.2. Relation entre débits et profondeur

#### Profondeur moyenne des forages et classes de débit

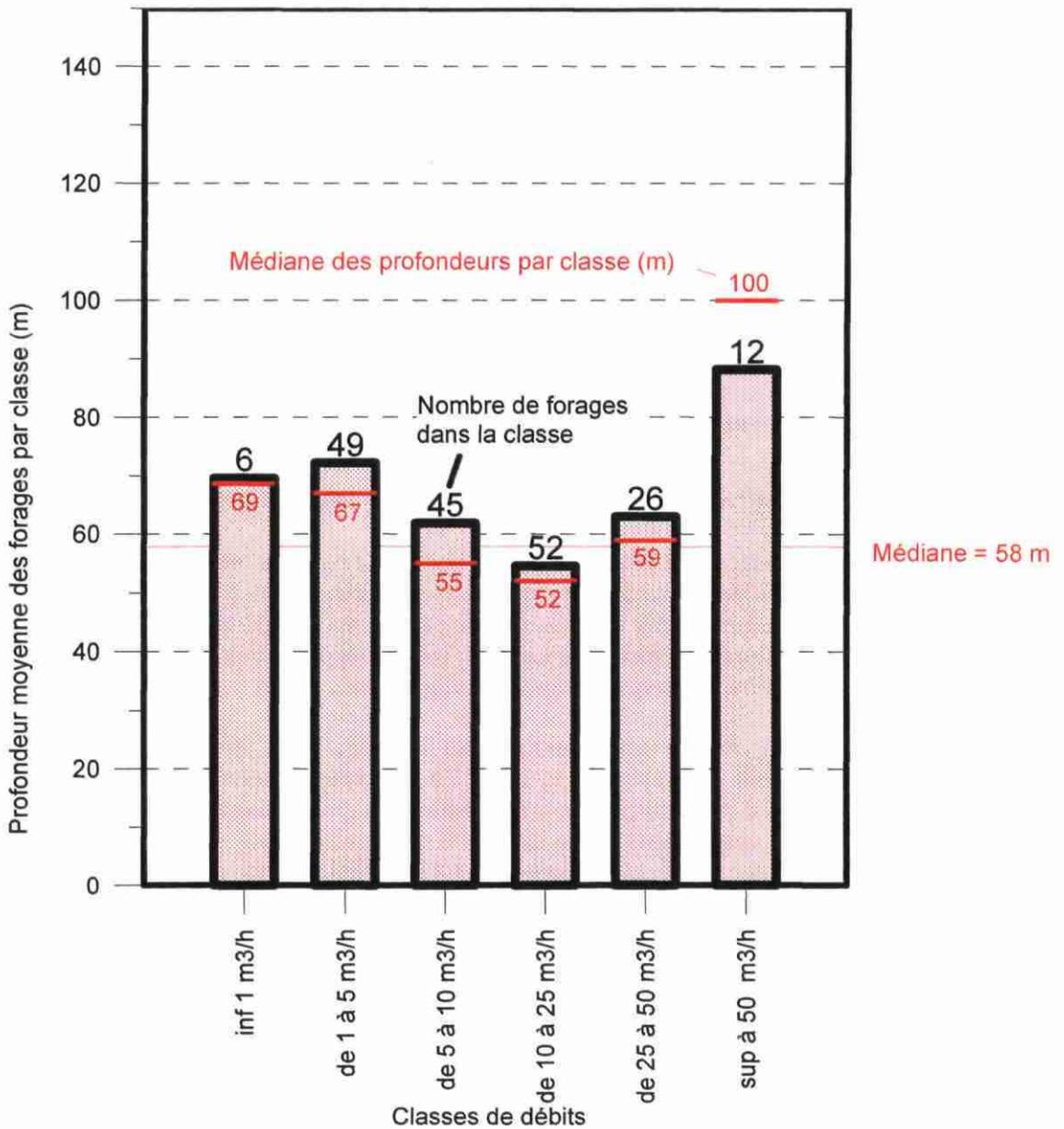


Illustration 11 : Profondeur moyenne des forages par classe de débit.

L'illustration 11 représente la profondeur moyenne des forages par classe de débit. Jusqu'à 50 m<sup>3</sup>/h environ, profondeur du forage et débit ne sont pas corrélés au sein de cet intervalle. Ceci suggère que la distribution verticale de la perméabilité n'est pas homogène ; en effet, si la perméabilité du sous-sol était homogène, une relation linéaire positive apparaîtrait. Par ailleurs, la diminution apparente de la profondeur moyenne des forages de la classe 1-5 à la classe 10-25 m<sup>3</sup>/h suggère que lorsqu'un débit significatif (quelques m<sup>3</sup>/h) est obtenu à faible profondeur, les maîtres d'ouvrages des forages ont tendance à considérer leur objectif comme atteint et à arrêter la foration.

L'étude menée en Pays de la Loire montre également que profondeur et débit sont deux grandeurs indépendantes pour les forages de plus de 100 m de profondeur.

La dernière classe de débit instantané, supérieure à 50 m<sup>3</sup>/h, concerne 12 forages et montre une profondeur moyenne plus élevée que la précédente. La différence n'est cependant pas assez significative pour conclure de manière certaine à une augmentation de la productivité en relation avec la profondeur de l'ouvrage qui pourrait apparaître entre la classe 10-25 et la classe >50 m<sup>3</sup>/h. Cela suggère néanmoins que des venues d'eau significatives continuent à être rencontrées au delà de 50 m de profondeur. Attention, ces 12 forages correspondent peut-être à des contextes structuraux favorables, et cette dernière suggestion ne doit pas être généralisée à l'ensemble de la zone d'étude.

### ***Débit total/ profondeur des forages et profondeur sous altérites***

L'altération des formations géologiques est renseignée dans le fichier de base par un code traduisant soit une légère altération (code 1), soit une altération moyenne (code 2), soit un niveau très altéré (code 3). Les roches saines sont codées en "0". Les trois codes d'altération n'existent pas forcément sur un même forage ; leur ordre ne suit pas systématiquement un ordre logique : de haut en bas, du plus altéré vers la roche saine.

Cette information a été utilisée pour calculer les longueurs de forage recoupant le milieu fissuré supposé se trouver sous la base de l'altération, selon les trois degrés d'altération et également pour la position d'altération la plus basse (quelque soit le code de 1 à 3). Ce sont ces valeurs, ainsi que celle de la profondeur du forage qui sont reportées en fonction du débit sur l'illustration 12. Si plusieurs codes d'altération apparaissent sur un même forage, le point sera tracé sur plusieurs graphiques.

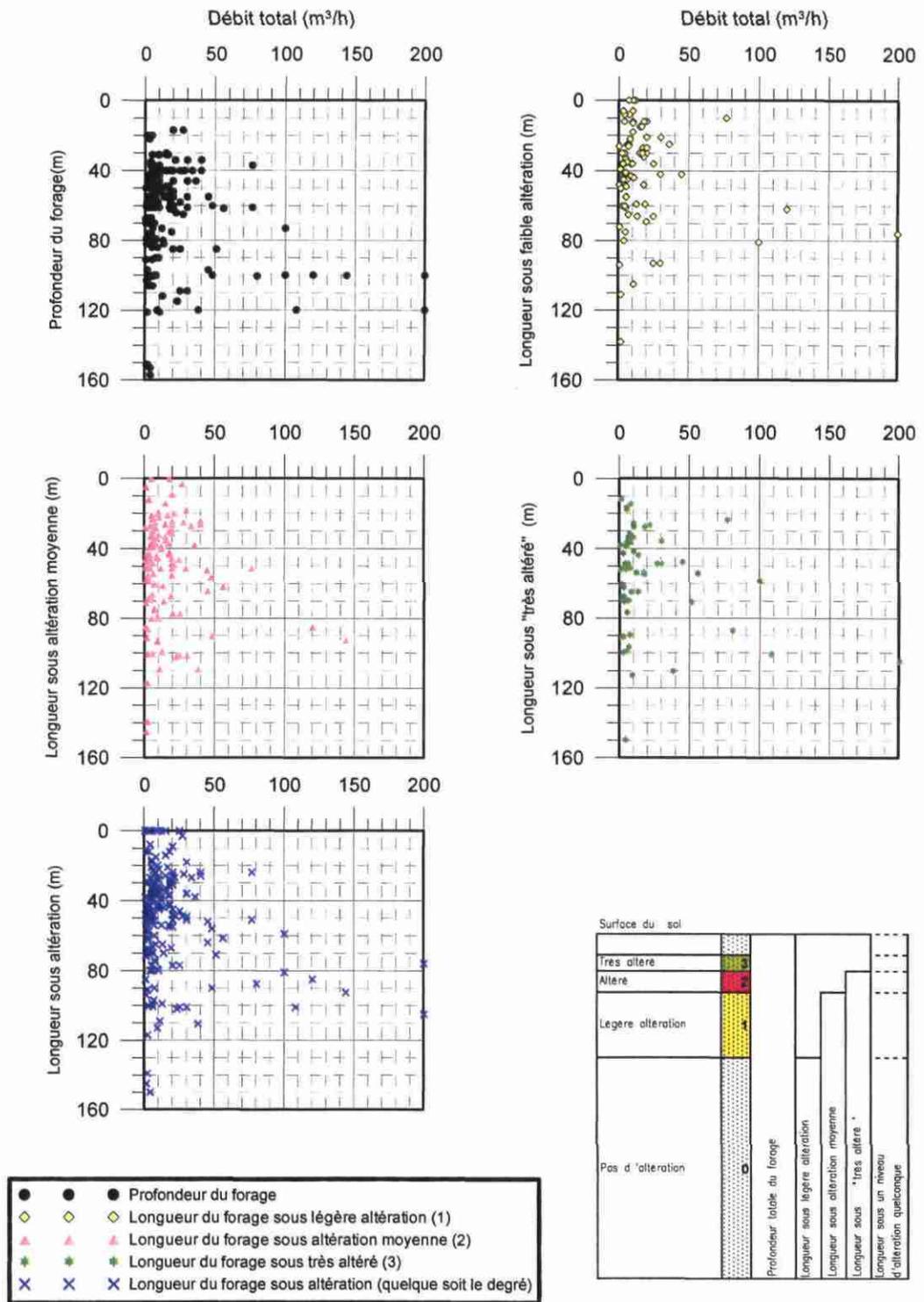


Illustration 12 : Relation entre le débit total et la longueur du forage sous les altérites

• **Commentaires :**

Le diagramme « débit total / profondeur totale du forage » montre l'absence de forages productifs de moins de 18 m de profondeur. Bien qu'un biais concernant l'échantillon ne puisse être exclu (un forage doit présenter une profondeur significative pour pouvoir être doté d'une pompe), ceci tend à confirmer qu'en contexte de socle, les terrains superficiels sont quasi systématiquement altérés et présentent donc en général une faible perméabilité.

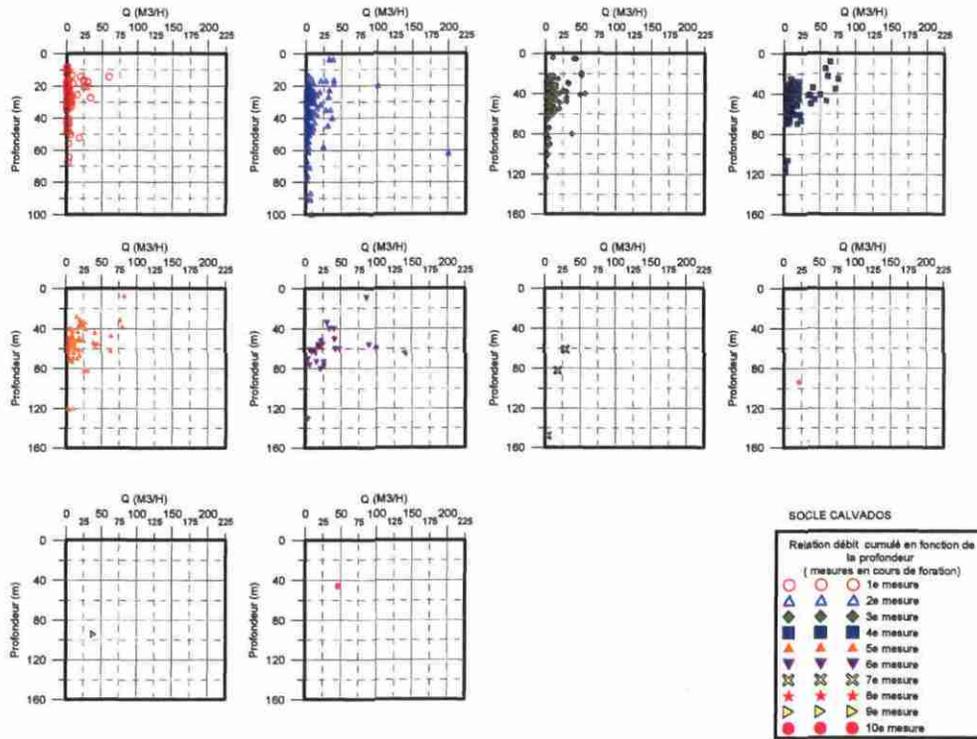
Une tendance à l'augmentation du débit en fonction de la profondeur du forage et de la longueur du forage sous altérites apparaît sur certains graphiques de l'illustration 12, sans pour autant que ce soit une règle générale. Cette tendance n'est cependant pas marquée. Les forages les plus productifs ( $> 50 \text{ m}^3/\text{h}$ ) ont, à une exception près, plus de 50 m de profondeur sous la base des altérations. Certains forages « profonds » présentent un débit nul ou très faible. La profondeur ne constitue donc pas une garantie de disposer d'un débit significatif mais apparaît comme une condition nécessaire.

Les valeurs de débit sont dans la norme des débits observés en milieu de socle (retours d'expérience brgm en Bretagne, Pays de la Loire ou encore à l'International) ; ils sont cependant obtenus avec des forages relativement peu profonds. En conséquence, les débits unitaires seront élevés (cf. paragraphe suivant).

### **3.2.3. Débit en cours de foration**

Les venues d'eau sont caractérisées sur l'illustration 13. Les valeurs de débit sont celles du débit à l'avancement en cours de foration. Chaque schéma correspond au rang de la venue d'eau, de la première à la dixième.

A quelques exceptions près, les débits les plus élevés s'observent plutôt dans les plus faibles profondeurs. Dans une phase ultérieure, il serait intéressant d'étudier plus précisément les valeurs qui font exception.



	QT	PMQ	Venue 1		Venue 2		Venue 3		Venue 4		Venue 5	
			P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
MINIMUM	0	1	8	0	1	0	4	1	8	2	8	2
MAX	200	148	86	60	100	200	124	56	118	77	121	83
MOYENNE	17.7	51.8	25.8	6.2	36.3	7.9	44.6	9.4	46.9	14.1	53.8	19.6
MEDIANE	9	50	22	2	34	3	40	5	46	9	52	16
ECART-TYPE	28.5	22.7	12.2	11.5	15.7	18.9	19.0	11.1	17.2	16.1	20.2	18.7
Nombre de valeurs	191	173	169	80	164	161	142	142	98	98	65	64

Venue 6		Venue 7		Venue 8		Venue 9		Venue 10	
P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
8	0	1	0	4	1	8	2	8	2
169	80	164	200	142	142	118	98	121	83
26.9	7.6	37.2	10.4	45.6	10.9	47.7	15.9	54.0	21.4
23	2	34	3	41	6	46	9	52	17
17.2	14.8	19.5	27.2						
166	86	161	158	140	140	98	98	68	67

QT Débit total du forage  
 PMQ Profondeur maximale correspondant à la mesure de QT  
 P Profondeur correspondant à la mesure du débit  
 Q Débit en cours de foration à la profondeur P  
 Les débits sont en m<sup>3</sup>/h  
 Les profondeurs sont en m

Illustration 13 : Venues d'eau en fonction de la profondeur

### 3.2.4. Débit des venues d'eau ponctuelles

#### *Profondeur des venues d'eau*

Les débits des venues d'eau ont été reportées en fonction de la profondeur par rapport au sol (Illustrations 14 et 15), et à des échelles différentes de débit pour visualiser correctement les faibles valeurs qui sont les plus nombreuses.

On remarque que le premier niveau (une quinzaine de mètres) est sans venue d'eau ou avec des valeurs faibles (niveau altéré), puis les valeurs maximales des débits des venues d'eau décroissent régulièrement de 20 m de profondeur vers 150 m, dernière venue d'eau de l'ensemble des forages étudiés (niveau fissuré). Les fissures productrices semblent disparaître avec la profondeur.

Les illustrations font apparaître trois forages qui se distinguent des autres par leurs valeurs de débits (situation des trois forages sur l'illustration 14) :

- 01756X0011/F2 : Forage d'exploitation d'eau F2 pour AEP. Coupe géologique par Lemoine. Série stratigraphique : Altérites sur Briovérien métamorphisé (Zone des Cornéennes). Les deux niveaux productifs sont à faible profondeur sous le niveau altéré (14 et 20 m/sol) ;
- 01752X0019/FE3 : Forage d'exploitation d'eau FE3 pour AEP. Coupe géologique détaillée. Série stratigraphique : Quaternaire (colluvions/alluvions) sur Cambrien (Formation des Schistes et calcaires, karstiques). Venues d'eau nettes entre 28 et 62m (débit instantané supérieur à 200 m<sup>3</sup>/h) ;
- 01752X0014/P1-92 : Forage de recherche d'eau pour AEP. Coupe géologique détaillée. Série stratigraphique : Quaternaire (colluvions/alluvions) sur Cambrien (Formation des grès feldspathiques bigarrés). Huit venues d'eau sont précisées dans la profondeur.

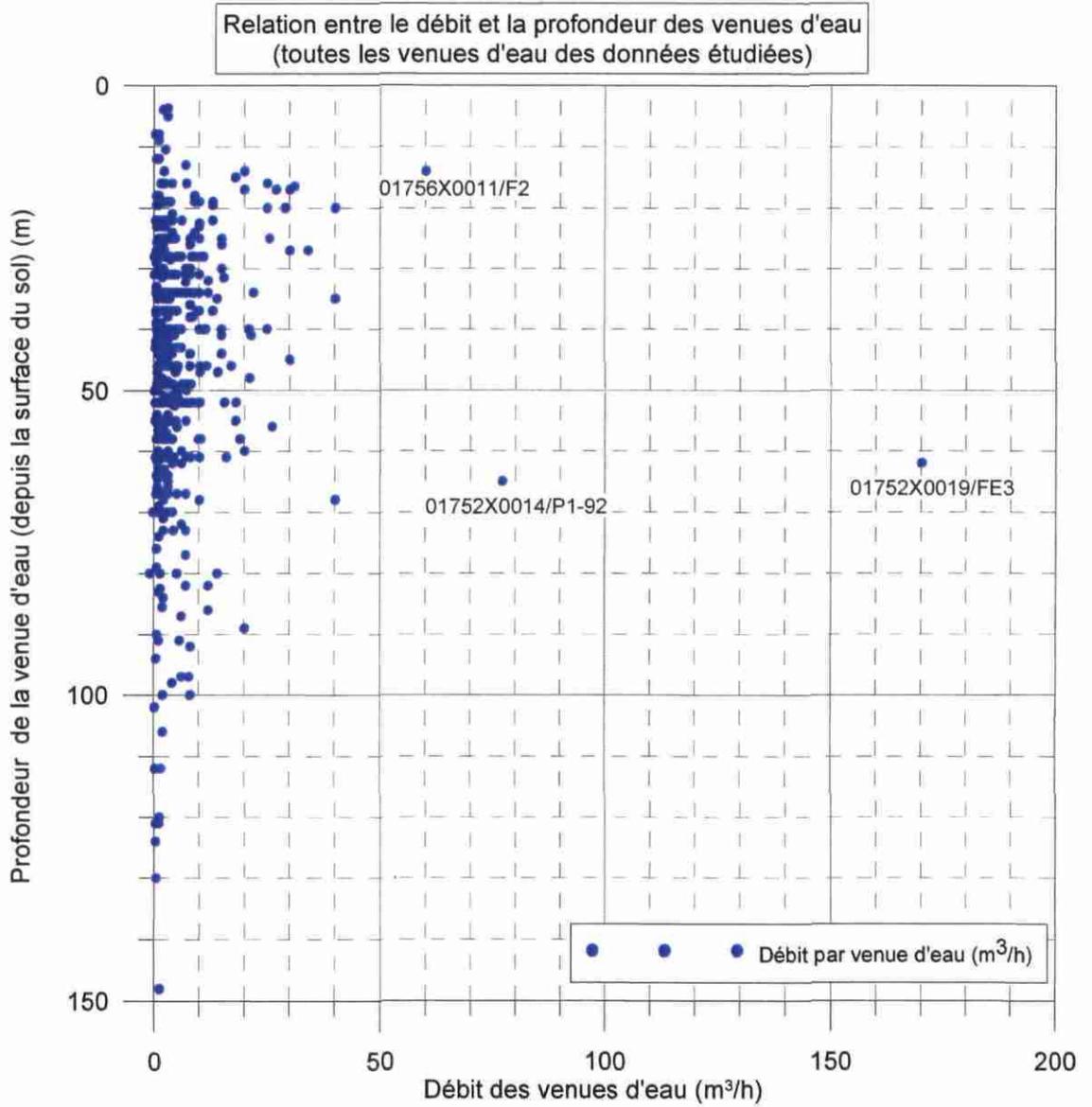


Illustration 14 : Distribution du débit des venues d'eau en fonction de la profondeur (1)

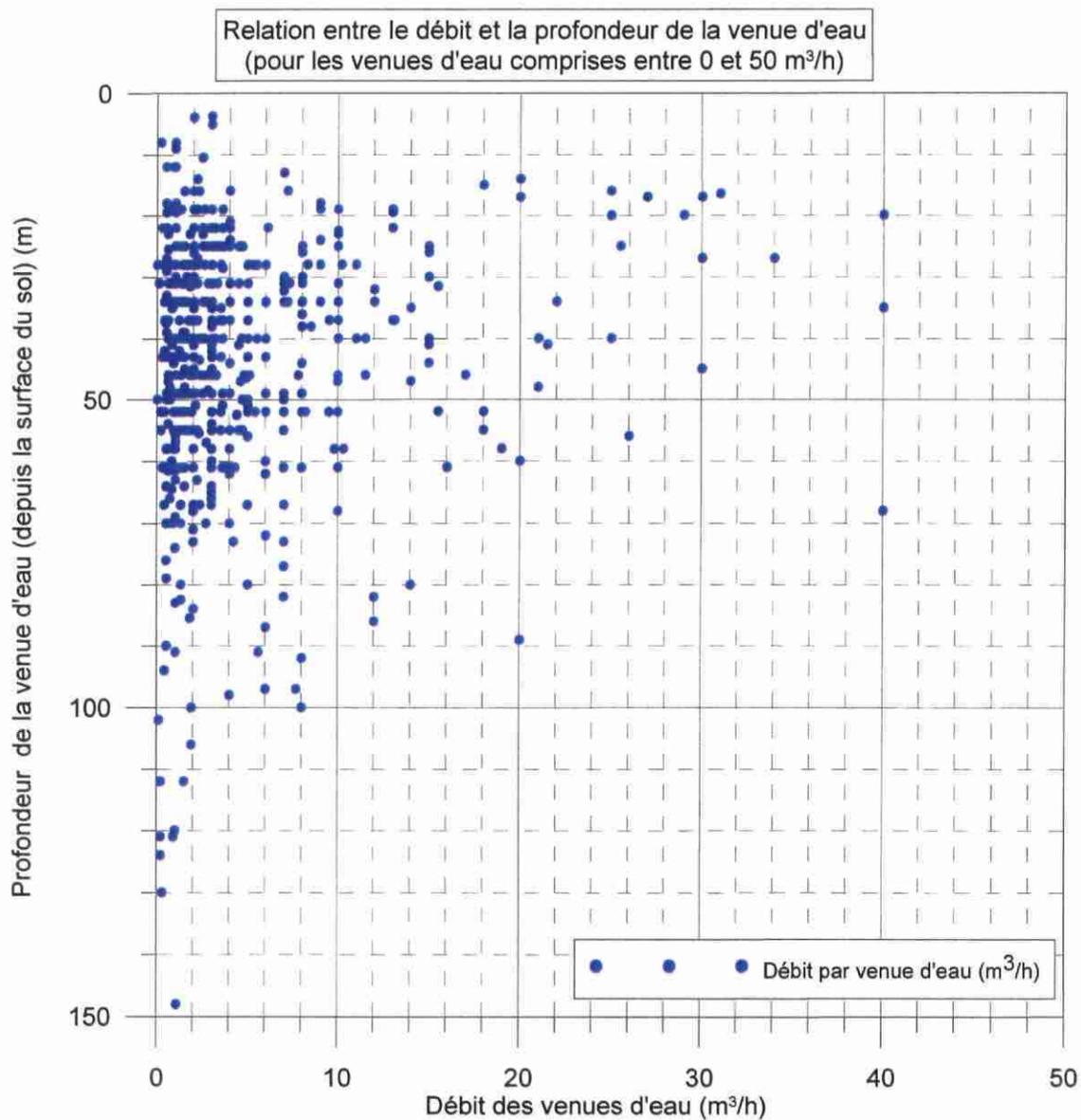


Illustration 15 : Distribution du débit des venues d'eau en fonction de la profondeur (2)

### 3.2.5. Relation entre débit et lithologie

Dans le but d'étudier la relation entre débits instantanés et lithologie, les lithologies initiales ont été regroupées pour former un ensemble plus réduit. Cinq familles ont ainsi été individualisées : les formations à dominante schisteuse (à granulométrie fine : argilite, siltite, ...), celles à dominante gréseuse, les granitoïdes, les formations métamorphisées (cornéennes et schistes tachetés) et les calcaires karstiques du Cambrien (formation des Schistes et calcaires) (Cf. § 2.1).

Pour cette dernière formation, les circulations d'eau montrent, en effet, des indices de dissolution des calcaires accompagnant la fracturation. La position structurale subverticale de la série crée un réservoir pouvant être de capacité importante.

<b>A dominante schisteuse</b>	NBVAL	109
	MIN	0
	MAX	144
	MOYENNE	15.7
	MEDIANE	10
	ECART-TYPE	18.0
<b>Granitoïdes</b>	NBVAL	18
	MIN	0.6
	MAX	18
	MOYENNE	4.9
	MEDIANE	4.3
	ECART-TYPE	4.2
<b>Cornéennes et Schistes tachetés</b>	NBVAL	19
	MIN	1
	MAX	100
	MOYENNE	17.5
	MEDIANE	10
	ECART-TYPE	23.2
<b>A dominante gréseuse</b>	NBVAL	31
	MIN	0
	MAX	200
	MOYENNE	18.9
	MEDIANE	5
	ECART-TYPE	40.9
<b>Schistes et Calcaires (Cambrien karstique)</b>	NBVAL	12
	MIN	2
	MAX	200
	MOYENNE	51.9
	MEDIANE	23.5
	ECART-TYPE	61.5

Illustration 16 : Relation entre débit et lithologie

Les résultats de l'analyse statistique présentés sur l'illustration 16 sont cependant à prendre avec précaution étant donné le faible échantillon de départ (190 forages), la prédominance des formations schisteuses (109 forages sur 190, soit 60% de

l'échantillon) et la faible représentativité de certaines lithologies (12 forages pour les schistes et calcaires, 18 pour les granitoïdes et 19 pour l'auréole de métamorphisme).

Quelques tendances semblent tout de même se dégager :

- les débits les plus faibles ont été enregistrés au sein des formations granitiques avec un débit moyen de 4.9 m<sup>3</sup>/h pour un débit maximal de 18 m<sup>3</sup>/h. La faible valeur de l'écart-type indique que les débits se répartissent de façon relativement homogène autour de la valeur moyenne. Ce point est très bien mis en évidence sur la carte de situation des forages étudiés (Illustration 7) où l'on observe une concentration de faibles débits dans l'extrême sud du département (massif granitique d'Athis) ;
- les débits les plus importants semblent avoir été obtenus pour la formation des Schistes et calcaires du Cambrien (moyenne de 51.9 m<sup>3</sup>/h). Ce constat s'explique par le caractère karstique de ces formations. A noter, cependant, une forte hétérogénéité dans la répartition des débits (médiane de 23.5 m<sup>3</sup>/h et écart-type de 61.5) ;
- en moyenne, les débits instantanés obtenus sur les schistes briovériens et les schistes métamorphisés semblent être du même ordre de grandeur. En complément, il est à signaler que pour l'auréole de métamorphisme, les débits les plus importants ont été obtenus pour la formation des Schistes tachetés (couronne externe), la moins affectée par le métamorphisme ;
- enfin, les débits moyens semblent du même ordre de grandeur pour les formations gréseuses et les formations schisteuses, avec respectivement 18.9 m<sup>3</sup>/h et 15.7 m<sup>3</sup>/h. En revanche, les classes de débits ne sont pas représentées de la même façon (Illustration 17) : 16 % des forages ont des débits instantanés supérieurs ou égaux à 20 m<sup>3</sup>/h pour les formations gréseuses contre 30 % pour les formations schisteuses.

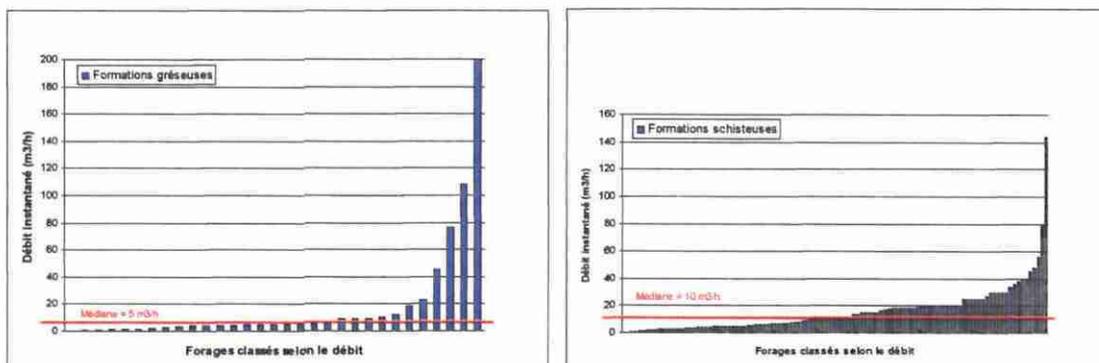


Illustration 17 : Distribution des débits mesurés au soufflage pour les lithologies à dominante gréseuse et celles à dominante schisteuse

### 3.2.6. Relation entre débit et profondeur d'altération

En Annexe 1, une figure présente les forages, avec leur coupe représentant le stade d'altération (de 0 à 3), par ordre de débit décroissant.

On n'observe pas un classement des épaisseurs d'altération en fonction du débit total par forage (même constat en Pays de la Loire).

En complément, un graphique de corrélation (Illustration 18) a été dressé entre le débit instantané total et l'épaisseur totale de l'altération superficielle (quelque soit le degré d'altération) reposant sur le premier horizon fissuré/sain rencontré. Il ne semble pas exister de relation directe entre le débit instantané total et l'épaisseur des altérites.

On peut tout de même noter que parmi les 29 forages les plus productifs ( $Q_{total} \geq 30$  m<sup>3</sup>/h), 25 (soit 86 %) traversent une épaisseur d'altérites supérieure à 10 m. Dans des travaux complémentaires, il pourra être intéressant d'étudier le lien avec le contexte structural de ces forages.

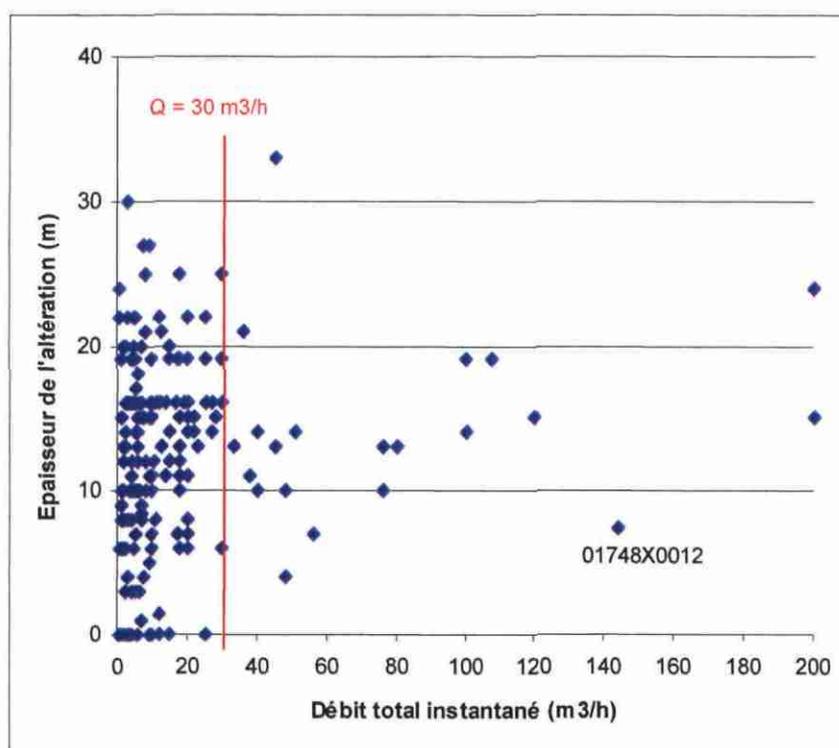


Illustration 18 : Relation entre débit total et épaisseur des altérites

### 3.2.7. Relation entre débits et distance aux failles

Pour chaque forage, la distance à la faille la plus proche a été calculée à partir du canevas structural géoréférencé des cartes géologiques harmonisées. L'illustration 19 présente le résultat graphique de la relation obtenue entre le débit instantané et cette distance.

Une nouvelle fois, le forage 01748X0012 semble se démarquer des autres forages les plus productifs (Illustrations 18 et 19). Il traverse les formations schisteuses de la Laize et de Granville (Briovérien supérieur) sous 3 m de remblai et 4.5 m de schistes altérés. Les venues d'eau ne sont pas décrites, mais il est mentionné un horizon à fortes venues d'eau entre 27 et 31 m (« *Schiste gris très fracturé. Passées gréseuses très altérées.* »). A noter pour la passe supérieure, entre 22 et 27 m, la description suivante : « *Schiste fin noir à filons de quartz tardifs, pyrite en plaque sur la fracturation* ». Les éléments structuraux issus de la carte géologique harmonisée ne sont pas forcément exhaustifs.

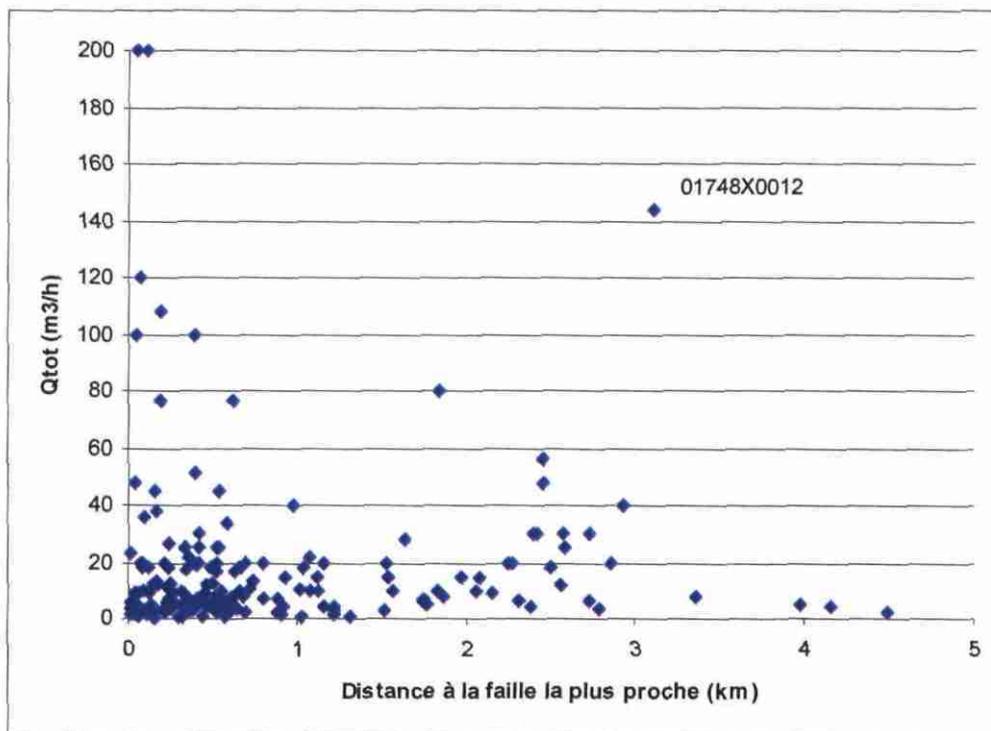


Illustration 19 : Relation entre débit total et distance à la faille la plus proche

Cette analyse pourrait être affinée en considérant uniquement les failles d'orientation représentative des principales classes régionales. L'étude menée en Pays de la Loire n'avait montré aucune corrélation pour ce dernier point.

### 3.2.8. Débit unitaire / longueur des forages sous les altérites

Un biais dans l'analyse des débits est possible à cause de la profondeur différente des forages : quand on dispose des débits à l'avancement (au cours de la foration), on observe, en effet, classiquement une augmentation du débit au droit des venues d'eau. La comparaison entre le débit d'un forage court et celui d'un forage profond doit donc prendre en compte le paramètre profondeur du forage. C'est ce qui est réalisé sur l'illustration 20 où le paramètre analysé est un "débit unitaire", par mètre de forage.

#### • Construction des graphiques :

**Ordonnée** : longueur du forage dans le milieu fissuré.

La longueur du forage dans le milieu fissuré a pour origine la base du niveau d'altération et pour extrémité le fond du forage : c'est la longueur du forage sous le niveau altéré. Trois stades d'altération sont considérés : faible, moyenne, ou très altéré.

**Abscisse** : le débit unitaire est calculé en divisant le débit du forage par la longueur du forage dans le milieu fissuré.

On obtient ainsi les trois schémas correspondant aux trois stades d'altération, plus un quatrième considérant la valeur d'altération des trois stades la plus profonde.

#### • Commentaires :

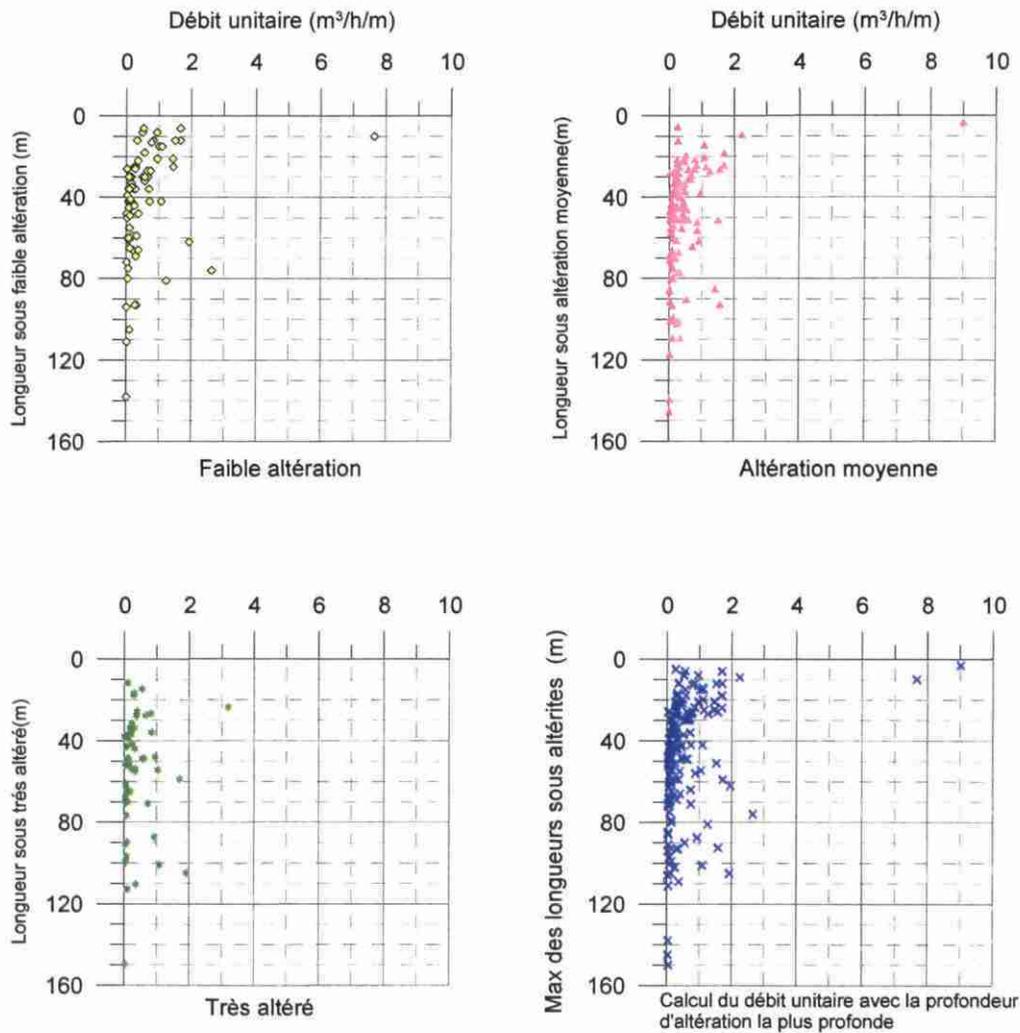
En considérant la profondeur totale d'altération, la médiane du débit unitaire varie de 0.24 à 0.27 m<sup>3</sup>/h/m et la moyenne de 0.45 à 0.55 m<sup>3</sup>/h/m. Les valeurs sont très dispersées : l'écart-type est de 0.9.

A titre comparatif, la moyenne mesurée en Pays de Loire est de 0.16 m<sup>3</sup>/h/m, il est vrai sur un échantillon de forages de profondeur supérieure ou égale à 100 m. Celle de Bretagne dans le projet en cours Silures<sup>1</sup> est de 0.3 m<sup>3</sup>/h/m (Illustration 21). Le débit unitaire moyen des forages semble donc sensiblement plus élevé que celui observé en Pays de Loire et en Bretagne. Cet écart ne peut s'expliquer par une profondeur moins importante que celle des forages de Bretagne (médiane : 49 m, moyenne 53.9 m, écart-type : 27.7 m).

Ces valeurs moyennes de débits unitaires plus importantes pour le Calvados peuvent éventuellement être attribuées à la formation des calcaires karstiques du Cambrien.

---

<sup>1</sup> Projet Silures Bretagne, année 5 (2007) ; B. Mougin, *Com. Pers.*



Débit unitaire = débit par longueur de forage sous un niveau altéré ("faible altération" ou "altération moyenne" ou "très altéré").

- ◇ Longueur du forage sous légère altération (1)
- ▲ Longueur du forage sous altération moyenne (2)
- ★ Longueur du forage sous très altéré (3)
- × Longueur du forage sous altération (quelque soit le degré)

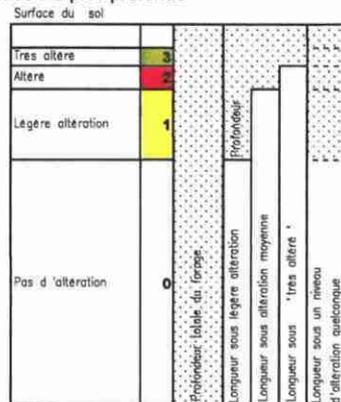
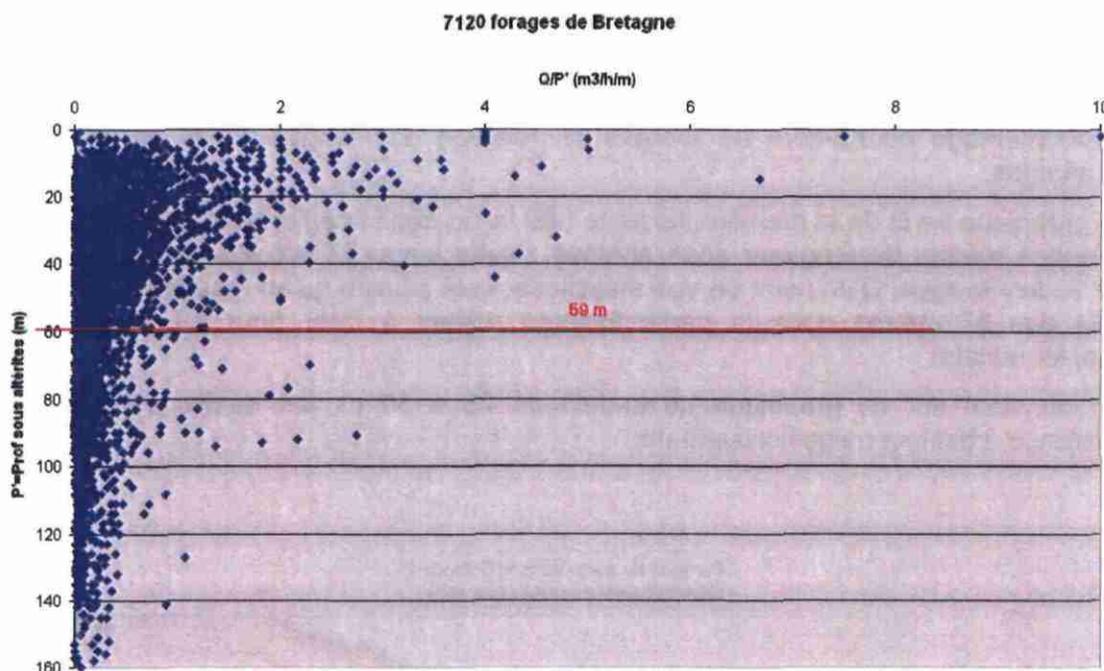


Illustration 20 : Relation entre "débit unitaire" et longueur des forages sous altérites



*Illustration 21 : Relation entre le « débit unitaire » et la longueur des forages sous les altérations (forages de la région Bretagne). Le débit cumulé des forages de moins de 59 m de profondeur (80% de l'échantillon) correspond à 90% de la productivité de l'ensemble des forages*

La majorité des points sur les 4 graphiques ont un débit unitaire compris entre 0 et  $2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ . Ce mode de représentation relativise les débits relativement élevés qui étaient mis en évidence sur l'illustration 10 à plus de 50 m sous la base des altérations.

De manière plus ou moins marquée selon le stade d'altération considéré, le débit unitaire décroît globalement en fonction de la longueur du forage sous les altérites.

### 3.3. DETERMINATION DE L'ÉPAISSEUR UTILE

Le traitement suivant a pour but de proposer une détermination d'épaisseur utile, c'est-à-dire estimer l'épaisseur de la partie fissurée supérieure qui produira l'essentiel du débit du forage. Le traitement est appliqué sur tout le département du Calvados ; les forages sont insuffisamment nombreux pour un calcul sur une sous-catégorie telle que la lithologie par exemple. Le principe est le suivant :

- calculer la somme des débits linéaires de tous les forages, puis calculer le pourcentage de débit linéaire de chaque forage par rapport à ce total ;
- classer les forages par ordre croissant des longueurs de forages sous altérites et calculer (1) le pourcentage cumulé des débits linéaires et (2) le pourcentage cumulé de la position du forage dans le classement (= numéro du forage / nombre total du forage).

Les courbes suivantes sont tracées (Illustration 22) :

- pourcentage cumulé des débits linéaires en fonction des longueurs du forage sous altérites ;
- pourcentage du nombre de forages en fonction des longueurs du forage sous altérites.

Le graphique se lit de la manière suivante : 80 % du débit linéaire est fourni par les 57 premiers mètres de longueur sous altérites ; cette longueur est atteinte par environ 70 % des forages. D'un point de vue statistique, cela signifie qu'en moyenne, forer au-delà des 57 mètres dans la partie fissurée revient à forer pour 20 % de débit supplémentaire.

On constate sur ce graphique qu'au-delà de 25 à 30 m, les débits linéaires ont tendance à diminuer significativement.

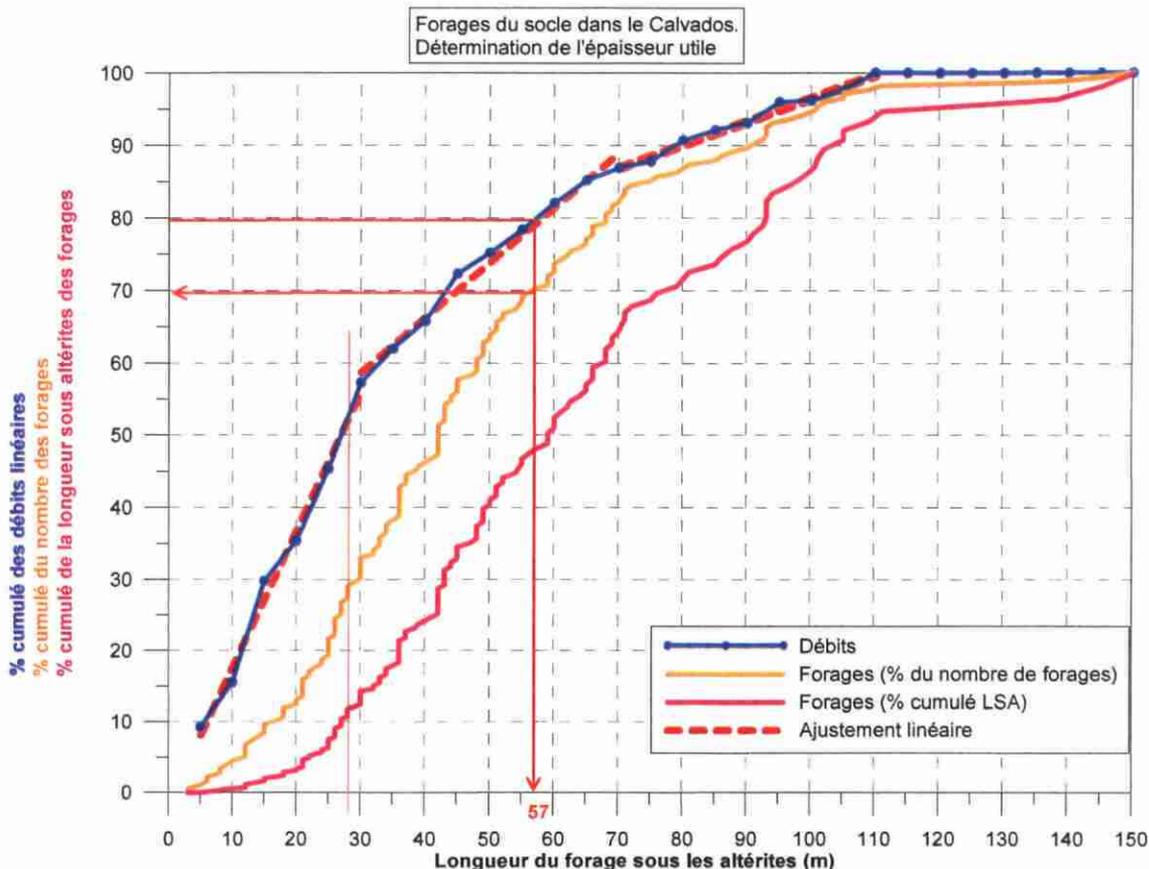


Illustration 22 : Détermination de l'épaisseur utile

Encore une fois, il est rappelé que l'épaisseur utile ainsi déterminée est globalisante vis-à-vis de l'échantillon traité et ne tient pas compte du contexte morfo-structural des forages.

### 3.4. CONCLUSIONS / PERSPECTIVES

#### • Principales observations sur les données de forages :

Les débits totaux par forage sont conformes aux valeurs observables en domaine de socle avec une valeur médiane de 9 m<sup>3</sup>/h.

Les débits linéaires sont *a priori* sensiblement supérieurs à ceux qui s'observent dans d'autres régions du socle proche (Bretagne et Pays de Loire). Ceci peut s'expliquer par la présence dans le Calvados de la formation des Schistes et calcaires, karstifiée et localement très productive. Le débit linéaire décroît avec la longueur du forage sous les altérites, et plus particulièrement à partir de 25-30 m sous les altérites.

Il ne semble pas y avoir de relation entre le débit total de l'ouvrage et sa profondeur. Cette remarque est à nuancer pour les forages produisant plus de 50 m<sup>3</sup>/h, mais les forages sont trop peu nombreux (12) dans cette classe pour en tirer des conclusions.

En moyenne, les valeurs de débits instantanés les plus faibles ont été observées au niveau des granodiorites et des cornéennes.

Enfin, en première analyse, l'épaisseur des altérites ne semble pas influencer le débit total par forage.

#### • Complément d'études :

Les forages du socle sont correctement renseignés et les données sont aisément manipulables à partir d'un fichier MS-Excel. Des traitements complémentaires pourraient, par conséquent, être envisagés :

- étude des relations entre débit et contacts lithologiques : est-ce que les forages à fort débit se situent à proximité de changements de lithologie ? (aucune corrélation mise en évidence en Pays de la Loire) ;
- étude des relations entre débit et distance aux failles d'orientation représentative des principales classes régionales.

D'un autre côté, un examen détaillé des 12 forages les plus productifs (et ou des forages ayant une assez forte productivité unitaire à moyenne profondeur) pourrait être mené afin d'identifier plus précisément, à l'échelle du forage, des facteurs favorables à de forts débits. L'étude du contexte morpho-structural de chacun devra, en particulier, être réalisée.

Enfin, il serait très intéressant, comme cela a été souligné par le Comité de Pilotage, d'étendre cette étude aux départements de la Manche et de l'Orne. Une approche régionale permettrait notamment de disposer d'un échantillon de forages plus important.



## 4. Cartographie de l'épaisseur actuelle des altérites

### 4.1. DONNEES COLLECTEES

#### 4.1.1. Source et nature des données

Différentes données ont été exploitées pour la modélisation de l'épaisseur des altérites :

- les logs géologiques disponibles en BSS. Il est rappelé que la BSS avait été enrichie suite à la consultation des archives de la DDE du Calvados et du Conseil Général du Calvados (Rapport BRGM/RP-54791-FR, 2006) ;
- les cartes géologiques harmonisées au 1 / 50 000 des départements de la Manche, de l'Orne et du Calvados ;
- le Modèle Numérique de Terrain au pas de 50 m de l'IGN.

Au final, 342 logs géologiques ont pu être utilisés (Illustration 24) :

- 263 logs dans le Calvados ;
- 57 logs dans la Manche ;
- 22 logs dans l'Orne.

Chacun de ces logs a été réinterprété selon la méthodologie du RGF (Référentiel Géologique Français) : description normalisée pour la lithologie, la formation et la stratigraphie pour chaque passe. Un exemple de ce codage est présenté par l'illustration 23.

Malgré une faible densité, la répartition des logs disponibles en domaine de socle apparaît relativement homogène (Illustration 24).

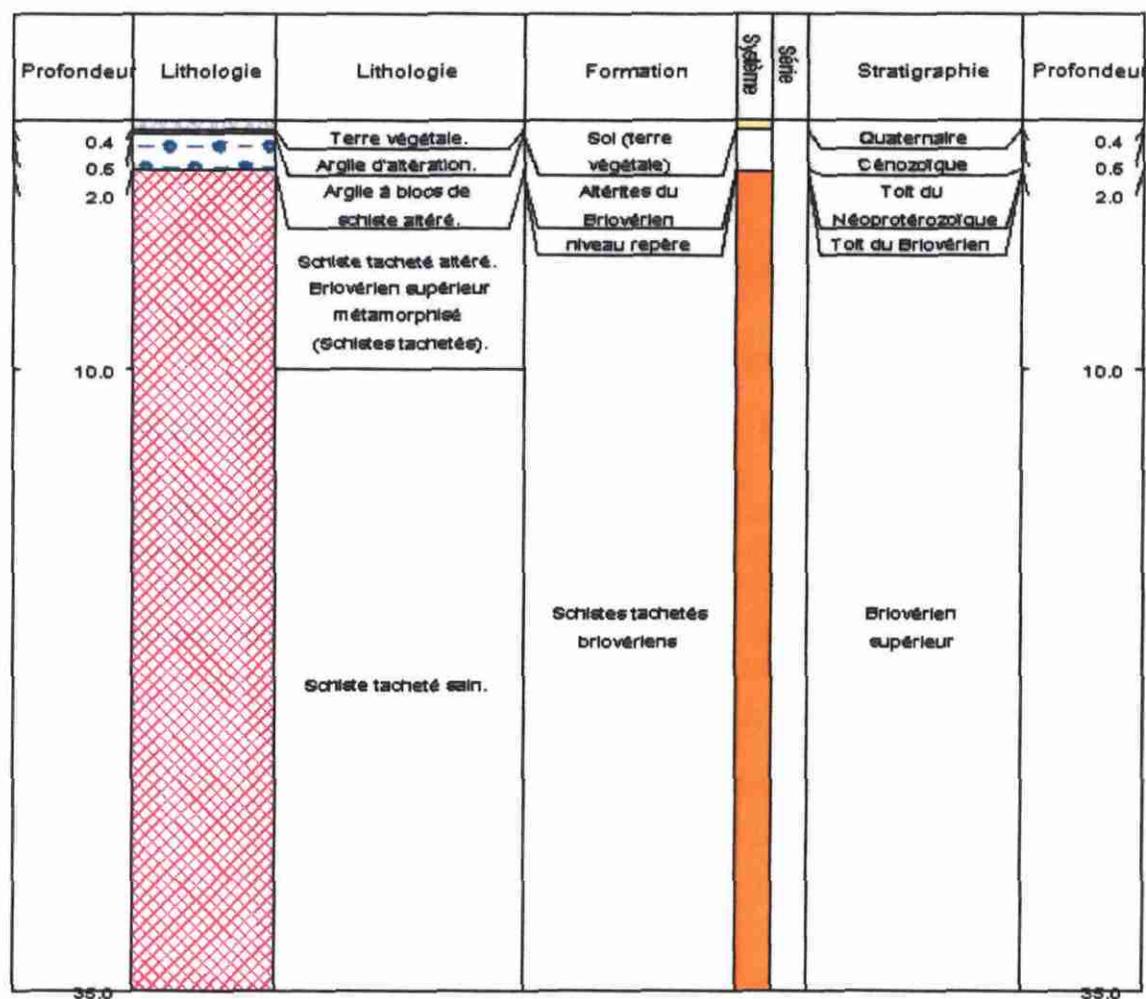


Illustration 23 : Représentation du log géologique validé de l'ouvrage n° 01748X0011 (commune de Bernières-le-Patry)

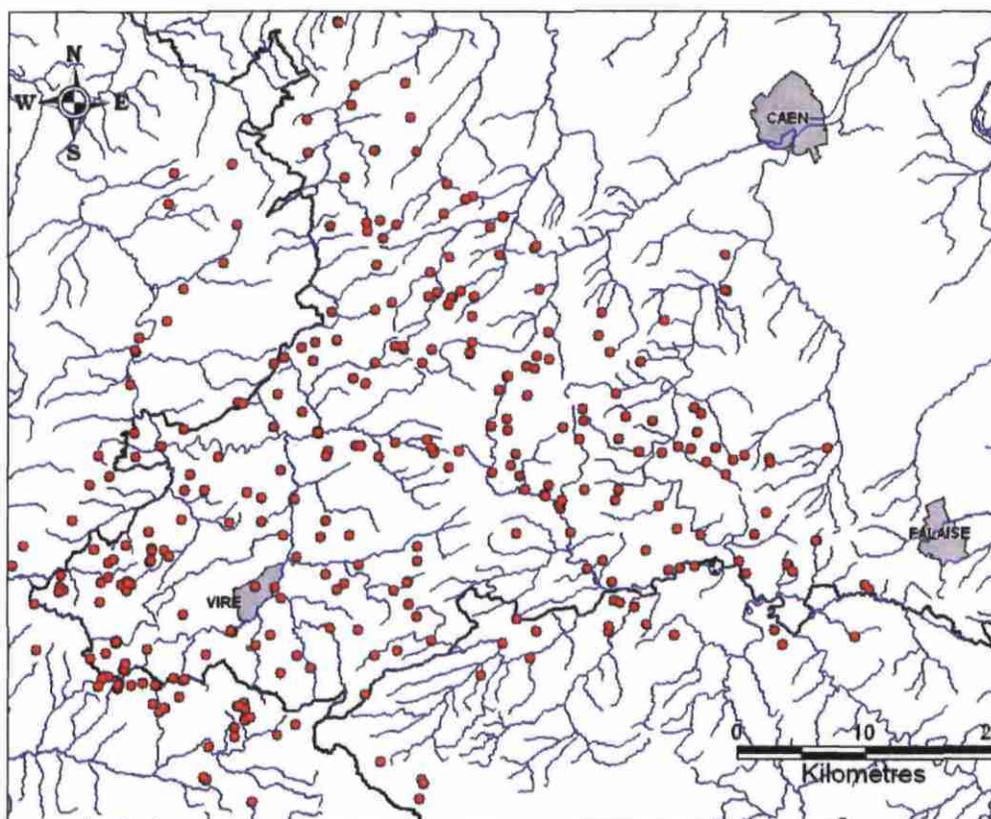


Illustration 24 : Répartition des logs géologiques utilisés pour la modélisation des altérites

#### 4.1.2. Analyse statistique générale

En première approche, une brève analyse statistique des données disponibles sur l'épaisseur des altérites a été menée (Illustration 25). Sur l'ensemble des 342 logs exploités, seuls 265 traversent des horizons altérés.

L'épaisseur des altérites varie de 0.5 à 25 m pour une valeur médiane égale à 7.5. Trois classes de valeur sont majoritairement représentées : 0-5 m / 5-10 m / 10-15 m. Seuls 8 % de l'échantillon présentent une épaisseur d'altérites supérieure à 15 m (Illustration 25).

Nbre de valeurs utilisées	265
Minimum	0.5
Médiane	7.5
Maximum	25
Moyenne	8.3
CV (écart-type / moyenne)	0.6
Variance d'échantillon	24.3
Ecart-type d'échantillon	4.9

Illustration 25 : Statistiques sur l'épaisseur des altérites décrites en forage

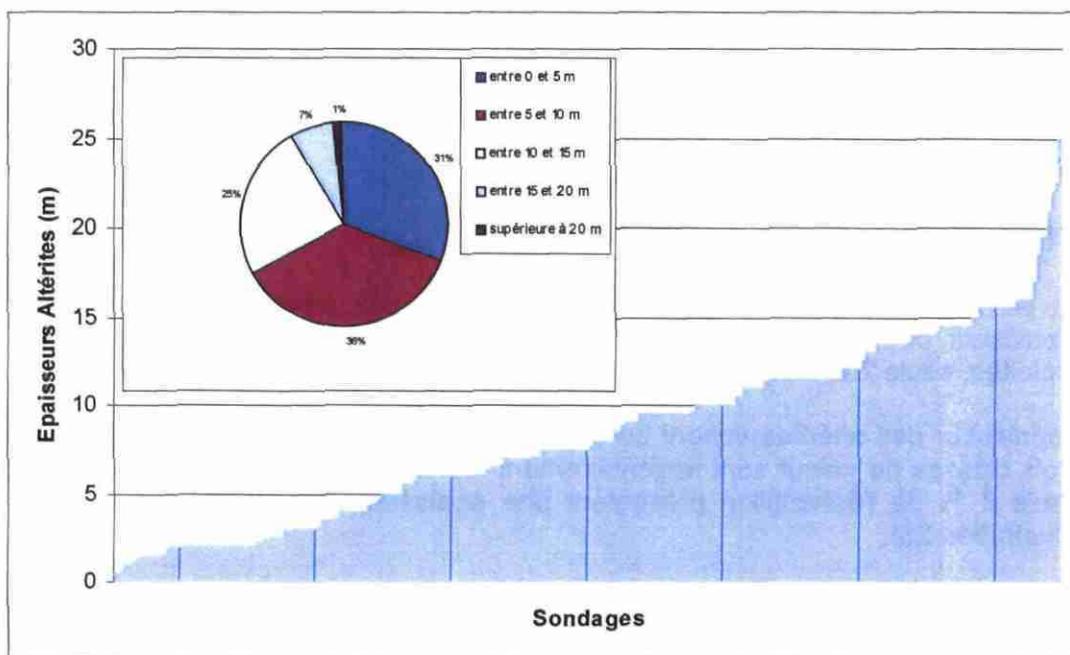


Illustration 26 : Distribution des épaisseurs d'altérites sur l'échantillon de sondages disponibles

Par ailleurs, il ne semble exister aucune corrélation entre l'épaisseur des altérites et la cote altimétrique de la tête de sondage (Illustration 27).

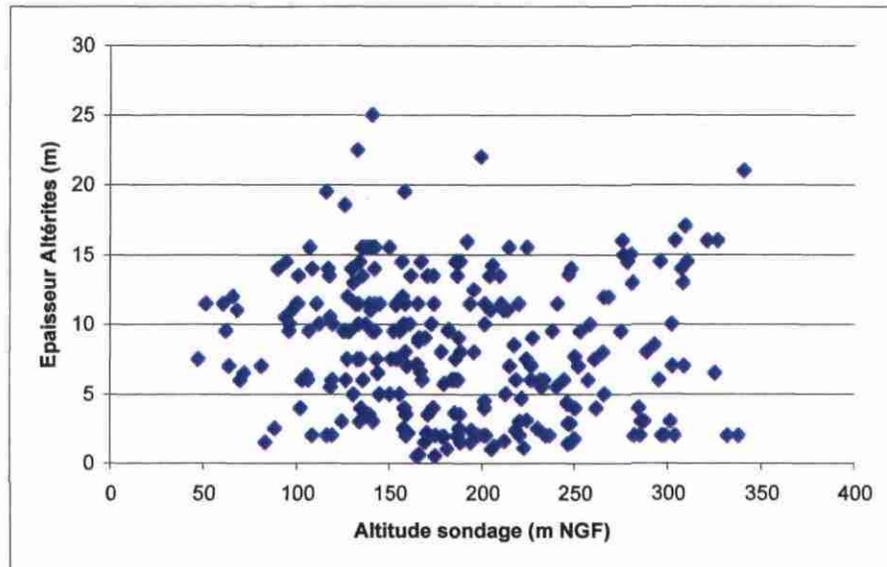


Illustration 27 : Epaisseur des altérites et altitude des sondages

#### 4.1.3. Relation altération / lithologie

Dans le but d'étudier les éventuelles variations d'épaisseur des altérites avec la lithologie, il a été procédé au même regroupement que celui effectué au paragraphe 3.2.5.

L'illustration 28 présente pour chacune de ces familles lithologiques les valeurs minimales, maximales, moyennes et médianes.

Le seul enseignement qui semble pouvoir être tiré de cette analyse sur la lithologie est une épaisseur moyenne d'altérites moindre sur les massifs granitiques : valeur médiane de 5 m contre 8 m pour les grès primaires et 9.5 m pour les schistes briovériens.

Peu de forages (12) traversant la formation des Schistes et calcaires cambriens, il est impossible de dégager une tendance pour cette dernière.

<b>A dominante schisteuse</b>	Min.	0.5
	Max.	22.5
	<b>Moyenne</b>	<b>8.9</b>
	<b>Médiane</b>	<b>9.5</b>
	Nb. Val.	121
<b>Granitoïdes</b>	Min.	0.5
	Max.	21
	<b>Moyenne</b>	<b>6.7</b>
	<b>Médiane</b>	<b>5</b>
	Nb. Val.	59
<b>Cornéennes et Schistes tachetés</b>	Min.	1
	Max.	25
	<b>Moyenne</b>	<b>9.0</b>
	<b>Médiane</b>	<b>9.3</b>
	Nb. Val.	30
<b>A dominante gréseuse</b>	Min.	1.25
	Max.	15.5
	<b>Moyenne</b>	<b>8.2</b>
	<b>Médiane</b>	<b>8</b>
	Nb. Val.	40
<b>Schistes et Calcaires (Cambrien karstique)</b>	Min.	3
	Max.	13.5
	<b>Moyenne</b>	<b>7.5</b>
	<b>Médiane</b>	<b>7.1</b>
	Nb. Val.	12

Illustration 28 : Epaisseur des altérites en fonction de la lithologie

#### 4.2. MODELISATION DE L'ÉPAISSEUR DES ALTERITES

Les calculs ont été effectués avec l'aide des logiciels GDM (calcul d'interpolation) et Multilayer (contrôle de données et élaboration de modèle multicouche), deux outils développés par le brgm.

Le fonctionnement du modèle Multilayer est basé sur trois principes, détaillés dans la suite du paragraphe :

- la définition d'une « pile stratigraphique » qui décrit la succession des formations et les relations entre deux formations successives ;
- l'interprétation des données (leur codage) selon le cadre fourni par cette pile ;
- l'interpolation des surfaces et leur combinaison en fonction des données et de la logique induite par la pile stratigraphique.

#### 4.2.1. Structure du modèle géologique

La pile stratigraphique du modèle est décrite par :

- l'ordre chronologique de dépôt des formations à modéliser ;
- les relations entre formations successives qui peuvent être de deux types : (1) ONLAP : dépôt d'une formation sur la précédente et (2) EROD : il y a une surface d'érosion entre deux formations.

Cette logique d'organisation des formations permet au logiciel de combiner automatiquement les interpolations de façon à reconstituer un modèle 3D topologiquement correct. L'illustration ci-après donne un exemple de pile stratigraphique permettant de modéliser la coupe dessinée sur cette même figure :

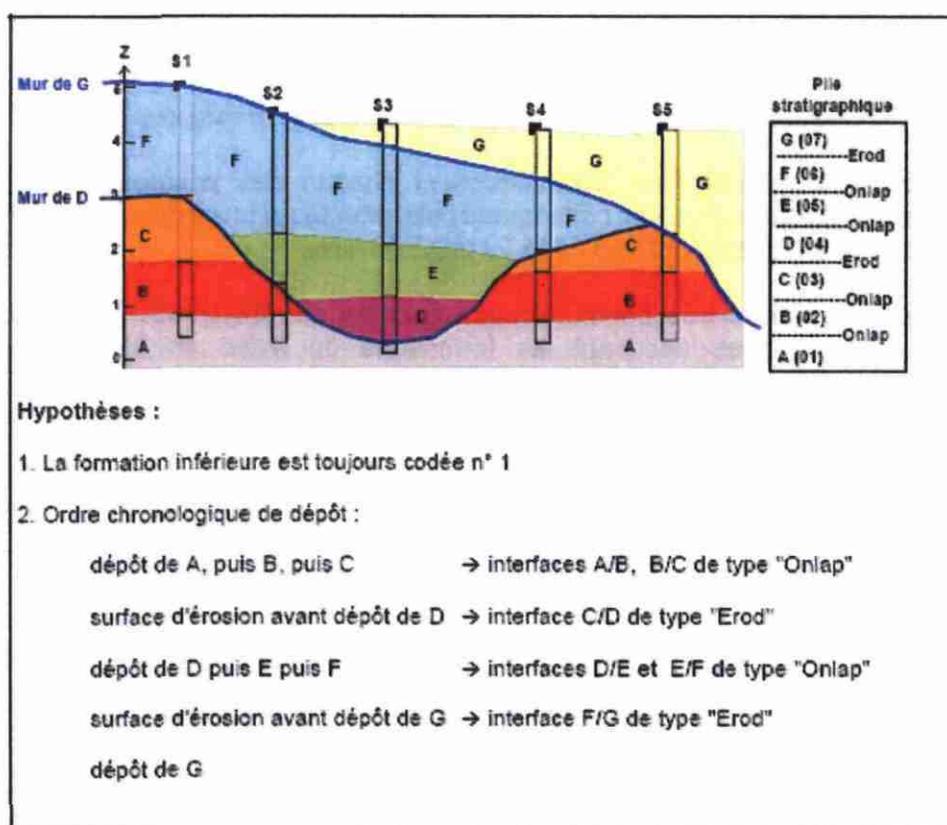


Illustration 29 : Exemple d'une coupe géologique et de la pile stratigraphique associée sous MultiLayer

Le modèle géologique retenu est un modèle multi-couche composé de 5 couches distinctes (Illustration 30) : alluvions, autres formations superficielles du Tertiaire et Quaternaire, les altérites de socle, les Grès ordoviciens et les autres formations de socle. Seule la couche des alluvions a été définie comme érosive.

PILE STRATIGRAPHIQUE MODELISEE D:\Partage\bt2006-socle\alte2.mly				
Formation	Surf. type	Description	Surf. name	n° FORM
F	EROD	Alluvions	M05	F05
CNZQ		Tertiaire	T03	F04
ALT		Altérites	T02	F03
GQZ		Gres armoricains	T01	F02
SAIN		Socle		F01

*Illustration 30 : Définition des couches du modèle géologique*

Chacune des passes des logs géologiques et chacun des polygones des cartes géologiques numériques ont, par conséquent, été affectés d'un code correspondant à l'une de ces cinq couches (F / CNZQ / ALT / GQZ / SAIN).

Les altérites n'étant que très ponctuellement décrites sur les cartes géologiques au 1/50 000, les polygones décrivant les formations du socle ont du, à quelques exceptions près, être codés en altérites.

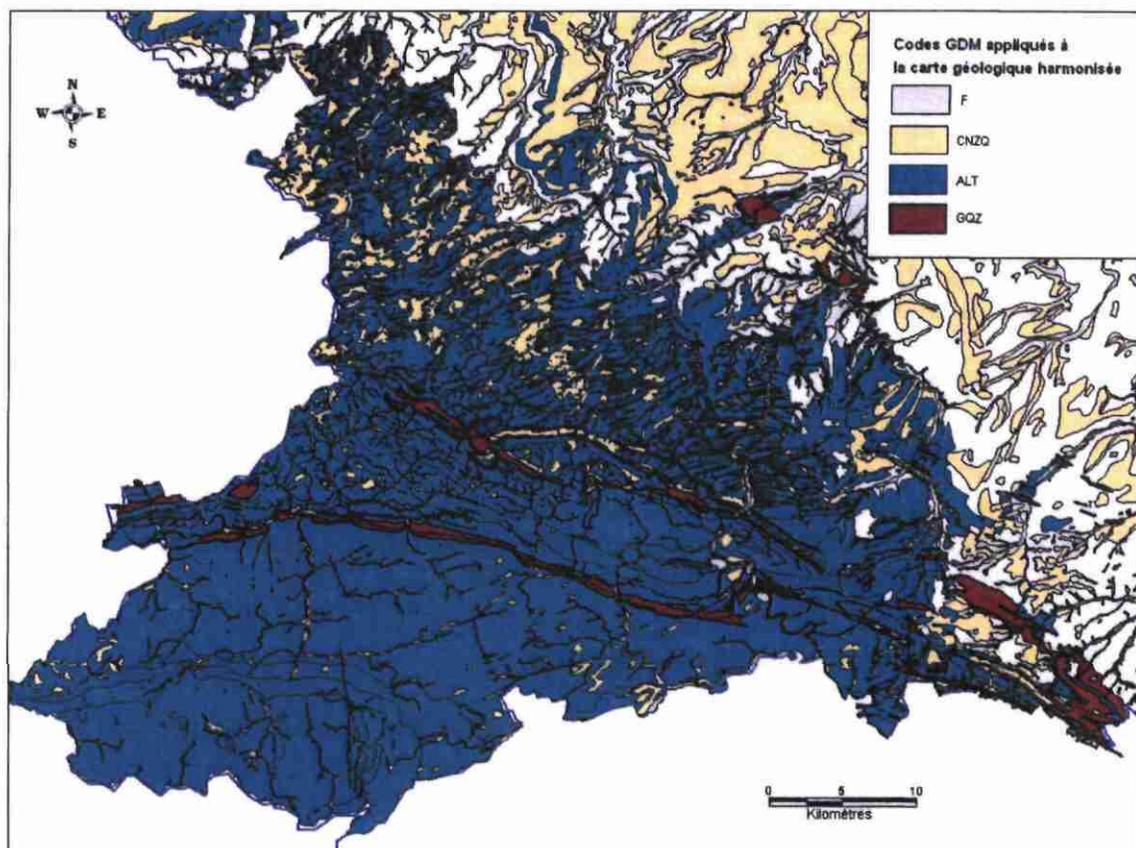


Illustration 31 : Carte géologique du Calvados au 1 / 50 000 codée selon la "pile stratigraphique" retenue

#### 4.2.2. Hypothèses de calcul

La modélisation s'est appuyée sur plusieurs hypothèses simplificatrices :

- la modélisation a tout d'abord été réalisée sans intégration d'un jeu de faille (pas de discontinuité dans les calculs d'interpolation). Etant donné la complexité du canevas structural sur la zone d'étude et le peu de logs disponibles, le calcul aurait été interrompu en de trop nombreux secteurs.
- Il est, cependant, rappelé que la couche SIG des éléments structuraux du Calvados fait partie des livrables de la présente étude.
- en fond de vallée, dans le but de contraindre le modèle, il a été considéré que les alluvions reposaient directement sur le socle fissuré ou sain (absence d'horizon altéré).
- enfin, la dernière hypothèse retenue a consisté à considérer l'absence d'altérites sur les grès ordoviciens formant les lignes de crêtes de la zone bocaine (§ 2.1). Les formations concernées sont : les Grès de Caumont, les Grès de May-sur-Orne, les Grès armoricains et les Grès pourprés. Les polygones de la carte géologique harmonisée, propres à ces formations, ont donc été affectés d'un code particulier

(GQZ). Malgré des duretés importantes, les logs indiquent tout de même un profil d'altération d'ordre métrique à pluri-métrique sur ces formations. Cette simplification s'est, cependant, avérée indispensable pour éviter des surépaisseurs importantes sur les lignes de crêtes.

#### 4.2.3. Contrôle de cohérence

Après le codage des données, le logiciel Multilayer permet de contrôler la cohérence des données entre elles :

- cohérence entre les forages voisins ;
- cohérence entre la carte géologique et les forages.

Pour lever les incohérences mises en évidence, un retour à l'analyse des logs géologiques est indispensable. Cela a conduit à réinterpréter certains forages et à en écarter d'autres de la base de données.

#### 4.2.4. Calcul des contraintes d'inégalités

Les contacts entre deux formations le long d'un forage fournissent des points de passage. De telles données sont appelées « exactes » dans le sens où elles sont observées et où on a effectivement la cote précise du contact.

Les données de sondages peuvent également fournir des contraintes d'inégalités sur les surfaces à construire. L'illustration 32 représente les deux principaux types d'inégalités rencontrées :

- pour un forage se terminant à la cote ZFin dans une formation (mur non atteint), ici les altérites, ZFin fournit une borne supérieure du mur de la formation ALT :  $Mur\_ALT \leq ZFin$  ;
- en présence de lacunes sur un forage (tronçon de forage non récupéré, ou tronçon pour lequel on n'a pu déterminer la nature de la formation), on a l'inégalité suivante :  $Z2 \leq Mur\_ALT \leq Z1$ .

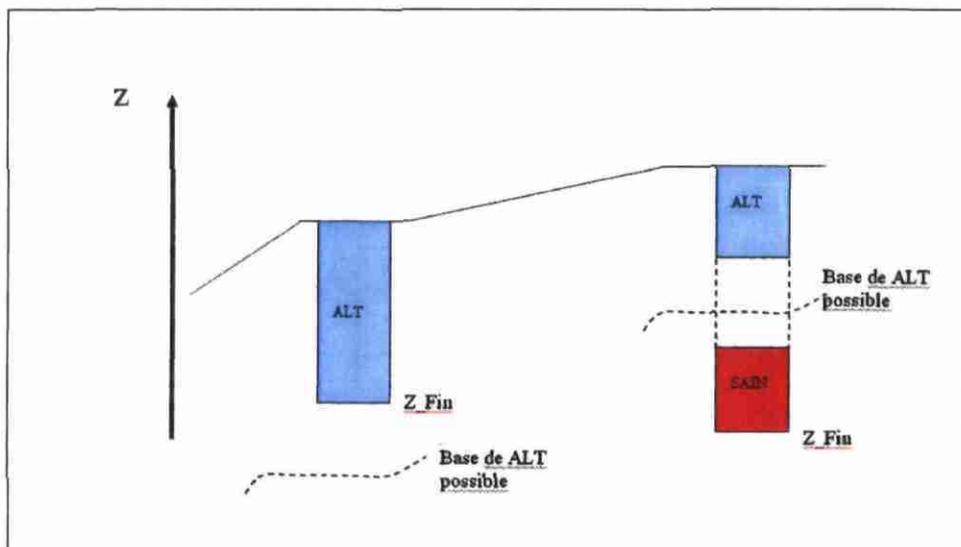


Illustration 32 : Les principales données d'inégalités pour un forage

Une des autres étapes de la modélisation est donc de calculer ces contraintes d'inégalités qui permettent d'ajouter des points de passage.

#### 4.2.5. Interpolation des surfaces

La méthode d'interpolation consiste en un krigeage linéaire sans dérive. Les grilles ont été calculées avec une maille de 200 mètres de côté.

Le voisinage d'interpolation a été fixé à 15 000 mètres, c'est-à-dire que le calcul est possible, sans donnée exacte, sur une distance maximale de 15 km.

Un seuil de fusion de 50 m a été retenu. Ce seuil de fusion consiste à moyenniser des points proches au droit desquels la valeur d'une même variable est connue simultanément (Illustration 33).

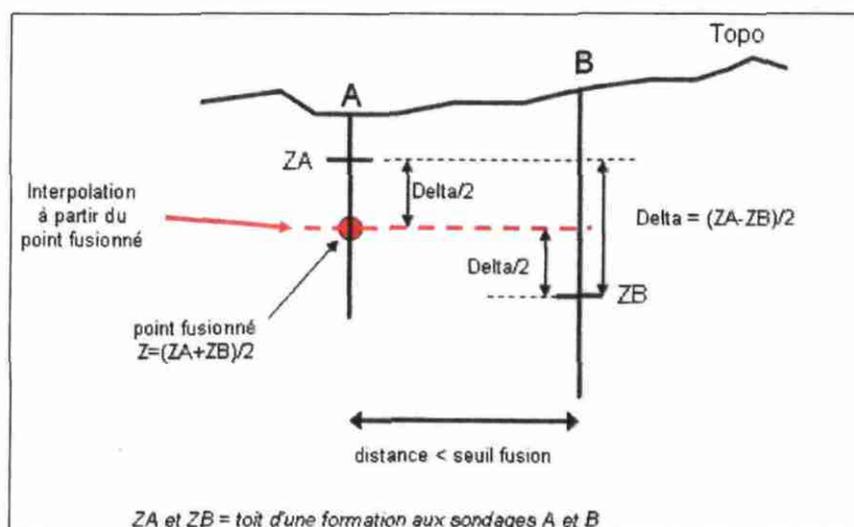


Illustration 33 : Seuil de fusion et conséquence sur l'interpolation

Après la longue phase de contrôle géométrique des données et de mise en cohérence, une succession de grilles de « premier niveau » a été obtenue : grilles satisfaisant les contraintes géométriques mais pas forcément réalistes d'un point de vue géologique.

Les erreurs les plus grossières, liées au calcul et au faible nombre de « données exactes » nous ont obligés à créer des points fictifs, points destinés à forcer l'interpolation à produire une grille cohérente avec un modèle géologique connu.

Le recours à des points fictifs a plus particulièrement été nécessaire pour contraindre l'interpolation d'une manière générale dans des zones où aucune donnée de forage n'était disponible et où les premiers résultats s'avéraient aberrants (surestimation des épaisseurs d'altérites).

L'ensemble de ces opérations longues et itératives nous a permis d'élaborer une première cartographie de l'épaisseur des altérites à l'échelle du département.

A partir de la grille finale, les isopaques ont été tracées à l'aide du logiciel ArcGis et finalement lissées et nettoyées manuellement.

### 4.3. LIMITES DE LA MODELISATION

Le présent paragraphe a pour objectif de préciser les principales difficultés rencontrées et, par voie de conséquence, les principales sources d'incertitudes relatives au résultat obtenu.

#### 4.3.1. Données disponibles et échelle de travail

Pour les formations briovériennes et paléozoïques comme pour les granodiorites, l'épaisseur actuelle des altérites se présente sous la forme de fines couches voire de poches localisées, guidées en particulier par la fracturation. A l'origine, les altérites étaient probablement plus développées, mais elles ont été en majeure partie décapées (Wyns, 2000).

Or, avec une échelle de travail départementale, une fine couche géologique devient difficile à modéliser, notamment en raison des incertitudes associées au MNT (pas de 50 m) et à la localisation des forages. Les altitudes des têtes de forage ont dû être projetées sur le MNT pour rendre possible la modélisation ( $Z_{\text{forage}} = Z_{\text{MNT}}$ ). La fine épaisseur des altérites peut, en effet, être de l'ordre de l'erreur entre l'altitude de la tête de forage indiquée en BSS et celle indiquée par le MNT.

Par ailleurs, les variations ponctuelles des épaisseurs (poches d'arènes ou développement à la faveur d'une faille par exemple) n'ont pu être approchées compte tenu du peu de logs géologiques disponibles.

Enfin, toujours en raison de ces faibles épaisseurs et d'une répartition très hétérogène, les altérites n'ont été que très rarement représentées sur les cartes géologiques au 1 / 50 000. Comme nous l'avons vu précédemment, les formations du socle ont donc dû être codées en altérites lors de la construction du modèle géologique. Une telle couverture systématique par des altérites engendre inévitablement, en l'absence de données de forages, une surestimation des épaisseurs en sommet de plateau.

**La finesse du profil d'altération et la forte variabilité des épaisseurs associées à une faible densité de forages ont, par conséquent, constitué la principale difficulté d'une modélisation géométrique à l'échelle départementale.**

#### 4.3.2. Interprétation des logs géologiques

Un des principaux problèmes rencontrés lors de l'interprétation des logs géologiques a concerné la fiabilité et la qualité des descriptions des terrains traversés. La qualité des informations fournies dans les dossiers BSS est essentiellement fonction de l'auteur de la coupe descriptive des terrains, la description lithologique étant très différente suivant la profession de l'auteur. Or, pour la très grande majorité des ouvrages sélectionnés, il s'agit de « coupes foreurs », très sommaires.

Il n'a donc pas toujours été facile d'identifier précisément les surfaces d'altération. Nous nous sommes appuyés sur les descriptions relatives aux couleurs, à la texture ou

encore sur les indications de venues d'eau. Cette difficulté a été renforcée du fait de l'emploi de terminologies très variées d'une entreprise de forage à l'autre mais également au sein d'une même entreprise.

#### **4.3.3. Maille de calcul**

Compte tenu de la faible densité des forages et d'une échelle de travail départementale, il n'était pas envisageable de travailler sur des mailles de calcul inférieures à 200 m. Cela signifie que la valeur du MNT finale de la maille de calcul correspond à la moyenne des valeurs sur cette même maille.

Il apparaît donc clairement que l'erreur peut-être importante dans les zones de vallées. Cette erreur sur la topographie se reportera ensuite sur les différentes interfaces calculées puisqu'il est rappelé que l'altitude des contacts géologiques et des têtes de forage est donnée par la cote topographique du MNT. En outre, il faut garder présent à l'esprit que la précision du MNT au pas de 50 m est déjà de l'ordre de 5 à 10 m selon le relief.

#### **4.3.4. Conclusion**

**Au vu de l'ensemble des observations faites précédemment, la carte proposée n'est donc pas une cartographie fine des altérites mais une carte prédictive dont l'objectif est de faire ressortir au mieux les principales tendances régionales.**

Il a été décidé par le Comité de Pilotage d'associer à chaque carte une notice d'utilisation (une page A4 au format Acrobat Reader) rappelant ses incertitudes et ses limites d'usages.

Dans la mesure du possible, la modélisation devra être mise à jour avec l'acquisition de nouvelles connaissances.

## **4.4. PRESENTATION DES RESULTATS**

La cartographie de l'épaisseur actuelle des altérites de socle dans le Calvados est présentée en Annexe 2 au format A3. Celle-ci est également jointe au présent rapport au format A0 (échelle 1 / 125 000).

### **4.4.1. Clefs de lecture de la carte**

Par soucis de lisibilité, les isopaques n'ont pas été reportées sur la cartographie au format papier mais la couche numérique correspondante fait bien partie des livrables.

Le mode de représentation pour la cartographie de l'épaisseur actuelle des altérites est donc une coloration continue de la grille de calcul avec distinction de 5 classes de valeur : 0-5 m / 5-10 m / 10-15 m / 15-20 m et supérieure à 20 m.

Les secteurs non cartographiés (« blancs ») correspondent aux affleurements des Grès ordoviciens pour lesquels nous avons fait l'hypothèse d'une altération nulle.

L'ensemble des sondages utilisés pour le calcul a été reporté sur la cartographie. Compte tenu des limites du travail réalisé (§ 4.3), il est, en effet, impératif de lire la carte en tenant compte de cette couche d'information : en l'absence de sondages à proximité, les épaisseurs calculées sont à affecter d'une incertitude importante. Cette information doit donc permettre à l'utilisateur du document de garder un regard critique sur les résultats proposés.

### **4.4.2. Résultats cartographiques**

D'une manière générale, les classes de faibles épaisseurs sont largement majoritaires avec 50 % de la superficie de la zone modélisée concernée par des épaisseurs inférieures à 6 m et 75 % par des épaisseurs inférieures à 13 m.

Pour les formations briovériennes et paléozoïques, les épaisseurs maximales ont été calculées sur les zones élevées, et plus particulièrement sur les versants des lignes de crêtes du synclinorium de la Zone bocaine. Cette tendance est confirmée par plusieurs notices des cartes géologiques de la zone d'étude.

L'autre secteur dont l'épaisseur des altérites briovériennes est reconnue importante (carte géologique de Villers-Bocage), à proximité des contacts avec la couverture sédimentaire mésozoïque notamment entre Curcy-sur-Orne et Amayé-sur-Orne à l'ouest de l'Orne, semble avoir été correctement modélisé.

En ce qui concerne le massif granitique, les épaisseurs moyennes sont de moindre importance comme annoncée par l'analyse statistique réalisée sur les données de forages (§ 4.1.3). Les épaisseurs maximales ont été calculées sur les hauteurs mais, dans la très grande majorité des cas, elles n'ont pas été contrôlées par des données

de forages. Ces valeurs importantes en sommet de plateau sont probablement surestimées.

Par ailleurs, d'après la notice de la carte géologique de Vire, les arènes granitiques se cantonneraient essentiellement dans deux zones : l'extrémité orientale du massif et les bordures du fossé de Saint-Germain-de-Tallevende. Ces tendances ne sont pas retrouvées par le modèle.

Il est à signaler que très peu de forages décrivent les arènes granitiques dans le Calvados (28), aussi, pour les différentes raisons déjà évoquées précédemment, les résultats sont à prendre avec beaucoup de précautions pour cette formation.

## 5. Conclusions

**L'étude sur les débits de forage** a permis de dresser le bilan des données disponibles pour le département du Calvados et d'en tirer les enseignements suivants :

- les débits totaux par forage sont conformes aux valeurs observables dans les contextes de socle avec une valeur médiane de 9 m<sup>3</sup>/h ;
- les débits linéaires sont *a priori* sensiblement supérieurs à ceux qui s'observent dans d'autres régions du socle proche (Bretagne et Pays de Loire). Ceci peut s'expliquer par la présence dans le Calvados de la formation des Schistes et calcaires, karstifiée et localement très productive. Le débit linéaire décroît avec la longueur du forage sous les altérites, et plus particulièrement à partir de 25-30 m sous les altérites ;
- il ne semble pas y avoir de relation entre le débit total de l'ouvrage et sa profondeur ;
- en moyenne, les valeurs de débits instantanés les plus faibles ont été observées au niveau des granodiorites et des cornéennes ;
- enfin, en première analyse, l'épaisseur des altérites ne semble pas influencer le débit total par forage.

Les données ont été archivées au format Excel© et pourront ainsi faire l'objet de traitements complémentaires sans aucune difficulté. Il serait notamment très intéressant d'étendre l'étude aux départements de la Manche et de l'Orne et d'étudier dans le détail les forages les plus productifs, et en particulier leur contexte morpho-structural.

En parallèle, **une carte de l'épaisseur actuelle des altérites de socle** a été élaborée à partir des logs géologiques disponibles en BSS et de la carte géologique harmonisée au 1 / 50 000. Les incertitudes liées à la cartographie sont nombreuses, en particulier pour le massif granitique. Par conséquent, son objectif est de mettre en évidence les principales tendances régionales dont les zones à plus forte épaisseur d'altérites.

La mise à jour de ce document cartographique apparaît indispensable avec l'acquisition de nouvelles données.

En complément du présent rapport, **les livrables relatifs à ce volet de l'Atlas hydrogéologique numérique du Calvados** sont composés de :

- la base de données des débits en forage (format Excel) ;
- la base de données des logs géologiques codés exploités pour la modélisation (formats Excel, MapInfo et Arcview) ;
- le tracé des isopaques des altérites (formats MapInfo et ArcView) ;
- le raster géoréférencé résultant de la grille de calcul (formats MapInfo et ArcView).



## 6. Références bibliographiques

**Bourgine B.** – Août 2006 – Modélisation géologique 3D à l'aide du programme MultiLayer. Rapport BRGM/RP-53111-FR.

**BRGM** – Novembre 1997 – Recherche de sites potentiels de roches dures dans l'Est de la Région Basse-Normandie et dans la Sarthe. Rapport BRGM/R39778.

**Caballero Y., Blaise M., Renoir A., Noël Y., Petit V.** – Avril 2006 – Retour d'expérience sur les forages réalisés en Corse du Sud dans les zones de socle granitique. Rapport BRGM/RP-54140-FR.

**Caballero Y., Lachassagne P., Ladouche B.** – Avril 2006 – Contribution à l'évaluation de la ressource en eau des aquifères de socle des roches granitiques de Corse. Rapport BRGM/RP-54541-FR.

**Doré F., Dupret L.** – 1993 – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille de Condé-sur-Noireau (n° 175). BRGM.

**Gigot P., Dupret L., Le Gall J.** – 1999 – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille de Falaise (n° 176). BRGM.

**Lachassagne P., Wyns R.** – Décembre 2001 – Structure and functioning of hard rock aquifers in Korea. Korea-France Co-operation Programme on Groundwater Assessment. Rapport BRGM/RC-51400-FR.

**Lachassagne P. et al** – Janvier 2005 – Nouveaux outils et méthodes pour gérer et protéger la ressource en eau souterraine des régions de socle. Hydrosciences, n° 25.

**Minoux L., Janjou D., Langevin C.** – 1987 – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille de Vire (n° 174). BRGM.

**Mougin B., Thomas E.** – 2003 – Transfert des polluants par ruissellement et écoulement souterrain sur le bassin versant de la rade de Brest (Finistère). Rapport BRGM/RP-52655-FR.

**Mougin B. et al** – Novembre 2003 – Comportement hydrodynamique des roches altérées de la surface sur le bassin versant de la rade de Brest. Rapport BRGM/RP-52656-FR.

**Mougin B. et al** – Janvier 2004 – Qualité des eaux en Bretagne. Ruissellement-Infiltration-Temps de réponse. Bassins versants du Yar (22), de l'Horn (29) et du Coët Dan (56). Rapport BRGM/RP-52656-FR.

**Petit V., Lachassagne, Rouxel, Baudouin, Lereculey** – Octobre 2007 – Détermination de contextes favorables à la présence de ressources en eau souterraine de moyenne profondeur en domaine de socle, Département de Loire-Atlantique. Rapport provisoire– 61 pages – 2 Annexes - 33 Illustrations.

**Vernhet Y., Baize S., Coutard J.-P., Langevin C.** – 1999 – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille de Balleroy (n° 118). BRGM.

**Vernhet Y., Lerouge G., Hervy V., Besombes J.-C., Langevin C.** – 2000 – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille de Torigni-sur-Vire (n° 144). BRGM.

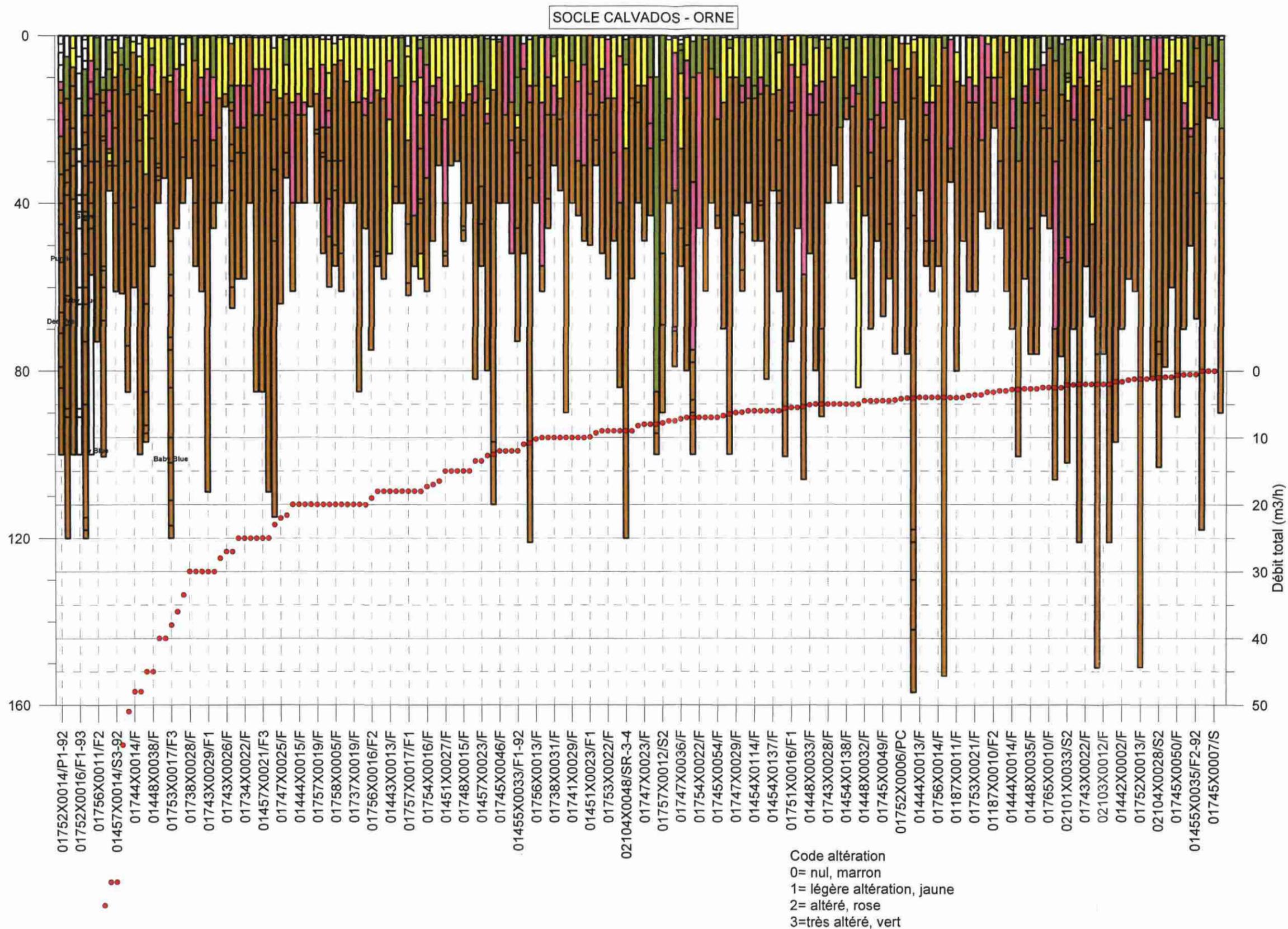
**Vernhet Y., Maurizot P., Le Gall J., Gigot P., Dupret L., Lerouge G., Besombes J.-C., Barbier G., Pay T.** – 2002 – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille de Villers-Bocage (n° 145). BRGM.



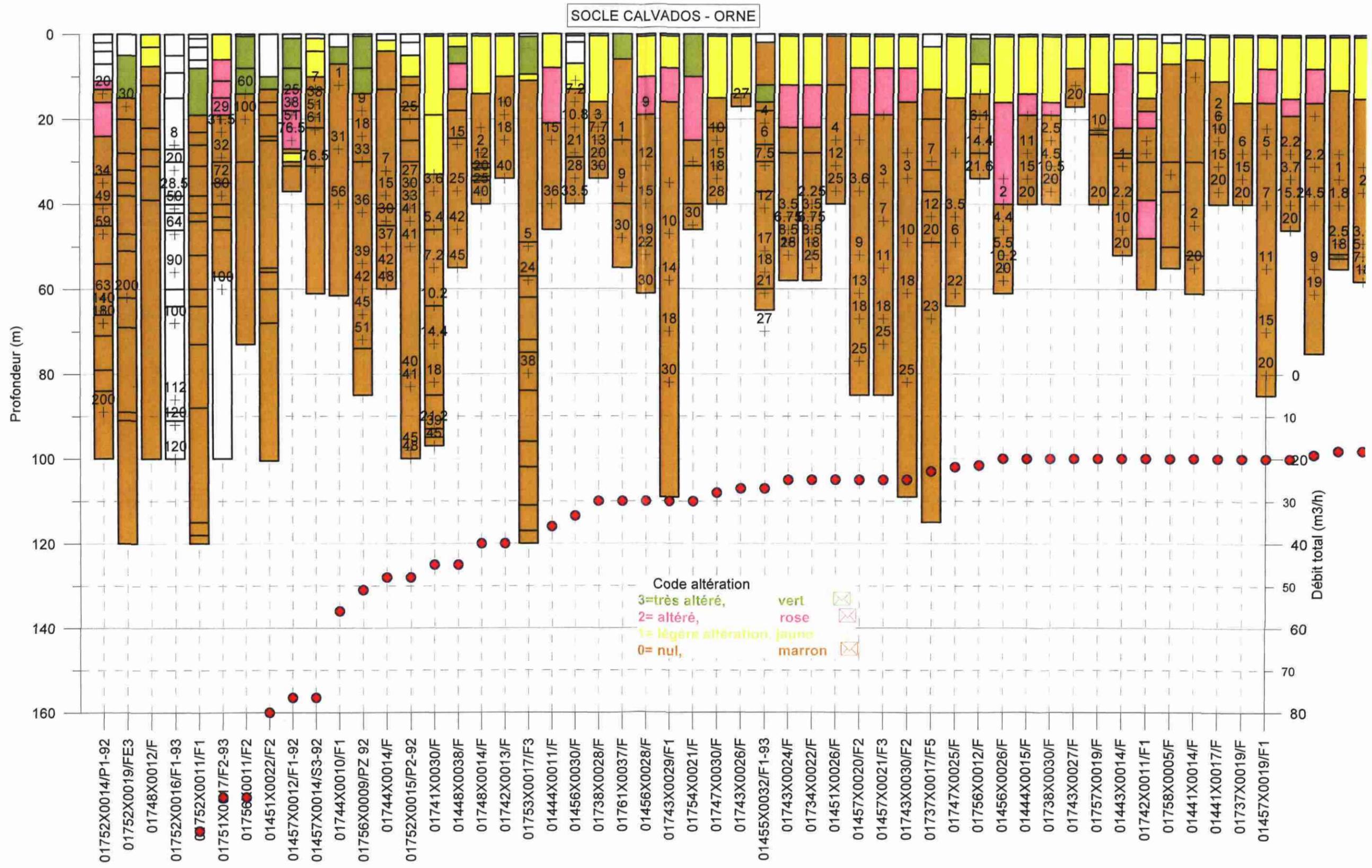
## **Annexe 1**

# **Représentation des degrés d'altération par forage**

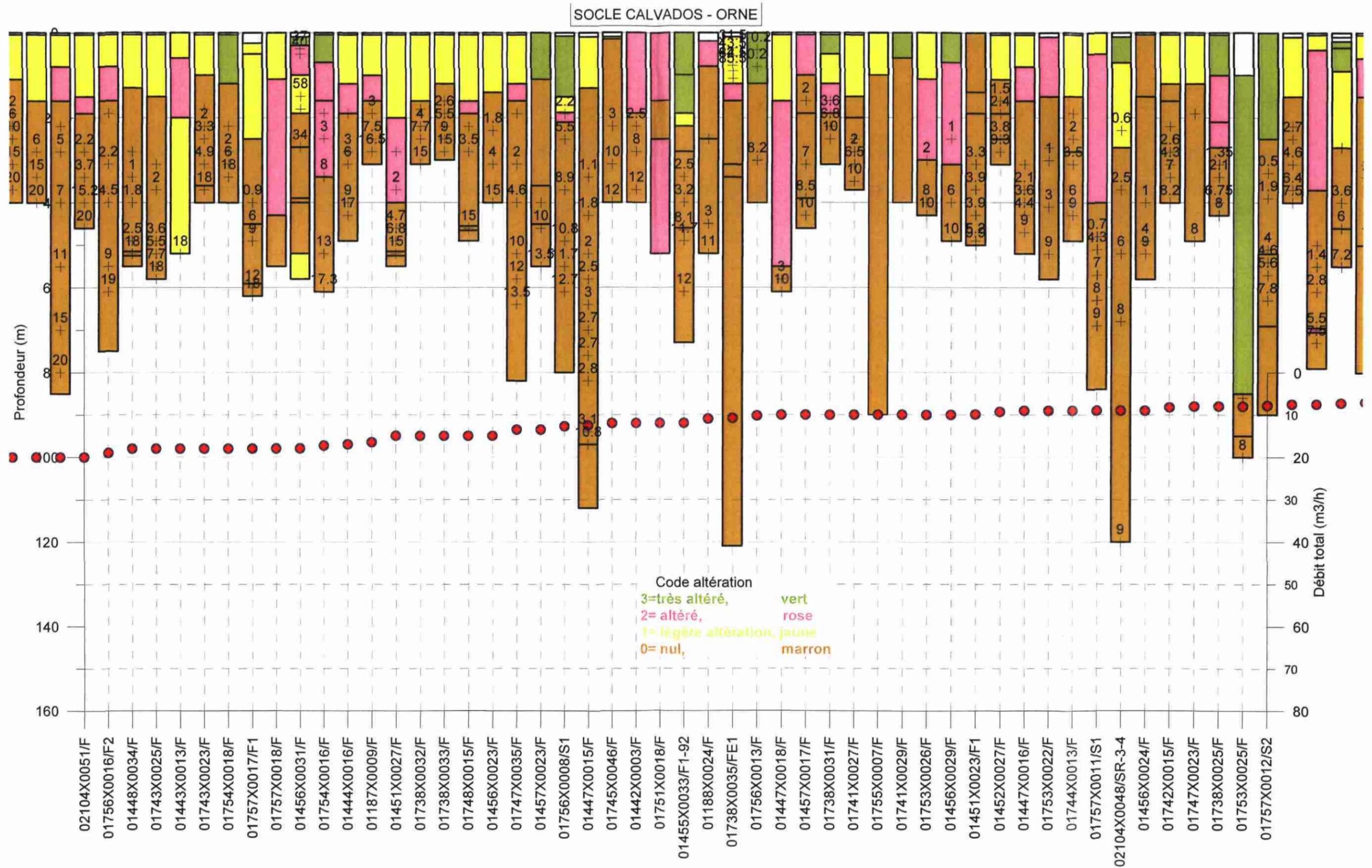










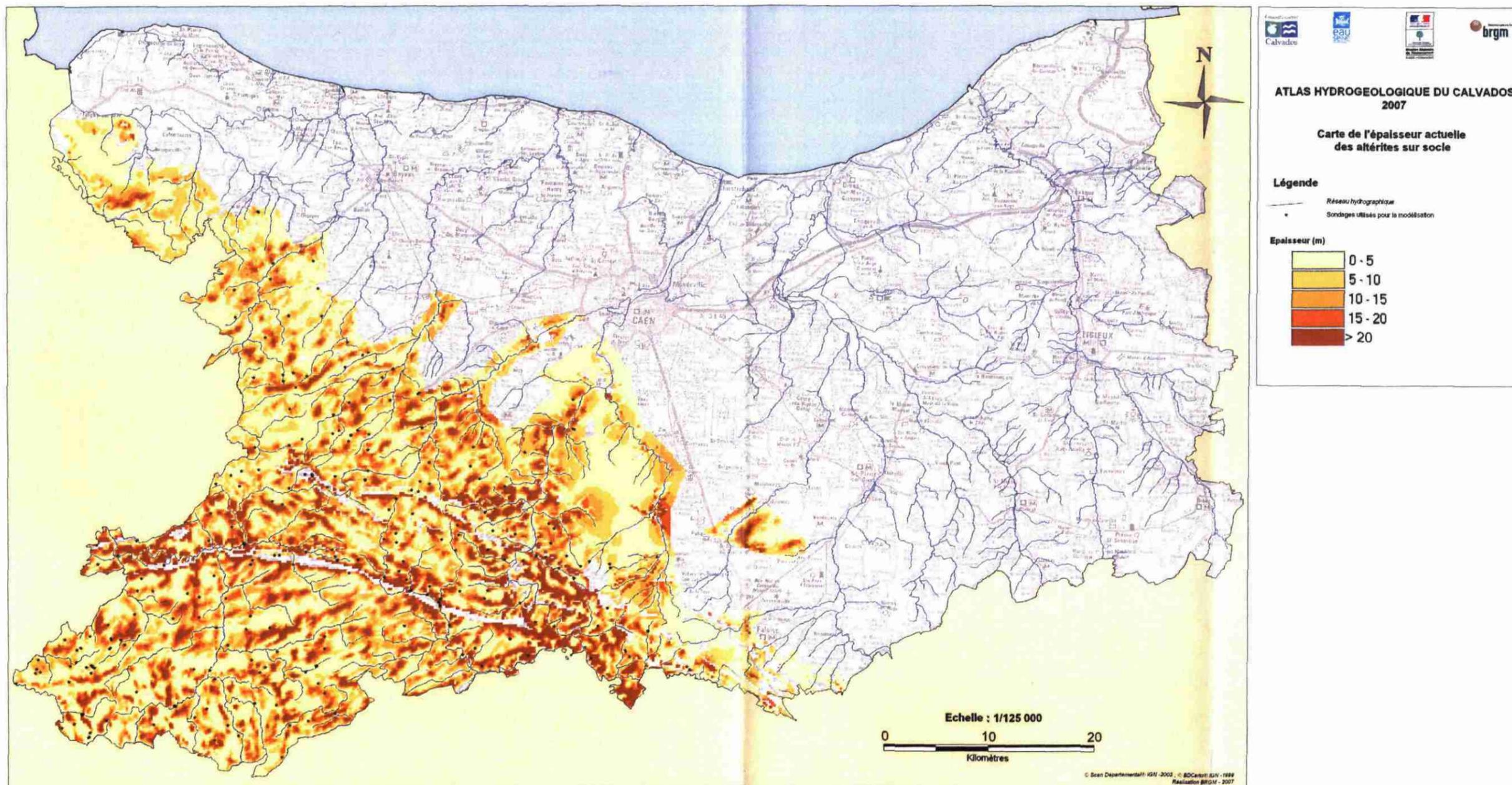




## **Annexe 2**

# **Cartographie de l'épaisseur actuelle des altérites de socle**





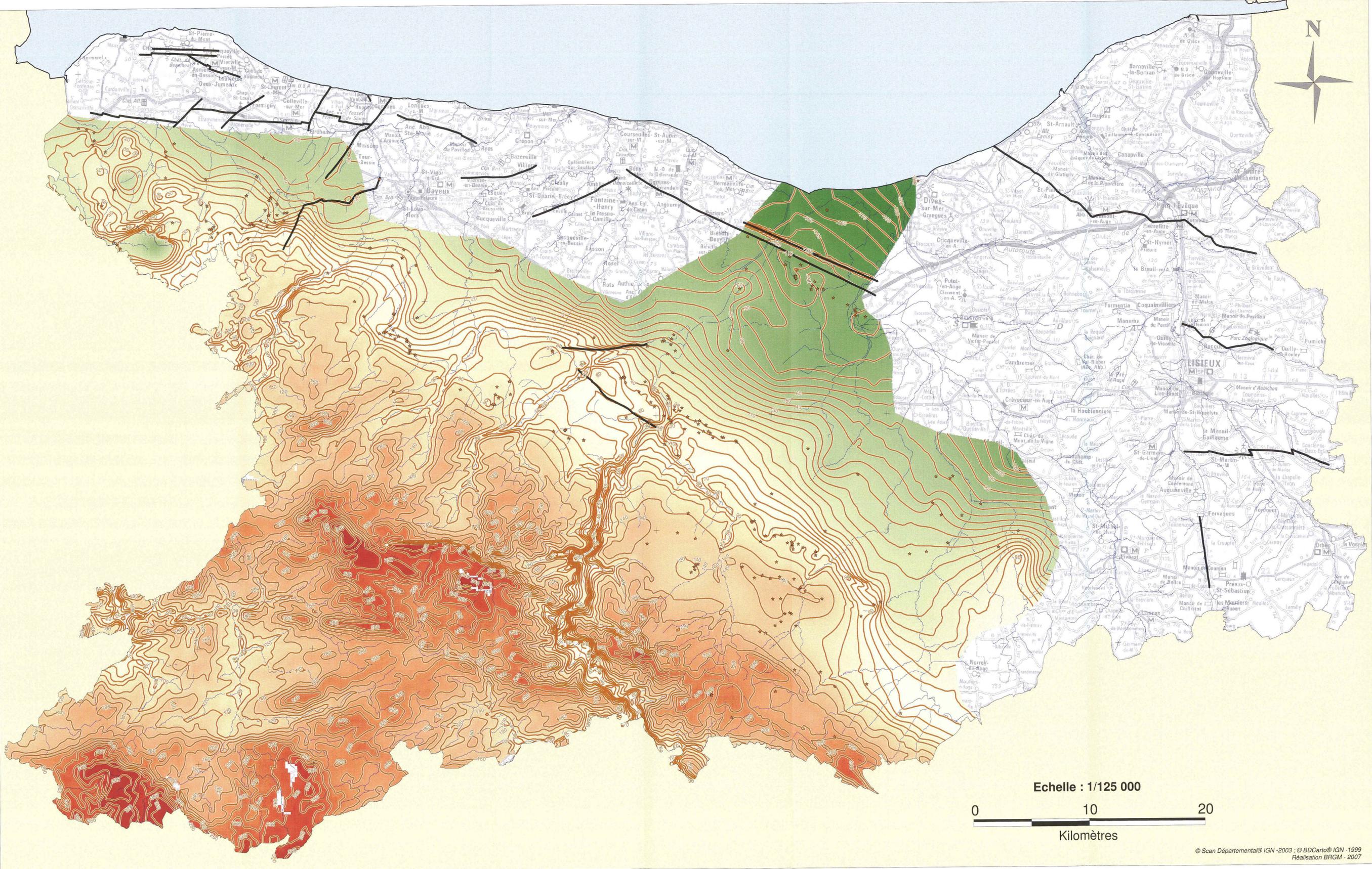


Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**  
3, avenue Claude-Guillemain  
BP 6009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34

**Service géologique régional Basse-Normandie**  
Citis Odyssée  
4 avenue de Cambridge  
14209 – Hérouville Saint Clair - France  
Tél. : 02.31.06.66.41










## ATLAS HYDROGÉOLOGIQUE DU CALVADOS 2007

### Carte du toit du socle

**Légende**

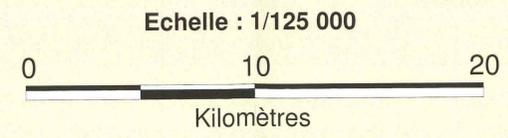
- Failles sélectionnées pour la modélisation
- Réseau hydrographique
- Sondage ayant recoupé le toit du socle
- Courbes isohypses du toit du socle et altitude NGF en mètres

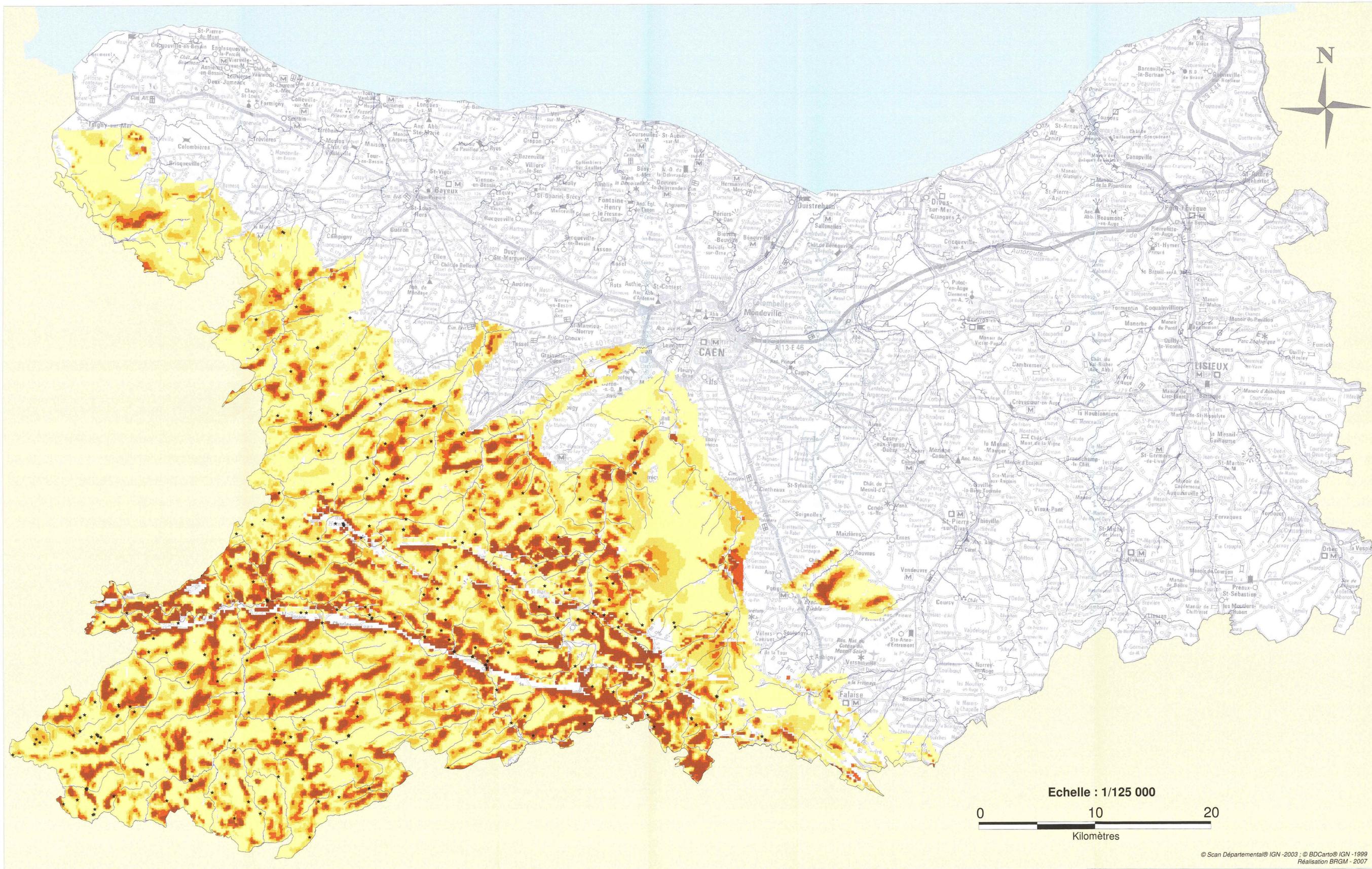
**Valeur**

Elevée

Faible







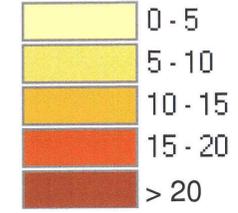
## ATLAS HYDROGEOLOGIQUE DU CALVADOS 2007

### Carte de l'épaisseur actuelle des altérites sur socle

#### Légende

-  Réseau hydrographique
-  Sondages utilisés pour la modélisation
-  Affleurements des grès ordoviciens

#### Epaisseur (m)



Echelle : 1/125 000

