

SILURES Bretagne (Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eaux Souterraines)

Rapport final - Année 5

BRGM/RP-56457-FR
juin 2008



Établissement public du ministère
chargé du développement durable



CONSEIL GENERAL
D'ILLE ET VILAINE



SILURES Bretagne (Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eaux Souterraines)

Rapport final - Année 5

BRGM/RP-56457-FR
juin 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2007 EAU I23

B. Mougin, D. Allier, R. Blanchin, A. Carn, N. Courtois, C. Gateau, E. Putot
Avec la collaboration de
J-P. Jégou, P. Lachassagne, P. Stollsteiner et R. Wynn



Établissement public du ministère
chargé du développement durable



Vérificateur :

Nom : Anne CARN

Date : 07/07/2008

(Original signé)

Approbateur :

Nom : Michel LECLERCQ

Date : 09/07/2008

(Original signé)

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



Mots clés : SILURES, eaux souterraines, hydrogéologie, géologie, géophysique aéroportée, forages, modélisation, hydrogramme rivières, aquifère, altérites, horizon fissuré, inertie, Côtes d'Armor, Finistère, Morbihan, Ille-et-Vilaine, Bretagne

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : 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 - 129 p., 37 ill., 7 ann. dont 2 planches.

Synthèse

Le programme SILURES Bretagne propose - à partir des données existantes (levés géophysiques aéroportés, forages recensés dans la Banque du Sous-Sol, hydrogrammes des rivières) mises en forme, interprétées et complétées - la création d'une base de données sur les eaux souterraines couvrant l'ensemble de la région Bretagne. Cet ensemble doit permettre, à terme, de mieux gérer les ressources bretonnes en eau souterraine.

Ce programme, d'une durée de 6 ans, est financé par l'Agence de l'Eau Loire Bretagne, le Conseil Régional de Bretagne, les Conseils Généraux des Côtes d'Armor, du Finistère, d'Ille-et-Vilaine et du Morbihan, le Syndicat Mixte de Gestion du fonds pour l'eau potable en Ille-et-Vilaine, et le BRGM.

Ce document constitue le rapport final du projet SILURES Bretagne qui a abouti à deux cartes de synthèse à l'échelle du 1/250 000 : 1) secteurs où l'exploitation de l'eau souterraine peut être encouragée et 2) zones où l'inertie du milieu physique souterrain est la plus faible favorisant ainsi les actions de restauration de la qualité de l'eau à court terme.

Pour obtenir ces produits livrés, des cartes intermédiaires de paramètres ont été réalisées : géométrie des réservoirs aquifères (épaisseur des milieux altérés et fissurés), productivité du sous-sol (débits instantanés obtenus en foration), contribution globale annuelle des eaux souterraines à l'alimentation des rivières (étude des hydrogrammes), et définition des réseaux de failles (interprétation des données géophysiques aéroportées : magnétisme et spectrométrie).

Pour les deux cartes de synthèse suivantes, les principaux résultats sont :

1) carte des secteurs où l'exploitation de l'eau souterraine peut être encouragée

- cette carte s'appuie sur les résultats de débits du milieu fissuré utile (en m³/h). L'horizon fissuré utile correspond à une épaisseur du sous-sol riche en fissures (provenant de l'altération des roches) qui apporte la meilleure productivité en terme de débit instantané potentiellement mobilisable en foration. Ce débit ne peut être obtenu que si le forage traverse toute l'épaisseur du milieu fissuré utile, c'est-à-dire dans les secteurs où les altérites sont présentes. Si les altérites sont absentes, alors l'horizon fissuré utile est décapé (moins épais) et il fournira donc des débits inférieurs à ceux annoncés ;
- les formations géologiques fournissant les tous meilleurs débits sont (par ordre décroissant) : la Formation de Paimpol au Nord-Ouest des Côtes d'Armor (roches volcaniques), les Formations de Fougères et Granville au Nord de l'Ille-et-Vilaine (roches métamorphiques), la Formation de Tréguier au Nord-Ouest des Côtes d'Armor (roches volcaniques) ;

- des formations productives existent dans chacun des quatre départements bretons : au Nord et au Sud de l'Ille-et-Vilaine, au Nord-Ouest et à l'Est des Côtes d'Armor, localement au Nord au Centre et au Sud du Finistère, et à l'Ouest du Morbihan.

Cette carte constitue donc un outil d'appui aux décideurs pour la localisation des secteurs où le recours aux eaux souterraines est à encourager et où les recherches locales ont les meilleures chances de succès.

2) carte du classement de l'inertie du milieu physique souterrain

- les bassins versants ayant une inertie du milieu physique souterrain plutôt faible situés au Centre de la Bretagne et aussi en Ille-et-Vilaine. Ce département rassemble le plus de bassins à inertie faible (Semnon, Meu, Combs, Guyoult, Couesnon...) ;
- les bassins versants ayant une inertie du milieu physique souterrain plutôt forte sont localisés majoritairement au Nord de la Bretagne mais également un peu au Sud du Finistère. L'inertie la plus forte concerne les bassins situés au Nord du Finistère et de l'Ille-et-Vilaine (Guillec, Horn, Loisançe, Nançon...) ;
- dans le premier cas (inertie faible), les actions de reconquête de la qualité des eaux de surface seront visibles à court terme, et dans le second cas (inertie forte) elles seront lentes et donc visibles à long terme. Ce raisonnement s'appuie sur le fait que la participation des eaux souterraines aux débits des rivières est importante, voire totale en période d'étiage.

Cette carte constitue un guide pour définir des priorités dans les actions de restauration de la qualité des eaux.

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, SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine et SILURES Suivi). Il est annexé à ce rapport.

Le but de ce CD-Rom est également de sensibiliser et d'informer un large public sur l'existence des eaux souterraines en Bretagne, afin de mieux les prendre en compte dans les stratégies d'exploitation et de reconquête de la ressource en eau.

Sommaire

1. Rappel du contexte et des objectifs du projet SILURES Bretagne.....	11
1.1. CONTEXTE.....	11
1.2. DUREE DU PROJET.....	12
1.3. OBJECTIF.....	12
1.4. ORGANIGRAMME TECHNIQUE DU PROJET	12
2. Rappel du modèle conceptuel des aquifères de socle.....	17
3. Interprétation des données de forages.....	23
3.1. DESCRIPTION DES DONNEES DES FORAGES.....	23
3.1.1. Origine et nature des données de base.....	23
3.1.2. Informations disponibles.....	24
3.2. VALORISATION DES DONNEES DANS LE CADRE DU PROJET.....	26
3.3. RAPPEL DU TRAVAIL REALISE	26
3.3.1. Interprétation des informations géologiques et hydrogéologiques	26
3.3.2. Carte d'intérêt hydrogéologique des aquifères de socle breton	29
3.4. GEOMETRIE DES RESERVOIRS AQUIFERES	30
3.4.1. Choix de la méthode d'interpolation	30
3.4.2. Modélisation de la base des altérites et de l'épaisseur des altérites en place	31
3.4.3. Modélisation de la base de l'horizon fissuré par défaut et de son épaisseur	35
3.5. PRODUCTIVITE DU SOUS-SOL	39
3.5.1. Notion de milieu fissuré utile et débit associé	39
3.5.2. Pertinence de la méthode du seuil de 80 %	43
3.5.3. Calcul des caractéristiques du milieu fissuré utile.....	45
3.5.4. Productivité du milieu fissuré utile	47
3.5.5. Epaisseur du milieu fissuré utile	56
3.6. CONCLUSION INTERMEDIAIRE.....	59

4. Interprétation des hydrogrammes de rivières	61
4.1. TRAVAIL A REALISER DANS LE CADRE DU PROJET	61
4.2. DERNIERS BASSINS MODELISES	61
4.3. RESULTATS OBTENUS SUR LES 70 BASSINS VERSANTS	67
4.4. RECHERCHE DE DETERMINISMES A LA PARTICIPATION DES EAUX SOUTERRAINES AUX DEBITS DES RIVIERES.....	70
4.4.1. Objectifs	70
4.4.2. Extraction des paramètres physiques des bassins versants	70
4.4.3. Rappel des paramètres issus des modélisations des bassins versants ..	71
4.4.4. Résultats des analyses.....	72
4.4.5. Synthèse des observations.....	76
5. Interprétation des données de géophysique aéroportée.....	77
6. Réalisation des cartes de synthèse	79
6.1. SECTEURS OU L'EXPLOITATION DE L'EAU SOUTERRAINE PEUT ETRE ENCOURAGEE	79
6.1.1. Mode d'obtention et description de la carte	79
6.1.2. Utilité de la carte.....	80
6.2. CLASSEMENT DE L'INERTIE DU MILIEU PHYSIQUE SOUTERRAIN.....	81
6.2.1. Mode d'obtention et description de la carte	81
6.2.2. Utilité de la carte.....	82
7. Conception d'un CD-Rom du programme SILURES	83
8. Conclusion.....	85
9. Bibliographie	87

Liste des illustrations

Illustration 1 - Organigramme technique du projet SILURES Bretagne	13
Illustration 2 - Modèle conceptuel des altérations supergènes en domaine granitique (Wyns, 1998).....	18
Illustration 3 - Partie supérieure de l'horizon fissuré dans le granite de Kernilis (Finistère) et estimation visuelle de la porosité.....	19
Illustration 4 - Corée du sud : débits instantanés par mètre en fonction de la profondeur du forage en dessous de la base des arènes, en contexte de granite altéré.....	21
Illustration 5 - Profondeurs et débits des forages bretons utilisés	25
Illustration 6 - Observations précisées lors de l'interprétation des données de forages	27
Illustration 7 - Représentation schématique des types de forages d'eau selon les horizons rencontrés en foration	28
Illustration 8 - Résultats sur la géométrie des réservoirs aquifères.....	28
Illustration 9 - Périmètre de krigeage de l'altitude de la base des altérites, et points avec altitude.....	31
Illustration 10 - Epaisseur des altérites en place calculée à partir de l'interprétation des données de forages	33
Illustration 11 - Périmètre de krigeage de l'altitude de la base de l'horizon fissuré par défaut, et points avec altitude	36
Illustration 12 - Epaisseur du milieu fissuré profond par défaut calculée à partir de l'interprétation des données de forages.....	37
Illustration 13 - Débits instantanés par mètre en fonction de la profondeur du forage en dessous de la base des altérites meubles	39
Illustration 14 - Exemple de calcul du pourcentage cumulé de débit linéaire.....	40
Illustration 15 - Calcul du pourcentage cumulé de débit linéaire sur 6089 forages bretons	41
Illustration 16 - Comparaison de 3 méthodes permettant d'approcher l'épaisseur de l'horizon fissuré	44
Illustration 17 - Principales propriétés de l'horizon fissuré utile défini par la méthode du seuil de 80 % sur 31 formations géologiques	45
Illustration 18 - Principales propriétés de l'horizon fissuré par défaut défini par la méthode d'interprétation des données de forages sur 11 formations géologiques.....	46
Illustration 19 - Corrélation du débit moyen du quartile supérieur et du débit du milieu fissuré utile	48
Illustration 20 - Intervalle de confiance de prévision du débit.....	49
Illustration 21 - Débits du milieu fissuré utile sur les formations géologiques bretonnes	50
Illustration 22 - Périmètre de krigeage du paramètre Q/P'	51
Illustration 23 - Débits instantanés obtenus en foration rapportés à la profondeur du forage sous la base des altérites meubles (Q/P')	52

Illustration 24 - Corrélation du Q/P' moyen issu du krigeage et du débit linéaire du milieu fissuré utile	53
Illustration 25 - Intervalle de confiance de prévision du débit linéaire	54
Illustration 26 - Débits du milieu fissuré utile rapportés à la profondeur du forage sous la base des altérites meubles	55
Illustration 27 - Corrélation de l'épaisseur reconstituée et l'épaisseur calculée du milieu fissuré utile	56
Illustration 28 - Intervalle de confiance de prévision de l'épaisseur	57
Illustration 29 - Epaisseur du milieu fissuré utile calculée par régressions successives	58
Illustration 30 - Derniers bassins versants retenus et stations hydrométriques associées	61
Illustration 31 - Localisation des derniers bassins versants modélisés	63
Illustration 32 - Modèle Gardénia [®] et organisation des réservoirs	65
Illustration 33 - Contribution globale annuelle des eaux souterraines à l'alimentation des rivières	68
Illustration 34 - Classes d'écoulement lent (l/s/km ²) des bassins versants modélisés	69
Illustration 35 - Valorisation des données de géophysiques aéroportées (magnétisme et spectrométrie) - Représentation des secteurs favorables et défavorables à l'implantation de forages d'eau en Bretagne	78
Illustration 36 - Secteurs où l'exploitation de l'eau souterraine peut être encouragée - Débits du milieu fissuré utile (en m ³ /h)	126
Illustration 37 - Classement de l'inertie du milieu physique souterrain	127

Liste des annexes

Annexe 1 Interpolation par la géostatistique.....	89
Annexe 2 Caractéristiques du milieu fissuré utile au niveau des 83 formations géologiques extrapolées	95
Annexe 3 Régressions climatiques des 8 bassins versants - Comparaison de la lame d'eau et des pluies efficaces	99
Annexe 4 Paramètres retenus pour les modélisations Gardénia [®] - Résultats obtenus suite aux modélisations Gardénia [®] - Modélisation Gardénia [®] , Calage des paramètres des bassins versants - Modélisation Gardénia [®] , Débits mesurés et calculés des bassins versants - Débits annuels rapides et souterrains des bassins versants - Débits mensuels moyens interannuels des bassins versants.....	105
Annexe 5 Matrices des corrélations et analyses en composantes principales (ACP).....	117
Annexe 6 Cartes de synthèse - Planches au format A3 dans cette annexe et au format A0 à côté du rapport.....	125
Annexe 7 CD-Rom SILURES.....	129

Liste des planches A0 (à côté du rapport)

Planche 1 - Secteurs où l'exploitation de l'eau souterraine peut être encouragée - Débits du milieu fissuré utile (en m³/h)

Planche 2 - Classement de l'inertie du milieu physique souterrain

1. Rappel du contexte et des objectifs du projet SILURES Bretagne

1.1. CONTEXTE

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 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 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 projet 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.

Ce projet SILURES se décompose en trois projets menés en parallèle :

- SILURES Bretagne qui propose - à partir des données existantes (aéromagnétisme, forages recensés, régime des rivières...) mises en forme, réinterprétées et complétées - la création d'une base de données sur les eaux souterraines couvrant l'ensemble du territoire régional ;
- SILURES Bassins versants qui est une application du projet SILURES Bretagne à certains bassins versants, avec une acquisition de données nouvelles afin de réaliser des cartes de paramètres spécifiques tels que l'extension des différents réservoirs aquifères, la porosité des réservoirs par géophysique, les débits instantanés obtenus en foration ou les volumes d'eau stockés ;
- SILURES Suivi qui conçoit un réseau de surveillance pour palier au manque de données fiables concernant l'amplitude des fluctuations saisonnières des différentes entités aquifères du territoire breton, et ainsi anticiper certaines mesures et avoir une meilleure appréciation de la réserve.

Le présent document constitue le rapport final du projet SILURES Bretagne.

1.2. DUREE DU PROJET

La durée du projet SILURES Bretagne était fixée initialement à 5 ans de 2002 à 2007.

En raison de la mission urgente confiée au BRGM par le Ministère de l'Ecologie et la Préfecture de Bretagne sur les bassins versants bretons en contentieux européen (nitrates dans les prises d'eau potable - eaux brutes), la fin du projet SILURES Bretagne a été retardée de six mois et s'est achevée fin juin 2008. Ce délai supplémentaire a été acté par les partenaires lors du 6^{ème} comité de pilotage du programme SILURES le 28 juin 2007.

1.3. OBJECTIF

L'objectif du projet SILURES Bretagne consiste, par la valorisation des données existantes (aéromagnétisme, forages archivés à la banque des données en sous-sol...) et l'acquisition de données nouvelles (forages non localisés, régime des cours d'eau, pluviométrie...), à réaliser une base de données sur les eaux souterraines permettant d'approcher le mode de fonctionnement des entités aquifères à l'échelle de la Bretagne. Le but principal étant d'appréhender la vitesse de renouvellement de l'eau des différentes nappes dans une optique de réhabilitation de la qualité des eaux souterraines et des rivières.

Cette base de données permettra la création de documents d'aide à la décision à l'échelle de la région Bretagne (1/250 000), avec notamment la création des cartes suivantes :

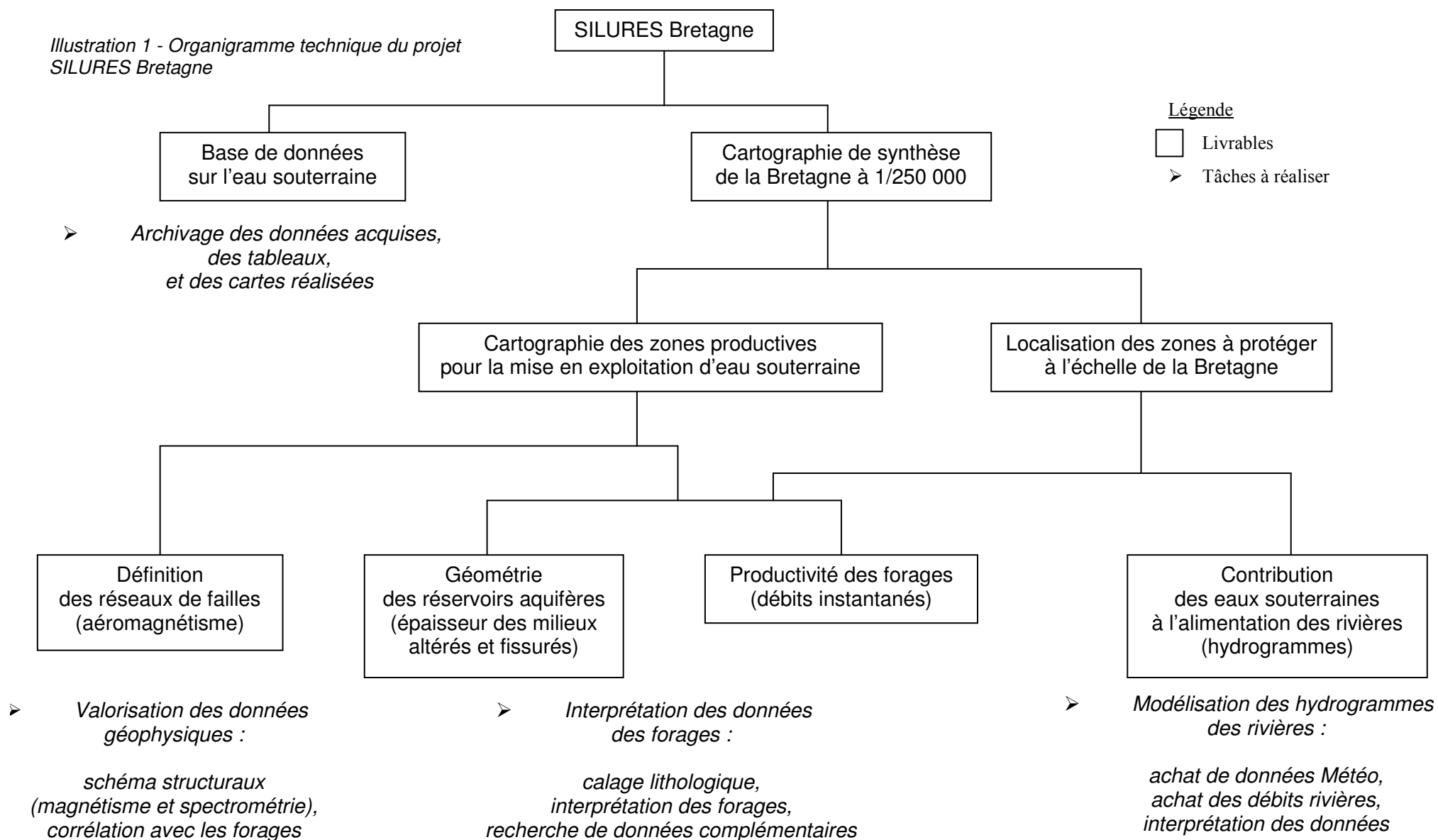
- secteurs où l'exploitation de l'eau souterraine peut être encouragée (zones productives),
- zones où l'inertie du milieu physique souterrain est la plus faible favorisant les actions de reconquête de la qualité de l'eau à court terme.

1.4. ORGANIGRAMME TECHNIQUE DU PROJET

L'organigramme technique du projet est rappelé en illustration 1 (page suivante).

Les cartes de synthèses définies au dernier paragraphe ci-dessus (point 1.3.) ont été réalisées grâce à plusieurs cartes de paramètres (définies en bas de l'organigramme de l'illustration 1).

Illustration 1 - Organigramme technique du projet SILURES Bretagne



La conception des cartes s'est faite grâce à :

- l'interprétation des données de forages,
- la modélisation des hydrogrammes des rivières.
- la valorisation des données de géophysique aéroportée (aéromagnétisme et radiométrie spectrale),

Quatre rapports d'avancements ont déjà été édités : rapport BRGM/RP-51481-FR (année 1), BRGM/RP-52825-FR (année 2), BRGM/RP-53621-FR (année 3), et BRGM/RP-55001-FR (année 4).

Les deux premiers rapports ont détaillé l'avancement du travail d'interprétation des données existantes. Le troisième s'est focalisé sur la valorisation des données de géophysique aéroportée. Le quatrième a présenté les résultats issus de l'interprétation des données de forages et de la modélisation des hydrogrammes des rivières.

Ce document, qui constitue le rapport final du projet SILURES Bretagne, explique comment ont été réalisées les cartes de paramètres à partir de l'interprétation des données énumérées ci-dessus (données de forages au chapitre 3, débits des rivières au chapitre 4 et géophysique aéroportée au chapitre 5), puis il présente la conception des cartes de synthèse (chapitre 6). Le chapitre 7 évoque la conception d'un CD-Rom qui est annexé à ce rapport.

2. Rappel du modèle conceptuel des aquifères de socle

Dans les socles anciens comme le Massif armoricain, les roches, généralement métamorphiques ou intrusives, sont massives et réputées imperméables. La présence éventuelle d'eau souterraine dépend des modifications physiques subies par ces massifs rocheux postérieurement à leur formation, et notamment de la fracturation et de l'altération.

Les fractures d'origine tectonique favorisent la circulation des eaux lorsque celles-ci sont ouvertes. C'est le cas des couloirs de fracturation souvent subverticaux, dont le degré d'ouverture est lié d'une part à leur mécanisme de formation, et d'autre part à leur orientation par rapport au champ de contraintes actuelles.

L'altération météorique a eu pour effet de développer une couverture meuble plus ou moins poreuse en fonction de la minéralogie de la roche mère, et, sous cette couverture meuble, une fissuration intense permettant le drainage des formations meubles sus-jacentes.

Les zones où préexistaient des réseaux de fractures d'origine tectonique permettant la circulation de l'eau ont constitué, par la multiplication des surfaces de contact entre eau et roche, des lieux privilégiés où l'action de l'altération a été décuplée. Cette addition de phénomènes (fracturation tectonique, altération et fissuration) a particulièrement fragilisé les lieux où elle s'appliquait, conduisant à la formation de couloirs fracturés et fissurés où l'altération a pénétré plus profondément. Ces couloirs constituent des drains privilégiés pour l'eau souterraine, alimentés par les horizons altérés et fissurés plus superficiels. Comme ils constituent des zones de faiblesse, ils ont été fréquemment empruntés par l'érosion lors du creusement des vallées, et se présentent dans le paysage actuel sous la forme de dépressions allongées gouvernant souvent les écoulements visibles en surface (thalwegs, vallées).

Dans cette étude, seules l'altération météorique et la fissuration qui en découle ont été prises en compte : elles concernent globalement des surfaces et des volumes incomparablement plus importants que les couloirs fracturés qui sont, eux, des systèmes locaux, dont chacun peut être un cas particulier et dont l'étude relève de méthodes différentes.

Les manteaux d'altération épais (plusieurs dizaines de mètres) ont été élaborés lors de longues périodes d'émersion sous des climats chauds et humides analogues aux climats de la zone intertropicale actuelle. Les périodes les plus favorables ont été le Crétacé inférieur ainsi que le début du Tertiaire (Paléocène à Eocène supérieur), d'une durée de 20 à 35 millions d'années chacune. La période récente (Miocène à Quaternaire) n'a donné que des altérations d'épaisseur négligeable par rapport aux altérations antérieures : en référence aux données acquises en Anjou et dans la région nantaise, on peut estimer que celles-ci ne dépassent pas quelques décimètres à quelques mètres, car la surface d'érosion qui supporte les dépôts marins miocènes et pliocènes de ces régions n'est pas altérée.

L'élaboration des manteaux d'altération météorique suppose lors de leur formation un paysage aplani et en relief, de façon à ce que l'érosion soit incapable d'évacuer les altérites au fur et à mesure de leur formation (pente faible), et que le front d'altération puisse progresser rapidement du haut vers le bas (écart altimétrique entre sol et niveau de base). A l'échelle régionale, pour une lithologie homogène donnée, la base des altérites est globalement parallèle à l'ancienne surface topographique. Dans le détail cependant (échelle hectométrique), cette surface de base peut s'approfondir de manière considérable le long de certains couloirs de fracturation tectonique jouant le rôle de drains préférentiels (augmentation locale de la vitesse d'altération), ou bien se réduire fortement en fonction des hétérogénéités lithologiques.

Un nouveau modèle conceptuel des propriétés physiques des roches en différents contextes de socle altéré a été élaboré ces dernières années, dans le cadre de projets de Recherche du BRGM. Il est représenté de manière schématique sur l'illustration 2.

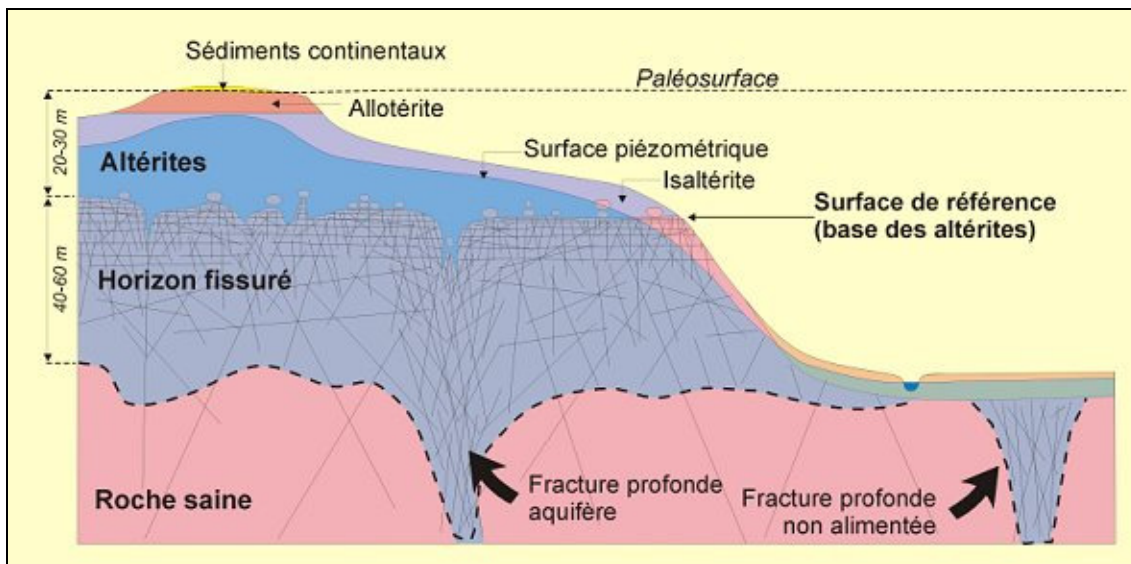


Illustration 2 - Modèle conceptuel des altérations supergènes en domaine granitique (Wyns, 1998)

Un profil d'altération type comprend ainsi, de haut en bas, sous les sédiments continentaux pénécotemporains de l'altération, les horizons suivants :

- cuirasse latéritique (0 à quelques m) : rarement préservée, par suite de la troncature du profil par l'érosion ou de sa destruction par évolution vers un latosol (non représentée sur l'illustration 2) ;
- allotérites (quelques mètres à une dizaine de mètres) : altérite caractérisée par une réduction de volume par rapport à la roche mère initiale ; la texture de la roche mère n'est pas préservée. En contexte schisteux, il s'agit d'une argile très peu perméable ; en contexte granitique, il s'agit d'une arène argileuse à faible perméabilité et faible porosité efficace.

- isaltérites (plusieurs dizaines de mètres) : altérite isovolumique où la texture de la roche initiale est préservée. Les éléments chimiques évacués par dissolution sont remplacés par des vides. Il en résulte une porosité importante, permettant à cet horizon de jouer un rôle capacitif vis à vis des eaux d'infiltration. En contexte schisteux, cet horizon, à dominante silto-argileuse, est faiblement perméable bien que très poreux. En contexte granitique, il correspond à une arène sableuse beaucoup plus perméable. A la base des isaltérites se rencontrent fréquemment des boules granitiques résiduelles, de diamètre souvent plurimétrique. Lorsqu'elles sont en place, elles sont en général isolées dans leur matrice d'arène. Lorsque les arènes ont été évacuées par l'érosion, les boules deviennent affleurantes et peuvent être plus ou moins remaniées sur les versants par gravité (chaos du Huelgoat, vallée du Gouët et Trégastel).
- zone fissurée (40 à 70 m) : cet horizon, situé dans la partie supérieure du substratum, est caractérisé par une très forte fissuration (illustration 3) dont l'intensité décroît vers le bas. Cette fissuration résulte de l'éclatement de la roche sous l'effet des contraintes générées par les changements de phase minéralogique, principalement l'hydratation de la biotite, qui se transforme avec augmentation de volume en chlorite, puis vermiculite, avant d'évoluer vers des minéraux argileux. Dans les 15 premiers mètres, la distance moyenne entre fissures est décimétrique et celles-ci sont ouvertes. L'espacement entre fissures (et donc leur probabilité d'interconnexion) diminue au fur et à mesure que l'on descend dans le profil.

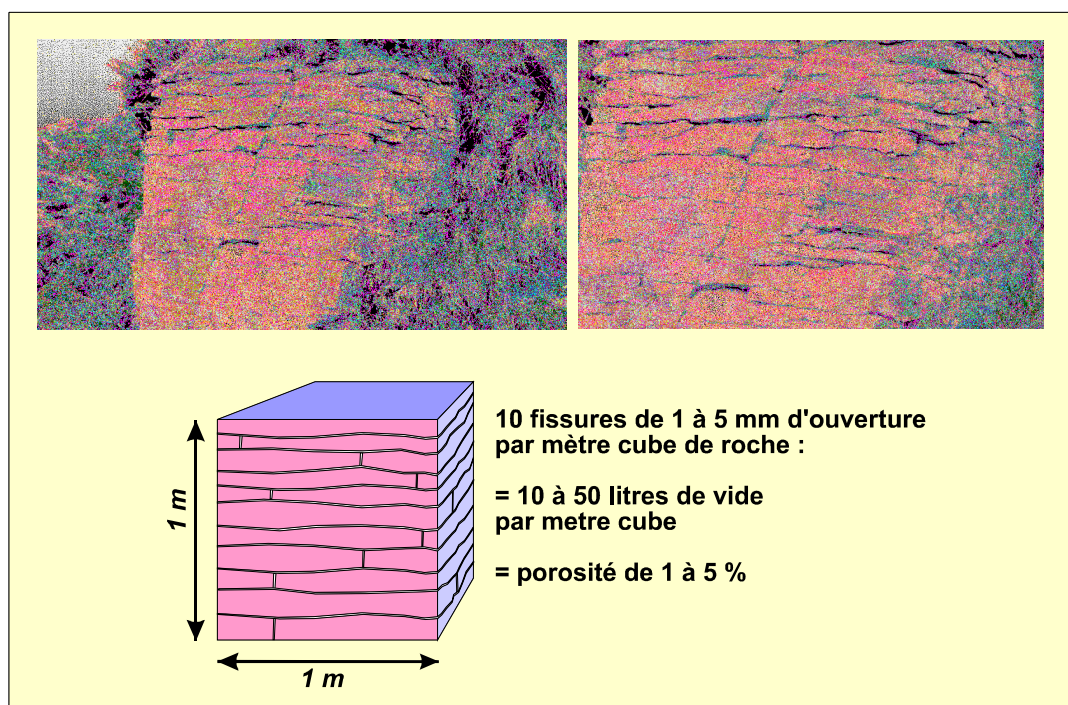


Illustration 3 - Partie supérieure de l'horizon fissuré dans le granite de Kernilis (Finistère) et estimation visuelle de la porosité

La partie supérieure de cet horizon fissuré (en moyenne les 15 premiers mètres) constitue un aquifère à perméabilité significative, alimenté par les isaltérites sus-jacentes lorsqu'elles sont conservées. Dans le Massif armoricain, la majorité des puits fermiers sont alimentés par cet aquifère ; une partie des sources de versant se situe également dans cet horizon.

Lorsque la roche-mère est isotrope (cas des granites), cet horizon est caractérisé par une fissuration horizontale caractéristique (illustration 3). Cette orientation préférentielle résulte des caractéristiques du déviateur de contraintes généré par l'altération : la dilatation étant impossible dans le sens horizontal, les 2 composantes principales du tenseur (σ_1 et σ_2) sont horizontales, tandis que la composante minimale (σ_3) est verticale ; dans un tel système de contraintes on ouvre principalement des fentes horizontales. Le même phénomène s'applique à la base des arènes, qui présentent un feuilletage horizontal caractéristique : ce feuilletage traduit un resserrement centimétrique à millimétrique entre joints ; cet espacement étant du même ordre de grandeur que celui du grain de la roche, tous les grains sont atteints par l'altération : il s'agit du début de l'arénisation.

Dans la partie inférieure de l'horizon fissuré, la densité de fissures diminue progressivement, de même que la porosité et la perméabilité.

L'eau souterraine peut également circuler par l'intermédiaire de failles sécantes à ces niveaux altérés et fissurés (cf. illustration 3).

Ce modèle de répartition verticale des porosités et des perméabilités en contexte de socle altéré a été validé dans de nombreuses régions de socle, non seulement en France (Bretagne, Massif Central, Vosges) mais dans le Monde (Afrique, Guyane, Inde, Corée du sud).

Ainsi, dans le Finistère Nord, une étude récente (Wyns et al., 2004) a mis en évidence que 80 % de la réserve en eau souterraine était contenue dans l'horizon fissuré. En Corée, des données de forages montrent que l'essentiel de leur productivité est fourni par l'horizon fissuré (50 à 100 premiers mètres sous la base des altérites) (cf. illustration 4).

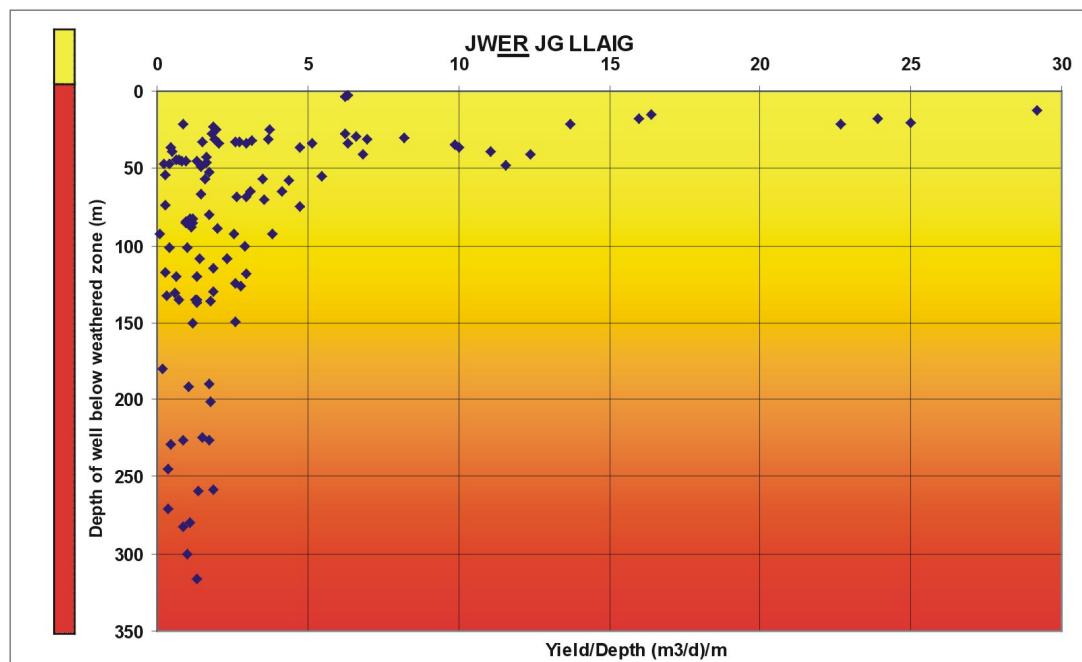


Illustration 4 - Corée du sud : débits instantanés par mètre en fonction de la profondeur du forage en dessous de la base des arènes, en contexte de granite altéré.

Ainsi, à la différence du concept classique d'aquifères discontinus de socle contrôlés par des fractures verticales d'origine tectonique, on peut maintenant utiliser un concept d'aquifère continu multicouches contrôlé par l'altération supergène. (Lachassagne et al., 2001) :

- les altérites meubles, à porosité importante et faible perméabilité, ont un rôle d'emmagasinement de l'eau de pluie ;
- l'horizon fissuré, à porosité plus faible mais cependant significative (1 à 5 %) et à perméabilité plus importante (10^{-4} à 10^{-6} m/s) joue un rôle capacitif et transmissif, en collectant et distribuant les eaux issues de l'horizon d'altération sus-jacent.

Ces horizons d'altération sont parallèles, à l'échelle régionale, à la paléosurface contemporaine de l'altération.

3. Interprétation des données de forages

3.1. DESCRIPTION DES DONNEES DES FORAGES

3.1.1. Origine et nature des données de base

En application du Code Minier (articles 131 et 132, titre VIII du Livre I), environ 25 000 forages sont recensés en Bretagne. Seuls les forages possédant une localisation géographique suffisamment précise et donc dotés de coordonnées géographiques, alimentent la Banque de données du Sous-Sol (BSS). Ils sont affectés d'un numéro BSS et sont saisis sur le site internet InfoTerre™^(*). Depuis 2001, les dossiers de récolement des déclarations de forage comprennent une localisation du forage sur fond IGN 1/25 000 et sur fond cadastral ; après calcul des coordonnées par le BRGM, les données sont directement saisies sous logiciel informatique après affectation d'un code BSS. Les déclarations antérieures à 2001 ne comportant que le lieu dit de la commune ont été reportées sur des fiches cartonnées, quand la localisation n'avait pas pu être obtenue par d'autres biais.

Une partie de ces forages (environ 12 000) possèdent des informations suffisamment précises (débit instantané, profondeur, géologie du terrain rencontré) pour qu'ils soient rassemblés dans un fichier informatique. Ce fichier comporte, selon le niveau de détail fourni par le foreur, les informations suivantes :

- numéro BSS du forage, commune où le forage existe,
- date de réalisation, entreprise réalisant le forage,
- coordonnées en Lambert 2 et altitude du sol au droit du forage,
- débit instantané mesuré en fin de foration, profondeur atteinte,
- diamètre de l'ouvrage, géologie rencontrée,
- niveau de la première arrivée d'eau.

A chaque forage renseigné dans la base informatique est affecté un code géologique correspondant à la formation géologique (référence aux cartes géologiques à 1/50 000 et 1/80 000 de la Bretagne) dans laquelle le forage a été implanté.

Les informations transmises par les entreprises de forages portent quasi systématiquement sur la profondeur finale de l'ouvrage et sur son débit instantané en fin de foration. Les autres informations, moins systématiques, concernent la nature et

(*) InfoTerre™ est le système d'information géographique des données publiques du BRGM, accessible à l'adresse Internet suivante : <http://infoterre.brgm.fr>

l'état de la roche traversée (lithologie, altération) et la localisation des différentes arrivées d'eau (fissures productives recoupées par le forage, associées à des débits instantanés cumulés). Ces données sont de valeurs inégales car dépendant notamment du foreur, de sa vigilance au déroulement du forage et de son aptitude à restituer ce qu'il a pu observer et mesurer.

Par ailleurs, les forages ont des profondeurs variées et sont réalisés avec des objectifs différents (par exemple, pour un particulier : objectif de débit de 3 m³/h). Ces biais ainsi introduits peuvent être notables, mais peuvent être compensés par le grand nombre de forages.

3.1.2. Informations disponibles

Dans le cadre du projet, 12 122 forages ont été utilisés (2 451 forages dans les Côtes d'Armor, 3 964 dans le Finistère, 2 745 en Ille-et-Vilaine et 2 962 dans le Morbihan). Ceci représente environ 1 forage pour 2 km² de superficie de la Bretagne.

Les graphiques de gauche de l'illustration 5 représentent les gammes de profondeurs et débits de ces ouvrages, et les graphiques de droite montrent les classes de distribution des profondeurs et débits.

Profondeurs

Les 12 122 forages sont renseignés par leur profondeur. Les ouvrages ont des profondeurs variant de 1 à 330 mètres, avec en moyenne 55.7 m (médiane 50 m, écart-type 27.6 m).

Moins de 1 % des forages ont une profondeur inférieure ou égale à 10 m (76 forages), et environ 6 % une profondeur supérieure à 100 m (706 forages).

Ceci indique que la population des forages renseigne majoritairement la tranche 10-100 mètres de profondeur (profondeur moyenne de ces 11 340 forages : 51.5 m). Cette information montre que ce jeu de données peut permettre une modélisation de l'épaisseur des aquifères bretons (altérites et horizon fissuré de l'illustration 2).

Débits instantanés

12 006 forages sont renseignés par leur débit instantané (116 n'ont pas de débit). Les ouvrages ont des débits instantanés variant de 0 à 250 m³/h, avec en moyenne 8.6 m³/h (médiane 5 m³/h, écart-type 12.1 m³/h).

Environ 5 % des forages ont un débit instantané inférieur ou égal à 0.5 m³/h (612 forages), tandis que 1 % ont un débit instantané supérieur à 50 m³/h (133 forages).

Les forages bretons utilisés ont donc un débit instantané compris entre 0.5 et 50 m³/h (débit instantané moyen des 11 261 forages : 8.2 m³/h). Le graphique en bas à droite de l'illustration 5 montre tout de même que la majorité des débits se situe dans la gamme 0-30 m³/h.

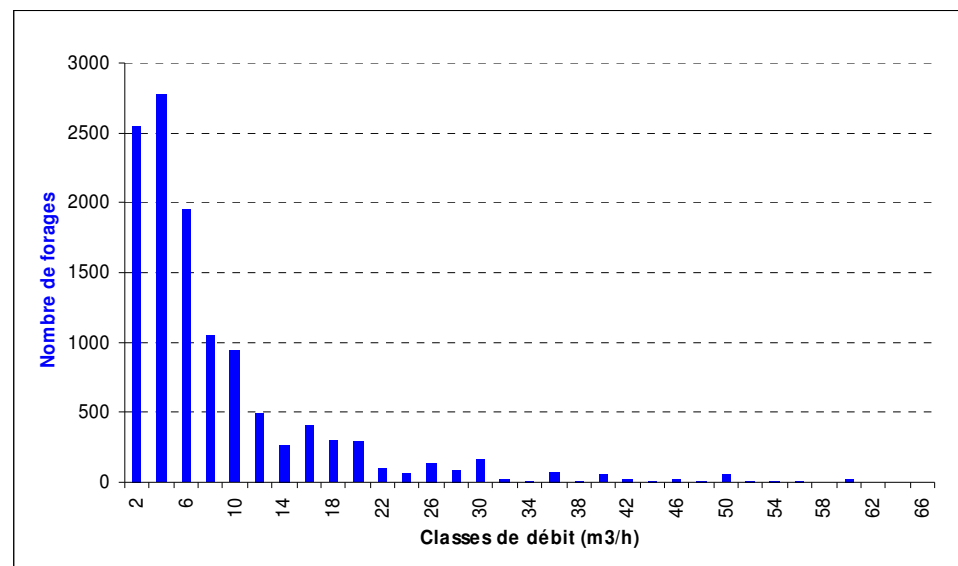
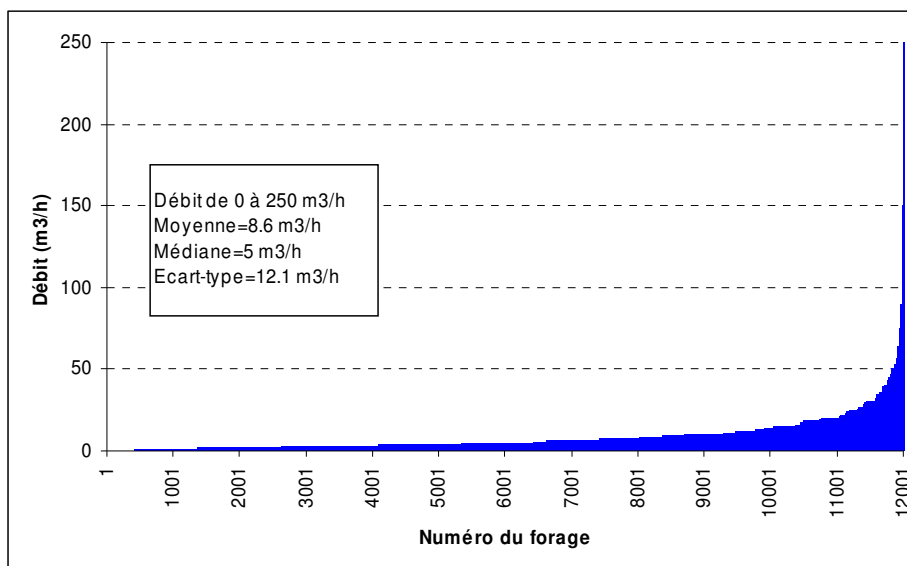
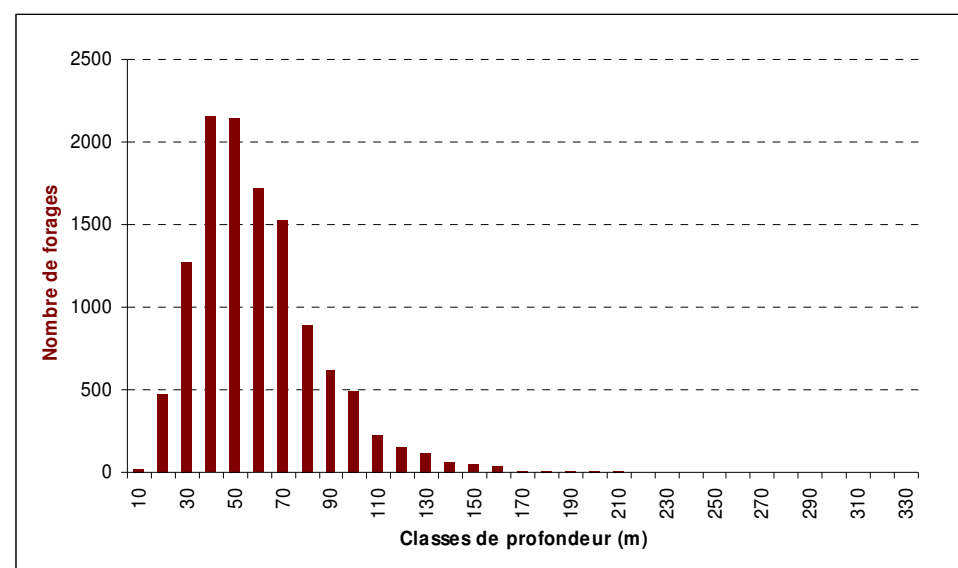
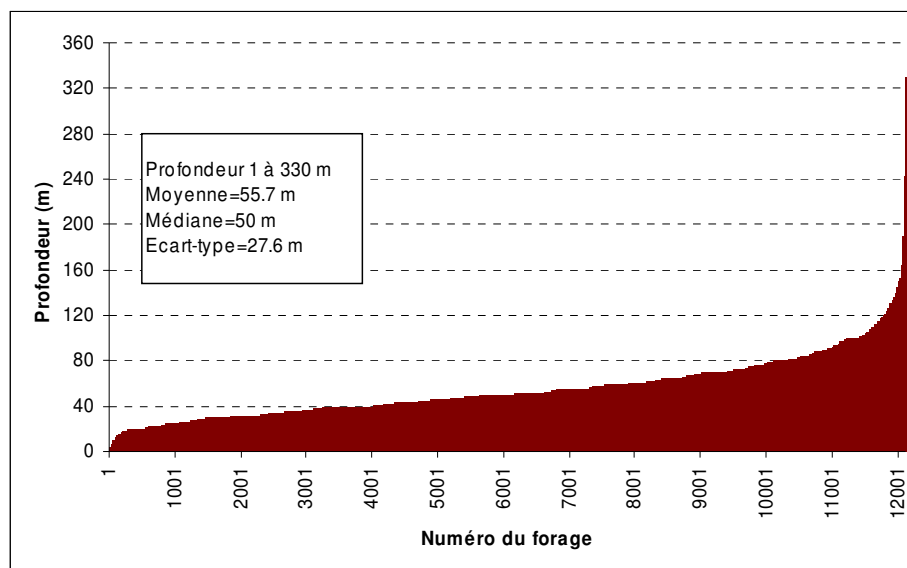


Illustration 5 - Profondeurs et débits des forages bretons utilisés

3.2. VALORISATION DES DONNEES DANS LE CADRE DU PROJET

Au cours de la 1^{ère} année du projet SILURES Bretagne, les codes géologiques affectés aux forages ont été homogénéisés pour obtenir une classification sur la région Bretagne (cf. rapport BRGM/RP-51481-FR).

Lors la 2^{ème} année (rapport BRGM/RP-52825-FR), deux autres types de travaux, débutés en 1^{ère} année du projet, se sont poursuivis afin de valoriser les données des forages recensés :

- interprétation des données géologiques et hydrogéologiques afin de connaître la géométrie des réservoirs aquifères (milieux altérés et fissurés),
- recherche de données complémentaires dans des sites dépourvus d'information.

En 3^{ème} et 4^{ème} année du projet, l'interprétation des données des forages a été décomposée en trois parties :

- recherche de forages complémentaires sur les départements bretons,
- réalisation d'une carte d'intérêt hydrogéologique des aquifères de socle breton,
- interprétation des informations géologiques et hydrogéologiques.

Cette valorisation des données des forages a permis de réaliser les cartes suivantes à l'échelle de la Bretagne (dernière année du projet) :

- géométrie des réservoirs aquifères (épaisseur des milieux altérés et fissurés),
- productivité du sous-sol (débits instantanés).

3.3. RAPPEL DU TRAVAIL REALISE

3.3.1. Interprétation des informations géologiques et hydrogéologiques

L'interprétation de ces informations fournies par les entreprises de forage, a pour but d'approcher, au niveau de chaque forage traité, la géométrie des réservoirs aquifères (épaisseurs des milieux altérés et fissurés). Celle-ci s'effectue à partir :

- des informations géologiques (nature et état de la roche traversée) et hydrogéologiques (localisation des différentes arrivées d'eau : fissures productives recoupées par le forage) fournies par les fiches de la Banque de données du Sous-Sol (BSS),
- et des champs lexicaux (termes utilisés) des foreurs.

En fonction de l'importance ou de l'absence des renseignements indiqués sur chaque forage, une échelle de fiabilité du découpage géologique a été établie de la manière suivante (cf. rapport BRGM/RP-51481-FR, année 1) :

- fiabilité 1, interprétation fiable : données sûres, suffisamment renseignées (il existe les côtes des bases des formations géologiques et les profondeurs des arrivées d'eau),
- fiabilité 2, interprétation estimée : découpage estimé par manque de données (il existe soit les profondeurs des arrivées d'eau soit les côtes géologiques),
- fiabilité 3, interprétation impossible : absence d'interprétation liée au manque de renseignements.

Une colonne d'observations et de remarques a été ajoutée au tableau d'interprétation des données (cf. illustration 6) : celle-ci permet de préciser les raisons entraînant une absence d'interprétation (fiabilité égale à 3) ou une difficulté d'interprétation (fiabilité 2). Parfois, l'interprétation fiable (fiabilité 1) est également renseignée.

	Fiabilité
A : Pas de coupe géologique, pas de mesure de débit	3
B : Pas de coupe géologique, un seul débit	2
C : Pas de coupe géologique, plusieurs débits	2
E : Description géologique sommaire, un seul débit	2
F : Description géologique sommaire, plusieurs débits	2
L : Coupe géologique détaillée, pas de mesure de débit	2 ou 3
J : Coupe géologique détaillée, un seul débit	2
P : L'altération est interprétée avec la première arrivée d'eau	2
K : L'horizon fissuré est décrit dans la coupe géologique comme arène + granite	1 ou 2
R : L'horizon fissuré est décrit dans la coupe géologique comme arène	1
O : Ouvrage décrit par un Bureau d'études	1 ou 2
N : Existence d'un niveau de quartz	1

Illustration 6 - Observations précisées lors de l'interprétation des données de forages

La base de données sur les eaux souterraines du projet SILURES Bretagne a donc été enrichie avec les informations suivantes, pour chaque forage interprété :

- épaisseur du milieu altéré (s'il existe), épaisseur du milieu fissuré par défaut (si recoupé totalement),
- chiffre correspondant à la fiabilité de l'interprétation,
- observation justifiant la fiabilité.

On parle de milieu fissuré « par défaut » car l'épaisseur de cet horizon géologique est difficilement accessible en interprétant les données des forages. L'interprétation effectuée s'est basée : sur l'arrêt des arrivées d'eau en fin de foration sur au moins 20 m, ou sur un débit inférieur à 1 m³/h sur une profondeur supérieure à 50 m, ou sur l'espacement des arrivées d'eau de plus de 30 m (cf. rapport BRGM/RP-55001-FR).

Ceci revient donc à caractériser une partie de l'horizon fissuré (cf. illustration 2) d'où le terme utilisé milieu fissuré « par défaut ».

L'illustration 7 indique les différents types de forages recoupant les horizons géologiques du socle cristallin de Bretagne (A : altérites, F : horizon fissuré, et S : roche saine).

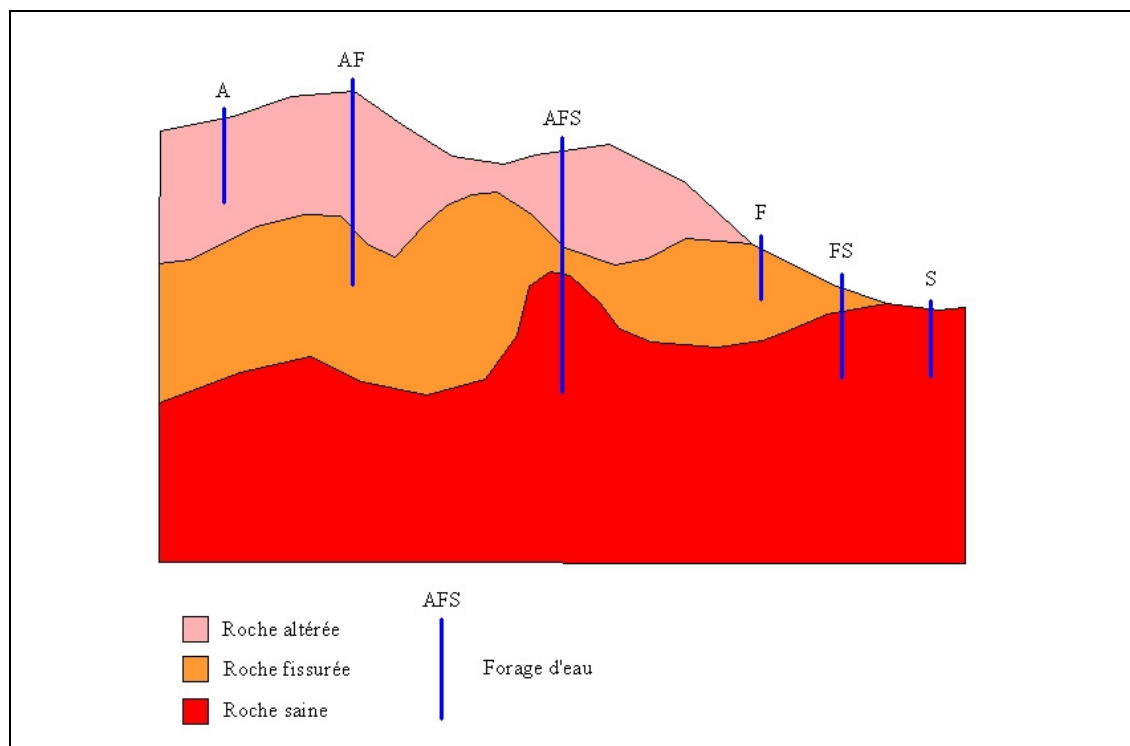


Illustration 7 - Représentation schématique des types de forages d'eau selon les horizons rencontrés en foration

Les résultats départementaux concernant la géométrie des réservoirs aquifères sont :

Département	% de forages caractérisant les altérites	Epaisseur moyenne des altérites (m)	% de forages caractérisant le milieu fissuré par défaut	Epaisseur moyenne (par défaut) du milieu fissuré (m)
Finistère	70 %	9.3	13 %	23.1
Côtes d'Armor	57 %	12.7	10 %	26.0
Morbihan	50 %	13.9	4 %	26.7
Ille-et-Vilaine	59 %	13.7	7 %	31.7

Illustration 8 - Résultats sur la géométrie des réservoirs aquifères

Pour approcher la géométrie des réservoirs aquifères (épaisseurs du milieu altéré et de l'horizon fissuré par défaut) à l'échelle de la Bretagne, les interfaces suivantes seront modélisées : altitudes de la base des altérites (contact rose-orange sur l'illustration 7) et de la base du fissuré par défaut (contact orange-rouge sur l'illustration 7).

Ces altitudes ont été utilisées dans le chapitre 3.4.

3.3.2. Carte d'intérêt hydrogéologique des aquifères de socle breton

Cette carte géoréférencée (au format vecteur), créée à partir du fond de la carte géologique synthétique de la Bretagne à l'échelle du 1/250 000 (Rabu D. et al., 2001), a été réalisée pour hiérarchiser les formations géologiques entre elles en fonction de leur intérêt hydrogéologique (cf. rapport BRGM/RP-55001-FR).

Pour chaque formation suffisamment renseignée par des forages, un indice global a été calculé en multipliant l'un par l'autre les deux paramètres suivants (pour tenir compte de ce qu'un débit plus faible peut être compensé par des fréquences de réussite plus grandes, et vice-versa) :

- le pourcentage de forages ayant fourni un débit instantané au moins égal à 10 m³/h sur la formation géologique étudiée : selon les formations et les zones géographiques en Bretagne, ce paramètre varie de façon très significative, de 0 à plus de 50 %. Ce critère peut être considéré comme une image des probabilités de succès, que des recherches cohérentes et organisées sont susceptibles d'améliorer fortement ;
- le débit moyen du quartile supérieur : moyenne des débits des 25 % « meilleurs forages » de chaque population concernée. Ce paramètre varie également de façon très significative en Bretagne : de 5 m³/h à 58 m³/h. On peut considérer que cette valeur, atteinte par le quart des forages implantés au hasard, était suffisamment fréquente pour correspondre à des conditions aquifères d'une certaine extension (les débits exploitables devraient s'en rapprocher dans le cas de recherches conduites sur des bases scientifiques). Ce paramètre pourrait être représentatif de la perméabilité des axes de drainage souterrain.

Ces deux paramètres, calculés sur 126 formations de socle cristallin, ont été utilisés dans le chapitre 3.5.

3.4. GEOMETRIE DES RESERVOIRS AQUIFERES

L'objectif de cette partie est de modéliser l'épaisseur des altérites en place et l'épaisseur de l'horizon fissuré par défaut à partir des données des forages bretons.

3.4.1. Choix de la méthode d'interpolation

Pour modéliser la géométrie des interfaces : surface de base des altérites et surface de base du fissuré, un recours à l'interpolation est nécessaire.

Plusieurs techniques d'interpolation existent parmi lesquelles nous avons choisi le krigeage, un des outils fondamentaux de la géostatistique (cf. détail en annexe 1). Un avantage essentiel du krigeage, par rapport aux interpolateurs classiques, réside dans la quantification de l'incertitude associée à l'interpolation, rendue possible par la modélisation de la structure spatiale. Cette incertitude qui est un indicateur de la qualité d'une interpolation est représentée généralement par la carte d'écart-types de krigeage (ou carte d'iso-incertitudes).

Dans le cadre de cette étude, à partir d'un semis de points caractérisant une altitude, l'approche géostatistique mise en œuvre va permettre :

- de caractériser la variabilité spatiale des paramètres étudiés ; c'est l'objectif de l'analyse variographique ;
- d'interpoler par krigeage les variables de travail aux nœuds d'un maillage régulier, par exemple, dans les cartes SILURES Bretagne, la maille est de 250 m.

Pour chaque secteur géographique étudié, la grille interpolée contient, au droit de chaque nœud, les informations suivantes :

- l'altitude krigée,
- et l'écart-type de krigeage, c'est-à-dire l'erreur associée (exemple : $100 \text{ m} \pm 2.5 \text{ m}$).

Une carte d'iso-incertitudes est ensuite établie sur le secteur étudié. Cette carte est un indicateur de la qualité de l'interpolation ; de ce point de vue elle permet de bien identifier les zones peu ou mal reconnues. De manière générale, l'écart-type de krigeage :

- prend des valeurs minimales dans le voisinage des points de mesures, ainsi l'estimation est de bonne qualité,
- augmente lorsque l'on s'éloigne des données ; cette augmentation est fonction de la variabilité spatiale du phénomène et donc des paramètres d'ajustement du variogramme adopté.

Chaque carte présentée ci-après sera associée à un encart d'incertitudes.

3.4.2. Modélisation de la base des altérites et de l'épaisseur des altérites en place

Correction des données

Suite à une première tentative de modélisation, les données interprétées d'environ 900 forages (sur 12 000 forages traités) semblaient à revoir. Les opérations suivantes ont alors été effectuées : correction de l'altitude de forages, corrections des interfaces base des altérites et base du fissuré par défaut, élimination des forages positionnés dans des formations qui ne sont pas du socle (alluvions, sables, bassins du Tertiaire), élimination des forages situés dans des formations géologiques qui ne s'altèrent pas (quartzites), enlèvement des forages où l'épaisseur des altérites était inférieure ou égale à 1 mètre, traitement des surconcentrations de points.

Il a ensuite été décidé de lancer le travail de modélisation sur toute la Bretagne, puis, lors du calcul d'épaisseur des altérites, d'effacer les résultats dans deux types de secteurs (cf. illustration 9) : les formations qui ne sont pas du socle (en gris sur l'illustration) et les formations géologiques qui ne s'altèrent pas (quartzites, en vert sur l'illustration). Les contours proviennent de la carte géologique synthétique de la Bretagne à l'échelle du 1/250 000 (Rabu D. et al., 2001).

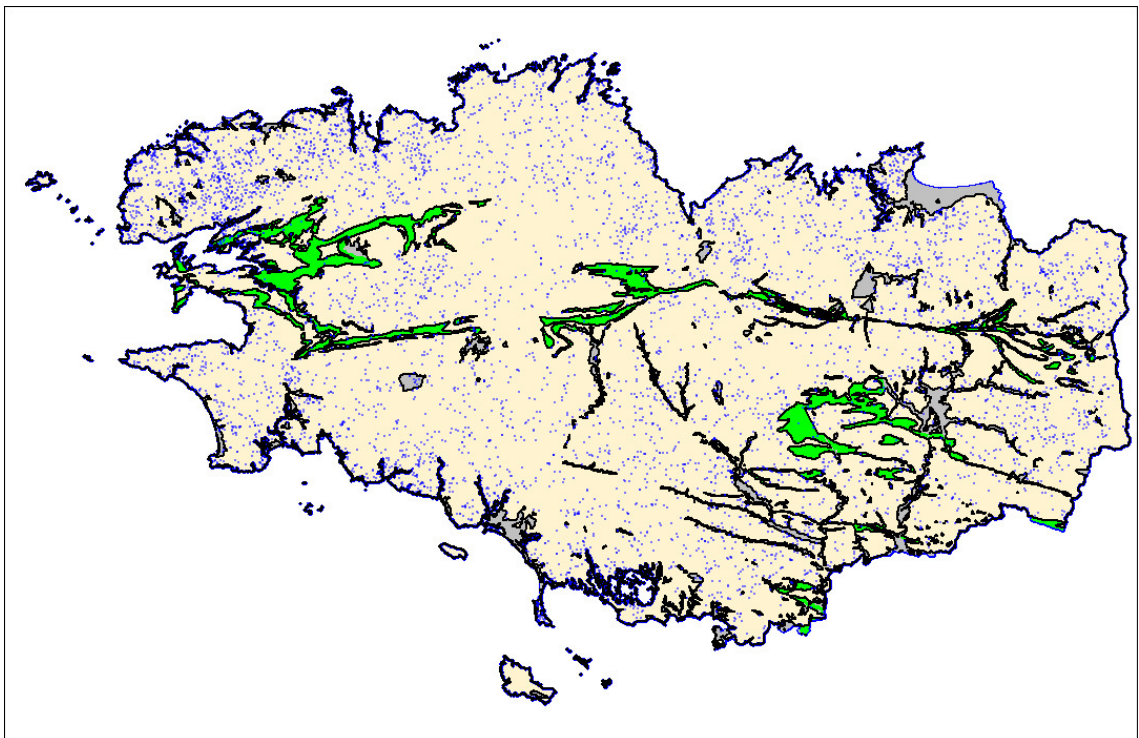


Illustration 9 - Périmètre de krigeage de l'altitude de la base des altérites, et points avec altitude

Modélisation

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'ensemble des points représente une densité d'observations d'environ 1 point pour 4.5 km² (secteur étudié : 27 390 km²). Ils sont bien répartis spatialement sur la Bretagne (cf. illustration 9) avec néanmoins quelques concentrations d'ouvrages, notamment dans le Nord du Finistère, et quelques secteurs pauvres soit en données décrites, soit en ouvrages (par exemple le secteur des Mont d'Arrées).

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.

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). L'incertitude (écart-type de krigeage) sur l'altitude de cette surface est représentée sur un encart de l'illustration 10. Cette carte montre que l'écart-type de krigeage est faible à proximité de chaque point servant de base à la modélisation (altitude de la base des altérites connue), tandis que cet écart-type augmente dans les secteurs où la densité de points est plus faible (notamment en bordure des côtes et en limite de région).

La carte de l'extension et de l'épaisseur des altérites en place 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).

Elle est représentée sur la carte principale de l'illustration 10.

L'épaisseur des altérites varie entre 0 et 40 m. Les épaisseurs supérieures à 40 m, incohérentes avec le modèle conceptuel de l'illustration 2, ont été mises en zones non renseignées (elles). Ces secteurs, représentant moins de 0.8 % de la superficie bretonne, correspondent à : des zones peu renseignées, des contacts géologiques, et des contours de formations quartzitiques.

L'illustration 10 montre que la Bretagne est relativement bien pourvue en altérites.

Une comparaison de cette illustration avec les quelques cartes géologiques à 1/50 000 où le recouvrement des altérites est mentionné, montre la bonne cohérence de cette représentation.

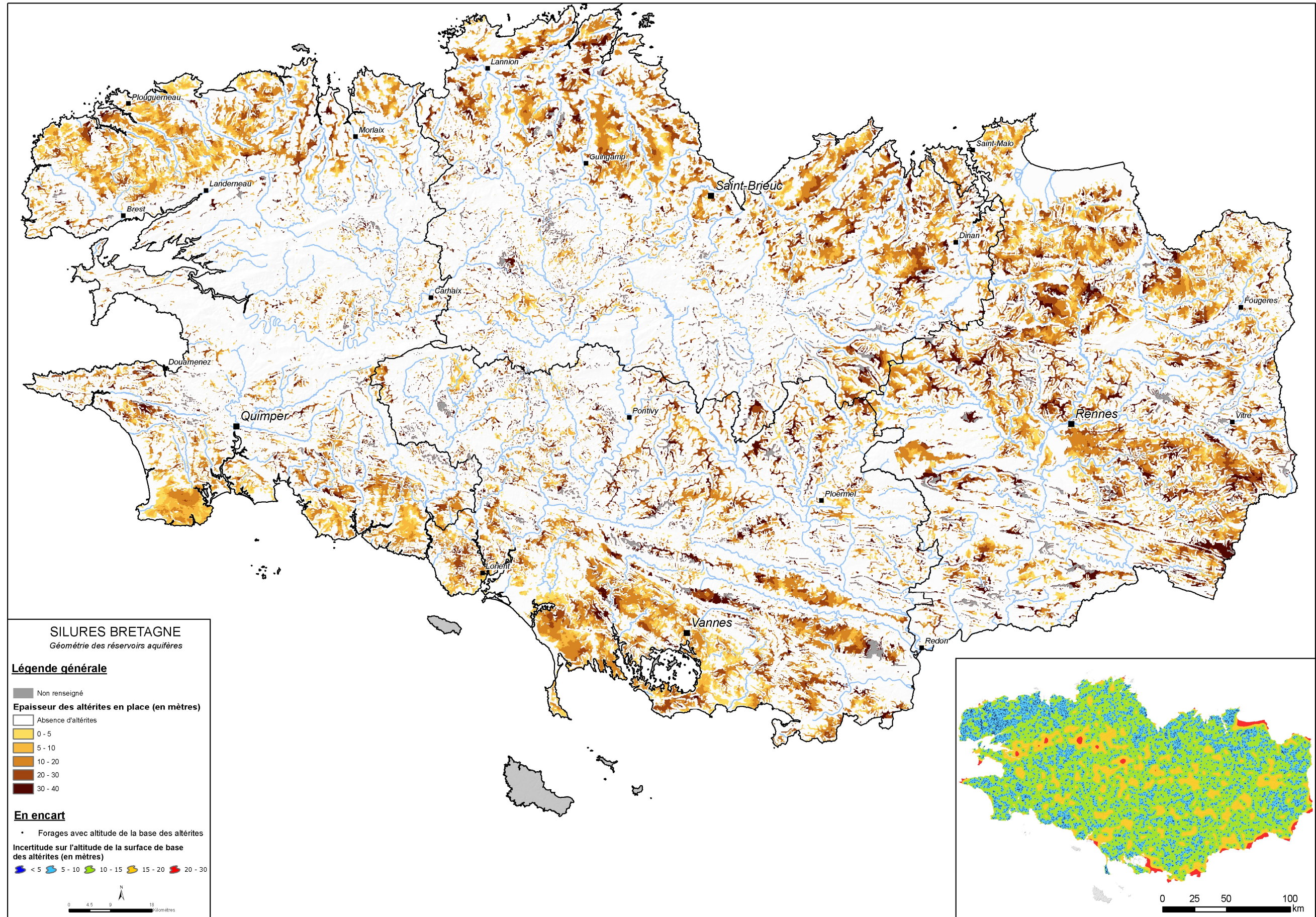


Illustration 10 - Épaisseur des altérites en place calculée à partir de l'interprétation des données de forages

L'illustration 10 montre également que les altérites occupent une superficie importante de la Bretagne au-dessus des formations de socle. Les connaissances régionales permettent de subdiviser cet ensemble en 6 groupes distincts :

- la plate-forme du Trégor (Nord-Ouest des Côtes d'Armor) présente des altérites sur presque toute sa surface. On sait cependant que si l'on trouve effectivement des altérites dans le Trégor, il s'agit principalement de formations très résiduelles de base de profil d'altération cénozoïque ou d'altération plus récentes et peu développées. La plate-forme du Trégor a été soumise à plusieurs invasions marines au cours du Plio-Pléistocène et l'abrasion qui en a résulté a décapé une grande partie du stock des formations d'altération. Dans ce secteur, et il semble que ce soit le seul pour l'ensemble de la carte obtenue par interpolation, le recouvrement est vraisemblablement surestimé, sans doute en raison de la présence importante de limons ;
- la plate-forme du Léon (Nord Finistère) présente aussi des altérites sur presque toute sa surface. Ceci est confirmé par les connaissances régionales du secteur. Les altérites font aussi partie de profils résiduels et il n'est que très rare de rencontrer des épaisseurs suffisantes (plus de 30 mètres) pour observer un profil type non tronqué tel que présenté en illustration 2. Cet ensemble du Léon se prolonge vers l'Est en longeant la bordure méridionale des Monts d'Arrée. Au sud de la baie de Morlaix, le recouvrement est moins important car les altérites ont été décapées par le système de drainage représenté par le Queffleuth, le Jarlot et le Tromorgant. Elles redeviennent prépondérantes au niveau de Guingamp où les épaisseurs deviennent par ailleurs plus notables ; il n'est pas rare de rencontrer entre Guingamp et St-Brieuc des profils arénisés sur les migmatites ou sur l'intrusion de Plouffragan pouvant dépasser 10 à 15 mètres de puissance. Cet ensemble se poursuit à l'Est de la baie de St-Brieuc dans les régions de Lamballe (Protérozoïque) puis de Dinan (leucogranite) et de St-Malo (migmatites). Néanmoins, à partir de la baie de St-Brieuc, les épaisseurs sont moindres et atteignent rarement plus d'une dizaine de mètres ;
- la région qui s'étire de la Pointe du Raz jusqu'à Redon (Sud Bretagne) est peut-être la moins connue en terme de répartition des formations d'altération. Sur ce vaste secteur qui a connu plusieurs invasions marines, les altérites, essentiellement des arènes granitiques à majorité de corps plutoniques et métaplutoniques, sont cependant bien représentées. Ceci peut être confirmé actuellement dans les régions du sud de Quimper et aux abords immédiats de Lorient où l'élargissement des voies rapides met à jour de beaux affleurements d'arènes. Dans tout ce secteur cependant, les variations dans l'épaisseur des altérites sont assez brutales. En effet, en quelques dizaines de mètres de marche à pied, on peut passer de la roche saine à plus de 10 mètres d'altérites ;
- au nord de ce secteur, dans la partie occidentale et avant d'atteindre la frange Sud des Monts d'Arrée, de l'Ouest de Gourin à Loudéac, en passant par Pontivy, se différencie un domaine où les altérites semblent n'occuper que de faibles étendues. Ceci peut sans doute s'expliquer par la mise en place de puissants systèmes de drainage et d'érosion que sont les multiples ramifications de l'Odet, de la Laïta, du Scorff, du Blavet et de l'Oust. Une origine lithologique est aussi certainement à

rechercher car aujourd'hui elle n'est pas bien définie. La région de Scaër cependant montre un recouvrement beaucoup plus important dans ce domaine. Des études effectuées il y a une trentaine d'années ont montré qu'il s'agit d'une région où les profils d'altération peuvent atteindre 30 mètres ou plus. La cause de ces épaisseurs remarquables est assez mal définie mais est sans doute à rechercher dans la présence de barrières de blocage de l'érosion au niveau du cisaillement sud-armoricain, aussi sans doute dans la présence de compartiments effondrés le long de failles orientées N140 ;

- vers l'Est se différencient les domaines (Est du Morbihan et la majorité de l'Ille-et-Vilaine) particulièrement réputés pour leur recouvrement en altérites : on entre dans les séries protérozoïques et paléozoïques de Bretagne centrale largement altérées, excepté au passage de masses plus gréseuses et donc plus résistantes. Dans ces secteurs s'observent les profils d'altération parmi les plus complets de Bretagne et nombre d'entre eux sont encore coiffés de leurs cuirasses siliceuses ou ferrifères ;
- enfin, le dernier domaine est celui des Monts d'Arrée où les altérites sont le moins représentées. Sur la bordure maritime, comme pour la plate-forme du Trégor et les domaines sud-armoricain, les invasions marines ont très largement décapé les altérites, notamment dans les régions de la presqu'île de Crozon, de Plougastel-Daoulas... Quelques altérites relictuelles peuvent être rencontrées sur les formations paléozoïques au Sud du Menez Hom. Le granite de Huelgoat peut aussi montrer localement des arènes mais celles-ci restent d'extension limitée et peu épaisses. Enfin, le carbonifère du bassin de Châteaulin est quasiment dépourvu d'altérites, décapées vraisemblablement lors de l'installation et du développement de l'Aulne.

3.4.3. Modélisation de la base de l'horizon fissuré par défaut et de son épaisseur

La surface de base de l'horizon fissuré par défaut a été construite par krigeage, après étude géostatistique, d'une population de 3 836 points d'observation de l'interface milieu fissuré/roche saine.

Ce jeu de données a été constitué en plusieurs étapes :

- première modélisation avec 1 074 ouvrages où la base de l'horizon fissuré par défaut a été interprétée, obtention d'une grille régionale au pas de 250 m ;
- comparaison de la valeur interpolée avec l'altitude du fond de 8 358 forages sensés ne pas traverser totalement le milieu fissuré ;
- sélection des 2 742 points où l'interface krigée (milieu fissuré/roche saine) se situe bien sous la profondeur du forage (pour les 5 616 forages restant, l'interface n'est donc pas connue par manque d'information du foreur) ;
- constitution d'un jeu de données avec 3 836 points (1 074 avec base du fissuré + 2 742 avec base déduite).

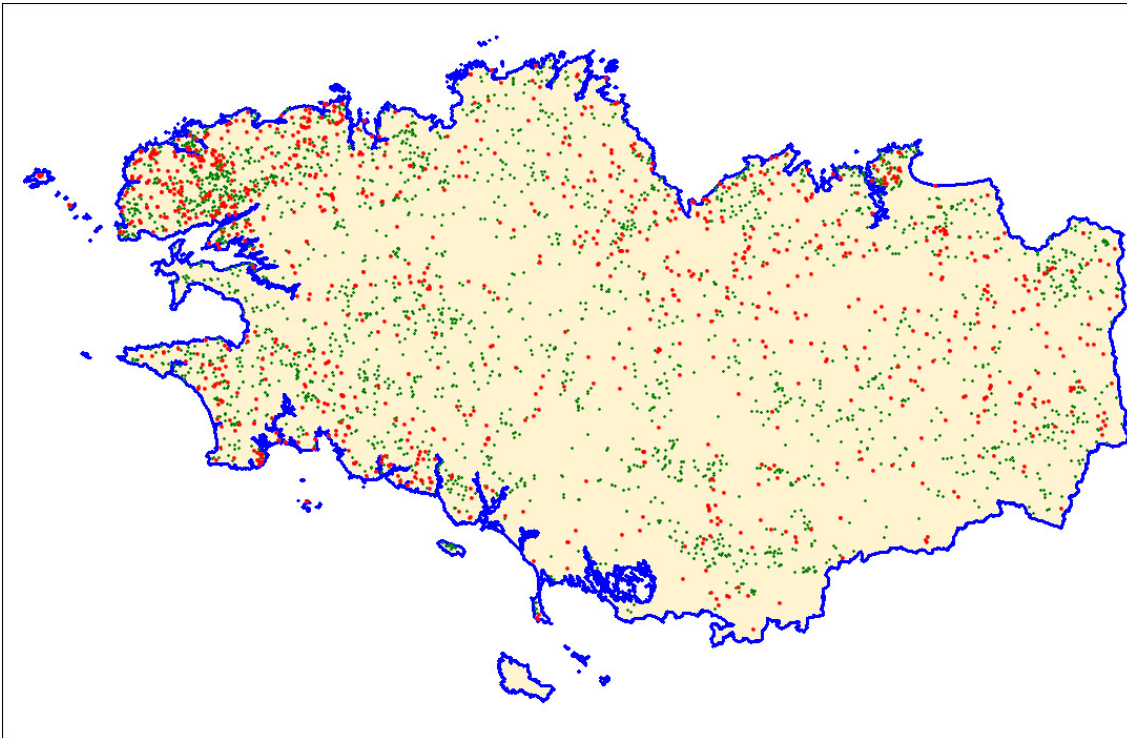


Illustration 11 - Périmètre de krigeage de l'altitude de la base de l'horizon fissuré par défaut, et points avec altitude

L'ensemble des 3 836 points représente une densité d'observations d'environ 1 point pour environ 7 km² (secteur étudié : 27 390 km²). Ils sont bien répartis spatialement sur la Bretagne (cf. illustration 11, 1 074 ouvrages en rouge et 2 742 en vert) avec néanmoins quelques concentrations d'ouvrages, notamment dans le Nord du Finistère, et plusieurs secteurs pauvres soit en données décrites, soit en ouvrages (par exemple entre Dinan et Rennes).

L'écart-type de krigeage, quantifiant l'erreur associée à la variable interpolée, varie entre 6 et 71 m, avec une moyenne de 15.9 m.

L'incertitude (écart-type de krigeage) sur l'altitude de cette surface est représentée sur un encart de l'illustration 12. Cette carte montre que l'écart-type de krigeage est faible à proximité de chaque point servant de base à la modélisation (altitude de la base des altérites connue), tandis que cet écart-type augmente dans les secteurs où la densité de points est plus faible (notamment en bordure des côtes).

La carte de l'extension et de l'épaisseur du milieu fissuré par défaut a été réalisée par différence entre l'altitude de la base des altérites et l'altitude de la base de l'horizon fissuré par défaut dans les secteurs où les altérites sont présentent, ou sinon entre le MNT et la surface de base du milieu fissuré.

Elle est représentée sur la carte principale de l'illustration 12.

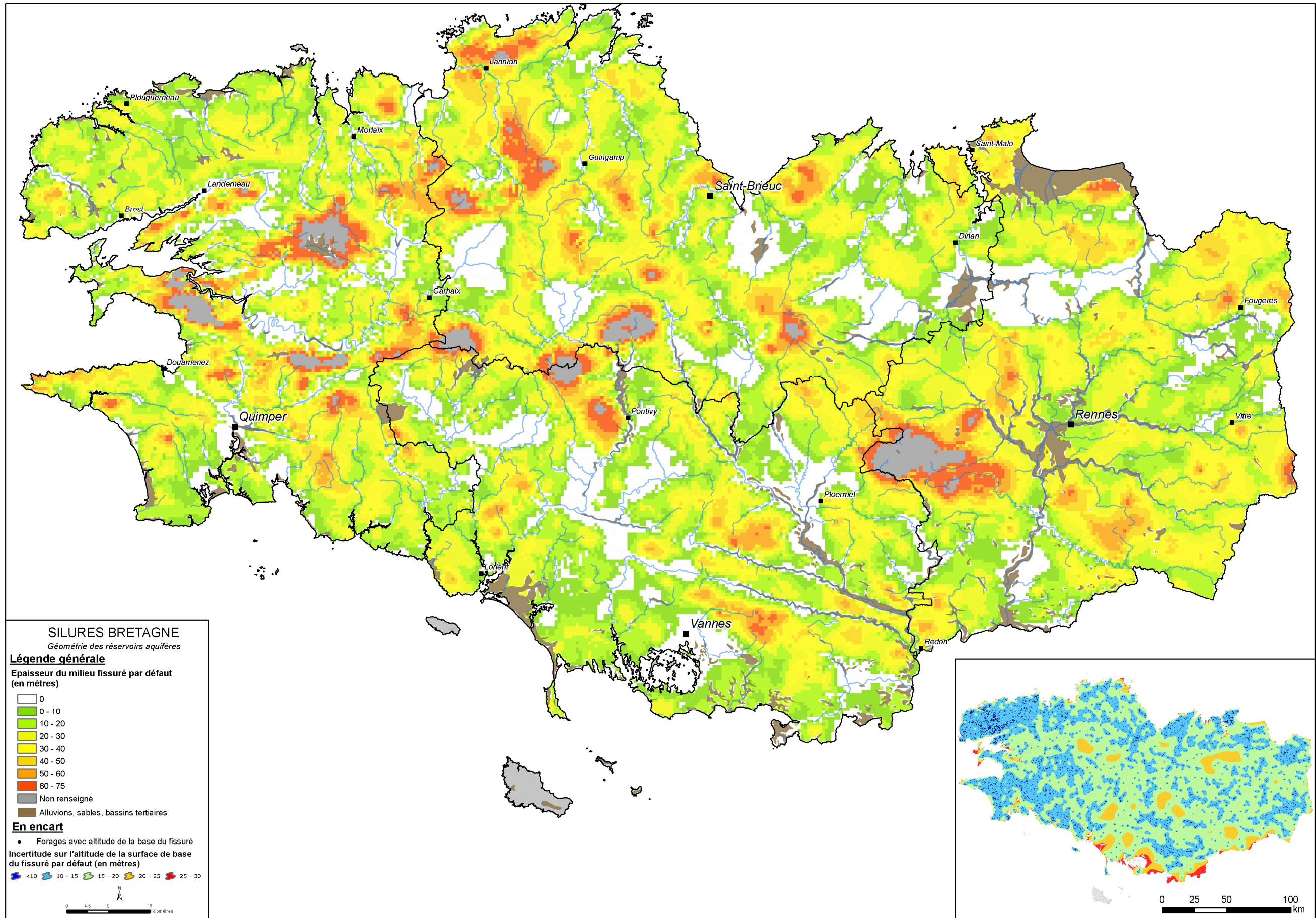


Illustration 12 - Épaisseur du milieu fissuré profond par défaut calculée à partir de l'interprétation des données de forages

L'épaisseur du milieu fissuré par défaut varie entre 0 et 75 m. Les épaisseurs supérieures à 75 m, incohérentes avec le modèle conceptuel de l'illustration 2, ont été mises en zones non renseignées. Ces secteurs, assez présents, correspondent à des zones peu renseignées où les forages font entre 30 et 50 m de profondeur. Il s'agit souvent de surépaisseurs calculées au niveau de formations gréseuses qui ne développent pas un horizon fissuré d'altération mais une fissuration intrinsèque liée à l'évolution diagénétique et tectonique de la roche.

Les formations qui ne sont pas du socle ont été isolées.

Beaucoup de secteurs à épaisseur nulle sont présents surtout au niveau des vallées et dans les secteurs peu renseignés, à fortes incertitudes soit de la base du fissuré soit de celle des altérites.

L'illustration 12 apparaît donc comme une carte très incomplète, en raison de la faible profondeur des ouvrages bretons et de la difficulté à caractériser l'interface milieu fissuré/roche saine. Nous verrons dans le chapitre suivant, qu'une carte plus pertinente que celle-ci a été créée : il s'agit de l'épaisseur du fissuré utile.

3.5. PRODUCTIVITE DU SOUS-SOL

3.5.1. 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'). L'illustration 13 montre les résultats obtenus.

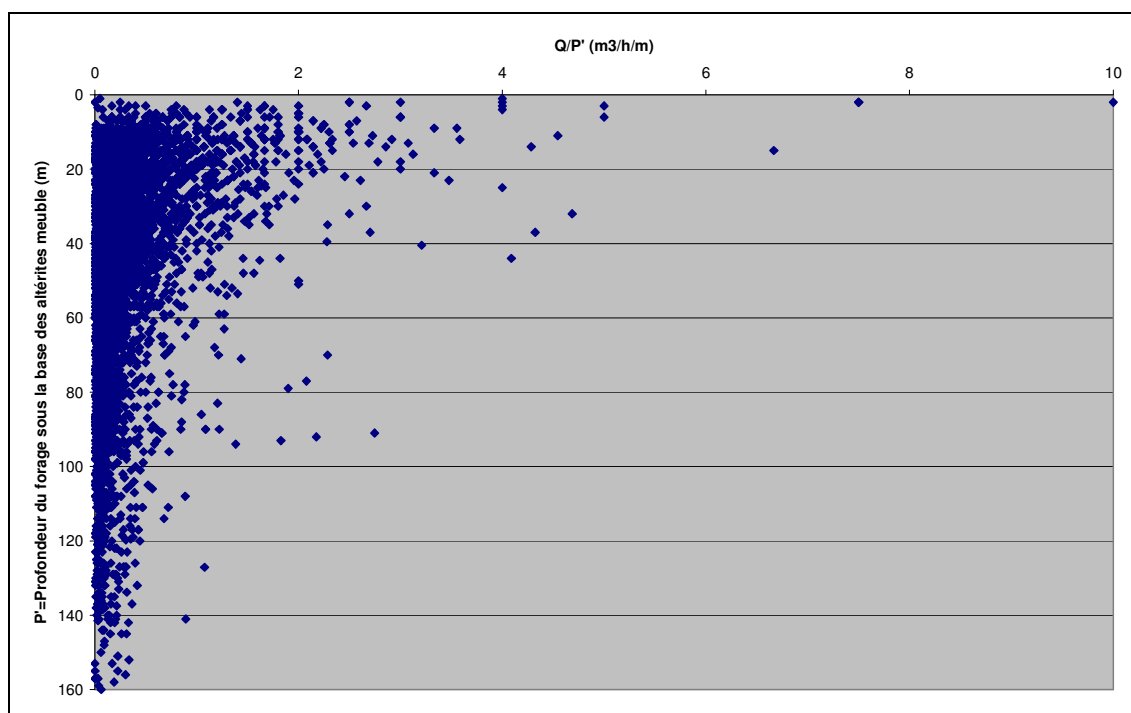


Illustration 13 - Débits instantanés par mètre en fonction de la profondeur du forage en dessous de la base des altérites meubles

Cette illustration 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 récemment mise au point (Courtois et al. 2008). Elle consiste à calculer un pourcentage cumulé de débit linéaire.

Pour chaque formation géologique suffisamment renseignée, il est possible de calculer :

$$q_i(l_i) = \frac{Q_i}{l_i}, i=1, n$$

Avec Q_i le débit instantané obtenu en fin de foration (en m³/h) au niveau du forage i , l_i la profondeur du forage i sous la base des altérites meubles (en m ; dans le rapport on appelle aussi cette profondeur P'), et le rapport $q_i(l_i)$ appelé débit linéaire (m³/h/m).

Ensuite, le pourcentage cumulé de débit linéaire est défini de la façon suivante :

$$p_q(L) = \frac{\sum_{l=Min(l_i, i=1, n)}^L q_i(l)}{\sum_{l=Min(l_i, i=1, n)}^{l=Max(l_i, i=1, n)} q_i(l)}, L=Min(l_i), Max(l_i), i=1, n$$

Avec L une profondeur donnée de forage sous la base des altérites meubles, et $p_q(L)$ le pourcentage cumulé de débit linéaire obtenu avec l'échantillon de forages dont la profondeur est inférieure à L .

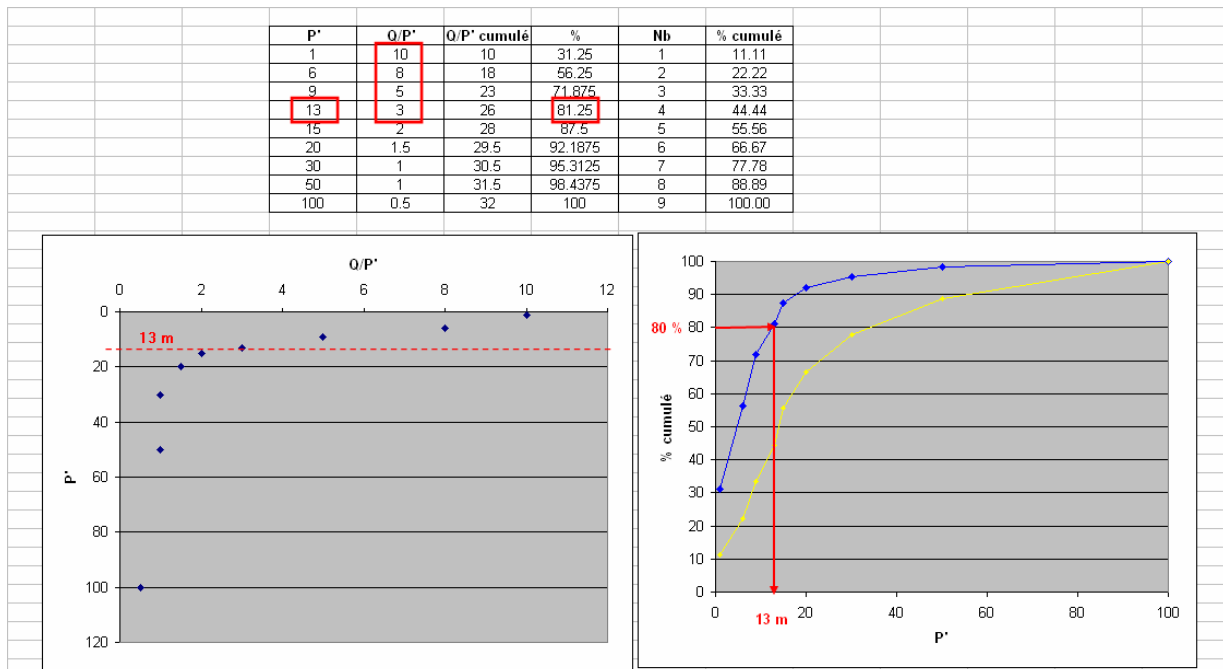


Illustration 14 - Exemple de calcul du pourcentage cumulé de débit linéaire

L'illustration 14 ci-dessus donne un exemple simple de calcul (qui ne correspond à aucun cas réel) avec une formation qui serait recoupée par 7 forages. Le tableau détaille le calcul du pourcentage cumulé de débit linéaire (4^{ème} colonne notée « % »), le graphique de droite montre sa représentation (en bleu) en fonction de la profondeur P' (le pourcentage cumulé du nombre de forages est également représenté en jaune, colonne la plus à droite du tableau notée « % cumulé »). Le graphique de gauche est l'équivalent de l'illustration 13.

L'illustration 15 montre le même type de représentation à partir des forages bretons qui traversent la base des altérites.

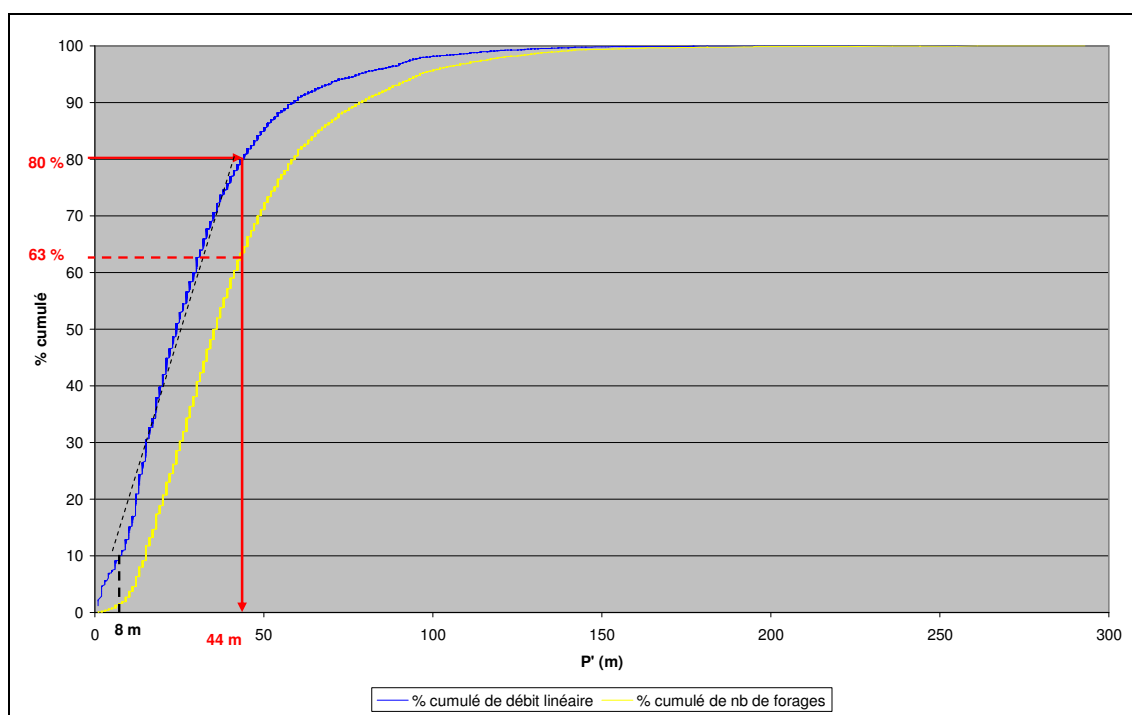


Illustration 15 - Calcul du pourcentage cumulé de débit linéaire sur 6089 forages bretons

Le pourcentage cumulé de débit linéaire (courbe bleue) permet de caractériser efficacement les propriétés hydrauliques de l'horizon fissuré :

- les premiers mètres (environ 8 m) sous la base des altérites meubles montrent une forte pente (pente cependant plus faible que le second secteur de la courbe). Cette épaisseur de 8 m caractérise l'incertitude de l'interprétation de l'altitude de la base des altérites : les forages n'ont peut-être pas encore atteint le milieu fissuré ;
- après ces premiers mètres (de 8 à 44 m), la pente de la courbe est beaucoup plus forte (quasiment une droite), ce qui signifie que l'on trouve ici les meilleurs résultats de débits linéaires. Cette épaisseur correspond à la partie la plus fissurée de l'horizon donc la plus productive ;

- avec la profondeur croissante, la pente devient de plus en plus faible : le pourcentage cumulé de débit linéaire augmente très doucement puis stagne en cohérence avec la diminution du nombre de fissures. Cette zone peut correspondre à la partie basse de l'horizon fissuré.

Cette illustration montre que 80 % du débit linéaire total des forages bretons recoupant la base des altérites est produit par environ 63 % des forages les moins profonds.

L'analyse de cette illustration permet de déduire plusieurs paramètres :

- l'épaisseur de l'horizon fissuré utile, qui correspond à l'épaisseur définie par le seuil de 80 % (pourcentage cumulé de débit linéaire), et qui sur la base de l'illustration 15 est de 44 m,
- la productivité de cet horizon fissuré utile (2 paramètres : le débit linéaire = débit du milieu fissuré utile rapporté à l'épaisseur de l'horizon fissuré utile, et le débit du milieu fissuré utile ; cf. formules ci-dessous) : ici respectivement 0.38 m³/h/m et 16.9 m³/h (0.38 x 44).

$$q_M(L) = \frac{\sum_{l=Min(l_i, i=1, n)}^L q_i(l)}{j(L)}, \quad i=1, n$$

$$Q_M(L) = q_M(L) \times L$$

Avec $q_M(L)$ la moyenne de débit linéaire (m³/h/m) calculée pour la gamme de profondeur L (m) située sous la côte définie par le seuil de 80 % du pourcentage cumulé de débit linéaire $p_q(L)$, $j(L)$ le nombre de forages correspondant. $q_M(L)$ peut aussi être appelé le débit linéaire du milieu fissuré utile.

$Q_M(L)$ est quant à lui le débit du milieu fissuré utile : c'est le produit du paramètre précédent par l'épaisseur définie par le seuil de 80 %.

Si l'on reprend l'exemple simple de l'illustration 14 (cf. annotations en rouge), les résultats sont les suivants :

- épaisseur de l'horizon fissuré utile = environ 13 m ;
- débit linéaire du milieu fissuré utile = 6.5 m³/h/m (= (10+8+5+3)/4) ;
- débit du milieu fissuré utile = 84.5 m³/h (= 6.5 x 13).

3.5.2. Pertinence de la méthode du seuil de 80 %

Afin d'apprécier la pertinence de la méthode présentée au paragraphe précédent, que l'on appellera « méthode du seuil de 80 % », celle-ci a été comparée sur 11 formations géologiques avec deux autres méthodes :

- une méthode basée sur l'interprétation des sondages de Résonance Magnétique Protonique (RMP)¹ qui permet d'approcher l'épaisseur de l'horizon fissuré supérieur (découpage de l'horizon en deux parties supérieure/inférieure en raison de ses propriétés hydromécaniques : porosité et perméabilité),
- une méthode qui s'appuie sur l'interprétation des données de forages et permet de calculer l'épaisseur de la partie de l'horizon fissuré renseignée par ces forages, partie appelée « horizon fissuré par défaut ».

Les résultats obtenus sont détaillés sur le tableau et le graphique de l'illustration 16.

Les formations sont classées, de la gauche vers la droite de l'illustration 16, selon la géologie : 5 formations granitiques, puis 3 métamorphiques et enfin 3 schisteuses. Un classement par épaisseur du fissuré croissante montre globalement une tendance identique au niveau des deux autres méthodes de détermination de cette épaisseur.

L'illustration 16 montre que, dans la détermination d'une épaisseur plus ou moins partielle de l'horizon fissuré, c'est la méthode du seuil de 80 % qui propose l'épaisseur la plus forte, puis celle d'interprétation des données des forages et enfin celle d'interprétation des sondages RMP. Les forages semblent donc traverser tout le fissuré supérieur et un peu du fissuré inférieur, tandis que la méthode du seuil de 80 % doit caractériser tout le fissuré supérieur puis la partie la plus productive du fissuré inférieur (cf. illustration 2).

Nous retiendrons donc cette méthode du seuil de 80 % car elle semble plus globalisante et parce qu'elle renseigne l'épaisseur la plus productive de l'horizon fissuré (cf. illustrations 13, 14 et 15).

¹ Les résultats présentés proviennent de 5 études utilisant cette technique de Résonance Magnétique Protonique sur les secteurs suivants : Plabennec, Rade de Brest, bassins Yar Horn et Naizin, 5 bassins de l'étude SILURES Bassins versants (cf. références en bibliographie).

Formation	Géologie	Epaisseur de l'horizon fissuré (m) calculé avec méthode :					
		seuil de 80%	Nb forages	interprétation forages	Nb forages	sondages RMP (Fsup)	Nb RMP
Massifs de Bonnemain et Fougères	granodiorites	51.0	59	32.5	12	11.5	2
Massifs de Vire	granodiorites	43.0	49	34.5	14	13.2	5
Massifs de Ploudalmézeau et Kernilis	leucogranites	39.5	41	26.2	35	15.0	5
Massif de Saint-Renan	monzogranites	25.0	47	17.9	19	14.0	2
Massif de Kersaint	monzogranites	23.0	114	15.1	20	14.4	5
Massif de Brest	métagranodiorites, quartzdiorites	32.0	42	31.9	17	14.3	3
Formation de Lesneven	paragneiss, orthogneiss	33.5	121	17.8	35	11.1	7
Formations du Conquet et de la Penzé	micaschistes, paragneiss	42.0	63	23.2	21	9.3	4
Formation de Plougastel	schistes, quartzites	34.0	64	26.8	18	20.0	4
Formation de Pont-de-Buis	schistes, grès, wackes	40.0	165	28.0	34	19.0	3
Formation de la Mayenne (Ouest faille Quessoy)	schistes, grès, wackes	45.0	255	32.7	30	20.6	15

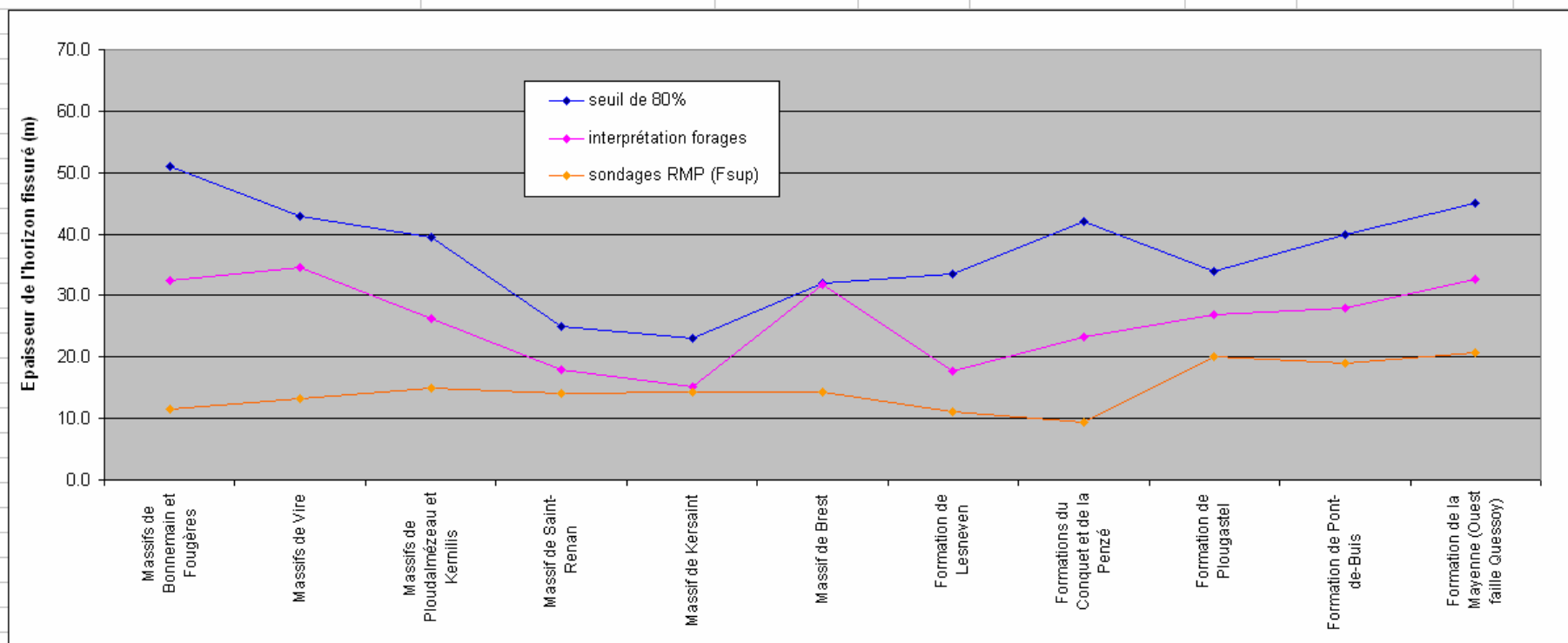


Illustration 16 - Comparaison de 3 méthodes permettant d'approcher l'épaisseur de l'horizon fissuré

3.5.3. Calcul des caractéristiques du milieu fissuré utile

Les paramètres définis ci-dessus (épaisseur, débit linéaire et débit du milieu fissuré utile) ont pu être calculés sur 31 formations géologiques. Ces formations développent un horizon fissuré d'altération (différenciation de Q/P' en fonction de la profondeur P', cf. illustration 13) et elles sont suffisamment renseignées par des forages recoupant la base des altérites (au moins 20 forages en-dessous du seuil de 80 %).

Les résultats sont présentés dans le tableau de l'illustration 17. Le nombre total de forage renseignant chaque formation est également rappelé (2^{ème} colonne).

Formation géologique	Nb de forages	Épaisseur du fissuré utile (m)	Nb de forages associés	Débit linéaire du fissuré utile (m ³ /h/m)	Débit du fissuré utile (m ³ /h)
Champs de Cesson et de Bais	158	43.0	49	0.391	16.8
Formation d'Argentré	408	40.0	165	0.247	9.9
Formation de la Mayenne (Est faille Quessoy)	779	49.0	284	0.310	15.2
Formation de la Mayenne (Ouest faille Quessoy)	837	45.0	255	0.261	11.7
Formation de Lanvollon	139	47.0	49	0.337	15.8
Formation de Lesneven	225	33.5	121	0.524	17.5
Formation de Plougastel	168	34.0	64	0.362	12.3
Formation de Pont-de-Buis	408	40.0	165	0.247	9.9
Formation de Saint-Malo	259	53.0	76	0.333	17.6
Formation du Faouët	219	36.0	74	0.276	9.9
Formations de Fougères et de Granville	263	36.0	118	0.604	21.8
Formations de Fougères et Granville	245	59.0	111	0.567	33.5
Formations de Lamballe et de Saint-Lô	223	42.0	80	0.462	19.4
Formations du Conquet et de la Penzé	123	42.0	63	0.474	19.9
Massif de Brest	114	32.0	42	0.479	15.3
Massif de Ergué-Languidic	78	40.0	28	0.605	22.4
Massif de Kersaint	210	23.0	114	0.611	14.1
Massif de l'Aber Ildut	96	22.0	36	0.646	14.3
Massif de Lannilis	35	19.0	20	0.744	14.1
Massif de Plouhinec	92	56.0	47	0.255	14.3
Massif de Pluguffan	86	30.0	34	0.373	11.2
Massif de Questembert	134	30.0	40	0.383	11.5
Massif de Saint-Renan	107	25.0	47	0.950	21.9
Massifs de Bonnemain et Fougères - type Louvigné	153	51.0	59	0.388	19.8
Massifs de Coëtmieux, Plouha et Pontrieux	57	54.0	23	0.210	11.3
Massifs de Ploudalmézeau et Kernilis	93	39.5	41	0.369	14.6
Massifs de Rostrenen, Croisty	62	47.0	27	0.261	12.3
Massifs de Saint-Quay, Squiffiec et Saint-Alban	56	48.0	20	0.368	17.7
Massifs de Scaer, Pontivy, Séglien, Odet, L	178	33.0	55	0.243	8.0
Massifs de Tréglonou et de Plounévez	115	37.0	57	0.457	16.9
Massifs de Vire, Athis, Avranches, la Ferté-Macé,	158	43.0	49	0.391	16.8

Illustration 17 - Principales propriétés de l'horizon fissuré utile défini par la méthode du seuil de 80 % sur 31 formations géologiques

Ces informations ont été associées sur SIG aux limites provenant de la carte géologique synthétique de la Bretagne à l'échelle du 1/250 000.

Les caractéristiques du milieu fissuré utile ont également été estimées sur 11 autres formations géologiques qui ne semblent pas développer un horizon fissuré d'altération (pas de différenciation de Q/P' en fonction de la profondeur P') mais qui sont suffisamment renseignées par des forages. La fissuration de la roche provient alors d'une fissuration intrinsèque liée à l'évolution diagénétique et tectonique de la roche. Pour chacune de ces 11 formations, une méthode un peu différente a été retenue :

- calcul de l'épaisseur moyenne de l'horizon fissuré par défaut, issu de l'interprétation des données de forages (calcul réalisé avec au moins 10 forages),
- calcul du débit linéaire du milieu fissuré par défaut (Q/P' moyen sur l'épaisseur définie ci-dessus, avec au moins 7 forages recoupant la base des altérites),
- multiplication des deux paramètres et obtention du débit du milieu fissuré par défaut.

Ce calcul permet de caractériser une épaisseur de fissuré puisque sur ces formations la méthode du seuil de 80 % ne peut pas s'appliquer. Comme on peut le voir sur l'illustration 16, cette méthode aura tendance à sous-estimer un peu l'épaisseur productive du fissuré. Malgré cela, et en l'absence d'autre solution connue, dans la suite du rapport, l'épaisseur du fissuré par défaut calculé sur les formations géologiques qui ne développent pas un horizon fissuré d'altération sera assimilée à un horizon fissuré utile.

Les résultats sont présentés dans le tableau de l'illustration 18. La 2^{ème} colonne indique le nombre total de forage renseignant chaque formation, la 4^{ème} colonne le nombre de forage permettant le calcul de l'épaisseur du fissuré par défaut, et la dernière le nombre de forage pour le calcul du débit linéaire.

Formation géologique	Nb de forages	Epaisseur du fissuré par défaut (m)	Nb de forages associés	Débit linéaire du fissuré (m ³ /h/m)	Débit du fissuré (m ³ /h)	Nb de forages associés
Formation de Missillac	96	30.6	11	0.190	5.8	12
Formation de Moëlan	49	22.4	10	0.171	3.8	13
Formation du Château-du-Mur	101	23.8	11	0.390	9.3	21
Groupes de Landevennec et Seillou-Guendaré	101	23.8	11	0.390	9.3	21
Groupes de Traon et de Fréau	62	32.9	10	0.338	11.1	13
Massif de Brignogan	48	20.5	11	0.301	6.2	8
Massif de Lanvaux	96	30.6	11	0.190	5.8	12
Massif de Moncontour	70	25.8	16	0.199	5.1	7
Massif de Pont-l'Abbé	136	21.1	20	0.184	3.9	40
Massif de Quintin	105	30.1	19	0.280	8.4	9
Massifs de Plougouven et Keréven	57	27.5	17	0.365	10.0	15

Illustration 18 - Principales propriétés de l'horizon fissuré par défaut défini par la méthode d'interprétation des données de forages sur 11 formations géologiques

De la même façon que les 31 formations précédentes, ces valeurs de paramètres ont été associées sur SIG aux limites provenant de la carte géologique synthétique de la Bretagne à l'échelle du 1/250 000.

Sur les 42 formations renseignées, l'épaisseur de l'horizon fissuré varie de 19 à 59 m, avec en moyenne 36.1 m. Le débit linéaire est quant à lui compris entre 0.17 et

0.95 m³/h/m (moyenne 0.38 m³/h/m), tandis que le débit évolue entre 3.8 et 33.5 m³/h (moyenne 13.5 m³/h).

Ces 42 formations (31+11) représentent 59 % de la superficie totale de la Bretagne.

Le chapitre ci-dessous explique comment le reste de la Bretagne a pu être renseigné.

3.5.4. Productivité du milieu fissuré utile

Le fond de carte géologique au 1/250 000, travaillé à partir du fond de carte géologique synthétique de la Bretagne à l'échelle du 1/250 000 (cf. méthode dans le rapport BRGM/RP-55001-FR, année 4), comporte au total 213 formations géologiques.

Le chapitre précédent montre que 42 formations, représentant 59 % de la superficie totale de la Bretagne, ont été renseignées. Sur les 41 % restant de la superficie totale de la Bretagne, les 171 formations géologiques se répartissent de la façon suivante :

- 83 formations où les caractéristiques du milieu fissuré utile ont été extrapolées (32 % de la superficie bretonne),
- 14 formations qui ne sont pas composées de roches de socle : alluvions, sables, bassins du Tertiaire (4 % de la superficie),
- et 74 formations de socle qui n'ont pas pu être renseignées faute de données suffisantes de forages (5 % de la superficie).

Les paragraphes ci-dessous expliquent comment ont été renseignées les formations extrapolées.

Débit

Le chapitre 3.3.2. explique que, sur chaque formation suffisamment renseignée par des forages, le paramètre débit moyen du quartile supérieur a été calculé. Il est calculé avec la moyenne des débits des 25 % « meilleurs forages » et il est représentatif de la perméabilité des axes de drainage souterrain. Ce débit est disponible sur les 125 formations géologiques citées ci-dessus (42+83).

L'illustration 19 montre que ce débit est assez corrélé avec le débit du milieu fissuré utile (coefficient de corrélation $R^2=0.74$), débit calculé par la méthode du seuil de 80 %. Le graphique s'appuie uniquement sur les 31 formations géologiques développant un horizon fissuré d'altération, puisque les 11 autres formations dégradaient la qualité de la régression ($R^2=0.66$).

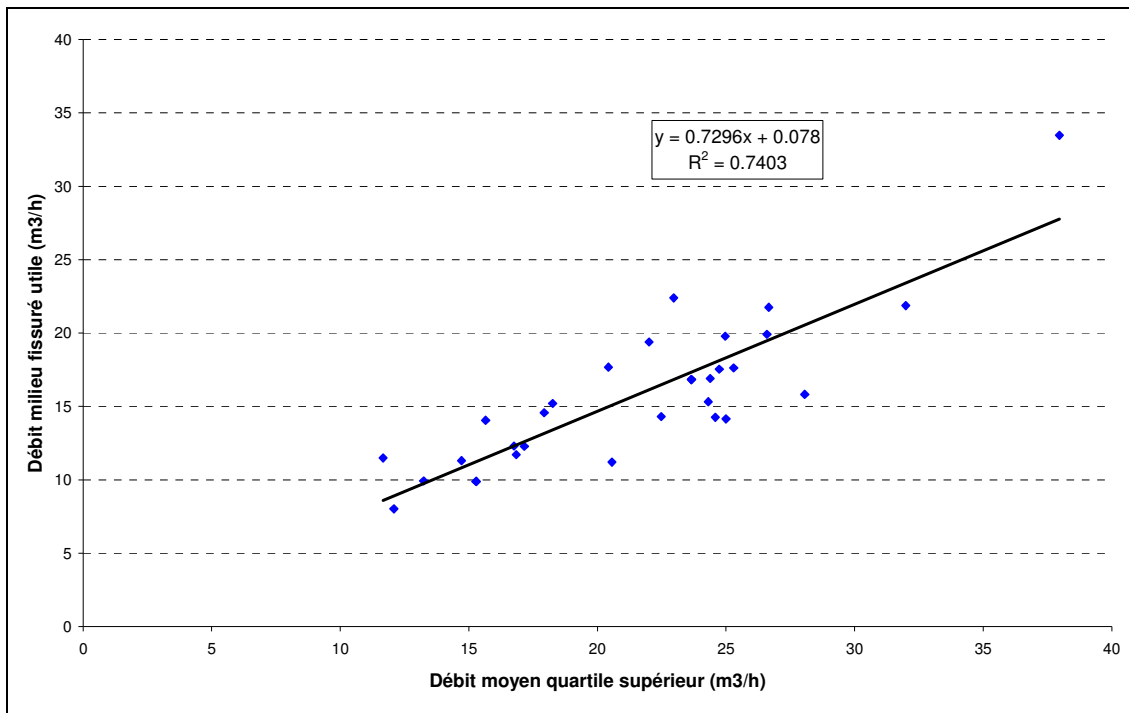


Illustration 19 - Corrélation du débit moyen du quartile supérieur et du débit du milieu fissuré utile

L'équation de la droite de l'illustration 19 permet de déduire le débit du milieu fissuré utile à partir du débit moyen du quartile supérieur.

Cette déduction peut être menée puisque les valeurs de débit moyen du quartile supérieur des 83 formations à extrapoler restent dans cette gamme de valeurs (entre 5 et 37 m³/h, à l'exception de la Formation de Paimpol avec 58 m³/h).

Le calcul est réalisé² en tenant compte d'un intervalle de prévision d'une valeur particulière de Y en fonction de la variable explicative X (courbe en gris sur l'illustration 20, où X=débit moyen quartile supérieur et Y=débit milieu fissuré utile). Il s'agit de l'intervalle de confiance d'une prévision de Y sachant X. L'incertitude est minimum à proximité du centre de gravité du nuage de points (meilleure précision) et elle augmente lorsqu'on s'en éloigne (moins bonne précision).

Chaque prévision de débit du milieu fissuré utile, calculée à partir du débit moyen du quartile supérieur, est ainsi associée à un écart-type sur la prédiction.

² Le calcul se fait avec XLSTAT Version 2008.4.01 de la société Addinsoft (copyright 1995-2008).

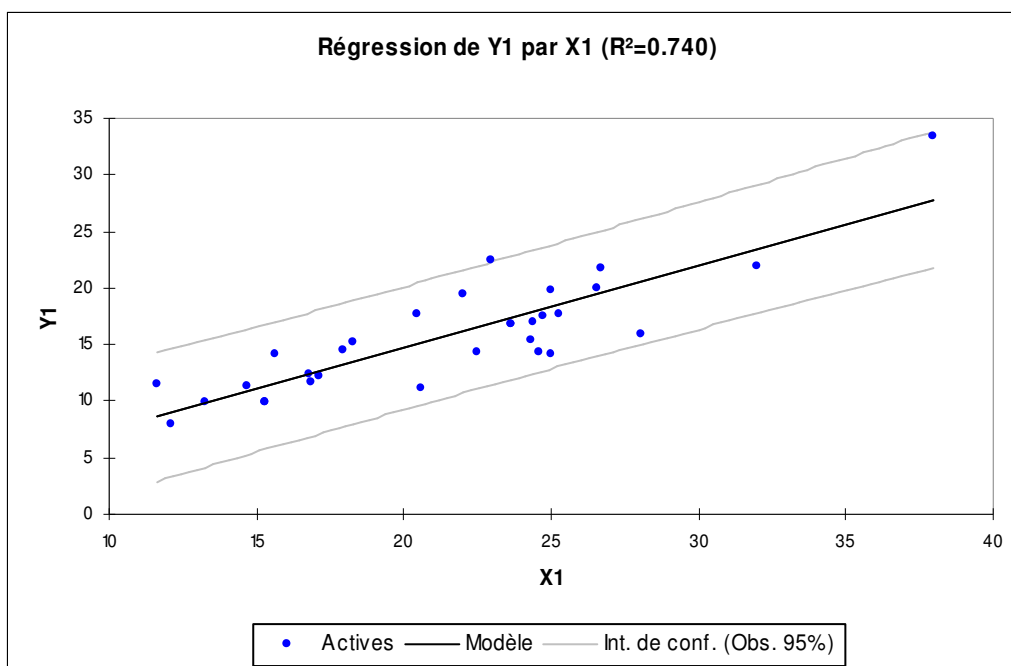


Illustration 20 - Intervalle de confiance de prévision du débit

Les résultats chiffrés sont présentés dans le tableau de l'annexe 2. La 2^{ème} colonne indique le nombre total de forage renseignant chaque formation, la 3^{ème} colonne le débit moyen du quartile supérieur, la 4^{ème} colonne le débit du milieu fissuré utile, et la 5^{ème} l'écart-type associé à la prédiction.

La carte des débits du milieu fissuré utile est représentée sur l'illustration 21.

Sur cette carte, chaque formation géologique est associée soit à la valeur calculée par les méthodes décrites au chapitre 3.5.3. (42 formations), soit à la valeur déduite de la droite de régression (83 formations).

Cette illustration comporte également un encart qui permet de localiser les formations géologiques extrapolées, ainsi que l'écart-type associé à chaque prédiction (2.7 à 4.0 m, moyenne 2.76 m).

Sur toute la Bretagne, le débit du milieu fissuré utile varie de 3.8 à 42.6 m³/h (respectivement la Formation de Moëlan composée de gneiss au Sud-Est du Finistère, et la Formation de Paimpol comportant des roches volcaniques au Nord-Ouest des Côtes d'Armor), avec en moyenne 13.45 m³/h.

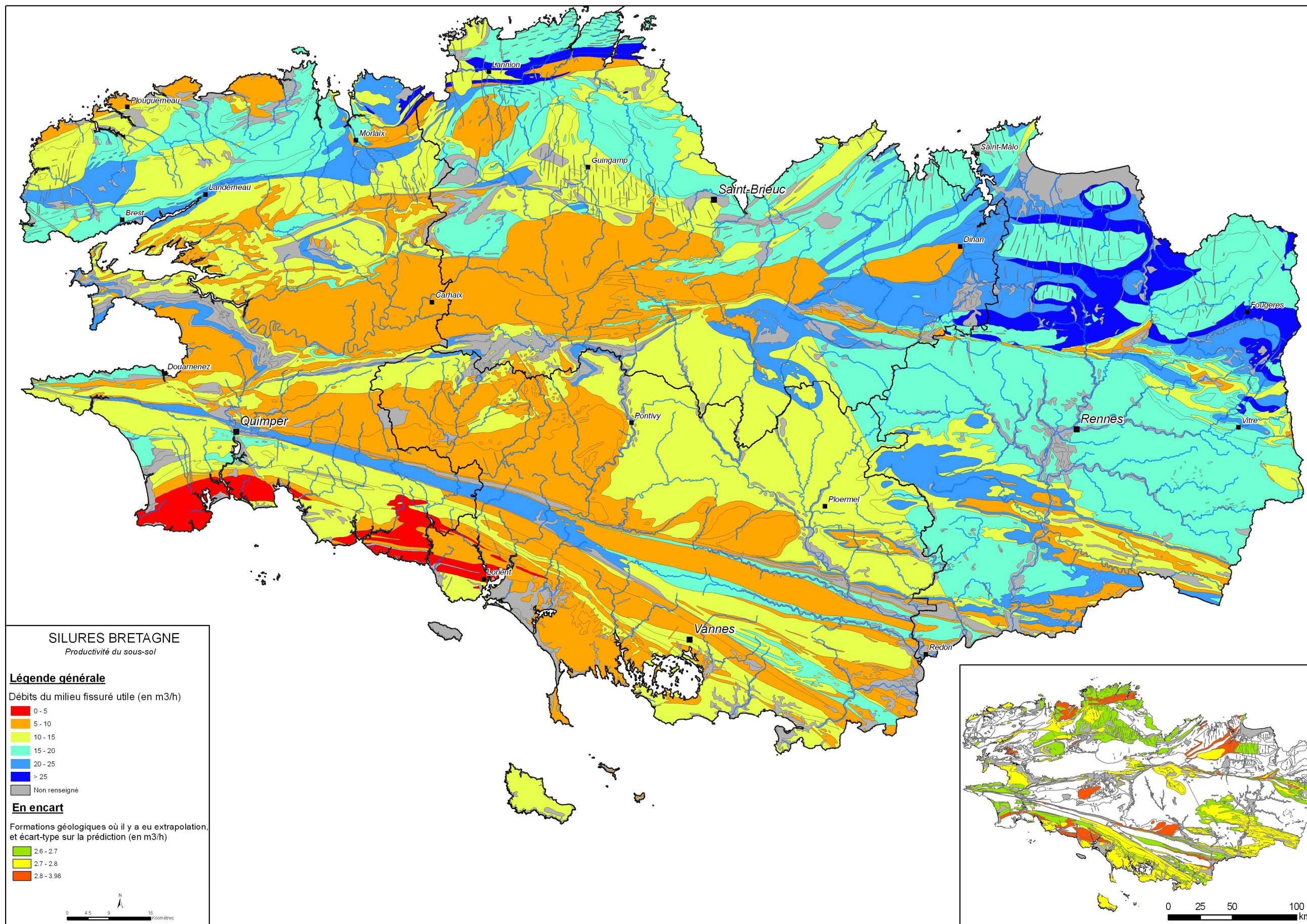


Illustration 21 - Débits du milieu fissuré utile sur les formations géologiques bretonnes

Débit linéaire

• Modélisation

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, après étude géostatistique, d'une population de 7 030 points d'observation (forages bretons recoupant l'interface altérites/milieu fissuré).

L'ensemble des points représente une densité d'observations d'environ 1 point pour environ 3.9 km² (secteur étudié : 27 390 km²). Ils sont bien répartis spatialement sur la Bretagne (cf. illustration 22).

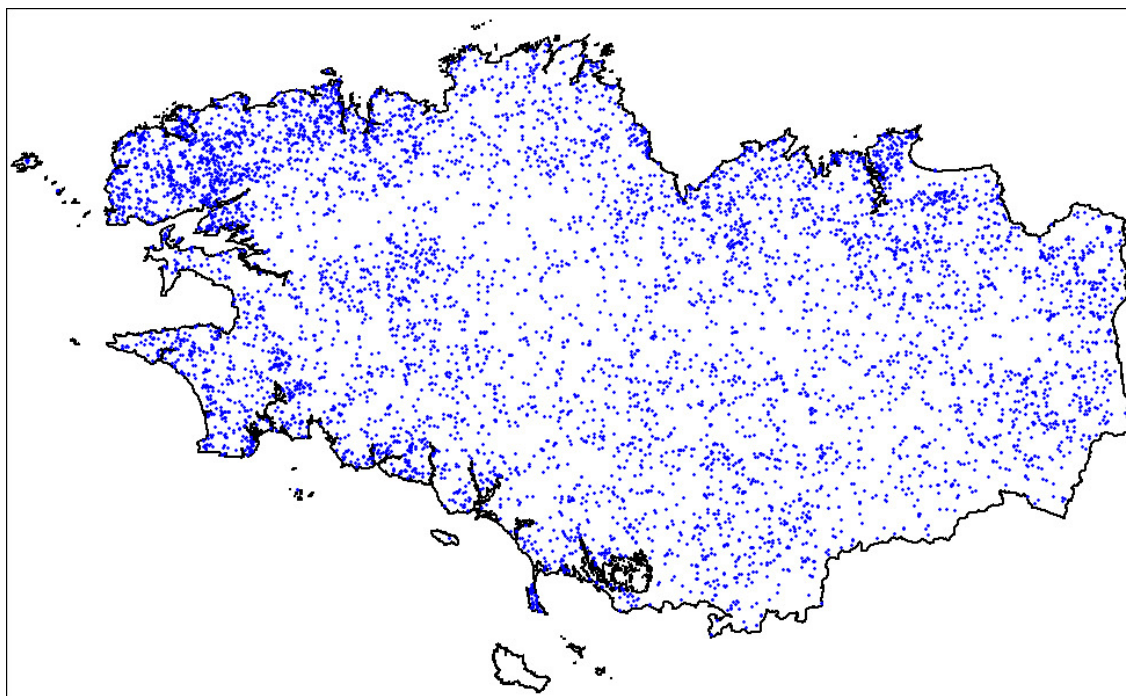


Illustration 22 - Périmètre de krigeage du paramètre Q/P'

L'écart-type de krigeage, quantifiant l'erreur associée à la variable interpolée, varie entre 0.07 et 0.34 m³/h/m, avec une moyenne de 0.276 m³/h/m.

L'incertitude (écart-type de krigeage) sur la variable Q/P' est représentée sur un encart de l'illustration 23. Cette carte montre que l'écart-type de krigeage est faible à proximité de chaque point servant de base à la modélisation (Q/P' connu), tandis que cet écart-type augmente dans les secteurs où la densité de points est plus faible.

Les débits instantanés obtenus en foration rapportés à la profondeur du forage sous la base des altérites meubles sont représentés sur la carte principale de l'illustration 23.

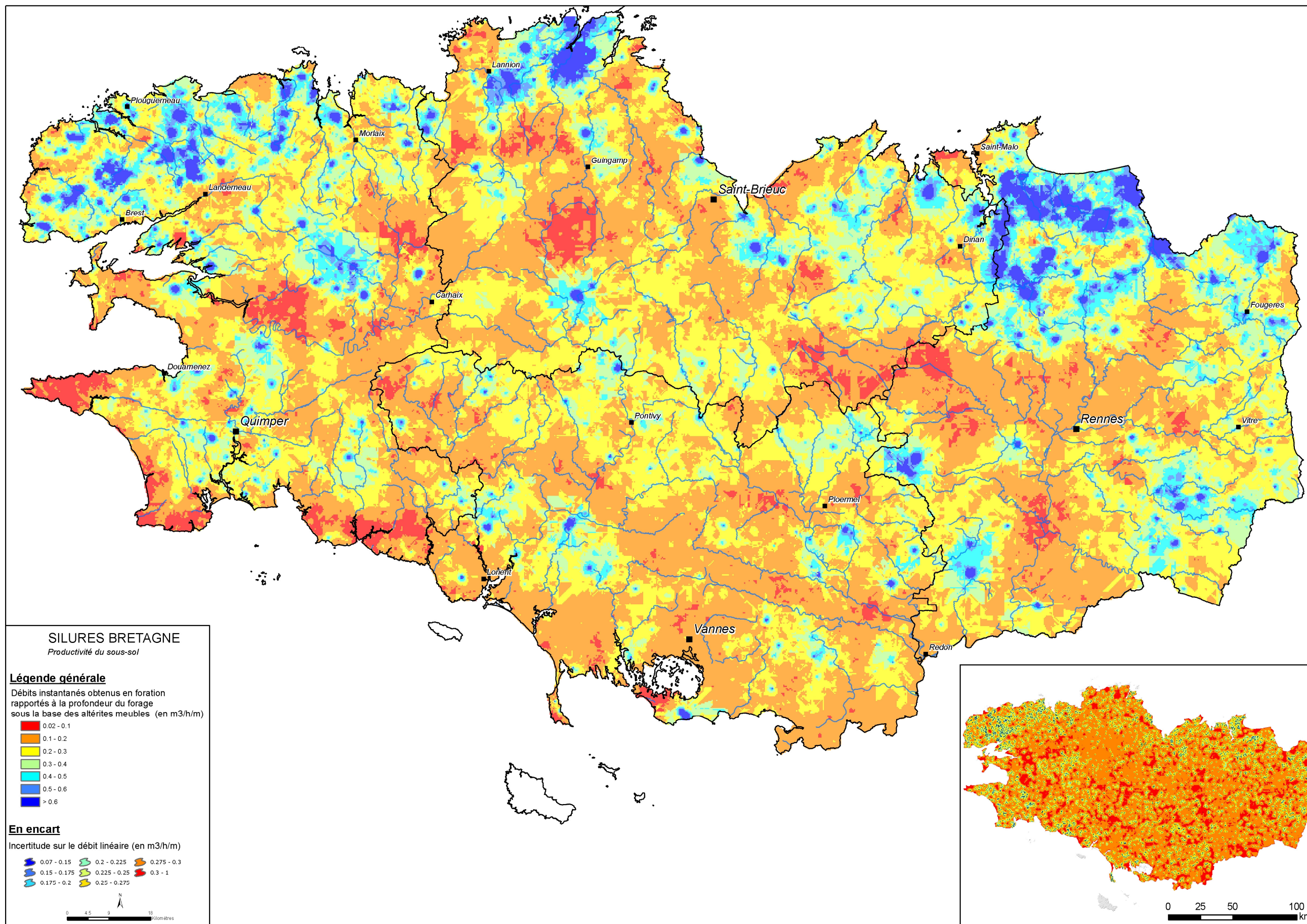


Illustration 23 - Débits instantanés obtenus en foration rapportés à la profondeur du forage sous la base des altérites meubles (Q/P')

• Régression

Le paragraphe précédent explique que, sur toute la Bretagne, le paramètre Q/P' a été calculé. Le Q/P' moyen a été obtenu suite à un travail sous SIG (moyenne des valeurs des mailles d'une grille pour un contour) sur l'ensemble des formations géologiques.

Ce débit est donc disponible sur les 42 formations géologiques où le débit linéaire du milieu fissuré utile a été obtenu par la méthode du seuil de 80 % (cf. chapitre 3.5.3.).

L'illustration 24 montre que le Q/P' moyen est assez corrélé avec le débit linéaire du milieu fissuré utile (coefficient de corrélation $R^2=0.74$).

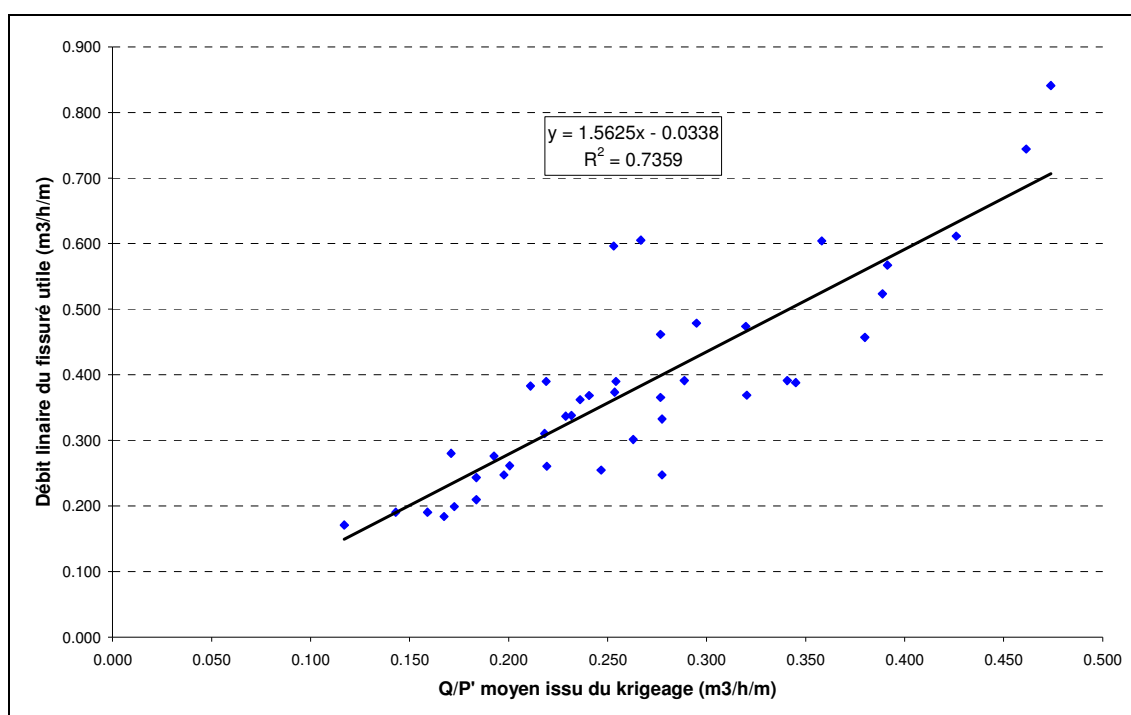


Illustration 24 - Corrélation du Q/P' moyen issu du krigeage et du débit linéaire du milieu fissuré utile

L'équation de la droite de l'illustration 24 permet de déduire le débit linéaire du milieu fissuré utile à partir du Q/P' moyen.

Cette déduction peut être menée puisque les valeurs du Q/P' moyen des 83 formations à extrapoler restent dans cette gamme de valeurs (entre 0.07 et 0.51 m³/h/m).

Tout comme la précédente prédiction, le calcul est réalisé en tenant compte d'un intervalle de prévision : intervalle de confiance d'une prévision de débit linéaire du milieu fissuré utile sachant le Q/P' moyen (illustration 25).

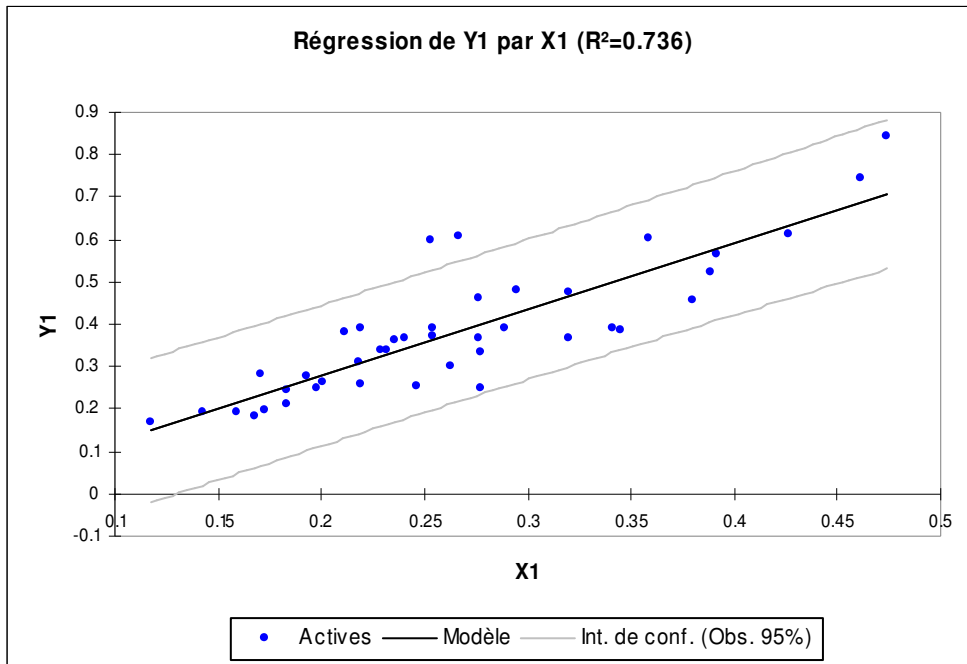


Illustration 25 - Intervalle de confiance de prévision du débit linéaire

Les résultats chiffrés sont présentés dans le tableau de l'annexe 2. La 6^{ème} colonne indique le Q/P' moyen renseignant chaque formation, la 7^{ème} colonne le débit linéaire du milieu fissuré utile, et la 8^{ème} l'écart-type associé à la prédiction.

La carte des débits du milieu fissuré utile rapportés à la profondeur du forage sous la base des altérites meubles (débit linéaire du milieu fissuré utile) est représentée sur l'illustration 26.

Sur cette carte, chaque formation géologique est associée soit à la valeur calculée par les méthodes décrites au chapitre 3.5.3. (42 formations), soit à la valeur déduite de la droite de régression (83 formations).

Cette illustration comporte également un encart qui permet de localiser les formations géologiques extrapolées, ainsi que l'écart-type associé à chaque prédiction (0.082 à 0.089 m³/h/m, moyenne 0.0827 m³/h/m).

Sur toute la Bretagne, le débit linéaire du milieu fissuré utile varie de 0.078 à 0.841 m³/h/m (respectivement la Formation de Lanmeur-Cosquer composée de gneiss au Sud-Est du Finistère, et le Massif de Saint-Renan comportant des roches granitiques au Nord du Finistère), avec en moyenne 0.3519 m³/h/m.

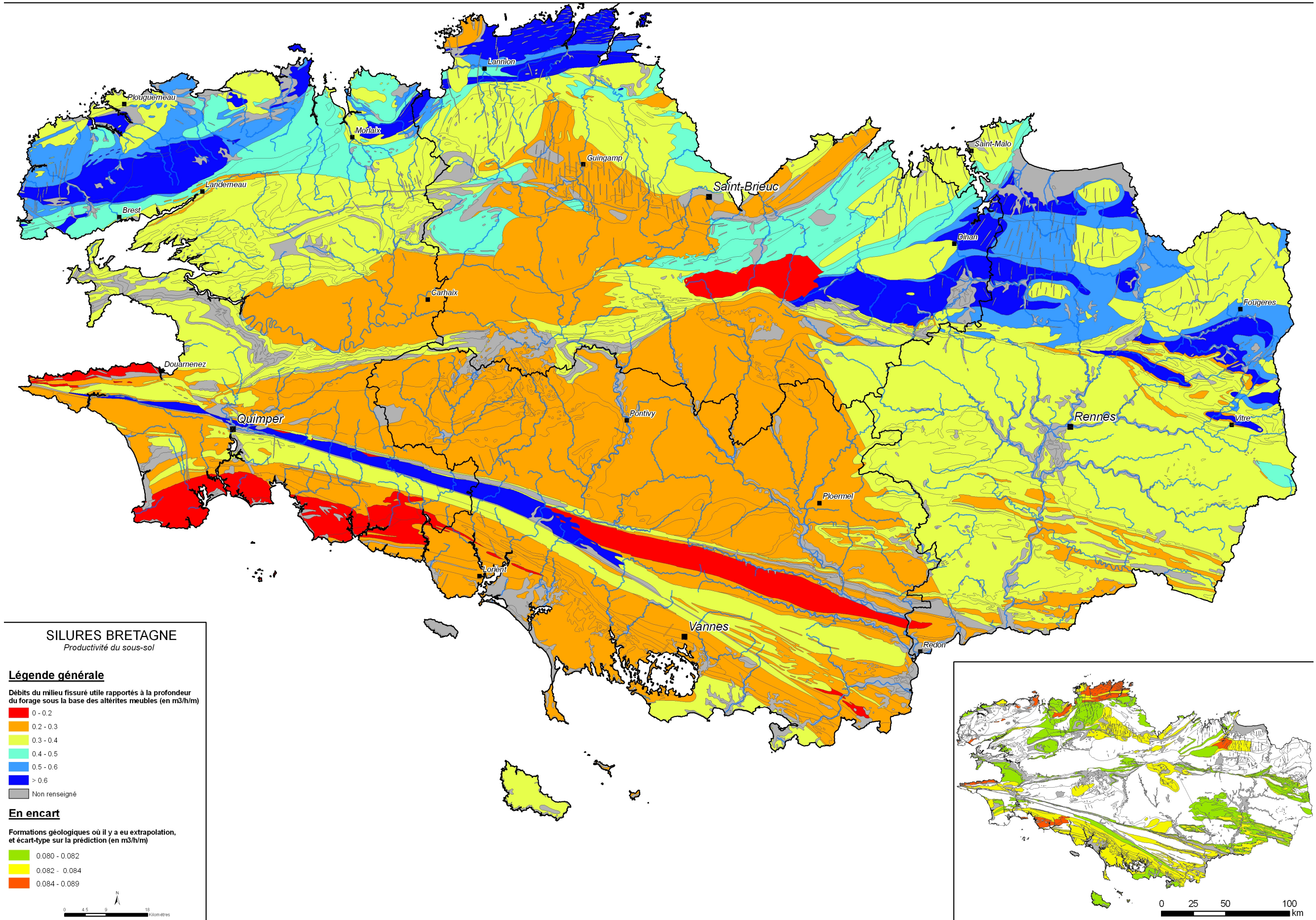


Illustration 26 - Débits du milieu fissuré utile rapportés à la profondeur du forage sous la base des altérites meubles

3.5.5. Epaisseur du milieu fissuré utile

Le chapitre précédent (3.5.4.) montre que les paramètres débit et débit linéaire du milieu fissuré utile ont été calculés sur 125 formations géologiques 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 du Finistère Sud (121 m pour le Massif de Douarnenez et 95 m pour la Formation de Penhors). Ces épaisseurs supérieures à 75 m, incohérentes avec le modèle conceptuel de l'illustration 2, ont été mises en zones non renseignées sur les cartes.

L'illustration 27 montre que cette épaisseur est un peu corrélée avec celle calculée par la méthode du seuil de 80 % (coefficient de corrélation $R^2=0.36$). Le graphique s'appuie uniquement sur les 31 formations géologiques développant un horizon fissuré d'altération, puisque les 11 autres formations dégradaient la qualité de la régression ($R^2=0.06$).

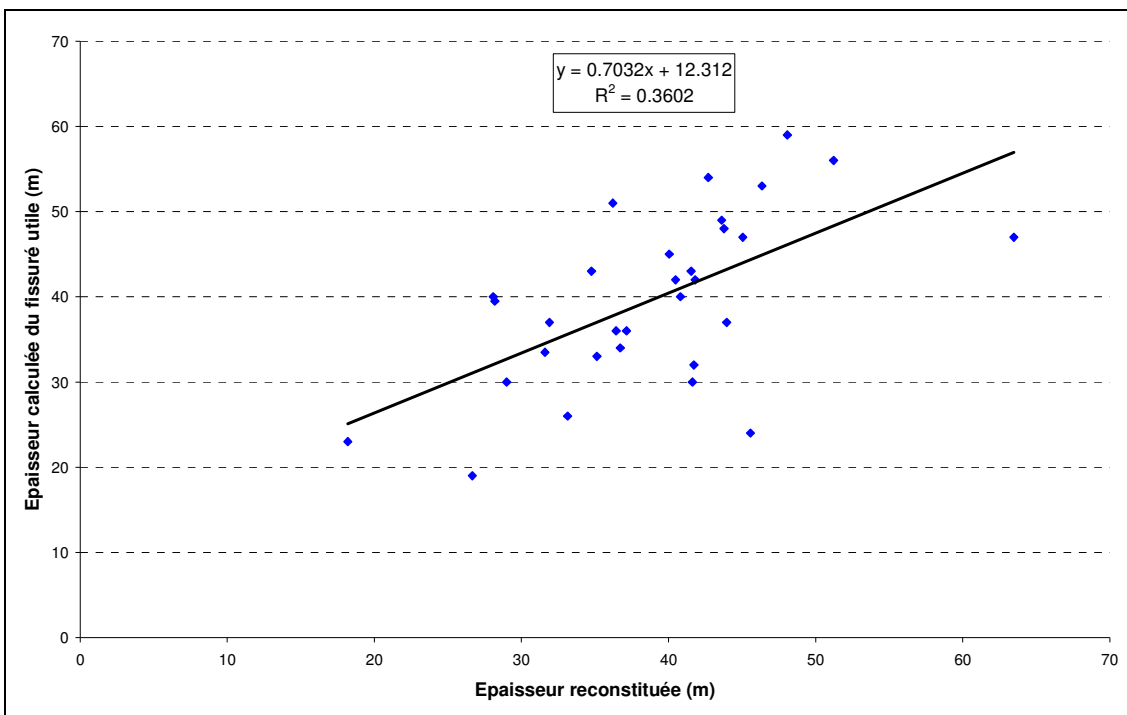


Illustration 27 - Corrélation de l'épaisseur reconstituée et l'épaisseur calculée du milieu fissuré utile

L'équation de la droite de l'illustration 27 permet de déduire l'épaisseur du milieu fissuré utile.

Cette déduction peut être menée puisque les valeurs d'épaisseur reconstituée du milieu fissuré utile des 83 formations à extrapoler, restent majoritairement dans cette gamme de valeurs (entre 11 et 76 m).

Tout comme les précédentes prédictions, le calcul est réalisé en tenant compte d'un intervalle de confiance de prévision (illustration 28).

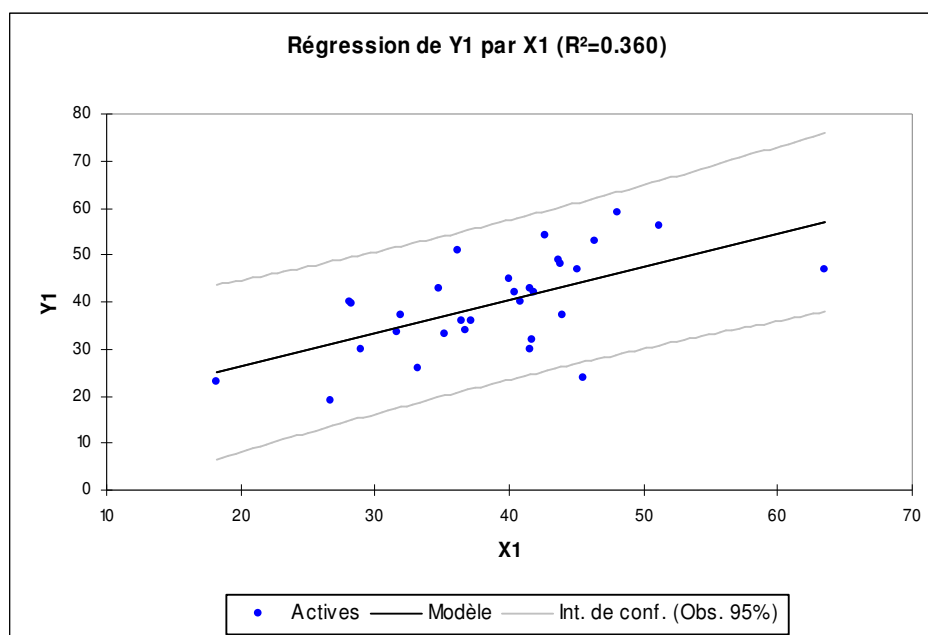


Illustration 28 - Intervalle de confiance de prévision de l'épaisseur

Les résultats chiffrés sont présentés dans le tableau de l'annexe 2. La 9^{ème} colonne indique l'épaisseur reconstituée du milieu fissuré utile renseignant chaque formation, la 10^{ème} colonne l'épaisseur calculée du milieu fissuré utile, et la 11^{ème} l'écart-type associé à la prédiction.

La carte d'épaisseur du milieu fissuré utile est représentée sur l'illustration 29.

Sur cette carte, chaque formation géologique est associée soit à la valeur calculée par les méthodes décrites au chapitre 3.5.3. (42 formations), soit à la valeur déduite de la droite de régression (83 formations).

Cette illustration 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.

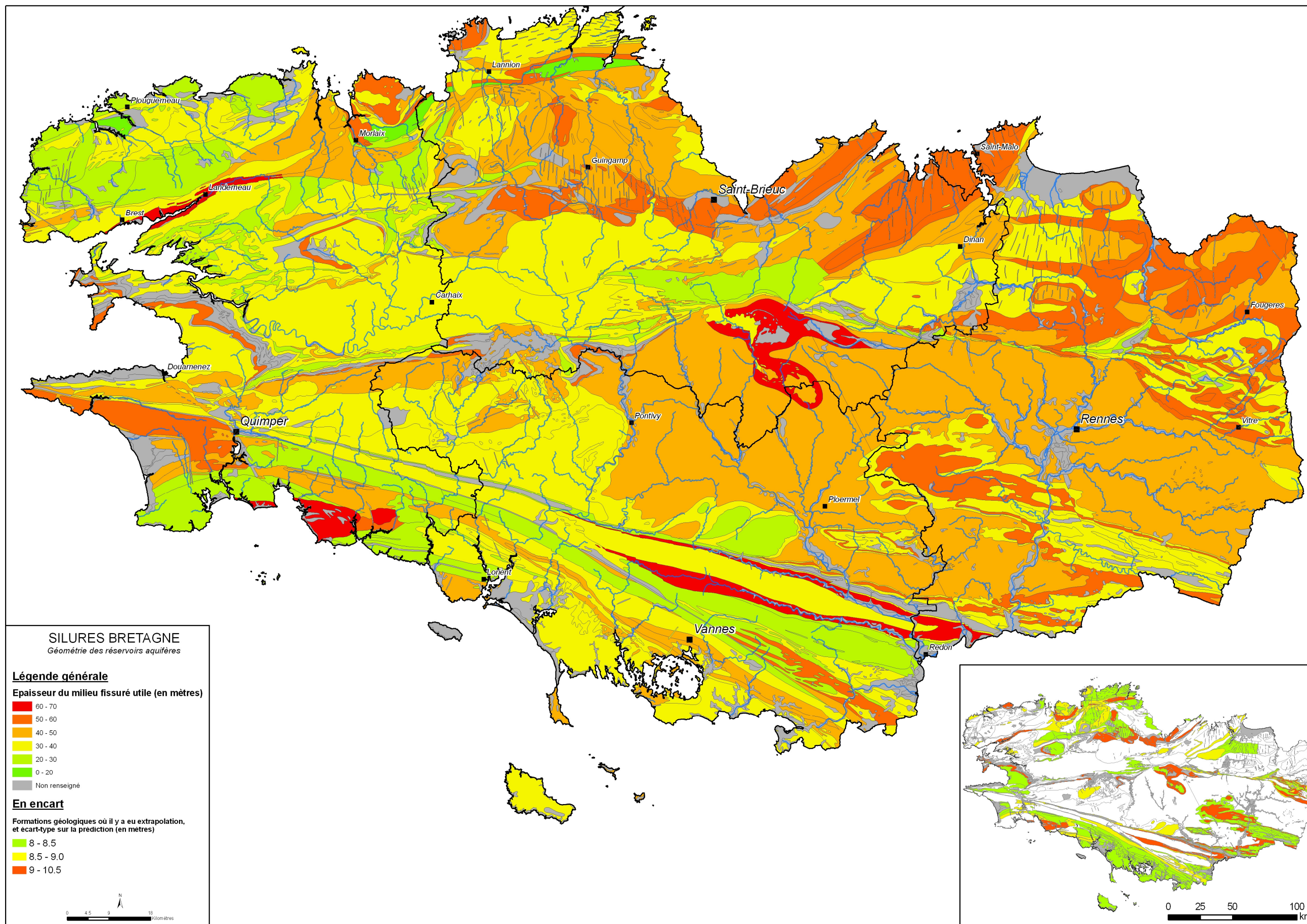


Illustration 29 - Épaisseur du milieu fissuré utile calculée par régressions successives

3.6. CONCLUSION INTERMEDIAIRE

Ce chapitre, consacré à l'interprétation des données de forages, a permis d'obtenir une bonne caractérisation, à l'échelle du 1/250 000 sur l'ensemble de la région Bretagne :

- de la géométrie des réservoirs aquifères (épaisseur des altérites en place et épaisseur du milieu fissuré utile),
- et de la productivité du sous-sol (débits et débits linéaires du milieu fissuré utile).

Chaque carte produite est associée, pour une meilleure interprétation, à une carte des incertitudes (écart-type de krigeage et écart-type sur la prédiction).

La carte de l'épaisseur des altérites en place renseigne sur la répartition géographique et en profondeur, de ces formations superficielles qui constituent un aquifère situé entre le sol et l'horizon fissuré des roches. Quand elles sont présentes, les altérites meubles, à porosité importante et faible perméabilité, ont un rôle d'emmagasinement de l'eau de pluie. Quand elles sont absentes, la roche fissurée affleure. Cet horizon fissuré, à porosité plus faible mais cependant significative et à perméabilité plus importante, joue un rôle capacitif et transmissif, en collectant et distribuant les eaux issues de l'horizon d'altération sus-jacent.

L'horizon fissuré utile correspond à une épaisseur du sous-sol riche en fissures, provenant de l'altération des roches, qui apporte la meilleure productivité en terme de débit instantané. La carte de l'épaisseur du milieu fissuré utile fournit des informations sur l'épaisseur qu'il sera utile de forer (éventuellement sous les altérites meubles, si elles existent dans le secteur de prospection) pour obtenir un débit optimum de forage (débit du fissuré utile indiqué dans la carte du même nom).

La carte des débits du milieu fissuré utile indique, sur chaque formation géologique de socle, le débit instantané potentiellement mobilisable en foration (en m³/h). Ce débit ne peut être obtenu que si le forage traverse toute l'épaisseur du milieu fissuré utile (cf. carte du même nom). Cette carte est utile pour un utilisateur qui s'est fixé un objectif de débit pour un ou plusieurs forages (exemple : débit d'au moins 15 m³/h).

Cette dernière carte est reprise au niveau d'une des deux cartes de synthèse du chapitre 6 et elle est éditée sur une planche au format A0 annexée au rapport.

Enfin, la carte des débits linéaires du milieu fissuré utile (débits du milieu fissuré utile rapportés à la profondeur du forage sous la base des altérites meubles) fournit une information sur le débit instantané potentiellement mobilisable par mètre foré (en m³/h/m). Ce débit linéaire ne peut être obtenu que si la foration se déroule au niveau de l'épaisseur du milieu fissuré utile (cf. carte du même nom). Cette carte peut donc s'avérer plus pertinente que la carte « débits » pour un utilisateur qui s'est fixé une contrainte de profondeur en foration (exemple : le forage doit faire au maximum 50 m de profondeur).

4. Interprétation des hydrogrammes de rivières

4.1. TRAVAIL A REALISER DANS LE CADRE DU PROJET

L'objectif de cette partie est de représenter, à l'échelle de la Bretagne, la contribution globale annuelle des eaux souterraines à l'alimentation des rivières. Une carte a été créée à partir des contours des bassins versants au droit des stations de mesure du débit journalier des cours d'eau bretons (stations de jaugeage de la DIREN Bretagne).

La part d'apport souterrain à l'écoulement total (résultats : pluriannuel, annuel et mensuel) est obtenue à la suite d'une modélisation des écoulements souterrains et superficiels en utilisant des données météorologiques (valeurs en « entrée » du modèle) et des données de débit (valeurs en « sortie » du modèle).

Les modélisations ont été effectuées avec le logiciel BRGM Gardénia[®] (modèle Global A Réservoirs pour la simulation des Débits et des Niveaux Aquifères), qui est un modèle hydrologique global de bassins versants.

4.2. DERNIERS BASSINS MODELISES

Liste des bassins

Les modélisations présentées dans le rapport BRGM/RP-55001-FR (avancement de l'année 4) ont été complétées avec 8 nouveaux bassins versants (cf. illustration 30). Les périodes des débits journaliers extraits de la Banque HYDRO sont également précisés.

Cours d'eau	Dépt	Station hydrométrique	N° station	Superficie BV (km ²)	Période extraite
Douron	29	Ponthou	J2404010	24.7	1995-2003
Guillec	29	Trézilidé	J3024010	43	1989-2003
Aber-Benoit	29	Plabennec [Loc Maria]	J3213020	27.4	1989-2003
Canut Nord	35	Lassy [Pont de Lassy]	J7523020	91	1995-2001
Aron	35	Grand-Fougeray [Bernardais]	J7824010	118	1995-2003
Canut Sud	35	Saint-Just	J7973010	37	1995-2003
Combs	35	Maure-de-Bretagne [Compassy]	J8653010	103	1988-1995
Vilaine	35+(22)	Guipry [Malon]	J7700610	4138	1985-2000

Illustration 30 - Derniers bassins versants retenus et stations hydrométriques associées

L'illustration 31 permet de localiser l'étendue des 8 bassins versants (en rouge) et les stations hydrométriques associées (en vert). Cette illustration montre également (en grisé) les 62 autres bassins versants modélisés sur l'ensemble des années du projet.

Modélisation

Les hydrogrammes des cours d'eau (débits journaliers) ont été modélisés à l'aide de Gardénia[®] à partir des données climatiques du secteur (achetées à Météo-France, pluie et évapotranspirations potentielles journalières, notée ETP), sur des périodes couvrant plusieurs années consécutives (cf. illustration 30).

Les modélisations des bassins versants ont été réalisées avec un modèle à deux réservoirs souterrains pour simuler les deux régimes d'écoulement existant dans les roches de socle en Bretagne : un écoulement dans les roches altérées et un écoulement plus profond dans le milieu fissuré.

Le principe de la modélisation Gardénia a été détaillé dans le rapport d'avancement de la première année du projet (BRGM/RP-51481-FR), il ne sera donc pas repris dans ce rapport.

La modélisation des hydrogrammes des rivières s'est déroulée, comme pour les années antérieures, en réalisant les étapes suivantes :

- mise en forme des données journalières de pluies, ETP et débits ;
- calcul de la pluie moyenne tombant sur chaque bassin versant : le contour de chaque bassin a été recoupé avec la carte des normales de pluies interannuelles sur la période 1961-1990 (origine Météo France). Le bassin est ainsi divisé en secteurs pluviométriques dans lesquels se situait au moins une station de Météo France. Un poids proportionnel à la surface de la zone météorologique du bassin a alors été affecté à chaque station ;
- comparaison de la lame d'eau écoulée sur le bassin versant (volume d'eau écoulé au niveau de l'exutoire divisé par la surface du bassin) à la totalité des pluies efficaces ;
- calage des paramètres du modèle (paragraphe suivant).

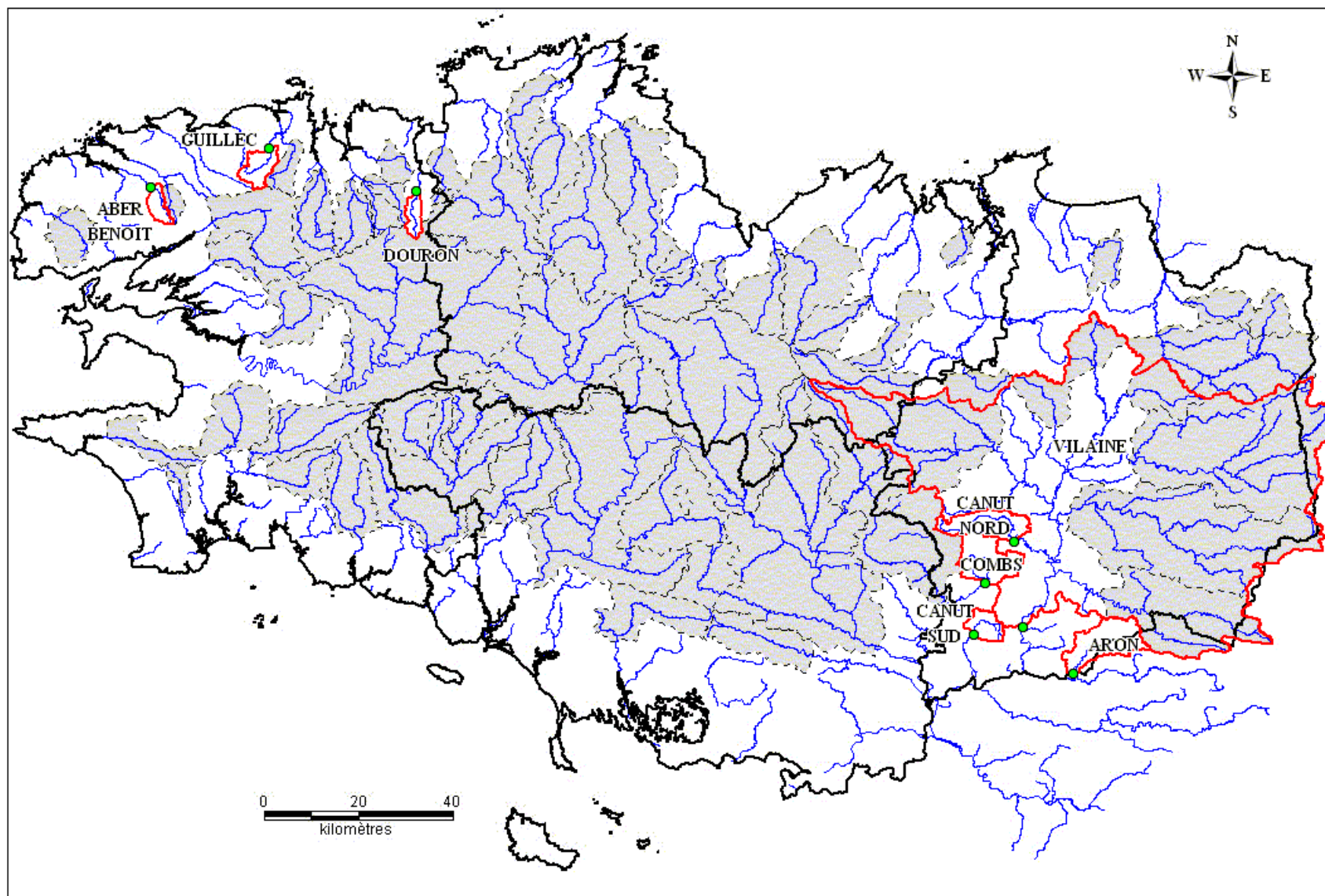


Illustration 31 - Localisation des derniers bassins versants modélisés

Paramètres

Le calage a consisté à ajuster les paramètres du modèle de telle sorte qu'ils permettent de calculer des débits de rivières aussi proches que possible des débits mesurés.

Les paramètres caractérisant les réservoirs de la modélisation sont les suivants (cf. illustration 32) :

- RUMAX (mm) : Réserve Facilement Utilisable maximale du sol (RFU moyenne à l'échelle du bassin versant) = capacité du réservoir U ou réserve disponible pour l'ETP,
- RUIPER (mm) : hauteur dans le réservoir H pour laquelle il y a répartition égale entre écoulement rapide et percolation (hauteur d'équilibre ruissellement-percolation),
- TPER1 (mois) : temps de demi-percolation du réservoir H (temps caractéristique de percolation de l'eau de la surface vers la nappe) = temps de demi-montée du réservoir G1,
- TAR1 (mois) : temps de demi-tarissement du premier réservoir souterrain G1,
- TPER2 (mois) : temps de demi-percolation du réservoir G1 (temps caractéristique de percolation de l'eau du réservoir G1 au réservoir G2), = temps de demi-montée du réservoir G2,
- TAR2 (mois) : temps de demi-tarissement du deuxième réservoir souterrain G2.

Dans le cadre du projet SILURES Bretagne, 2 réservoirs souterrains ont été retenus pour caractériser les 2 aquifères de socle : altérites (G1) et horizon fissuré (G2).

Le temps de demi-tarissement est le temps au bout duquel, en l'absence de recharge du réservoir souterrain, le débit souterrain du réservoir est divisé par deux.

Le temps de demi-percolation caractérise la vitesse de réponse entre une pluie efficace et un accroissement du débit souterrain.

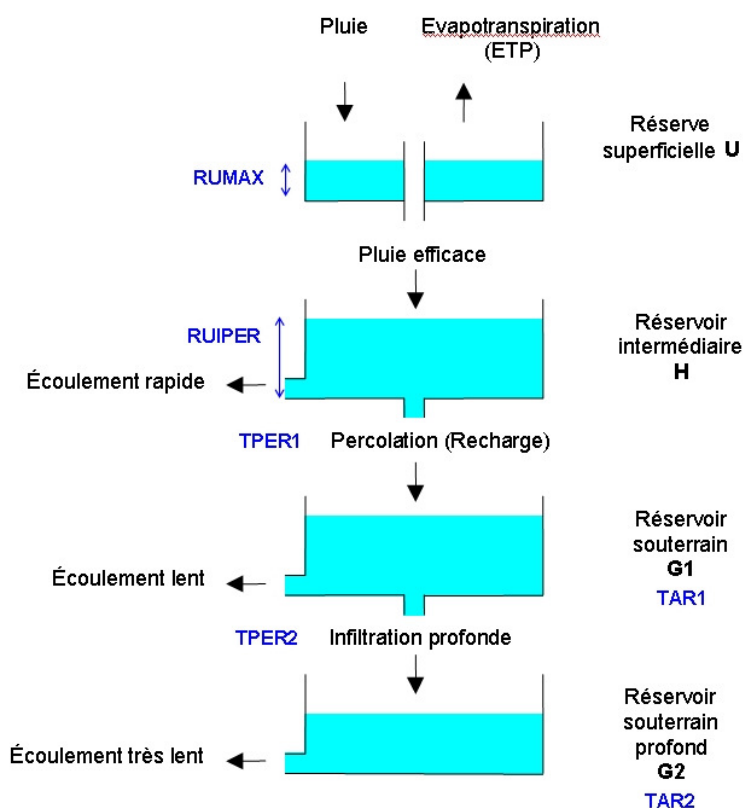


Illustration 32 - Modèle Gardénia® et organisation des réservoirs

Le paramètre RUMAX est estimé suite à la comparaison entre les pluies efficaces et la lame d'eau écoulée. C'est un paramètre nécessaire au calcul des pluies efficaces (Réserve Facilement Utilisable du sol). Les temps de demi-tarissement des deux réservoirs souterrains (TAR1 et TAR2) sont calculés d'après les courbes exponentielles de décrues régulières (durant les périodes où il n'y a pas ou peu d'influence de la pluviométrie) des débits journaliers des cours d'eau.

Les autres paramètres doivent être calés en respectant les inégalités suivantes :

- $TPER1 \leq TAR1 \leq TAR2$,
- $TPER1 \leq TPER2 \leq TAR2$.

On peut noter que les paramètres TAR1 et TAR2 sont représentatifs de l'inertie du milieu souterrain.

Dans la suite de ce chapitre, on appellera écoulement souterrain la somme des écoulements lents et très lents en sortie des réservoirs G1 et G2 (cf. illustration 32).

Résultats

Les résultats obtenus sur ces 8 bassins sont rassemblés en annexes 3 et 4 :

- tableau des régressions climatiques (sélection des pluies et ETP journalières des bassins), et graphiques des comparaisons des lames d'eau et des pluies efficaces (annexe 3) ;
- tableau des paramètres de calage retenus pour les modélisations Gardénia[®], et tableau des résultats obtenus suite à ces modélisations (annexe 4) ;
- graphiques des calages sur les débits rapides et souterrains. Les graphiques des premières figures de l'annexe 4 (deux graphiques de gauche pour chaque bassin) illustrent l'ajustement du débit total calculé (en vert) au débit mesuré à la station hydrologique (en rouge), et les débits des deux réservoirs souterrains (supérieur en bleu et inférieur en violet) lors deux années de calage et des périodes de modélisation ;
- graphiques des débits annuels rapides et souterrains, et graphiques des débits mensuels moyens interannuels des bassins versants (annexe 4, deux graphiques de droite pour chaque bassin). Les différents débits sont exprimés en terme de lame d'eau écoulée sur le bassin versant (en mm).

Les coefficients de corrélation (ajustement entre le débit mesuré et calculé de la rivière) obtenus suite à ces modélisations varient entre 73 et 91 % (cf. premier tableau de l'annexe 4). Ces coefficients sont très satisfaisants (> 80 %), sauf pour les bassins versants : de l'Aron (coefficient 73 %) et du Combs (78 %). Pour le bassin de l'Aron, il existe une chronique incomplète d'ETP journalières (ETP à La Noë Blanche). Pour celui du Combs, le poste des ETP journalières est très éloigné du bassin versant (ETP à St-Jacques-de-la-Lande) et l'année 1989, très sèche, est difficilement prise en compte dans les modélisations en raison de la faiblesse des débits mesurés. De plus, la mesure du débit du Combs à Maure-de-Bretagne semble erronée en 1992, année où le débit estimé est décalé dans le temps par rapport au débit mesuré, malgré un bon calage des autres années.

4.3. RESULTATS OBTENUS SUR LES 70 BASSINS VERSANTS

Tout au long du projet SILURES Bretagne, les hydrogrammes de 70 cours d'eau bretons (débits journaliers exportés de la Banque HYDRO) ont donc été modélisés à l'aide du logiciel BRGM Gardénia® à partir des données climatiques du secteur (achetées à Météo-France, pluie et ETP journalières ; pluie sur 150 postes et ETP sur 36 stations), sur des périodes couvrant plusieurs années consécutives (9.5 en moyenne pour toutes les stations).

Ce travail a permis de quantifier la contribution des eaux souterraines au débit total des cours d'eau. Celle-ci varie de 38 à 83 % (respectivement bassin versant de la Rance et de la Noë Sèche). La participation moyenne est d'environ 55 %.

Les illustrations 33 et 34 présentent les résultats obtenus :

- en contribution globale annuelle des eaux souterraines à l'alimentation des rivières (écoulement lent total issu des 2 réservoirs souterrains=percolation (recharge) de l'illustration 32, rapporté à la pluie efficace ; valeur exprimée en %),
- en débit spécifique lent (en l/s/km²).

Un certain nombre de stations de jaugeage (12 sur 70) sont influencées soit par un barrage (retenue et/ou lâchers d'eau, soit par des prélèvements AEP (de l'ordre de quelques litres par seconde), car situés en amont de la station. Afin de tenir compte de ce biais dans les résultats, la fiabilité des stations sera rappelée (cf. couleur de la station sur l'illustration 33).

L'illustration 33 permet de se rendre compte de la participation non négligeable des eaux souterraines aux débits des rivières (en moyenne sur ces bassins versants, plus de la moitié du débit annuel provient des eaux souterraines). Elle peut aussi, par exemple, servir à expliquer la fluctuation mensuelle des teneurs en éléments chimiques (exemple : nitrates) dans les eaux de surface, par une participation plus ou moins forte des eaux souterraines.

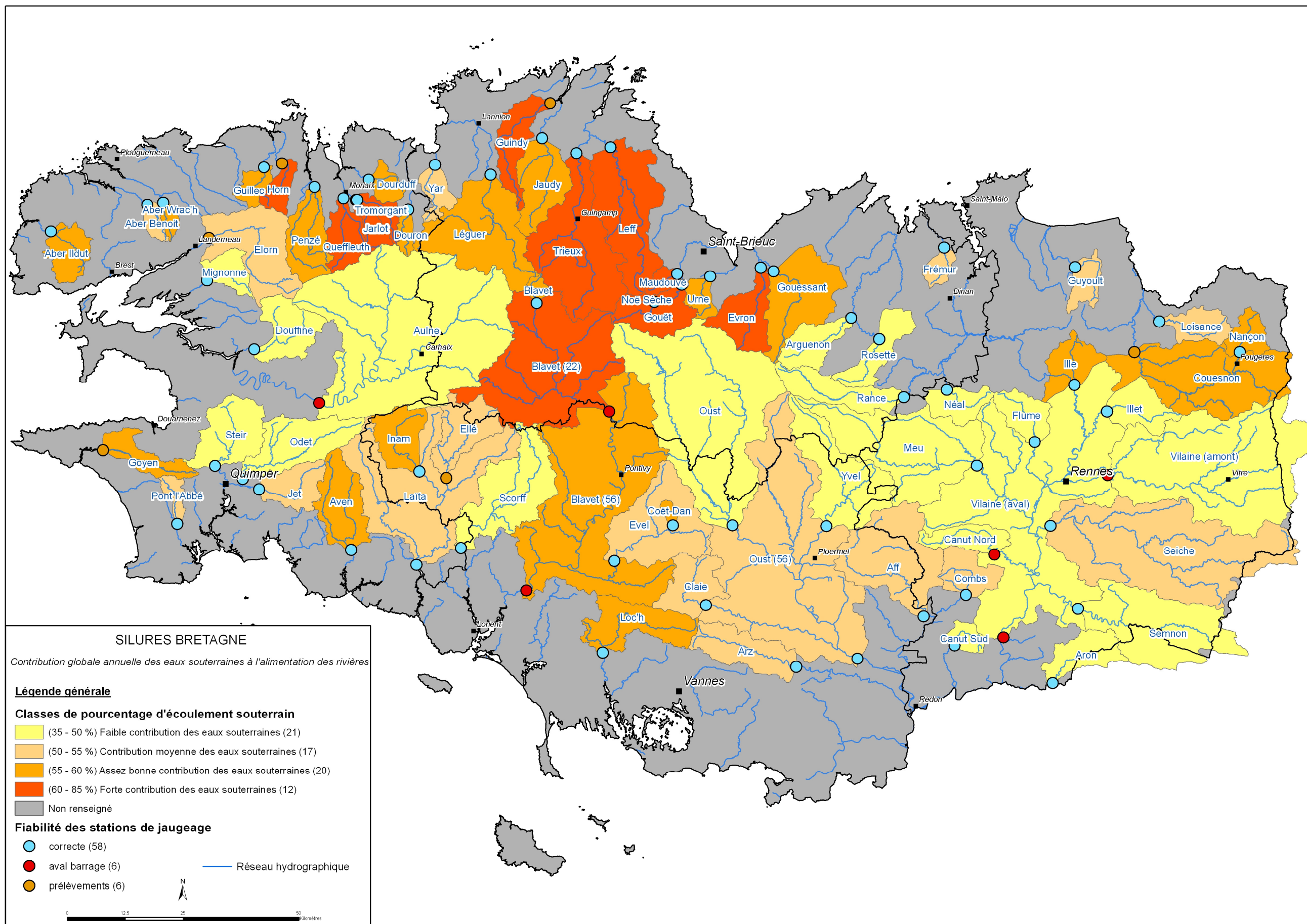


Illustration 33 - Contribution globale annuelle des eaux souterraines à l'alimentation des rivières

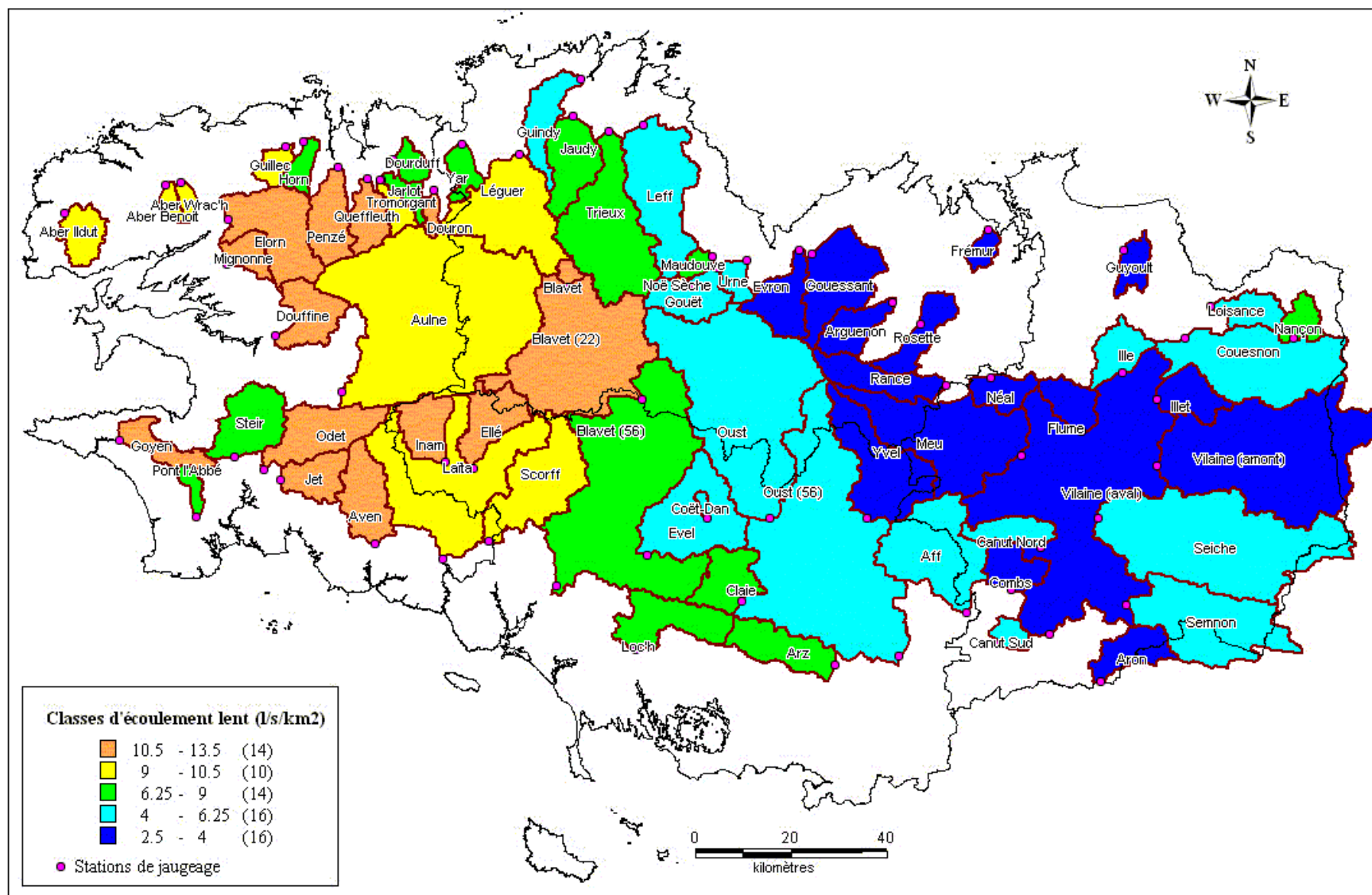


Illustration 34 - Classes d'écoulement lent (l/s/km²) des bassins versants modélisés

4.4. RECHERCHE DE DETERMINISMES A LA PARTICIPATION DES EAUX SOUTERRAINES AUX DEBITS DES RIVIERES

4.4.1. Objectifs

Les objectifs de cette partie du rapport sont :

- d'identifier des éléments physiques qui peuvent expliquer la carte de répartition de la participation des eaux souterraines aux débits des rivières sur les 70 bassins versants bretons modélisés avec le logiciel Gardénia, et hiérarchiser leur influence,
- de tenter d'étendre, si possible, cette carte aux bassins côtiers non jaugés.

Dans la modélisation Gardénia, les seuls paramètres physiques qui sont pris en compte sont les données climatiques (pluie et ETP), ainsi que la surface du bassin versant. Cette recherche de déterminismes *a posteriori* est donc justifiée.

La méthode retenue est d'analyser les corrélations entre des variables issues de paramètres physiques et celles issues des modélisations, et d'identifier celles qui se différencient fortement des autres. Pour effectuer l'analyse, deux méthodes ont été appliquées : la matrice des corrélations (coefficients de Pearson) et l'analyse en composantes principales (ACP). L'ACP est une méthode efficace pour analyser des données quantitatives en :

- visualisant sur le cercle des corrélations (graphique à 2 dimensions) les variables liées ;
- éliminant ces variables et en regroupant par famille les bassins versants à comportement semblable ;
- repérant les variables non corrélées afin de les analyser par d'autres méthodes (régression par exemple).

La matrice des corrélations permet de justifier le travail de modélisation, tandis que les ACP permettent d'aller plus loin (groupe de bassins, régressions).

4.4.2. Extraction des paramètres physiques des bassins versants

Les parties 4.4.2. et 4.4.3. du rapport donnent la liste de tous les paramètres utilisés.

Caractéristiques morphologiques :

- 1) Superficie du bassin versant (km²)
- 2) Indice d'allongement= L^2/S ; L=plus long thalweg à l'intérieur du bassin, et S=superficie du bassin (sans dimension)
- 3) Pente moyenne sur le bassin versant (%), calculée à partir du MNT au pas de 125 m
- 4) Pente moyenne du cours d'eau principal=plus long thalweg (%)

- 5) Altitude du milieu du cours d'eau principal (m)
- 6) Densité du réseau hydrographique, longueur / périmètre (sans dimension)

Caractéristiques climatiques :

- 1) Précipitation moyenne annuelle (mm/an), basée sur Aurhely 1971 - 2000 ; afin de ne pas confondre ce paramètre avec celui en entrée de Gardénia, il sera appelé « pluie Aurhely ».
- 2) Précipitation efficace moyenne annuelle (mm/an), basée sur la digitalisation des contours des isohyètes des précipitations efficaces moyennes annuelles, calculées sur la période 1946-1976 (LOUVRIER M. et al. - 1983) ; afin de ne pas confondre ce paramètre avec celui calculé avec Gardénia, il sera appelée « pluie efficace Louvrier ».

Caractéristiques géologiques :

- 1) Pourcentage de granite (Plutonisme) (%)
- 2) Pourcentage de métamorphisme (Métamorphisme) (%)
- 3) Pourcentage de schistes du Briovérien (Métasédimentaire protérozoïque) (%)
- 4) Pourcentage de schistes du Primaire ((Méta) sédimentaire paléozoïque) (%)
- 5) Pourcentage de formations superficielles type alluvions-colluvions (%)
- 6) Pourcentage d'altérites (%)

Caractéristiques de végétation :

- 1) Pourcentage de forêt (%)
- 2) Pourcentage de prairies et terrains incultes (%)

4.4.3. Rappel des paramètres issus des modélisations des bassins versants

Paramètres Gardénia (cf. illustration 32) :

- 1) 5 paramètres de calage : RUMAX et RUIPER (mm), TPER1, TPER2, TAR1 et TAR2 (mois)
- 2) débit souterrain Gardénia : écoulement lent total issu des 2 réservoirs souterrains=percolation (recharge) (exprimé en % de la pluie efficace, mm/an et l/s/km²)
- 3) débit souterrain du mois d'août Gardénia : écoulement lent total issu du réservoir souterrain profond G2 pendant le mois d'août (exprimé en mm/mois et l/s/km²)
- 4) résultats en sortie de logiciel : pluie totale, évapotranspiration réelle (ETR) et pluie efficace (mm/an), débit rapide et 2 débits souterrains en sortie des 2 réservoirs souterrains (exprimés en % de la pluie efficace et mm/an)

Paramètres d'écoulement (données DIREN Bretagne) :

- 1) VCN10 : débit minimal (« moyen ») calculé sur 10 jours consécutifs (m^3/s)
- 2) QES : débit d'étiage spécifique ($l/s/km^2$)

4.4.4. Résultats des analyses

Types d'ACP

Les ACP présentées en annexe 5 ont été menées :

- sur tous les paramètres,
- entre les débits souterrains calculés avec Gardénia (recharge en mm/an et $l/s/km^2$) et les paramètres physiques,
- entre les 5 paramètres de calage de Gardénia et les paramètres physiques.

Analyse des relations entre paramètres

Remarque : nous avons retenu l'idée d'être exhaustif dans ces analyses, c'est pourquoi certaines des relations citées ci-dessous peuvent paraître évidentes au lecteur.

• Analyse des relations entre les paramètres physiques

L'analyse de la matrice des corrélations montre des liaisons entre les variables suivantes (R =coefficient de corrélation de Pearson) :

- précipitations moyennes annuelles Auhely et précipitations efficaces Louvrier ($R=0.948$) ;
- superficie du bassin versant et densité du réseau hydrographique (longueur / périmètre) ($R=0.868$) : plus la superficie est grande, plus le réseau est dense ;
- pente moyenne sur le bassin versant et pente moyenne du cours d'eau principal ($R=0.832$) ;
- pente moyenne sur le bassin versant et précipitations moyennes annuelles ($R=0.717$) : plus la pente est forte, plus la pluviométrie est importante. Il en est de même pour les pluies efficaces ;
- altitude du milieu du cours d'eau principal et pourcentage de granites ($R=0.481$) : plus le bassin versant est haut en altitude, plus il a de chance d'être granitique. En Bretagne, les massifs granitiques sont plus hauts que les massifs schisteux car ils ont été plus résistants à l'érosion.

Les variables suivantes semblent anti-corrélées :

- pourcentage d'altérites et pente moyenne sur le bassin versant ($R= -0.831$) : les altérites sont présentes plutôt sur des plateaux, ailleurs, elles ont été érodées ;

- pourcentage de granite et pourcentage de schistes du Briovérien ($R = -0.556$), pourcentage de granite et pourcentage de schistes du Primaire ($R = -0.495$) : si la géologie du sous-sol n'est pas granitique alors elle peut être schisteuse ;
- précipitations moyennes annuelles Auhely et pourcentage de schistes du Briovérien ($R = -0.542$) : les bassins versants les plus pluvieux ne sont pas *a priori* schisteux (Briovérien) ; ceci peut s'expliquer par l'altitude des bassins versants schisteux (Briovérien) qui sont les moins élevés. Cette conclusion peut être un hasard car les trois autres formations géologiques ne sont pas corrélées avec la pluie ($R = 0.262, 0.228$ et 0.167) ;
- précipitations moyennes annuelles Auhely et pourcentage d'altérites ($R = -0.539$) : la pluie peut tomber dans des secteurs pentus donc avec moins d'altérites.

• Analyse des relations entre les paramètres Gardénia (cf. illustration 32)

Les pluies totales et efficaces en sortie de Gardénia sont logiquement corrélées avec tous les écoulements en sortie de Gardénia (rapide, souterrain 1^{er} réservoir, souterrain des 2 réservoirs).

Les paramètres suivants sont également corrélés entre eux :

- RUMAX et ETR ($R = 0.730$) : l'ETP conditionne RUMAX ;
- RUIPER et les écoulements souterrains (souterrain des 2 réservoirs, souterrain août) : RUIPER est la hauteur d'équilibre ruissellement-percolation. La matrice des corrélations donne les coefficients suivants : RUIPER et écoulement souterrain 1^{er} réservoir ($R = 0.579$), RUIPER et écoulement souterrain 2nd réservoir ($R = 0.720$), RUIPER et écoulement souterrain 2nd réservoir en août ($R = 0.812$) ;
- RUIPER et TPER1 ($R = 0.611$) : le temps TPER1 dépend de la hauteur RUIPER (calcul de la répartition écoulement lent / rapide) ;
- RUIPER et TAR1-TAR2 (respectivement $R = 0.607$ et 0.536) : la hauteur RUIPER conditionne les temps TAR1-2 ;
- TPER1 et TAR1 ($R = 0.619$) : TAR1 dépend de TPER1 (calcul de l'écoulement souterrain) ; De la même façon, TPER2 et TAR2 sont liés ($R = 0.737$) ;
- TAR1 et TPER2 ($R = 0.815$) : TAR1 influence TPER2 ;
- TAR1 et TAR2 ($R = 0.712$) : plus TAR1 augmente, plus TAR2 est long (ceci est une obligation du calage du logiciel) ;
- écoulement souterrain août et TAR2 ($R = 0.684$) ;
- écoulement souterrain et écoulement souterrain août ($R = 0.687$).

• Analyse des relations entre paramètres physiques et paramètres Gardénia

Les résultats climatiques (pluie totale en entrée de Gardénia, pluie efficace en sortie) sont tout à fait cohérents avec les paramètres physiques : précipitation moyenne annuelle Auhely, et précipitation efficace moyenne annuelle Louvrier. Par exemple, la

matrice des corrélations donne les coefficients suivants : pluie efficace et pluie efficace Louvrier (R=0.902), pluie efficace et pluie Auhely (R=0.916). Ceci conforte la qualité des données en entrée du modèle.

La pluviométrie annuelle influence le débit souterrain tout comme le débit rapide : les précipitations moyennes annuelles Auhely et les précipitations efficaces moyennes annuelles Louvrier sont corrélées avec tous les écoulements en sortie de Gardénia (rapide, souterrain total des deux réservoirs souterrains, souterrain de chacun des 2 réservoirs souterrains, souterrain août). Par exemple, la matrice donne les coefficients suivants : pluies et écoulement rapide (R=0.841), pluies et écoulement souterrain (R=0.915), pluies efficaces et écoulement souterrain (R=0.908), pluies et écoulement souterrain 1^{er} réservoir (R=0.850), pluies et écoulement souterrain 2nd réservoir (R=0.915), pluies efficaces et écoulement souterrain 2nd réservoir (R=0.910), pluies et écoulement souterrain août (R=0.726). Ceci conforte la qualité des données en sortie du modèle.

De la même façon RUIPER est corrélé avec les précipitations moyennes annuelles Auhely (R=0.631) : plus la pluie est forte, plus RUIPER augmente et plus il y a d'infiltration.

On note, en outre, les corrélations suivantes :

- débit souterrain du mois d'août Gardénia et QES DIREN (l/s/km²) (R=0.938) : plus le débit d'août augmente, plus le QES augmente ;
- superficie du bassin versant et VCN10 (R=0.665) : plus la superficie est grande, plus le VCN10 est soutenu. Ceci peut s'expliquer par un nombre plus important de cours d'eau qui alimentent la rivière durant l'étiage ; l'eau de surface pouvant mettre un peu plus de temps à arriver à l'exutoire. Ceci est illustré par la bonne relation densité du réseau hydrographique et le VCN10 (R=0.703). Une autre explication peut être une plus grande surface de bassin versant dans laquelle on peut trouver plus de réservoirs souterrains ;
- pente moyenne sur le bassin versant et écoulement rapide (R=0.634) : aucune conclusion ne peut être donnée car pente moyenne et écoulement souterrain sont également corrélés (R=0.634).

Les variables suivantes semblent anti-corrélées :

- écoulements en sortie de Gardénia (souterrain total, souterrain de chacun des 2 réservoirs, et souterrain août) et pourcentage de schistes du Briovérien (respectivement R= -0.558, -0.562, -0.561 et -0.590) : ces schistes semblent favoriser l'écoulement rapide (leur altération argileuse fournit un horizon assez imperméable) et pas le soutien d'étiage. On peut noter que cette conclusion est cohérente avec l'atlas hydrologique de la Bretagne (DIREN 1991, « Les terrains granitiques fournissent en général les meilleurs débits d'étiage. Les terrains sédimentaires se révèlent être très peu productifs »). Ceci est également illustré par l'anti-corrélation RUIPER et pourcentage de schistes du Briovérien (R= -0.573). Pour information, la corrélation écoulements souterrains et pourcentage de granites est assez faible (R=0.373) ;

- TAR1-TAR2 et pourcentage de schistes du Briovérien (respectivement $R = -0.421$ et -0.409) : la présence de schistes dans un bassin versant diminuerait les temps de demi-tarissement des réservoirs souterrains. A l'inverse dans les bassins versants métamorphiques et granitiques, TAR1 et TAR2 seraient plus longs avec respectivement $R = 0.422$ et 0.327 pour le métamorphisme, et $R = 0.303$ et 0.292 pour les granites. Le temps de demi-tarissement dépend de la quantité d'eau souterraine présente dans le réservoir et de sa perméabilité. A perméabilité sensiblement identique, les formations magmatiques se vidangent plus lentement, et peuvent soutenir les étiages des rivières, car elles sont plus riches en eaux souterraines (de plus, les bassins versants sont un peu plus arrosés car plus hauts en altitude), tandis que les aquifères des formations méta-sédimentaires sont moins riches en eau souterraine et ils se vidangeraient moins lentement (par ailleurs, ce sont des bassins versants moins arrosés) ;
- pourcentage d'altérites et écoulement rapide ($R = -0.511$), ainsi que pourcentage d'altérites et écoulement souterrain ($R = -0.460$) : la présence d'altérites au niveau d'un bassin versant diminuerait la part d'écoulement annuel. Ceci peut être lié à la faible perméabilité des altérites et le temps de passage d'une goutte d'eau dans la zone non saturée.

Paramètres sans influence ou non corrélés

On voit en particulier :

- que l'indice d'allongement n'est significativement corrélé à aucune variable. L'indice d'allongement intervient principalement sur les débits de crue : les transferts sont plus rapides pour un bassin compact que pour un bassin allongé (toutes choses égales par ailleurs). Cet indice influe peu sur les écoulements souterrains ;
- le pourcentage de prairies et terrains incultes n'a que peu d'influence sur les autres paramètres ;
- le pourcentage de forêt a aussi très peu d'influence, sauf peut-être sur l'écoulement souterrain d'août où il semble y avoir un début d'anti-corrélation ($R = -0.227$) : les forêts diminueraient l'écoulement d'étiage. Ceci est probablement dû au choix de la modélisation (globale) et à la méthode de calage. Cela aurait été différent si nous avions travaillé avec un logiciel qui faisait intervenir un coefficient cultural pour pondérer l'ETP ;
- le pourcentage de forêt et de prairies est indépendant de la formation géologique dans laquelle la végétation pousse.

Les variables suivantes ne sont pas corrélées :

- pourcentage d'altérites et pourcentages des 4 formations géologiques : l'altération s'est déroulée sur toutes les formations géologiques de Bretagne, sans distinction.

4.4.5. Synthèse des observations

Les observations énumérées dans ce chapitre ont permis d'argumenter les résultats des modélisations et de recenser des éléments physiques pour expliquer la plus ou moins forte participation des eaux souterraines aux débits des rivières sur les 70 bassins versants bretons modélisés.

Ainsi, on peut dire que l'importance de l'écoulement souterrain peut s'expliquer par les paramètres suivants : précipitations moyennes annuelles, pente moyenne sur le bassin versant, pourcentage de schistes du Briovérien (inverse), pourcentage d'altérites (inverse), et pourcentage de granite.

Par ailleurs, les ACP permettent de définir trois groupes de bassins versants :

- 1) bassins versants granitiques et/ou métamorphiques avec altérites, à écoulement souterrain important ;
- 2) bassins versants avec plus ou moins de schistes du Primaire sans altérites, à écoulement souterrain important ;
- 3) bassins versants schisteux du Briovérien avec plus ou moins d'altérites, à écoulement souterrain faible.

On peut citer quelques bassins versants appartenant à chacun de ces groupes :

- 1) Aber Benoit, Aber Wrac'h, Aber Ildut, Horn, Guillec, Jaudy, Jarlot, Douron et Nançon. Ce sont tous des bassins situés au Nord de la Bretagne ;
- 2) Ellé, Léguer, Laïta, Elorn, Inam, Blavet (22), Aulne, Mignonne et Douffine. Ces bassins sont localisés à l'Ouest de la Bretagne à proximité du point de jonction des départements Côtes d'Armor, Finistère et Morbihan ;
- 3) Frémur, Gouessant, Flume, Néal, Canut Sud, Meu, Combs, Coët-Dan, Evel, Aff et Arguenon. Ce sont des bassins positionnés à l'Est de la Bretagne principalement en Ille-et-Vilaine.

Enfin, la connaissance des différents paramètres indépendants au sein d'un groupe de bassins versants permettent de définir la répartition des écoulements (rapides et lents). Etant donné que les paramètres : pente moyenne et pourcentage d'altérites sont liés, tout comme le pourcentage de granite et de schistes, une régression, permettant de reconstituer un débit souterrain sur les bassins côtiers non jaugés, pourrait être tentée avec seulement trois paramètres : précipitations moyennes annuelles, pente moyenne sur le bassin versant et pourcentage de granite.

Comme cela n'était pas prévu dans le cadre du projet SILURES Bretagne et par manque de temps, aucune régression n'a pu être calculée utilisant les trois paramètres cités ci-dessus. Malgré tout, les illustrations 33 et 34 pourraient être ainsi complétées sur l'ensemble de la région Bretagne, dans le cadre d'une étude ultérieure.

5. Interprétation des données de géophysique aéroportée

Le principe de la valorisation des données de géophysique aéroportée a été détaillé dans le rapport d'avancement de la troisième année du projet (BRGM/RP-53621-FR), il ne sera donc pas repris en détail dans ce document.

En 1998, le Massif Armoricaïn a été survolé afin de mesurer le magnétisme des roches ainsi que leur radiométrie spectrale (combinaison Uranium-Potassium-Thorium). Les grilles ont été traitées et ont ensuite fait l'objet d'une analyse structurale automatique qui a permis de tracer des discontinuités géophysiques. Ces discontinuités ont ensuite été corrélées avec les résultats des forages d'eau (débit instantané en fin de foration rapporté à la profondeur de l'ouvrage) pour mettre en évidence des directions de discontinuités favorables ou défavorables à l'implantation de forages d'eau.

Pour ce travail, deux hypothèses importantes ont été prises :

- ces discontinuités sont la trace d'une fracturation profonde du sous-sol,
- la fracturation se fait sentir dans un périmètre de 400 mètres de part et d'autre de la discontinuité.

Ces périmètres ont été tracés autour de toutes les discontinuités géophysiques. Les résultats moyens des forages d'eau présents ont été associés à chaque discontinuité. Ceci a permis de déterminer des directions de discontinuités favorables à l'implantation de forages d'eau, des directions défavorables et des directions intermédiaires (notées « neutres »).

Le résultat de ce travail est représenté sur l'illustration 35. Cette carte n'est renseignée que dans les secteurs où les altérites meubles n'existent pas (cf. illustration 10), c'est-à-dire où l'épaisseur maximum de l'horizon fissuré utile n'est pas présente. Dans ce cas, il peut être intéressant de tenter de positionner un forage à proximité de ces discontinuités.

L'illustration 35 montre qu'au niveau de la Bretagne, les directions de discontinuités à N0-10° et N70-80° sont favorables à l'implantation de forages d'eau, tandis que la direction N120-130° est défavorable.

A partir du moment où l'utilisateur de cette carte identifie l'existence ou pas de discontinuités favorables sur un secteur, il est important de regarder si le critère « favorable » est bien fondé. Ainsi, les discontinuités doivent faire l'objet d'une caractérisation sur le terrain afin de savoir à quoi elles correspondent réellement (filons de quartz, dolérite, contact géologique, faille tectonique...).

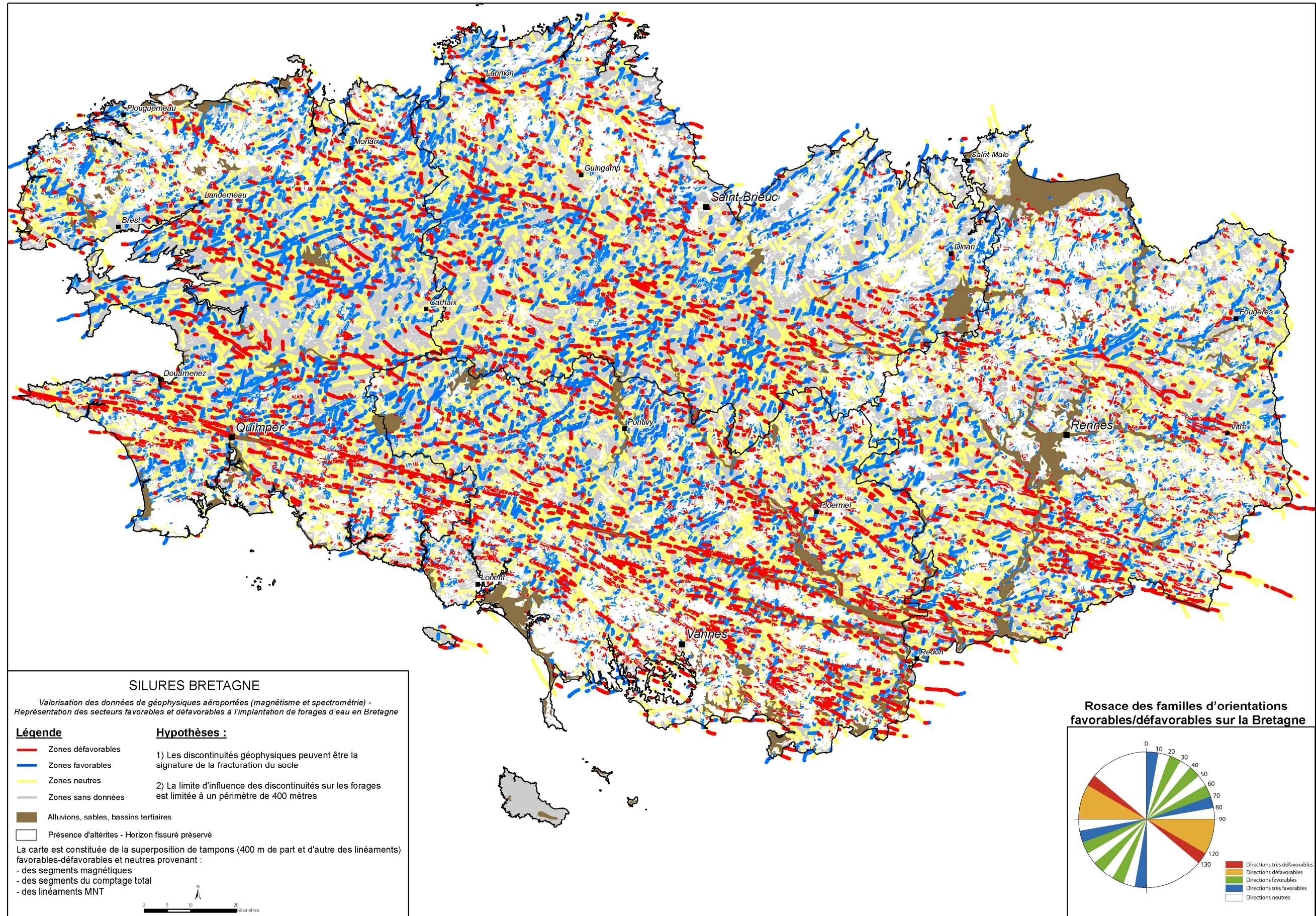


Illustration 35 - Valorisation des données de géophysiques aéroportées (magnétisme et spectrométrie) - Représentation des secteurs favorables et défavorables à l'implantation de forages d'eau en Bretagne

6. Réalisation des cartes de synthèse

La base de données du projet SILURES Bretagne a permis la création de documents d'aide à la décision à l'échelle de la région Bretagne (1/250 000), sous la forme des deux cartes de synthèse suivantes :

- secteurs où l'exploitation de l'eau souterraine peut être encouragée (zones productives),
- zones où l'inertie du milieu physique souterrain est la plus faible favorisant les actions de reconquête de la qualité de l'eau à court terme.

Les cartes sont présentées au format A3 en annexe 6 (illustrations 36 et 37), et également sous la forme de 2 planches au format A0 (chaque carte est pliée au format A4) à côté du rapport. L'échelle de restitution est le 1/250 000. Ces cartes ne devront donc pas être utilisées à une échelle plus détaillée.

6.1. SECTEURS OU L'EXPLOITATION DE L'EAU SOUTERRAINE PEUT ETRE ENCOURAGEE

6.1.1. Mode d'obtention et description de la carte

Cette carte s'appuie sur les résultats de débits du milieu fissuré utile (en m³/h), présentés au chapitre 3.5.4. L'horizon fissuré utile correspond à une épaisseur du sous-sol riche en fissures (provenant de l'altération des roches) qui apporte la meilleure productivité en terme de débit instantané (cf. chapitre 3.5.1.). Les débits ont été calculés pour 42 formations géologiques avec la méthode du seuil de 80 %, et ils ont été déduits pour 83 formations à partir du paramètre débit moyen du quartile supérieur.

L'unité de restitution de cette carte est un contour géologique à l'échelle du 1/250 000.

La Bretagne est renseignée sur 91 % de sa superficie. Les 9 % restants, indiqués comme « non renseigné », concernent des formations géologiques qui ne sont pas composées de roches de socle (alluvions, sables, bassins tertiaires) et des formations de socle qui n'ont pas pu être renseignées faute de données suffisantes de forages.

En Bretagne, le débit du milieu fissuré utile varie de 3.8 à 42.6 m³/h, avec une moyenne de 13.5 m³/h pour l'ensemble de la région.

Cette illustration est associée à deux encarts : celui du bas permet de localiser les formations géologiques extrapolées ainsi que l'écart-type associé à chaque prédiction (2.7 à 4.0 m, moyenne 2.76 m), et celui du haut fournit une image des probabilités

d'échec avec le pourcentage de forages ayant fourni un débit instantané inférieur ou égal à 10 m³/h (cf. chapitre 3.3.2.). Selon les formations, ce paramètre varie de façon très significative, de 48 à 100 %.

6.1.2. Utilité de la carte

La carte des débits du milieu fissuré utile indique, sur chaque formation géologique de socle, le débit instantané potentiellement mobilisable en foration (en m³/h). Ce débit ne peut être obtenu que si le forage traverse toute l'épaisseur du milieu fissuré utile (cf. illustration 29), c'est-à-dire dans les secteurs où les altérites sont présentes (cf. illustration 10). Si les altérites sont absentes, alors l'horizon fissuré utile est décapé (moins épais) et il fournira donc des débits inférieurs à ceux annoncés.

Les formations géologiques fournissant les tous meilleurs débits sont (par ordre décroissant) : la Formation de Paimpol au Nord-Ouest des Côtes d'Armor (roches volcaniques, débit=42.6 ± 4 m³/h), les Formations de Fougères et Granville au Nord de l'Ille-et-Vilaine (roches métamorphiques, débit=33.5 m³/h), la Formation de Tréguier au Nord-Ouest des Côtes d'Armor (roches volcaniques, débit=28.3 ± 3 m³/h).

Les épaisseurs du milieu fissuré utile associées à ces formations sont égales à : 51.8 ± 9 m (Formation de Paimpol), 59 m (Formations de Fougères et Granville), et 46.5 ± 9 m (Formation de Tréguier). De la même façon, les pourcentages de forages ayant fourni un débit instantané inférieur ou égal à 10 m³/h sont : 48 % (Formation de Paimpol), 50 % (Formations de Fougères et Granville), et 61 % (Formation de Tréguier). Ceci signifie qu'en moyenne, sur ces trois formations, on a un peu plus d'une chance sur deux d'obtenir un forage atteignant les débits annoncés par la carte.

Ci-dessus l'exemple cite les meilleures formations bretonnes. Cependant on peut remarquer, sur la carte de synthèse, que des formations productives existent dans chacun des quatre départements bretons : au Nord et au Sud de l'Ille-et-Vilaine, au Nord-Ouest et à l'Est des Côtes d'Armor, localement au Nord au Centre et au Sud du Finistère, et à l'Ouest du Morbihan.

Cette carte peut également fournir des informations régionales pour un interlocuteur (collectivité, communauté de communes, SAGE, syndicat d'eau) qui souhaite rechercher des eaux souterraines et qui s'est fixé un objectif de débit. La carte peut permettre de donner des grandes tendances pour répondre aux questions suivantes : L'objectif de débit peut-il être atteint (exemple : obtenir au moins 15 m³/h) ? Faut-il réaliser un ou plusieurs forages ? Quelle gamme de profondeur dois-je forer ?

Cette carte constitue donc un outil d'appui aux décideurs pour la localisation des secteurs où le recours aux eaux souterraines est à encourager et où les recherches locales ont les meilleures chances de succès.

6.2. CLASSEMENT DE L'INERTIE DU MILIEU PHYSIQUE SOUTERRAIN

6.2.1. Mode d'obtention et description de la carte

Cette carte s'appuie sur les résultats des modélisations des 70 bassins versants effectuées avec le logiciel BRGM Gardénia[®], détaillées au chapitre 4.

Les modélisations ont été réalisées avec un modèle à deux réservoirs souterrains pour simuler les deux régimes d'écoulement existant dans les roches de socle en Bretagne : un écoulement dans les roches altérées et un écoulement plus profond dans le milieu fissuré.

Le classement de l'inertie du milieu physique souterrain se base sur le résultat d'un paramètre de calage des modèles : il s'agit de la somme des temps de demi-tarissement de chacun des deux réservoirs souterrains (TAR1+TAR2, cf. illustration 32). Le temps de demi-tarissement est le temps au bout duquel, en l'absence de recharge du réservoir souterrain, le débit souterrain du réservoir est divisé par deux.

La carte ne prend donc pas en compte l'inertie du milieu physique superficiel, ni le temps de trajet de l'eau du sol jusqu'à la surface de la nappe.

L'unité de restitution de cette carte est un contour de bassin versant tracé à l'amont de chaque station de jaugeage, à l'échelle du 1/250 000.

La Bretagne est renseignée sur 62 % de sa superficie. Les 38 % restants, indiqués en blanc sur la carte, concernent des bassins versants côtiers qui ne sont pas jaugeés.

Sur toute la région, l'inertie du milieu physique souterrain a été hiérarchisée de façon qualitative en cinq classes allant d'inertie très forte (longs temps de vidange des réservoirs souterrains) à inertie très faible (temps moins longs).

Cette illustration est associée à une information concernant la fiabilité des stations de jaugeage (station non influencée, influencée par retenue et/ou lâchers d'eau de barrage, ou par des prélèvements AEP).

Au sujet de l'inertie du milieu physique souterrain, des temps de vidanges de la réserve totale d'eau souterraine ont été calculés sur les 11 bassins versants suivants (dans le cadre de quatre études citées en bibliographie) : l'Elorn à Pont ar Bled (superficie 260 km²), l'Aulne à Châteauneuf-du-Faou (1 224 km²), le Yar de sa source à la mer (61 km²), l'Horn de sa source à la mer (81 km²), le Coët Dan de sa source à l'Evel (12,5 km²), le Dourduff de sa source à Garlan (45 km²), la Maudouve de sa source au Gouët (30 km²), la Noë Sèche de sa source au Gouët (10 km²), l'Oust du Larhon au Lié (55 km²), l'Yvel du Doueff - Rézo à Loyat (54 km²) et le Nançon de sa source à Lécousse (57 km²).

Les résultats de ces études permettraient d'associer aux classes de la carte des valeurs chiffrées : l'inertie très faible correspondrait à un temps d'environ 2 ans, tandis que l'inertie très forte évoquerait à un temps d'environ 4 ans. On rappelle que ces temps ne prennent pas en compte le temps de transfert de l'eau dans la zone non saturée (du sol à la surface de la nappe) qui peut être tout aussi long.

Ces temps de renouvellement ne correspondent pas à des temps de reconquête de la qualité de l'eau en raison des phénomènes de mélange qui se déroulent entre le sol et la nappe, dans les altérites et dans le milieu fissuré.

6.2.2. Utilité de la carte

La carte de synthèse met en évidence les secteurs où l'inertie du milieu physique souterrain est faible et les secteurs où cette inertie est forte.

Les bassins versants ayant l'inertie du milieu physique souterrain la plus faible sont (par ordre décroissant) : Semnon, Meu, Combs, Penzé, Guyoult, Couesnon, Yvel, Rosette, Blavet (22), Canut Nord, Evron, Néal et Aron. Ils sont principalement situés en Ille-et-Vilaine, mais également dans les Côtes d'Armor.

Les bassins versants ayant l'inertie du milieu physique souterrain la plus forte sont (par ordre décroissant) : Guillec, Loisançe, Horn, Nançon, Jaudy, Tromorgant, Queffleuth, Jarlot, Aber Benoit et Douron. Ils sont tous situés au Nord de la Bretagne.

Dans le premier cas (inertie faible), les actions de reconquête de la qualité des eaux de surface seront visibles à court terme, et dans le second cas (inertie forte) elles seront lentes et donc visibles à long terme. Ce raisonnement s'appuie sur le fait que la participation des eaux souterraines aux débits des rivières est importante, voire totale en période d'étiage.

Si l'on regarde les cinq classes d'inertie et la position des bassins versants, on peut remarquer que ceux ayant une inertie du milieu physique souterrain plutôt forte sont localisés majoritairement au Nord de la Bretagne mais également un peu au Sud du Finistère. Ceux qui ont une inertie plutôt faible sont situés au Centre de la Bretagne et aussi en Ille-et-Vilaine.

Cette carte constitue un guide pour définir des priorités dans les actions de restauration de la qualité des eaux.

7. Conception d'un CD-Rom du programme SILURES

Un CD-Rom a été conçu pour rassembler et mettre à disposition d'un large public l'ensemble des données du programme SILURES (quatre projets : SILURES Bretagne, SILURES Bassins versants, SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine et SILURES Suivi). Il est annexé à ce rapport (cf. annexe 7).

Le but de ce CD-Rom est également de sensibiliser et d'informer un large public sur l'existence des eaux souterraines en Bretagne, afin de mieux les prendre en compte dans les stratégies d'exploitation et de reconquête de la ressource en eau.

L'objectif du BRGM, à travers le présent rapport accompagné du CD-Rom, est d'assurer la traçabilité de l'évolution de l'architecture du CD-Rom SILURES et des données associées.

La protection du droit d'auteur sur la base de données SILURES a été garantie par un dépôt de ces documents devant huissier. Depuis cette date, le contenu du CD-Rom SILURES est protégé par le copyright © BRGM 2008.

8. Conclusion

Le présent document constitue le rapport final du projet SILURES Bretagne. La dernière année du projet a permis de réaliser un important travail de cartographie : huit cartes de paramètres au format A3 et deux cartes de synthèse au format A0.

Après 6 ans d'étude de 2002 à 2008, SILURES Bretagne a permis de créer une base de données unique sur les eaux souterraines en Bretagne, à partir du croisement de plusieurs types d'informations disponibles : coupes géologiques et hydrogéologiques de 12 000 forages géoréférencés, données géophysiques aéroportées (magnétisme des roches et analyses spectrométriques), débits des rivières. L'objectif était de réaliser des cartes à l'échelle du 1/250 000, pour mieux connaître les réservoirs aquifères (épaisseurs, débits exploitables) et appréhender leur fonctionnement (relation avec les rivières, inertie).

Les cartes de synthèse établies (secteurs où l'exploitation de l'eau souterraine peut être encouragée, et classement de l'inertie du milieu physique souterrain) constituent des outils d'aide à la décision pour une politique globale de gestion de l'eau :

- outil d'appui aux décideurs pour la localisation des secteurs où le recours aux eaux souterraines est à encourager et où les recherches locales ont les meilleures chances de succès,
- guide pour définir des priorités dans les actions de restauration de la qualité des eaux.

En fin de projet, un travail d'organisation et d'archivage des données a été effectué en créant un CD-Rom regroupant l'ensemble des données de tous les projets SILURES (Bretagne, Bassins versants, Bassin versant Ille-et-Vilaine et Suivi).

Quelques pages de vulgarisation du programme SILURES seront mises en ligne sur Internet (site de Bretagne Environnement), où elles évoqueront l'accès gratuit au CD-Rom, sur demande auprès du BRGM Bretagne ; ce CD étant destiné à être diffusé auprès d'un large public s'intéressant à la thématique eau.

9. Bibliographie

M. BOISSON et D. THIERY (1991) – Logiciel GARDENIA modèle Global A Réservoirs pour la simulation des DEbits et des Niveaux Aquifères – Rapport BRGM R 32209

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 (soumis)

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.

DIREN Bretagne (1991) - Atlas hydrologique de la Bretagne - Echelle 1/500 000

LACHASSAGNE, P., WYNS R., BÉRARD P., BRUEL T., CHÉRY L., COUTAND T., DESPRATS J.-F., LE STRAT P. (2001) - Exploitation of high-yields in hard-rock aquifers : downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones - Groundwater, vol. 39, (4), p. 568-581

LOUVRIER M. et MARGAT J. (1983) - Précipitations efficaces moyennes annuelles en France (1946-1976) ; carte à 1/500 000 - Rapport BRGM 83 SGN 003 EAU, Orléans

B. MAZENC (1981) – Etude des relations entre les paramètres d'un modèle global pluie-débit et les caractéristiques physiques du bassin versant correspondant – Application à 17 bassins versants bretons – Rapport BRGM 81 SGN 525 EAU – 120 p., 14 tab., 26 fig., 7 annexes.

MOUGIN B., collaboration : CARN A., THOMAS E., JEGOU J-P. (2002) - SILURES Bretagne - Etat d'avancement de l'année 1 - BRGM/RP-51481-FR - 53 p., 18 tab., 24 fig., 6 annexes.

B. MOUGIN, A. CARN, N. DEBEGLIA, J. PERRIN et E. THOMAS avec la collaboration de J-P. JEGOU (2004) - SILURES Bretagne - Rapport d'avancement de l'année 2 - BRGM/RP-52825-FR - 62 p., 15 tabl., 23 fig., 3 ann.

B. MOUGIN, N. DEBEGLIA, J. PERRIN et E. THOMAS (2005) - SILURES Bretagne - Valorisation des données de géophysique aéroportée - Rapport d'avancement de l'année 3 - BRGM/RP-53621-FR - 85 p., 11 tabl., 44 fig.

MOUGIN B., collaboration : CARN A., JEGOU J-P. et QUEMENER G. (2006) - SILURES Bretagne - Rapport d'avancement de l'année 4 - BRGM/RP-55001-FR - 61 p., 23 ill., 5 ann.

B. MOUGIN, E. THOMAS, R. WYNS, R. BLANCHIN et F. MATHIEU (2003) - Comportement hydrodynamique des roches altérées de la surface sur le bassin versant de la rade de Brest (Finistère) - Rapport final - BRGM/RP-52656-FR - 54 p., 7 tab., 16 fig., 2 ann., 13 pl.

B. MOUGIN et E. THOMAS (2003) - Transfert des polluants par ruissellement et écoulement souterrain sur le bassin versant de la rade de Brest (Finistère) - Rapport final - BRGM/RP-52655-FR - 42 p., 5 tabl., 20 fig.

B. MOUGIN, E. THOMAS, R. WYNS, R. BLANCHIN et F. MATHIEU (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 final - BRGM/RP-52731-FR - 82 p., 16 tab., 21 fig., 3 annexes, 39 planches.

B. MOUGIN, E. THOMAS, F. MATHIEU, R. BLANCHIN et R. WYNS (2005) - SILURES Bassins Versants - Dourduff (29), Oust (56), Yvel (56), Maudouve et Noë Sèche (22) - Rapport final Année 2 - BRGM/RP-53742-FR - 98 p., 20 tabl., 21 fig., 3 ann. dont 56 planches (vol. séparé).

B. MOUGIN, J-M. BALTASSAT, R. BLANCHIN, E. PUTOT, J-M. SCHROETTER et R. WYNS (2008) - SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine - Bassin du Nançon - Rapport final - Année 2 - BRGM/RP-56318-FR - 82 p., 29 ill., 3 ann. dont 14 planches (vol. séparé)

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

M. SANCHEZ et D. THIERY (1981) – Détermination de débits d'un cours d'eau par analyse typologique du bassin versant – Application à 17 bassins versants bretons – Rapport BRGM 81 SGN 892 EAU – 40 p., 14 fig., 11 annexes.

Tutorial de XLSTAT : <http://www.xlstat.com/fr/support/tutorials/pca.htm>

WYNS, R. (1998) - Ressources en eau de la Margeride ouest - PRD 324 - Modélisation de la géométrie (altitude, épaisseur) des arènes granitiques du bassin-versant lozérien de la Truyère (Lozère, Massif Central). Rapport BRGM R 40191, 18 p., 9 fig., 4 pl. hors-texte.

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.

Annexe 1

Interpolation par la géostatistique

Interpolation par la géostatistique

Les formations lithologiques présentent un comportement global que l'on pourrait modéliser par une approche déterministe, néanmoins elles présentent aussi des variations et des irrégularités locales qui échappent à toute représentation fonctionnelle simple et qu'il est plus rigoureux de modéliser par une approche probabiliste.

La géostatistique est une théorie et une méthodologie, fondée sur l'analyse statistique des corrélations spatiales, pour étudier les variables dites régionalisées c'est à dire dont l'évolution dans l'espace (et/ou le temps) présente un caractère à la fois aléatoire et structuré.

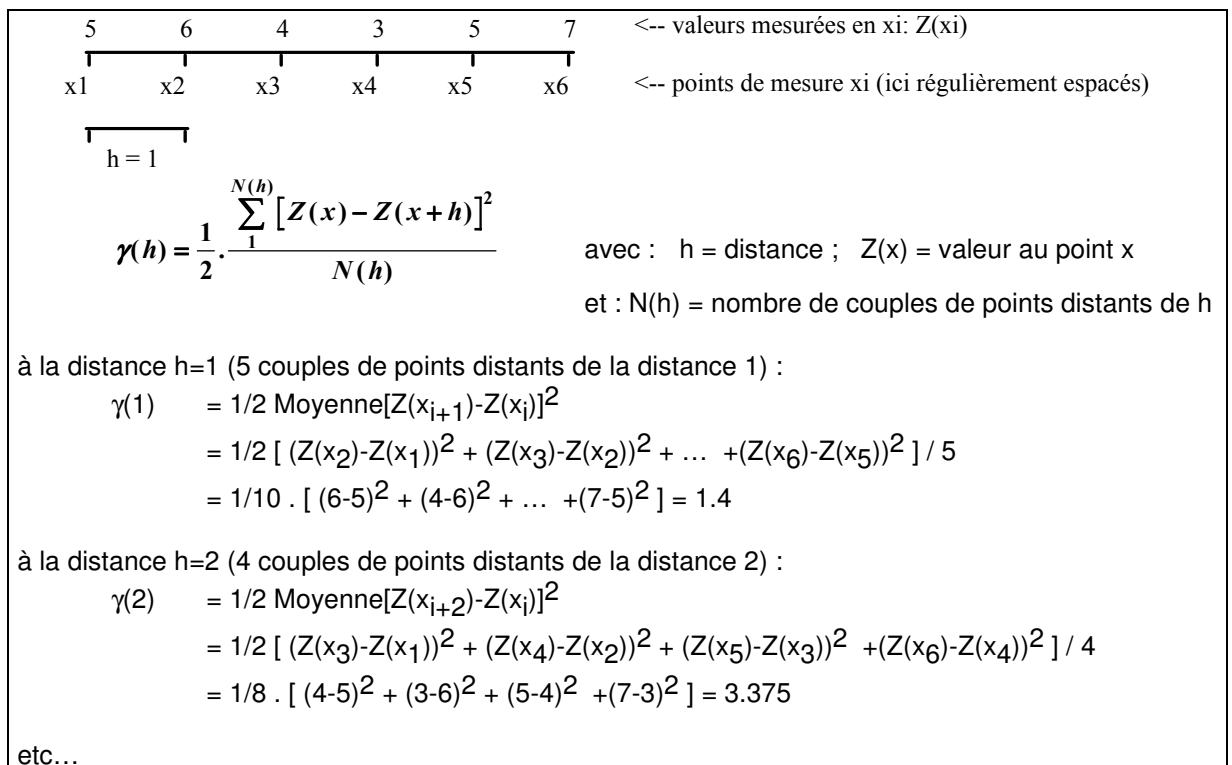
Deux raisons majeures justifient la mise en œuvre d'une approche géostatistique :

- Elle permet de caractériser la variabilité spatiale du phénomène que l'on étudie, à savoir le comportement des formations retenues. L'outil utilisé est **le variogramme** qui synthétise la structure de la variable. Pour une direction donnée, il indique comment varie l'écart des valeurs prises en 2 points X et X+h en fonction de la distance h. Il renseigne sur les anisotropies éventuelles et sur le degré de régularité de la variable.
- Elle permet de résoudre le problème de l'interpolation optimale, c'est à dire de l'estimation optimale d'une valeur $Z(x_0)$ inconnue à partir des informations disponibles. L'interpolateur utilisé est le **krigeage**, seule technique qui fournit simultanément la valeur estimée et l'erreur associée caractérisée par l'écart-type de krigeage.

Le variogramme

Dans un phénomène naturel comme la topographie, les cotes mesurées en différents points, bien que variables d'un point à l'autre, ne sont pas indépendantes de leur localisation. La différence de cote Z entre deux points x et x + h est d'autant plus faible que la distance h qui les sépare est petite. D'un point de vue statistique, il y a une corrélation spatiale entre les données. Cette corrélation est d'autant plus forte que les points expérimentaux sont rapprochés et que le phénomène est continu et régulier. Pour quantifier le degré de corrélation spatiale, ou plutôt la détérioration de cette corrélation avec la distance, la géostatistique fait appel à la fonction variogramme $\gamma(h)$. Cette fonction donne, en fonction de la distance h qui sépare deux points, la valeur moyenne de $1/2[Z(x+h)-Z(x)]^2$.

La figure ci-dessous illustre ce calcul.



Principe de calcul du variogramme

Le variogramme est d'abord un outil d'analyse des phénomènes naturels. En effet, l'allure et le comportement du variogramme expérimental fournissent une image synthétique des principaux traits structuraux du phénomène étudié :

- **Continuité à l'origine.** En principe $Z(x)$ et $Z(x+h)$ sont égaux quand h tend vers 0. En pratique toutefois, ceci n'est pas toujours vérifié. En effet il peut exister une discontinuité apparente à l'origine, qui peut être liée soit à une erreur de mesure, soit à des variations à « petites distances », en tout cas à des distances inférieures à la maille d'échantillonnage. Cette discontinuité à l'origine est appelée « effet de pépite ». Elle traduit la part de variabilité du phénomène que l'on ne peut expliquer soit en raison de la maille d'échantillonnage, qui ne permet pas de mettre en évidence des variabilités locales, soit en raison d'erreurs de mesure. La figure A (b) ci-dessous montre un exemple d'effet de pépite.
- **Continuité spatiale au delà de l'origine**, traduite par les observations suivantes :
 - **portée** (distance de corrélation), phénomène stationnaire - figure A (a) ci-dessous ; classiquement la valeur du variogramme est plus faible à l'origine ($Z(x)$ et $Z(x+h)$ sont voisins quand h est faible, donc la valeur du variogramme est faible) et augmente quand la distance augmente. Au bout d'une certaine distance entre points de mesure, la différence entre $Z(x)$ et $Z(x+h)$ n'augmente plus statistiquement, car les points ne sont plus corrélés. Cette distance limite est appelée portée (distance maximale jusqu'à laquelle

des points peuvent être corrélés). A partir de cette distance, la valeur du variogramme se stabilise autour d'un palier,

- **anisotropie,**
- **imbrication d'échelles de variabilité,**
- **absence de portée finie** - figure A (b) ci-dessous, dérive ou tendance régionale, phénomène non stationnaire.

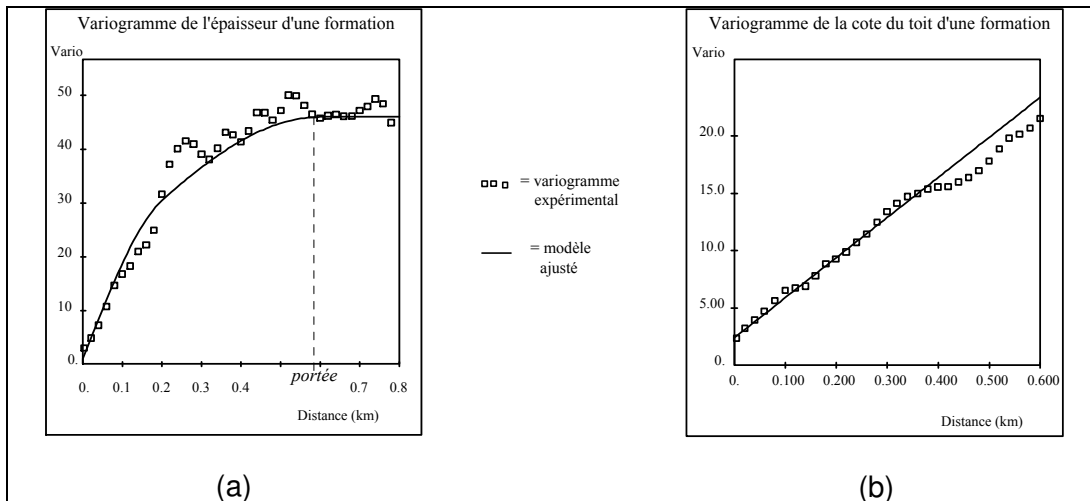


Fig. A : Exemples types de variogrammes : (a) : variable stationnaire avec portée visible, (b) : variable non stationnaire, sans portée.

Le krigeage

La méthode d'interpolation spécifique à la géostatistique est le krigeage. Par rapport aux autres méthodes d'interpolation automatique, les algorithmes du krigeage reposent sur une interprétation du phénomène à travers l'étude variographique préalable. Le krigeage présente un double intérêt :

- Il remplace le dessin par un calcul qui permet d'estimer en tout point la valeur la plus probable du paramètre étudié. Cette interpolation prend en compte :
 - la densité et la répartition des données sur le domaine étudié,
 - la plus ou moins grande continuité spatiale modélisée par le variogramme,
 - les diverses erreurs de mesure et incertitudes associées aux données.
- Il quantifie l'incertitude qui entache toute valeur interpolée. Cette incertitude, qui est une mesure de la qualité locale de la carte obtenue, est essentielle dans tous les projets où les risques encourus doivent être connus, et minimisés le cas échéant par de nouvelles mesures.

Formalisme du krigeage « ordinaire »

Le krigeage le plus utilisé est le « krigeage ordinaire ». Il s'agit d'une interpolation par combinaison linéaire des données de base $Z(x_i)$. La valeur interpolée au point x , notée $Z^*(x)$, est donnée par :

$$Z^*(x) = \sum_{i=1,n} \lambda_i Z(x_i)$$

Le non biais est assuré à la condition que la somme des poids ou pondérateurs λ_i soit égale à 1 :

$$\sum_{i=1,n} \lambda_i = 1$$

Les pondérateurs sont alors choisis de façon à minimiser la variance d'estimation. Ceci conduit aux équations du krigeage ordinaire suivantes :

$$\sum_{j=1,n} \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x) \quad \forall i \text{ (n équations)}$$

$$\sum_{i=1,n} \lambda_i = 1$$

n	=	nombre d'informations disponibles,
i, j	=	indices des points de mesure ; i et j varient de 1 à n ,
x_i, x_j	=	points de mesure x_i et x_j ,
$Z(x_i), Z(x_j)$	=	valeurs mesurées en x_i et x_j ,
x	=	volume à estimer (point ou bloc),
λ_i (ou λ_j)	=	pondérateur (ou poids) affecté à la valeur mesurée en x_i ,
μ	=	paramètre de Lagrange,
$\gamma(x_i, x_j)$	=	valeur du variogramme $\gamma(h)$ pour h = distance entre x_i et x_j ,
$\gamma(x_i, x)$	=	valeur du variogramme $\gamma(h)$ pour h = distance entre x_i et x , si x est un volume, on prend la valeur moyenne de γ entre x_i et ce volume.

Enfin la variance de l'erreur d'estimation, appelée **variance d'estimation** ou **variance de krigeage**, vaut :

$$S_k^2 = \sum_{i=1,n} \lambda_i \gamma(x_i, x) - \bar{\gamma}(x, x) + \mu$$

$\bar{\gamma}(x, x)$ est la valeur moyenne du variogramme entre deux points appartenant au volume x . Si le volume se réduit à un point, la distance qui sépare ces points est nulle et on a $\bar{\gamma}(x, x) = 0$.

Dans les expressions ci-dessus on voit que dans le krigeage interviennent :

- les positions des informations x_i par rapport au volume ou au point à estimer x , par le biais des valeurs de $\gamma(x_i, x)$;
- la répartition des informations, par le biais des valeurs de $\gamma(x_i, x_j)$;
- la fonction structurale variogramme γ .

Annexe 2

Caractéristiques du milieu fissuré utile au niveau des 83 formations géologiques extrapolées

Formation géologique	Nb de forages	Débit moyen quartile supérieur (m3/h)	Débit du fissuré utile (m3/h)	Ecart-type associé à la prédiction (m3/h)	Q/P' moyen issu du krigeage (m3/h/m)	Débit linéaire du fissuré utile (m3/h/m)	Ecart-type associé à la prédiction (m3/h/m)	Epaisseur reconstituée du fissuré utile (m)	Epaisseur calculée du fissuré utile (m)	Ecart-type associé à la prédiction (m)
Complexe de Plouguerneau	31	13.1	9.7	2.7	0.273	0.393	0.082	24.6	29.6	8.7
Formation de Bains-sur-Oust	93	23.5	17.2	2.7	0.176	0.242	0.083	71.3	62.4	10.0
Formation de Béganne	71	12.5	9.2	2.8	0.200	0.279	0.082	33.0	35.5	8.4
Formation de Gahard	24	9.4	7.0	2.8	0.245	0.350	0.082	19.9	26.3	8.9
Formation de Guingamp	29	19.6	14.4	2.7	0.173	0.237	0.083	60.6	54.9	9.1
Formation de Kerroc'h	35	24.0	17.6	2.7	0.256	0.366	0.082	48.1	46.1	8.4
Formation de Kervignac	24	12.0	8.8	2.8	0.211	0.296	0.082	29.8	33.3	8.4
Formation de la Baie de Douarnenez	47	12.2	9.0	2.8	0.220	0.310	0.082	29.1	32.7	8.5
Formation de la Roche-Derrien	32	9.2	6.8	2.8	0.434	0.644	0.085	10.5	19.7	9.6
Formation de la Vilaine	40	14.3	10.5	2.7	0.217	0.305	0.082	34.4	36.5	8.3
Formation de Langrolay	55	33.8	24.7	2.8	0.297	0.431	0.082	57.4	52.6	8.9
Formation de Lanmeur-Cosquer	31	7.1	5.3	2.9	0.071	0.078	0.087	67.8	60.0	9.7
Formation de Lannion	24	17.0	12.5	2.7	0.329	0.481	0.082	26.0	30.6	8.6
Formation de l'Elorn	61	29.9	21.9	2.7	0.217	0.306	0.082	71.7	62.7	10.1
Formation de Merrien	37	6.3	4.7	2.9	0.159	0.215	0.083	21.7	27.6	8.8
Formation de Morlaix	34	25.8	18.9	2.7	0.219	0.309	0.082	61.0	55.2	9.1
Formation de Muzillac	87	14.8	10.9	2.7	0.175	0.240	0.083	45.4	44.2	8.4
Formation de Nerly	30	9.4	6.9	2.8	0.199	0.276	0.082	25.0	29.9	8.6
Formation de Nizon-Quimperlé-Tréauray-Roguedas-Arz	85	18.2	13.3	2.7	0.203	0.284	0.082	47.0	45.4	8.4
Formation de Paimpol	52	58.3	42.6	4.0	0.507	0.758	0.089	56.2	51.8	8.8
Formation de Penhors	28	26.1	19.1	2.7	0.151	0.202	0.083	/	/	/
Formation de Plouguenast	56	27.4	20.1	2.7	0.197	0.274	0.082	73.3	63.8	10.2
Formation de Plourivo	39	17.5	12.8	2.7	0.227	0.320	0.082	40.0	40.4	8.3
Formation de Pont-Réan	82	16.1	11.8	2.7	0.217	0.305	0.082	38.9	39.7	8.3
Formation de Port Saint-Hubert	30	32.5	23.8	2.8	0.391	0.576	0.084	41.2	41.3	8.3
Formation de Riadan-Renazé	40	13.7	10.1	2.7	0.221	0.312	0.082	32.3	35.0	8.4
Formation de Saint-Dolay	31	13.0	9.6	2.7	0.203	0.283	0.082	33.8	36.1	8.3
Formation de Saint-Germain-sur-Ille	56	27.1	19.8	2.7	0.216	0.303	0.082	65.3	58.3	9.5
Formation de Saint-Perreux	24	7.5	5.5	2.9	0.189	0.261	0.082	21.2	27.2	8.8
Formation de Traveusot	71	12.5	9.2	2.8	0.208	0.291	0.082	31.7	34.6	8.4
Formation de Tréguier	33	38.6	28.3	3.0	0.394	0.581	0.084	48.6	46.5	8.5
Formation de Trunvel	23	17.7	13.0	2.7	0.203	0.283	0.082	45.9	44.6	8.4
Formation d'Elliant	21	10.0	7.3	2.8	0.218	0.306	0.082	24.0	29.2	8.7
Formation du Grand Auverné	71	12.5	9.2	2.8	0.182	0.251	0.083	36.7	38.1	8.3
Formation du Grès armoricain	223	29.1	21.3	2.7	0.230	0.325	0.082	65.5	58.4	9.5
Formation du Guerno	29	20.6	15.1	2.7	0.188	0.260	0.082	58.3	53.3	9.0
Formation du Morbihan	37	10.7	7.9	2.8	0.180	0.248	0.083	31.9	34.8	8.4
Formations de Binic et du Minard	54	18.7	13.7	2.7	0.286	0.413	0.082	33.3	35.7	8.3
Formations de la Lande-Murée et du Val	29	13.8	10.2	2.7	0.241	0.342	0.082	29.7	33.2	8.4
Formations de Porsguen, Traonlions et Bolazec	22	9.8	7.2	2.8	0.240	0.341	0.082	21.2	27.2	8.8
Formations du Grès armoricain et d'Andouillé	26	21.2	15.6	2.7	0.200	0.278	0.082	56.0	51.7	8.8
Formations du Grès armoricain, Andouillé et Saint-	26	21.2	15.6	2.7	0.239	0.339	0.082	45.9	44.6	8.4
Groupe de la Roche-Maurice	87	29.0	21.2	2.7	0.200	0.279	0.082	75.9	65.7	10.5
Groupe de Plouigneau	87	29.0	21.2	2.7	0.280	0.404	0.082	52.4	49.2	8.6

Formation géologique	Nb de forages	Débit moyen quantile supérieur (m3/h)	Débit du fissuré utile (m3/h)	Ecart-type associé à la prédiction (m3/h)	Q/P' moyen issu du krigeage (m3/h/m)	Débit linéaire du fissuré utile (m3/h/m)	Ecart-type associé à la prédiction (m3/h/m)	Epaisseur reconstituée du fissuré utile (m)	Epaisseur calculée du fissuré utile (m)	Ecart-type associé à la prédiction (m)
Groupe de Saint-Goazec	34	13.0	9.5	2.7	0.230	0.326	0.082	29.3	32.9	8.5
Groupe d'Eréac	34	13.0	9.5	2.7	0.242	0.344	0.082	27.8	31.8	8.5
Massif de Baye	25	5.3	4.0	3.0	0.124	0.160	0.084	24.8	29.7	8.6
Massif de Bégard	62	24.8	18.2	2.7	0.241	0.343	0.082	53.0	49.6	8.6
Massif de Bonnemain - type Lanhélin (ss cordieri)	59	26.4	19.4	2.7	0.382	0.562	0.083	34.4	36.5	8.3
Massif de Carnac	177	10.8	8.0	2.8	0.167	0.228	0.083	35.1	37.0	8.3
Massif de Dinan	33	12.2	9.0	2.8	0.226	0.320	0.082	28.0	32.0	8.5
Massif de Douarnenez	26	24.0	17.6	2.7	0.115	0.145	0.085	/	/	/
Massif de Guidel	76	8.9	6.6	2.8	0.167	0.227	0.083	28.9	32.6	8.5
Massif de Kerlouan	45	10.7	7.9	2.8	0.367	0.540	0.083	14.6	22.6	9.3
Massif de Langonnet	28	9.9	7.3	2.8	0.201	0.280	0.082	26.1	30.7	8.6
Massif de Lizio	63	9.1	6.7	2.8	0.193	0.268	0.082	25.1	30.0	8.6
Massif de Ménéac	20	14.4	10.6	2.7	0.184	0.254	0.083	41.6	41.6	8.3
Massif de Orvault-Mortagne-Châteaumur	106	13.0	9.5	2.7	0.162	0.219	0.083	43.6	43.0	8.3
Massif de Ploemeur	29	14.1	10.4	2.7	0.168	0.228	0.083	45.5	44.3	8.4
Massif de Ploufragan	31	17.6	12.9	2.7	0.152	0.204	0.083	63.4	56.9	9.3
Massif de Plouguenast	21	13.0	9.6	2.7	0.186	0.257	0.082	37.2	38.4	8.3
Massif de Ploumanach	31	18.2	13.4	2.7	0.169	0.230	0.083	58.1	53.2	8.9
Massif de Plumergat	42	11.9	8.8	2.8	0.253	0.361	0.082	24.2	29.4	8.7
Massif de Port-Morvan	39	25.2	18.5	2.7	0.203	0.284	0.082	65.0	58.0	9.5
Massif de Roscoff	30	25.5	18.7	2.7	0.430	0.637	0.085	29.3	32.9	8.5
Massif de Sainte-Anne-d'Auray	106	13.0	9.5	2.7	0.198	0.275	0.082	34.6	36.7	8.3
Massif de Saint-Helen	30	33.3	24.3	2.8	0.416	0.616	0.085	39.5	40.1	8.3
Massif de Saint-Jean-du-Doigt	33	34.0	24.9	2.8	0.301	0.437	0.082	56.9	52.4	8.9
Massif de Tonquédec	29	13.2	9.7	2.7	0.235	0.334	0.082	29.1	32.8	8.5
Massif nord-trégorrois	61	26.7	19.5	2.7	0.409	0.605	0.084	32.3	35.0	8.4
Massifs de Barnenez-Plestin	20	19.0	13.9	2.7	0.367	0.540	0.083	25.8	30.5	8.6
Massifs de Carantec, Trégastel, Lanmeur et Yaudet	29	18.2	13.4	2.7	0.242	0.345	0.082	38.7	39.6	8.3
Massifs de Gerlesquin, Berrien et Commana	27	23.9	17.5	2.7	0.234	0.332	0.082	52.7	49.4	8.6
Massifs de Huelgoat, le Pothou et Plounéour	50	16.1	11.8	2.7	0.272	0.391	0.082	30.3	33.6	8.4
Massifs de Lamballe, Cancale et Saint-Cast	29	17.8	13.1	2.7	0.320	0.467	0.082	28.0	32.0	8.5
Massifs de Locronan, Steir	90	17.6	12.9	2.7	0.216	0.303	0.082	42.6	42.3	8.3
Massifs de Plonéour et Saint-Joseph	37	16.7	12.2	2.7	0.218	0.306	0.082	40.0	40.4	8.3
Massifs de Plouisy et de Pabu	52	16.2	11.9	2.7	0.193	0.268	0.082	44.4	43.6	8.3
Massifs de Quiberon et Guér	39	11.4	8.4	2.8	0.151	0.202	0.083	41.5	41.5	8.3
Massifs de Quimper et Plomelin	29	26.5	19.4	2.7	0.268	0.386	0.082	50.3	47.7	8.5
Massifs de Trégana, Ploudaniel et Kernic	24	18.8	13.8	2.7	0.424	0.628	0.085	21.9	27.7	8.8
Massifs de Trégunc et de Riec	36	15.0	11.0	2.7	0.118	0.151	0.085	72.7	63.4	10.2
Massifs du Pertre et de Craon	22	15.5	11.4	2.7	0.304	0.442	0.082	25.8	30.4	8.6

Annexe 3

Régressions climatiques des 8 bassins versants - Comparaison de la lame d'eau et des pluies efficaces

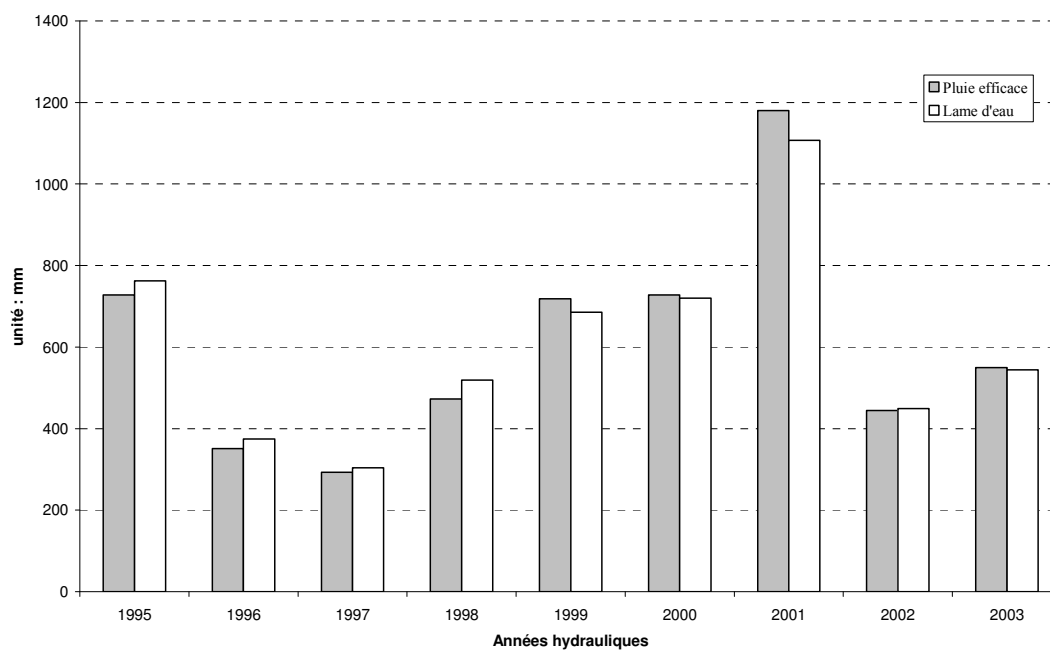
SILURES Bretagne

Bassin versant	Dépt	Station hydrométrique	N° station	Superficie BV (km²)	Pluie BV	ETP BV
Douron	29	Ponthou	J2404010	24.7	0.25 P Plougonven + 0.35 P Guerlesquin + 0.40 P Lannéanou	ETP Louargat
Guillec	29	Trézilidé	J3024010	43	0.29 P Sibiril + 0.71 P Landivisiau	ETP St-Servais (Landivisiau)
Aber-Benoit	29	Plabennec [Loc Maria]	J3213020	27.4	P Brest (Guipavas)	ETP Guipavas
Canut Nord	35	Lassy [Pont de Lassy]	J7523020	91	0.12 P Plélan-le-Grand + 0.80 P Monterfil + 0.08 P Guichen	ETP Monterfil
Aron	35	Grand-Fougeray [Bernardais]	J7824010	118	P La Noë Blanche	ETP La Noë Blanche
Canut Sud	35	Saint-Just	J7973010	37	P Pipriac	ETP La Noë Blanche
Combs	35	Maure-de-Bretagne [Compessy]	J8653010	103	P Monterfil	ETP St-Jacques-de-la-Lande
Vilaine	35+(22)	Guipry [Malon]	J7700610	4138	0.05 P Luitré + 0.21 P St-Didier + 0.20 P Melesse + 0.20 P Martigné-Ferchaud + 0.05 P St-Aubin-du-Cormier + 0.13 P St-Jacques-de-la-Lande + 0.13 P Bléruais + 0.015 P Trémoré + 0.005 P Guipry + 0.005 P Plélan-le-Grand + 0.005 P Merdrignac	0.11 ETP Monterfil + 0.265 ETP St-Jacques-de-la-Lande + 0.625 ETP Martigné-Ferchaud

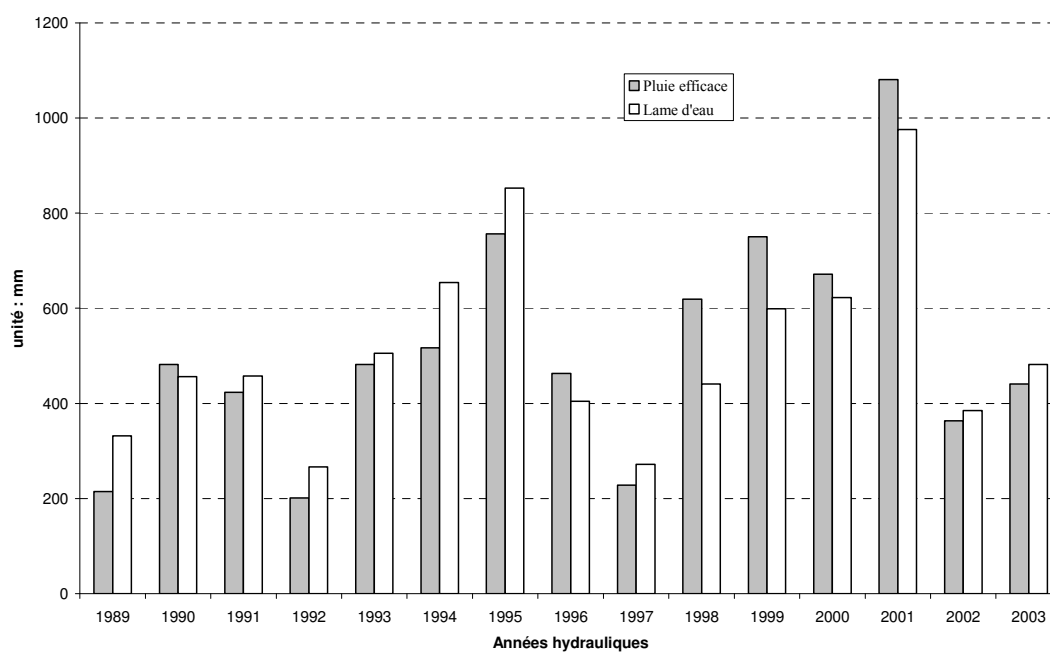
Régressions climatiques des 8 bassins versants

Comparaison entre pluie efficace et lame d'eau pour les 8 bassins versants

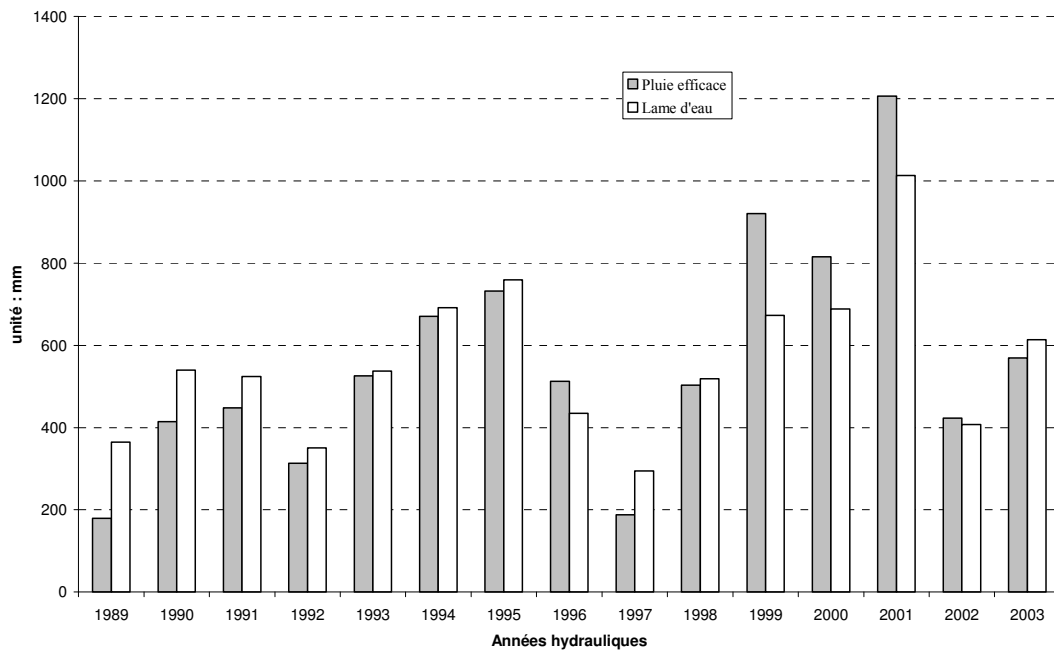
DOURON



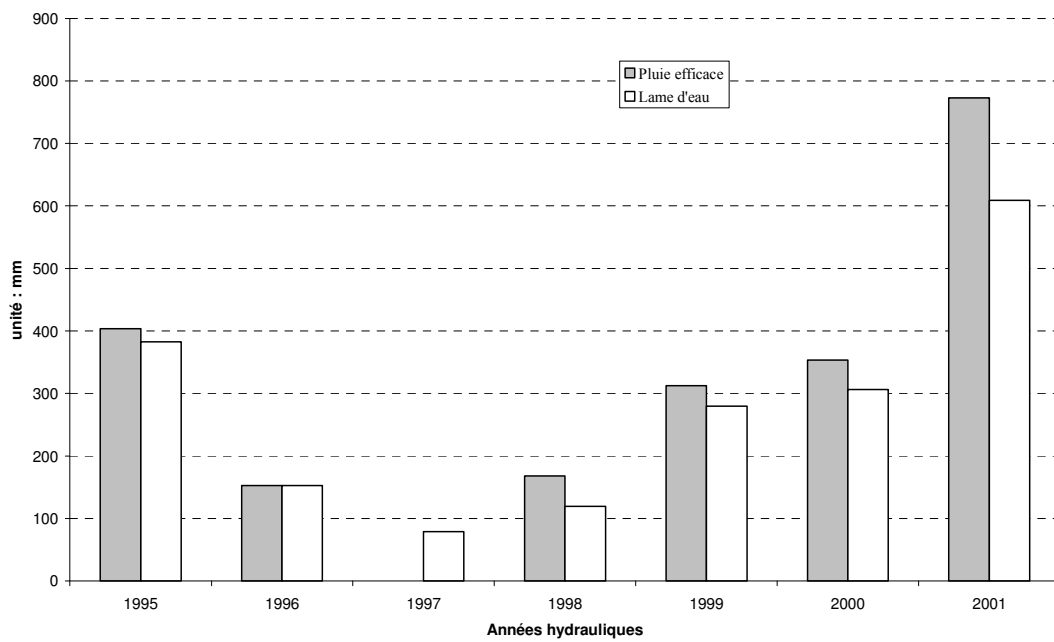
GUILLEC



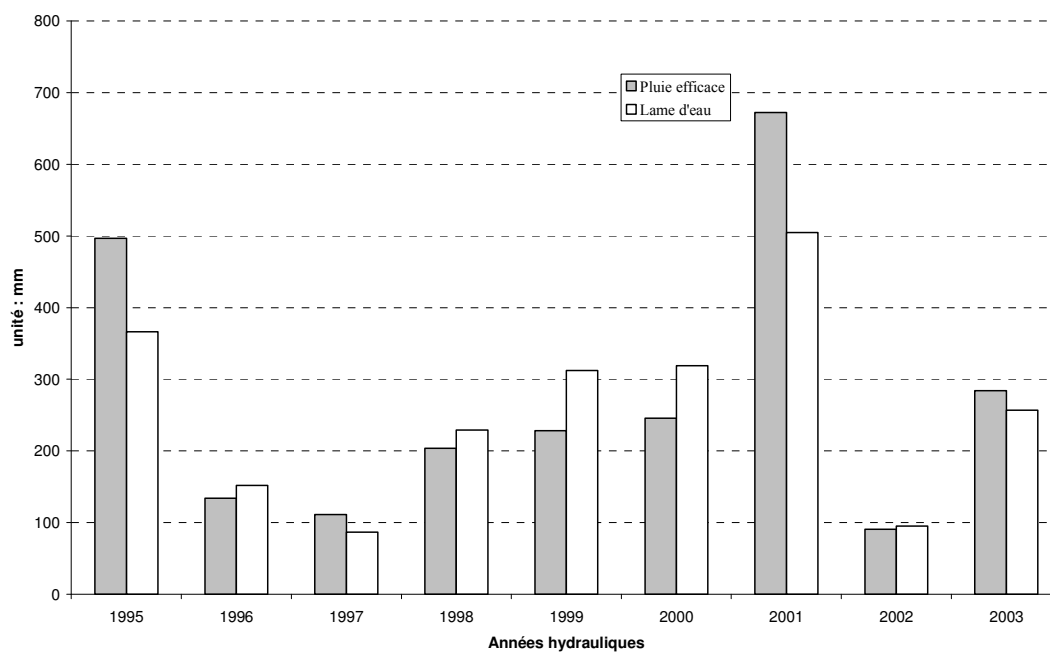
ABER-BENOIT



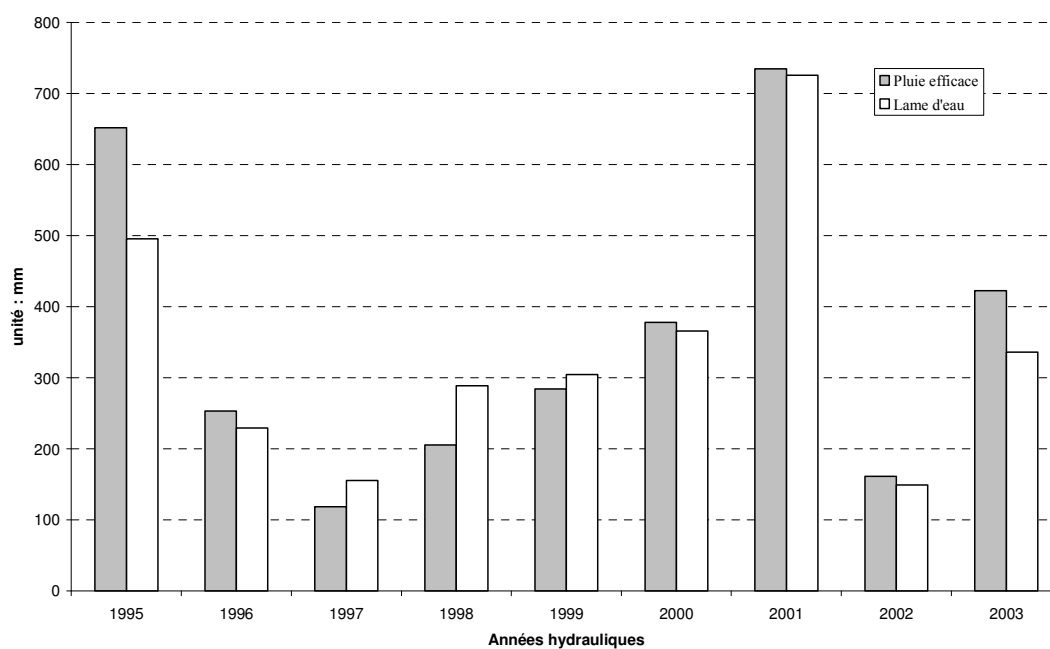
CANUT NORD



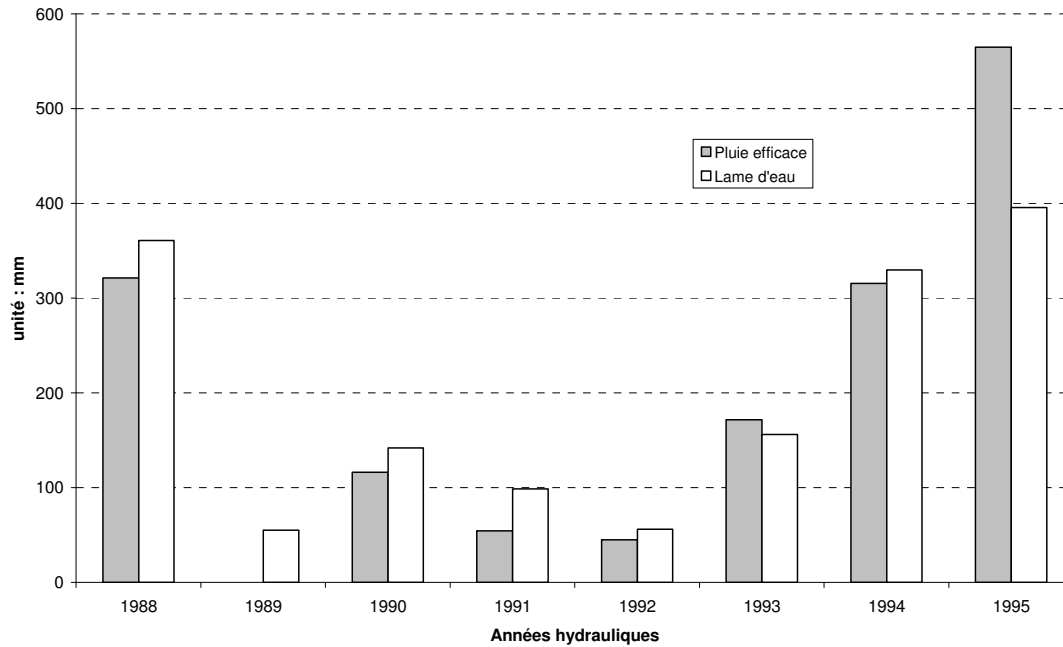
ARON



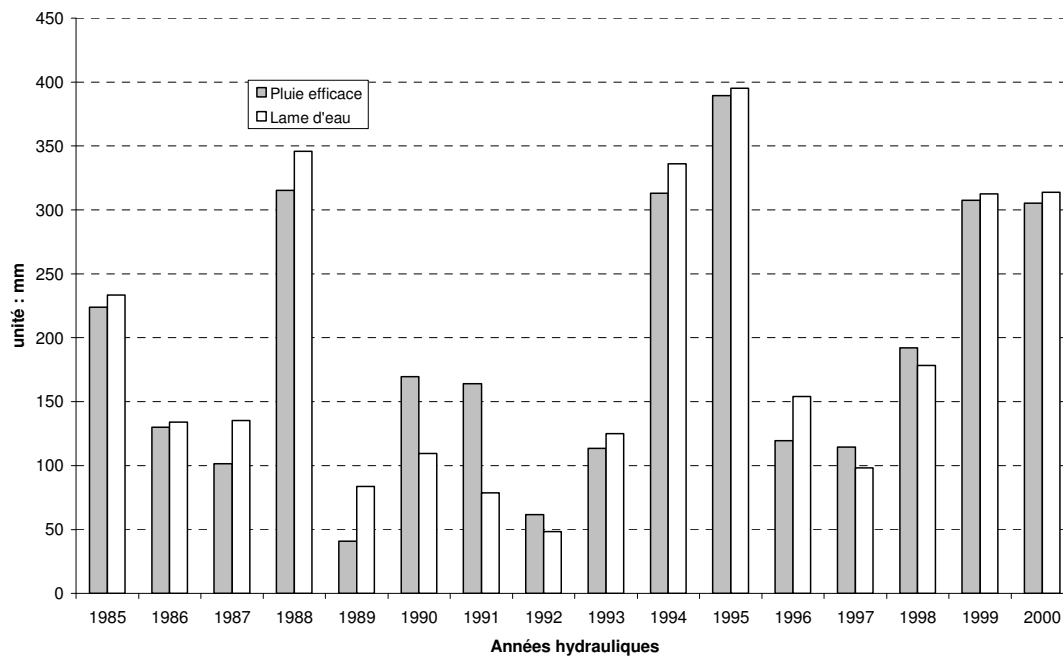
CANUT SUD



COMBS



VILAINE



Annexe 4

**Paramètres retenus pour les modélisations
Gardénia[©] -
Résultats obtenus suite aux modélisations
Gardénia[©] -
Modélisation Gardénia[©], Calage des paramètres
des bassins versants -
Modélisation Gardénia[©], Débits mesurés et
calculés des bassins versants -
Débits annuels rapides et souterrains des
bassins versants -
Débits mensuels moyens interannuels des
bassins versants**

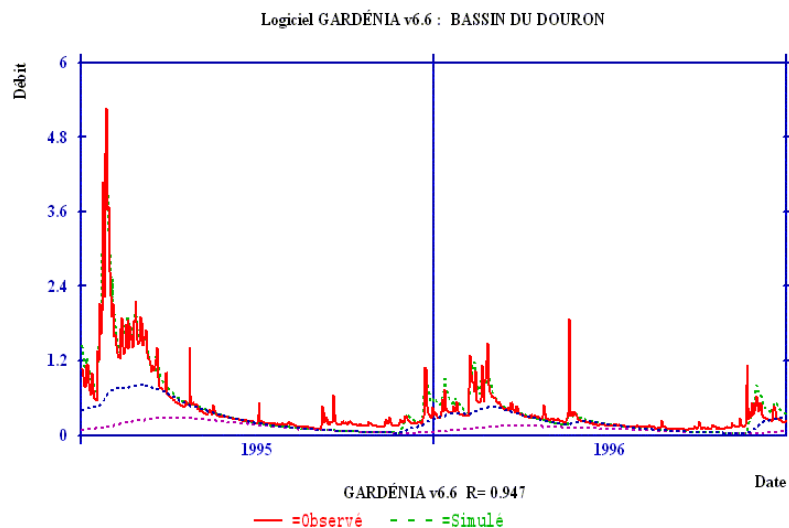
SILURES Bretagne

Bassin versant	Dépt	Station hydrométrique	N° station	Superficie BV (km²)	Années calage	Corrélation (%)	Période modélisation Gardénia	Corrélation (%)	RUMAX (mm)	RUIPER (mm)	TPER1 (mois)	TAR1 (mois)	TPER2 (mois)	TAR2 (mois)
Douron	29	Ponthou	J2404010	24.7	1995-1996	95	1995-2003	91	175	65	0.4	1.05	1.3	2.05
Guillec	29	Trézilié	J3024010	43	1995-1996	93	1989-2003	85	160	60	0.5	1.3	1.7	2.7
Aber-Benoit	29	Plabennec [Loc Maria]	J3213020	27.4	1995-1996	93	1989-2003	88	200	65	0.6	1.1	1.4	2.0
Canut Nord	35	Lassy [Pont de Lassy]	J7523020	91	2000-2001	86	1995-2001	84	300	20	0.25	0.25	0.6	1
Aron	35	Grand-Fougeray [Bernardais]	J7824010	118	1997-1998	75	1995-2003	73	165	15	0.2	0.3	0.6	1
Canut Sud	35	Saint-Just	J7973010	37	1995-1996	91	1995-2003	88	135	20	0.3	0.5	0.6	1
Combs	35	Maure-de-Bretagne	J8653010	103	1990-1991	83	1988-1995	78	190	25	0.3	0.3	0.5	0.7
Vilaine	35+(22)	Guipry [Malon]	J7700610	4138	1995-1996	92	1985-2000	87	130	20	0.45	0.5	0.9	1.6

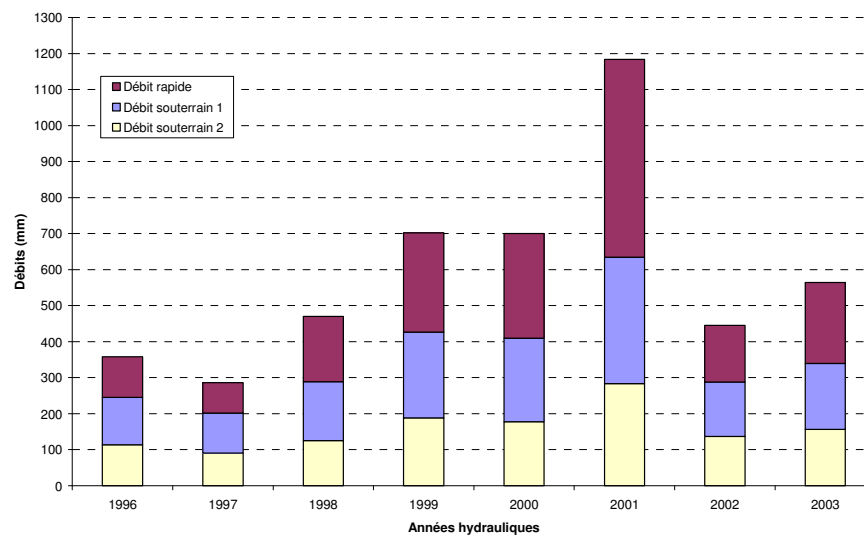
Paramètres retenus pour les modélisations Gardénia®

Bassin versant	Dépt	Station hydrométrique	N° station	Superficie BV (km ²)	Période modélisation Gardénia	Pluie totale (mm/an)	Evapo-transpiration (mm/an)	Pluie efficace (mm/an)	Ecoulement rapide (mm/an) (%)		Ecoulement lent (mm/an) (%)		Ecoulement lent réservoir 1 (mm/an) (%)		Ecoulement lent réservoir 2 (mm/an) (%)	
Douron	29	Ponthou	J2404010	24.7	1995-2003	1200	600	600	244	40.5	356	59.5	196	33	160	26.5
Guillec	29	Trézilidé	J3024010	43	1989-2003	1085	564	521	224	43	297	57	168	32	129	25
Aber-Benoit	29	Plabennec [Loc Maria]	J3213020	27.4	1989-2003	1189	613	576	261	45.5	315	54.5	176	30.5	139	24
Canut Nord	35	Lassy [Pont de Lassy]	J7523020	91	1995-2001	942	647	295	151	51	144	49	101	34	43	15
Aron	35	Grand-Fougeray [Bernardais]	J7824010	118	1995-2003	832	565	267	137.5	51.5	129.5	48.5	85.5	32	44	16.5
Canut Sud	35	Saint-Just	J7973010	37	1995-2003	873	534	339	175.5	52	163.5	48	88	26	75.5	22
Combs	35	Maure-de-Bretagne	J8653010	103	1988-1995	742	551	191	91.5	48	99.5	52	61.5	32	38	20
Vilaine	35+(22)	Guipry [Malon]	J7700610	4138	1985-2000	736	542	194	97	50	97	50	62	32	35	18

Résultats obtenus suite aux modélisations Gardénia®

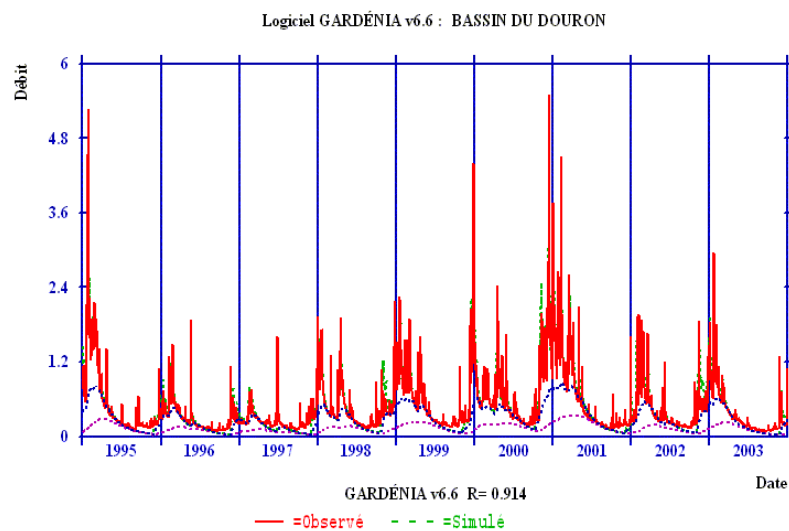


Modélisation Gardénia®, Calage des paramètres des bassins versants

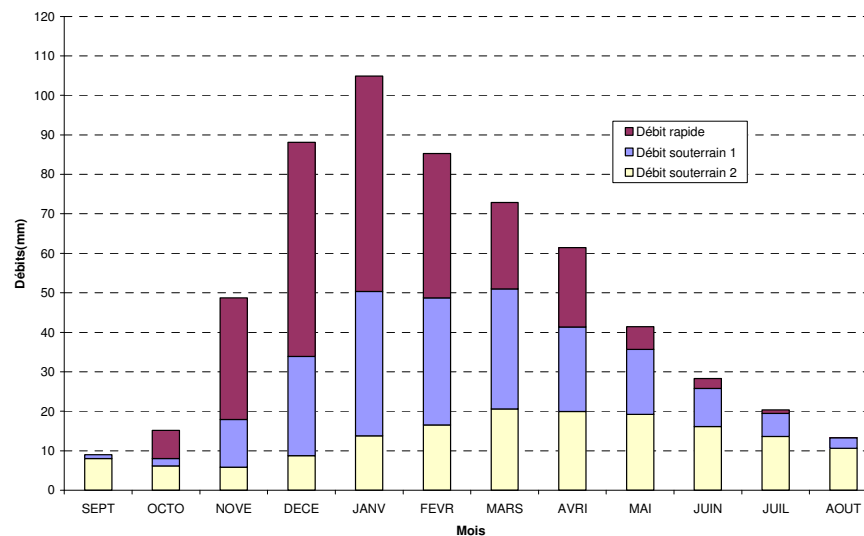


Débits annuels rapides et souterrains des bassins versants

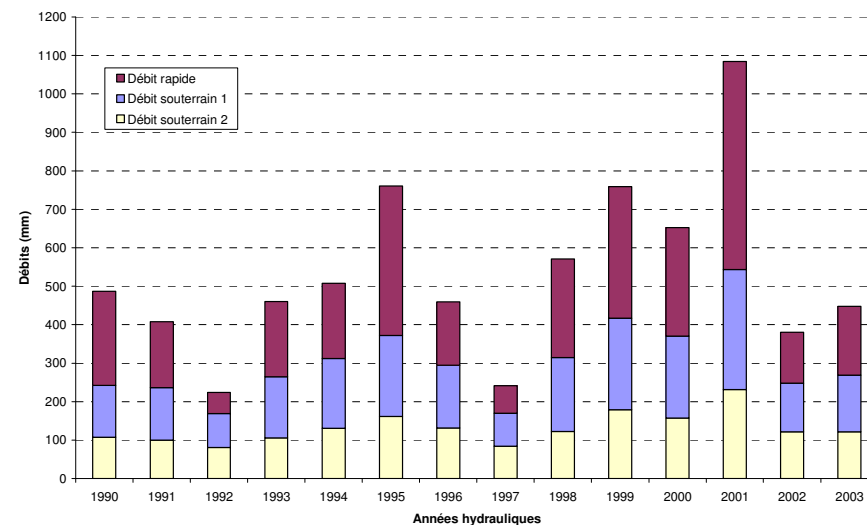
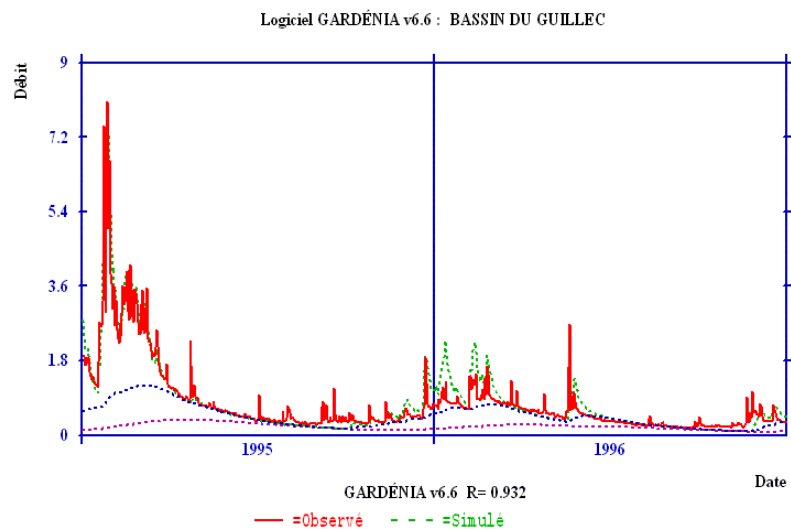
DOURON



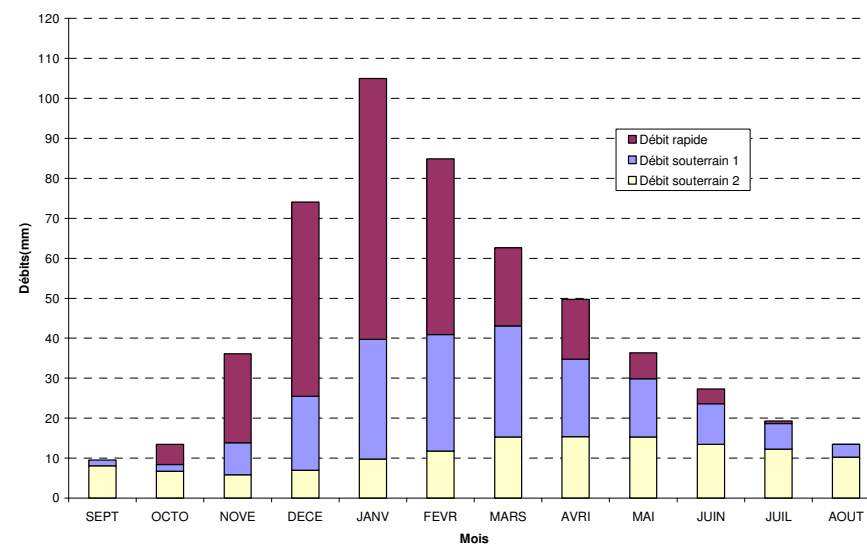
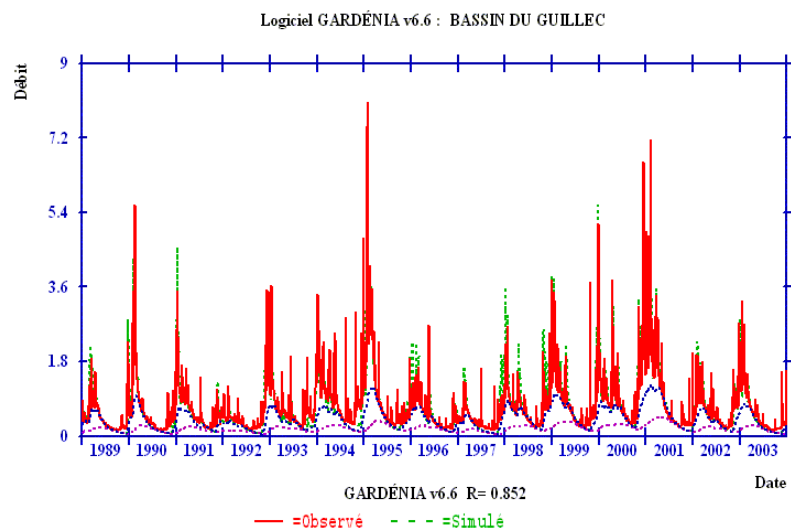
Modélisation Gardénia®, Débits mesurés et calculés des bassins versants

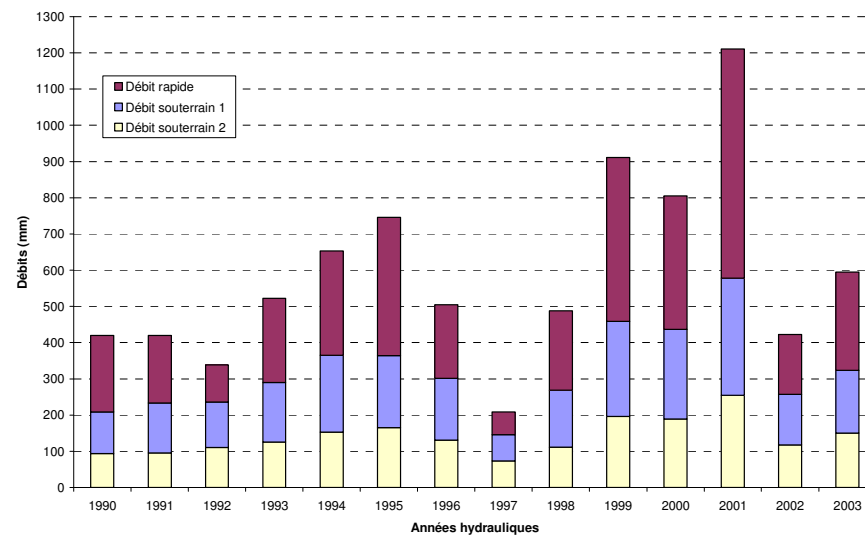
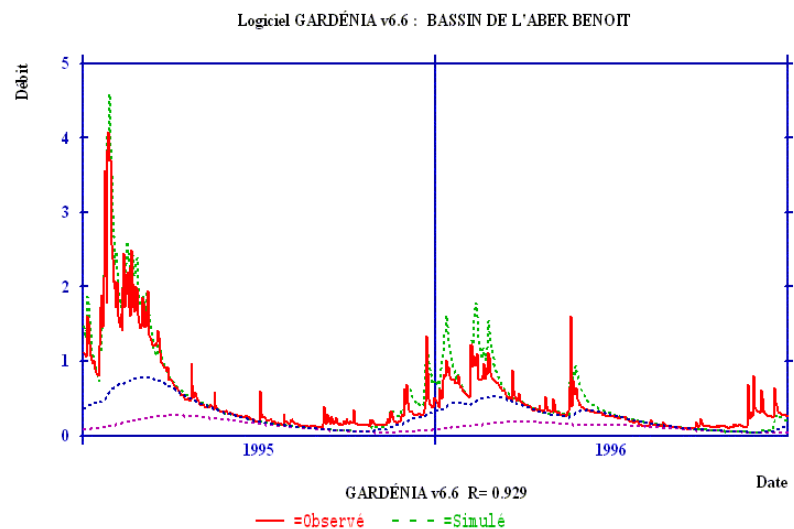


Débits mensuels moyens interannuels des bassins versants

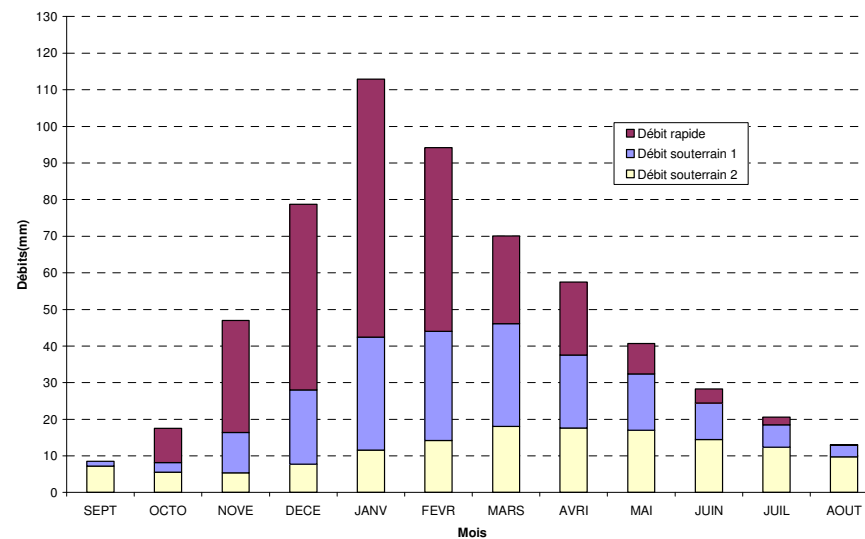
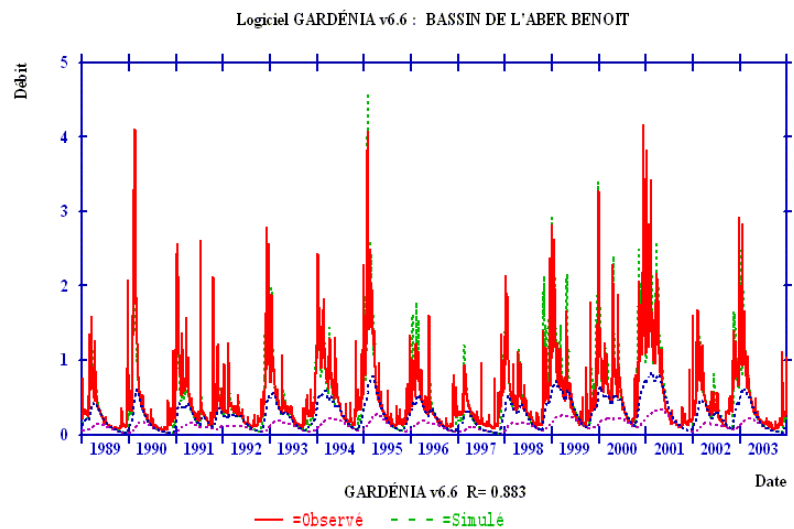


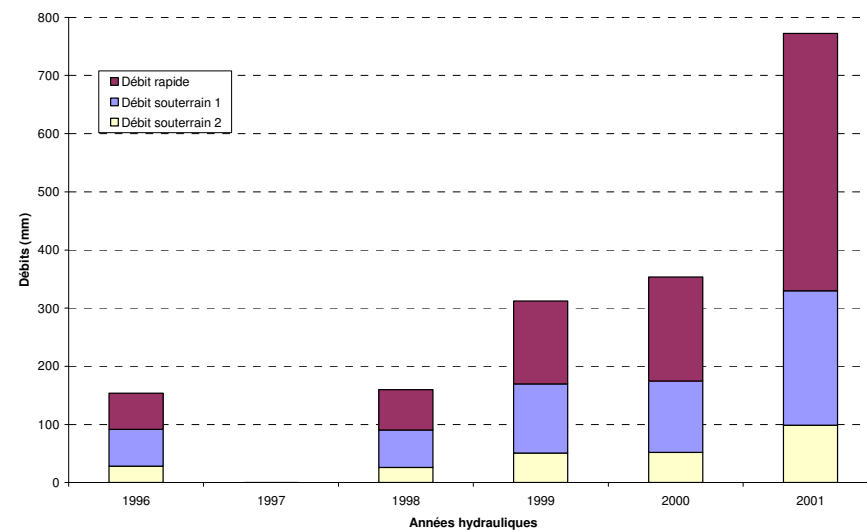
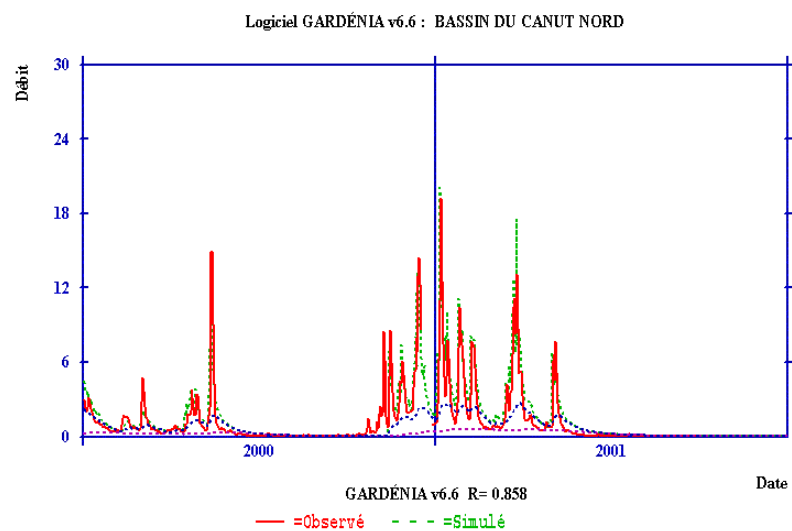
GUILLEC



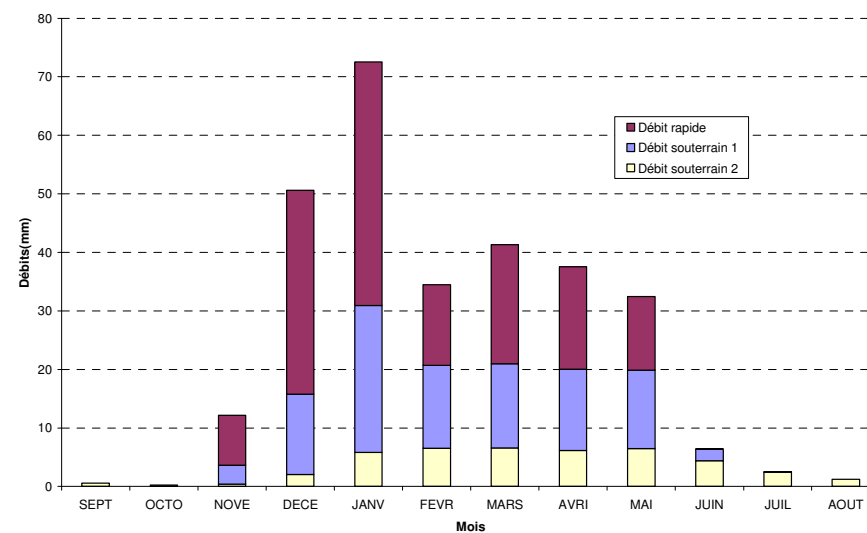
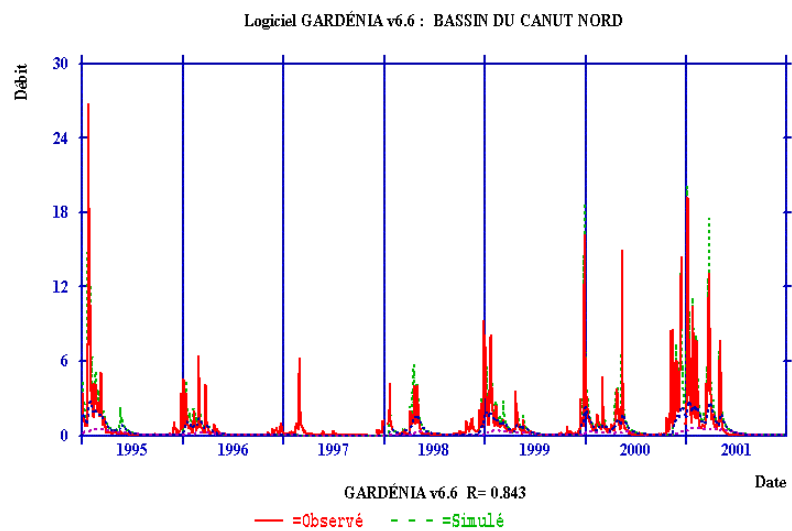


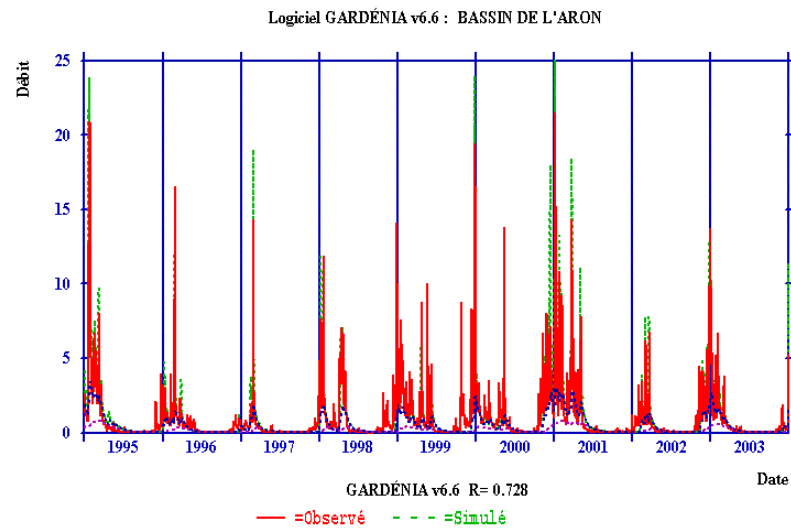
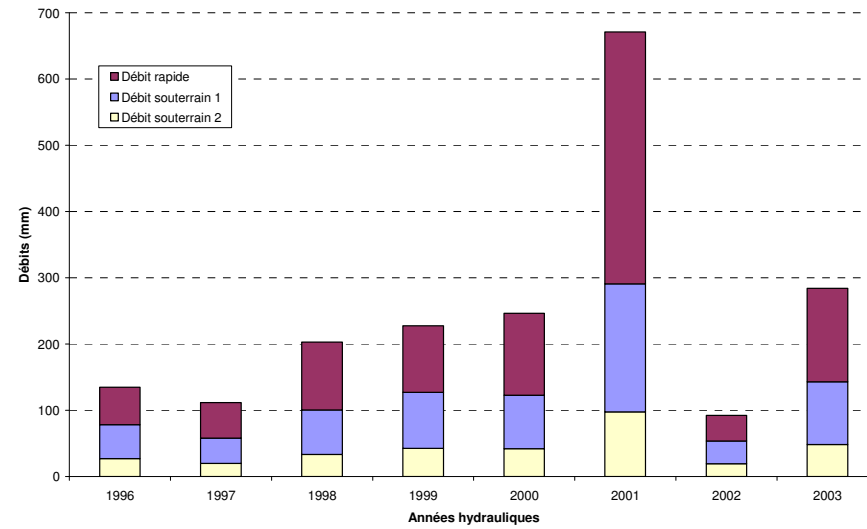
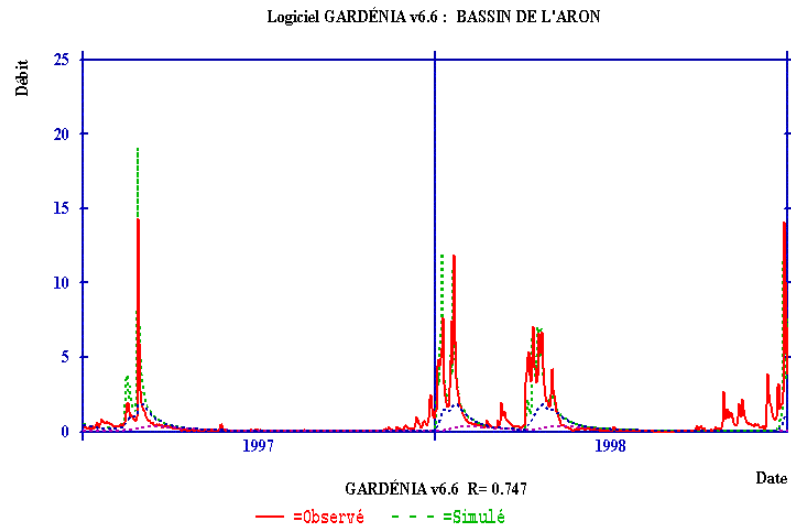
ABER-BENOIT



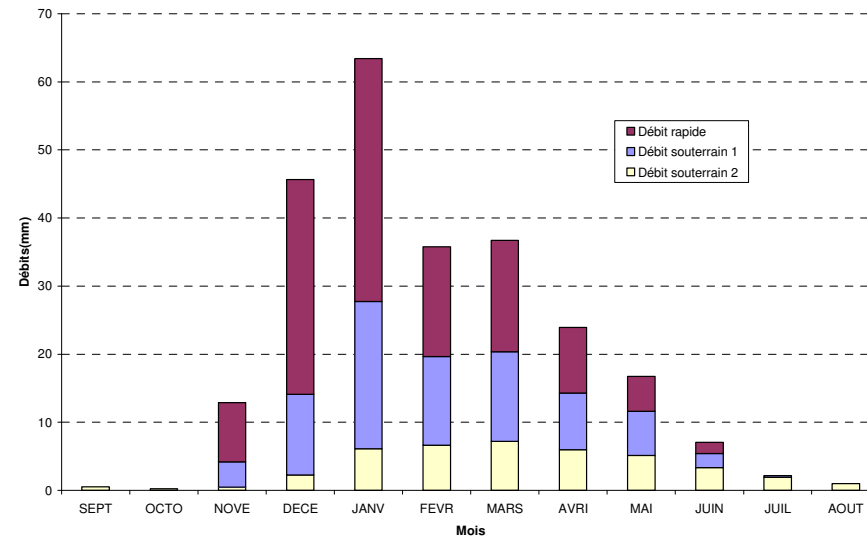


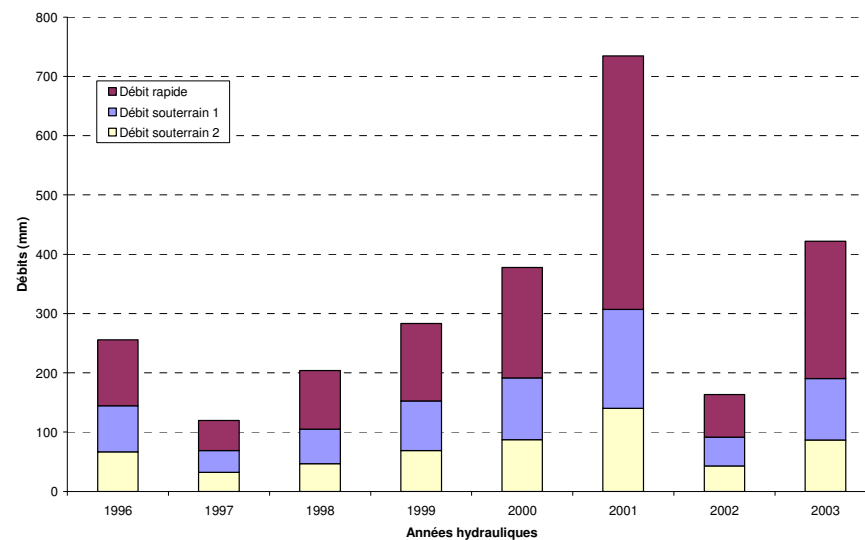
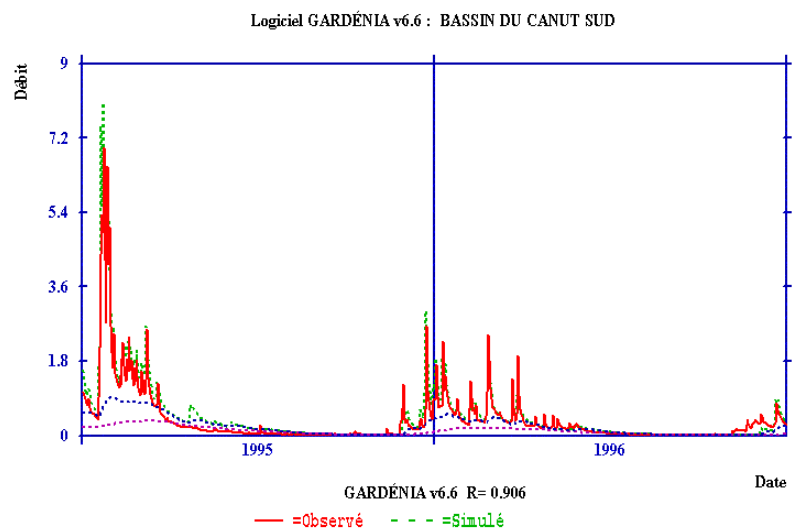
CANUT NORD



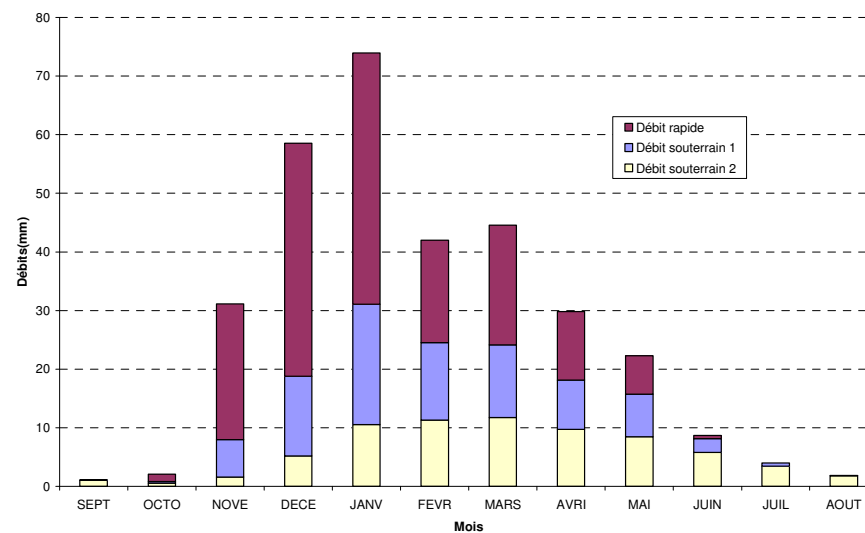
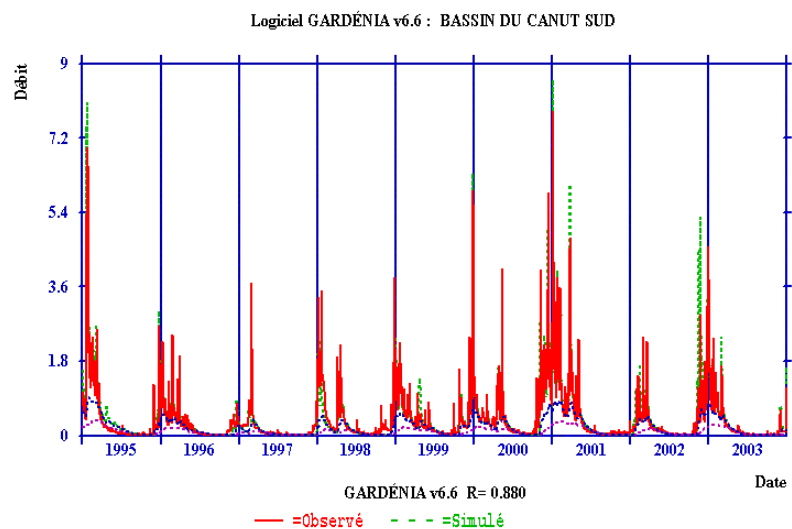


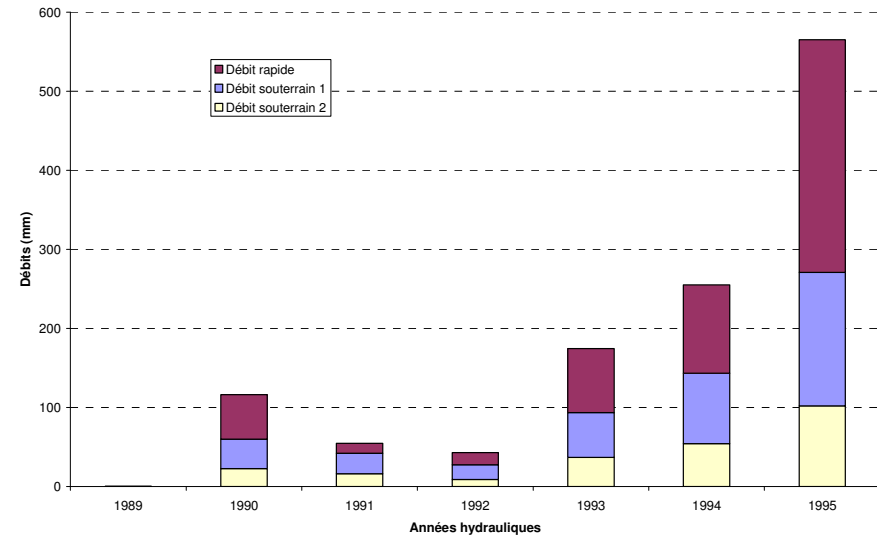
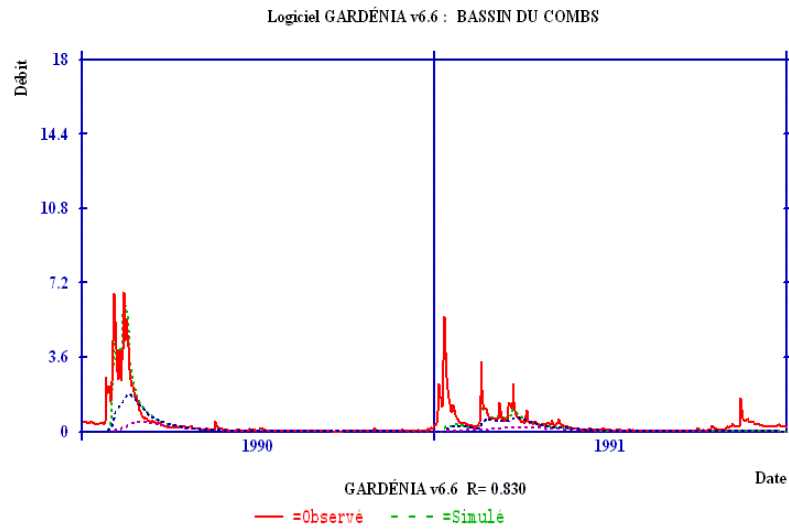
ARON



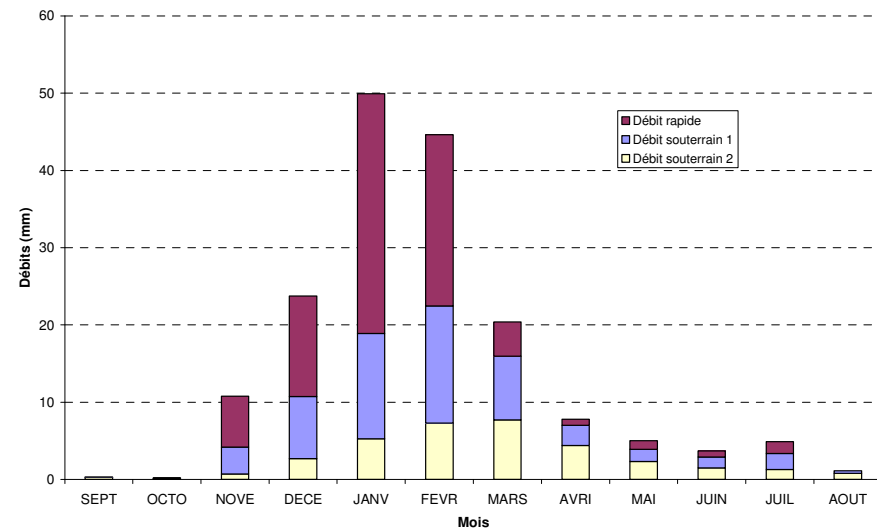
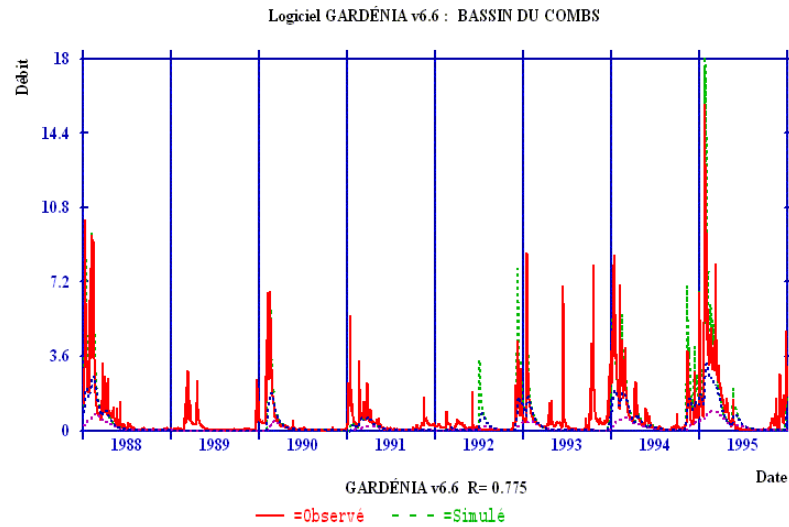


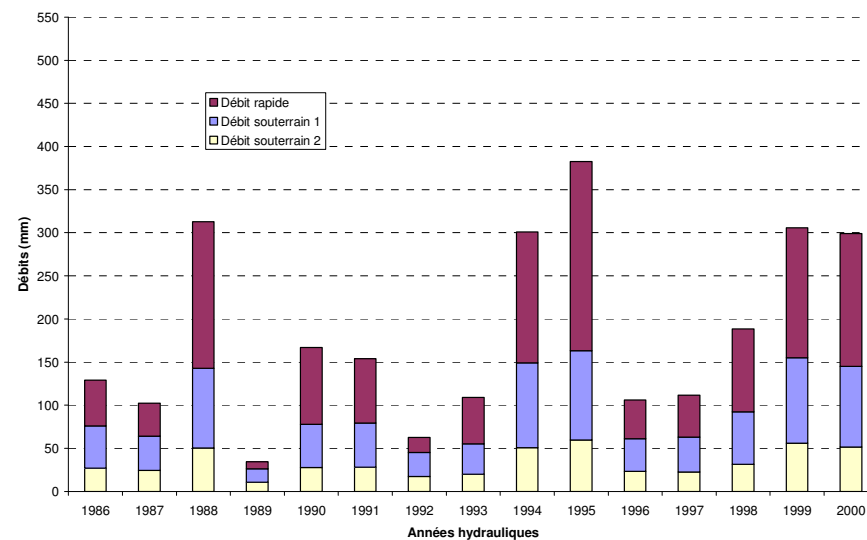
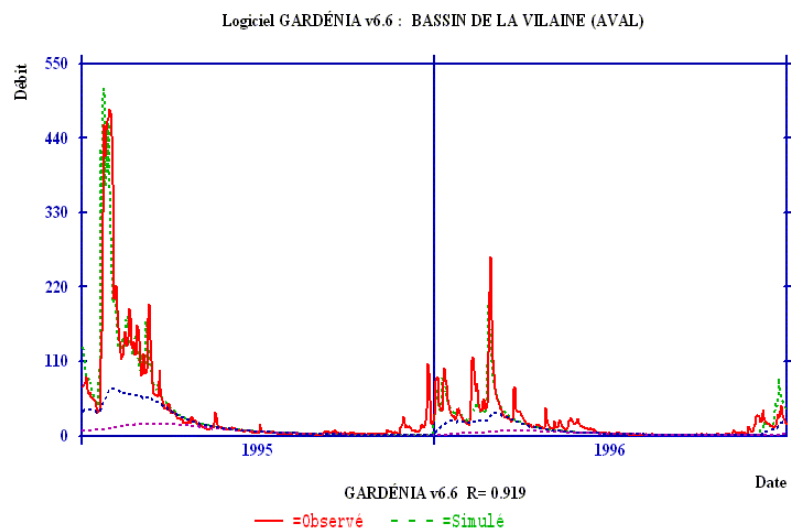
CANUT SUD



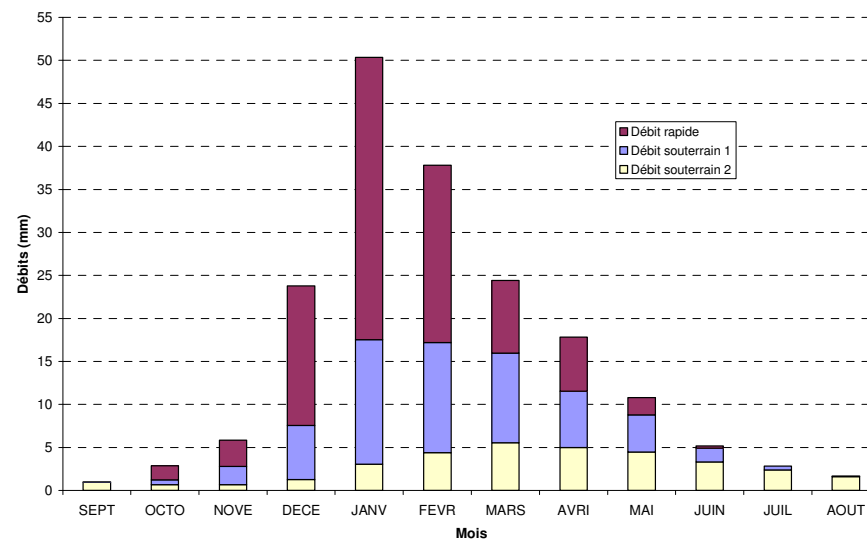
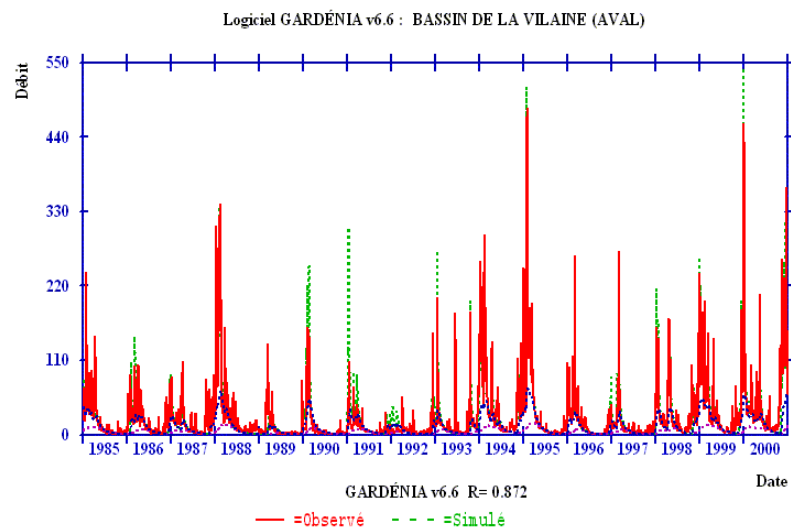


COMBS





VILAINE



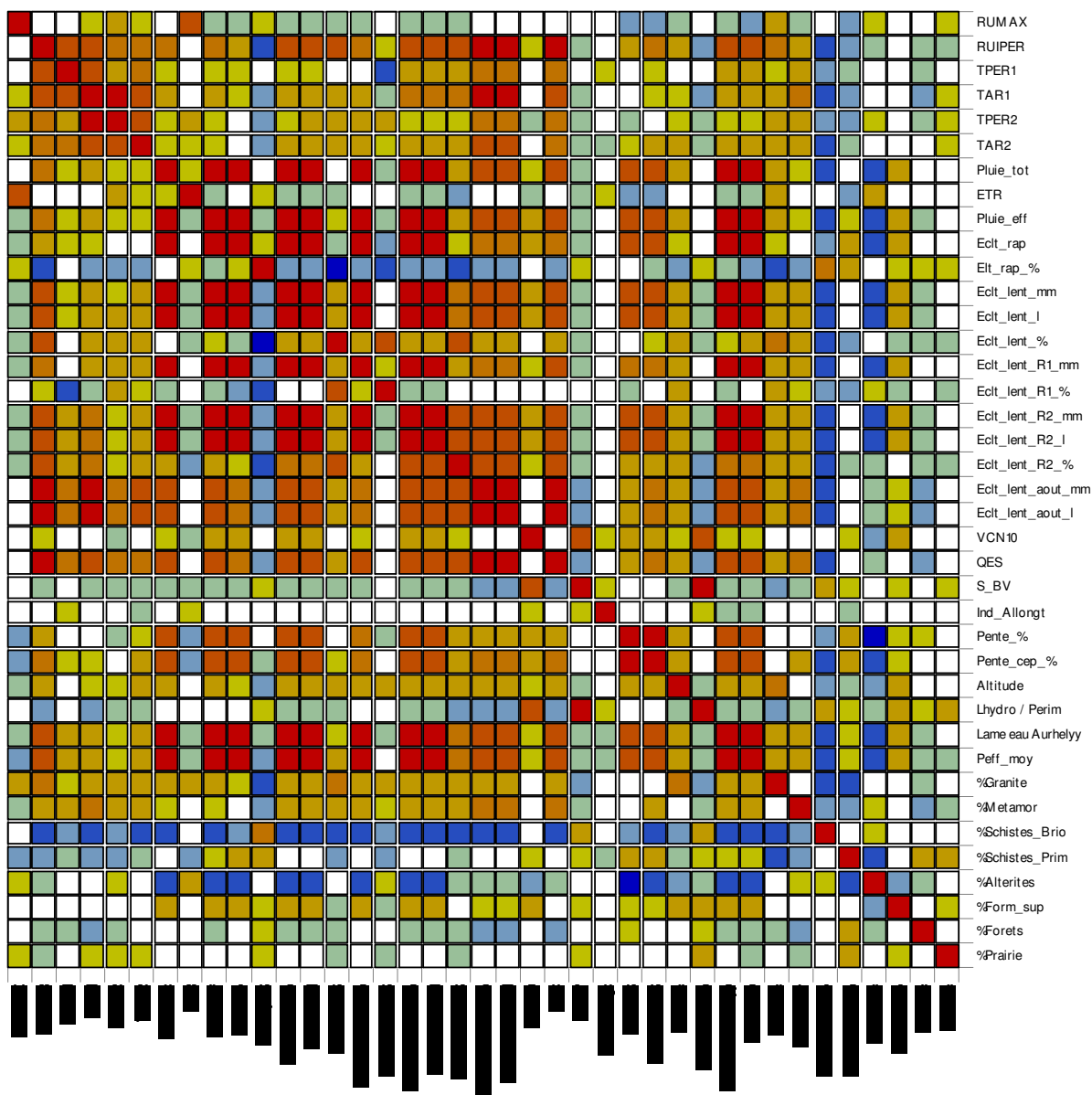
Annexe 5

Matrices des corrélations et analyses en composantes principales (ACP)

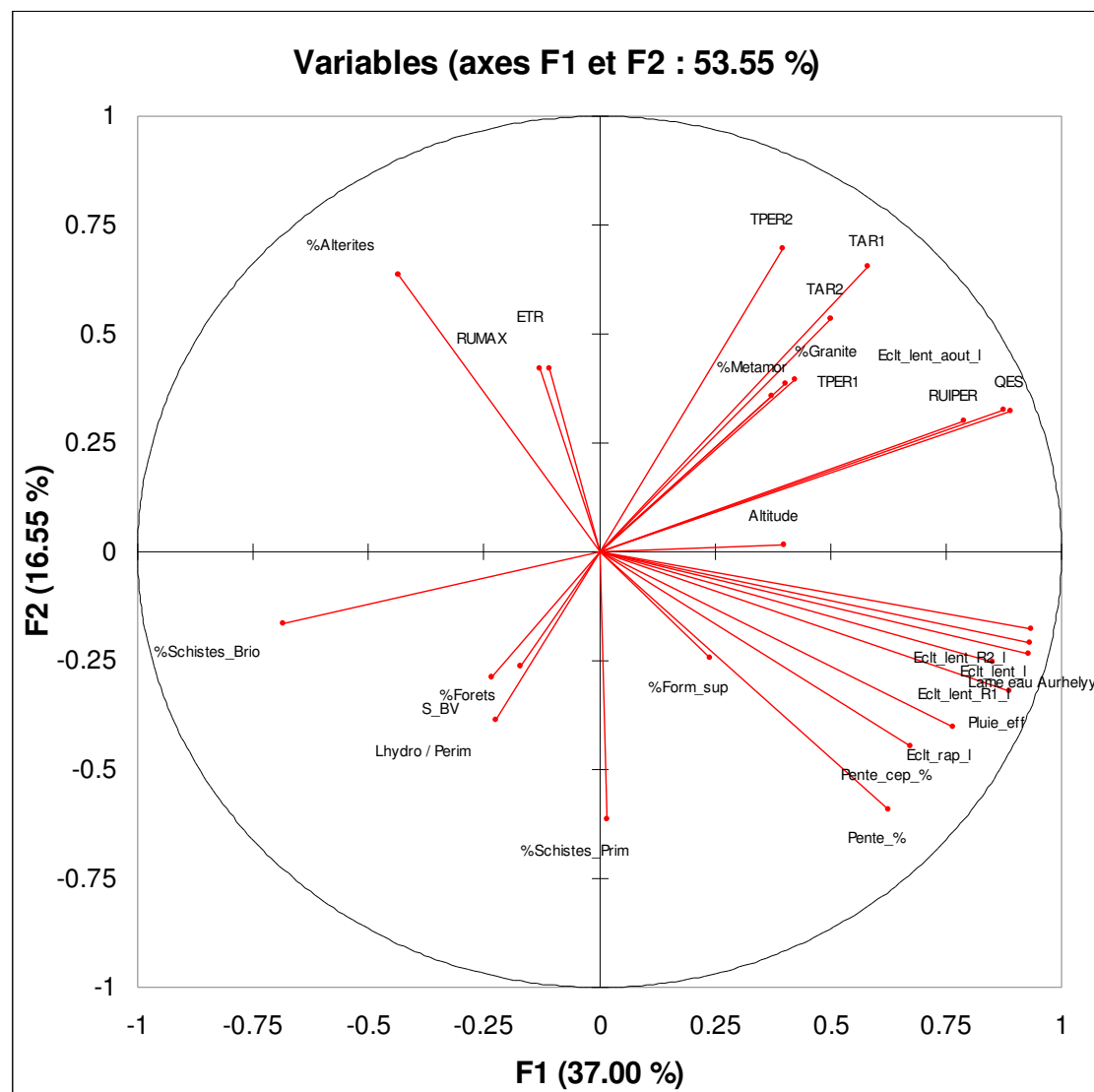
1) Matrices de corrélation, avec tests de similarité/dissimilarité

Sur toutes les variables

Carte des corrélations



Carte du bleu (non corrélé) vers le rouge (corrélé)



2) ACP avec toutes les variables sauf :

% prairies, indice allongement, VCN10, Pluie efficace Louvrier

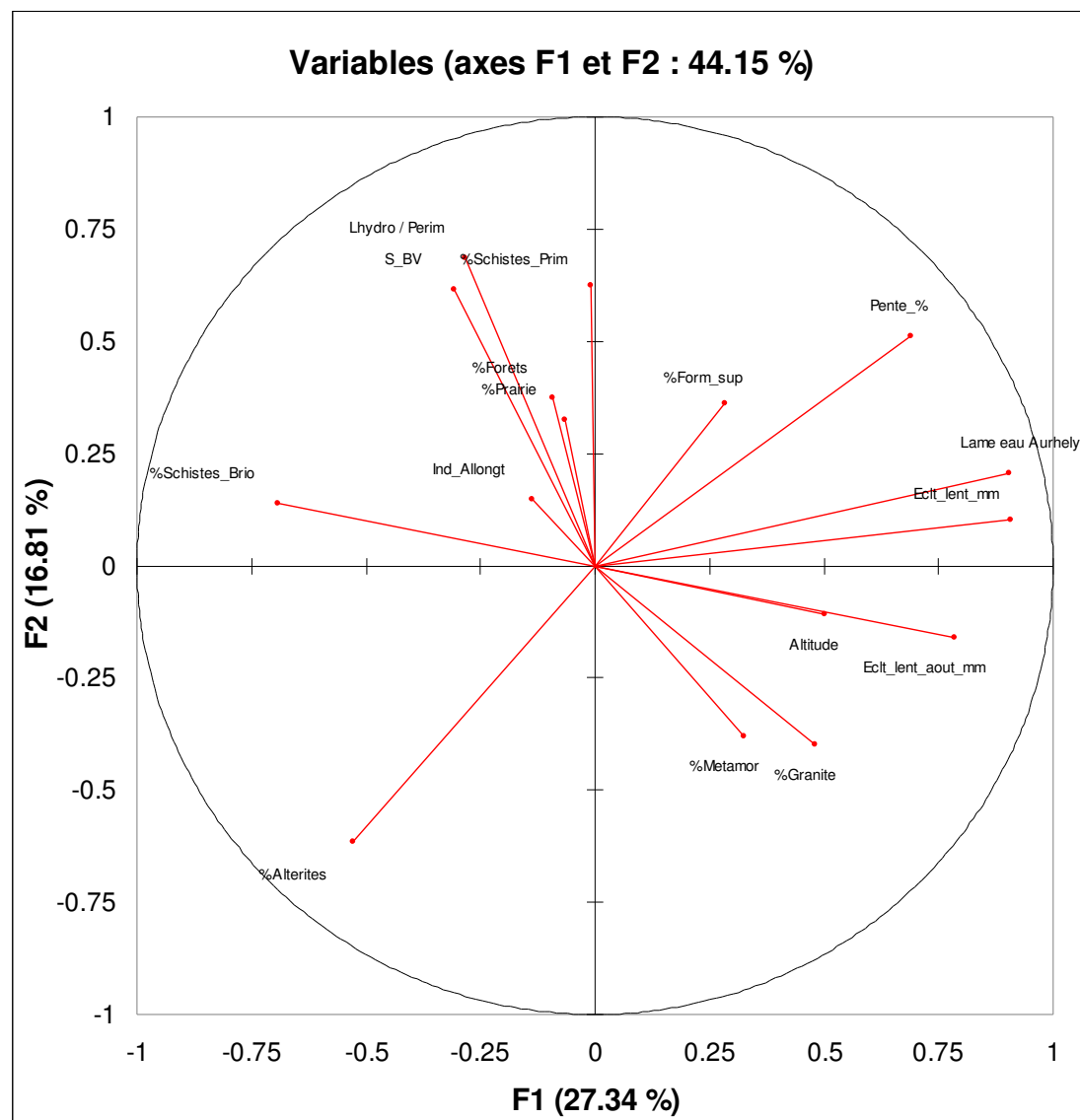
sorties Gardénia : Pluie totale, écoulements rapide, souterrain, souterrain 2 réservoirs (mm/an et %)

SILURES Bretagne

Matrice de corrélation (Pearson (n)) :

Variables	RUMAX	RUIPER	TPER1	TAR1	TPER2	TAR2	ETR	Pluie_eff	Eclt_rap	cl_lent_R1	mcl_lent_R2	ml_lent_aout_r	VCN10	S_BV	Ind_Allongt	Pente_%	Pente_cep_%	Altitude	Lhydro / Perinne	eau_Aurhe	%Granite	%Metamor	%Schistes	BricSchistes	%Pir	%Alterites	%Form_sup	%Forets	%Prairie
RUMAX	1	-0.022	0.073	0.143	0.225	0.116	0.730	-0.137	-0.103	-0.138	-0.167	-0.020	-0.030	-0.028	0.085	-0.286	-0.324	-0.102	0.053	-0.188	0.241	-0.145	0.069	-0.294	0.194	0.087	0.088	0.152	
RUIPER	-0.022	1	0.611	0.607	0.407	0.536	-0.071	0.531	0.323	0.579	0.720	0.812	0.117	-0.171	0.081	0.323	0.401	0.271	-0.233	0.659	0.406	0.390	-0.573	-0.201	-0.152	0.082	-0.176	-0.109	
TPER1	0.073	0.611	1	0.619	0.355	0.455	0.042	0.183	0.190	0.035	0.312	0.596	0.099	0.033	0.181	0.068	0.134	-0.041	-0.060	0.342	0.158	0.207	-0.217	-0.115	-0.003	0.046	-0.185	0.073	
TAR1	0.143	0.607	0.619	1	0.815	0.712	0.091	0.260	0.176	0.204	0.421	0.801	-0.061	-0.199	-0.054	0.013	0.103	0.171	-0.311	0.371	0.303	0.422	-0.421	-0.228	0.070	-0.027	-0.270	0.114	
TPER2	0.225	0.407	0.355	0.815	1	0.737	0.224	0.122	0.039	0.205	0.141	0.578	-0.140	-0.112	-0.095	-0.130	-0.053	0.189	-0.189	0.188	0.336	0.367	-0.376	-0.279	0.183	-0.082	-0.179	0.171	
TAR2	0.116	0.536	0.455	0.712	0.737	1	0.124	0.172	0.072	0.201	0.274	0.684	-0.086	-0.133	-0.127	0.119	0.235	0.226	-0.194	0.336	0.292	0.327	-0.409	-0.134	0.018	-0.021	-0.005	0.103	
ETR	0.730	-0.071	0.042	0.091	0.224	0.124	1	-0.110	-0.058	-0.096	-0.194	-0.094	-0.146	-0.142	0.141	-0.224	-0.031	-0.079	-0.141	0.269	-0.016	0.017	-0.358	0.233	0.044	0.087	0.047		
Pluie_eff	-0.137	0.531	0.183	0.260	0.122	0.172	-0.110	1	0.952	0.935	0.927	0.634	0.224	-0.149	-0.045	0.657	0.654	0.298	-0.063	0.916	0.269	0.191	-0.512	0.136	-0.500	0.324	-0.102	-0.017	
Eclt_rap	-0.103	0.323	0.190	0.176	0.039	0.072	-0.058	0.952	1	0.811	0.813	0.512	0.215	-0.109	-0.033	0.634	0.611	0.189	0.000	0.841	0.147	0.090	-0.384	0.235	-0.511	0.330	-0.065	0.026	
Eclt_lent_R1	-0.138	0.579	0.035	0.204	0.205	0.201	-0.096	0.935	0.811	1	0.855	0.577	0.172	-0.152	-0.064	0.590	0.590	0.375	-0.074	0.850	0.362	0.234	-0.562	0.028	-0.430	0.299	-0.087	-0.054	
Eclt_lent_R2	-0.167	0.720	0.312	0.421	0.141	0.274	-0.194	0.927	0.813	0.855	1	0.775	0.250	-0.181	-0.031	0.626	0.654	0.327	-0.149	0.915	0.309	0.275	-0.561	0.056	-0.448	0.264	-0.161	-0.046	
Eclt_lent_aou	-0.020	0.812	0.596	0.801	0.578	0.684	-0.094	0.634	0.512	0.577	1	0.775	0.050	-0.235	-0.099	0.345	0.436	0.267	-0.297	0.721	0.349	0.406	-0.590	-0.064	-0.181	0.140	-0.227	0.008	
VCN10	-0.030	0.117	0.099	-0.061	-0.140	-0.086	-0.146	0.224	0.215	0.172	0.250	0.050	1	0.665	0.194	0.260	0.336	0.109	0.703	0.196	-0.014	-0.022	-0.052	0.111	-0.253	0.208	0.051	0.074	
S_BV	-0.028	-0.171	0.033	-0.199	-0.112	-0.133	-0.142	-0.149	-0.109	-0.152	-0.181	-0.235	0.665	1	0.135	-0.015	-0.008	-0.140	0.868	-0.167	-0.223	-0.171	0.253	0.124	-0.066	0.193	0.045	0.165	
Ind_Allongt	0.085	0.081	0.181	-0.054	-0.095	-0.127	0.141	-0.045	-0.033	-0.064	-0.031	-0.099	0.194	0.135	1	-0.040	0.093	0.008	0.185	-0.112	-0.042	0.053	-0.134	-0.011	0.078	-0.038	0.029		
Pente_%	-0.286	0.323	0.068	0.013	-0.130	0.119	-0.224	0.657	0.634	0.590	0.626	0.345	0.260	-0.015	-0.040	1	0.832	0.241	0.026	0.716	0.003	0.037	-0.286	0.365	-0.831	0.200	0.118	-0.099	
Pente_cep_%	-0.324	0.401	0.134	0.103	-0.053	0.235	-0.224	0.654	0.611	0.590	0.654	0.436	0.356	-0.008	0.063	0.832	1	0.243	0.067	0.691	0.060	0.210	-0.418	0.256	-0.588	0.134	0.000	-0.091	
Altitude	-0.102	0.271	-0.041	0.171	0.189	0.226	-0.031	0.298	0.189	0.375	0.327	0.267	0.109	-0.140	0.008	0.241	0.243	1	-0.155	0.327	0.452	0.096	-0.291	-0.186	-0.237	0.294	0.017	-0.011	
Lhydro / Perin	0.053	-0.233	-0.060	-0.311	-0.189	-0.194	-0.079	-0.063	0.000	-0.074	-0.149	-0.297	0.703	0.868	0.185	0.026	0.067	-0.155	1	-0.131	-0.219	-0.193	0.283	0.116	-0.112	0.232	0.106	0.338	
Lame eau Aur	-0.188	0.659	0.342	0.371	0.188	0.336	-0.141	0.916	0.841	0.850	0.915	0.721	0.196	-0.167	-0.112	0.716	0.691	0.327	-0.131	1	0.262	0.228	-0.542	0.167	-0.544	0.272	-0.108	0.021	
%Granite	0.241	0.406	0.158	0.303	0.336	0.292	0.269	0.269	0.147	0.362	0.309	0.349	-0.014	-0.223	-0.016	0.003	0.060	0.452	-0.219	0.262	1	-0.057	-0.556	-0.495	0.050	0.080	-0.117	0.027	
%Metamor	-0.145	0.390	0.207	0.422	0.367	0.327	-0.016	0.191	0.090	0.234	0.275	0.406	-0.022	-0.171	-0.042	0.037	0.210	0.096	-0.193	0.228	-0.057	1	-0.355	-0.346	0.179	-0.029	-0.223	-0.187	
%Schistes_Br	0.069	-0.573	-0.217	-0.421	-0.376	-0.409	0.017	-0.512	-0.384	-0.562	-0.561	-0.590	-0.052	0.253	0.053	-0.286	-0.418	-0.291	0.283	-0.542	-0.556	-0.355	1	-0.092	0.312	-0.031	-0.038	-0.055	
%Schistes_Pr	-0.294	-0.201	-0.115	-0.228	-0.279	-0.134	-0.358	0.136	0.235	0.028	0.056	-0.064	0.111	0.124	-0.134	0.365	0.256	-0.186	0.116	0.167	-0.495	-0.346	-0.092	1	-0.421	-0.013	0.343	0.230	
%Alterites	0.194	-0.152	-0.003	0.070	0.183	0.233	-0.500	-0.511	-0.430	-0.448	-0.181	-0.253	-0.066	-0.111	-0.831	-0.588	-0.257	-0.112	-0.544	0.050	0.179	0.142	-0.421	1	-0.248	-0.168	0.002		
%Form_sup	0.087	0.082	0.046	-0.027	-0.082	-0.021	0.044	0.324	0.330	0.299	0.264	0.140	0.208	0.193	0.078	0.200	0.134	0.294	0.232	0.272	0.080	-0.029	-0.031	-0.013	-0.248	1	0.004	0.195	
%Forets	0.088	-0.176	-0.185	-0.270	-0.179	-0.005	0.097	-0.102	-0.065	-0.087	-0.161	-0.227	0.051	0.045	-0.038	0.118	0.000	0.017	0.106	-0.108	-0.117	-0.223	-0.038	0.343	-0.168	0.004	1	0.001	
%Prairie	0.152	-0.109	0.073	0.114	0.171	0.103	0.047	-0.017	0.026	-0.054	-0.046	0.008	0.074	0.165	0.029	-0.089	-0.091	-0.011	0.338	0.021	0.027	-0.197	-0.055	0.230	0.002	0.195	0.001	1	

Les valeurs en gras sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0.05



3) ACP avec débits souterrains de Gardénia (mm/an) et paramètres physiques

avec toutes les variables sauf :

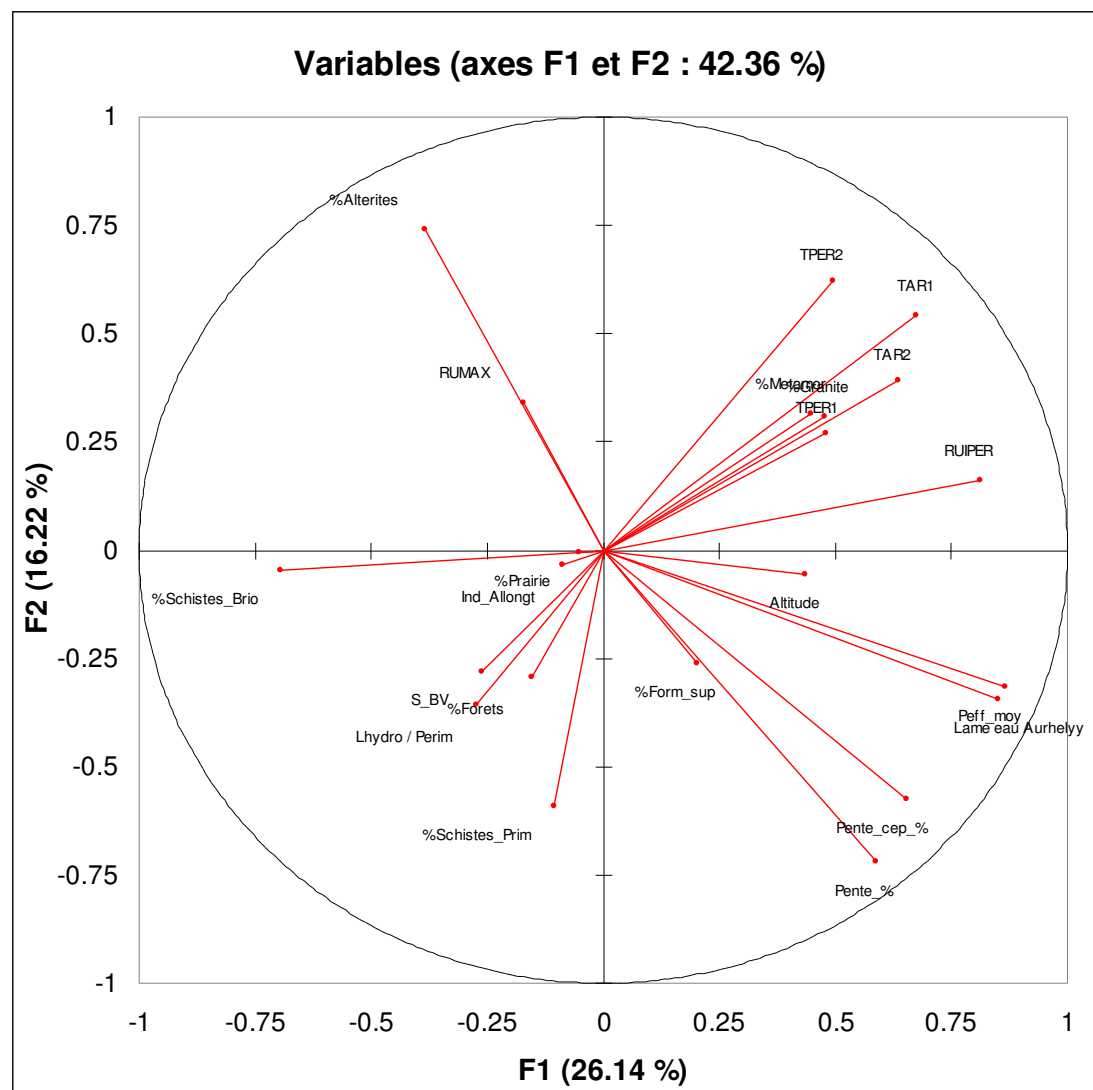
Pente moyenne du cours d'eau principal , Pluie efficace Louvrier

SILURES Bretagne

Matrice de corrélation (Pearson (n)) :

Variables	Eclt lent mm	It lent aout r	S BV	Ind Allongt	Pente %	Altitude	Lhydro / Perim	eau Aurhe	%Granite	%Metamor	%Schistes Bri	%Schistes Prir	%Alterites	%Form sup	%Forets	%Prairie
Eclt_lent_mm	1	0.687	-0.164	-0.082	0.634	0.366	-0.101	0.905	0.373	0.263	-0.558	-0.006	-0.460	0.295	-0.124	-0.061
Eclt_lent_aou	0.687	1	-0.214	-0.096	0.353	0.228	-0.248	0.726	0.341	0.423	-0.564	-0.089	-0.180	0.182	-0.200	-0.003
S_BV	-0.164	-0.214	1	0.136	-0.009	-0.153	0.863	-0.153	-0.213	-0.150	0.230	0.106	-0.063	0.212	0.058	0.158
Ind_Allongt	-0.082	-0.096	0.136	1	-0.055	-0.042	0.196	-0.112	-0.077	-0.033	0.023	-0.023	0.018	0.077	0.006	0.061
Pente_%	0.634	0.353	-0.009	-0.055	1	0.232	0.038	0.717	0.028	0.048	-0.281	0.305	-0.829	0.211	0.119	-0.104
Altitude	0.366	0.228	-0.153	-0.042	0.232	1	-0.196	0.289	0.481	0.055	-0.296	-0.170	-0.263	0.209	-0.010	0.005
Lhydro / Perin	-0.101	-0.248	0.863	0.196	0.038	-0.196	1	-0.099	-0.213	-0.144	0.241	0.092	-0.100	0.282	0.136	0.316
Lame eau Au	0.905	0.726	-0.153	-0.112	0.717	0.289	-0.099	1	0.255	0.244	-0.511	0.122	-0.539	0.295	-0.094	0.008
%Granite	0.373	0.341	-0.213	-0.077	0.028	0.481	-0.213	0.255	1	-0.054	-0.549	-0.490	0.021	0.075	-0.118	0.023
%Metamor	0.263	0.423	-0.150	-0.033	0.048	0.055	-0.144	0.244	-0.054	1	-0.340	-0.335	0.177	0.024	-0.193	-0.201
%Schistes_Br	-0.558	-0.564	0.230	0.023	-0.281	-0.296	0.241	-0.511	-0.549	-0.340	1	-0.134	0.131	-0.039	-0.083	-0.097
%Schistes_Pr	-0.006	-0.089	0.106	-0.023	0.305	-0.170	0.092	0.122	-0.490	-0.335	-0.134	1	-0.352	-0.059	0.350	0.274
%Alterites	-0.460	-0.180	-0.063	0.018	-0.829	-0.263	-0.100	-0.539	0.021	0.177	0.131	-0.352	1	-0.234	-0.151	0.011
%Form_sup	0.295	0.182	0.212	0.077	0.211	0.209	0.282	0.295	0.075	0.024	-0.039	-0.059	-0.234	1	0.037	0.161
%Forets	-0.124	-0.200	0.058	0.006	0.119	-0.010	0.136	-0.094	-0.118	-0.193	-0.083	0.350	-0.151	0.037	1	0.022
%Prairie	-0.061	-0.003	0.158	0.061	-0.104	0.005	0.316	0.008	0.023	-0.201	-0.097	0.274	0.011	0.161	0.022	1

Les valeurs en gras sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0.05$



4) ACP avec paramètres de Gardénia et paramètres physiques
avec toutes les variables

SILURES Bretagne

Matrice de corrélation (Pearson (n)) :

Variables	RUMAX	RUIPER	TPER1	TAR2	S_BV	Ind Allongt	Pente %	Altitude	Lhydro / Perimé eau Aurhe	%Granite	%Metamor	%Schistes_Bri	%Schistes_Prir	%Alterites	%Form sup	%Forets	%Prairie	
RUMAX	1	-0.111	0.071	0.082	-0.030	0.187	-0.293	-0.127	0.042	-0.198	0.111	-0.148	0.035	-0.079	0.215	0.031	0.118	0.194
RUIPER	-0.111	1	0.525	0.508	-0.170	0.010	0.328	0.317	-0.238	0.631	0.456	0.362	-0.549	-0.238	-0.172	0.067	-0.185	-0.110
TPER1	0.071	0.525	1	0.469	0.059	0.202	0.075	-0.111	0.010	0.356	0.115	0.243	-0.206	-0.108	0.010	0.121	-0.133	0.060
TAR2	0.082	0.508	0.469	1	-0.117	-0.118	0.128	0.188	-0.153	0.348	0.280	0.344	-0.393	-0.143	0.018	0.025	0.013	0.091
S_BV	-0.030	-0.170	0.059	-0.117	1	0.136	-0.009	-0.153	0.863	-0.153	-0.213	-0.150	0.230	0.106	-0.063	0.212	0.058	0.158
Ind_Allongt	0.187	0.010	0.202	-0.118	0.136	1	-0.055	-0.042	0.196	-0.112	-0.077	-0.033	0.023	-0.023	0.018	0.077	0.006	0.061
Pente_%	-0.293	0.328	0.075	0.128	-0.009	-0.055	1	0.232	0.038	0.717	0.028	0.048	-0.281	0.305	-0.829	0.211	0.119	-0.104
Altitude	-0.127	0.317	-0.111	0.188	-0.153	-0.042	0.232	1	-0.196	0.289	0.481	0.055	-0.296	-0.170	-0.263	0.209	-0.010	0.005
Lhydro / Perin	0.042	-0.238	0.010	-0.153	0.863	0.196	0.038	-0.196	1	-0.099	-0.213	-0.144	0.241	0.092	-0.100	0.282	0.136	0.316
Lame eau Aur	-0.198	0.631	0.356	0.348	-0.153	-0.112	0.717	0.289	-0.099	1	0.255	0.244	-0.511	0.122	-0.539	0.295	-0.094	0.008
%Granite	0.111	0.456	0.115	0.280	-0.213	-0.077	0.028	0.481	-0.213	0.255	1	-0.054	-0.549	-0.490	0.021	0.075	-0.118	0.023
%Metamor	-0.148	0.362	0.243	0.344	-0.150	-0.033	0.048	0.055	-0.144	0.244	-0.054	1	-0.340	-0.335	0.177	0.024	-0.193	-0.201
%Schistes_Br	0.035	-0.549	-0.206	-0.393	0.230	0.023	-0.281	-0.296	0.241	-0.511	-0.549	-0.340	1	-0.134	-0.134	-0.039	-0.083	-0.097
%Schistes_Pr	-0.079	-0.238	-0.108	-0.143	0.106	-0.023	0.305	-0.170	0.092	0.122	-0.490	-0.335	-0.134	1	-0.352	-0.059	0.350	0.274
%Alterites	0.215	-0.172	0.010	0.018	-0.063	0.018	-0.829	-0.263	-0.100	-0.539	0.021	0.177	0.131	-0.352	1	-0.234	-0.151	0.011
%Form_sup	0.031	0.067	0.121	0.025	0.212	0.077	0.211	0.209	0.282	0.295	0.075	0.024	-0.039	-0.059	1	0.037	0.037	0.161
%Forets	0.118	-0.185	-0.133	0.013	0.058	0.006	0.119	-0.010	0.136	-0.094	-0.118	-0.193	-0.083	0.350	-0.151	0.037	1	0.022
%Prairie	0.194	-0.110	0.060	0.091	0.158	0.061	-0.104	0.005	0.316	0.008	0.023	-0.201	-0.097	0.274	0.011	0.161	0.022	1

Les valeurs en gras sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0.05

Annexe 6

**Cartes de synthèse -
Planches au format A3 dans cette annexe
et au format A0 à côté du rapport**

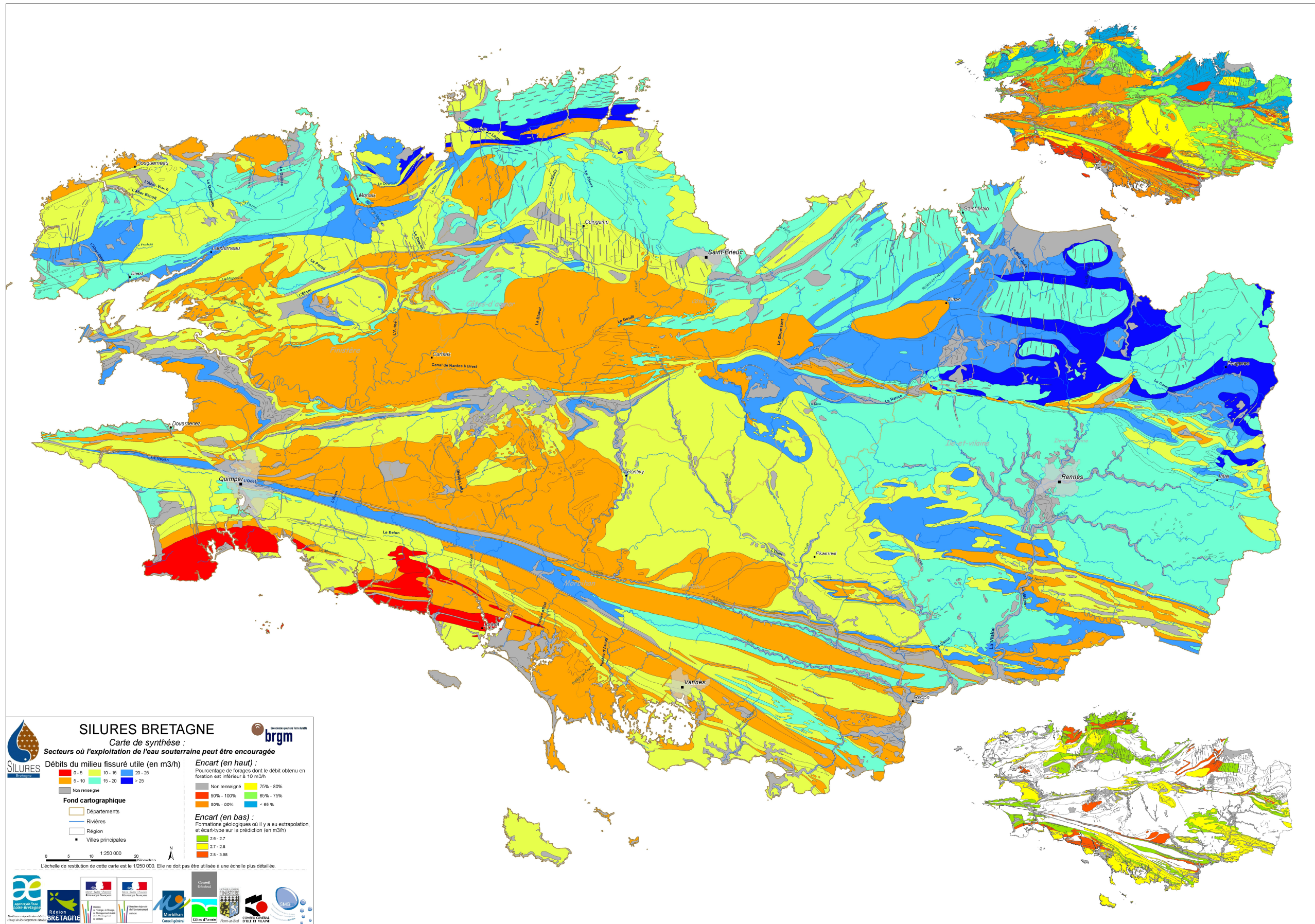


Illustration 36 - Secteurs où l'exploitation de l'eau souterraine peut être encouragée - Débits du milieu fissuré utile (en m³/h)

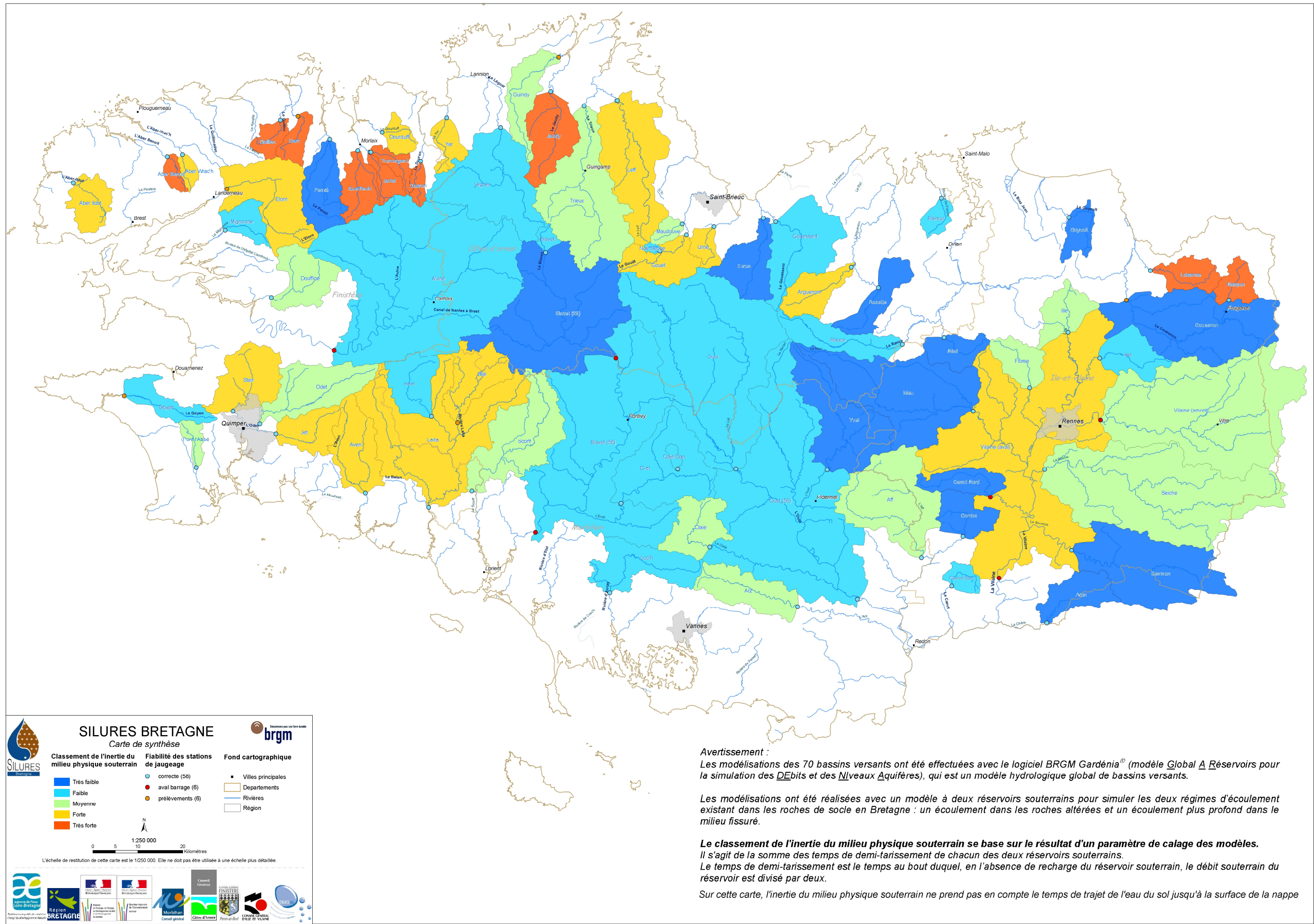


Illustration 37 - Classement de l'inertie du milieu physique souterrain

Annexe 7

CD-Rom SILURES



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

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

Service géologique régional Bretagne

Rennes Atalante Beaulieu
2, rue de Jouanet

35700 – Rennes – France
Tél. : 02 99 84 26 70