

SILURES Bretagne
(Système d'Information pour la
Localisation et l'Utilisation des
Ressources en Eaux Souterraines)
Rapport d'avancement de l'année 2

BRGM/RP-52825-FR
février 2004

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 03EAUC10

B. MOUGIN, A. CARN, N. DEBEGLIA, J. PERRIN et E. THOMAS
Avec la collaboration de
J-P. JEGOU



Mots clés : SILURES, eaux souterraines, hydrogéologie, géologie, aéromagnétisme, forages, modélisation, hydrogrammes de rivière, Côtes d'Armor, Finistère, Morbihan, Ille-et-Vilaine, Bretagne.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : 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.

© BRGM, 2004, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Sommaire

Synthèse	7
1. Contexte et objectif du projet SILURES Bretagne	9
1.1. Contexte.....	9
1.2. Objectif.....	10
1.3. Organigramme technique du projet	10
2. Interprétation des données de géophysique aéroportée	12
2.1. Description des données géophysiques	12
2.1.1. Magnétisme	12
2.1.2. Radiométrie spectrale	12
2.1.3. Utilisation et valorisation des données dans le cadre du projet	12
2.2. Valorisation des données dans le secteur de Plabennec.....	13
2.3. Généralisation à l'ensemble de la Bretagne	15
2.3.1. Organisation du travail à effectuer	15
2.3.2. Description de l'outil automatique	15
2.3.3. Test de l'outil automatique et validation.....	23
2.3.4. Choix des paramètres pour la région Bretagne	26
2.3.5. Travail réalisé sur la Bretagne au cours de la 2 ^{ème} année du projet.....	27
2.3.6. Travail à réaliser sur la Bretagne au cours de la 3 ^{ème} année du projet.....	30
3. Interprétation des données de forages.....	33
3.1. Description des données des forages.....	33
3.1.1. Origine et nature des données de base	33
3.1.2. Utilisation et valorisation des données dans le cadre du projet	33
3.2. Interprétation des données géologiques et hydrogéologiques	34
3.2.1. Echelle de fiabilité de l'interprétation	34
3.2.2. Découpage et dénomination des milieux rencontrés	35

3.2.3. Interprétation des données géologiques et hydrogéologiques du Finistère	36
3.2.4. Interprétation des tarières du projet SILURES Bassins Versants	37
3.2.5. Champs lexicaux des foreurs des Côtes d'Armor	37
3.3. Recherche de forages complémentaires sur les départements bretons	41
3.3.1. Recherche des secteurs faiblement représentés en forages	41
3.3.2. Recherche de forages supplémentaires	42
3.3.3. Informatisation des données recherchées	47
3.4. Conclusion sur l'avancement du travail d'interprétation des données de forages	47
4. Interprétation des hydrogrammes de rivières	48
4.1. Travail à réaliser dans le cadre du projet	48
4.2. Choix des bassins à modéliser	48
4.3. Acquisition des données	51
4.3.1. Données météorologiques	51
4.3.2. Hydrogrammes des rivières	52
4.4. Modélisation des hydrogrammes des rivières	52
4.4.1. Validation et mise en forme des données	53
4.4.2. Calage des paramètres du modèle	54
4.4.3. Résultats corrigés sur le bassin versant du Gouët	55
4.4.4. Résultats obtenus sur les 21 bassins versants	55
4.5. Conclusion et comparaison des bassins en fonction des résultats obtenus	57
4.6. Conclusion sur l'avancement du travail d'interprétation des hydrogrammes des rivières	60
Conclusion	61
Bibliographie	62

Liste des figures

- Fig. 1 - Organigramme technique du projet SILURES Bretagne
- Fig. 2 - Répartition des forages par rapport aux discontinuités géophysiques interprétées manuellement sur le secteur de Plabennec
- Fig. 3 - Regroupement des discontinuités élémentaires en discontinuités « fractures » (Ploërmel, traitement du Magnétisme)
- Fig. 4 - Regroupement des discontinuités « fractures » en « lignes » brisées (Ploërmel, traitement du Magnétisme)
- Fig. 5 - Etapes de traitement des « lignes » (Ploërmel, traitement du Magnétisme)
- Fig. 6 - Résultats de l'analyse structurale automatique sur le secteur de Plabennec
- Fig. 7 - Linéaments naturels issus de l'analyse du MNT sur toute la Bretagne (interprétation manuelle)
- Fig. 8 - Lever spectrométrique - Carte régionale des teneurs équivalentes en thorium
- Fig. 9 - Résultat de l'analyse structurale automatique des teneurs en thorium
- Fig. 10 - Répartition de l'intervention des foreurs dans les Côtes d'Armor
- Fig. 11 - Répartition par commune des forages recensés dans la base de données - Localisation des communes visitées lors de l'inventaire de l'année 2 - Département des Côtes d'Armor - Etat à fin octobre 2003
- Fig. 12 - Répartition par commune des forages recensés dans la base de données - Localisation des communes visitées lors de l'inventaire de l'année 2 - Département de l'Ille-et-Vilaine - Etat à fin octobre 2003
- Fig. 13 - Répartition par commune des forages recensés dans la base de données - Localisation des communes visitées lors de l'inventaire de l'année 2 - Département du Morbihan - Etat à fin octobre 2003
- Fig. 14 - Répartition par commune des forages recensés dans la base de données - Localisation des communes visitées lors de l'inventaire de l'année 2 - Département du Finistère - Etat à fin octobre 2003
- Fig. 15 - Localisation des 21 bassins versants modélisés lors de la seconde année du projet
- Fig. 16 - Schéma du cycle de l'eau
- Fig. 17 - Comparaison entre pluie efficace et lame d'eau pour les 21 bassins versants
- Fig. 18 - Modélisation Gardénia - Calage des paramètres des bassins versants
- Fig. 19 - Modélisation Gardénia - Débits mesurés et calculés des bassins versants
- Fig. 20 - Débits annuels rapides et souterrains des bassins versants
- Fig. 21 - Débits mensuels moyens interannuels des bassins versants
- Fig. 22 - Classification des 21 bassins versants selon les résultats des modélisations Gardénia réalisées au cours de la deuxième année du projet
- Fig. 23 - Synthèse des résultats obtenus sur les bassins modélisés au cours des deux premières années du projet

Liste des tableaux

Tabl. 1 - Paramètres utilisés pour l'analyse structurale automatique du secteur de Plabennec

Tabl. 2 - Orientation, longueur et gradient associés aux « lignes » sélectionnées à proximité des forages à fort débit du secteur de Plabennec

Tabl. 3 - Paramètres utilisés pour l'analyse structurale automatique de la région Bretagne

Tabl. 4 - Observations précisées lors de l'interprétation des données de forage

Tabl. 5 - Nombre de forages recensés dans la base de données (avant recherche de forages complémentaires de l'année 2)

Tabl. 6 - Inventaire de forages complémentaires - Année 2 - Département des Côtes d'Armor

Tabl. 7 - Inventaire de forages complémentaires - Année 2 - Département de l'Ille-et-Vilaine

Tabl. 8 - Inventaire de forages complémentaires - Année 2 - Département du Morbihan

Tabl. 9 - Inventaire de forages complémentaires - Année 2 - Département du Finistère

Tabl. 10 - Nombre de forages recensés dans la base de données (après la recherche de forages complémentaires de l'année 2)

Tabl. 11 - Périodes d'extraction des pluviométries et ETP journalières à Météo-France

Tabl. 12 - Périodes d'extraction des débits journaliers de la Banque HYDRO

Tabl. 13 - Sélection des pluies et ETP journalières des bassins versants retenus

Tabl. 14 - Paramètres retenus pour les modélisations Gardénia

Tabl. 15 - Résultats obtenus suite aux modélisations Gardénia

Liste des annexes

Ann. 1 - Recherche de forages complémentaires

Ann. 2 - Régressions climatiques des 21 bassins versants - Comparaison de la lame d'eau et des pluies efficaces

Ann. 3 - 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

Synthèse

Le programme SILURES Bretagne propose la création d'un système d'information sur les eaux souterraines au niveau de la région Bretagne. Il a pour but d'interpréter l'ensemble des sondages archivés dans la Banque du Sous-Sol, gérée par le BRGM, de créer des cartes de la base des altérites et du milieu fissuré, de croiser ces données avec les résultats d'une campagne de levés géophysiques aéromagnétiques et radiométriques, et de créer une base de données. Cet ensemble de tâches doit permettre, à terme, de mieux gérer les ressources en eau souterraine de Bretagne.

Ce programme, d'une durée de 5 ans, est réalisé grâce à la collaboration de la Région Bretagne, des Conseils Généraux des Côtes d'Armor, du Finistère et du Morbihan et de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne.

Ce rapport constitue un état d'avancement du projet SILURES-Bretagne. Il détaille le travail, réalisé au cours de la 2^{ème} année, qui avait pour but de continuer l'interprétation des données existantes (données aéromagnétiques et spectrométriques, données des forages) et des données à acquérir (hydrogrammes des rivières).

La 2^{ème} année a été consacrée à 3 phases d'interprétations menées en parallèle :

1) interprétation des données aéromagnétiques et spectrométriques

Suite au travail réalisé sur le secteur de Ploërmel dans le Morbihan (1^{ère} année du projet), un second test, mené dans la région Plabennec dans le Finistère (48 x 40 km), a permis d'affiner la démarche de traitement combiné des données magnétiques et spectrométriques, destinée à la mise en évidence de discontinuités géophysiques susceptibles de constituer des guides de prospection hydrogéologique.

Par ailleurs, au cours de la deuxième année du projet, le travail de valorisation des données géophysiques sur l'ensemble de la Bretagne a débuté grâce à l'utilisation d'un outil de traitement automatique. Cet outil basé sur des calculs mathématiques permet, à partir des données brutes, de tracer automatiquement des discontinuités élémentaires qui sont ensuite rassemblées en « fractures » linéaires, puis organisées en « lignes » brisées continues qui constituent une représentation schématique des discontinuités et contacts géophysiques.

Cet outil automatique a été testé sur le secteur de Plabennec et a montré que les résultats fournis sont cohérents avec ceux de l'interprétation « manuelle ».

Suite à cette validation et après rassemblement des données disponibles sur la Bretagne, l'outil automatique a permis de traiter les données spectrométriques et le Modèle Numérique de Terrain (MNT).

Le travail se poursuivra, lors de la 3^{ème} année du projet, par :

- la valorisation des données magnétiques,
- l'analyse du schéma structural (superposition des tous ces accidents),
- la comparaison du schéma structural avec les contours géologiques, les linéaments naturels issus du MNT...,
- la corrélation des accidents communs avec les débits des forages bretons.

A terme, des familles d'accidents de même orientation, à proximité desquels les forages fournissent des débits importants, seront identifiées et localisées. Ces familles constitueront alors des guides de prospection d'eau souterraine.

2) interprétation des données de forages

Cette phase a été décomposée en deux parties :

a) interprétation des informations géologiques et hydrogéologiques

La nature et l'état de la roche traversée ainsi que la localisation des diverses arrivées d'eau lors de la foration sont des informations, fournies par les entreprises de forage, qui permettent d'approcher la géométrie des réservoirs aquifères (épaisseurs des milieux altérés et fissurés) à l'échelle de la Bretagne.

Ce travail a été mené sur les 3962 forages localisés du Finistère en précisant la fiabilité de l'interprétation et l'épaisseur des horizons géologiques rencontrés.

Par ailleurs en vue du travail similaire à réaliser dans les autres départements bretons, les termes utilisés par les foreurs des Côtes d'Armor ont été recensés.

b) recherche de forages complémentaires sur les départements bretons

La base informatique de données des forages a été alimentée par 451 forages supplémentaires (localisés précisément sur le terrain, cf. figures 11 à 14 pages 43 à 46) dans l'optique d'une valorisation future de ces nouvelles données. Le nombre total de forages informatisés dans la base est de 10580 ouvrages sur toute la Bretagne.

Les 451 forages ont été recherchés dans des communes faiblement représentées en forages et également sur des formations géologiques nécessitant d'être mieux caractérisées par des forages (informations géologiques et hydrogéologiques).

3) interprétation des hydrogrammes des rivières

21 bassins versants ont fait l'objet d'un travail de modélisation des hydrogrammes des rivières (débits journaliers exportés de la Banque HYDRO), à l'aide du logiciel BRGM Gardénia[®], et à partir des données climatiques du secteur (achetées à Météo-France).

Sur ces bassins, la contribution de l'écoulement souterrain au débit des cours d'eau a été chiffrée : les pourcentages varient de 38 à 78 %.

Une classification des bassins en 3 catégories a été mise en place (cf. fig. 22 p. 58) :

- bassins à forte contribution des réservoirs souterrains aux débits des cours d'eau (apport souterrain supérieur à 60 %),
- bassin à assez bonne contribution des réservoirs souterrains aux débits des cours d'eau (de 51 à 60 %),
- bassin à contribution moyenne des eaux d'origine souterraine aux débits des cours d'eau : le ruissellement est majoritaire (inférieur à 51 %).

La figure 23 page 59 montre les résultats obtenus sur les 38 bassins modélisés (1^{ère} et 2^{ème} années du projet).

Un superposition de cette figure avec une carte géologique synthétique de la Bretagne permet de commencer à formuler des conclusions :

- les formations géologiques situées au Nord du Finistère (micaschistes, orthogneiss, granites...) favorisent les fortes contributions souterraines (Horn 61 %, Penzé 59%, et Queffleuth 63 % de l'écoulement total provient des eaux souterraines),
- au Nord des Côtes d'Armor, les Massifs cristallins (Plouisy, Quintin et Montcontour), semblent former les meilleurs réservoirs d'eau souterraine (Trieux 62%, Gouët 61 %, et Evron 64 %),
- tandis que les schistes briovériens et les schistes et Grès Primaires de Centre Bretagne sont favorables au ruissellement (Oust, Yvel, Rance, Auline : seulement 38 à 50 %).

Le travail d'interprétation des données continuera au cours de la 3^{ème} année du projet.

1. Contexte et objectif 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, 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'emménagement 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 le Conseil Régional Bretagne, les Conseils Généraux du Morbihan, du Finistère et des Côtes d'Armor, l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, et la Direction Régionale de l'Environnement Bretagne.

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 va concevoir 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 rapport détaille l'avancement du projet SILURES Bretagne.

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

1.3. ORGANIGRAMME TECHNIQUE DU PROJET

Le durée du projet a été fixée à cinq ans avec la répartition suivante :

- les trois premières années sont dédiées à l'interprétation et à la valorisation des données,
- la quatrième année à la création de la base de données,
- et la cinquième année à la création et à l'édition des documents de synthèse.

L'organigramme technique du projet est rappelé en figure 1.

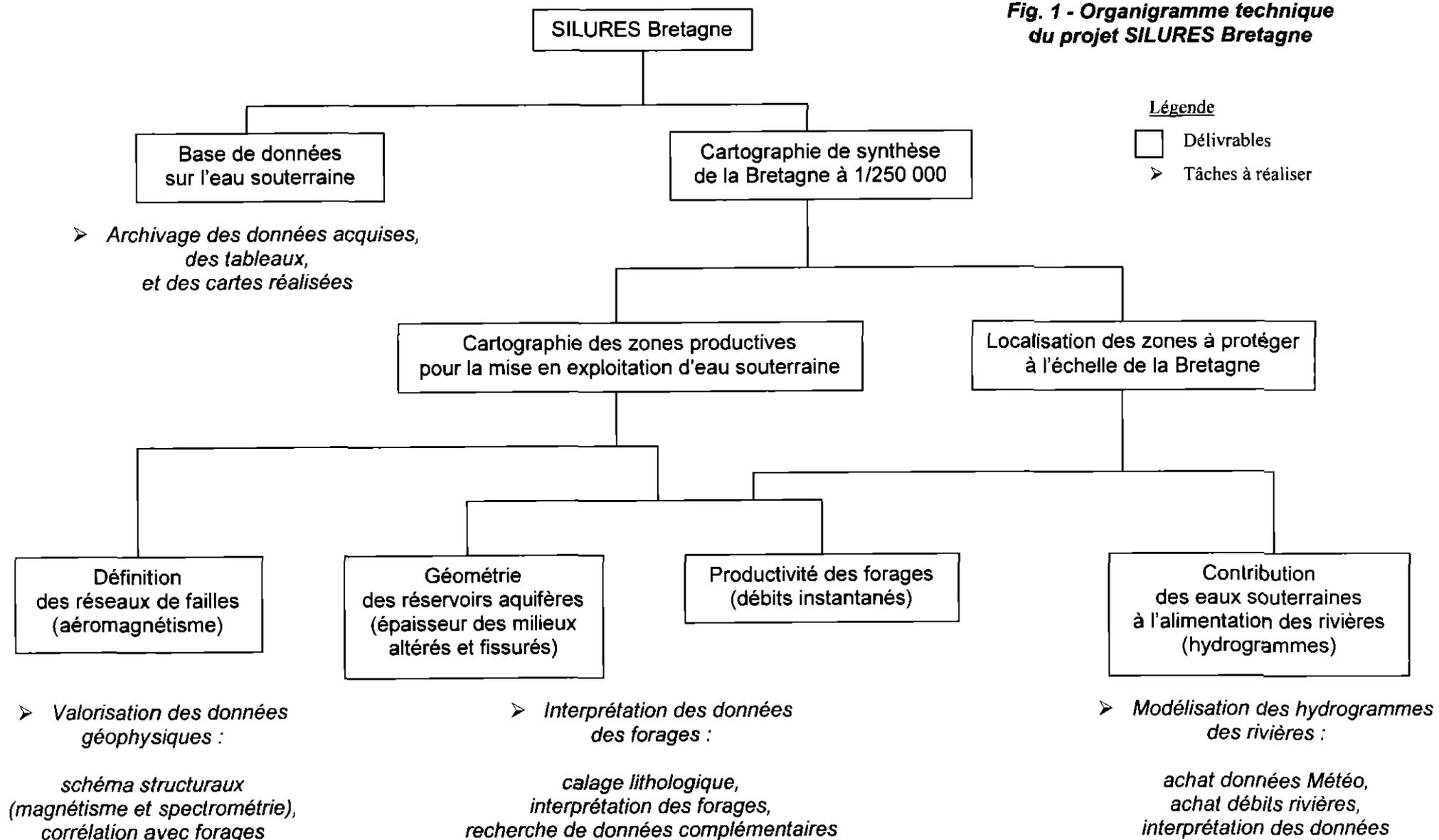
Les cartes de synthèses définies au dernier paragraphe ci-dessus (point 1.2.) seront réalisées grâce à plusieurs cartes de paramètres (définies en bas de l'organigramme de la figure 1). La création de ces cartes passe par trois phases d'interprétation et de valorisation des données existantes :

- la valorisation des données aéromagnétiques,
- l'interprétation des données de forages,
- et la modélisation des hydrogrammes des rivières.

Ces trois phases seront réalisées au cours des trois premières années du projet. Les trois phases définies ci-dessus sont détaillées aux chapitres 2, 3 et 4.

L'objet de ce rapport est de faire l'état d'avancement de la 2^{ème} année du projet.

Fig. 1 - Organigramme technique du projet SILURES Bretagne



2. Interprétation des données de géophysique aéroportée

2.1. DESCRIPTION DES DONNEES GEOPHYSIQUES

De mi-juillet à fin octobre 1998, le BRGM a conduit une campagne géophysique aéroportée dans le Massif armoricain (Bretagne, Pays de Loire et une partie de la Basse-Normandie). Réalisée à la demande du Ministère de l'Industrie, cette opération avait pour but de doter la région de données géophysiques, compléments indispensables aux données géologiques. Des données magnétiques et de radiométrie spectrale ont ainsi été mesurées.

2.1.1. Magnétisme

Les données aéromagnétiques sont depuis longtemps utilisées en appui à la cartographie des structures géologiques et des accidents qui les affectent ou pour détecter des concentrations de minéraux magnétiques.

La prospection aéromagnétique a eu pour objet la mesure des variations du champ magnétique terrestre (exprimées en nanoTesla) causées par des modifications des propriétés magnétiques des structures et formations géologiques.

2.1.2. Radiométrie spectrale

La radiométrie spectrale permet d'évaluer les contrastes de concentration des radioéléments (uranium, thorium, potassium) les plus fréquents dans les sols et dans les formations géologiques affleurantes. Ces contrastes sont ensuite interprétés en terme de lithologie du socle et de caractérisation des formations superficielles et de l'altération.

On parle de comptage total lorsque les trois radioéléments uranium, thorium et potassium sont combinés.

2.1.3. Utilisation et valorisation des données dans le cadre du projet

En hydrogéologie, les données magnétiques et la radiométrie sont utilisées pour aider à compléter la cartographie géologique et à localiser les accidents (failles...).

Dans le cadre du projet SILURES Bretagne, ces données aéroportées (magnétisme et spectrométrie) seront traitées et combinées pour établir des cartes des discontinuités structurales à l'échelle du 1/250 000. Ces données structurales seront ensuite corrélées avec les forages recensés en Bretagne (cf. chapitre 3.) et notamment avec la distribution des forages à fort débit.

Au cours de la deuxième année du projet :

- le secteur du Plabennec a fait l'objet d'une valorisation des données aéromagnétiques et radiométriques ;
- le travail de valorisation des données géophysiques à mener sur toute la Bretagne a débuté grâce à l'utilisation d'un outil de traitement automatique.

2.2. VALORISATION DES DONNEES DANS LE SECTEUR DE PLABENNEC

Suite au travail réalisé sur la zone de Ploërmel dans le Morbihan (cf. rapport BRGM/RP-50583-FR), un second test, mené dans la région Plabennec dans le Finistère, a permis d'affiner la démarche de traitement combiné des données magnétiques et spectrométriques, destinée à la mise en évidence de discontinuités géophysiques susceptibles de constituer des guides de prospection hydrogéologique. Cette étude est détaillée dans le rapport BRGM/RP-51740-FR de juin 2002.

La valorisation de la couverture de géophysique aéroportée a eu lieu en contexte granito-gneissique (Plabennec, Finistère), tandis que le travail mené sur Ploërmel (Morbihan) concernait essentiellement des domaines métasédimentaires.

Le travail réalisé a suivi celui adopté pour le premier test où il avait été défini un protocole de traitement des données géophysiques permettant d'extraire l'information la plus fine possible.

Les données magnétiques étant principalement influencées par les structures géologiques profondes et régionales, des traitements spécifiques (transformation en gradient vertical magnétique réduit au pôle et représentation en échelle logarithmique) permettent d'isoler les structures locales et peu profondes (failles ou dykes) pouvant présenter un intérêt hydrogéologique ; ces structures sont appelées discontinuités magnétiques.

Les cartes spectrométriques reflètent également la superposition d'effets locaux, susceptibles de jaloner des accidents, et d'anomalies régionales de grande longueur d'onde. Ces dernières sont extraites par une opération de lissage et c'est à partir de cartes résiduelles que le schéma des discontinuités spectrométriques est dessiné.

Les discontinuités magnétiques et radiométriques, interprétées manuellement, sont reportées sur un schéma structural géophysique (cf. figure 2) qui fait apparaître trois orientations structurales principales dans le Léon :

- une famille, orientée N120-140, qui est bien connue dans la région ; c'est la direction des champs filoniens basiques dont le plus spectaculaire jalonne la faille « Kerforne » (au Sud-Ouest et à l'Est du secteur),
- une famille d'orientation N70-80 qui correspond aux grands accidents crustaux tels que le cisaillement Nord-armoricain (à l'Est du secteur), la faille de l'Elorn (au Sud-Est) et le linéament Porspoder-Guissény (au Nord-Ouest),
- une faille orientée N150-160 au Nord-Ouest du secteur, quasiment absente des cartes géologiques mais particulièrement bien mise en évidence par l'étude des linéaments naturels déduits du Modèle Numérique de Terrain (MNT).

Ce schéma structural géophysique a ensuite été superposé aux forages du secteur classés selon leurs débits instantanés (cf. figure 2) afin de localiser des discontinuités susceptibles de constituer des drains privilégiés des eaux souterraines.

Les résultats issus des données de magnétisme montrent que les forages à fort débit sont localisés à l'aplomb ou très à proximité des discontinuités magnétiques. Les données du magnétisme aéroporté peuvent donc très largement concourir à l'établissement d'un schéma qui pourra guider les recherches en eaux souterraines.

Les données de la spectrométrie apportent une contribution moindre dans ce domaine. En revanche, elles pourront largement, à terme, être utilisées dans la détermination des domaines altérés qui peuvent constituer des réservoirs capacitifs et transitionnels vers le milieu fissuré plus profond.

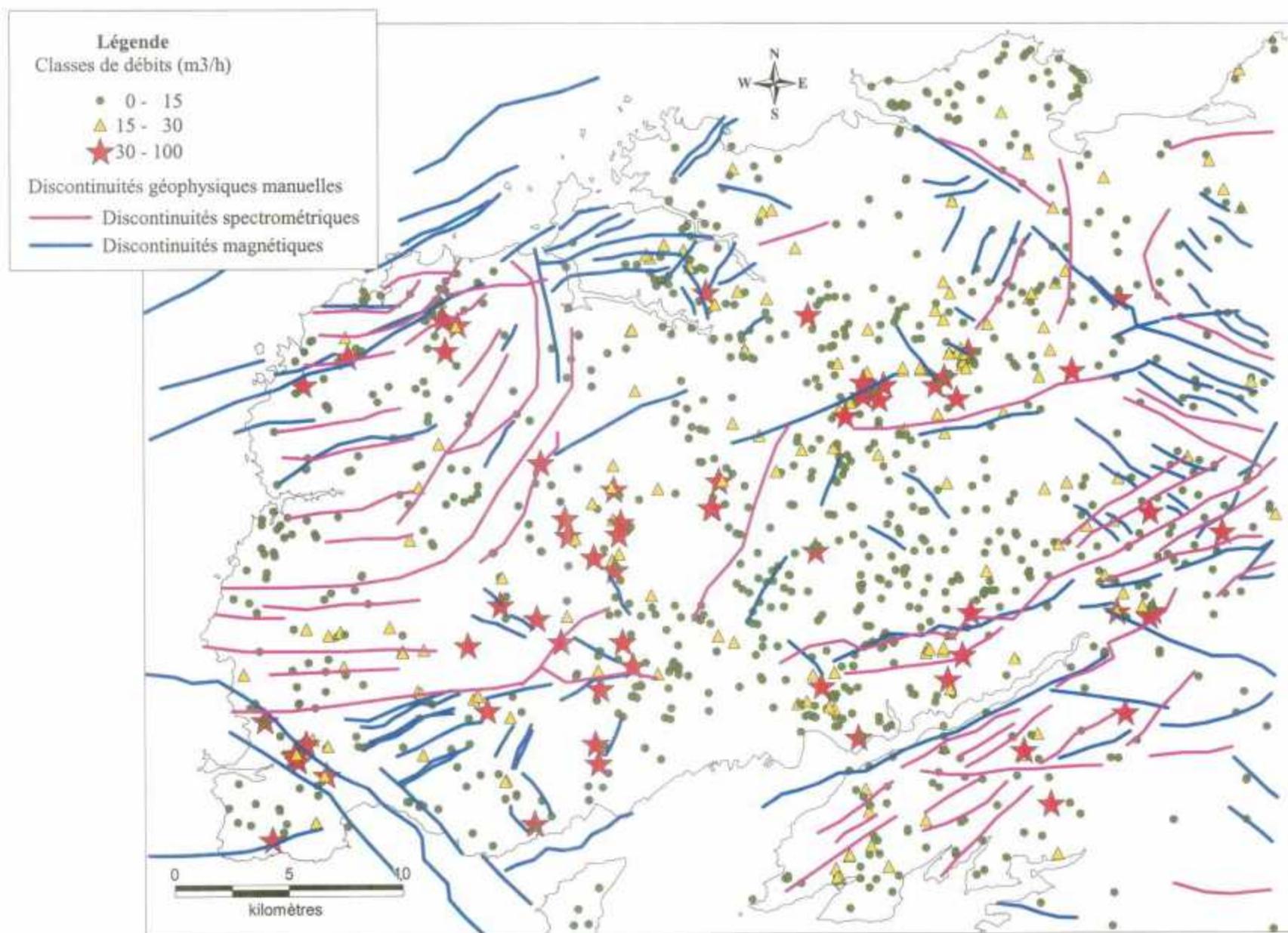


Fig. 2 - Répartition des forages par rapport aux discontinuités géophysiques interprétées manuellement sur le secteur de Plabennec

2.3. GENERALISATION A L'ENSEMBLE DE LA BRETAGNE

2.3.1. Organisation du travail à effectuer

De manière à interpréter les données géophysiques sur l'ensemble de la région Bretagne, le travail à effectuer a été organisé en plusieurs tâches réparties sur les 2^{ème} et 3^{ème} années du projet SILURES Bretagne :

- test de l'outil automatique (cf. description au chapitre 2.3.2.) (année 2),
- acquisition du MNT de la Bretagne et traitement (année 2),
- analyse structurale automatique du MNT puis valorisation (année 2),
- traitement et interprétation des données magnétiques et radiométriques (année 2),
- transfert des données dans un SIG (année 2),
- analyse structurale automatique des données radiométriques (année 2),
- analyse structurale automatique des données magnétiques (année 3),
- intégration des données non-continues dans le SIG (année 3),
- interprétation lithologique et structurale (année 3),
- corrélation entre débits des forages et données structurales (année 3),
- synthèse des données et rédaction d'un rapport (année 3).

2.3.2. Description de l'outil automatique

L'interprétation manuelle des données géophysiques présente l'inconvénient d'être subjective et fastidieuse dès que les surfaces à traiter sont importantes (digitalisation des discontinuités à partir d'images adaptées). C'est pourquoi une méthode d'interprétation automatique a été élaborée dans le cadre du projet de recherche et développement du BRGM « Méthodes Géophysiques au service de la cartographie numérique et 3D ».

Le module d'analyse structurale automatique des données géophysiques est destiné à l'extraction de discontinuités de type lignes brisées constituées de segments rectilignes jointifs. Cette analyse est basée sur l'interprétation automatique des gradients horizontaux des données à interpréter : magnétisme, spectrométrie, MNT (CASTAING, DEBEGLIA, 1992). Ces gradients peuvent être calculés par convolution fréquentielle en utilisant différents logiciels disponibles au BRGM.

Les étapes suivantes sont illustrées par un test sur la grille du champ magnétique réduit au pôle, localisée dans le secteur de Ploërmel.

Etape 1 : Algorithmes d'extraction des discontinuités élémentaires

Des deux gradients horizontaux, selon x et selon y, on déduit le module du gradient horizontal et sa direction. L'analyse du module du gradient horizontal, par une méthode adaptée de BLAKELY et SIMPSON (1986), permet de localiser des discontinuités élémentaires locales, correspondant aux maxima de ce gradient. L'importance de ces discontinuités est fonction de l'amplitude locale du gradient et on doit définir un seuil d'amplitude à partir duquel un maxima sera retenu. Ce seuil peut être choisi assez bas, par exemple, 0.01% de l'amplitude totale de l'anomalie, sauf s'il est nécessaire de limiter le temps de calcul.

Cette méthode d'analyse des gradients présente plusieurs particularités intéressantes :

- elle repose sur la signification physique des gradients horizontaux gravimétriques et magnétiques. Ces derniers présentent des maxima au niveau des zones de

contacts entre structures de densité ou d'aimantation différente, contacts lithologiques, failles. Cette localisation est d'autant plus précise que ces contacts sont verticaux et superficiels ;

- les maxima, centres des segments représentant les discontinuités, sont localisés avec précision dans la maille de calcul et non pas affectés au centre de la maille, comme on le fait en traitement d'image, ce qui offre l'avantage d'une meilleure précision et d'une plus grande continuité entre les discontinuités élémentaires ;
- l'orientation du segment est déduite de la direction du gradient horizontal local et généralement interpolées en fonction de la position exacte dans la maille, sauf lorsqu'il y a une grande variabilité de direction (bruit, extrémité de discontinuité, interférence entre plusieurs structures ou discontinuités).

A la fin de l'analyse un fichier contenant les caractéristiques de discontinuités élémentaires est constitué. Les attributs des discontinuités élémentaires sont les suivants :

- KDIS, indice de la discontinuité,
- X, Y, coordonnées du centre,
- KEPIJ, classement selon l'importance du gradient horizontal (système de 3 classes avec équirépartition),
- ALPIJ, angle de la discontinuité, en radian, de 0 à π , compté dans le sens trigonométrique à partir de l'axe des abscisses,
- I, J, indices dans la grille du centre de la discontinuité,
- GHMAX, gradient horizontal maximal au centre de la discontinuité,
- d, longueur de la discontinuité, variable selon son orientation, du pas à sa diagonale,
- xt1, yt1, xt2, yt2, coordonnées des extrémités de la discontinuité.

Etape 2a : Algorithmes de regroupements des discontinuités élémentaires en discontinuités « fractures »

Les discontinuités élémentaires sont regroupées en segments moyens rectilignes, supposés être représentatifs de fractures. Cette opération est réalisée grâce à un algorithme de suivi obéissant aux règles suivantes :

- On part d'une discontinuité quelconque, d1.
- On cherche la discontinuité d2 dont le centre est le plus proche de celui de d1 et qui respecte un triple critère :
 - angle entre les 2 discontinuités inférieur à un seuil angulaire, alpha, donné,
 - distance selon la direction moyenne du groupe inférieure à un seuil, dis1, donné,
 - distance perpendiculairement à la direction moyenne du groupe inférieure à un seuil, disp, donné.
- Si une discontinuité d2 est trouvée, les discontinuités d1 et d2 sont regroupées en un seul segment moyen rectiligne qui remplace d1 et d2 est éliminée. Si aucune discontinuité d2 ne correspond au critère, d1 est conservée, inchangée. La méthode de regroupement fait intervenir chaque segment avec un poids proportionnel à la longueur du segment.
- La procédure reprend avec une discontinuité élémentaire de moins.
- Lorsqu'il n'y a plus de regroupement possible, la procédure s'arrête.

Les paramètres de regroupement, seuils d'angle, alpha, et de distance, dis1 et disp, sont réglables.

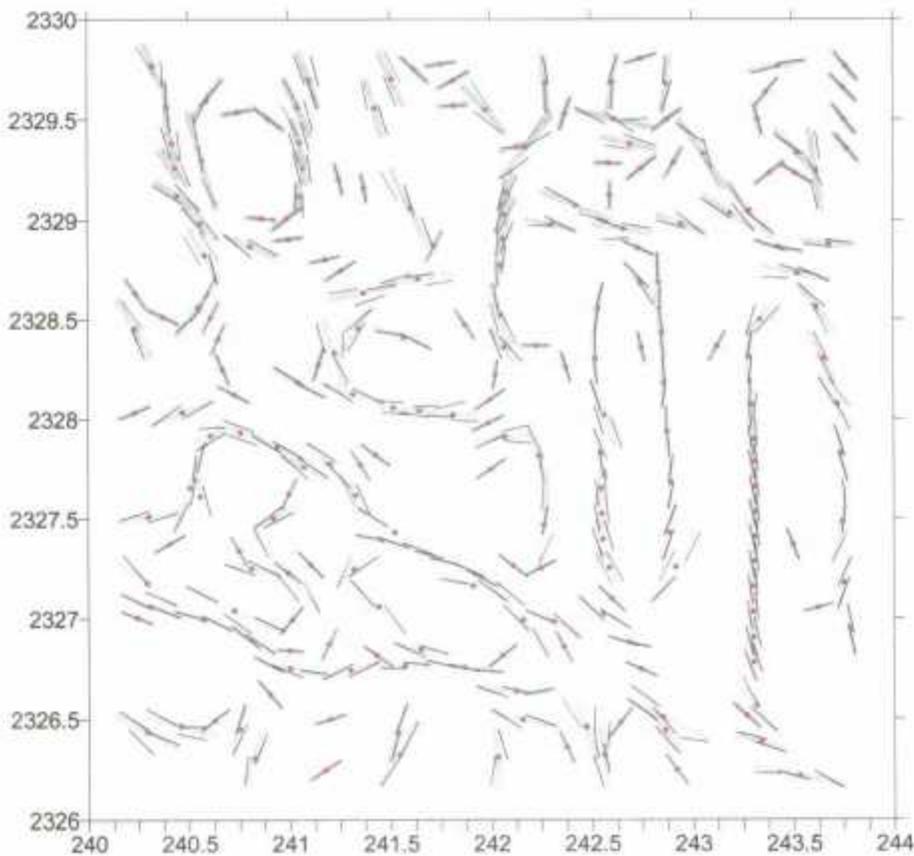
Etape 2b : Algorithmes de traitements des discontinuités « fractures »

Les fractures de longueur inférieure à un seuil, d_{\min} , donné sont éliminées, ce qui permet, si nécessaire, de clarifier l'image structurale, en supprimant des fractures isolées. En cas d'intersection, l'accident le plus court est arrêté sur le plus long, la portion de discontinuité conservée étant la plus étendue.

A la fin de ces deux dernières étapes un fichier contenant les caractéristiques de discontinuités fractures est constitué. Les attributs des discontinuités « fractures » sont semblables à ceux des discontinuités élémentaires. Cependant :

- le paramètre KEPIJ, devient le nombre de discontinuités élémentaires intervenant dans le regroupement,
- les paramètres, I, J, sans objet, sont mis à 0,
- la longueur de la discontinuité, d, n'est plus limitée et est fonction des regroupements effectués.

La figure 3 ci-dessous montre, sur le secteur de Ploërmel (4 x 4 km), le résultat des étapes 2a et 2b de regroupement des discontinuités élémentaires (représentées en noir) en discontinuités « fractures » rectilignes (en gris), et de traitements des discontinuités « fractures ». Les centres des fractures sont notés par un point rouge.



Fractures : $\alpha = 30$ $disp = 0.07$ $disl = 0.125$ $d_{\min} = 0.125$

Fig. 3 - Regroupement des discontinuités élémentaires en discontinuités « fractures » (Ploërmel, traitement du Magnétisme)

Influence des paramètres de regroupement en discontinuités « fractures »

- Influence du seuil angulaire, alpha

Pour favoriser les regroupements, on peut utiliser un seuil angulaire, alpha, relativement élevé, 30 à 40°, sans trop affecter la précision de localisation des fractures.

- Influence du seuil de distance perpendiculairement à l'allongement, disp

Pour augmenter les regroupements, on peut prendre un seuil de distance perpendiculairement à l'allongement du groupe de discontinuités, disp, plus élevé. Augmenter ce seuil ne favorise pas particulièrement la création de longues fractures mais permet d'éviter d'avoir des accidents parallèles, doublés, voir triplés, dans les zones de gradient larges. Cependant, la précision de la localisation des fractures peut être affectée si on augmente trop ce paramètre.

- Influence du seuil de distance selon l'allongement, disl

Pour privilégier les regroupements en longues fractures, on peut prendre un seuil de distance selon l'allongement du groupe de discontinuités, disl, plus élevé. Augmenter ce seuil favorise la création de fractures de grande taille en reliant entre eux des segments d'accidents isolés. Cependant, si on augmente trop ce paramètre, on risque de créer une continuité fictive entre des éléments de fait indépendants. Si on ne veut pas privilégier les fractures rectilignes et si on prévoit d'utiliser l'étape suivante pour relier les « fractures » par des « lignes » brisées, il vaut mieux utiliser un seuil disl petit, de l'ordre de 0,125 km et laisser l'algorithme suivant opérer.

Etape 3a : Algorithmes de regroupements des discontinuités « fractures » en « lignes »

Il serait possible de constituer directement des lignes de discontinuités à partir des discontinuités élémentaires. Cependant, le regroupement en fractures, en permettant une première concentration de la discontinuité, facilite généralement les traitements ultérieurs.

Les discontinuités « fractures » sont regroupées en « lignes » brisées constituées de segments rectilignes. Cette opération est réalisée grâce à un algorithme de suivi obéissant aux règles suivantes :

- On part d'une fracture quelconque, f1.
- On cherche la fracture f2, telle que :
- l'angle (f1, f2) soit inférieur à un seuil angulaire, alpha, donné,
- la distance entre une extrémité de f1 et une extrémité de f2 soit inférieure à un seuil de distance, dis, donné,
- il n'existe pas d'autre discontinuité plus proche de f2.
- Si une fracture f2 est trouvée, on initialise une nouvelle ligne.
- On construit ensuite la ligne, de proche en proche, de part et d'autre du segment initial, f1. Les segments utilisés sont extraits de la procédure.
- La procédure reprend par la création d'une nouvelle ligne à partir des segments restants. Lorsqu'il n'y a plus de regroupement possible, la procédure s'arrête.
- Seules les lignes de longueur supérieure à un seuil fixé, d_{min}, sont conservées.

La figure 4 ci-dessous montre, sur le secteur de Ploërmel, le résultat de l'étape 3a de regroupement des discontinuités « fractures » (représentée en noir) en « lignes » brisées (en gris). Les centres des fractures sont notés par un point rouge.

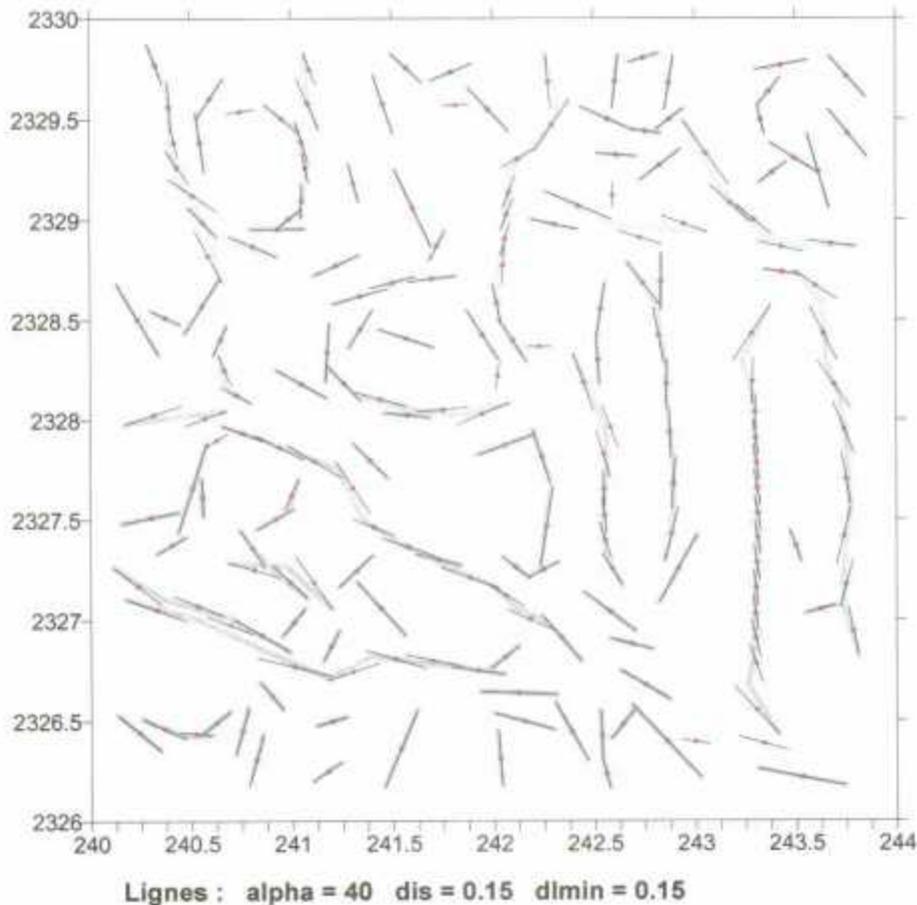


Fig. 4 - Regroupement des discontinuités « fractures » en « lignes » brisées (Ploërmel, traitement du Magnétisme)

Etape 3b : Algorithmes de traitements des « lignes »

Le traitement des lignes est contrôlé par un paramètre unique, s_{dmax} . s_{dmax} est la distance à partir de laquelle deux lignes trop proches seront concaténées en une seule ligne. Pour des raisons algorithmiques tenant au mode de recherche des points proches, le même paramètre est utilisé comme pas d'échantillonnage constant lors du lissage de la ligne.

Le traitement des lignes comporte 3 étapes successives :

- le lissage de la ligne est réalisé par un algorithme de splines sous tension, codé par A.K. CLINE (1987) et issu du package FITPACK, distribué par Netlib. Le paramètre de tension ayant été fixé à 0, l'algorithme se comporte strictement comme un « cubic spline ». Le lissage a surtout pour but d'obtenir un échantillonnage régulier de la ligne ce qui facilitera les traitements ultérieurs ;
- le traitement des intersections de lignes permet de clarifier l'image. Le principe du traitement est le suivant :
 - si les deux lignes ne se recoupent qu'une fois, le plus petit des quatre segments de ligne définis par l'intersection est supprimé s'il est plus petit que d_{\min} , sinon, les lignes ne sont pas modifiées ;
 - si les deux lignes se recoupent plusieurs fois, on ne garde que les segments situés à l'extérieur de la zone d'intersection, et seulement s'ils sont plus grands que d_{\min} ;
- la concaténation des lignes trop proches a également pour but de simplifier le schéma structural. Si deux lignes restent à une distance inférieure à s_{\max} sur une longueur de plus d'un pas d'échantillonnage, les lignes sont interrompues et les deux portions de lignes trop proches sont remplacées par un segment unique. Pour préserver la continuité de l'image de la discontinuité, aucun segment de ligne ainsi créé n'est supprimé, même s'il est plus court que d_{\min} . Dans les zones de maxima de gradient larges où la localisation de l'accident principal est imprécise et se manifeste par plusieurs discontinuités parallèles, le tracé final sera donc constitué de lignes interrompues, localement doublées.

Deux fichiers contenant les caractéristiques des discontinuités lignes sont constitués, l'un avant traitement des lignes, l'autre, après traitement. Ces fichiers contiennent, pour chaque ligne les attributs suivants :

- KDIS, indice de la ligne,
- KEPIJ, nombre de points de la ligne,
- d, longueur de la ligne,
- orientation globale (azimuth par rapport au Nord) calculée entre les deux points extrêmes de la ligne,
- orientation moyenne (azimuth par rapport au Nord) pondérée par la longueur de chaque segment constituant la ligne,
- écart-type des directions des segments,
- GHMAX, gradient horizontal moyen,
- Suivis des coordonnées x, y, des points de la ligne

La figure 5 ci-après montre, sur le secteur de Ploërmel, le résultat du traitement des « lignes » qui est décomposé en 4 cartes :

- a) lignes initiales,
- b) lignes après interpolation et traitement des intersections,
- c) lignes finales après concaténation,
- d) lignes finales superposées aux discontinuités élémentaires initiales.

Les lignes sont tracées sur fond de gradient vertical du champ magnétique réduit au pôle. Le paramètre s_{\max} est égal à 0.125 km.

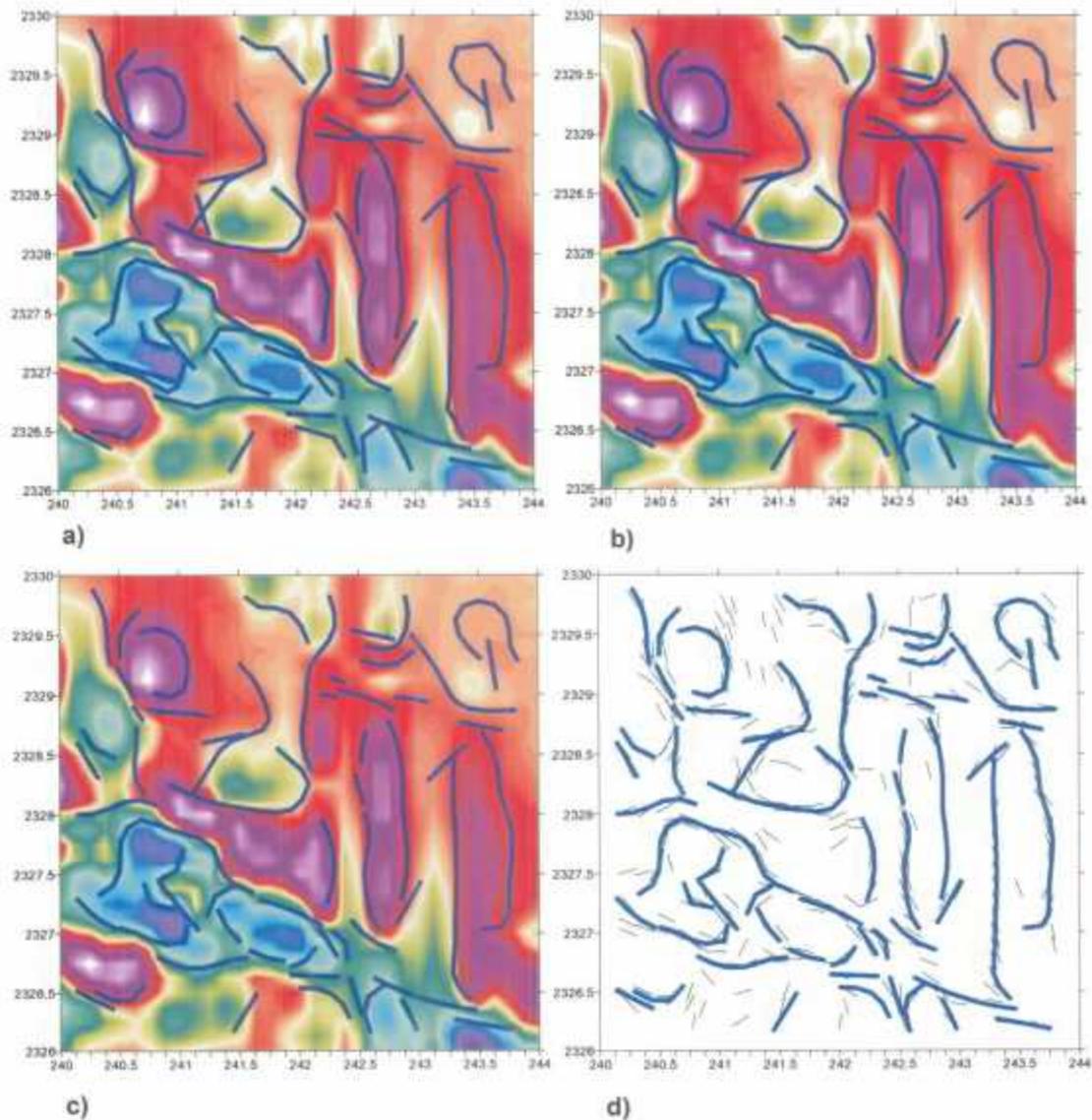


Fig. 5 - Etapes de traitement des « lignes » (Ploërmel, traitement du Magnétisme)

Influence des paramètres de regroupement en « lignes »

Des seuils angulaires, alpha assez élevés, 40 à 60°, favorisent le regroupement en « lignes ». La diminution du paramètre (alpha=20°) entraîne d'avantage d'accidents rectilignes.

Il ne faut pas trop augmenter le seuil de distance, dis, afin de pas créer de liaisons factices entre des discontinuités trop éloignées.

La diminution du paramètre dmin de 0.3 à 0.6 permet d'éliminer des discontinuités isolées.

L'augmentation de la distance sdmax entraîne une diminution du nombre de « lignes », et favorise le caractère rectiligne des accidents (représentation plus régionale).

Etape 4 : Sortie finale des résultats au format MAPINFO

En sortie, les données concernant les « lignes » de discontinuités sont stockées dans deux fichiers, d'extension .mif et .mid, au format d'import de MAPINFO. Le fichier .mid contient pour chaque ligne les attributs suivants :

- indice de la ligne,
- nombre de points de la ligne,
- longueur de la ligne,
- gradient moyen le long de la ligne,
- orientation globale (azimut par rapport au Nord) calculée entre les deux points extrêmes de la ligne,
- orientation moyenne (azimut par rapport au Nord),
- écart-type des directions des segments par rapport à la direction moyenne,
- rotation, égale à la différence de direction entre le début et la fin de la ligne,
- rotation maximale, égale à la différence entre les orientations maximales observées le long de la ligne,
- coordonnées du premier point de la ligne.

Il est donc possible de faire ensuite des sélections sur ces attributs ce qui permettra d'extraire les discontinuités présentant des caractéristiques particulières :

- sélection sur les orientations ou les longueurs,
- discontinuités rectilignes, caractérisées par un faible écart-type des directions,
- discontinuités majeures, les plus longues et correspondant à un fort gradient horizontal, par exemple...

Les données concernant les segments de lignes sont également stockées dans deux fichiers, d'extension .mif et .mid, au format d'import de MAPINFO. Le fichier .mid contient pour chaque ligne les attributs suivants :

- indice de la ligne à laquelle appartient le segment,
- nombre de points de la ligne,
- longueur de la ligne,
- gradient moyen le long de la ligne.
- orientation globale (azimut par rapport au Nord) calculée entre les deux points extrêmes de la ligne,
- orientation moyenne (azimut par rapport au Nord),
- écart-type des directions des segments par rapport à la direction moyenne,
- rotation, égale à la différence de direction entre le début et la fin de la ligne,
- rotation maximale, égale à la différence entre les orientations maximales observées le long de la ligne,
- azimut du segment

Ces attributs permettront d'isoler des portions de lignes ayant des caractéristiques particulières : portions rectilignes ou ayant une orientation donnée, en particulier.

2.3.3. Test de l'outil automatique et validation

Les résultats obtenus par l'analyse structurale automatique ont été testés, sur le secteur de Plabennec, de la façon suivante :

- identification des orientations majeures des discontinuités « automatiques » et comparaison avec les résultats fournis par les tracés manuels,
- test de l'existence de corrélation des discontinuités avec les forages à fort débit,
- identification des directions favorables à la prospection hydrogéologique et comparaison avec les résultats fournis par les tracés manuels.

Sur le secteur de Plabennec, l'analyse structurale automatique a permis de créer les cartes suivantes (cf. figure 6, page suivante) :

- une carte des discontinuités spectrométriques, à partir de la carte du comptage total (filtrage fréquentiel, longueur d'onde de coupure équivalente à 440 m),
- une carte des discontinuités magnétiques, à partir de la carte du gradient vertical du champ magnétique réduit au pôle (filtré des directions Nord-Sud),
- et une carte des discontinuités magnétiques régionales (changement des paramètres d_{lmin} et s_{dmax}), à partir de la carte du gradient vertical du champ magnétique réduit au pôle (filtré des directions Nord-Sud).

Les paramètres retenus sont rassemblés dans le tableau 1.

	Regroupement en « fractures »				Regroupement des « fractures » en « lignes » - Traitement des « lignes »			
	alpha (°)	disl (m)	disp (m)	dlmin (m)	alpha (°)	dis (m)	dlmin (m)	sdmax (m)
Spectro comptage total	30	125	125	125	60	150	300	125
Mag détail	30	125	125	125	60	150	300	125
Mag régional	30	125	125	125	60	150	1000	500

Tabl. 1 - Paramètres utilisés pour l'analyse structurale automatique du secteur de Plabennec

Des analyses thématiques réalisées sur l'attribut « orientation globale » de toutes les discontinuités spectrométriques et magnétiques mettent en évidence les directions majeures suivantes :

- comptage total (5221 lignes), N90-120 et N60-90 (42 % des lignes),
- magnétisme (7264 lignes), N90-120 et N60-90 (47 % des lignes),
- magnétisme régional (1791 lignes), N90-120 et N60-90 (57 % des lignes).

Le schéma structural géophysique (cf. rapport BRGM/RP-51740-FR) rassemblant les discontinuités tracées manuellement (magnétiques et spectrométriques) soulignait l'importance régionale des orientations N60-80 et une structuration N120-140.

L'outil automatique met donc en évidence des orientations de discontinuités cohérentes avec celles des discontinuités interprétées manuellement.

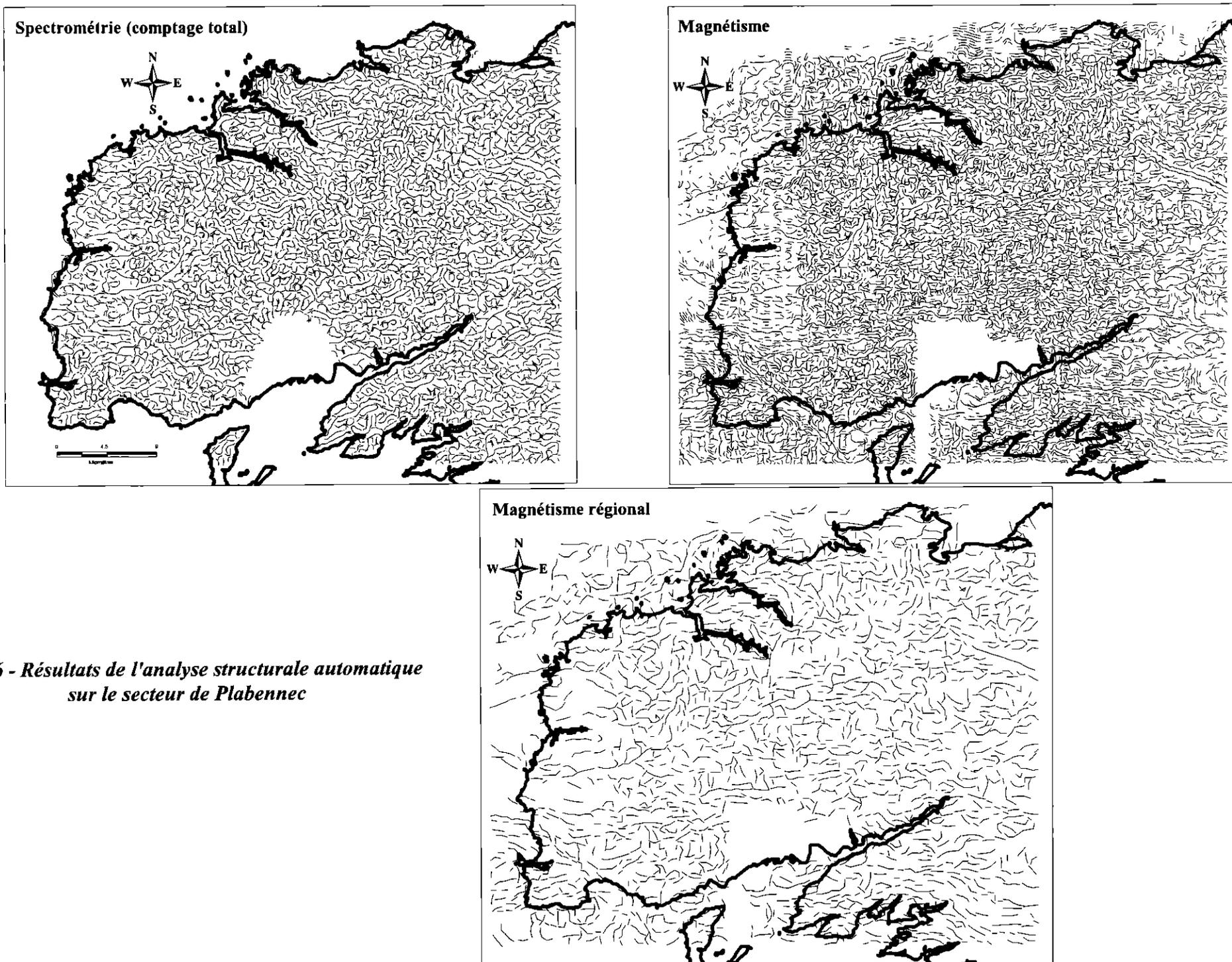


Fig. 6 - Résultats de l'analyse structurale automatique sur le secteur de Plabennec

Les discontinuités « automatiques » ont ensuite été superposées aux forages présents sur le secteur afin de tester leur corrélation avec les forages à fort débit.

Les forages dont le débit est supérieur à 30 m³/h ont été sélectionnés. Pour chaque type de discontinuités, un périmètre de 400 m autour de chacun de ces forages à fort débit a permis de sélectionner les « lignes » passant par ce voisinage, puis de réaliser des analyses thématiques sur les attributs suivants des « lignes » : orientation globale, orientation moyenne, longueur et gradient moyen.

Les résultats les plus fréquemment observés sont présentés ci-dessous (tableau 2).

	orientation globale (°)	orientation moyenne (°)	longueur moyenne (m)	Gradient moyen (nano Gray/h/km) (nano Tesla/km) (nano Tesla/km)
Spectrométrie comptage total (146 sélections)	60-90	120-150	250-500	0.02-0.03
	120-150 (45 % des lignes sél.)	60-90 (43 %)	1000-10000 (63 %)	0.01-0.02 (66 %)
Magnétisme détaillé (190 sélections)	60-90	60-90	250-500	0.01-0.02
	90-120 (46 %)	90-120 (46 %)	1000-5000 (61 %)	0.02-0.03 (47 %)
Magnétisme régional (58 sélections)	90-120	90-120	1000-5000	0.02-0.03
	60-90 (55 %)	60-90 (52 %)	500-750 (88 %)	0.01-0.02 (53 %)

Tabl. 2 - Orientation, longueur et gradient associés aux « lignes » sélectionnées à proximité des forages à fort débit du secteur de Plabennec

Le magnétisme détaillé met en évidence majoritairement des discontinuités potentiellement « productives » (susceptibles de fournir un fort débit en forage) orientées à N60-90, mais également à N90-120.

Le magnétisme régional met en évidence majoritairement des discontinuités orientées à N90-120, mais également à N60-90.

Les discontinuités sélectionnées avec le magnétisme régional sont nettement plus longues qu'avec le magnétisme détaillé (>1 km par rapport à 250-500 m).

La radiométrie spectrale met en évidence des discontinuités potentiellement « productives » orientées à N60-90 et à N120-150.

La comparaison entre la disposition des forages à fort débit et des discontinuités géophysiques tracées manuellement (cf. figure 2 et rapport BRGM/RP-51740-FR) montrait que ces forages semblaient être alignés suivant trois directions :

- N60-80 au Nord-Ouest (linéament de Porspoder-Guissény) et au Sud-Est du secteur (faille de l'Elorn),
- N150-160 à l'Est et à l'Ouest de Brest,
- N120-130 au Sud-Ouest du secteur à proximité des filons de dolérite du faisceau de Kerforne, et au Nord-Est du secteur proche d'un accident traversant les gneiss de Tréglonou.

L'outil automatique met donc en évidence des discontinuités cohérentes :

- avec les forages à fort débit (à chaque forage est associé au moins une discontinuité géophysique),
- avec les discontinuités interprétées manuellement (directions et orientations favorables à l'exploitation des eaux souterraines).

2.3.4. Choix des paramètres pour la région Bretagne

Dans le cadre du projet SILURES Bretagne, les données aéroportées (magnétisme et spectrométrie) et du Modèle Numérique de Terrain (MNT) seront traitées avec l'outil automatique. L'objectif final de cette partie du projet est de représenter une carte, à l'échelle du 1/250 000, des accidents à proximité desquels l'implantation d'un forage est susceptible de fournir un fort débit.

Afin d'aboutir à cette représentation régionale (1/250 000), les paramètres de l'outil automatique doivent être choisis de manière adéquate :

- pour les « fractures » disp = 70 m (afin d'éviter le rassemblement des discontinuités élémentaires en doublet voir triplet, cf. chapitre 2.3.2. étape 2a),
- pour les « lignes » alpha = 20 à 40° (20° : besoin de discontinuités rectilignes pour l'analyse du MNT, 40° : besoin de contours courbes pour la spectrométrie, cf. chapitre 2.3.2. étape 3a),
- pour les « lignes » dlmin = 1 000 m (une discontinuité de longueur inférieure à 1 km n'est pas visible à l'échelle régionale au 1/250 000, cf. chapitre 2.3.2. étape 3a),
- pour les « lignes » sdmax = 500 m (les résultats obtenus au chapitre précédent avec le magnétisme détaillé et le magnétisme régional sont très proches ; obtention d'une image plus lisible à l'échelle régionale au 1/250 000, cf. chapitre 2.3.2. étape 3b).

Les paramètres retenus sont rassemblés dans le tableau 3.

	Regroupement des discont. élémentaires en « fractures »				Regroupement des « fractures » en « lignes » - Traitement des « lignes »			
	alpha (°)	disl (m)	disp (m)	Dlmin (m)	alpha (°)	dis (m)	dlmin (m)	sdmax (m)
MNT	30	125	70	125	20	150	1000	500
Magné-tisme	30	125	70	125	30	150	1000	500
Spectro-métrie	30	125	70	125	40	150	1000	500

Tabl. 3 - Paramètres utilisés pour l'analyse structurale automatique de la région Bretagne

Afin d'obtenir une carte régionale, il a été prévu que l'analyse structurale automatique des données magnétiques se fasse sur un gradient vertical prolongé vers le haut (0.5 km, au lieu de 0.125 km pour Plabennec) et l'analyse structurale automatique des données spectrométriques se fasse sur des données ayant subi un lissage fréquentiel.

2.3.5. Travail réalisé sur la Bretagne au cours de la 2^{ème} année du projet

Acquisition du MNT de la Bretagne et traitement

Le MNT au pas de 50 m couvrant toute la Bretagne a été acheté à l'Institut Géographique National et a été remis au BRGM sur CD-Rom.

Ce MNT a fait l'objet d'un rééchantillonnage afin d'établir une grille au pas de 125 m. Ce pas a été choisi afin d'être cohérent avec les données géophysiques.

Analyse structurale automatique du MNT puis valorisation

Une analyse structurale automatique du MNT a été effectuée en été 2003 et a fourni les éléments suivants : lignes, segments et fractures. Le traitement, réalisé sur une station UNIX, Compaq Alpha a nécessité plusieurs jours de calcul.

Les résultats précédents ont été associés à plusieurs ombrages du MNT (source d'éclairage au Nord et incidence de lumière de 30°, N315 incidence 30°, et N45 incidence 25°) pour digitaliser manuellement les linéaments naturels mis en évidence par les deux méthodes.

Ces linéaments obtenus sont reportés sur la figure 7.

Le secteur Sud-Ouest des Côtes d'Armor et Est du Finistère, relativement pauvre en linéaments, sera approfondi au cours de la 3^{ème} année du projet.

Traitement et interprétation des données magnétiques et radiométriques

Les différentes données magnétiques et radiométriques mesurées lors de la campagne aéroportée de 1998 ont permis d'établir plusieurs cartes couvrant tout le Massif armoricain. Ces cartes sont les suivantes :

- magnétisme : anomalie du champ réduit au pôle,
- spectrométrie : comptage total, uranium, thorium, potassium.

La figure 8 montre, par exemple, les résultats obtenus pour les teneurs en thorium dans les limites de la couverture aéroportée.

Suite à l'édition de ces premières cartes représentatives des données brutes disponibles, de nouvelles cartes plus élaborées ont été créées :

- carte du rapport potassium/thorium ;
- cartes de l'anomalie résiduelle en uranium, thorium, potassium ;
- carte du gradient vertical du champ magnétique réduit au pôle.

Chaque carte est établie à partir d'une grille au pas de 125 m.

Transfert des données dans un SIG

L'ensemble des données obtenues ci-dessus (MNT, magnétisme brut et traité, radiométrie spectrale brute et traitée) ont été transférées dans un SIG sous Arcview afin de permettre des mises en page et des traitements ultérieurs.

Des gammes d'échelle et de représentation couleur ont été créées.

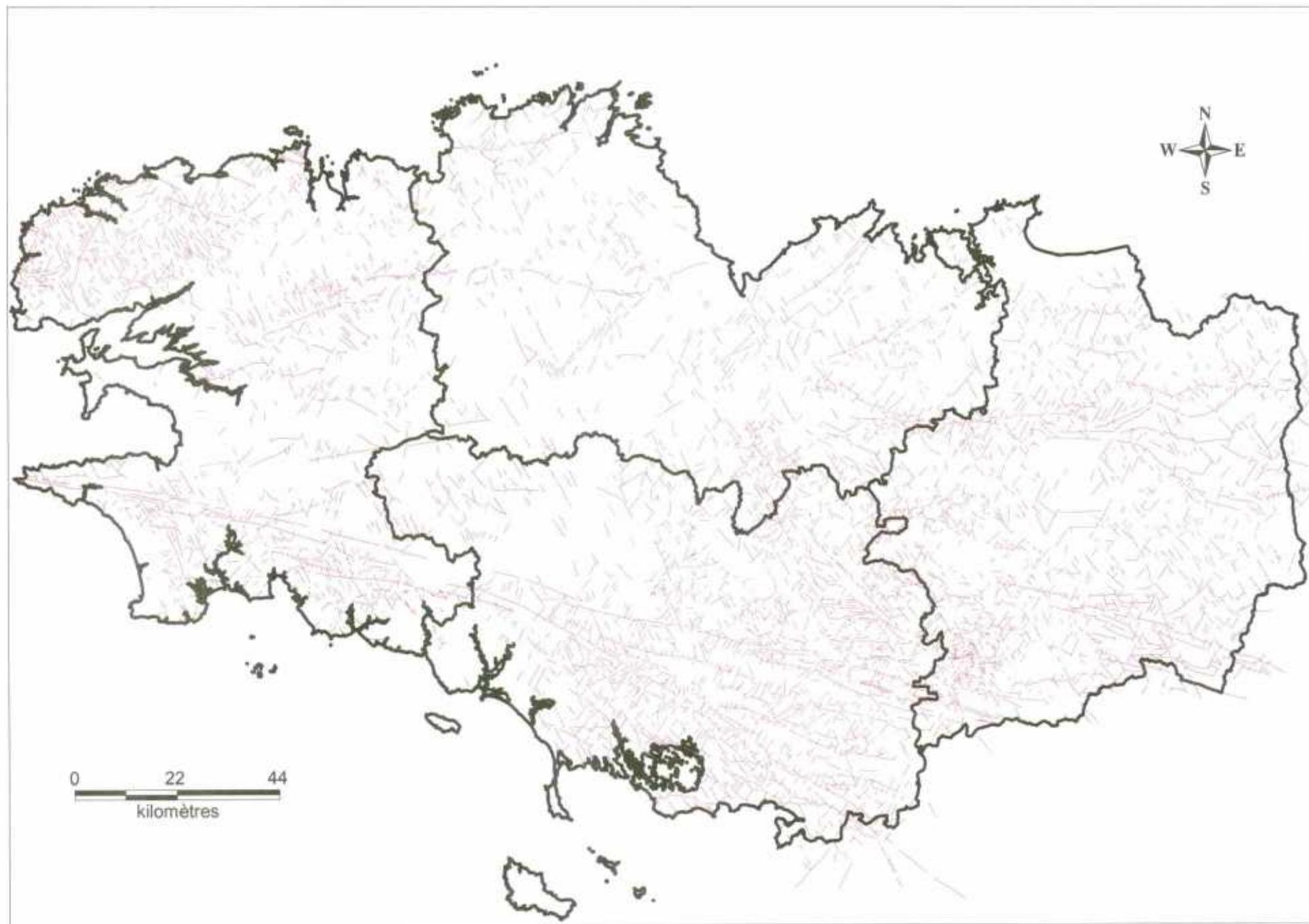


Fig. 7 - Linéaments naturels issus de l'analyse du MNT sur toute la Bretagne (interprétation manuelle)

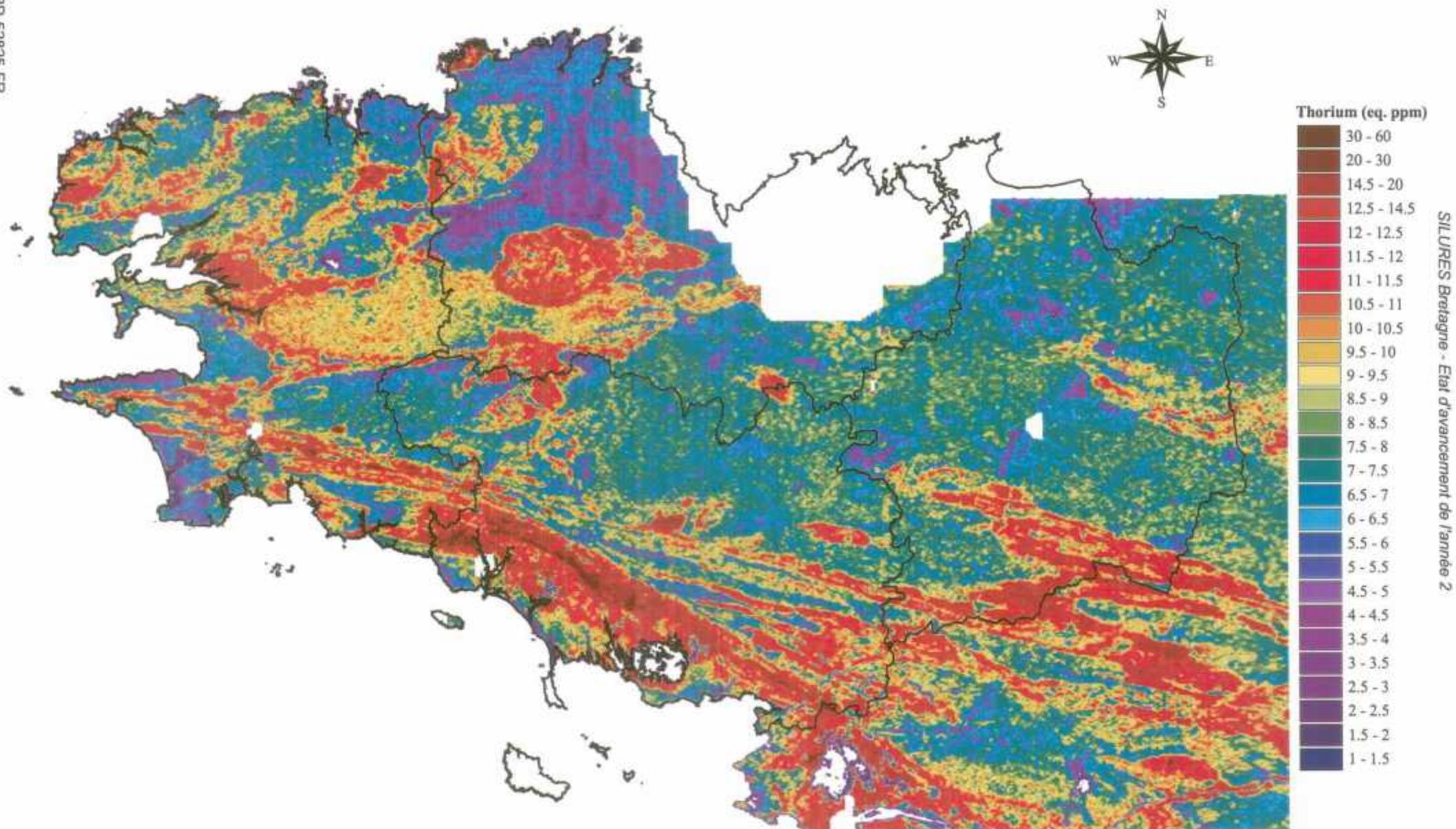


Fig. 8 - Lever spectrométrique - Carte régionale des teneurs équivalentes en thorium

Analyse structurale automatique des données radiométriques

Une analyse structurale automatique a été lancée sur les données radiométriques (comptage total, éléments uranium, thorium, potassium, et rapport potassium/thorium). Comme pour le MNT, les traitements ont nécessité d'importants moyens et plusieurs jours de calcul sur une station UNIX.

Les résultats obtenus sont des discontinuités spectrométriques (lignes et segments de ligne) utilisables avec le logiciel Mapinfo.

Afin d'obtenir des cartes régionales (lisibilité à échelle 1/250 000), les données ont été filtrées passe-bas, en fréquentiel, de manière à éliminer les longueurs d'onde inférieures à 500 m.

Par ailleurs, une analyse encore plus régionale des trois éléments uranium, thorium et potassium a été réalisée à partir des grilles lissées par moyennes pondérées en inverse de la distance sur une fenêtre de 2 km, puis rééchantillonnées à la maille de 500 m.

Les résultats de cette analyse automatique plus régionale des teneurs équivalentes en thorium est représentée sur la figure 9.

Les discontinuités tracées mettent en évidence :

- des accidents comme les deux directions du cisaillement Sud-armoricain ;
- des contours de formations géologiques : Granite de Quintin (Ouest des Côtes d'Armor), bassin Carbonifère de Châteaulin (Centre Finistère et Sud-Ouest Côtes d'Armor), Granite porphyroïde de Bignan (au-dessus du cisaillement dans le Centre du Morbihan), et des alternances schisto-gréseuses : Grès armoricains et Formation de Traveusot (Sud-Est de l'Ille-et-Vilaine).

2.3.6. Travail à réaliser sur la Bretagne au cours de la 3^{ème} année du projet

Analyse structurale automatique des données magnétiques

Comme pour les données radiométriques, une analyse structurale automatique des données magnétiques sera effectuée. Les résultats obtenus seront des discontinuités magnétiques élémentaires (lignes et segments de ligne) utilisables avec le logiciel Mapinfo.

Intégration des données non-continues dans le SIG

Les données dites « non-continues » suivantes seront intégrées dans le SIG sous Arcview :

- données des forages et valeurs de débit (fichier Excel extrait de la Banque de données du Sous-Sol et mis à jour),
- linéaments naturels issus du MNT,
- contours géologiques numériques (extraits de la carte géologique à 1/250 000),
- réseaux des failles cartographiques (extraits de la carte géologique à 1/250 000),
- résultats des analyses structurales automatiques des données magnétiques et spectrométriques (lignes et segments de ligne).

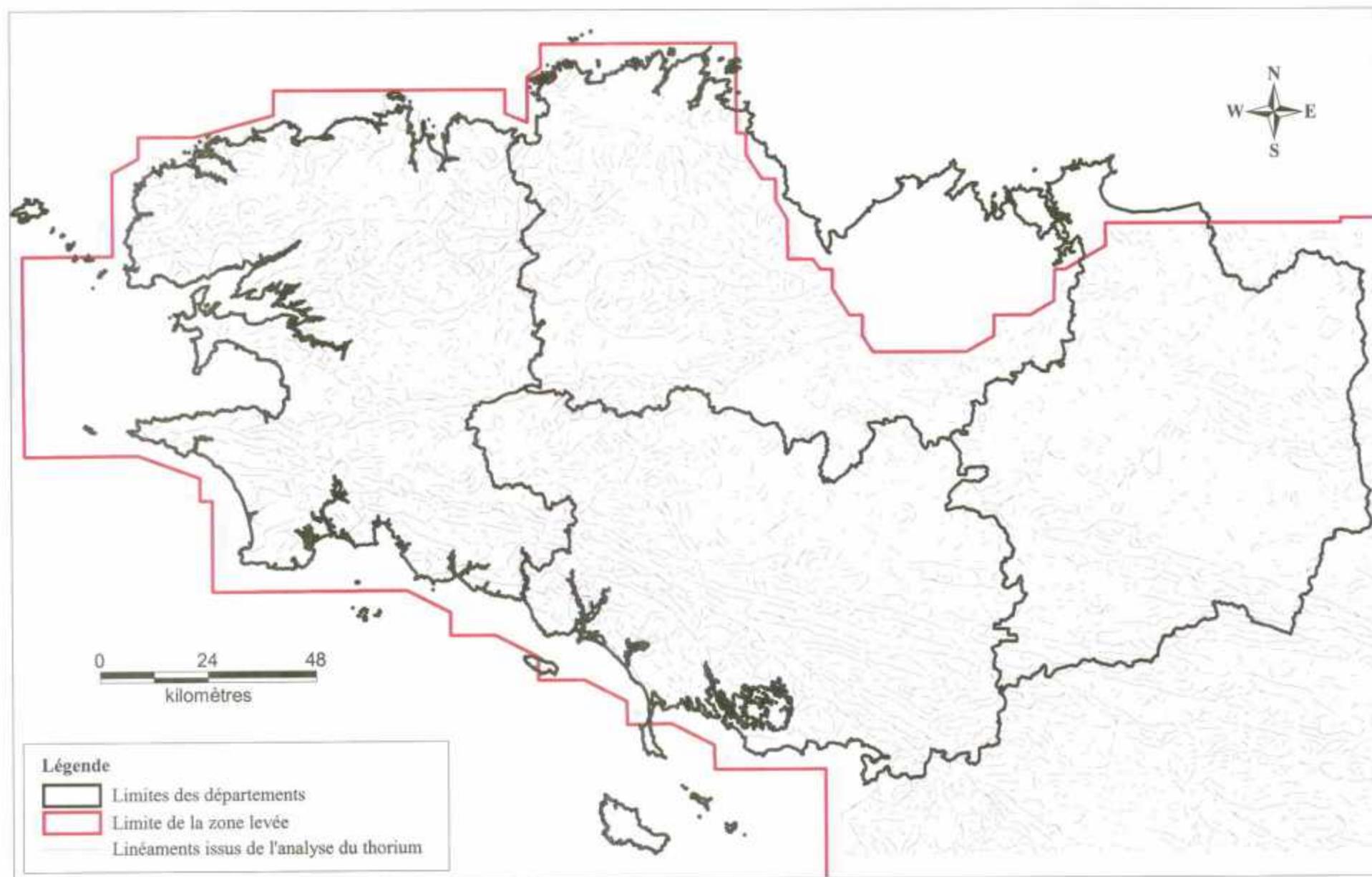


Fig. 9 - Résultat de l'analyse structurale automatique des teneurs en thorium

Interprétation lithologique et structurale

Un schéma structural sera établi en superposant les accidents recueillis et calculés : failles, contours géologiques, linéaments MNT, discontinuités magnétiques et spectrométriques. Les directions régionales majeures seront identifiées grâce à des rosaces de direction qui seront créées.

A partir de cette superposition, seront mis en évidence : les accidents communs à plusieurs méthodes, les accidents superficiels ou profonds, et la signature géophysique des contours géologiques.

Corrélation entre débits des forages et données structurales

La corrélation entre les débits des forages et les données structurales issues des observations géologiques et analyses automatiques sera recherchée en utilisant, par exemple, cette méthode :

- pour chaque famille d'accidents, mise en évidence de l'existence de forages à fort débit situés dans un périmètre de 400 m autour des accidents ;
- sur les accidents suffisamment renseignés, classement des accidents selon les informations suivantes : nombre de forages dans le périmètre, rapport débit/profondeur moyen et écart-type ; et réalisation de rosaces de direction pour chaque classe ;
- réalisation de rosaces de direction pour les accidents suffisamment renseignés et identification de classes de directions ; réalisation d'histogrammes des rapports débit/profondeur pour chaque classe de direction.

Une autre méthode peut consister à :

- représenter tous les accidents issus des 3 méthodes (MNT, magnétisme et spectrométrie) ;
- identification des accidents communs à 2 méthodes ou à 3 méthodes ;
- analyses multicritères sur l'ensemble des accidents (communs à plusieurs méthodes ou non) et extraction des caractéristiques des discontinuités situés à proximité des forages à fort débit : nombre de méthodes définissant l'accident, directions, longueurs, gradients ;
- sélection multicritère sur l'ensemble des accidents, selon les paramètres les plus fréquemment rencontrés ci-dessus ;
- représentation régionale des accidents sélectionnés (carte au 1/250 000).

Une méthode finale sera retenue à l'issu de plusieurs tests.

Synthèse des données et rédaction d'un rapport

A terme, l'interprétation du schéma structural géophysique devra identifier des familles d'accidents de même orientation à proximité desquels les forages fournissent des débits importants. Ces familles constitueront alors des guides de prospection d'eau souterraine.

Un rapport détaillera la méthode utilisée ainsi que les grandes conclusions obtenues.

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 17000 forages sont connus en Bretagne. Une partie de ces forages (environ 10 000) possèdent une localisation géographique suffisamment précise pour qu'ils soient numérotés (affectation d'un numéro BSS - Banque de données du Sous-Sol) et 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 forage,
- débit instantané mesuré en fin de foration, profondeur atteinte,
- diamètre de l'ouvrage, géologie rencontrée,
- niveau piézométrique, 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 forage portent quasi systématiquement sur la profondeur finale de l'ouvrage et sur son débit instantané. Les autres informations, moins systématiques, concernent la nature et l'état de la roche traversée (lithologie, altération) et la localisation des différentes arrivées d'eau (fissures productives recoupées par le forage). Ces données sont de valeurs inégales car dépendant notamment du foreur, de son attention 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 d'informations.

3.1.2. Utilisation et valorisation des données dans le cadre du projet

Lors 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 du projet SILURES Bretagne, deux autres types de travaux débutés lors de la 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.

Cette valorisation des données des forages permettra à terme de réaliser les cartes suivantes à l'échelle de la Bretagne :

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

3.2. INTERPRETATION DES DONNEES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES

L'interprétation 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 entreprises de forage, a pour but d'approcher la géométrie des réservoirs aquifères (épaisseurs des milieux altérés et fissurés) à l'échelle de la Bretagne.

Dans le cadre du projet SILURES Bretagne, la méthode de travail suivante a été adoptée :

- mise en place d'une échelle de fiabilité de l'interprétation des données,
- définition des termes utilisés pour le découpage des horizons géologiques,
- choix d'un secteur à interpréter,
- recensement des foreurs exerçant sur le secteur,
- inventaire des termes lithologiques utilisés par les foreurs,
- interprétation des données géologiques et hydrogéologiques.

Au cours de la 2^{ème} année du projet, le travail décrit ci-dessus a été terminé sur les forages du Finistère, et a débuté sur les forages des Côtes d'Armor.

3.2.1. Echelle de fiabilité de l'interprétation

Cette échelle est détaillée dans le rapport BRGM/RP-51481-FR (année 1).

L'interprétation se base sur les informations suivantes mesurées en cours de foration : le lever de la coupe géologique et la mesure des arrivées d'eau.

Au niveau de la description des formations géologiques, trois cas de figure se présentent : description absente, sommaire ou détaillée.

Pour le débit instantané fourni par le forage : il est soit absent, soit mesuré uniquement en fin de foration, soit mesuré à chaque arrivée d'eau.

Le croisement des deux informations précédentes fournit alors neuf possibilités de description allant de la plus médiocre (absence de coupe géologique et de débit) à la meilleure (coupe géologique détaillée et mesure régulière des arrivées d'eaux).

Lors de la 2^{ème} année du projet, une colonne d'observations et de remarques a donc été ajoutée au tableau d'interprétation des données (cf. tableau 4) : 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 (cf. tableau 4).

Le tableau 4 précise les différents champs renseignés

	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

Tabl. 4 - Observations précisées lors de l'interprétation des données de forage

On retrouve dans ce tableau, au niveau des sept premières lignes, les cas de figure exposés ci-dessus (la situation « Description géologique sommaire, pas de mesure de débit » n'a pas été rencontrée, et la meilleure situation n'est pas commentée car la fiabilité de son interprétation est toujours égale à 1).

Les trois lignes suivantes précisent le mode d'interprétation des données : avec la profondeur de la première arrivée d'eau, ou avec la description géologique de l'horizon fissuré.

Les deux dernières lignes précisent :

- que le forage a été réalisé par un bureau d'étude et donc que les informations sont relevées plus précisément que par les entreprises de forage,
- et qu'un niveau de quartz, mentionné dans la description géologique, signale le recoupement d'une fracture.

3.2.2. Découpage et dénomination des milieux rencontrés

Le découpage détaillé dans le rapport BRGM/RP-51481-FR (année 1) a été précisé et simplifié.

Les catégories « altéré, fissuré, sain » ont été découpées en plusieurs sous-ensembles :

- AA : « Altéré Argileux », lorsque le matériau altéré est imperméable ;
- AP : « Altéré Perméable », lorsque le matériau altéré est assez perméable ;
 - ❖ en l'absence d'information géologique, la cote de la base de l'altération sera estimée égale à la profondeur de la première arrivée d'eau ;
- F : « Fissuré », quand le débit instantané du forage est supérieur à 3 m³/h et qu'il existe plusieurs arrivées d'eau successives espacées de moins de 30 m ;
- FF : « Faiblement Fissuré », quand le débit instantané du forage est inférieur ou égal à 3 m³/h ;
- SF : « Sain Fracturé », lorsqu'il existe encore une - voire plusieurs mais très distantes (plus de 30 m) - arrivée(s) d'eau dans la roche saine faillée ;

- ❖ le SF est très souvent caractérisé au niveau des sondages implantés sur des photolinéaments et suivis par le BRGM ; les premières arrivées d'eau pouvant commencer à plus de 40 m ;
- S : « Sain », lorsque la roche saine est très dure par défaut (exemples : absence d'arrivées d'eau en fin de forage sur au moins 20 m, ou débit inférieur à 1 m³/h sur une profondeur supérieure à 50 m).

Les anciennes catégories FC, FFC, SFC et SC ont été rassemblées avec les descriptions F, FF, SF et S. L'alternance de géologie « en couches » peut être précisée géographiquement grâce à la carte géologique (schistes-grès briovériens, alternances schistes et quartzites en rade de Brest, schistes et calcaires de l'Armorique, bassin Carbonifère de Châteaulin...).

3.2.3. Interprétation des données géologiques et hydrogéologiques du Finistère

En fin de 2^{ème} année du projet, le travail de découpage des horizons géologiques a été mené sur tous les forages localisés du Finistère (3962 ouvrages, période 1974-2003).

L'interprétation a été réalisée pour chaque forage, à partir :

- des informations géologiques et hydrogéologiques fournies par les fiches de la Banque de données du Sous-Sol (BSS),
- des champs lexicaux des foreurs du Finistère (décrits dans le rapport BRGM/RP-51481-FR).

Pour chaque interprétation de forage comportant un numéro BSS, les caractéristiques suivantes ont été relevées et informatisées :

- un chiffre correspondant à la fiabilité de l'interprétation (cf. 3.2.1.),
- une observation expliquant le choix dans l'échelle de fiabilité (notamment les fiabilités égales à 2 et 3, cf. 3.2.1.),
- l'épaisseur des formations rencontrées au niveau de chaque horizon géologique rencontré (cf. 3.2.2. : 6 dénominations), selon leur existence au niveau du forage.

Les résultats du travail d'interprétation de tous les forages du Finistère montrent que l'interprétation des données est :

- fiable dans 64 % des cas (2548 ouvrages, fiabilité 1),
- estimée dans 32 % des cas (1247 ouvrages, fiabilité 2),
- et impossible dans 4 % des cas (167 ouvrages, fiabilité 3).

L'estimation de l'interprétation est liée en grande partie (41 % des cas où la fiabilité est égale à 2) à une interprétation de l'épaisseur du milieu altéré s'appuyant sur la profondeur de la première arrivée d'eau (cf. observation « P » du tableau 4), mais également aux catégories « E » (géologie sommaire, un débit), « B » (pas de coupe géologique, un débit) et « F » (géologie sommaire, plusieurs débits) du tableau 4 (respectivement 23, 17 et 12 % des cas).

L'impossibilité d'interprétation est due à l'absence d'information sur la géologie recoupée et sur le débit mesuré en fin de foration (cf. observation « A » du tableau 4).

Au terme de l'interprétation des données des forages de Bretagne, le fichier informatique d'interprétation des données sera inséré dans le fichier des caractéristiques des forages d'eau.

3.2.4. Interprétation des tarières du projet SILURES Bassins Versants

89 tarières ont été réalisées dans le cadre du projet SILURES Bassins Versants (rapport BRGM/RP-51891-FR) : 28 sur les bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche, 21 sur le bassin de l'Yvel, 19 sur le bassin du Dourduff, et 21 sur le bassin de l'Oust.

55 tarières suffisamment profondes et comportant des informations jugées pertinentes ont été affectées d'un numéro BSS (Banque de données du Sous-Sol).

L'interprétation des données géologiques et hydrogéologiques des tarières réalisées a été intégré dans la base du projet SILURES Bretagne.

3.2.5. Champs lexicaux des foreurs des Côtes d'Armor

Afin d'obtenir des éléments supplémentaires pour l'interprétation des données des forages des Côtes d'Armor (termes utilisés par les foreurs pour définir les différents horizons), la figure 10 a été éditée à l'échelle du département.

Cette figure montre le champ d'action des entreprises de forage, et met en évidence les foreurs les plus présents sur le département : LEFEUVRE (405 forages réalisés), FORAFRANCE (314), PERFORA (281), LE MAGOUROU (236), DENIS (173), CHICOINE (168) ; pour un total de 1818 forages localisés sur la période 1974-2003.

Pour chacun de ces foreurs, les termes les plus utilisés ont été recensés et affectés à la dénomination des milieux rencontrés. Le détail de cette recherche est précisée ci-dessous.

Dans les pages suivantes, en raison de l'analyse critique des descriptions géologiques et hydrogéologiques des forages que les entreprises ont réalisé, celles-ci ne seront pas nommées (affectées d'une lettre A, B, C...).

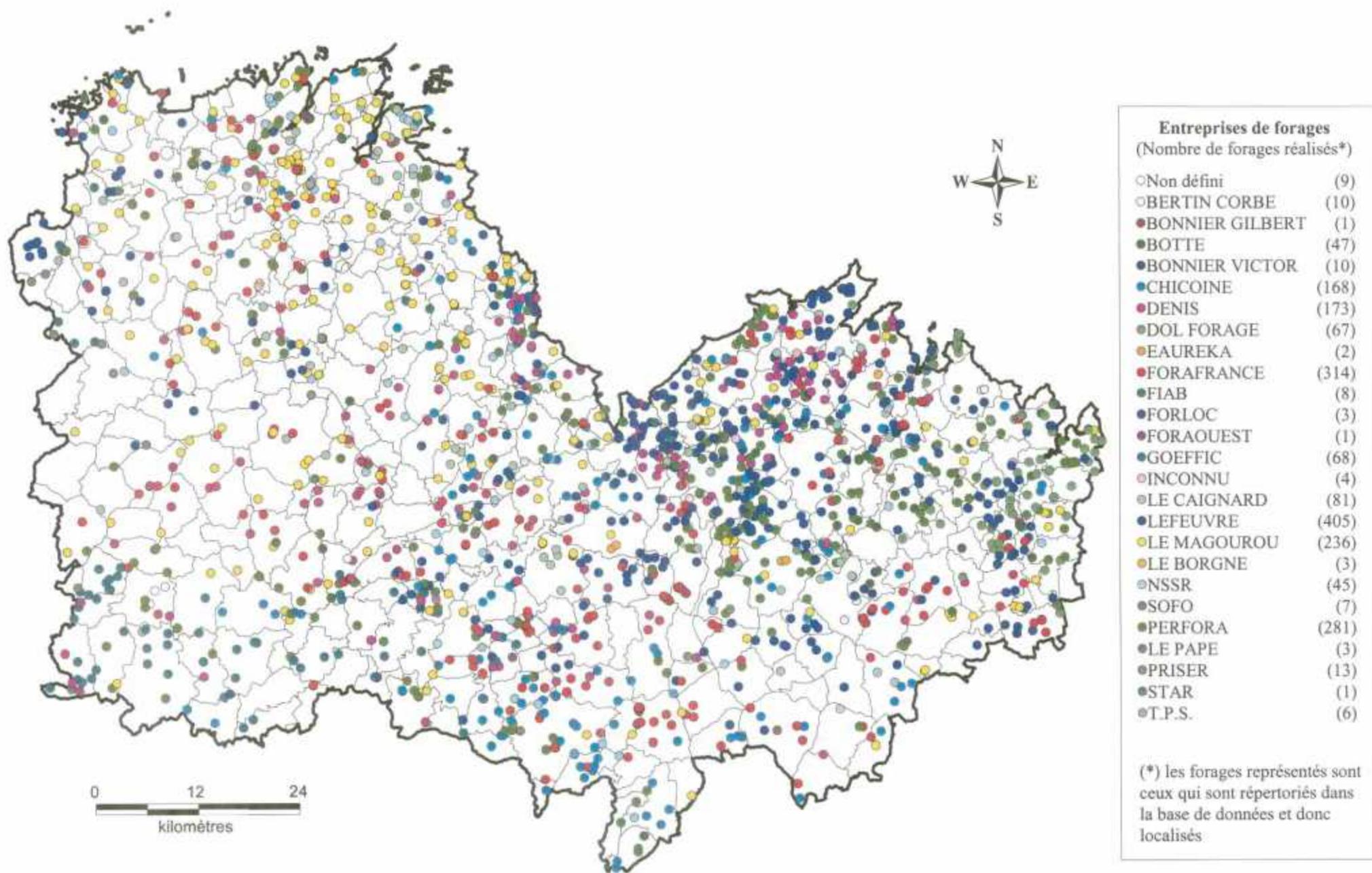


Fig. 10 - Répartition de l'intervention des foreurs dans les Côtes d'Armor

Entreprise A

Dans les forages réalisés les informations géologiques et d'arrivées d'eau sont très bien détaillées. La description géologique se fait avec des adjectifs caractérisant l'état des roches (tendre, dur, pourri...). La profondeur des fractures dans la roche est parfois précisée (quartz, petits blocs, passages argileux...). Les termes les plus fréquemment utilisés sont les suivants :

AA : argile, argile sèche, terre argileuse,
schistes terreux, schistes altérés jaunes

AP : sable, sable argileux jaune,
arène, arène granitique, micaschiste pourri

FF et F : granite gris tendre, granite bleu fracturé,
granite à passages de quartz, granite avec passages d'argile,
granite avec petits blocs et passages argileux,
schistes gris, schistes tendres noirs, schistes très tendres,
schistes et quartz, micaschiste bleu altéré

SF et S : granite bleu, granite dur, granite gris régulier,
grès, schistes durs

Entreprise B

De 1976 à 1989, les coupes géologiques des forages sont absentes et les arrivées d'eau ne sont que peu ou pas décrites. Les forages réalisés en 1990-1991 ont une description géologique bien plus approfondie et des arrivées d'eau détaillées. Pour ces derniers forages, les termes les plus fréquemment utilisés par l'entreprise sont les suivants :

AA : argile, schiste tendre, argile rouge et schistes

FF et F : schiste fissuré, schiste altéré et fracturé, grès et schistes,
schiste compact (avec plusieurs arrivées d'eau),
schiste dur avec petit passage de quartz

SF et S : schiste compact (sans arrivée d'eau)

Entreprise C

La géologie décrite lors de la réalisation des forages d'eau est peu détaillée (un mot voir aucun) et les arrivées d'eau sont régulièrement mesurées. L'interprétation devra s'appuyer sur les profondeurs des arrivées d'eau. Les termes les plus fréquemment utilisés par l'entreprise de forage sont les suivants :

AA : schiste, schiste tendre, schiste altéré en argile

AP : arène

FF et F : grès tendre, grès peu dur,
grès et niveaux de quartz

Entreprise D

De 1976 à 1982, les coupes géologiques des forages sont absentes et seul le débit final du forage est indiqué. De 1984 à 1990, la description géologique est plus détaillée et les arrivées d'eau sont précisées. Pour ces derniers forages, les termes les plus fréquemment utilisés par l'entreprise sont les suivants :

AA : argile, schistes fins et tendres

AP : terre, sable jaune, sable tuffeau

FF et F : spilites de Paimpol, pierre bleue, granite bleu,
schistes durs, schistes bleus et quartz

Entreprise E

Les coupes géologiques des forages sont très souvent absentes et seul le débit obtenu en fin de foration est indiqué. Les quelques termes utilisés par l'entreprise sont les suivants :

AP : terre végétale, sable

FF et F : schiste, granite, pierre décomposée

Entreprise F

La description géologique des forages est aléatoire (sommaire à absente). Il en est de même pour la profondeur des arrivées d'eau (soit un débit final, soit les profondeurs sont détaillées). Les quelques termes utilisés sont les suivants :

AA : argile, terre, pierre marron

AP : sable

FF et F : granite, pierre bleue,
schistes, schistes tendres, schistes et quartz

3.3. RECHERCHE DE FORAGES COMPLEMENTAIRES SUR LES DEPARTEMENTS BRETONS

La recherche de forages complémentaires a pour but d'alimenter la base de données sur les eaux souterraines dans les communes de Bretagne dépourvues d'informations.

Lors de la 2^{ème} année du projet, les étapes suivantes ont été réalisées :

- mise en évidence des secteurs dépourvus d'information (par commune et par formation géologique),
- repérage sur le terrain des forages correctement renseignés mais non localisés,
- insertion des caractéristiques des forages dans la base informatisée.

Le travail décrit ci-dessus a permis, au cours de la 2^{ème} année du projet, de localiser 451 forages répartis de la manière suivante : 65 en Ille-et-Vilaine, 124 dans le Morbihan, 184 dans les Côtes d'Armor, 78 dans le Finistère.

3.3.1. Recherche des secteurs faiblement représentés en forages

La répartition du nombre de forages localisés par département est la suivante :

Ille-et-Vilaine	Morbihan	Finistère	Côtes d'Armor	Total Bretagne
2167	2605	3539	1818	10129

Tabl. 5 - Nombre de forages recensés dans la base de données (avant recherche de forages complémentaires de l'année 2)

Le recensement du nombre de forages présents sur chaque commune de Bretagne a été réalisé après l'inventaire de la 1^{ère} année. La représentation de cette répartition permet de mettre en évidence les communes (rouges et oranges) où le nombre de forages recensés est nul ou très faible (cf. figures 11, 12, 13, 14 pour chacun des départements bretons).

Ces cartes ont servi de base pour orienter le travail de repérage de terrain. D'autres critères ont également orienté le choix des communes à inventorier :

- nombre de forages susceptibles d'être repérés sur la commune,
- taille de la commune et répartition homogène des forages dans celle-ci,
- proximité des communes choisies (mission dans un secteur défini et non dispersé),
- nombre de forages par formation géologique (afin d'en approfondir les propriétés hydrogéologiques)...

Les communes « pauvres » en données de forages localisés ont donc été inventoriées en priorité, et selon les critères précédents des communes plus « riches » ont été approfondies.

3.3.2. Recherche de forages supplémentaires

Suivant les critères du paragraphe précédent, les secteurs suivants ont été retenus :

- Côtes d'Armor : secteurs Centre (Plémy-Trédaniel), Sud-Est (Langourla-St Vran), Nord-Est (Fréhel-St Jacut jusqu'à Taden), Nord (Squiffiec-Plouha) et Nord-Ouest (Plestin les Grèves-Trébeurden) du département,
- Ille-et-Vilaine : secteurs Nord (La Fresnais), Centre-Est (Servon sur Vilaine-Val d'Ize) et Centre-Ouest (Plélan-le-Grand jusqu'à Maure-de-Bretagne) du département dans des géologies variées,
- Morbihan : secteurs Est (de Molac à Glénac), Nord-Ouest (Langoelan) et Sud-Ouest (autour de Lorient) du département,
- Finistère : secteurs variés dans différentes géologies.

Dans les secteurs cités ci-dessus, les formations géologiques ciblées ne comportant que peu de forages sont les suivantes (nom du code géologique, secteur où se situe la formation) :

- Morbihan : le Granite des Landes de Lanvaux (N017, secteur Est), le Granite de Ploemeur (G031, à l'Est de Lorient), le Granite de Rostrenen (G024, secteur Nord-Ouest) et les Schistes et Arkoses de Bains sur Oust (I011-E026, secteur Est),
- Côtes d'Armor : les Diorites gneissiques du cycle cadomien (N026, secteur Nord-Est), les Micaschistes du même épisode (M009, secteur Nord-Est), les Migmatites de Saint Malo et de Guingamp (N022, secteur Nord-Est), les Granites des Massifs de Quintin et de Moncontour (G033-G034, secteur Nord-Ouest), et les Granites hercyniens de Ploumanac'h (G043, secteur Nord-Ouest).

A partir des informations reportées sur les fiches cartonnées extraites de la BSS (commune, lieu-dit et propriétaire), le travail de repérage sur le terrain débute en se rendant sur place afin de localiser précisément le forage sur une carte IGN au 1/25 000, et de recueillir d'éventuelles informations complémentaires sur la qualité de l'eau, l'usage du forage (agricole, domestique, industriel...).

Les communes inventoriées et le nombre de forages localisés précisément sur ces communes sont représentés sur les figures 11, 12, 13 et 14 pour chacun des départements bretons. La liste de ces communes figure dans les tableaux 6, 7, 8 et 9 en annexe 1.

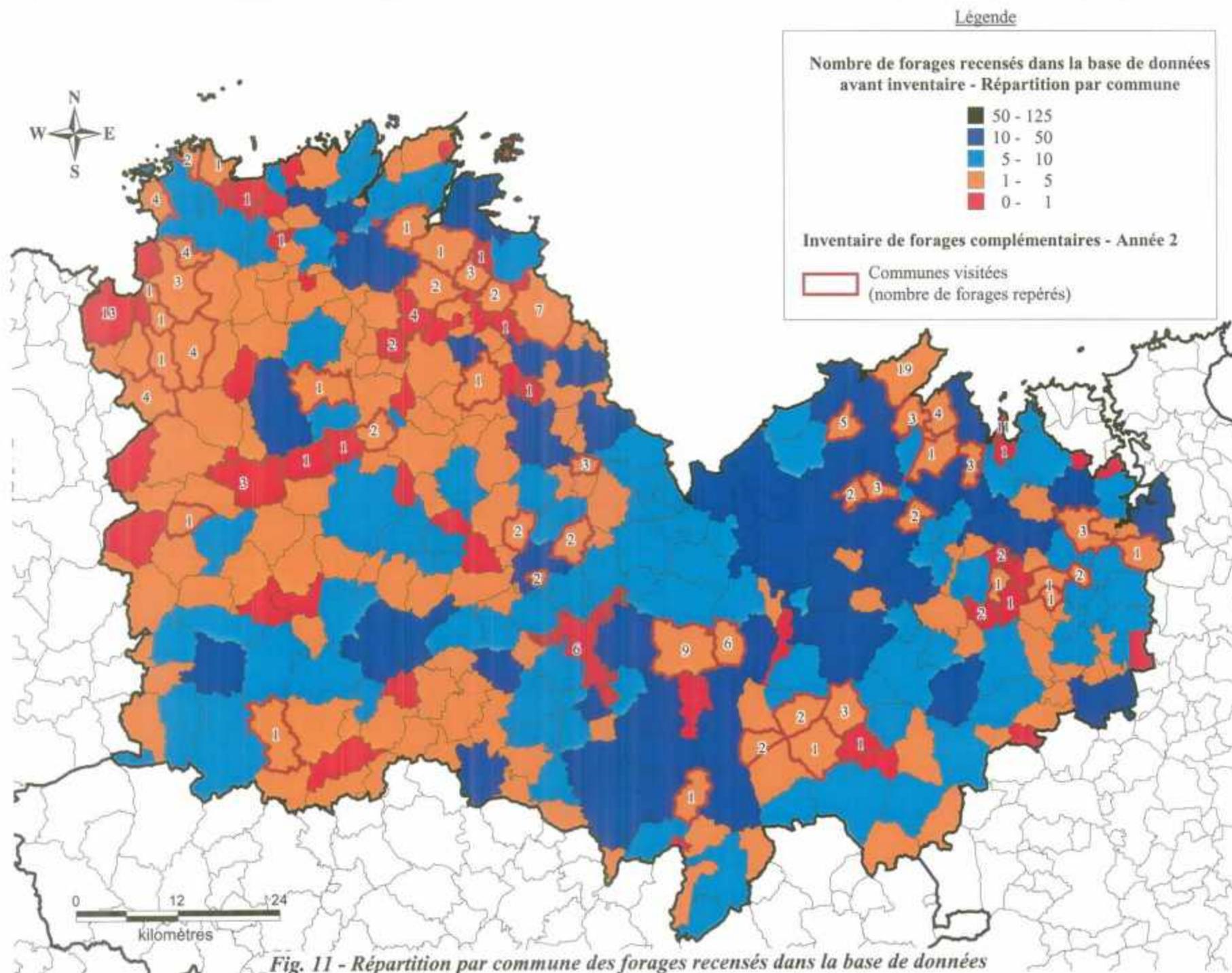


Fig. 11 - Répartition par commune des forages recensés dans la base de données
Localisation des communes visitées lors de l'inventaire de l'année 2
Département des Côtes d'Armor - Etat à fin octobre 2003

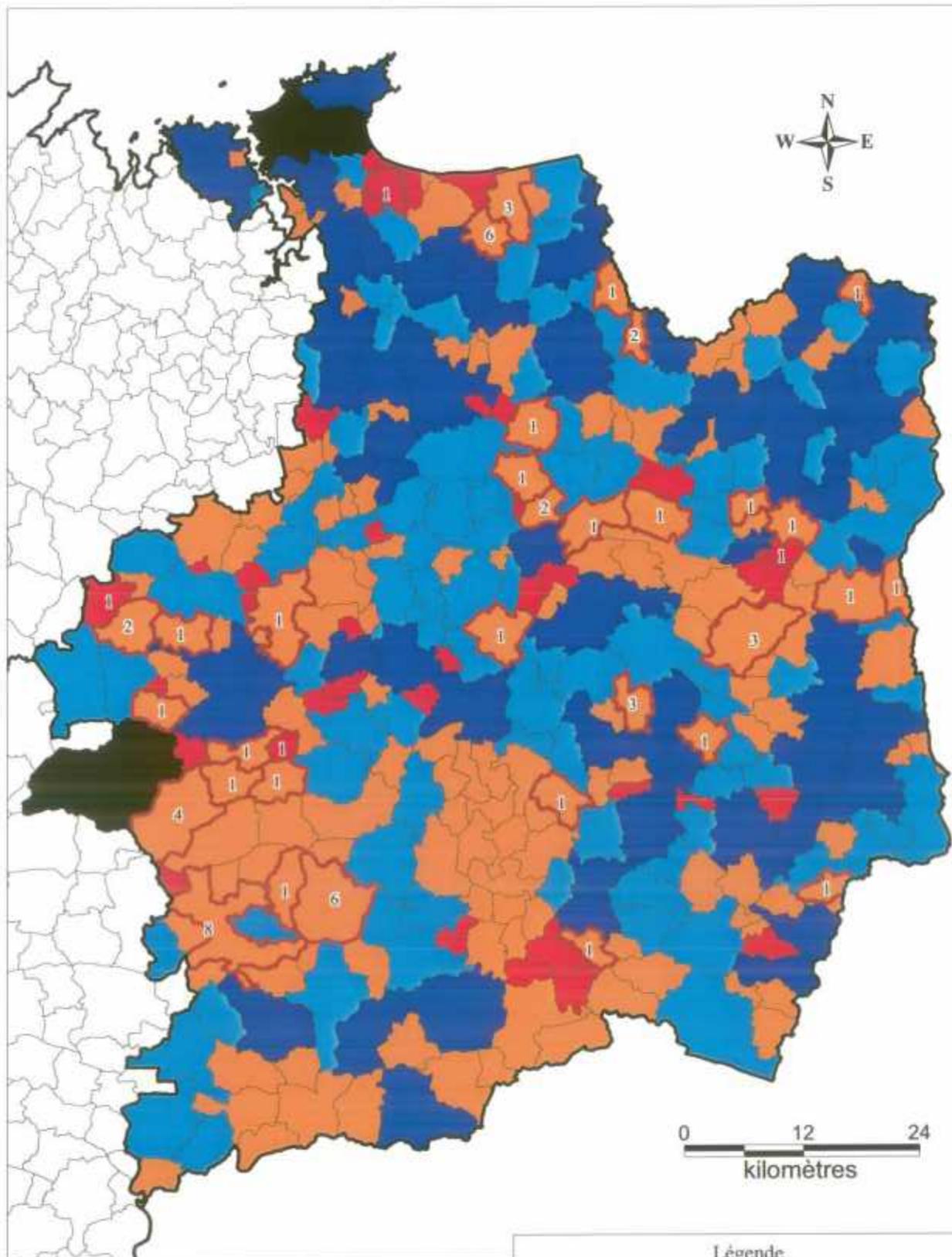
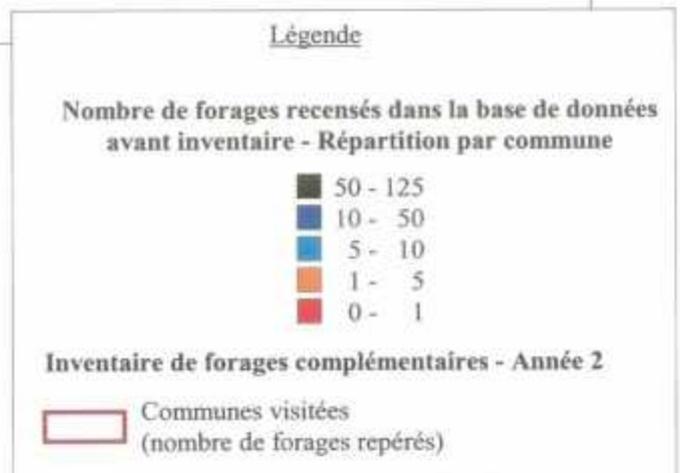


Fig. 12 -
Répartition par commune des forages recensés
dans la base de données
Localisation des communes visitées
lors de l'inventaire de l'année 2
Département de l'Ille-et-Vilaine
Etat à fin octobre 2003



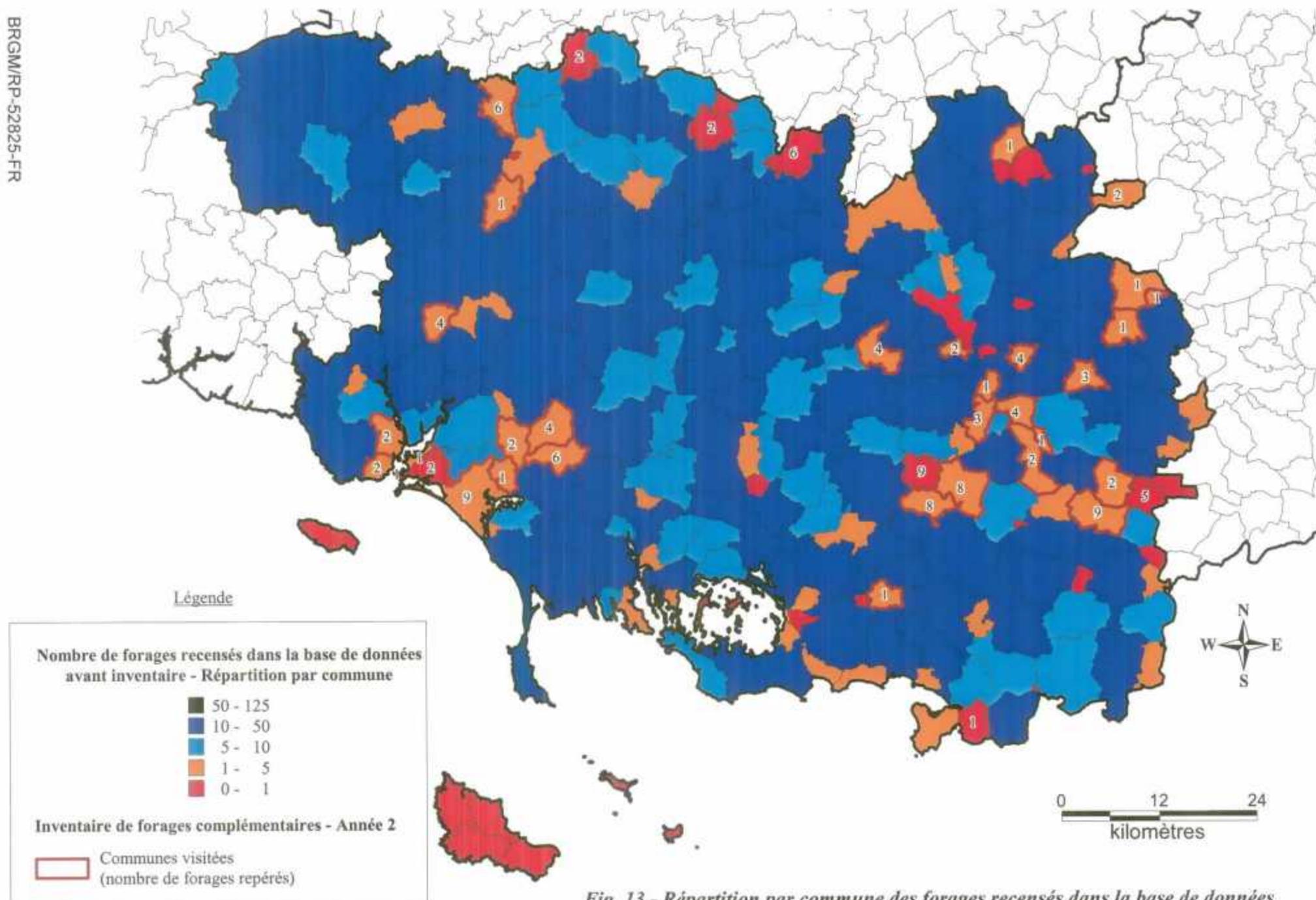
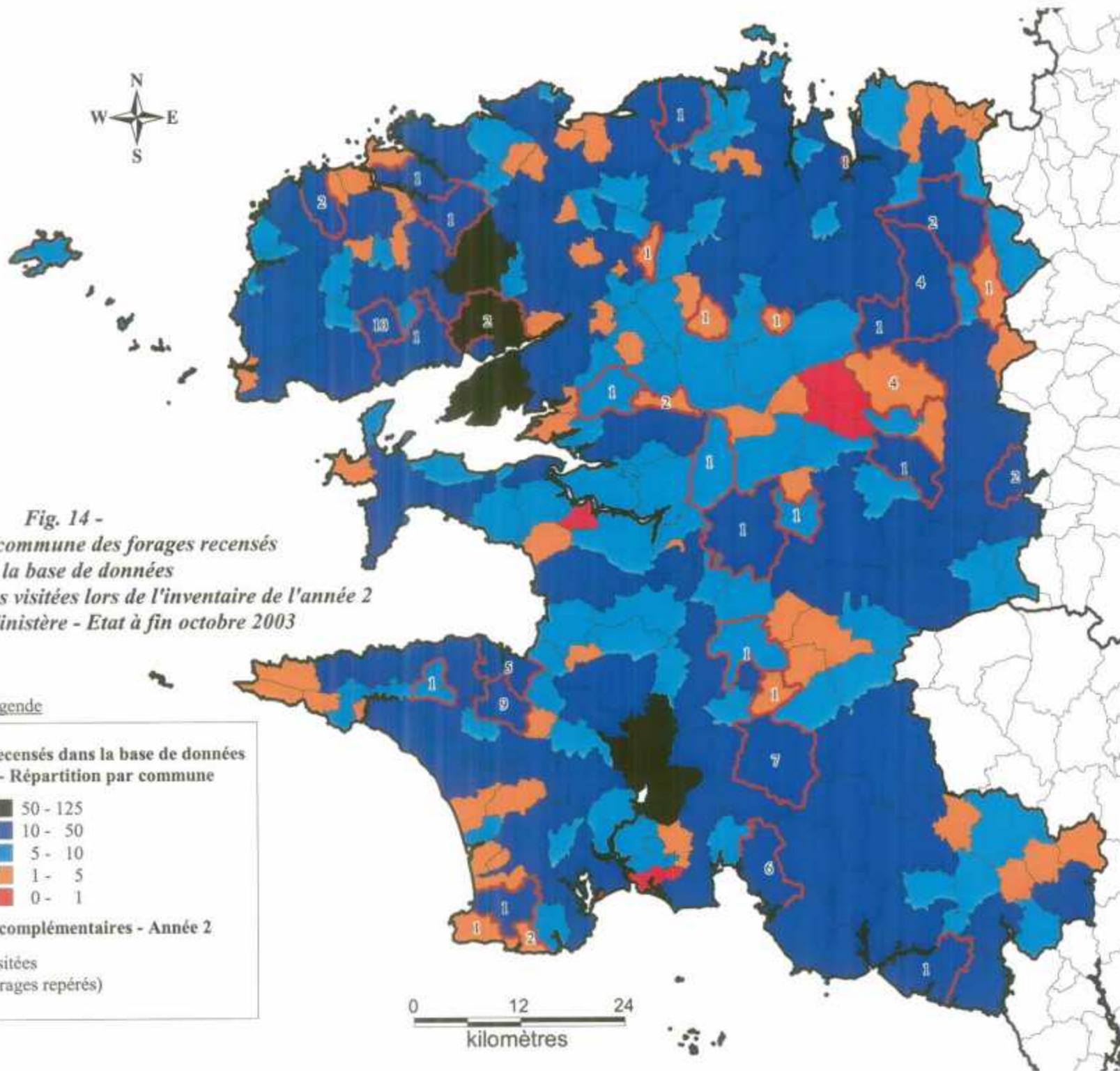


Fig. 13 - Répartition par commune des forages recensés dans la base de données
Localisation des communes visitées lors de l'inventaire de l'année 2
Département du Morbihan - Etat à fin octobre 2003



3.3.3. Informatisation des données recherchées

Suite au travail de localisation sur le terrain, un numéro BSS et un code géologique sont affectés à chaque forage et ses coordonnées en Lambert 2 sont calculées. Les informations recueillies sur le terrain ainsi que les données déjà renseignées (fiche BSS) sont rassemblés dans des fichiers informatiques.

Ces fichiers sont réalisés selon le même modèle que la base de données sur les eaux souterraines (cf. 3.1.1.), et comportent les informations suivantes :

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

Ces différents fichiers ont été insérés à la base de données sur l'eau souterraine (enrichissement de la base avec 451 nouveaux forages).

Suite à cet ajout des nouveaux forages, la nouvelle répartition du nombre de forages par département est la suivante :

Ille-et-Vilaine	Morbihan	Finistère	Côtes d'Armor	Total Bretagne
2232	2729	3617	2002	10580

Tabl. 10 - Nombre de forages recensés dans la base de données (après la recherche de forages complémentaires de l'année 2)

3.4. CONCLUSION SUR L'AVANCEMENT DU TRAVAIL D'INTERPRETATION DES DONNEES DE FORAGES

Dans le cadre de la 2^{ème} année du projet SILURES Bretagne, deux phases ont été réalisées lors de la valorisation des données des forages :

- tout d'abord, les informations géologiques et hydrogéologiques de tous les forages du Finistère (3962 ouvrages) ont été valorisés selon leur niveau de détail, pour approcher la géométrie des réservoirs aquifères du département :
 - le découpage a été réalisé en précisant la fiabilité de l'interprétation (échelle),
 - l'épaisseur des horizons géologiques (6 catégories définies) a été chiffrée selon leur existence dans la coupe du forage ;
- ensuite, un recensement des termes utilisés par les foreurs des Côtes d'Armor a permis de débiter le travail d'interprétation des coupes géologiques de ce département ;
- enfin, la base de données a été alimentée dans l'optique d'une valorisation future de ces nouvelles données : 451 forages supplémentaires, localisés précisément sur le terrain, ont permis d'alimenter la base.

Au cours de la 3^{ème} année du projet :

- l'interprétation des données géologiques des forages se poursuivra dans les autres départements ;
- le travail de recherche de forages complémentaires continuera dans d'autres secteurs sous-alimentés.

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 des eaux souterraines à l'alimentation des rivières. Une carte sera alors créée à partir des contours des bassins versants au droit des stations de mesure du débit journalier des cours d'eau bretons.

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

Plusieurs étapes seront alors nécessaires :

- recensement des stations hydrométriques et des bassins versants correspondants,
- choix des bassins à modéliser,
- achat des débits journaliers des rivières choisies,
- recensement des postes météorologiques présents sur la Bretagne,
- achat des données météorologiques existantes sur les bassins choisis,
- modélisation des hydrogrammes : calcul des parts d'écoulements souterrains participant aux débits des rivières, et approche des caractéristiques des réservoirs souterrains,
- comparaison des comportements des bassins en fonction des résultats obtenus.

4.2. CHOIX DES BASSINS A MODELISER

Plusieurs critères de choix ont été à l'origine du choix des bassins versants modélisés au cours de la 2^{ème} année du projet SILURES Bretagne :

- besoin de connaissances vis-à-vis des partenaires du projet,
- correspondance entre les périodes de mesure des données climatiques et hydrométriques acquises,
- une éventuelle appartenance du bassin au programme Bretagne Eau Pure,
- existence d'une station hydrométrique (dont les mesures ont été validées) contrôlant une grande superficie du bassin versant.

En fonction des critères évoqués ci-dessus les 21 bassins versants suivants ont été choisis :

- la Rosette (22) à l'amont de la station de Mégrit (superficie du bassin : 102 km²),
- la Rance (22) à la station de Saint-Jouan-de-l'Isle (153 km²),
- la Maudouve (22) à la station de Saint-Donan (24.2 km²),
- le Frémur (22) à la station de Pleslin-Trigavou (37.5 km²),
- le Léguer (22) à la station de Pluzunet (353 km²),
- l'Evron (22) à la station de Coëtmieux (142 km²),
- le Blavet (22) à la station de Kérien (Kerlouet) (20.6 km²),
- le Trieux (22) à la station de Saint-Clet (Moulin de Châteaulin) (417 km²),
- l'Urne (22) à la station de Plédran (40.4 km²),

- l'Oust (56-22) à la station de Pleugriffet (La Tertraie) (929 km²),
- le Loc'h (56) à la station de Brech (179 km²),
- l'Arz (56) à la station de Molac (148 km²),
- la Claie (56) à la station de Saint-Jean-Brévelay (137 km²),
- l'Inam (56) à la station de Faouët (Pont Priant) (118 km²),
- l'Aff (56-35) à la station de Quelneuc (334 km²),
- le Coët-Dan (56) à la station de Guénin (Stimoës) (11.9 km²),
- l'Aber Wrac'h (29) à la station du Drennec (24 km²),
- le Dourduff (29) à la station de Garlan (45 km²),
- la Penzé (29) à la station de Taulé (Penhoal) (141 km²),
- l'Aven (29) à la station de Pont-Aven (Voie express) (165 km²),
- l'Ellé (29) à la station du Faouët (142 km²).

La figure 15 permet de localiser l'étendue des 21 bassins versants et les stations hydrométriques associées. Cette figure montre également (en grisé) les 17 bassins versants modélisés lors de la première année du projet.

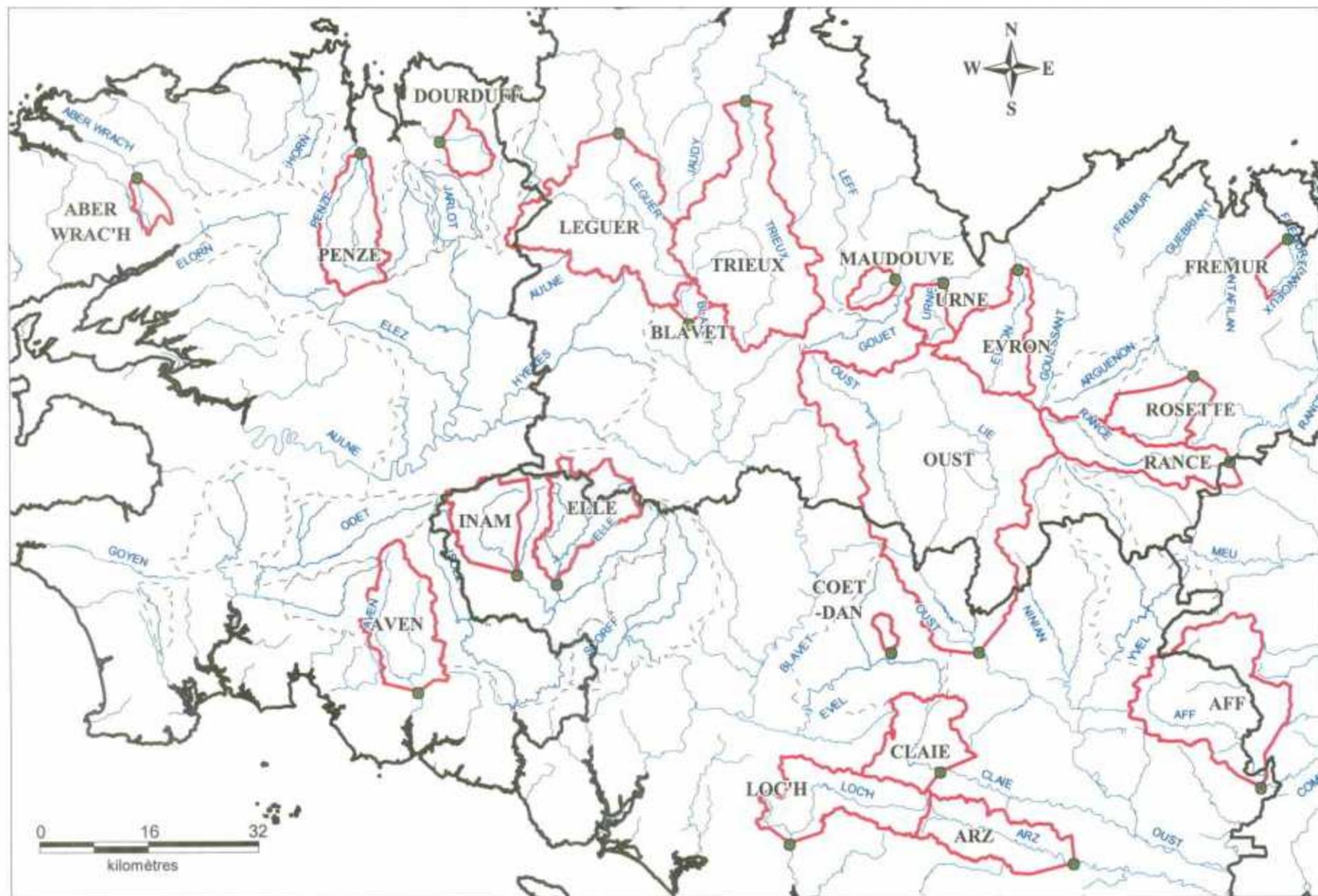


Fig. 15 - Localisation des 21 bassins versants modélisés lors de la seconde année du projet

4.3. ACQUISITION DES DONNEES

4.3.1. Données météorologiques

Les demandes de données météorologiques (pluie et évapotranspirations potentielles ETP) du BRGM Bretagne ont été suivies d'une extraction et d'un envoi Météo-France par mail au cours des mois de septembre et octobre 2002 (cf. détail dans le tableau 11).

Station climatique	N° station	Pluie/ETP	Période extraite
GRANDCHAMP	56067002	Pluie	1994-2000
ELVEN	56053001	Pluie	1993-2000
PLOUDANIEL	29179001	Pluie	1988-2000
GUIPAVAS	29075001	ETP	1988-2000
GUER	56075001	Pluie	1993-2000
PLELAN	35223001	Pluie	1993-2000
MELGVEN	29146001	Pluie	1993-2000
LANRODEC	22116002 et 22116003	Pluie	1994-2000
KERPERS	22092001	Pluie	1994-2000
GUERLESQUIN	29067001	Pluie	1994-2000
BULAT-PESTIVIEN	22023001	Pluie	1994-2000
ST BRIEUC-TREMUSON	22372001	Pluie et ETP	1994-2000
LAMBALLE	22093001	Pluie	1994-2000
BREHAND	22015001	Pluie	1994-2000
QUINTINIC	22261002	ETP	1994-2000
PLOUGUENAST	22219003	Pluie et ETP	1994-2000
PLEMET	22183001	Pluie	1994-2000
ROSTRONEN	22266001	Pluie et ETP	1993-2000
MORLAIX	29151001	Pluie	2000
PLEYBER-CHRIST	29163002	Pluie	2000
CLOITRE-ST THEGONNEC	29034001	Pluie	1998 et 2000
SIZUN	29277001	Pluie	1997-2000
PESLIN-TRIGAVOU	22190002	Pluie	1991-2001
PLEURTUIT	35228001	ETP	1991-2001
PLOURAY	56170001	Pluie	1993-2000
GOURIN	56066001	Pluie	1993-2000

Tabl. 11 - Périodes d'extraction des pluviométries et ETP journalières à Météo-France

Par ailleurs, les données météorologiques extraites lors de la première année du projet ont été reprises et utilisées.

4.3.2. Hydrogrammes des rivières

En utilisant les données acquises lors de la première année du projet (coordonnées et caractéristiques des stations hydrométriques de Bretagne), les débits journaliers de certaines stations ont été extraites de la Banque HYDRO (Banque Nationale de Données pour l'Hydrométrie et l'Hydrologie) (cf. tableau 12).

Cours d'eau	Station hydrométrique	N° station	Période extraite
Rosette	Mégrit	J1114010	1994-2000
Rance	Saint-Jouan-de-l'Isle	J0611610	1994-2000
Maudouve	Saint-Donan	J1524010	1994-2000
Frémur	Pleslin-Trigavou	J1004520	1992-2001
Léguer	Pluzunet	J2233020	1994-2000
Evron	Coëtmieux	J1324010	1994-2000
Blavet	Kérien (Kerlouet)	J5202110	1994-2000
Trieux	Saint-Clet (Moulin de Châteaulin)	J1721720	1994-2000
Urne	Plédran	J1405310	1994-2000
Oust	Pleugriffet (La Tertraie)	J8202310	1994-2000
Loc'h	Brech	J6213010	1994-2000
Arz	Molac	J8813010	1993-2000
Claie	Saint-Jean-Brévelay	J8433010	1994-2000
Inam	Fauët (Pont Priant)	J4734010	1993-2000
Aff	Quelneuc	J8632410	1993-2000
Coët-Dan	Guénin (Stimoës)	J5606810	1994-1999
Aber Wrac'h	Drennec	J3205710	1988-2000
Dourduff	Garlan	J2514010	1994-2000
Penzé	Taulé (Penhoat)	J2723010	1989-2000
Aven	Pont-Aven (Voie express)	J4623020	1993-2000
Ellé	Fauët	J4712010	1993-2000

Tabl. 12 - Périodes d'extraction des débits journaliers de la Banque HYDRO

4.4. MODELISATION DES HYDROGRAMMES DES RIVIERES

Des modélisations des écoulements mesurés dans les cours d'eau aux stations hydrométriques citées ci-dessus ont été effectuées avec le logiciel Gardénia, développé par le BRGM, afin d'évaluer, pour chaque rivière, la participation du ruissellement et des écoulements souterrains à l'écoulement global.

Les modélisations des 21 bassins versants ont été réalisées avec un modèle à deux réservoirs profonds pour simuler les deux régimes d'écoulement existant dans les socles bretons : 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.

4.4.1. Validation et mise en forme des données

Validation des données de départ

Avant l'utilisation des données brutes de débit, pluie et ETP, une phase de validation des valeurs s'avérait nécessaire. Cette étape consiste à comparer la lame d'eau écoulee sur le bassin versant (volume d'eau écoulee au niveau de l'exutoire divisé par la surface du bassin) à la totalité des pluies efficaces.

L'ETP (cf. figure 16) représente la quantité d'eau théorique qui retourne à l'atmosphère par l'intermédiaire de l'évaporation directe ou de la transpiration des plantes avant de pouvoir s'écouler. La quantité réelle d'eau qui subit l'évapotranspiration (évapotranspiration réelle ETR) dépend d'une part des pluies tombées, et d'autre part de l'état de la Réserve Facilement Utilisable (RFU), qui représente l'eau retenue par une couche très superficielle du sol dans laquelle se produit l'évapotranspiration (zone d'influence des racines de la végétation).

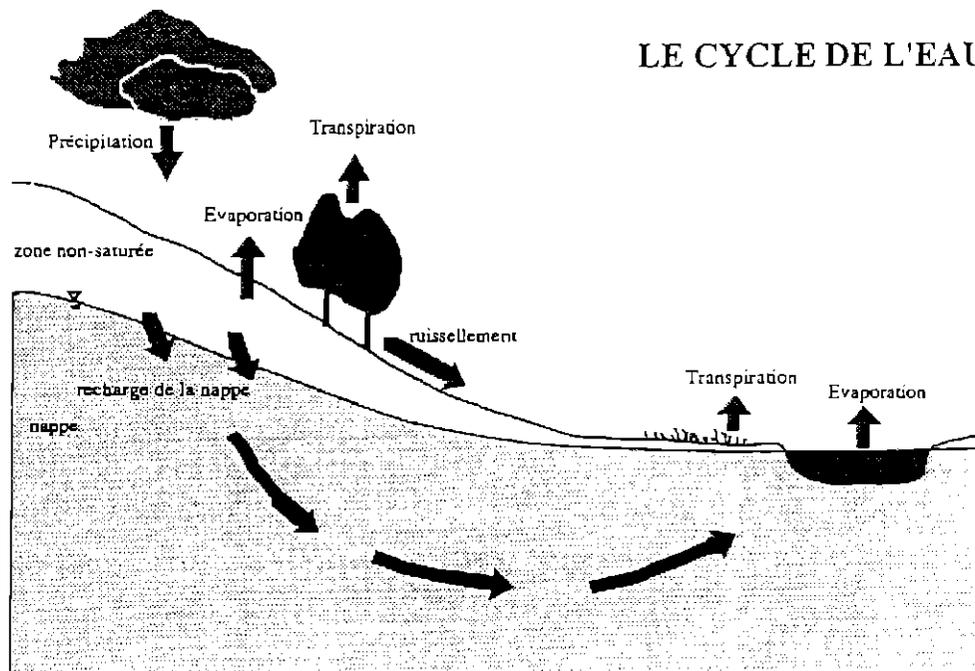


Fig. 16 - Schéma du cycle de l'eau

Les pluies efficaces représentent la quantité d'eau journalière, issue des pluies, sujette à écoulement. Cette quantité est la différence entre les pluies totales et l'ETR. Cette eau peut ruisseler (écoulement rapide) ou s'écouler par voie souterraine (écoulement lent). Le ruissellement peut être épidermique (de surface) ou hypodermique (dans la couche superficielle du sol).

La comparaison entre les pluies efficaces et la lame d'eau écoulee doit faire apparaître deux grandeurs égales puisque la totalité des pluies, participant soit au ruissellement soit à l'infiltration, doivent se retrouver au niveau de l'exutoire du bassin versant.

Mise en forme des données

Le logiciel Gardénia nécessite « en données d'entrée », les pluies et ETP journalières des bassins versants étudiés. Le calcul de ces valeurs uniques (pluie ou ETP représentative de l'ensemble de la surface du bassin versant), a été réalisé à partir des données ponctuelles localisées aux stations de Météo France.

Le contour de chaque bassin versant a été recoupé avec la carte des normales de pluies interannuelles sur la période 1961-1990 (origine Météo France). Le bassin a ainsi été divisé en secteurs pluviométriques dans lesquels se situait au moins une station Météo France. Un poids proportionnel à la surface de la zone météorologique du bassin versant a alors été affecté à chaque station.

Les régressions obtenues pour les 21 bassins versants sont précisées dans le tableau 13 en annexe 2.

Comparaison de la lame d'eau et des pluies efficaces

La comparaison entre les pluies efficaces et la lame d'eau écoulée sur les bassins versants s'effectue au pas de temps de l'année hydraulique, c'est à dire de septembre à septembre (par exemple, l'année hydraulique 1995 se déroule du 01/09/1994 au 31/08/1995). En effet, en vue de cette comparaison, il est plus logique de considérer les pluies à partir de septembre car elles contribuent aux débits pendant la période de crue et la période d'étiage.

Les graphiques de la figure 17 (un graphique par bassin versant) de l'annexe 2 présentent ces comparaisons.

Les adéquations entre les pluies efficaces et les lames d'eau ne sont pas tout à fait parfaites pour deux raisons :

- d'une part, le calcul de la pluie efficace utilise arbitrairement une RFU pour l'ensemble du bassin versant, or cette valeur peut être très hétérogène sur le bassin versant et peut même être en moyenne distincte de la valeur choisie,
- d'autre part, l'ETP affectée à l'ensemble du bassin versant provient d'une seule station de Météo France.

4.4.2. Calage des paramètres du modèle

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

Les paramètres caractérisant les réservoirs de la modélisation sont les suivants :

- RUMAX (mm) : RFU maximale du sol,
- RUIPER (mm) : hauteur d'équilibre ruissellement-percolation,
- TAR1 (mois) : temps de demi-tarissement du premier réservoir souterrain,
- TPER1 (mois) : temps de demi-percolation du premier réservoir souterrain,
- TAR2 (mois) : temps de demi-tarissement du deuxième réservoir souterrain,
- TPER2 (mois) : temps de demi-percolation du deuxième réservoir souterrain.

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.

La paramètre RUMAX est estimé suite à la comparaison des pluies efficaces et de la lame d'eau écoulée. C'est un paramètre nécessaire au calcul des pluies efficaces (RFU). Les temps de demi-tarissement des deux réservoirs souterrains (TAR1 et TAR2) sont calculés d'après les courbes exponentielles de décrues régulières (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 :

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

4.4.3. Résultats corrigés sur le bassin versant du Gouët

Les résultats obtenus lors de la 1^{ère} année du projet sur le bassin versant du Gouët (22) au droit de la station de St-Julien (J1513010, superficie 138 km²) ont été revus et corrigés suite aux conseils du Conseil Général des Côtes d'Armor.

Le calage des paramètres sur les années 1998-1999 n'était en effet pas optimal (corrélation 77 %, et 82 % sur les années 1995-2000) en raison de l'utilisation d'une chronique d'ETP journalière à Kerpert incomplète.

En utilisant l'ETP journalière à St-Brieuc (série complète) en complément de celle de Kerpert, ainsi que les régressions suivantes :

$$\begin{aligned} P \text{ Gouët} &= 0,40 P \text{ La Harmoye} + 0,60 P \text{ St-Donan} \\ ETP \text{ Gouët} &= 0,40 ETP \text{ Kerpert} + 0,60 ETP \text{ St Brieuc} \end{aligned}$$

un meilleur calage des paramètres sur les années 1995-1996 (années fréquemment utilisées pour la calage) a fourni un meilleur résultat (coefficient de corrélation : 92 %).

En utilisant ces paramètres pour la modélisation Gardénia sur les années 1995-2000, ce coefficient est égal à 88 % ; le résultat obtenu étant plus satisfaisant en comparant les signaux modélisés et observés (pic de crue et temps de décroissance).

Après correction, la contribution des eaux souterraines au régime du Gouët s'élève donc à 61 % de l'écoulement total (contre 42 % initialement calculés).

Les nouveaux résultats obtenus sur le bassin versant du Gouët sont reportés dans les tableaux cités au chapitre 4.4.4.

4.4.4. Résultats obtenus sur les 21 bassins versants

Les simulations suivantes ont été testées : aquifères souterrains à 2 réservoirs, pas de temps journalier.

Compte-tenu de la disponibilité des données, les modélisations ont été réalisées pour les périodes indiquées dans le tableau 14 de l'annexe 3, après un calage des paramètres sur deux années. Les ajustements susceptibles de représenter au mieux la réalité ont été obtenus en considérant les paramètres détaillés dans le tableau 14.

Les graphiques des figures 18 et 19 de l'annexe 3 (deux graphiques pour chaque bassin : le premier correspond à la figure 18 et le second à la figure 19) illustrent l'ajustement du débit total calculé (en violet) au débit mesuré à la station hydrologique (en bleu), et les débits des deux réservoirs souterrains (supérieur en jaune et inférieur en vert) lors des périodes de calage et de modélisation.

Pour la période considérée, les précipitations tombées sur le bassin représentent une lame d'eau moyenne exprimée en millimètres par an (cf. tableau 15 de l'annexe 3). L'évapotranspiration est également exprimée en millimètres par an et les précipitations efficaces correspondant au solde restant disponible pour le ruissellement et/ou l'infiltration, se répartissent en un écoulement arrivant à la rivière après un cheminement rapide (ruissellement, écoulement retardé) et en un cheminement lent (écoulement souterrain). Le tableau 15 de l'annexe 3 rassemble les résultats ultimes des modélisations.

Les contributions des eaux souterraines au régime des cours d'eau s'élèvent donc entre 38 et 78 % de l'écoulement total.

Les graphiques des figures 20 et 21 de l'annexe 3 (deux graphiques pour chaque bassin) montrent l'influence de l'écoulement souterrain durant les différentes années hydrauliques, et durant les mois de ces années. Les différents débits sont exprimés en terme de lame d'eau écoulée sur le bassin versant (en mm).

Les graphiques de la figure 20 détaillent l'importance que prend l'écoulement souterrain lors d'une année sèche (1992, 1996 et 1997) où le débit rapide (ruissellement) décroît plus fortement que les débits souterrains (1 : réservoir supérieur et 2 : réservoir inférieur). Ce phénomène illustre le soutien de la nappe en période de sécheresse. Ces figures mettent également en évidence la participation respective des deux réservoirs souterrains à l'écoulement global mesuré à l'exutoire, qui peut être équivalente ou différente.

Les graphiques de la figure 21 montrent une influence prépondérante du réservoir souterrain inférieur (2), par rapport au réservoir supérieur (1), lors de la période d'étiage : globalement du mois de juin au mois de septembre. La tendance s'inverse pour les autres mois de l'année. Ce soutien de la nappe en période d'étiage (l'écoulement souterrain total étant supérieur à environ 80-90 % de l'écoulement global) atteint même son paroxysme aux mois de juillet, août, et septembre où la totalité (100 %) de l'écoulement de la rivière provient de l'écoulement souterrain. Pendant la période de crue (décembre et janvier) ce pourcentage diminue et se situe autour de 40-50 %.

Les écoulements souterrains amortissent les variations climatiques, leur poids relatif augmente :

- vers l'étiage, où ils peuvent représenter la totalité de l'écoulement observable dans la rivière (cas des mois de juillet, août, et septembre),
- et en année « sèche » : pour les années hydrologiques 1992, 1996 et 1997, les cours d'eau sont alimentés à hauteur de 56 à 83 % par les apports souterrains.

4.5. CONCLUSION ET COMPARAISON DES BASSINS EN FONCTION DES RESULTATS OBTENUS

Les coefficients de corrélation (ajustement entre le débit mesuré et calculé de la rivière) obtenus suite aux modélisations varient entre 66 et 94 % (cf. tableau 14). Ces coefficients sont très satisfaisants (> 83 %), sauf pour les bassins versants de la Rosette (coefficient 66 %) et de la Rance (coefficient 73 %) où il existe une chronique d'ETP journalières incomplète (ETP à Trémeur). Par ailleurs, l'année 1997 très sèche est difficilement prise en compte dans les modélisations en raison de la faiblesse des débits mesurés.

Les graphiques de la figure 21 (débits mesurés en millimètres) mettent en évidence :

- des rivières à étiages peu soutenus liés au fait que leurs bassins versants sont soumis aux phénomènes de ruissellement (Rosette, Rance, Oust). Ceci est confirmé par des paramètres RUIPER faibles (15-30 mm) retenus pour la modélisation, qui favorise l'écoulement rapide donc le ruissellement,
- des cours d'eau à étiages soutenus liés au fait que leurs bassins versants sont soumis aux phénomènes d'infiltration (Maudouve, Evron, Trieux). Dans ces bassins, la contribution des eaux souterraines au régime des rivières est très forte,
- des rivières à étiages « intermédiaires ».

En fonction des résultats obtenus (pourcentage d'apport souterrain à l'écoulement global, cf. tableau 15), les 21 bassins versants peuvent être classés en 3 catégories (cf. figure 22) :

- bassins à forte contribution des réservoirs souterrains aux débits des cours d'eau (Maudouve, Evron, Trieux : apport souterrain supérieur à 60 %),
- bassin à assez bonne contribution des réservoirs souterrains aux débits des cours d'eau (Frémur, Léguer, Blavet, Urne, Loc'h, Arz, Claie, Inam, Aff, Coët-Dan, Aber Wrac'h, Dourduff, Penzé, Aven, Ellé : de 51 à 60 %),
- bassin à contribution moyenne des eaux d'origine souterraine aux débits des cours d'eau : le ruissellement est majoritaire (Rosette, Rance, Oust : inférieur à 51 %).

La figure 23 rappelle les résultats obtenus sur les 17 bassins modélisés lors de la 1^{ère} année du projet et représente également ceux obtenus la 2^{ème} année.

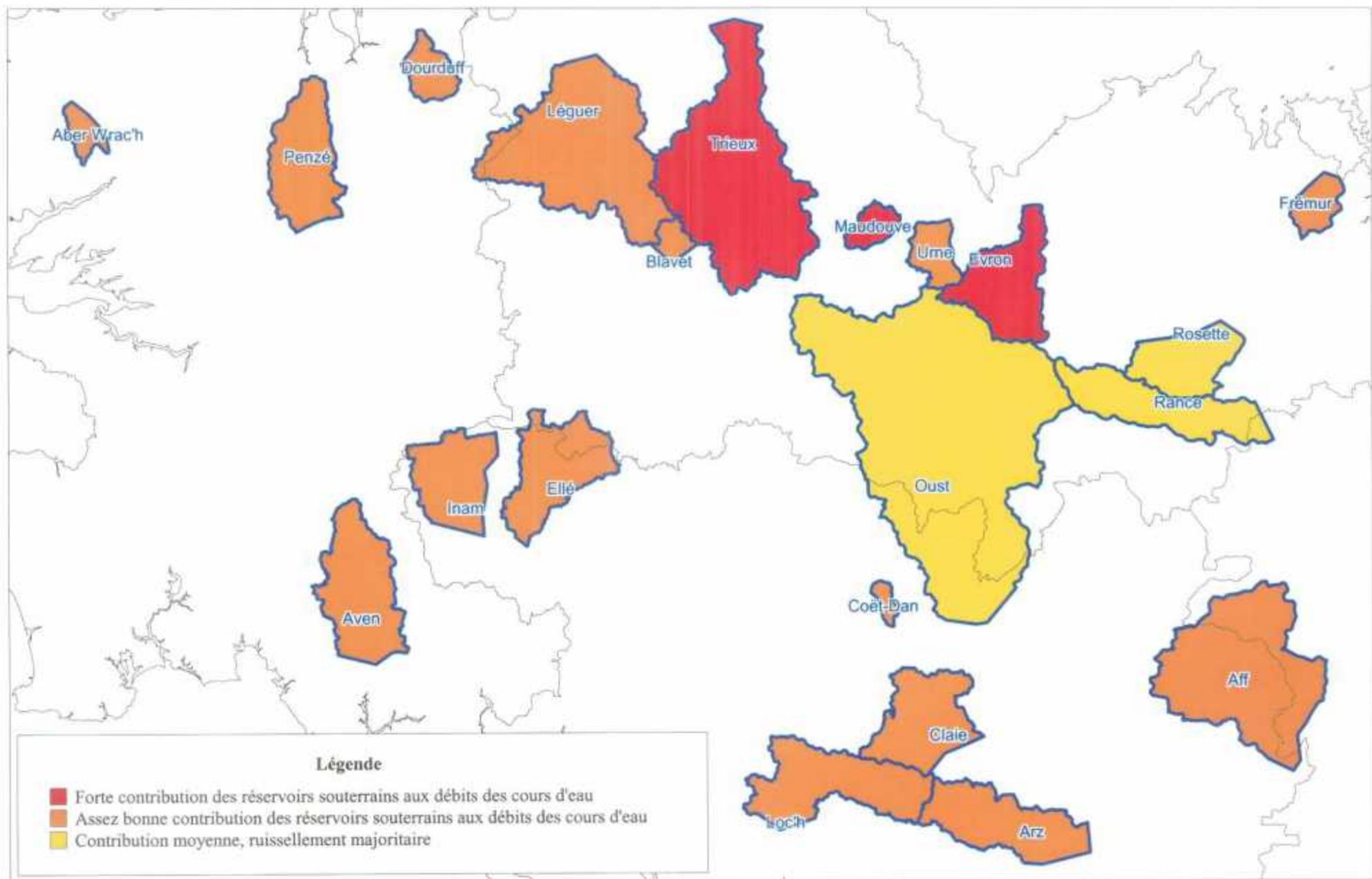


Fig. 22 - Classification des 21 bassins versants selon les résultats des modélisations Gardénia réalisées au cours de la deuxième année du projet

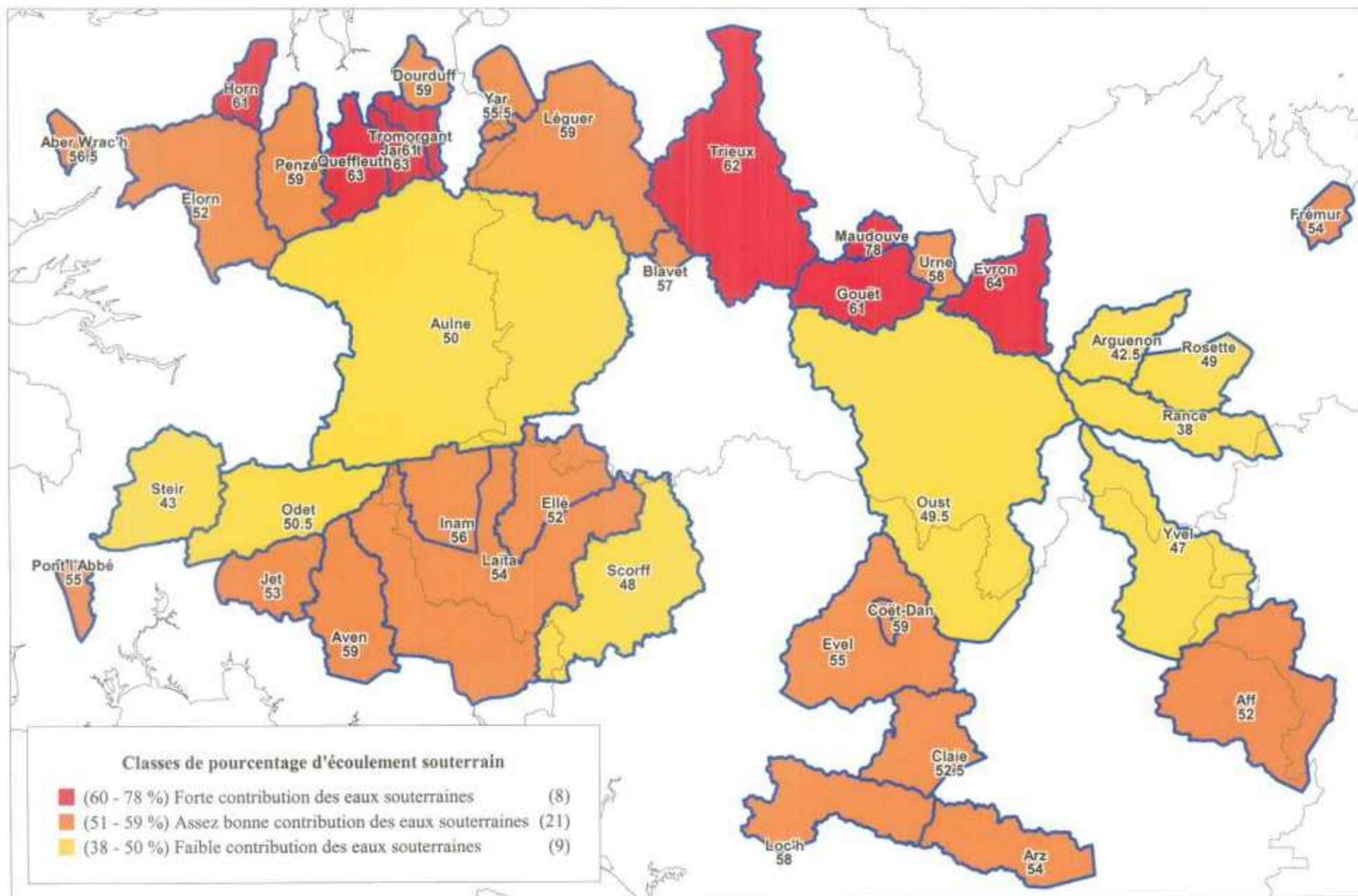


Fig. 23 - Synthèse des résultats obtenus sur les bassins modélisés au cours des deux premières années du projet

La disparité des résultats s'explique par les différences suivantes entre les bassins :

- géologies plus ou moins favorables aux phénomènes d'infiltration /ruissellement,
- encaissement plus ou moins prononcé des vallées des cours d'eau (pentes des versants),
- occupation du sol sur les bassins...

Un superposition de la figure 23 avec une carte géologique synthétique de la Bretagne permet de commencer à formuler des conclusions :

- les formations géologiques situées au Nord du Finistère (micaschistes, orthogneiss, granites...) favorisent les fortes contributions souterraines (Horn 61 %, Penzé 59%, et Queffleuth 63 % de l'écoulement total provient des eaux souterraines),
- au Nord des Côtes d'Armor, les Massifs cristallins (Plouisy, Quintin et Montcontour), semblent former les meilleurs réservoirs d'eau souterraine (Trieux 62%, Gouët 61 %, et Evron 64 %),
- tandis que les schistes briovériens et les schistes et Grès Primaires de Centre Bretagne sont favorables au ruissellement (Oust, Yvel, Rance, Aulne : seulement 38 à 50 %).

4.6. CONCLUSION SUR L'AVANCEMENT DU TRAVAIL D'INTERPRETATION DES HYDROGRAMMES DES RIVIERES

Dans le cadre de la 2^{ème} année du projet SILURES Bretagne, 21 bassins versants ont fait l'objet d'un travail de modélisation des hydrogrammes des rivières (débits journaliers exportés de la Banque HYDRO) à partir des données climatiques du secteur (achetées à Météo-France).

Sur ces 21 bassins, la contribution de l'écoulement souterrain au débit des cours d'eau a été chiffrée et les caractéristiques des réservoirs souterrains ont été approchées (temps de demi-vidange des réservoirs souterrains).

Ce travail sera étendu à d'autres bassins versants de Bretagne au cours de la 3^{ème} année du projet.

Suite aux résultats obtenus, les bassins seront comparés entre eux et classés afin de mettre en évidence leurs tendances aux phénomènes d'infiltration et de ruissellement. La classification actuelle des différentes catégories de bassins versants sera revue et corrigée en fonction des résultats issus des modélisations Gardénia à venir.

Par ailleurs, l'interprétation des données de forages (code géologique, débits instantanés...) permettra de hiérarchiser les formations géologiques de Bretagne en fonction de leurs propriétés hydrogéologiques. Cette classification permettra d'argumenter l'interprétation des résultats des modélisations Gardénia.

Conclusion

Ce rapport constitue un état d'avancement de la 2^{ème} année du projet SILURES Bretagne.

Au cours de la 2^{ème} année, les trois phases d'interprétations débutées lors de la 1^{ère} année du projet se sont poursuivies et ont été menées en parallèle :

- interprétation des données aéromagnétiques et spectrométriques,
- interprétation des données de forages,
- interprétation des hydrogrammes des rivières.

La première phase s'est déroulée en deux temps :

- le secteur de Plabennec a fait l'objet d'une valorisation des données aéromagnétiques et spectrométriques qui a permis de définir une méthodologie de traitement à étendre sur l'ensemble de la Bretagne ;
- le travail de valorisation des données géophysiques à mener sur toute la Bretagne a débuté grâce à l'utilisation d'un outil de traitement automatique.

La deuxième phase a été divisée en deux parties :

- une interprétation des données géologiques de tous les forages du Finistère (3962 ouvrages) afin d'approcher la géométrie des réservoirs aquifères (milieux altéré et fissuré),
- une recherche de 451 forages supplémentaires afin d'enrichir la base de données.

La troisième phase a permis d'interpréter les hydrogrammes de 21 cours d'eau et d'en déduire une classification des bassins versants contrôlés selon les pourcentages d'apport souterrain à l'écoulement global.

Le travail d'interprétation des données se poursuivra au cours de la 3^{ème} année du projet. Il sera suivi en année 4 d'une organisation et d'un archivage des données, puis d'un travail de réalisation et édition de cartographie de synthèse en année 5.

Bibliographie

BLAKELY R.J. and SIMPSON R.W. (1986) - Locating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies - *Geophysics*, 51, 1494-1498

CASTAING C. and DEBEGLIA N. (1992) - A new method for combining gravimetric and geological data - *Tectonophysics*, 204, 151-162

CLINE A.K. (1974) - « Scalar- and Planar- Valued Curve Fitting Using Splines Under Tension » - *Communications of the ACM* v 17 n 4 p. 218-223

DEBEGLIA N., PERRIN J. (2000) - Démonstration de la contribution de la cartographie aéromagnétique basse altitude/haute résolution à la maîtrise des ressources en eaux souterraines et en matériaux de la Bretagne - Etude de faisabilité - Apports des levés géophysiques aéroportés pour la recherche et la protection des ressources en eau : application à la feuille de Ploërmel (Morbihan) - BRGM/RP-50583-FR, 41 p., 19 fig., 1 tabl.

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 ann.

MOUGIN B., collaboration : THOMAS E., JEGOU J-P. (2002) - SILURES Bassins versants - Dourduff (29), Maudouve et Noë Sèche (22), Oust (56), Yvel (56) - Etat d'avancement de l'année 1 - BRGM/RP-51891-FR - 43 p., 3 tab., 11 fig., 3 ann.

THOMAS E., MOUGIN B., DEBEGLIA N., PERRIN J. (2002) - Apport des levés géophysiques aéroportés pour la recherche et la protection des ressources en eau : application à la région du Léon (Finistère) - BRGM/RP-51740-FR, 63 p., 31 fig., 1 tabl.

Annexe 1

Recherche de forages complémentaires

Tabl. 6 - Inventaire de forages complémentaires - Année 2
Département des Côtes d'Armor

NUMERO	NOM COMMUNE	Forages localisés
22008	BOBITAL	1
22012	LA BOUILLIE	5
22024	CALANHEL	1
22045	COHINIAC	2
22065	GOUDELIN	1
22067	GRACES	2
22072	GURUNHUEL	1
22080	L'HERMITAGE-LORGE	6
22086	KERFOT	1
22097	LANDEC(LA)	1
22102	LANGOURLA	3
22104	LANGUEDIAS	2
22110	LANMERIN	1
22119	LANVELLEC	1
22123	LEHON	2
22134	LOUANNEC	1
22143	MATIGNON	4
22148	MERILLAC	1
22156	MOUSTERU	1
22164	PEDERNEC	1
22168	PERROS-GUIREC	1
22170	PLAINE-HAUTE	2
22174	PLEBOULLE	3
22178	PLEHEDEL	2
22179	FREHEL	12
22184	PLEMY	9
22194	PLESTIN-LES-GREVES	13
22196	PLEUDANIEL	1
22200	PLEVEN	2
22201	PLEVENON	7
22207	PLOUARET	4
22216	PLOUGONVER	3
22222	PLOUHA	7
22224	PLOULEC'H	4
22226	PLOUMILLIAU	3
22227	PLOUNERIN	4
22233	PLOURIVO	1
22235	PLOUZELAMBRE	1
22236	PLUDUAL	1
22255	PRENESSAYE(LA)	1
22256	QUEMPER-GUEZENNEC	2

NUMERO	NOM COMMUNE	Forages localisés
22261	QUINTENIC	2
22262	QUINTIN	2
22266	ROSTRENEN	1
22283	SAINT-CLET	4
22286	SAINT DENOUAL	3
22292	SAINT GILLES DU MENE	2
22299	SAINT-HELEN	1
22302	SAINT-JACUT-DE-LA-MER	11
22303	SAINT-JACUT-DU-MENE	2
22311	SAINT LORMEL	3
22315	SAINT-MAUDEZ	2
22319	SAINT-MICHEL-EN-GREVE	1
22323	SAINT POTAN	1
22333	SAINT VRAN	1
22338	SQUIFFIEC	2
22339	TADEN	3
22342	TREBEDAN	1
22343	TREBEURDEN	4
22346	TREDANIEL	6
22353	TREGASTEL	2
22357	TREGON	1
22361	TREGUIDEL	1
22364	TRELIVAN	1
22372	TREMUSON	3
22390	YVIAS	3

Tabl. 7 - Inventaire de forages complémentaires - Année 2
Département de l'Ille-et-Vilaine

NUMERO	NOM COMMUNE	Forages localisés
35003	ANDOUILLE-NEUVILLE	2
35004	ANTRAIN	2
35008	AVAILLES-SUR-SEICHE	1
35010	BAGUER-PICAN	6
35023	BEDEE	1
35024	BETTON	1
35025	BILLE	1
35027	BOISGERVILLY	1
35057	CHAPELLE-BOUEXIC(LA)	1
35063	CHAPELLE-SAINT-AUBERT(LA)	1
35072	CHATILLON-EN-VENDELAIS	1
35086	COMBOURTILLE	1
35089	COUYERE(LA)	1
35110	FEINS	1
35116	FRESNAIS(LA)	1
35118	GAHARD	1
35127	GUIGNEN	6
35164	MARCILLE-RAOUL	1
35168	MAURE-DE-BRETAGNE	8
35178	MEZIERES-SUR-COUESNON	1
35187	MONTERFIL	1
35190	MONTHAULT	1
35204	NOUVOITOU	1
35223	PLELAN-LE-GRAND	4
35232	PRINCE	1
35259	SAINT-BROLADRE	3
35264	SAINT-DIDIER	1
35290	SAINT-MALON-SUR-MEL	1
35297	SAINT-MEEN-LE-GRAND	1
35302	SAINT-ONEN-LA-CHAPELLE	2
35319	SAINT-THURIAL	1
35327	SERVON-SUR-VILAINE	3
35329	SOUGEAL	1
35340	TREFFENDEL	1
35347	VAL-D'IZE	3
35351	VERGER(LE)	1

Tabl. 8 - Inventaire de forages complémentaires - Année 2
Département du Morbihan

NUMERO	NOM COMMUNE	Forages localisés
56012	BEIGNON	1
56025	BRIGNAC	1
56029	CALAN	4
56030	CAMOEL	1
56043	CONCORET	2
56045	LE COURS	9
56051	CRUGUEL	4
56060	LES FOUGERETS	2
56064	GLENAC	5
56096	LANDAUL	6
56097	LANDEVANT	4
56099	LANGOELAN	6
56107	LARMOR-PLAGE	2
56108	LARRE	8
56109	LAUZACH	1
56118	LOCMIQUELIC	1
56121	LORIENT	2
56133	MISSIRIAC	4
56135	MOLAC	8
56138	MONTERREIN	4
56148	NOSTANG	2
56154	PEILLAC	9
56156	PERSQUEN	1
56169	PLOUHINEC	9
56180	PORCARO	1
56181	PORT-LOUIS	1
56187	QUILY	2
56191	REMINIAC	3
56193	RIANTEC	2
56202	SAINT-ABRAHAM	1
56209	SAINTE-BRIGITTE	2
56211	SAINT-CONGARD	2
56213	SAINT-GERAND	2
56220	SAINTE-HELENE	1
56224	SAINT-LAURENT	1
56226	SAINT MALO DE BEIGNON	1
56228	SAINT-MARCEL	3
56235	SAINT-SAMSON	6

Tabl. 9 - Inventaire de forages complémentaires - Année 2
Département du Finistère

NUMERO	NOM COMMUNE	Forages localisés
29007	BERRIEN	4
29014	BOTSORHEL	1
29019	BREST	1
29030	CLEDER	1
29033	CLOITRE-PLYBEN	1
29034	CLOITRE-ST-TREGONNEC	1
29039	CONCARNEAU	6
29046	DOUARNENEZ	5
29048	EDERN	1
29049	ELLIANT	7
29069	GUILLERS	10
29075	GUIPAVAS	1
29086	IRVILLAC	2
29110	LANGOLEN	1
29117	LANNILIS	1
29127	LOC-EGUINER-SAINT-THEGONNEC	1
29131	LOCMELAR	1
29132	LOCQUENOLE	1
29139	LOPEREC	1
29145	MEILARS	1
29150	MOELAN SUR MER	1
29158	PENMARCH	1
29162	PLYBEN	1
29171	PLOMEUR	1
29178	PLOUDALMEZEAU	2
29191	PLOUGONVEN	4
29199	PLOUIGNEAU	2
29205	PLOUNEVEZEL	2
29209	PLOUVIEN	1
29211	PLOUYE	1
29224	POULDERGAT	9
29246	SAINT-ELOY	2
29264	SAINT-SERVAIS	1
29284	TREFFIAGAT	2

Annexe 2

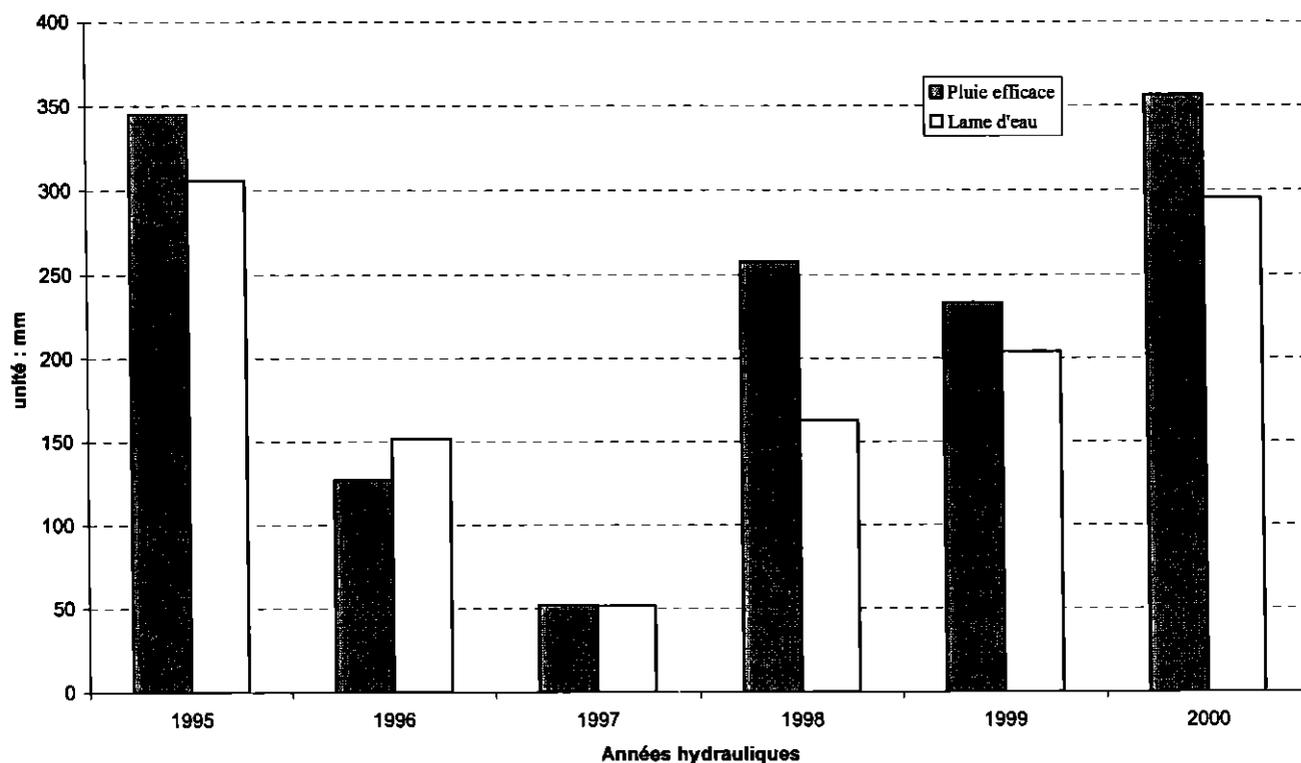
Régressions climatiques des 21 bassins versants
Comparaison de la lame d'eau et des pluies efficaces

Tabl 13 - Sélection des pluies et ETP journalières des bassins versants retenus

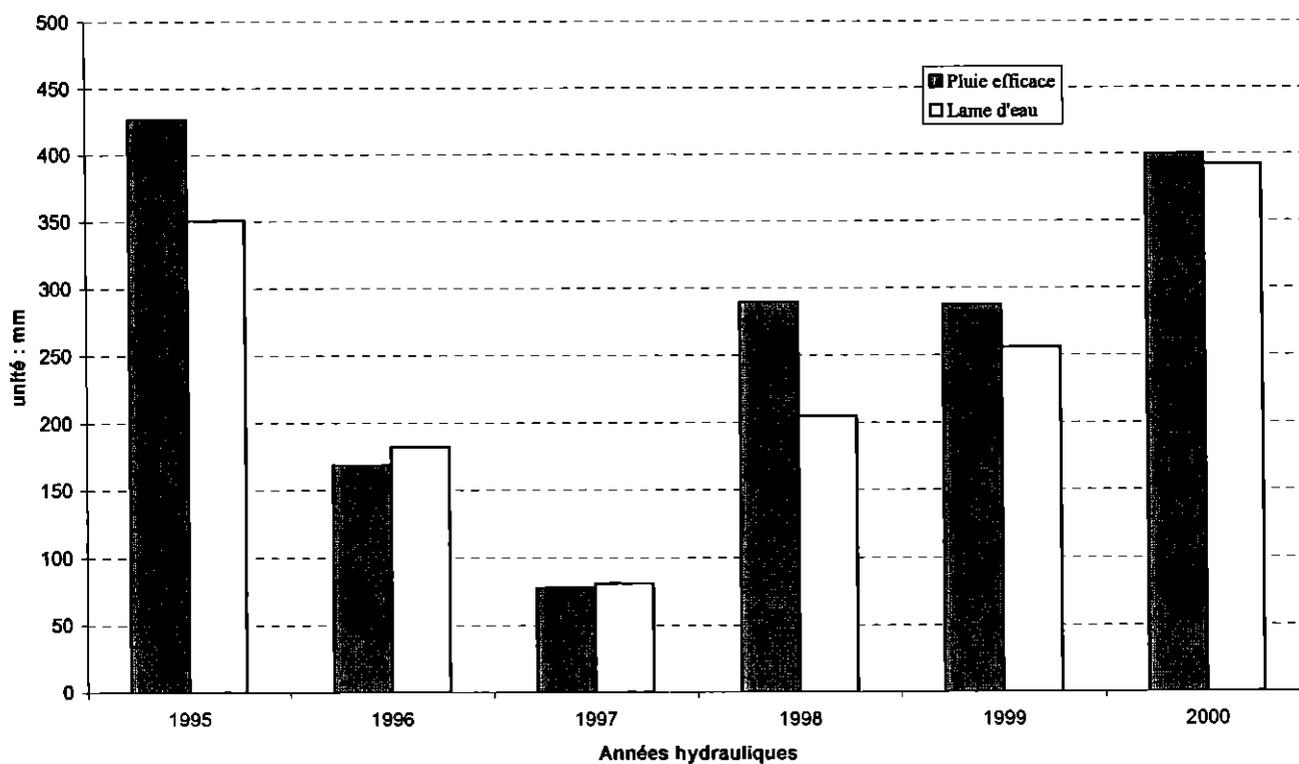
Bassin versant	Dépt	Station hydrologique	N° station	Superficie BV (km ²)	Pluie BV	ETP BV
Rosette	22	Mégrit	J1114010	102	0,52 P Trémeur + 0,46 P Lanrelas + 0,02 P Collinée	ETP Trémeur
Rance	22	Saint-Jouan-de-l'Isle	J0611610	153	0,35 P Trémeur + 0,30 P Lanrelas + 0,20 P Collinée + 0,15 P St-Vran	ETP Trémeur
Loch	56	Brech	J6213010	179	0,15 P Baud + 0,85 P Grandchamp	ETP Pontivy
Arz	56	Molac	J8813010	148	0,96 P Elven + 0,04 P Merdrignac	ETP Ploërmel
Claie	56	Saint-Jean-Brévelay	J8433010	137	0,85 P Moréac + 0,15 P Naizin	ETP Pontivy
Aff	56-35	Quelneuc	J8632410	334	0,80 P Guer + 0,20 P Plélan-le-Grand	ETP Ploërmel
Aber Wrach	29	Drennec	J3205710	24	0,75 P Ploudaniel + 0,25 P Landivisiau	0,75 ETP Guipavas + 0,25 ETP St Servais
Dourduff	29	Garlan	J2514010	45	0,46 P Lanmeur + 0,54 P Plufur	ETP Louargat
Oust	56-22	Pleugriffet (La Tertraie)	J8202310	929	0,02 P Lanrelas + 0,03 P St Vran + 0,51 P Plouguenast + 0,44 P Plémet	0,02 ETP Trémeur + 0,98 ETP Plouguenast
Maudouve	22	St-Donan	J1524010	24,2	P St Donan	ETP St Brieuc
Frémur	22	Pleslin-Trigavou	J1004520	37,5	P Pleslin Trigavou	ETP Pleurtuit
Léguer	22	Phuzunet	J2233020	353	0,18 P Plufur + 0,30 P Louargat + 0,37 P Guerlesquin + 0,15 P Bulat Pestivien	ETP Louargat
Evron	22	Coëtmeux	J1324010	142	0,10 P Lamballe + 0,40 P Bréhand + 0,30 P St Brieuc + 0,10 P St Donan	0,60 ETP Quintenic + 0,40 ETP St Brieuc
Blavet	22	Kérien (Kerlouet)	J5202110	20,6	P Bulat Pestivien	ETP Kerpert
Penzé	29	Taulé (Penhoat)	J2723010	141	0,07 P Morlaix + 0,33 P Landivisiau + 0,40 P Pleyber Christ + 0,20 P Sizun	0,07 ETP Morlaix + 0,53 ETP St Servais + 0,40 ETP Pleyber Christ
Aven	29	Pont-Aven (Voie express)	J4623020	165	0,19 P Coray + 0,35 P Edern + 0,39 P Elliant + 0,07 P Melgven	0,26 ETP Quimperlé + 0,74 ETP Pluguffan
Inam	56	Fauouët (Pont Priant)	J4734010	118	0,18 P Plouray + 0,64 P Gourin + 0,18 P Coray	0,82 ETP Plouray + 0,18 ETP Pluguffan
Ellé	56	Fauouët	J4712010	142	0,30 P St Rostrenen + 0,70 P Plouray	0,30 ETP Rostrenen + 0,70 ETP Plouray
Coët-Dan	56	Guénin (Stimoës)	J5606810	11,9	0,17 P Moréac + 0,83 P Naizin	ETP Pontivy
Trioux	22	Saint-Clet (Moulin de Châteaulin)	J1721720	417	0,25 P Lanrodec + 0,20 P St Donan + 0,20 P Louargat + 0,25 P Kerpert + 0,10 P Bulat Pestivien	0,70 ETP Kerpert + 0,30 ETP Louargat
Urne	22	Plédran	J1405310	40,4	0,90 P St Donan + 0,10 P St Brieuc	ETP St Brieuc

Fig. 17 - Comparaison entre pluie efficace et lame d'eau pour les 21 bassins versants

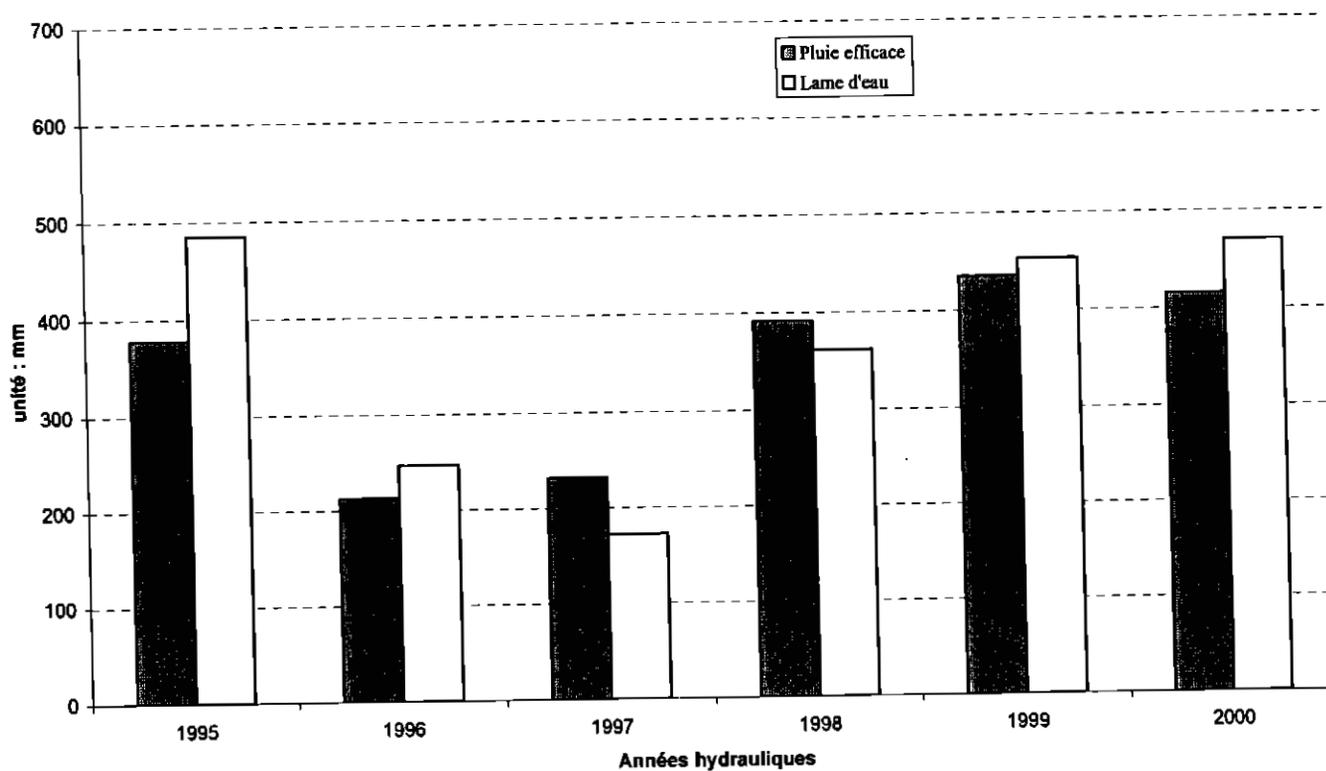
ROSETTE



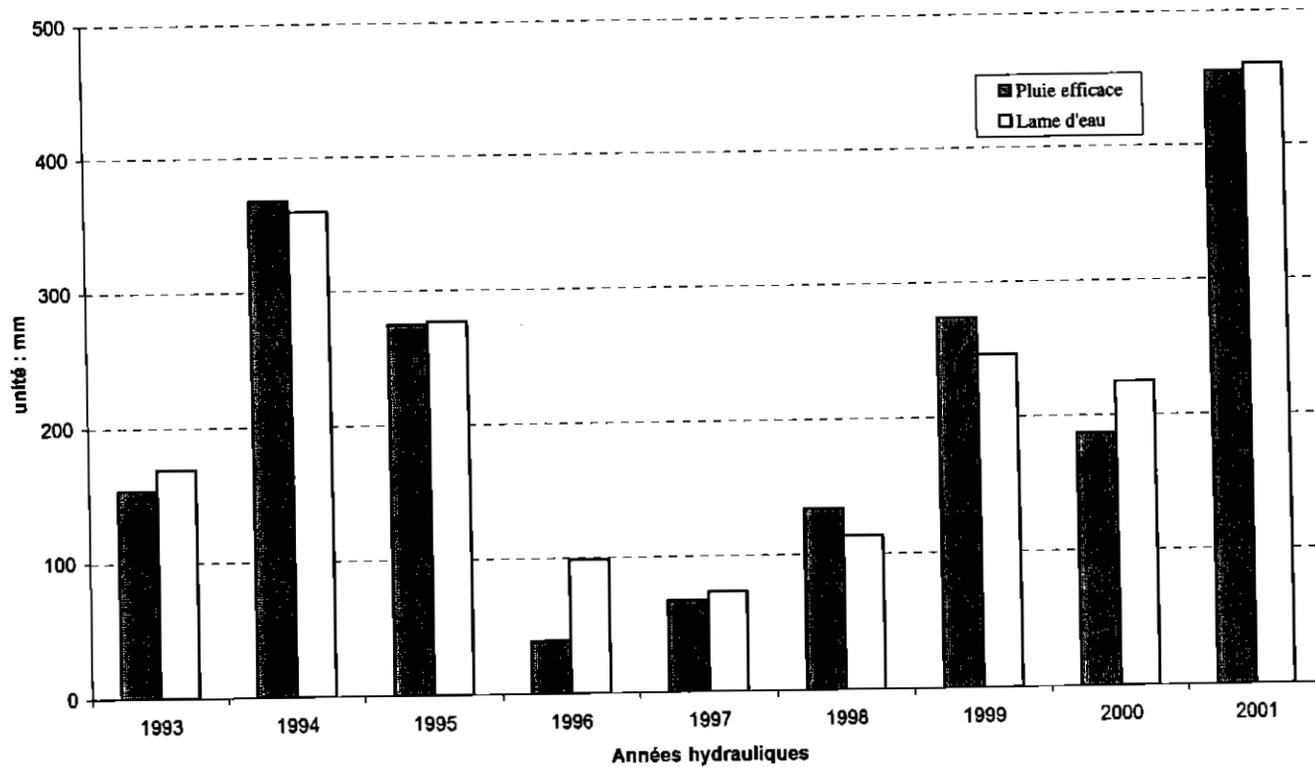
RANCE



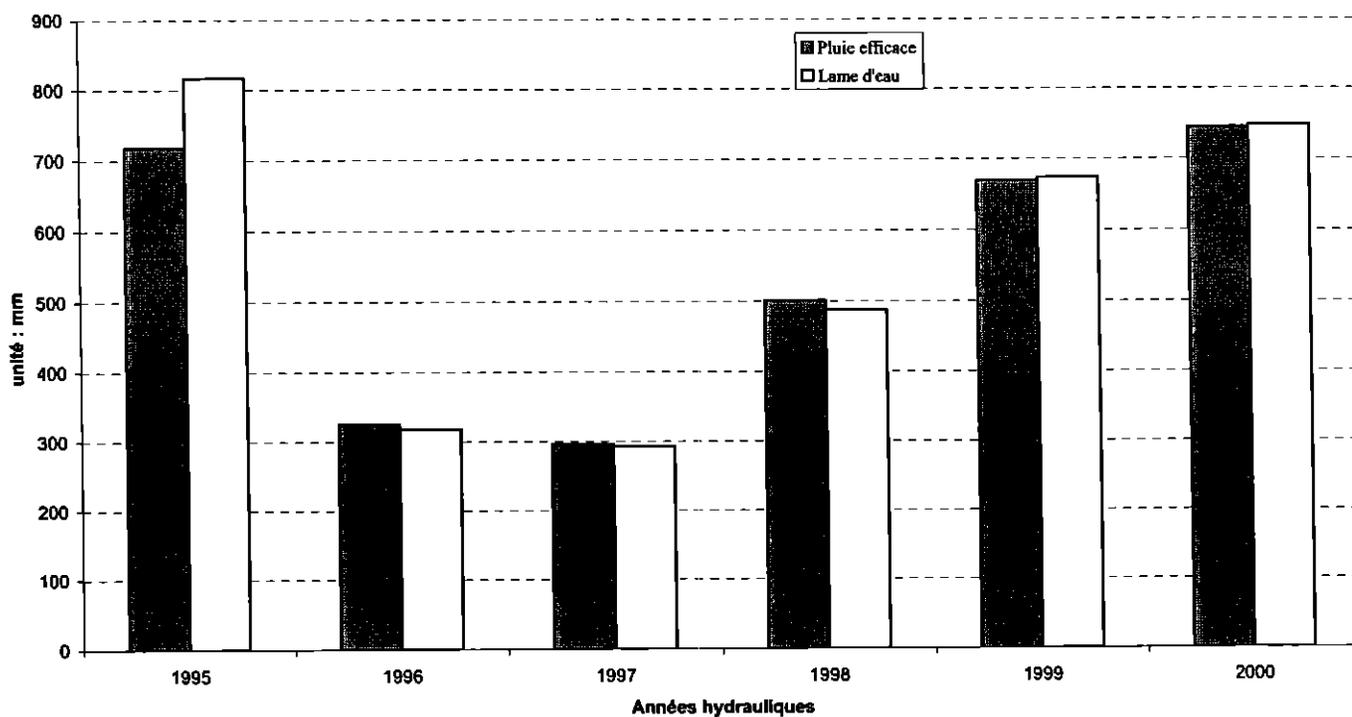
MAUDOUVE



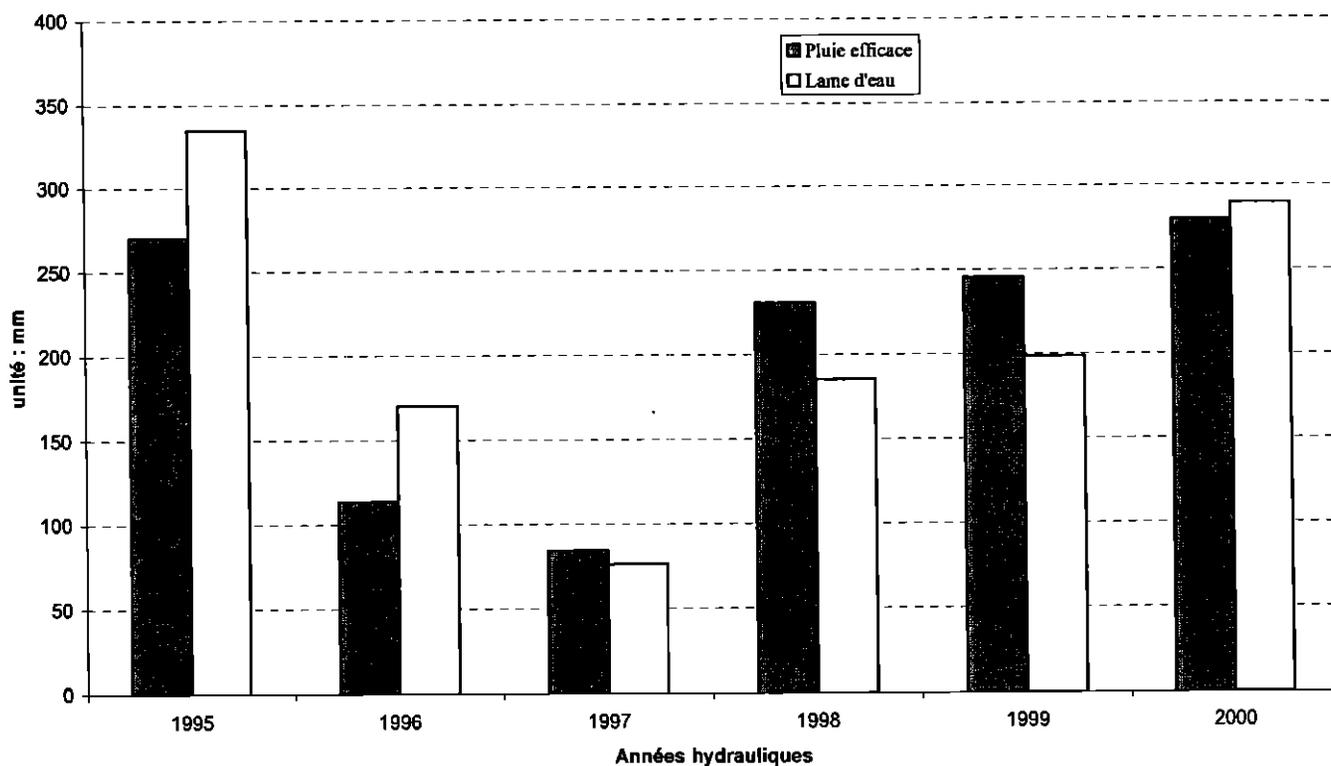
FREMUR



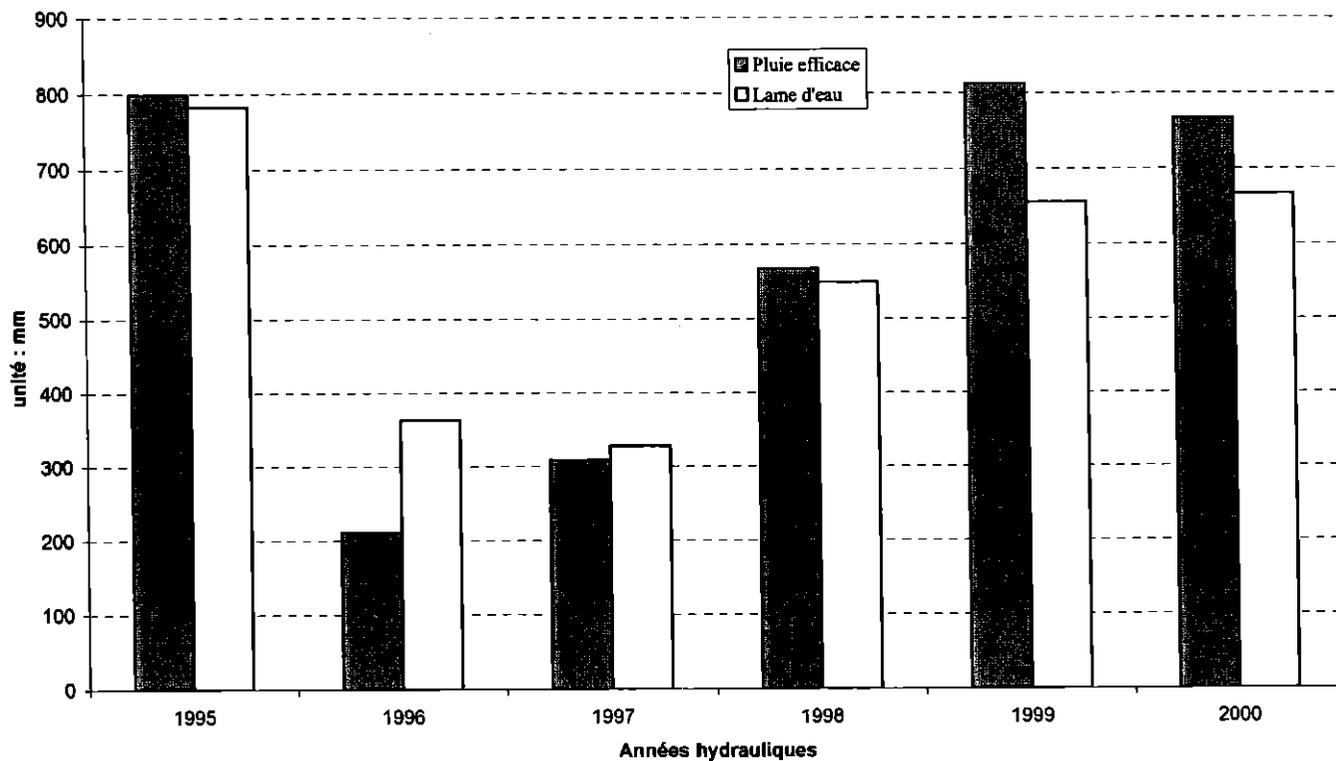
LEGUER



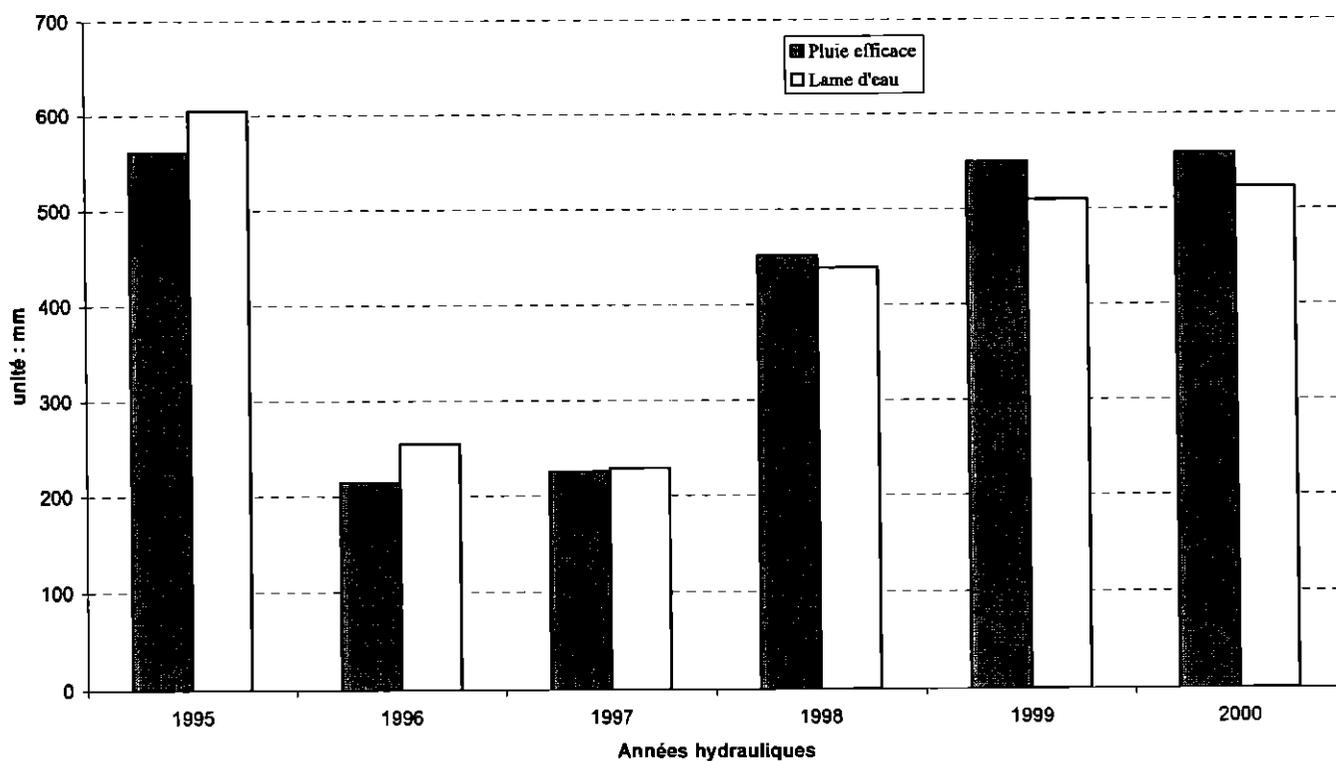
EVRON



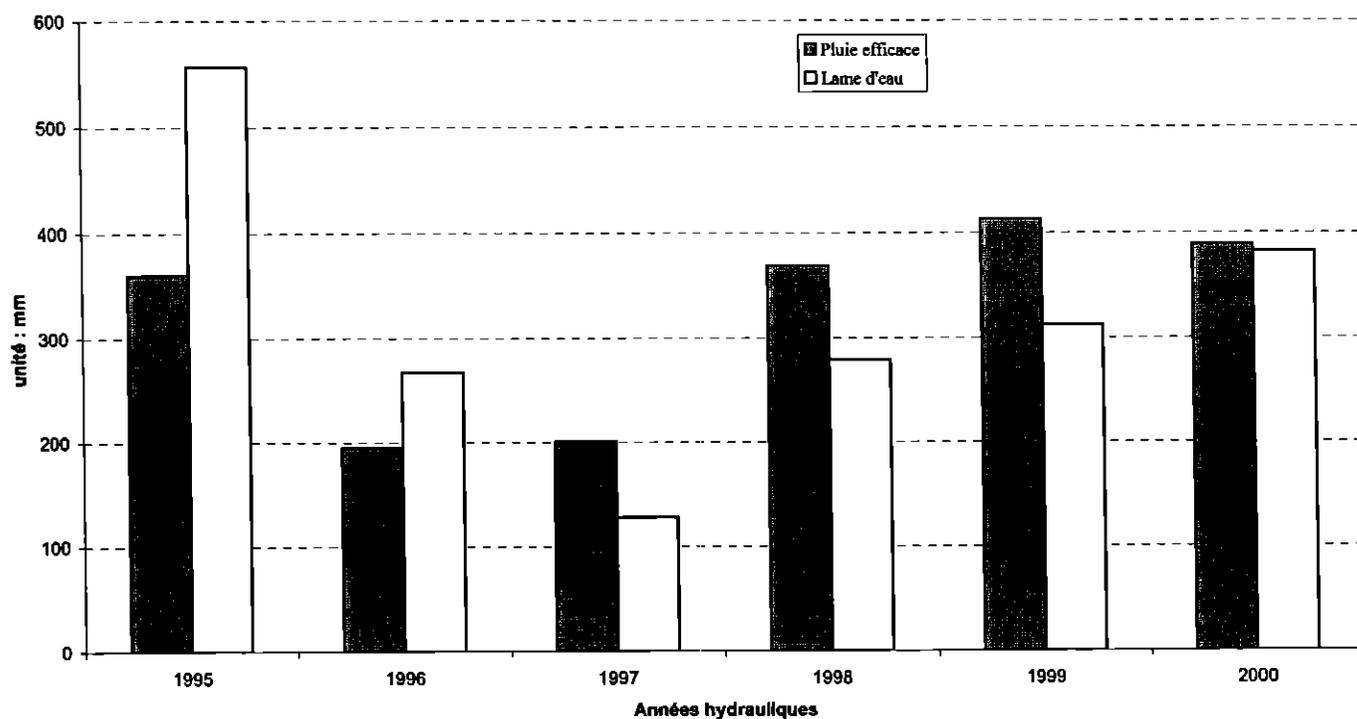
BLAVET



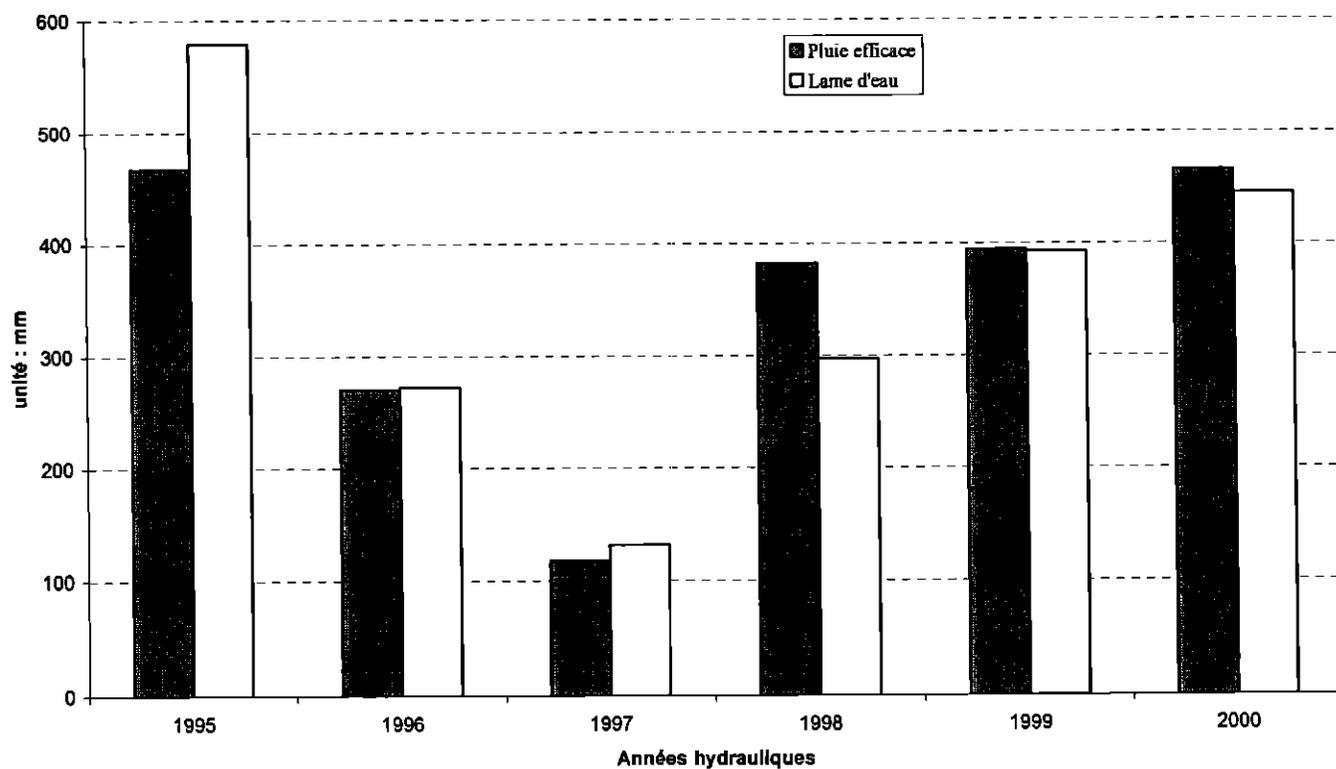
TRIEUX



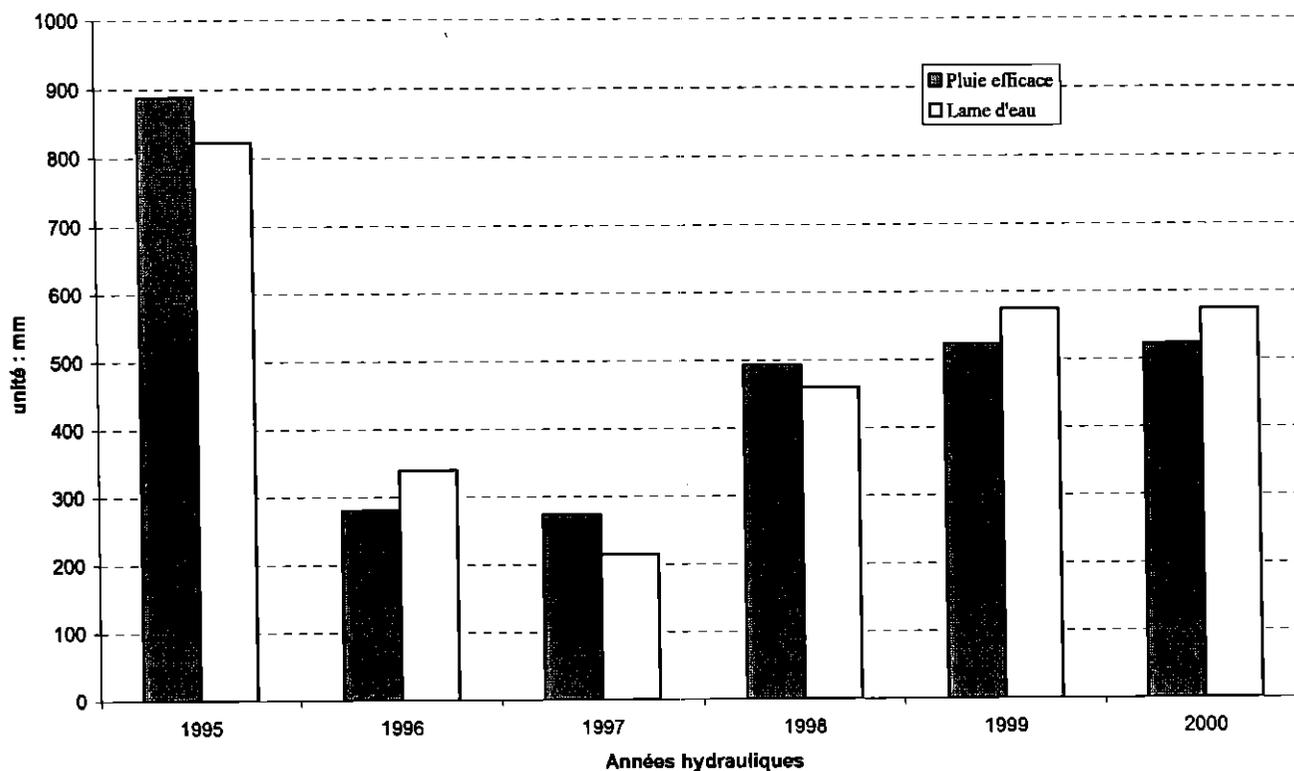
URNE



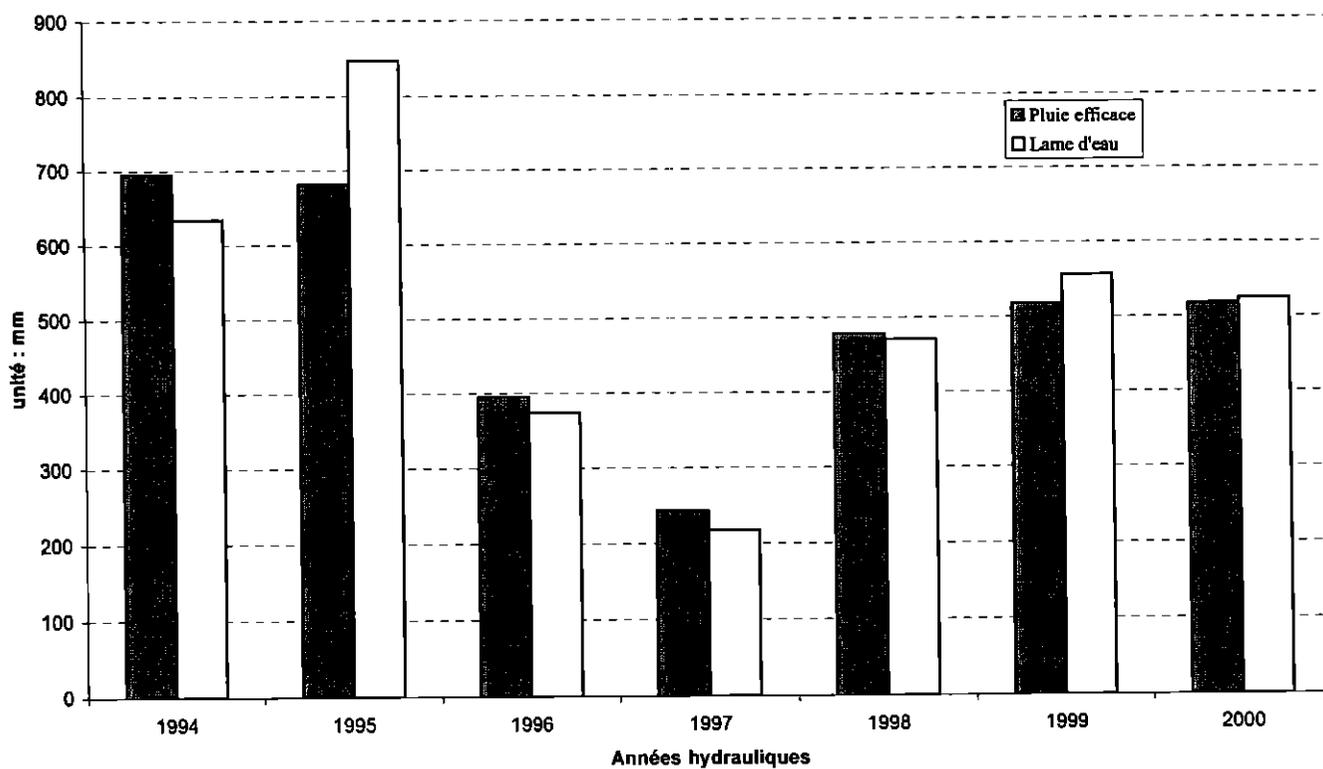
OUST



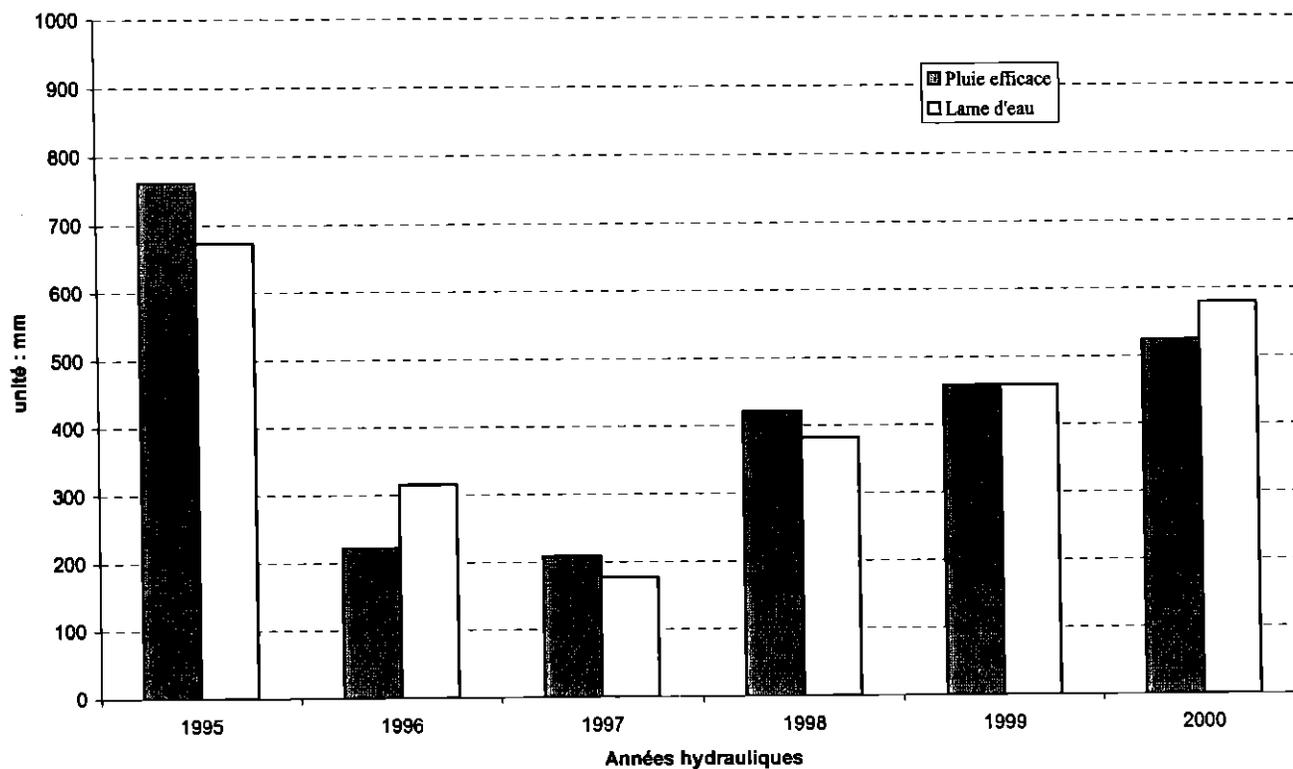
LOC'H



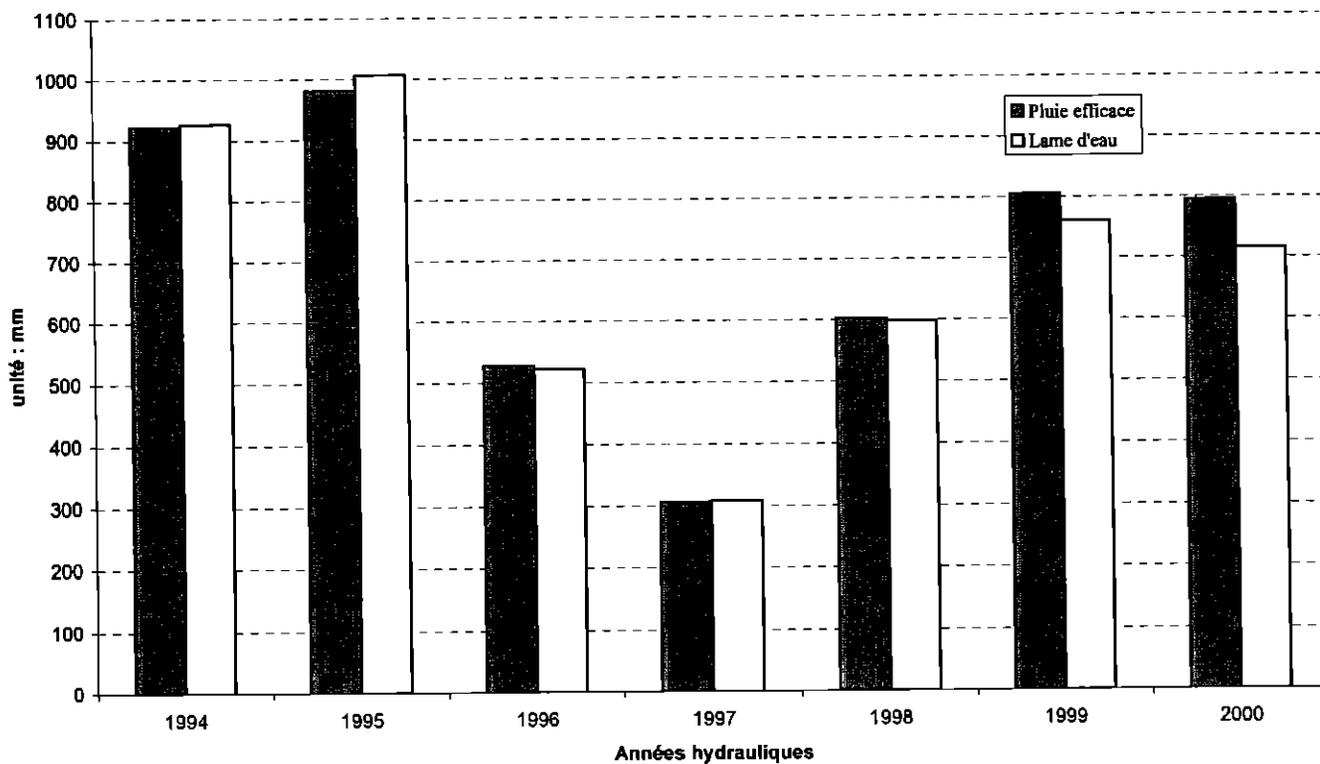
ARZ



CLAIE

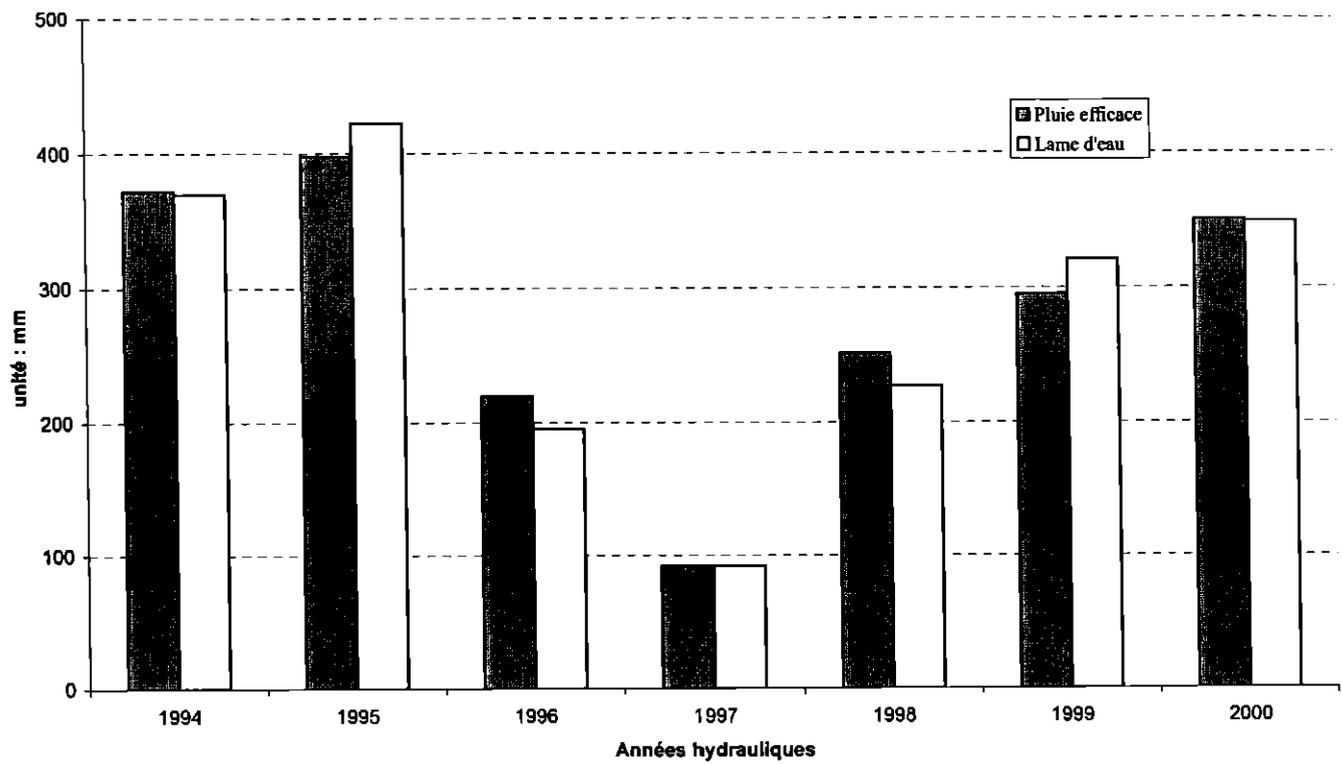


INAM

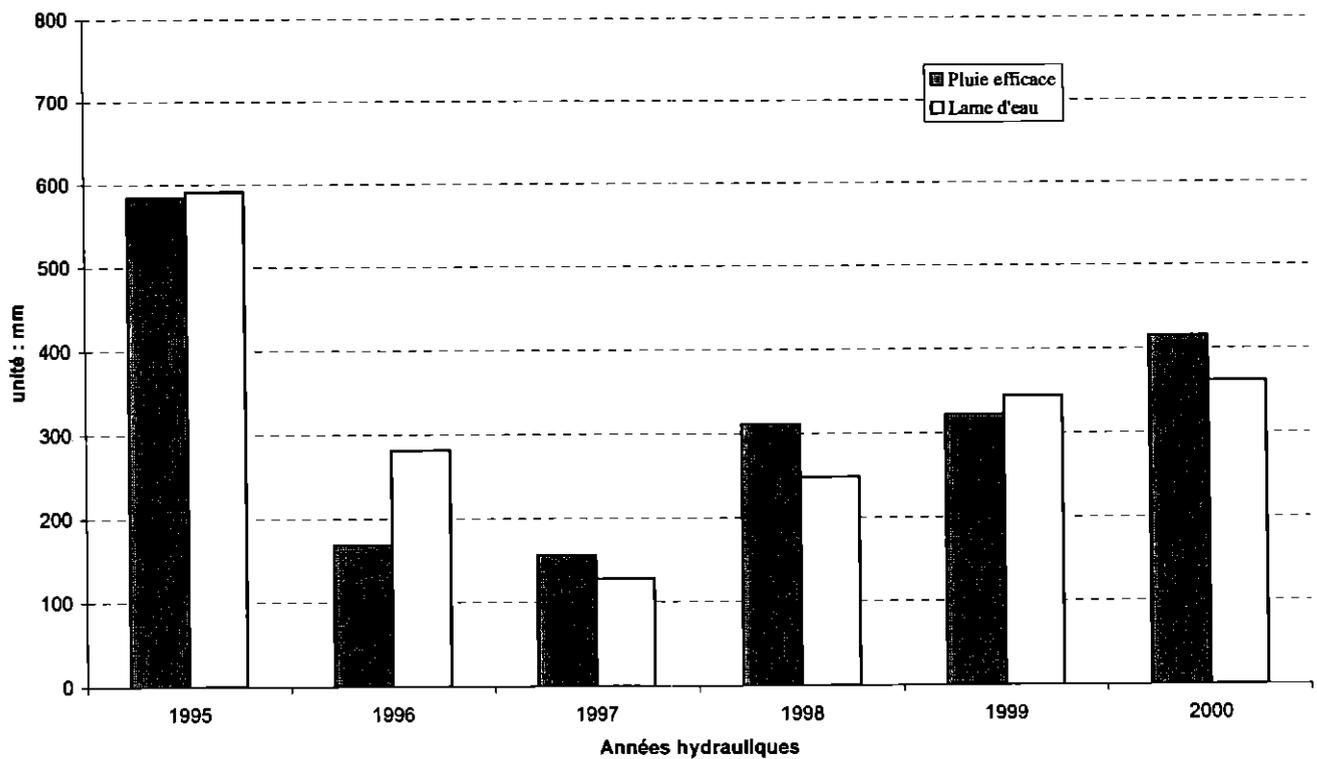


SILURES Bretagne - Etat d'avancement de l'année 2

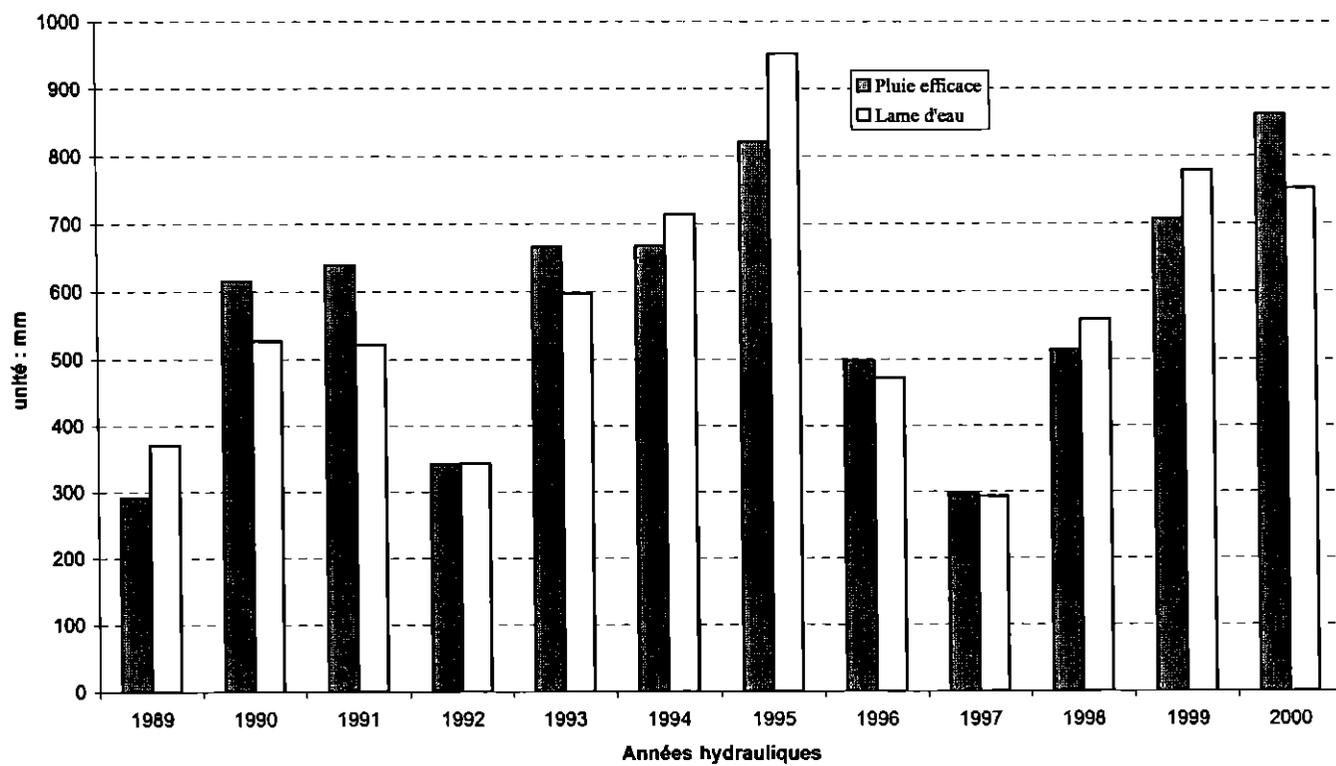
AFF



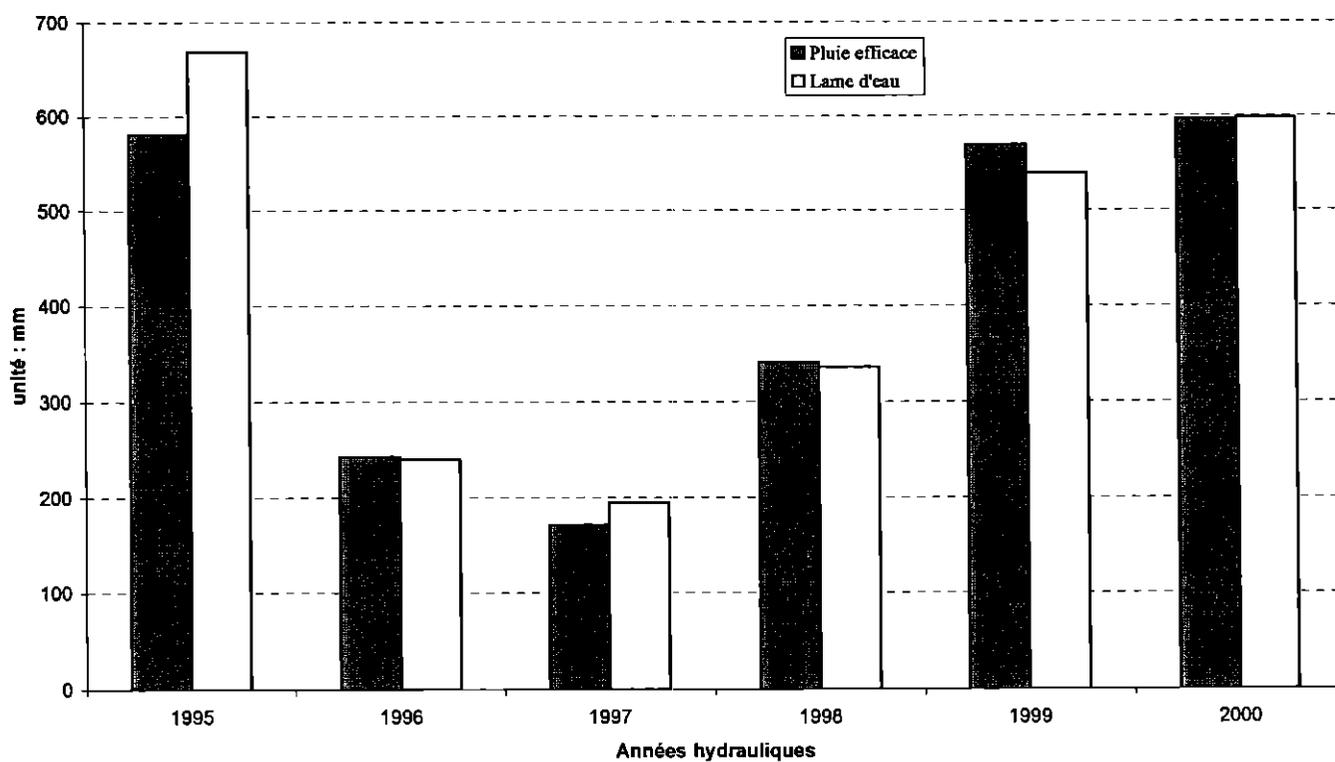
COET DAN



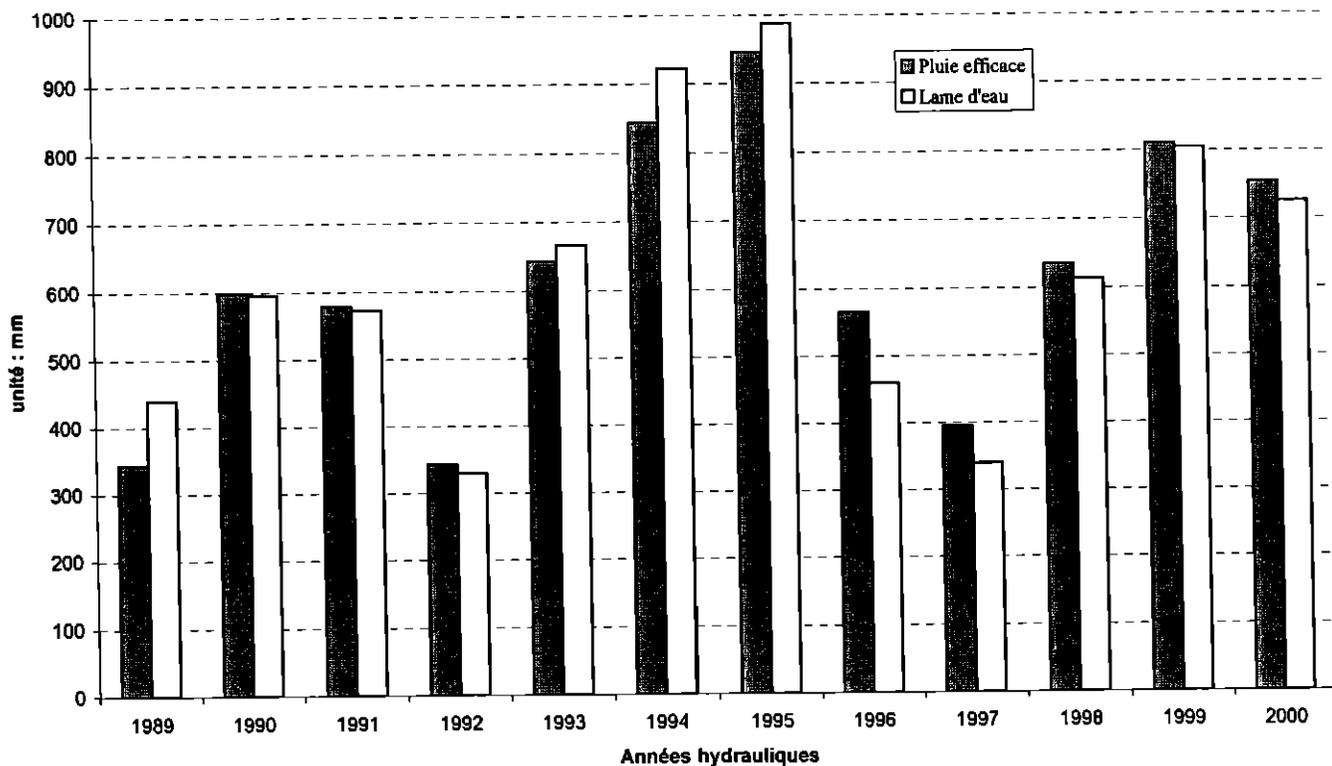
ABER WRAC'H



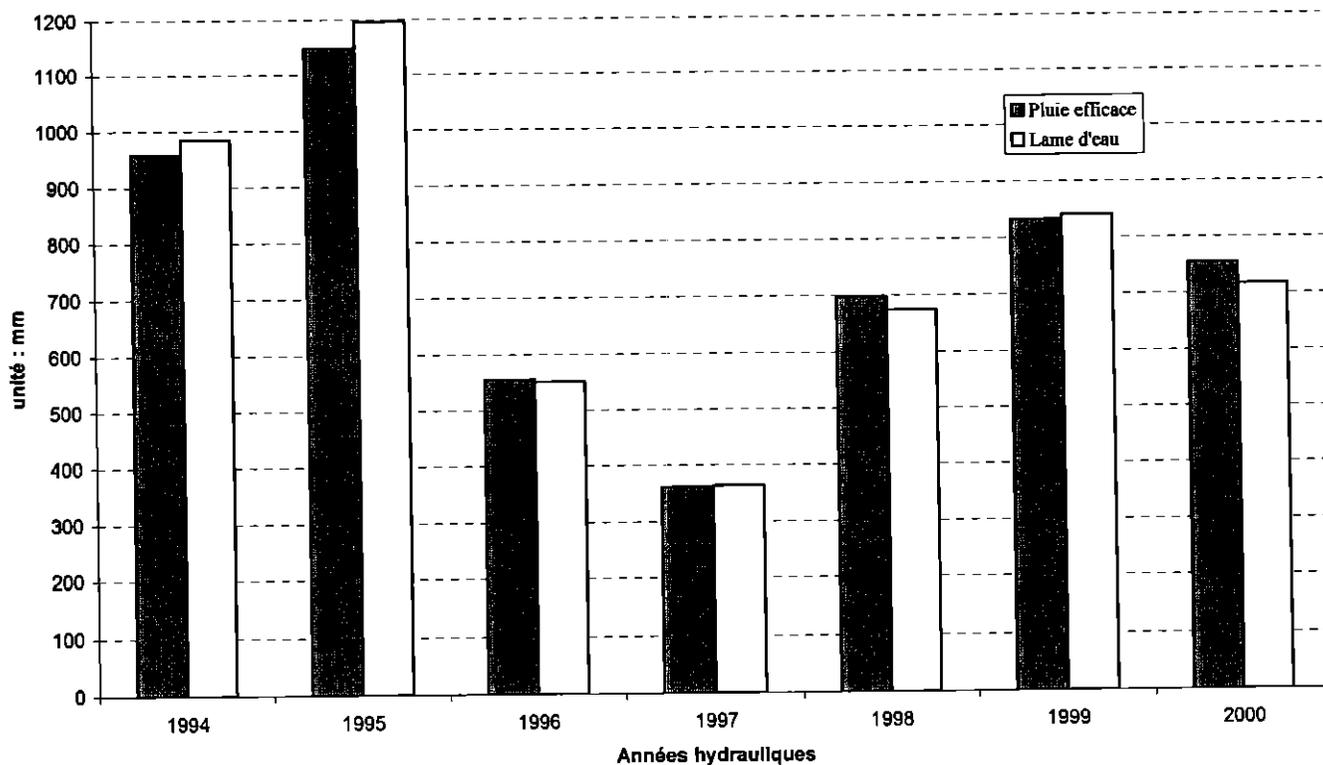
DOURDUFF



PENZE

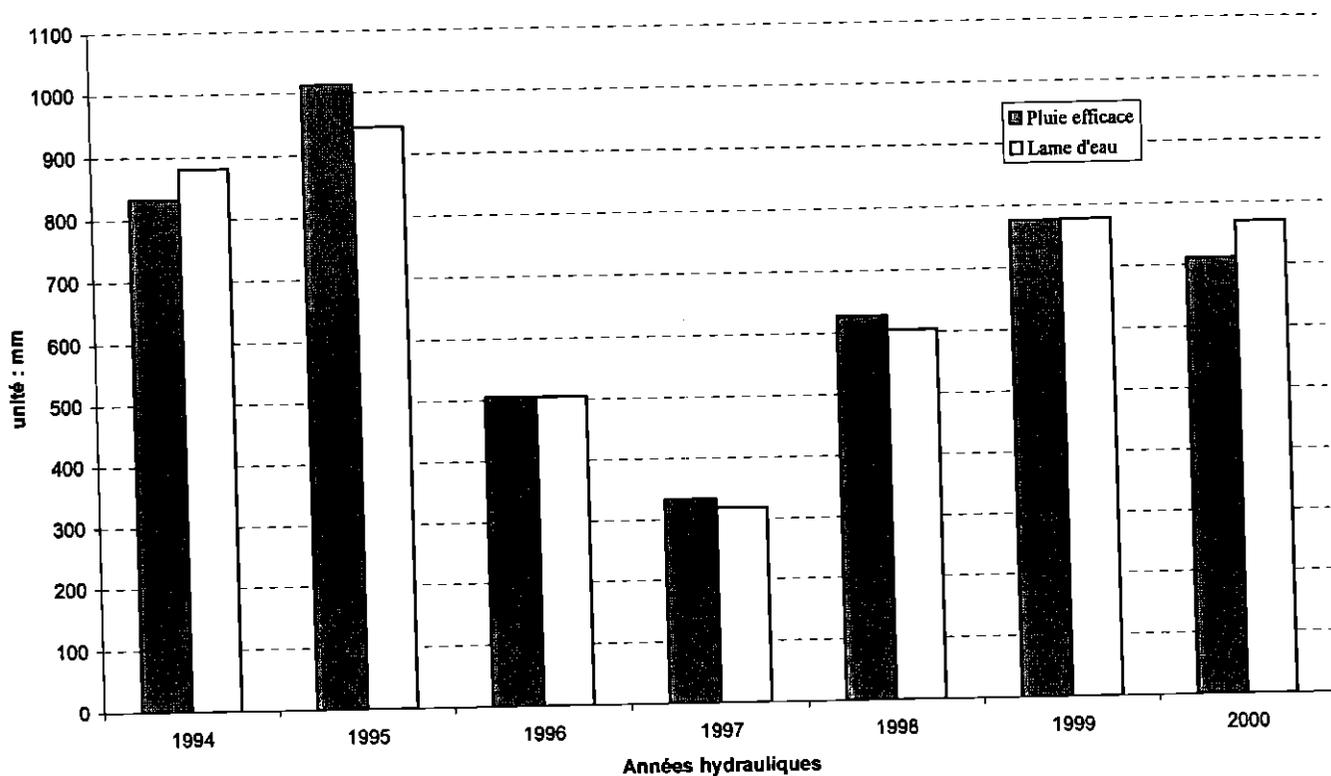


AVEN



SILURES Bretagne - Etat d'avancement de l'année 2

ELLE



Annexe 3

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

Tabl. 14 - Paramètres retenus pour les modélisations Gardénia

Bassin versant	Dépt	Station hydrologique	N° station	Superficie BV (km ²)	Années calage	Corrélation (%)	Période modélisation Gardénia	Corrélation (%)	RUMAX (mm)	RUIPER (mm)	TPER1 (mois)	TAR1 (mois)	TPER2 (mois)	TAR2 (mois)
Rosette	22	Mégnit	J1114010	102	1995-1996	85	1995-2000	66	200	20	0.3	0.4	0.3	0.8
Rance	22	Saint-Jouan-de-l'Isle	J0611610	153	1995-1996	74	1995-2000	73	150	15	0.5	0.5	0.6	0.9
Loc'h	56	Brech	J6213010	179	1995-1996	94	1995-2000	92	150	50	0.3	0.4	0.6	1.2
Arz	56	Molac	J8813010	148	1999-2000	93	1994-2000	94	200	50	0.4	0.5	0.6	1.2
Claie	56	Saint-Jean-Brévelay	J8433010	137	1995-1996	94	1995-2000	91	150	40	0.4	0.6	0.9	1.3
Aff	56-35	Quelneuc	J8632410	334	1995-1996	88	1994-2000	85	195	20	0.2	0.4	0.8	1.5
Aber Wrac'h	29	Drennec	J3205710	24	1990-1991	89	1989-2000	90.5	150	70	0.6	0.95	1	1.6
Dourduff	29	Garlan	J2514010	45	1995-1996	93	1995-2000	90	130	40	0.3	0.8	0.8	1.3
Oust	56-22	Pleugriffet (La Trairie)	J8202310	929	1995-1996	92	1995-2000	89	170	30	0.4	0.4	0.6	1
Maudouve	22	St-Donan	J1524010	24,2	1997-1998	87	1995-2000	88	75	50	0.1	0.5	0.8	1.5
Frémur	22	Pleslin-Trigavou	J1004520	37,5	1998-1999	76	1993-2001	83	150	20	0.3	0.3	0.5	1.3
Léguer	22	Pluznet	J2233020	353	1995-1996	94	1995-2000	93	110	50	0.3	0.5	0.7	1.1
Evron	22	Coëtnieux	J1324010	142	1995-1996	91	1995-2000	88	150	30	0.2	0.4	0.6	0.9
Blavet	22	Kérien (Kerlouer)	J5202110	20,6	1995-1996	92	1995-2000	85	170	50	0.3	0.45	0.65	1
Penzé	29	Taulé (Penhoat)	J2723010	141	1995-1996	93	1990-2000	93	100	50	0.3	0.4	0.6	0.8
Aven	29	Pont-Aven (Voie express)	J4623020	165	1995-1996	94	1994-2000	91	130	60	0.3	0.5	1	1.7
Inam	56	Fauët (Pont Priant)	J4734010	118	1995-1996	92	1994-2000	88	200	40	0.2	0.5	0.7	1.1
Ellé	56	Fauët	J4712010	142	1995-1996	89	1994-2000	86	155	30	0.2	0.5	0.9	1.6
Coër-Dan	56	Guénin (Stimoës)	J5606810	11.9	1995-1996	95	1995-1999	84	150	30	0.2	0.4	0.6	1
Trieux	22	Saint-Clet (Moulin de Châteaulin)	J1721720	417	1995-1996	94	1995-2000	91	150	40	0.2	0.6	0.7	1.2
Urne	22	Plédran	J1405310	40,4	1995-1996	74	1995-2000	85	100	30	0.3	0.5	1.2	2.1

Corrections des valeurs de la première année du projet

Tabl. 15 - Résultats obtenus suite aux modélisations Gardénia

Bassin versant	Dépt	Station hydrologique	N° station	Superficie BV (km²)	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) (%)	
Rosette	22	Mégrit	J1114010	102	1995-2000	828	621	207	105.5	51	101.5	49	45.5	22	56	27
Rance	22	Saint-Jouan-de-l'Isle	J0611610	153	1995-2000	893	600	293	182.5	62	110.5	38	61	21	49.5	17
Loc'h	56	Brech	J6213010	179	1995-2000	1101	566.5	534.5	223.5	42	311	58	187	35	124	23
Arz	56	Molac	J8813010	148	1994-2000	1189	648	541	247	46	294	54	162	30	132	24
Claie	56	Saint-Jean-Brévelay	J8433010	137	1995-2000	1013	559	454	216	47.5	238	52.5	143	31.5	95	21
Aif	56-35	Quelneuc	J8632410	334	1994-2000	921	617	304	146	48	158	52	106	35	52	17
Aber Wrac'h	29	Drennec	J3205710	24	1989-2000	1144	574	570	248.5	43.5	321.5	56.5	167	29.5	154.5	27
Dourduff	29	Garlan	J2514010	45	1995-2000	1015	563	452	186.5	41	265.5	59	135	30	130.5	29
Oust	56-22	Pleugriffet (La Tertraie)	J8202310	929	1995-2000	968	581	387	196	50.5	191	49.5	115	30	76	19.5
Maudouve	22	St-Donan	J1524010	24,2	1995-2000	854	530	324	71	22	253	78	157.5	48.5	95.5	29.5
Frémur	22	Pleslin-Trigavou	J1004520	37,5	1993-2001	816	624	192	88	46	104	54	64	33	40	21
Léguer	22	Pluznet	J2233020	353	1995-2000	1166	563	603	246	41	357	59	210.5	35	146.5	24
Evron	22	Coëtmieux	J1324010	142	1995-2000	791	572	219	79	36	140	64	85	39	55	25
Blavet	22	Kérien (Kerlouet)	J5202110	20,6	1995-2000	1277	609	668	287	43	381	57	227	34	154	23
Penzé	29	Taulé (Penhoat)	J2723010	141	1990-2000	1137	524	613	250	41	363	59	218	35	145	24
Aven	29	Pont-Aven (Voie express)	J4623020	165	1994-2000	1399	617	782	322	41	460	59	307	39	153	20
Inam	56	Fauët (Pont Priant)	J4734010	118	1994-2000	1361	617	744	325	44	419	56	246	33	173	23
Ellé	56	Fauët	J4712010	142	1994-2000	1328	588	740	354	48	386	52	249	33.5	137	18.5
Coët-Dan	56	Guénin (Simoës)	J5606810	11,9	1995-1999	872	553	319	131.5	41	187.5	59	112.5	35	75	24
Trieux	22	Saint-Clet (Moulin de Châteaulin)	J1721720	417	1995-2000	1064	588	476	182	38	294	62	161	34	133	28
Urne	22	Plédran	J1405310	40,4	1995-2000	849	554	295	125	42	170	58	121	41	49	17

Corrections des valeurs de la première année du projet

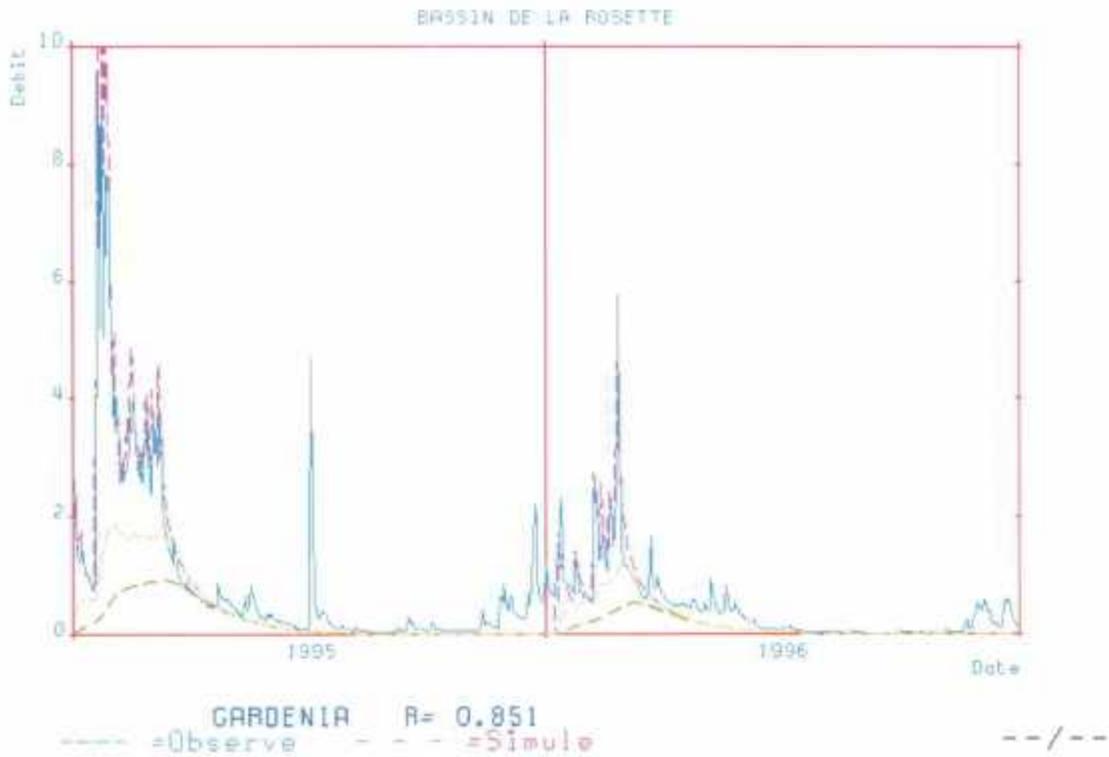
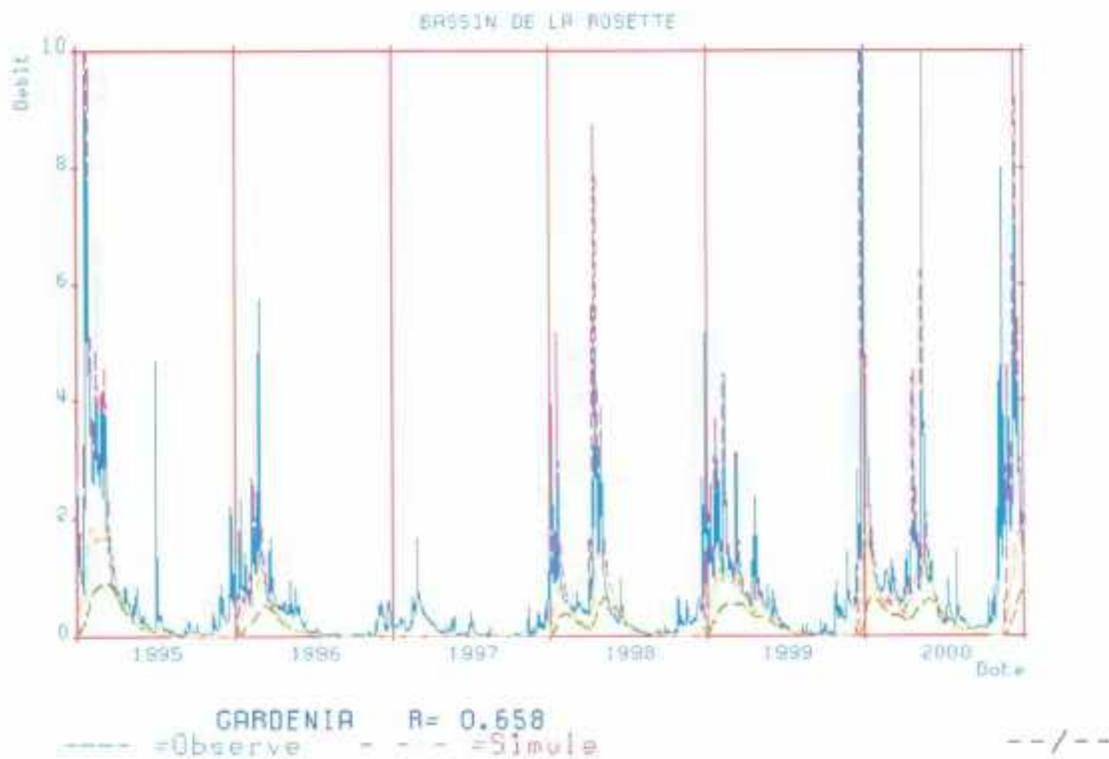
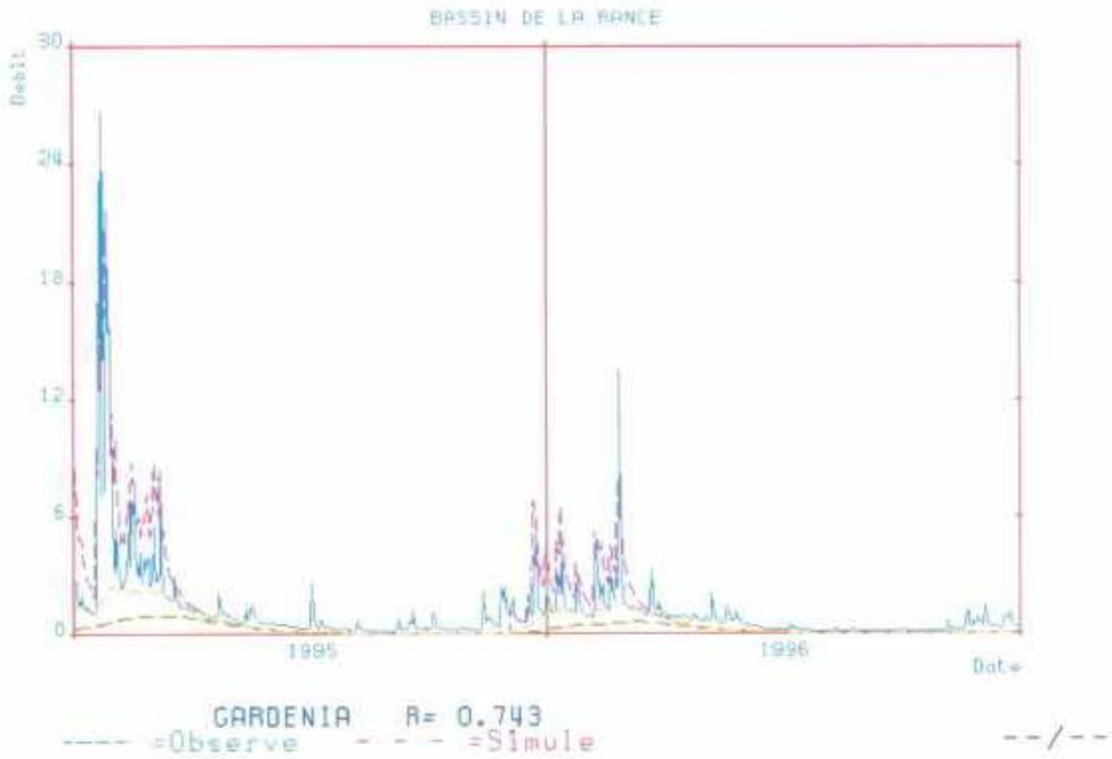


Fig. 18 - Modélisation Gardénia - Calage des paramètres des bassins versants

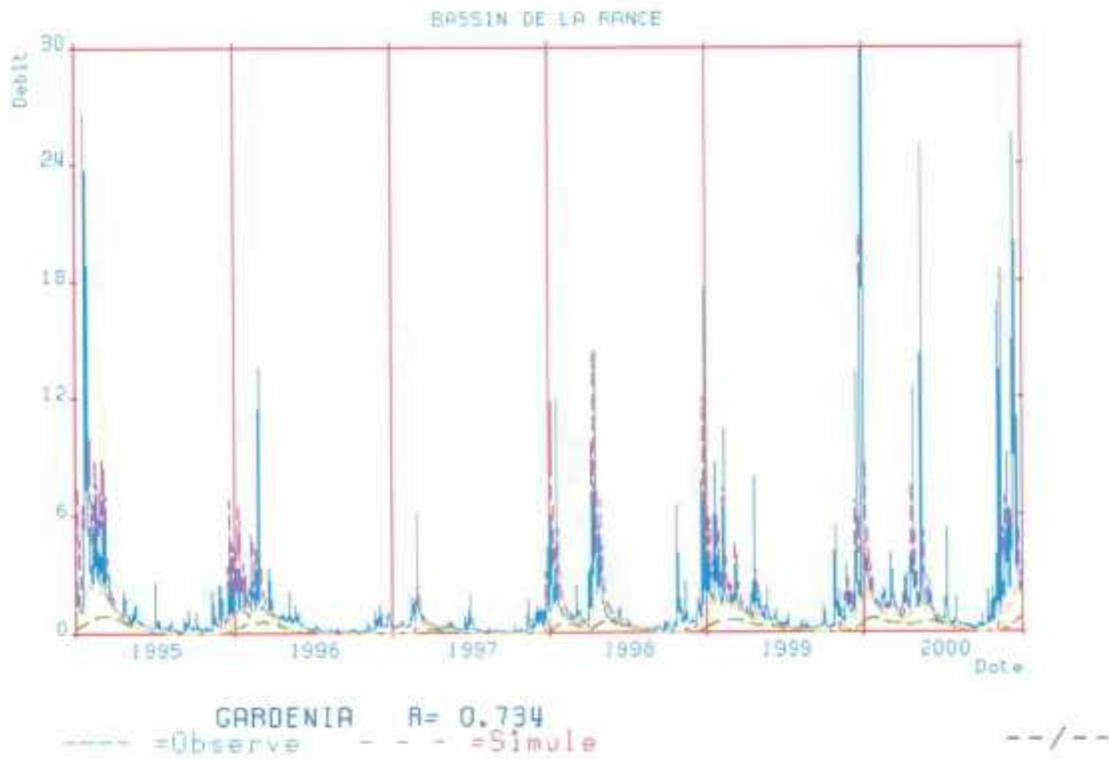
ROSETTE

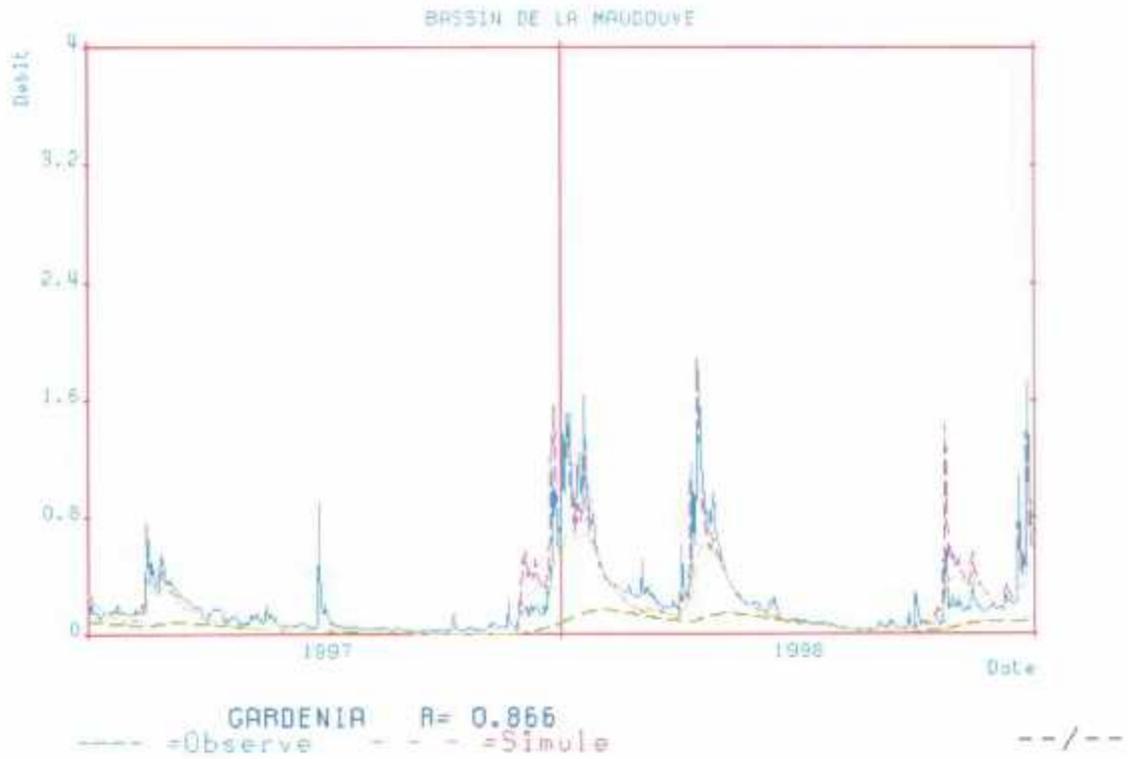


**Fig. 19 - Modélisation Gardénia
Débits mesurés et calculés des bassins versants**

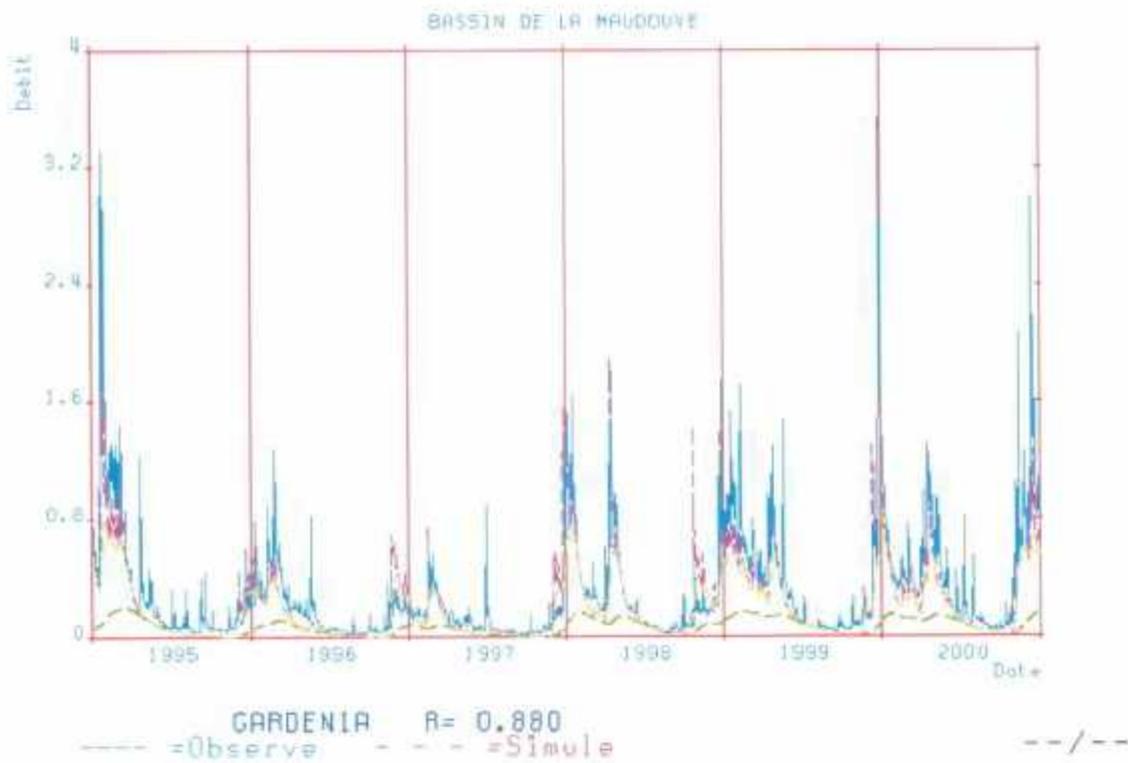


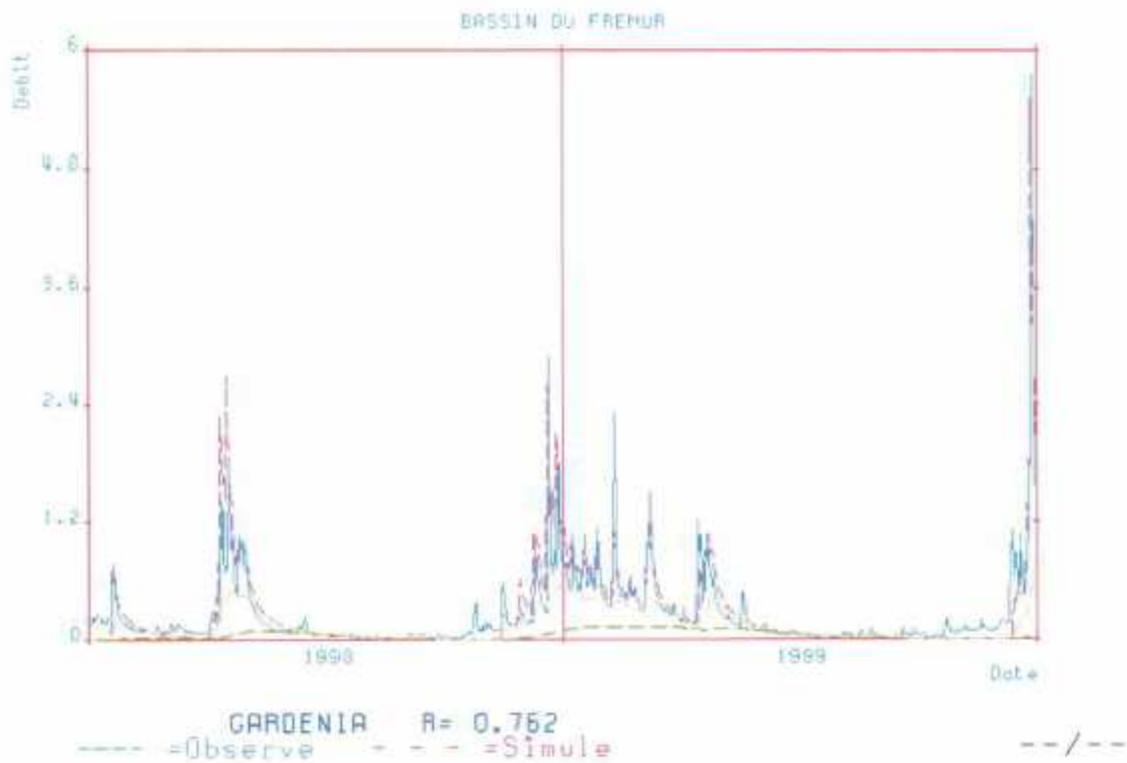
RANCE



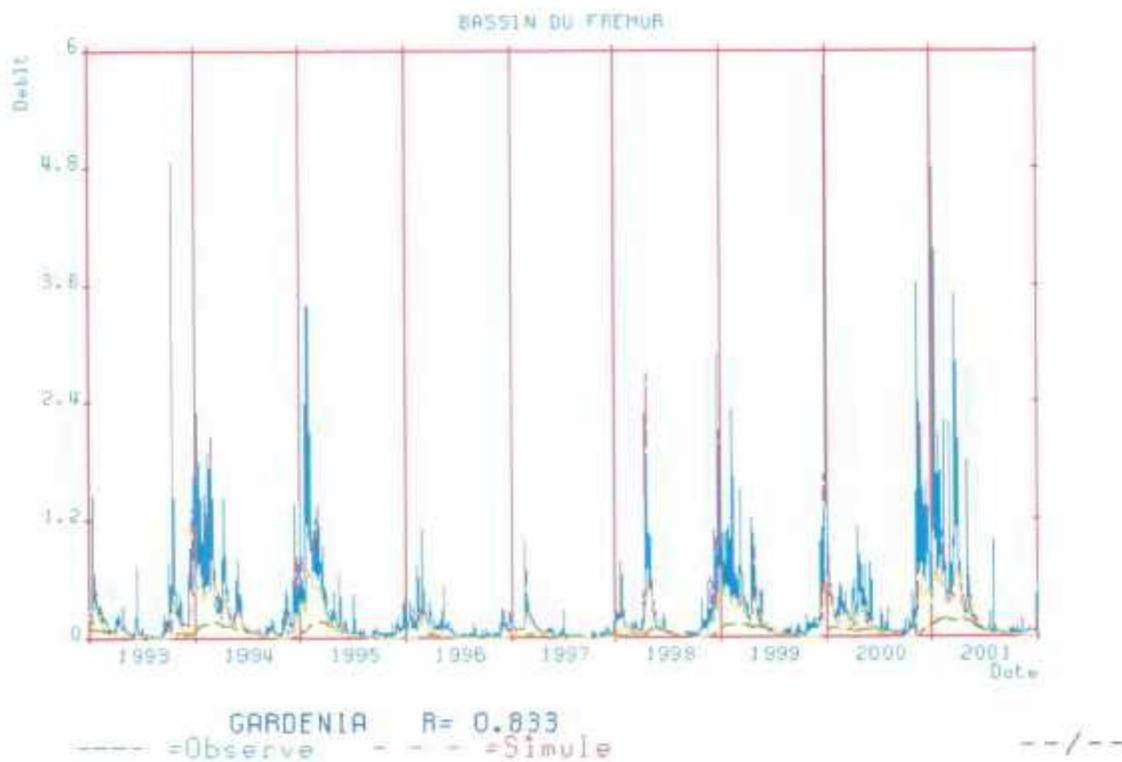


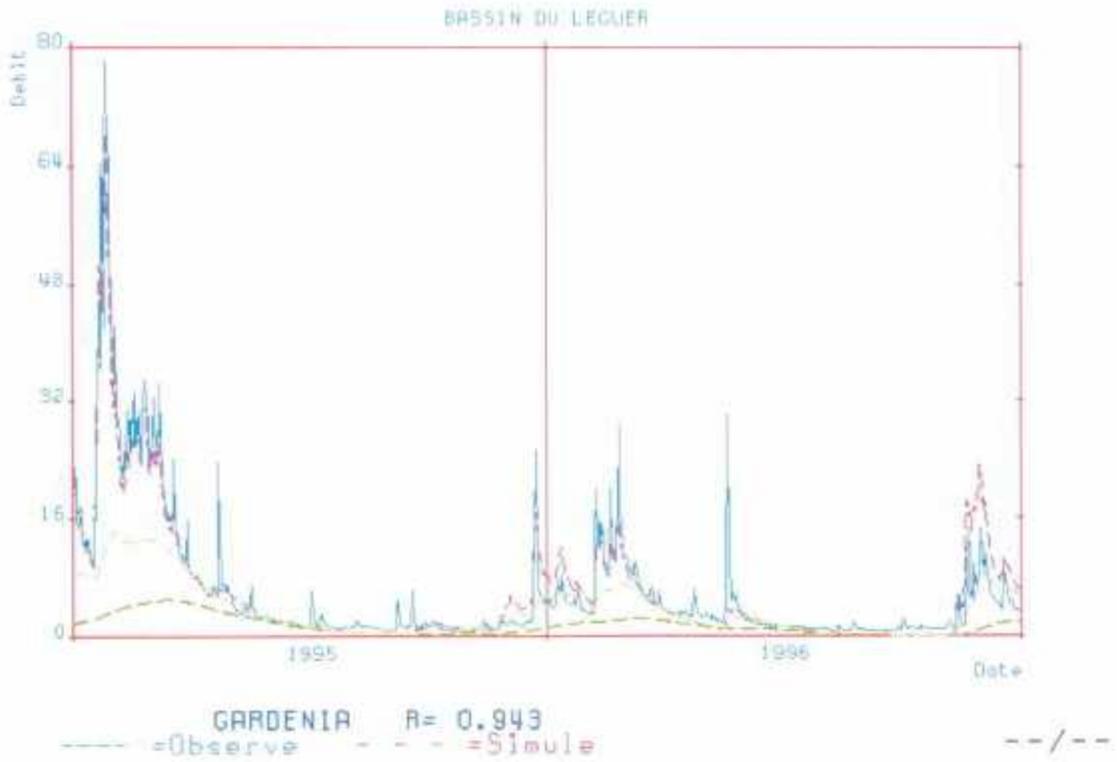
MAUDOUVE



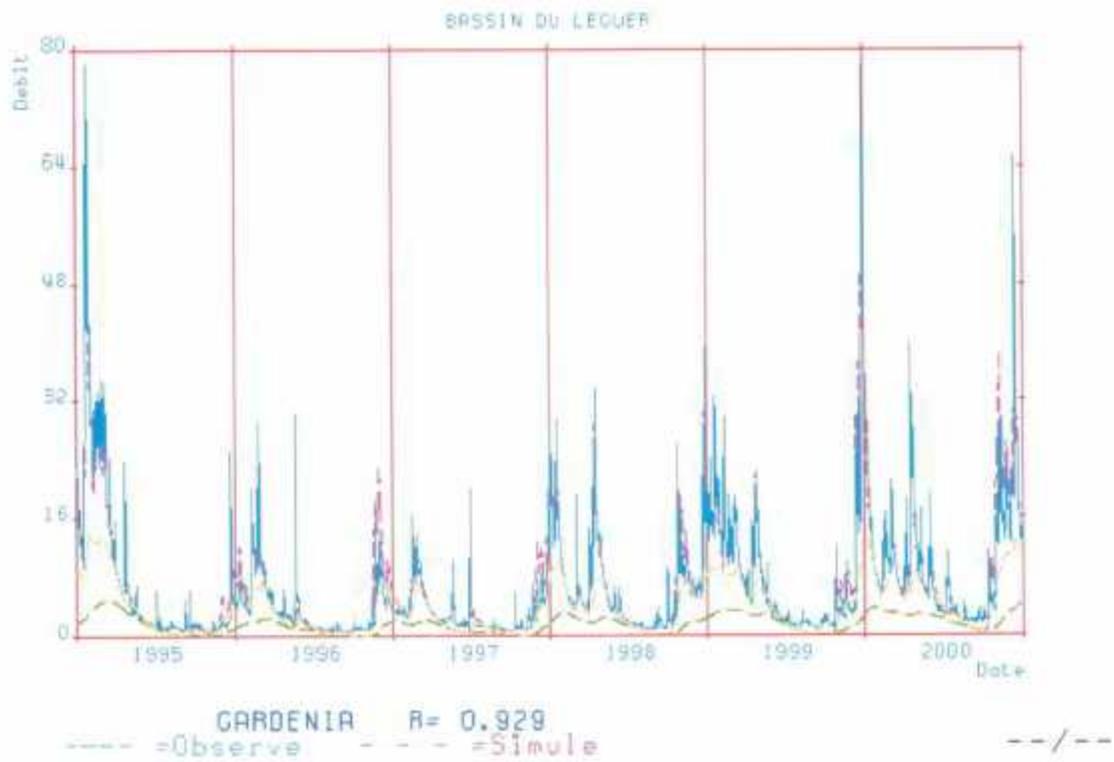


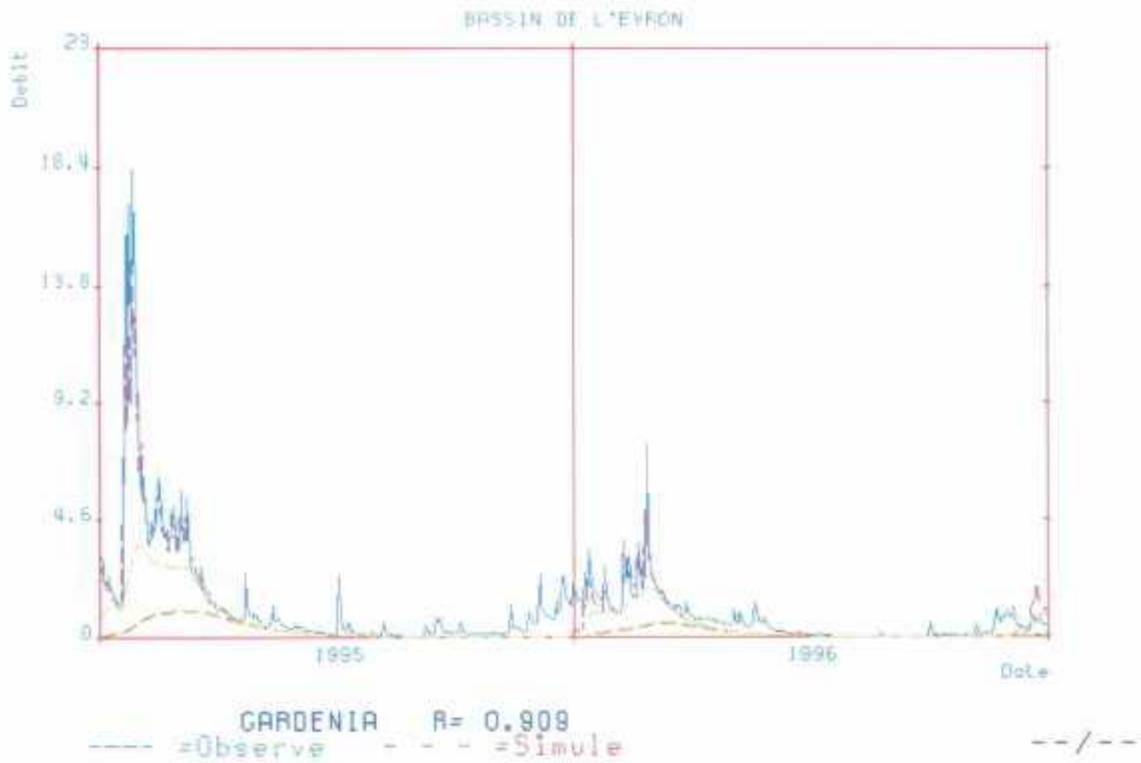
FREMUR



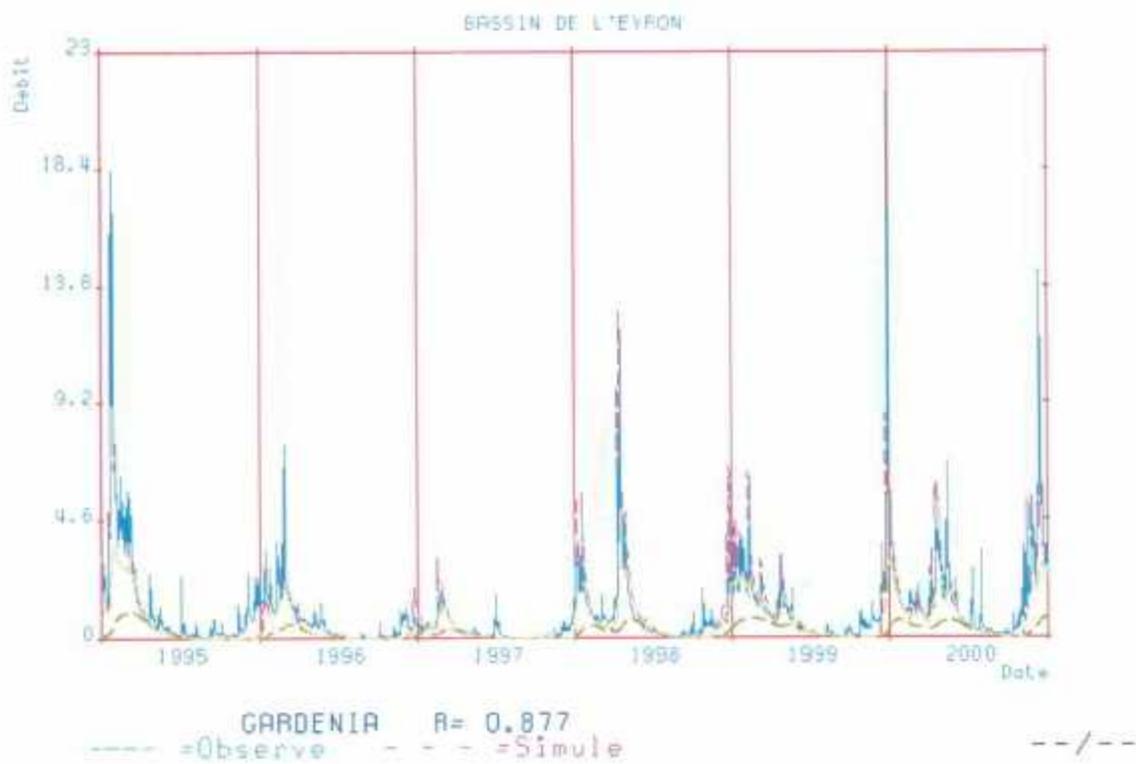


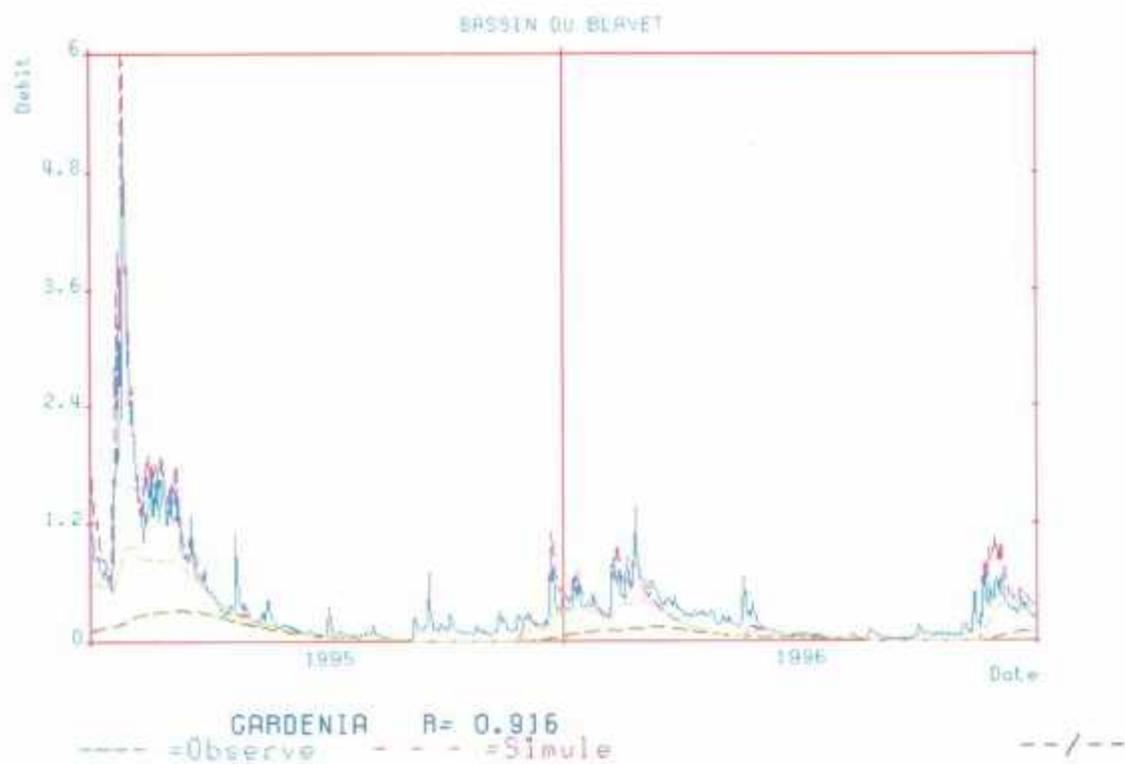
LEGUER



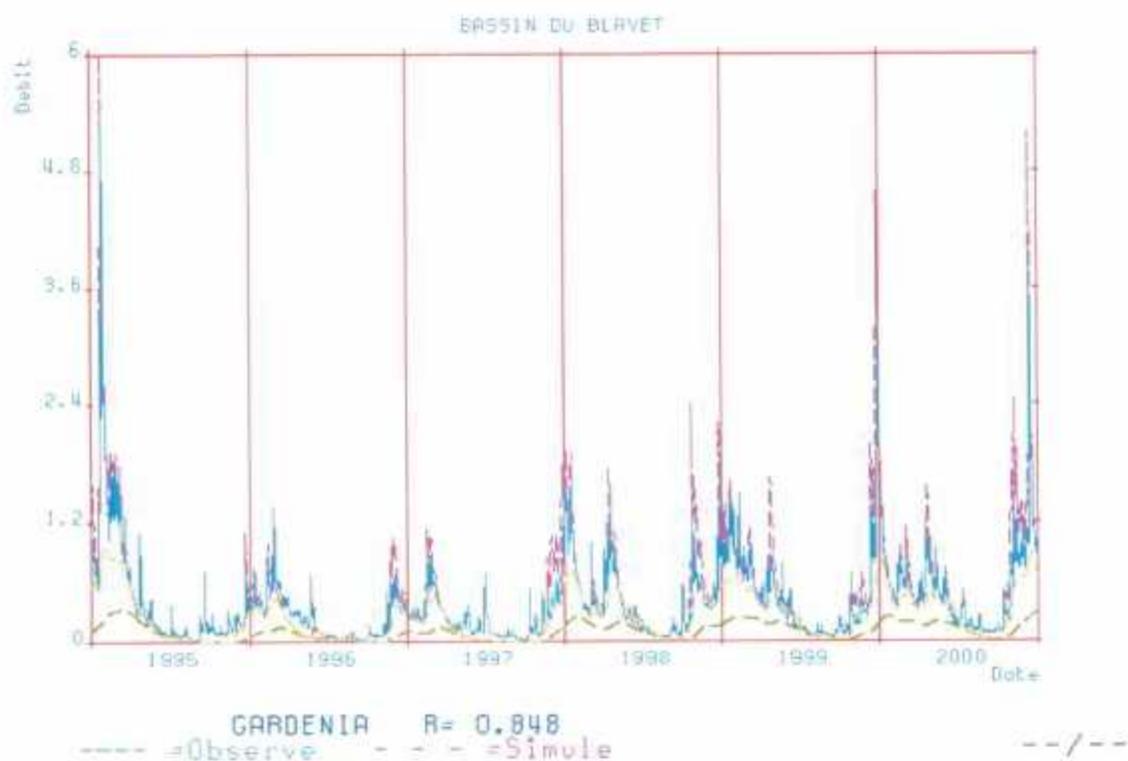


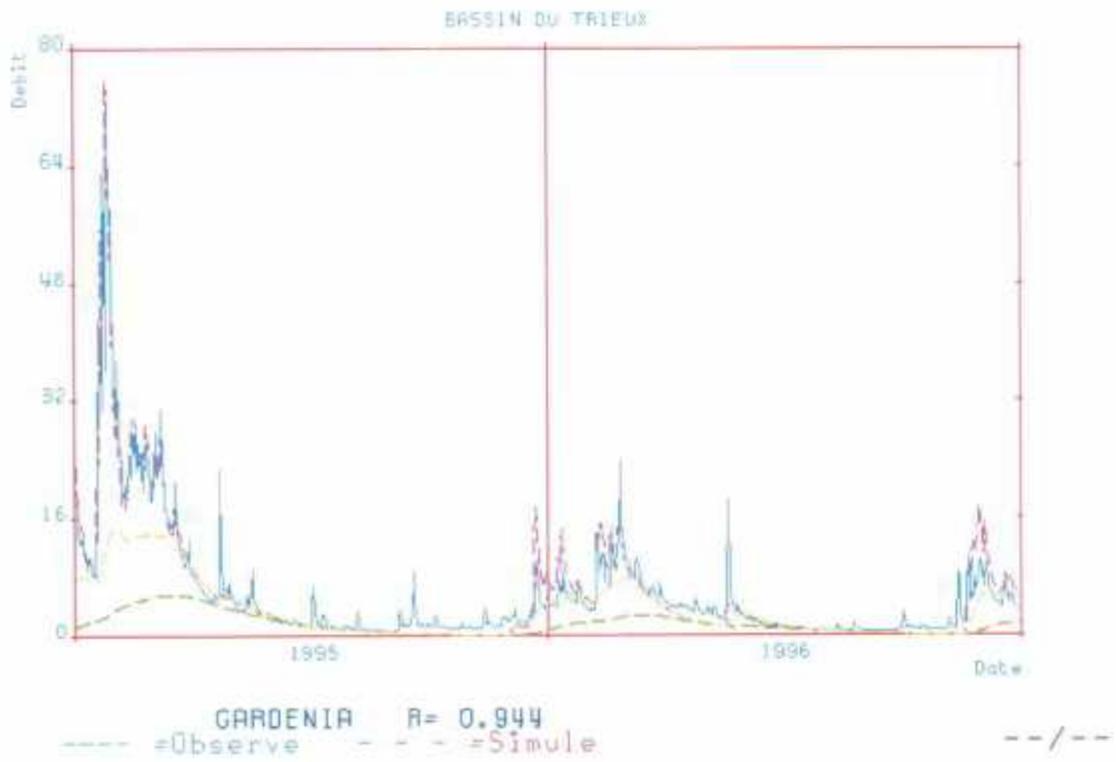
EVRON



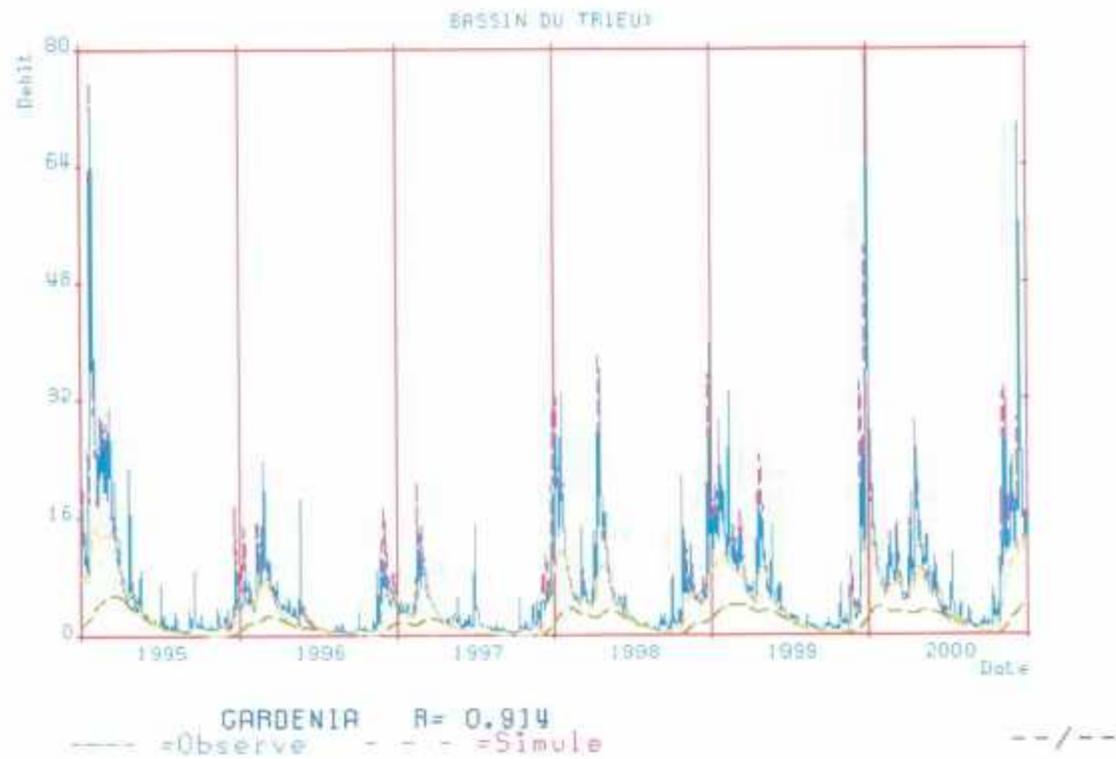


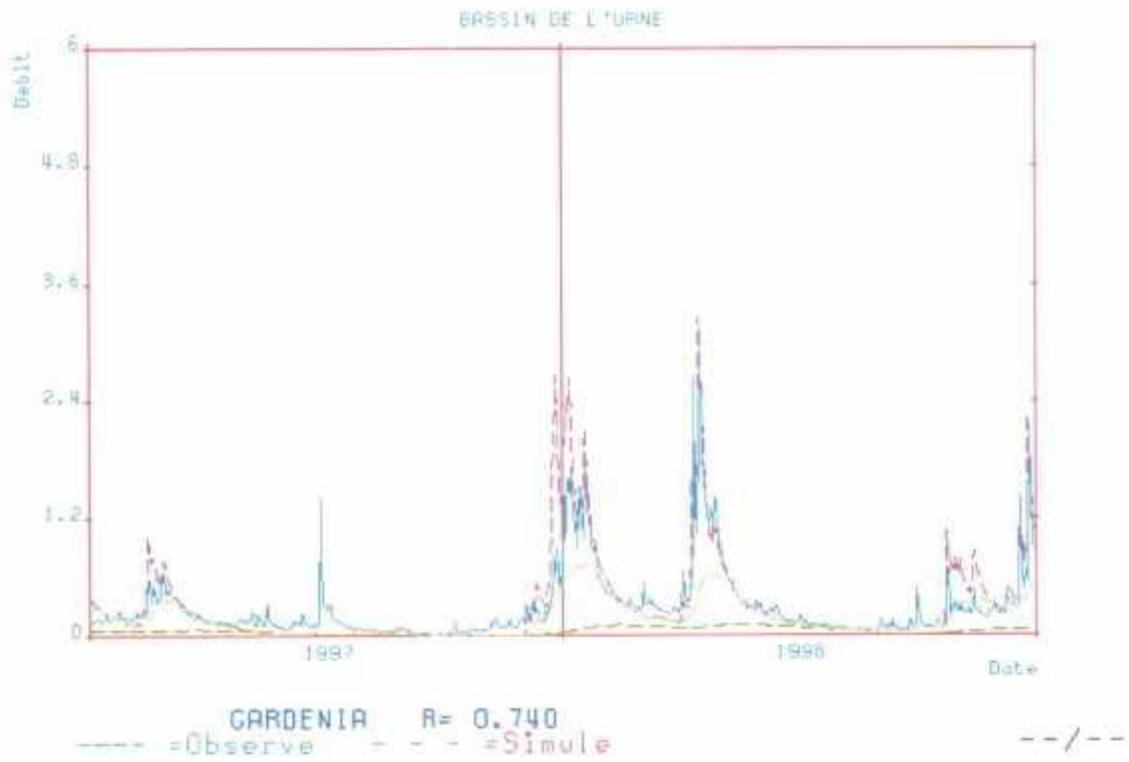
BLAVET



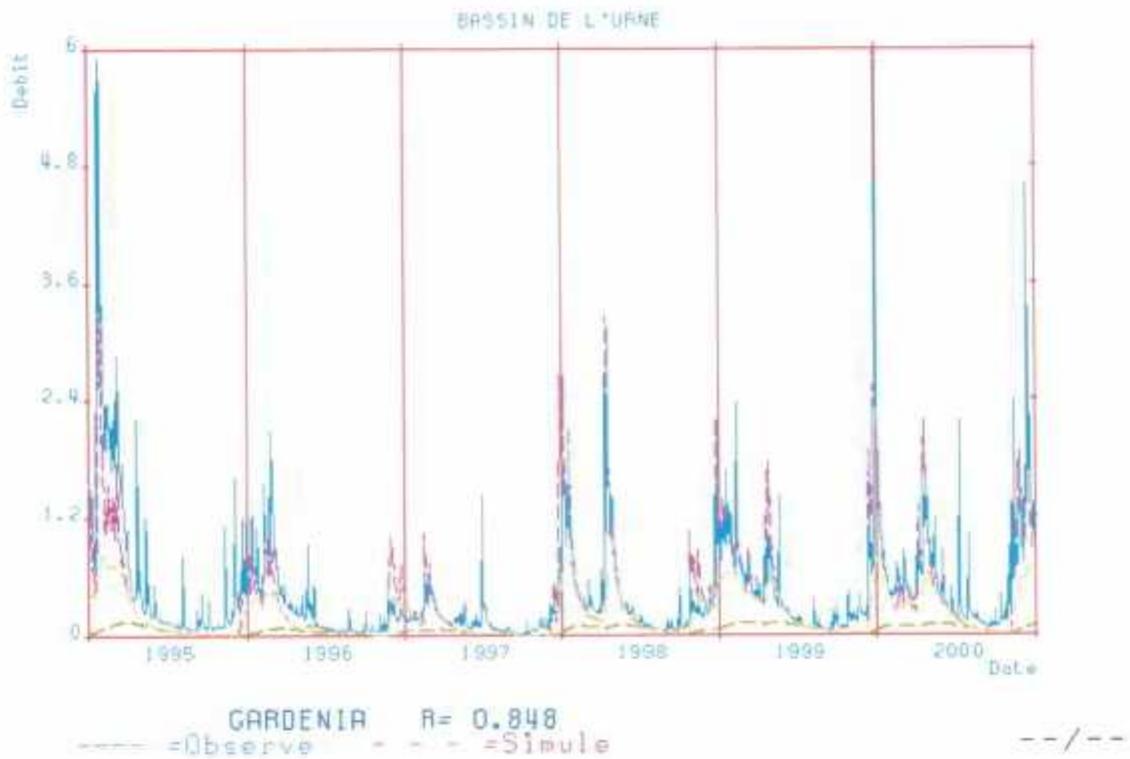


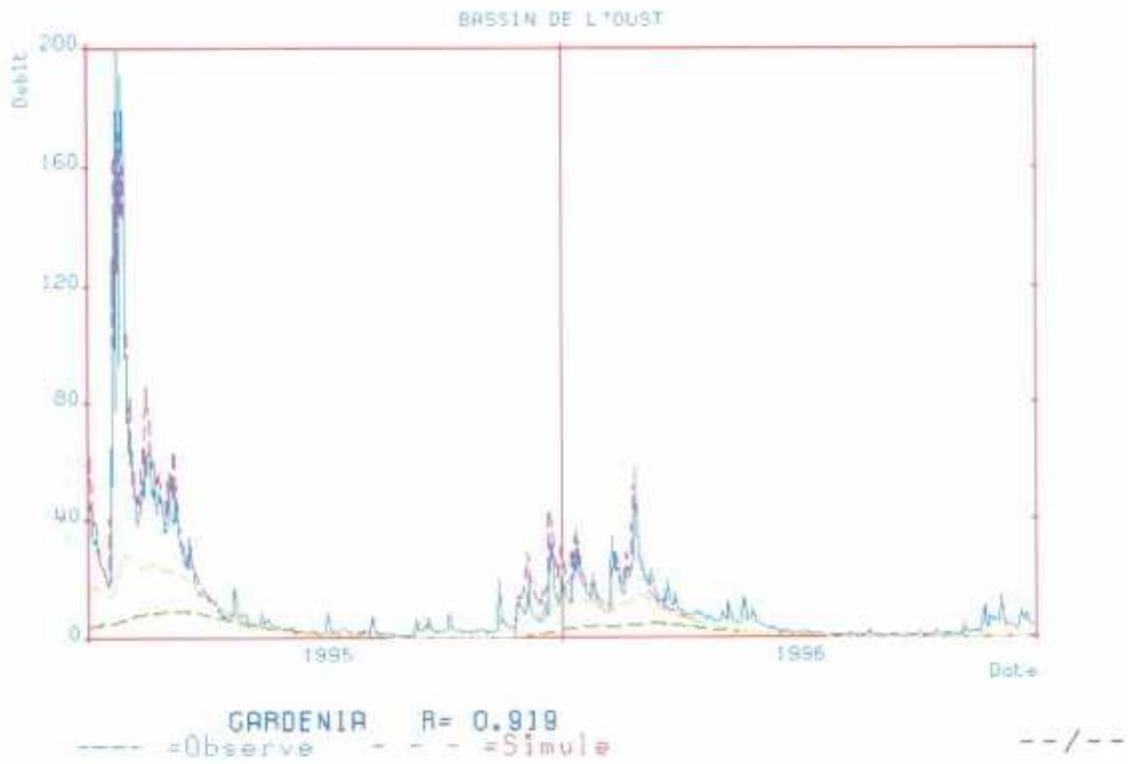
TRIEUX



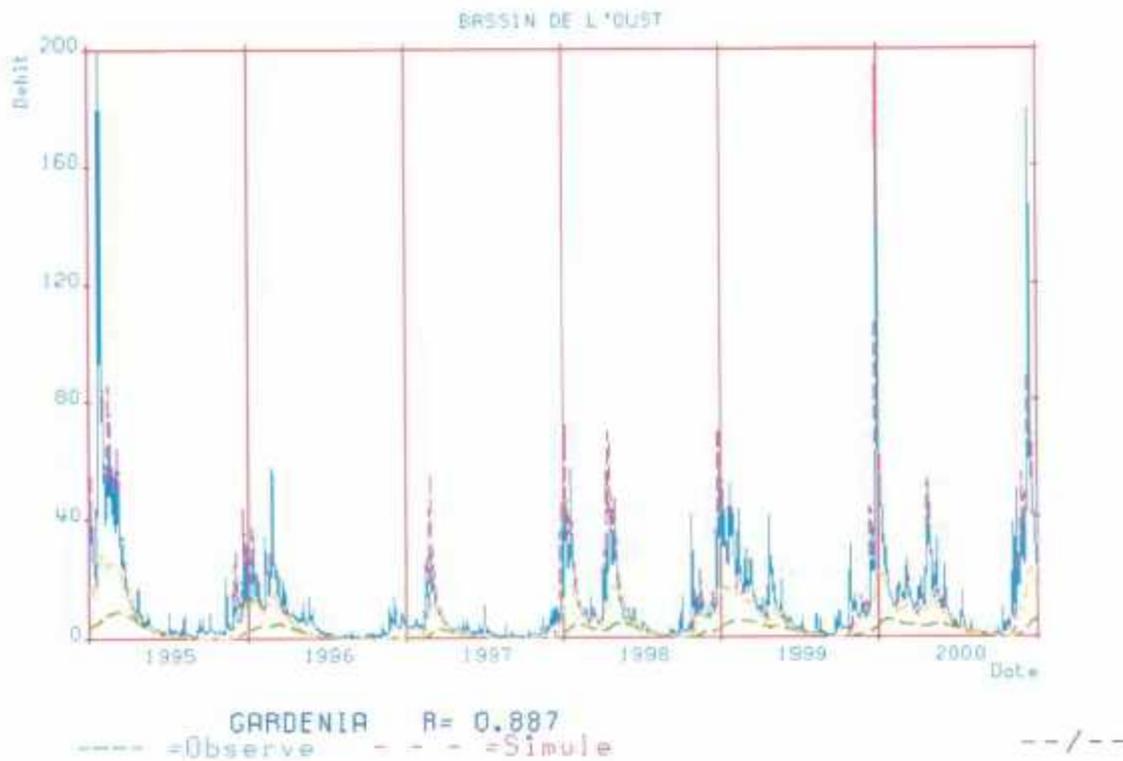


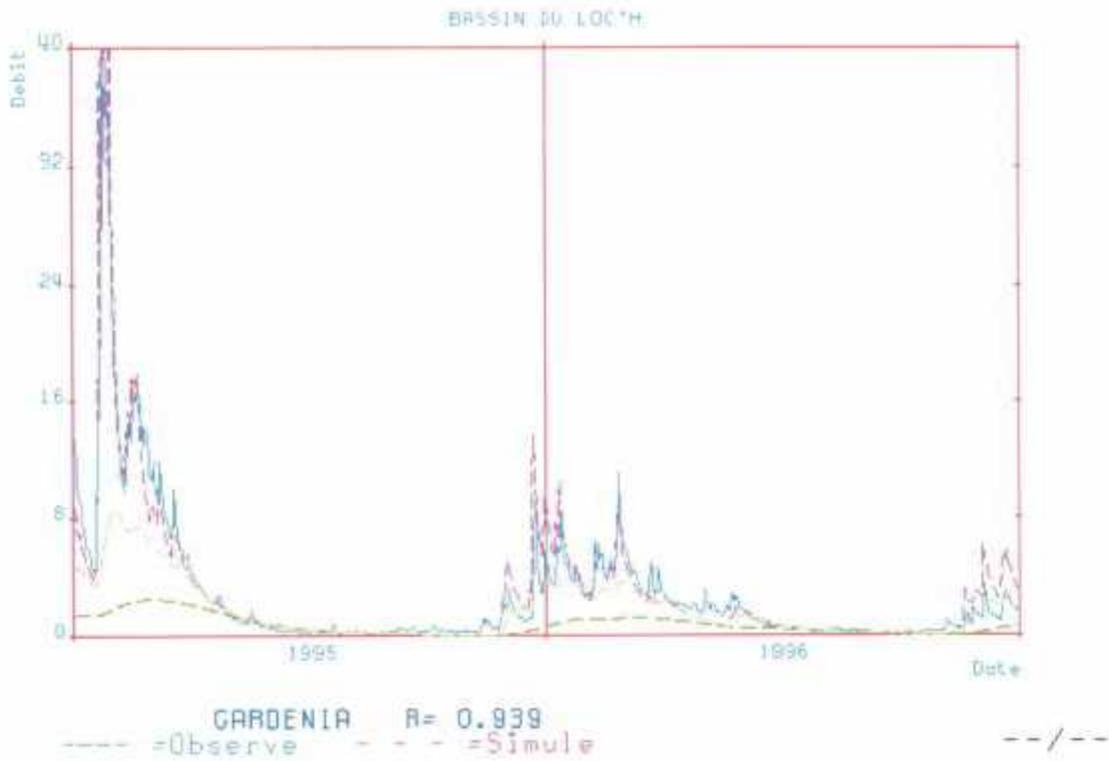
URNE



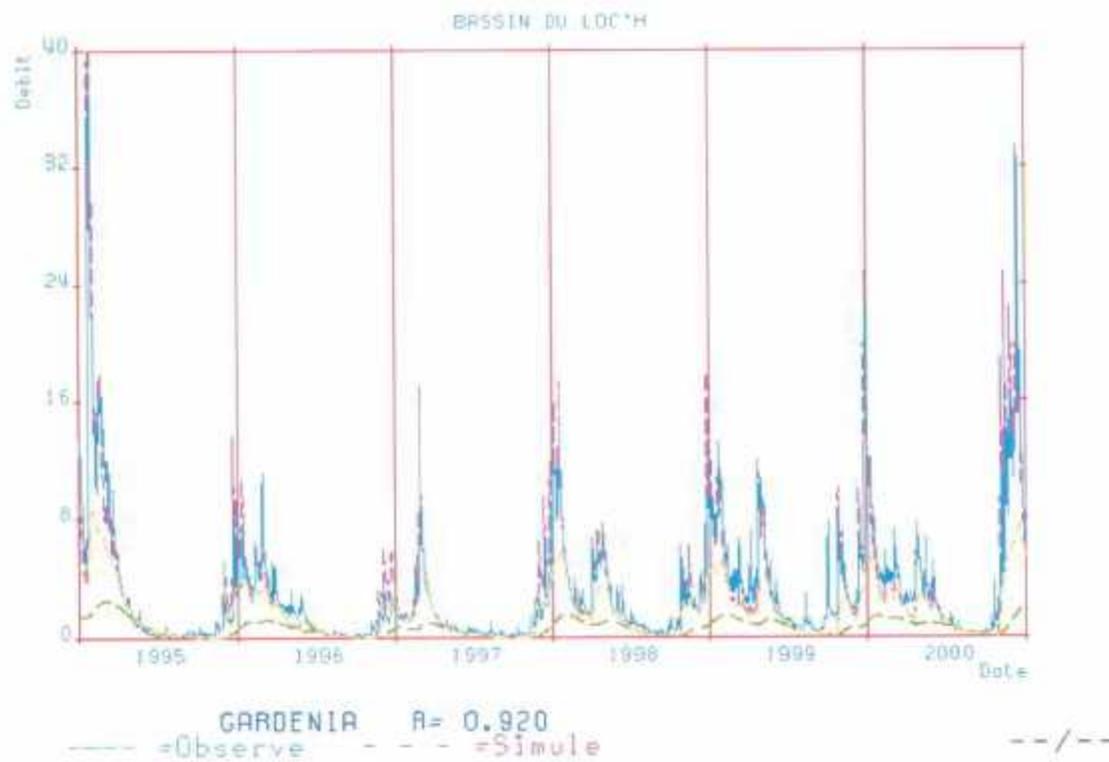


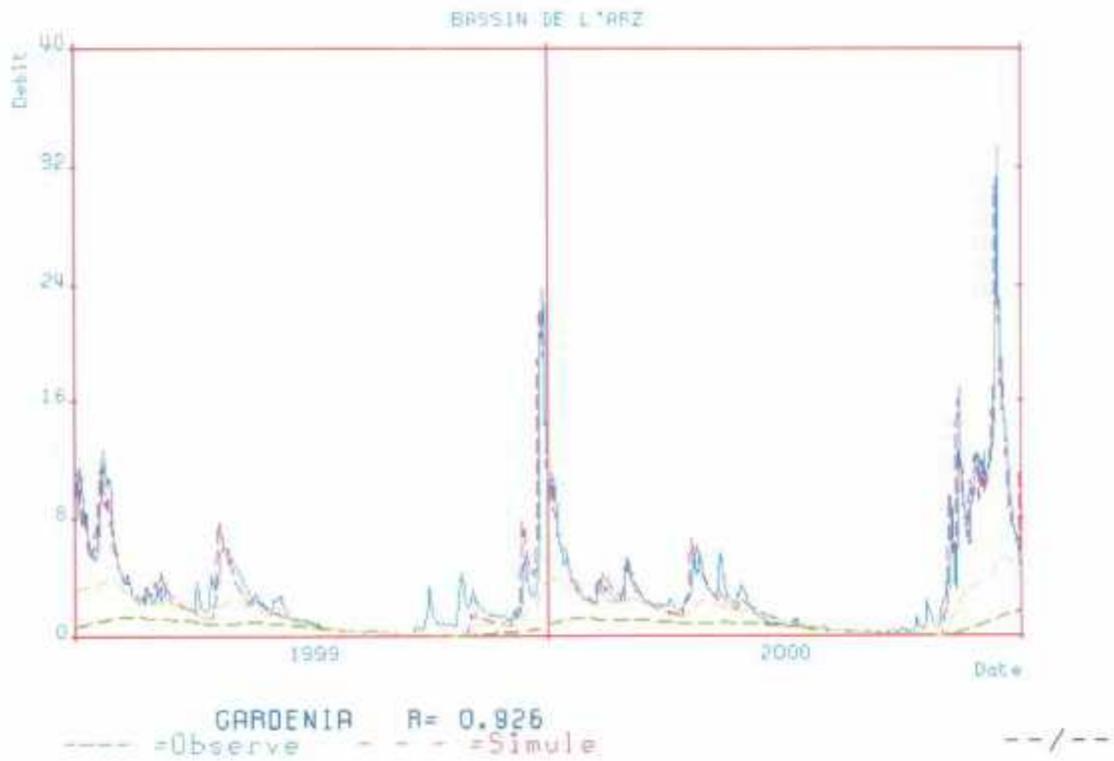
OUST



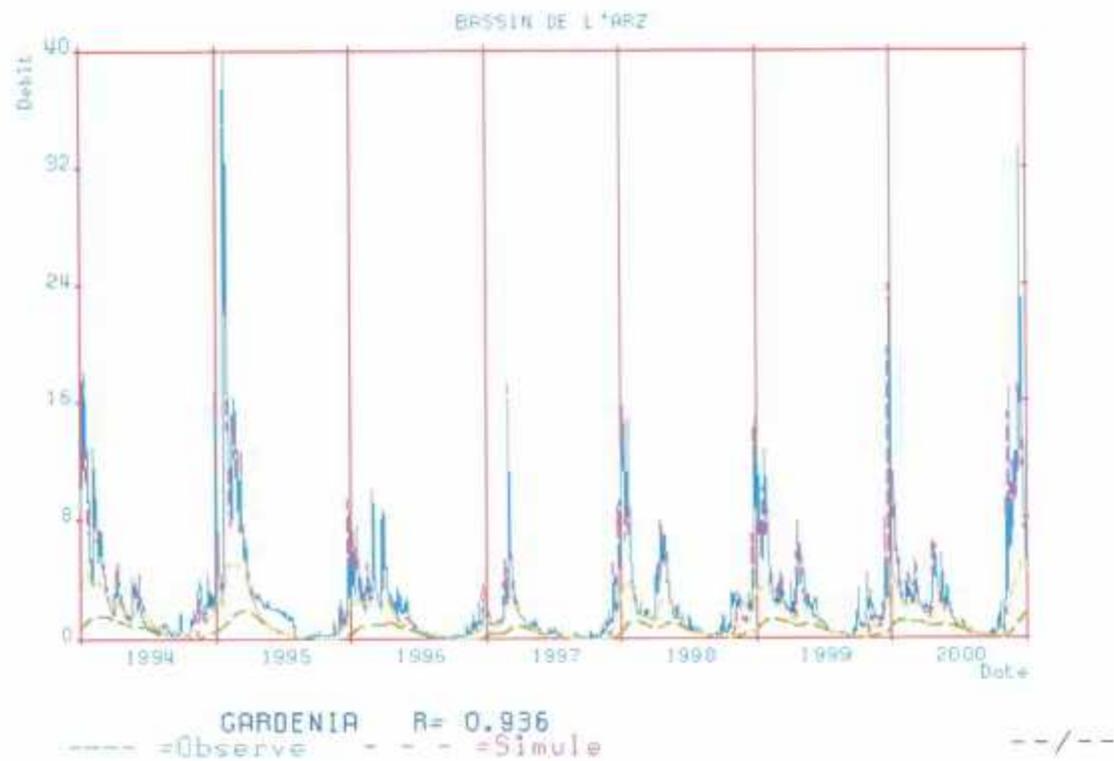


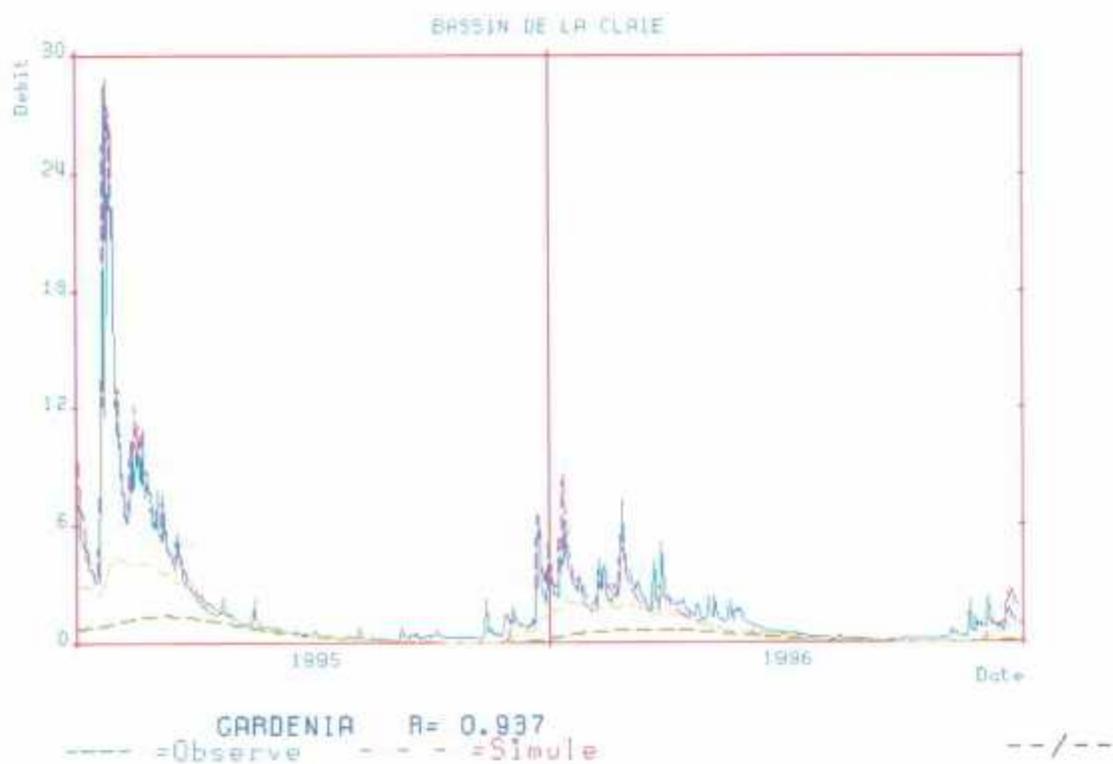
LOC'H



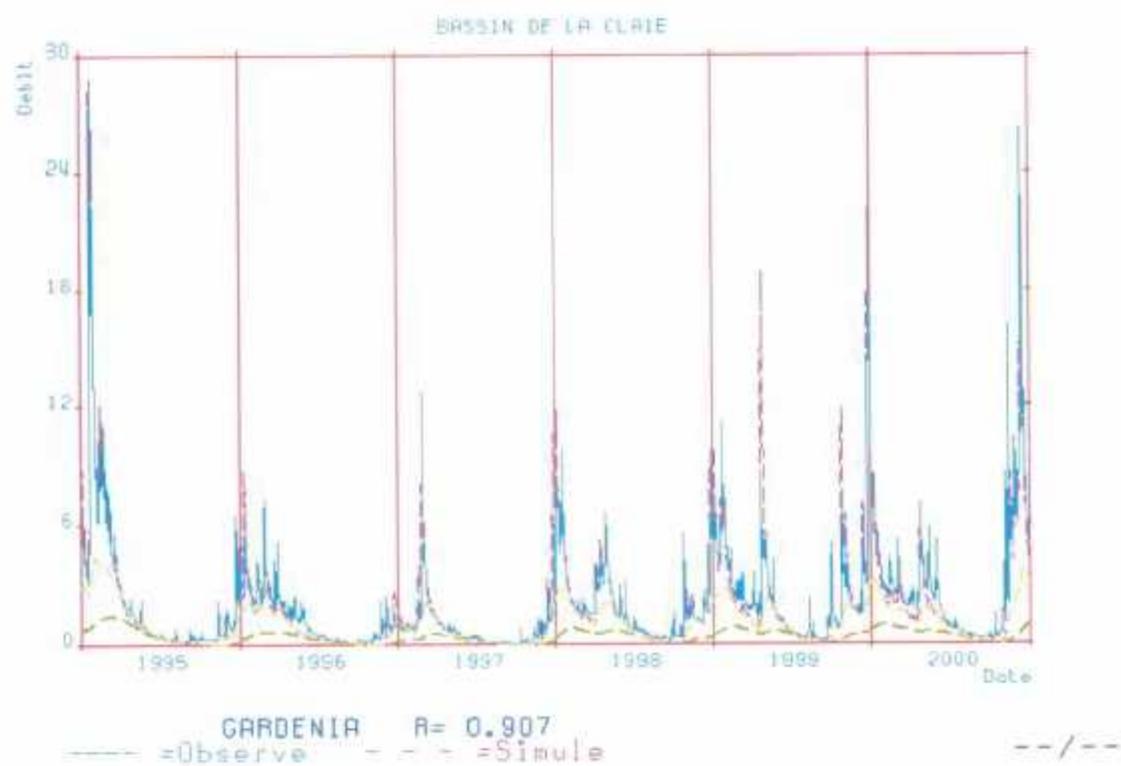


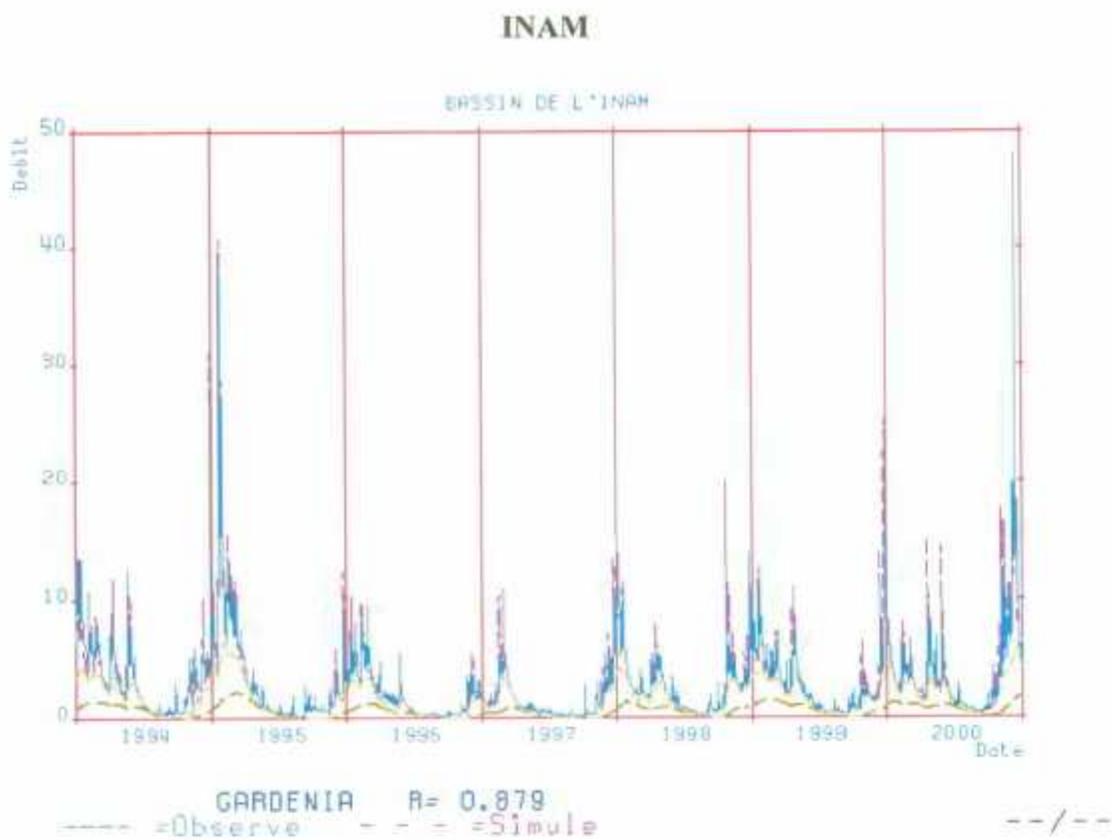
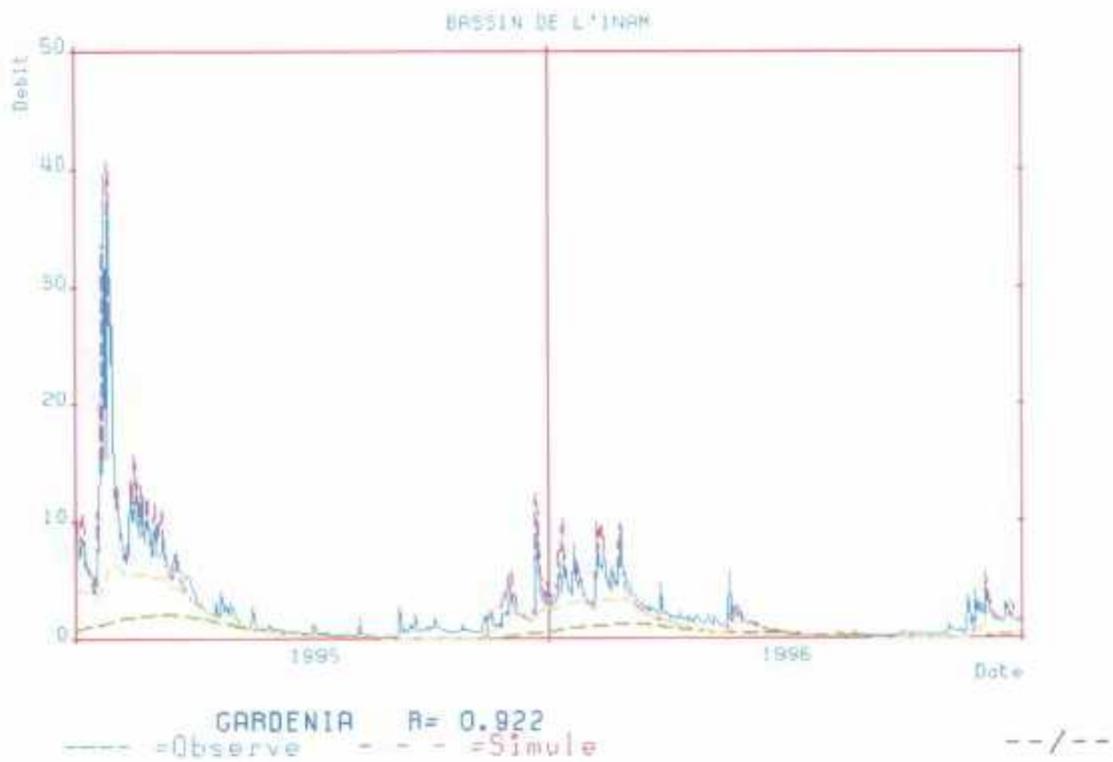
ARZ

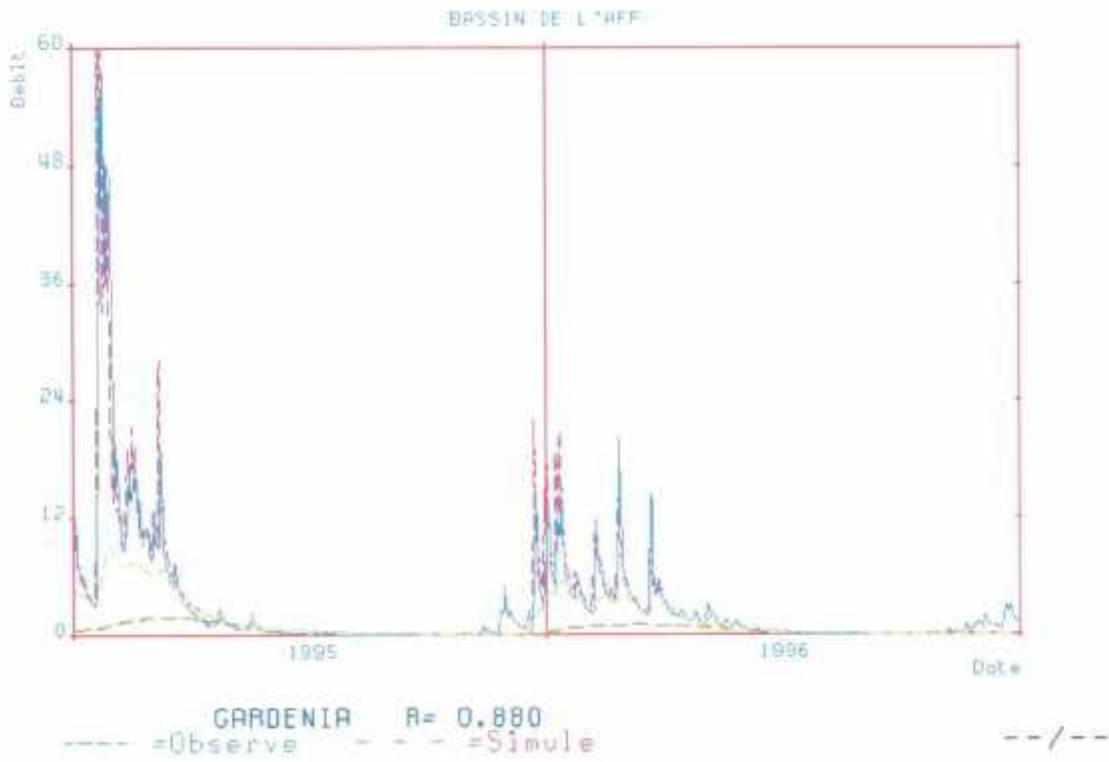




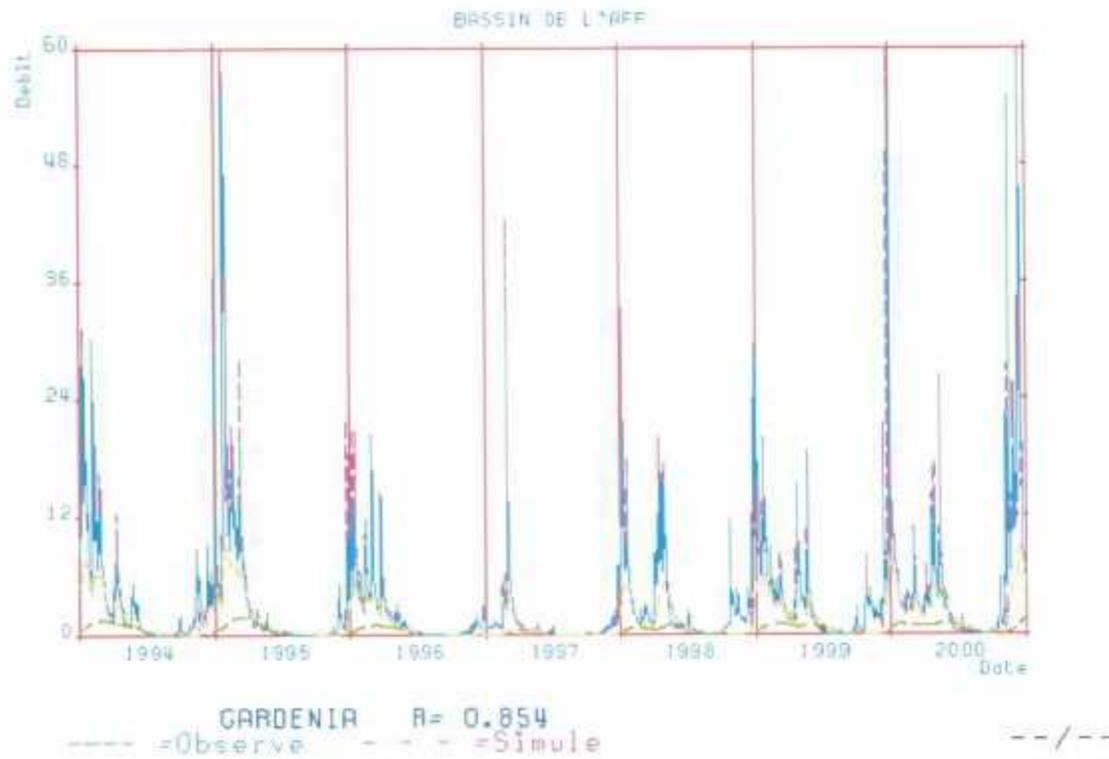
CLAIE

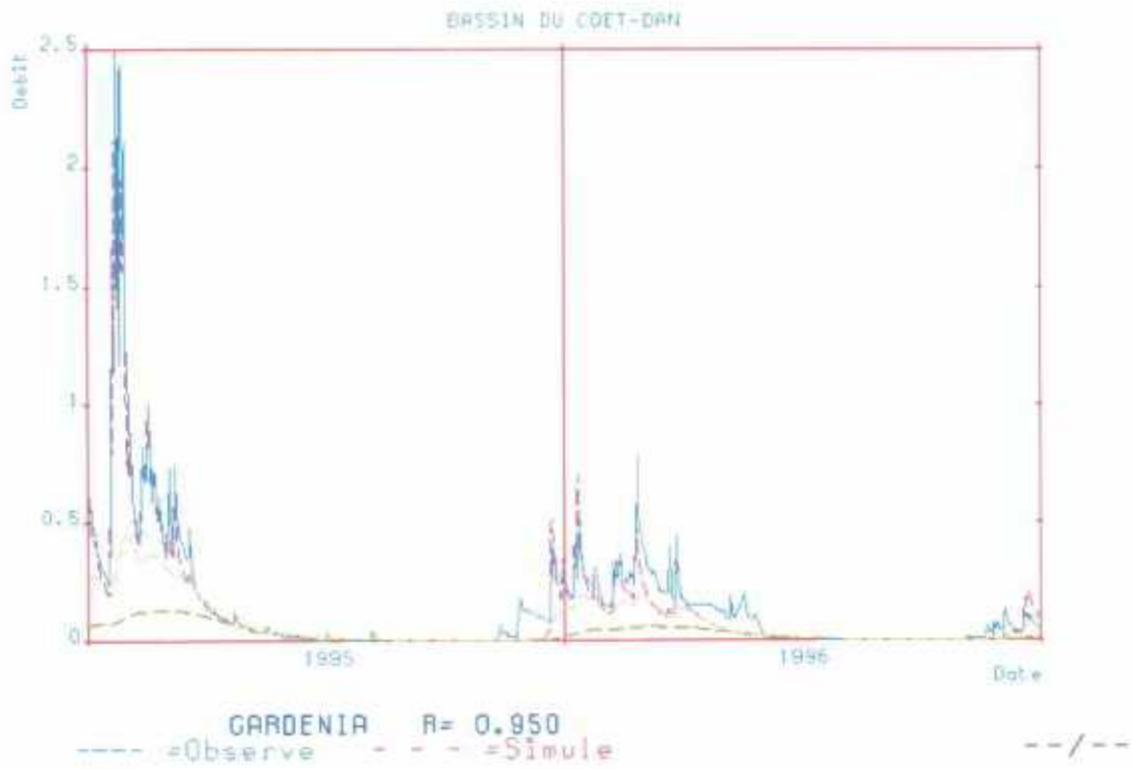




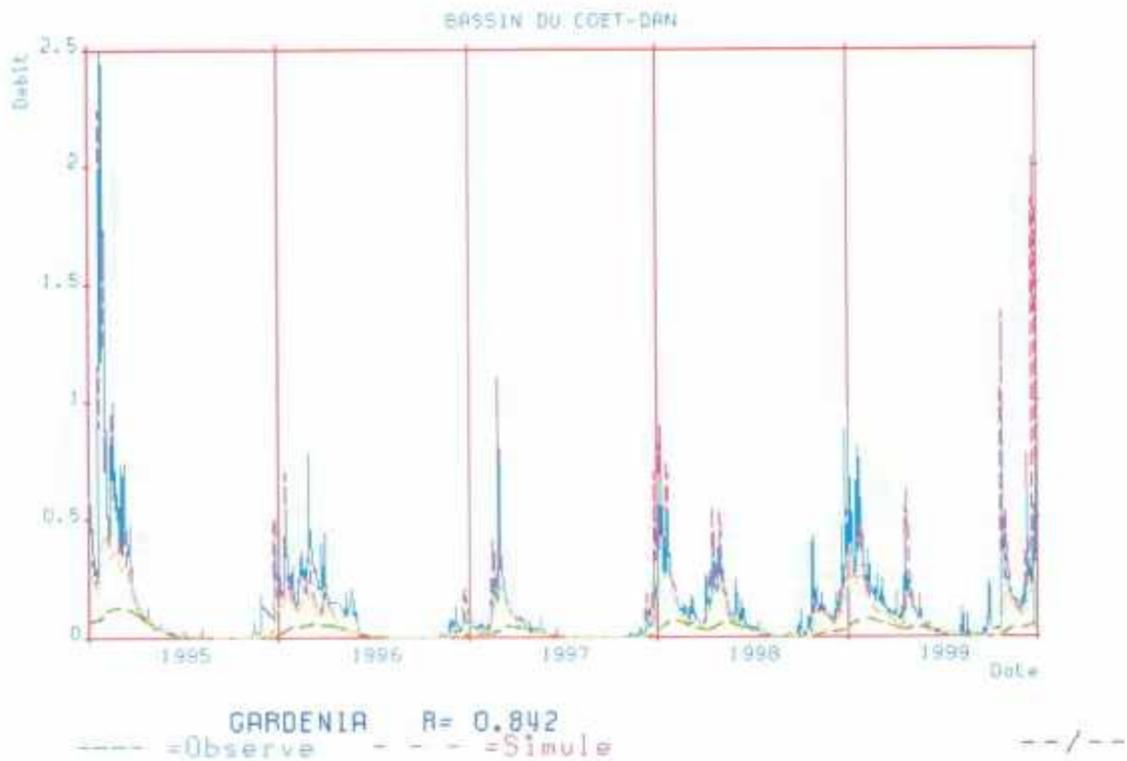


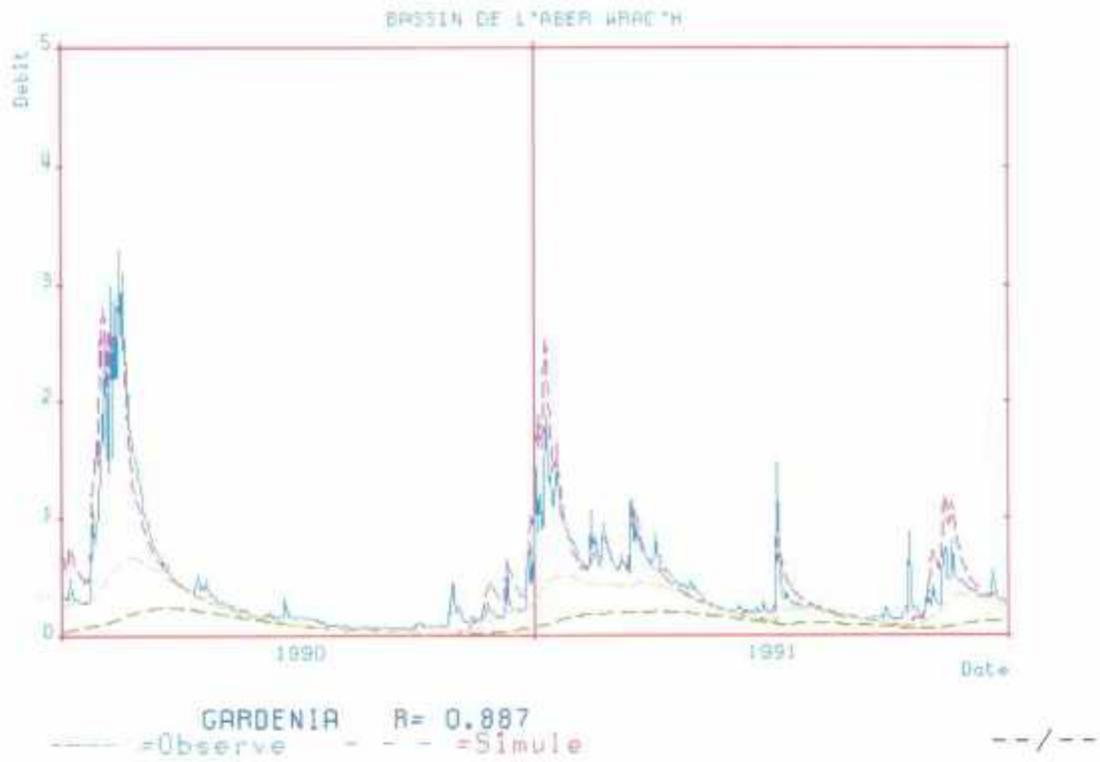
AFF



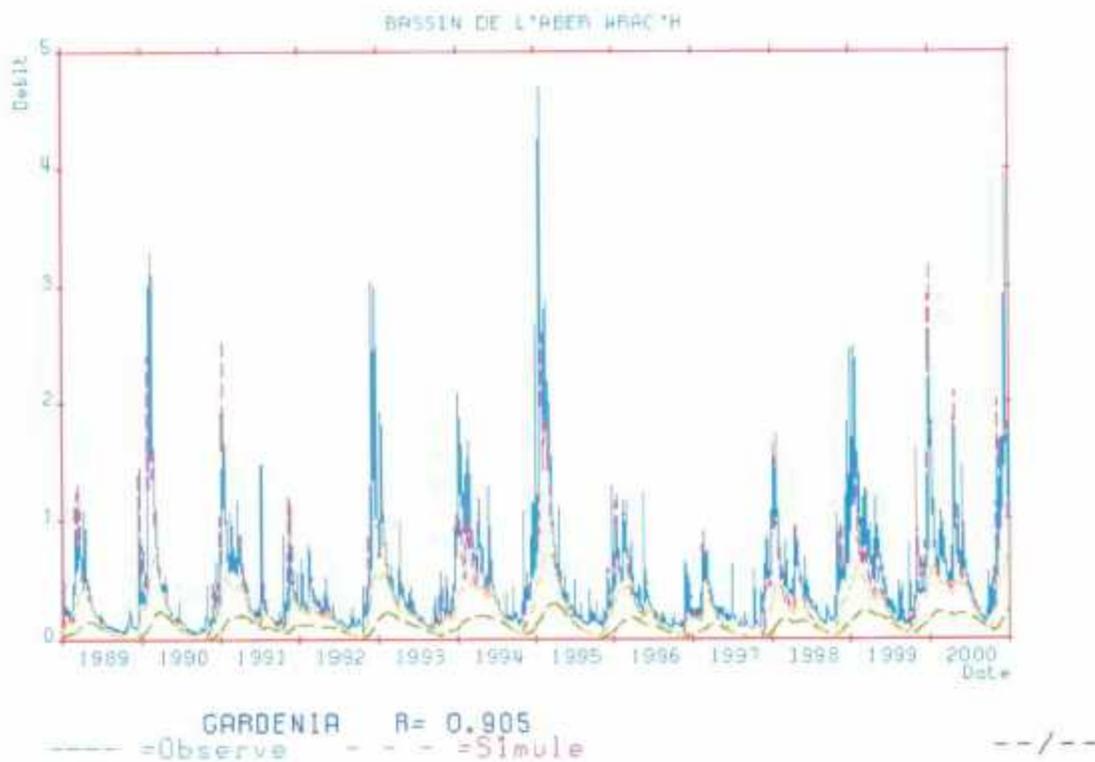


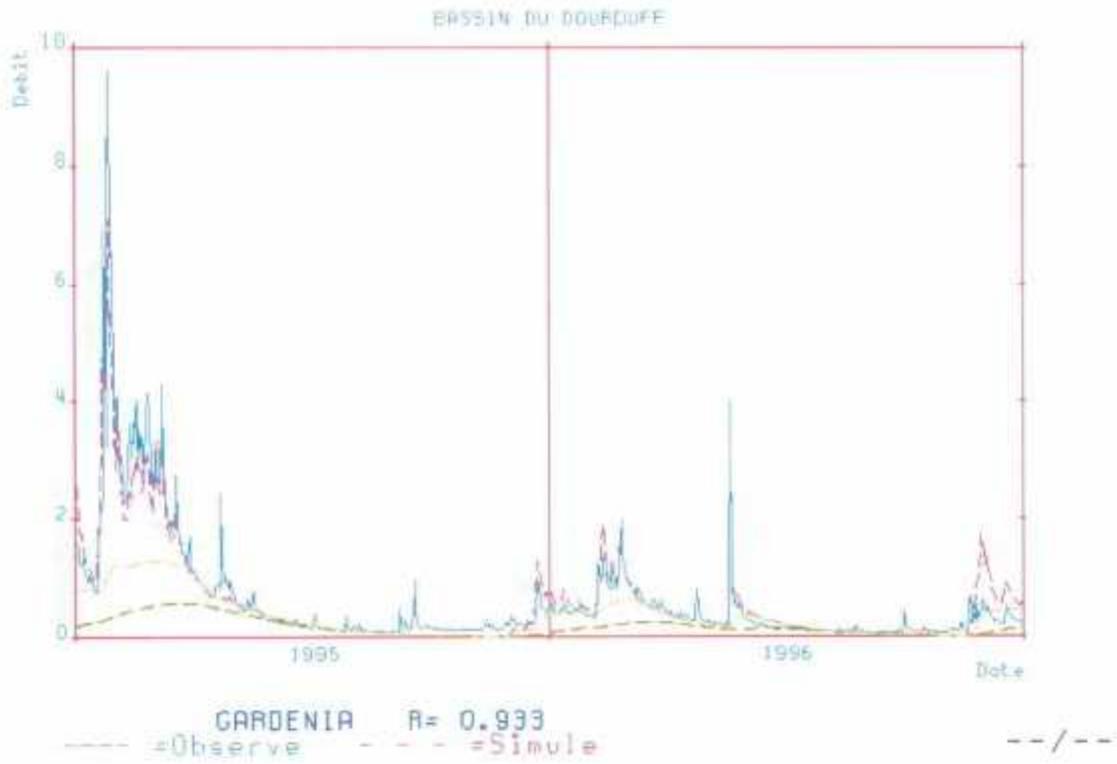
COET-DAN



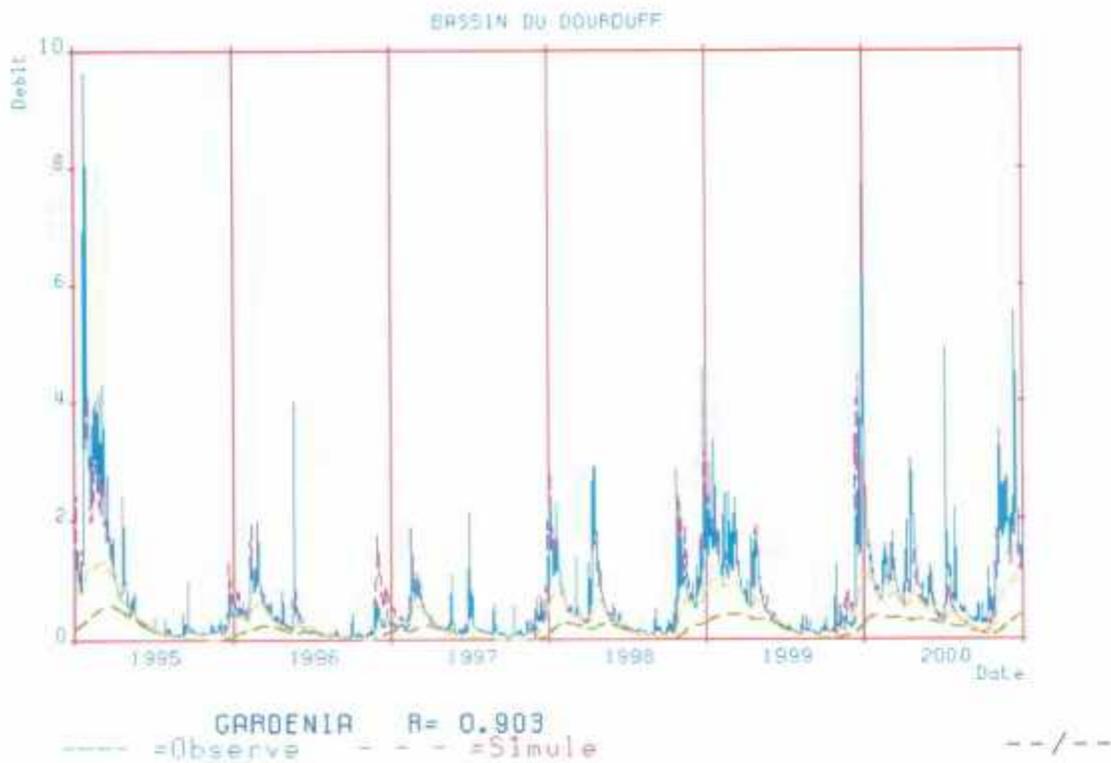


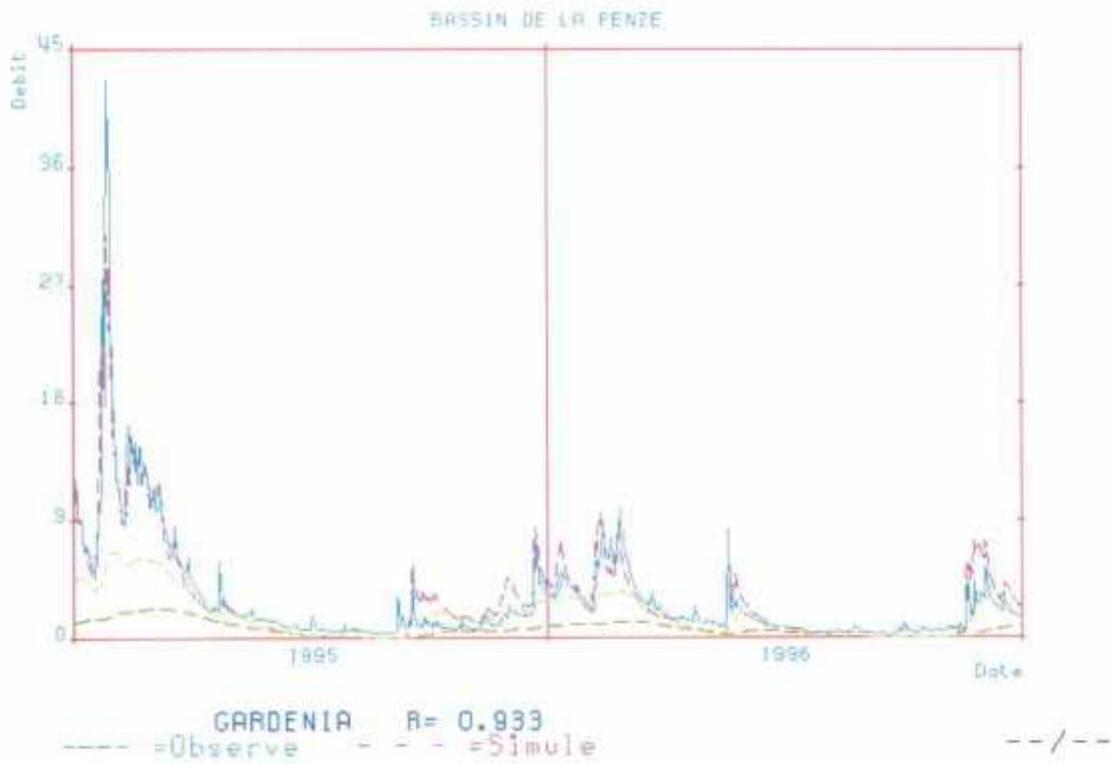
ABER WRAC'H



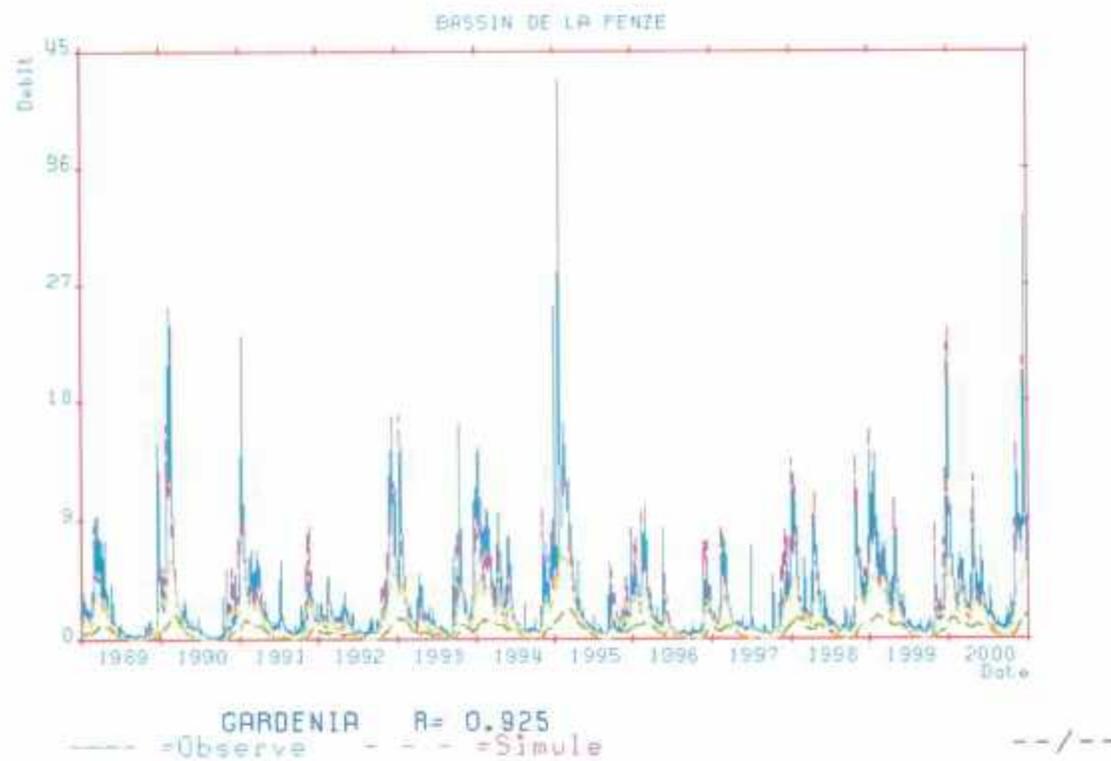


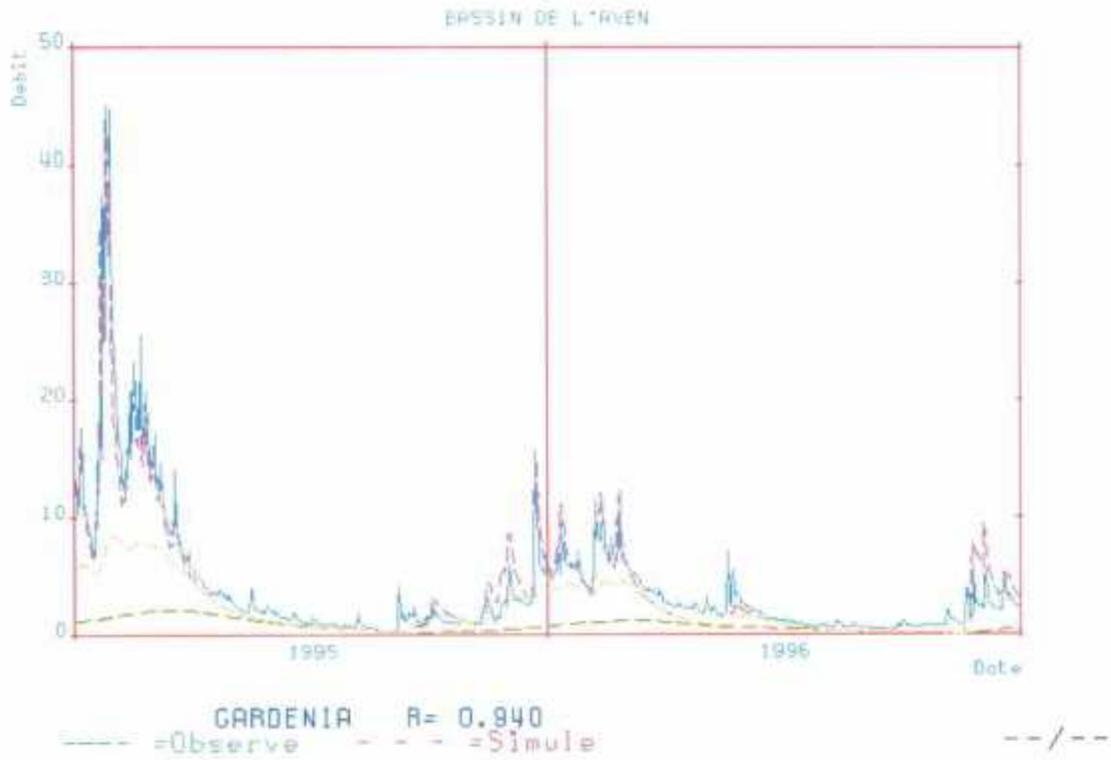
DOURDUFF



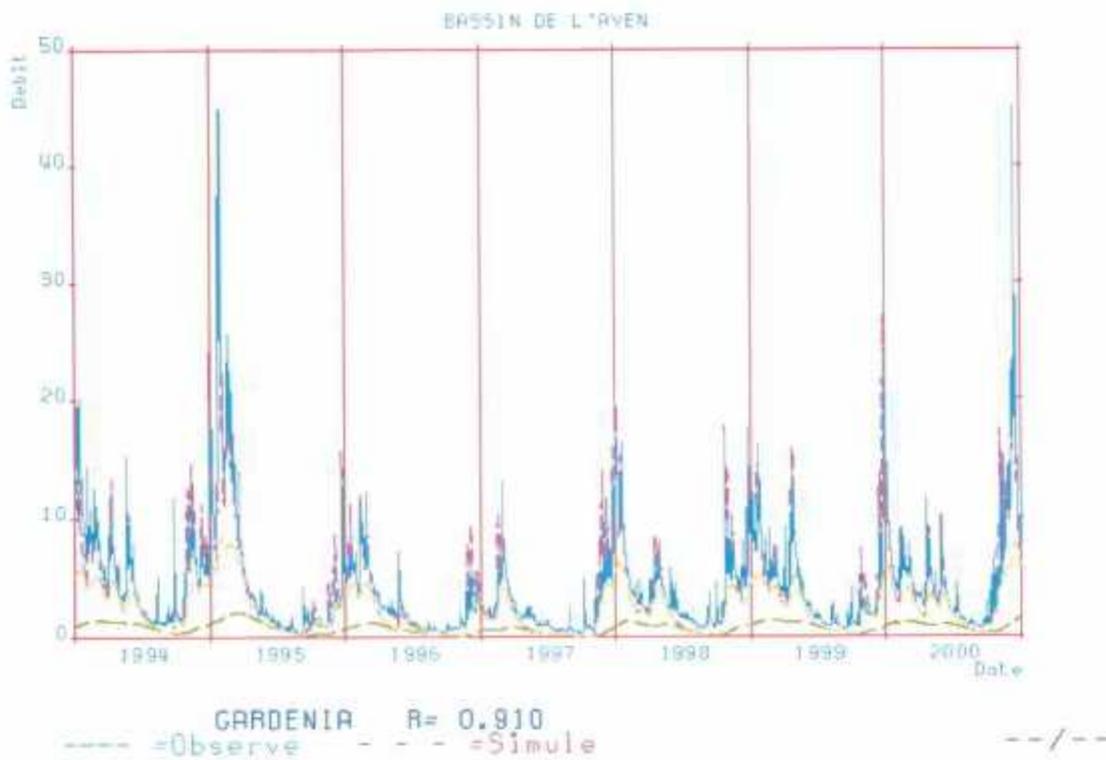


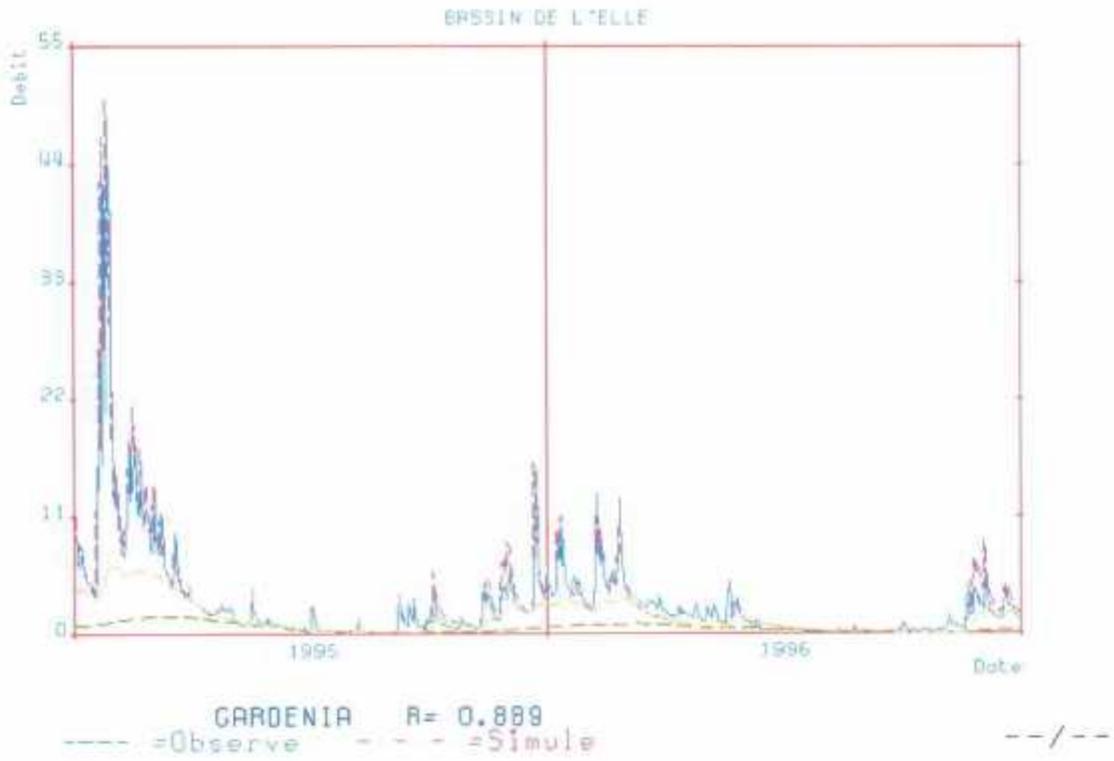
PENZE



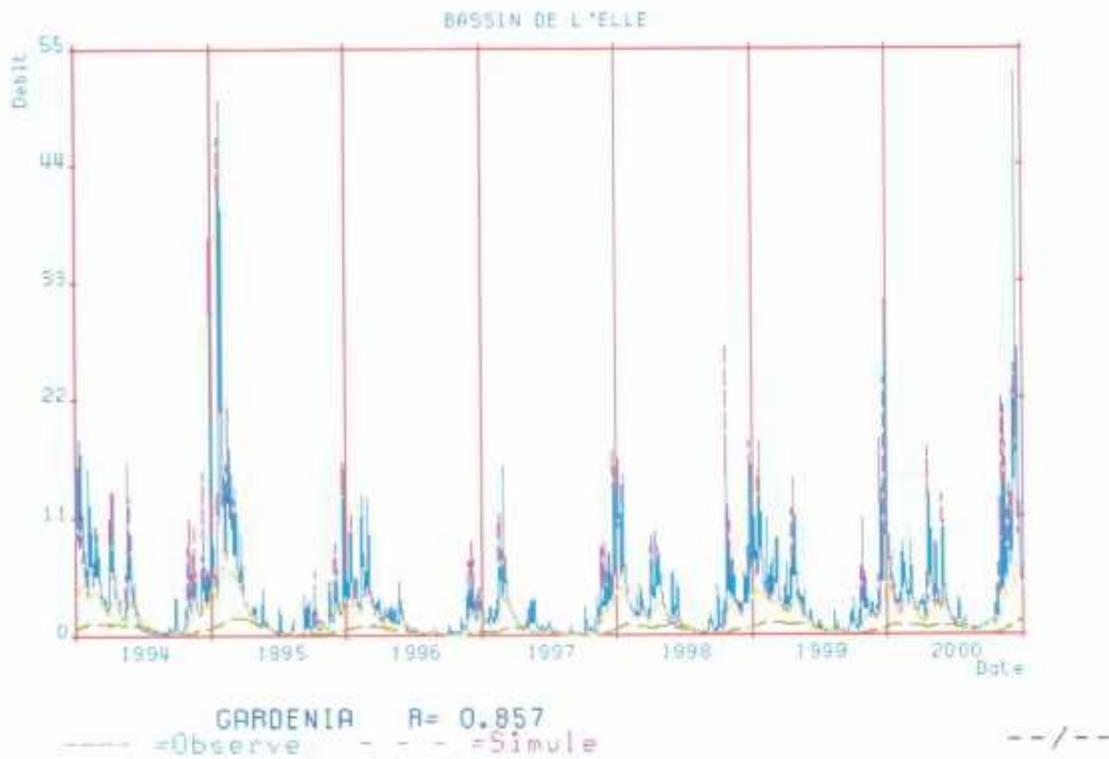


AVEN





ELLE



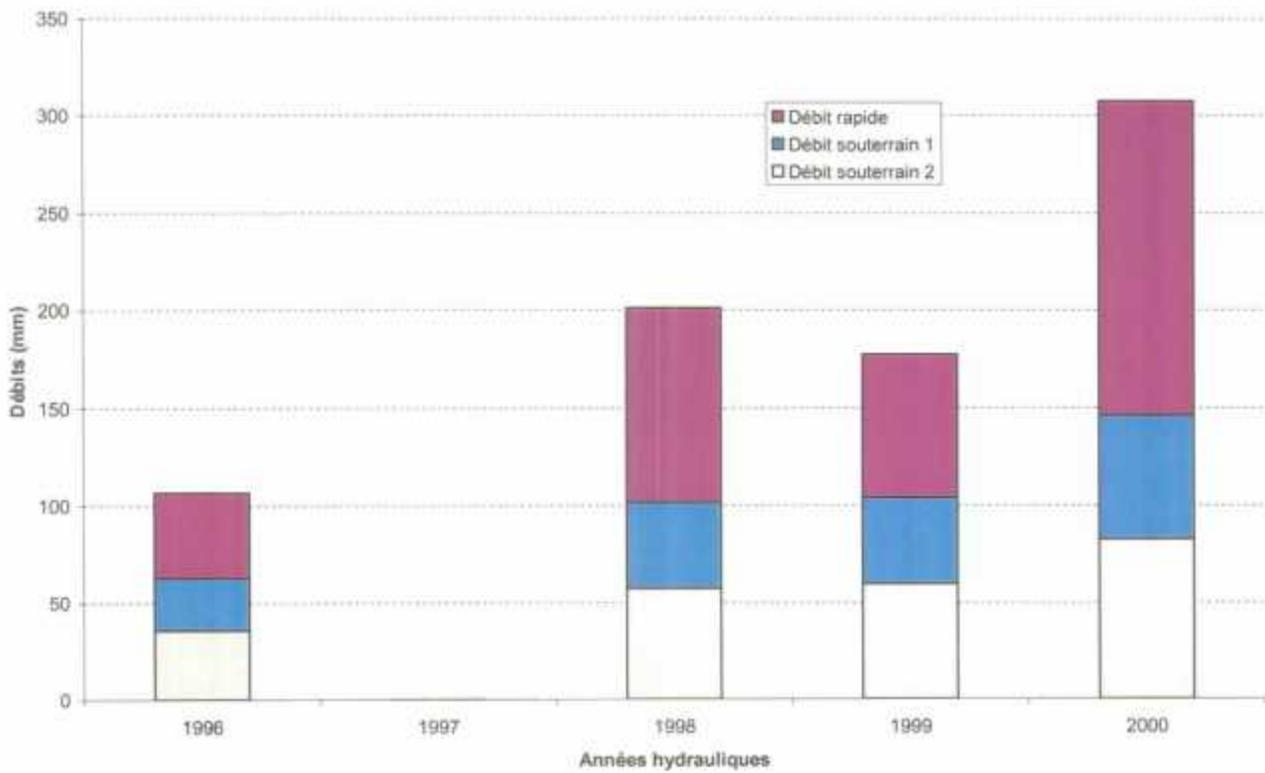


Fig. 20 - Débits annuels rapides et souterrains des bassins versants

ROSETTE

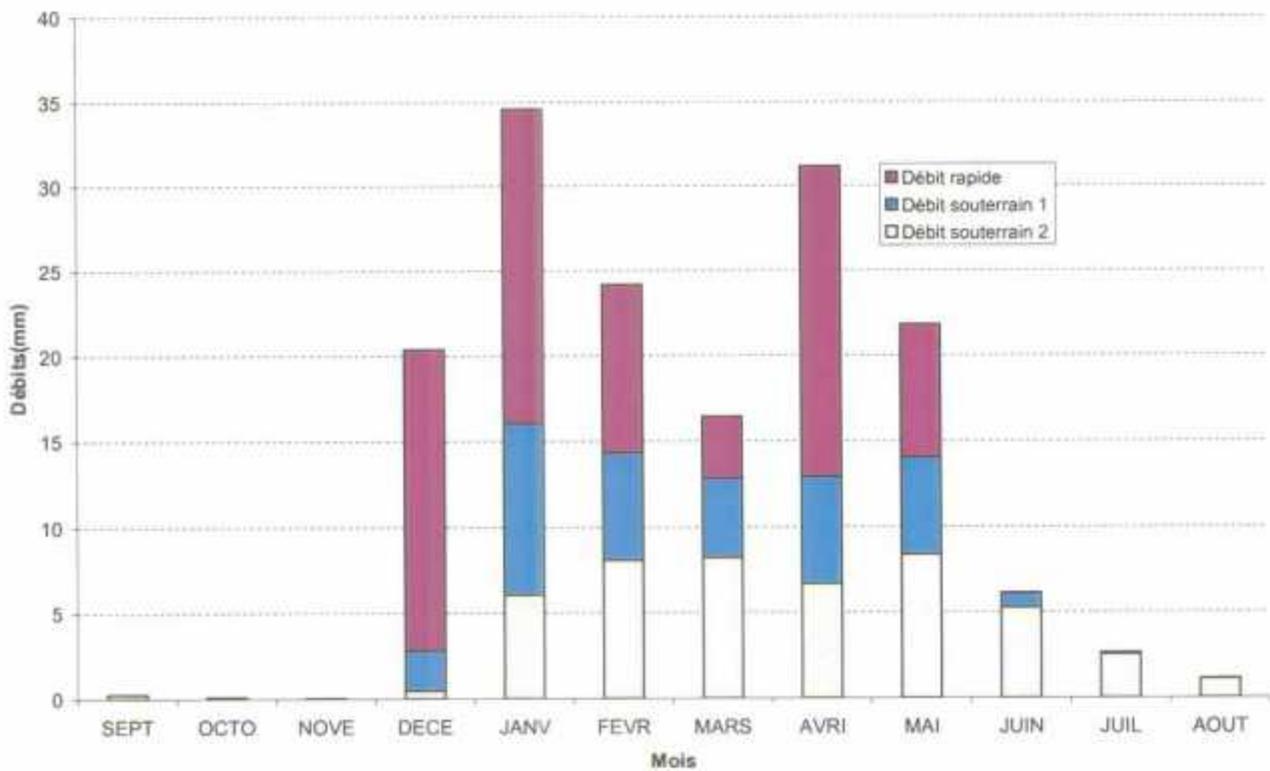
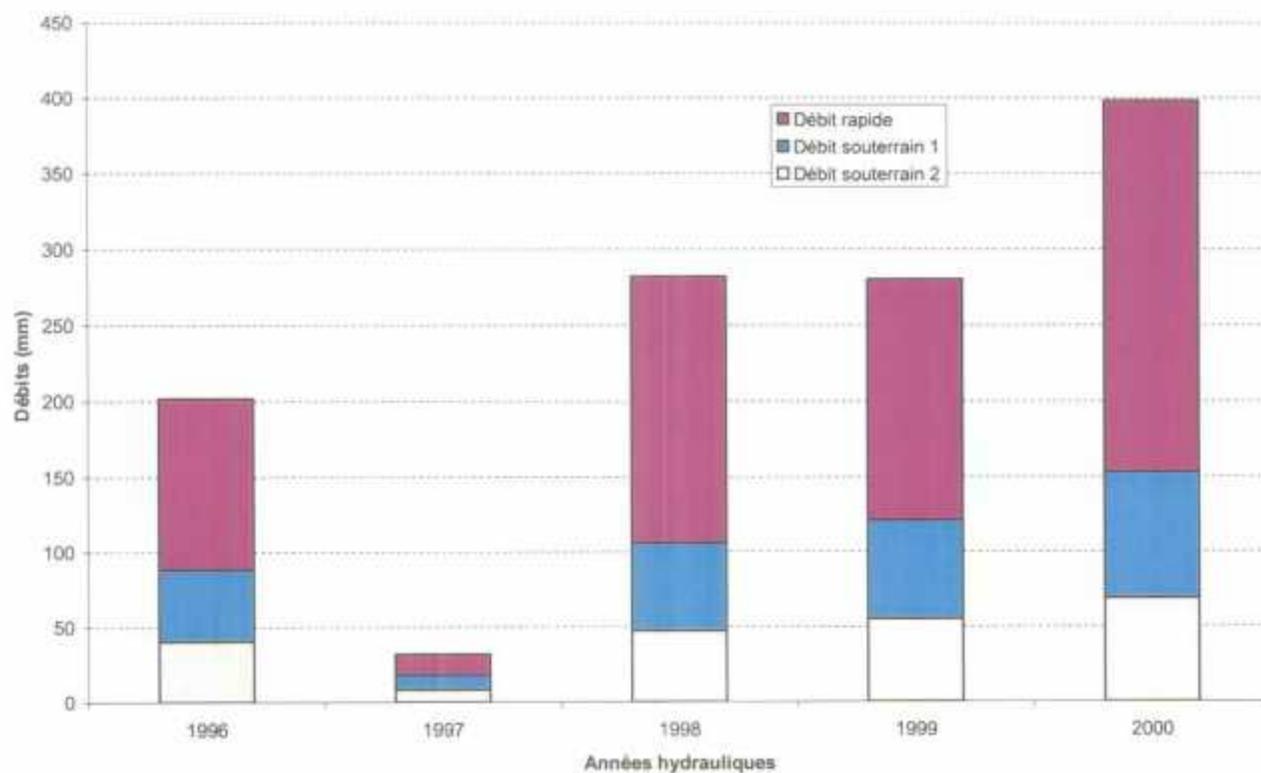
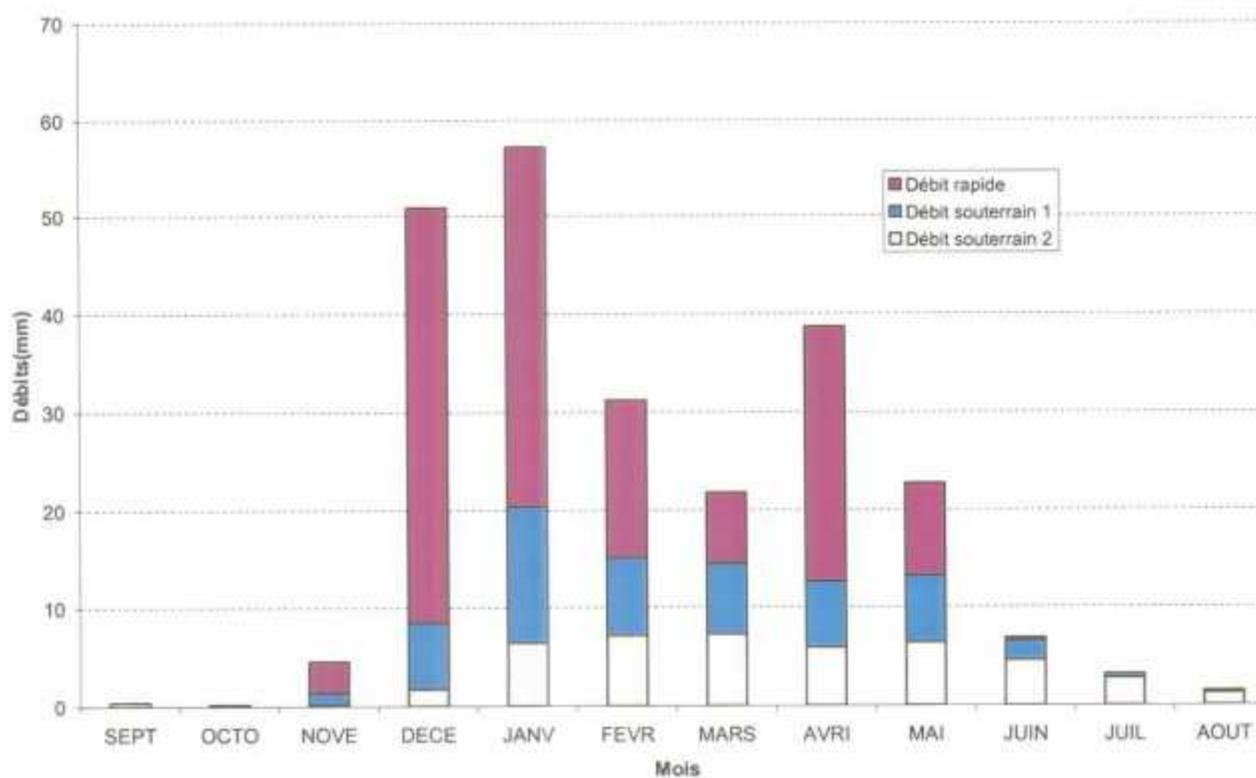


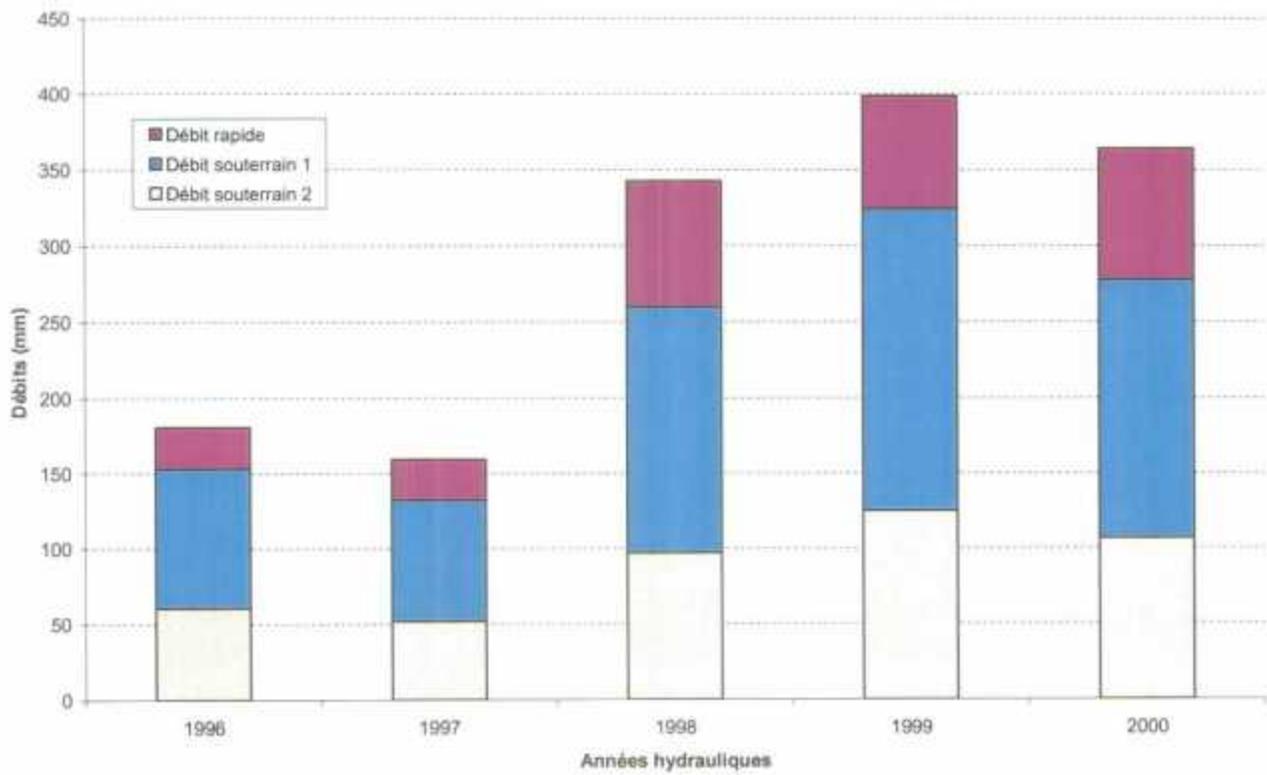
Fig. 21 - Débits mensuels moyens interannuels des bassins versants

SILURES Bretagne - Etat d'avancement de l'année 2

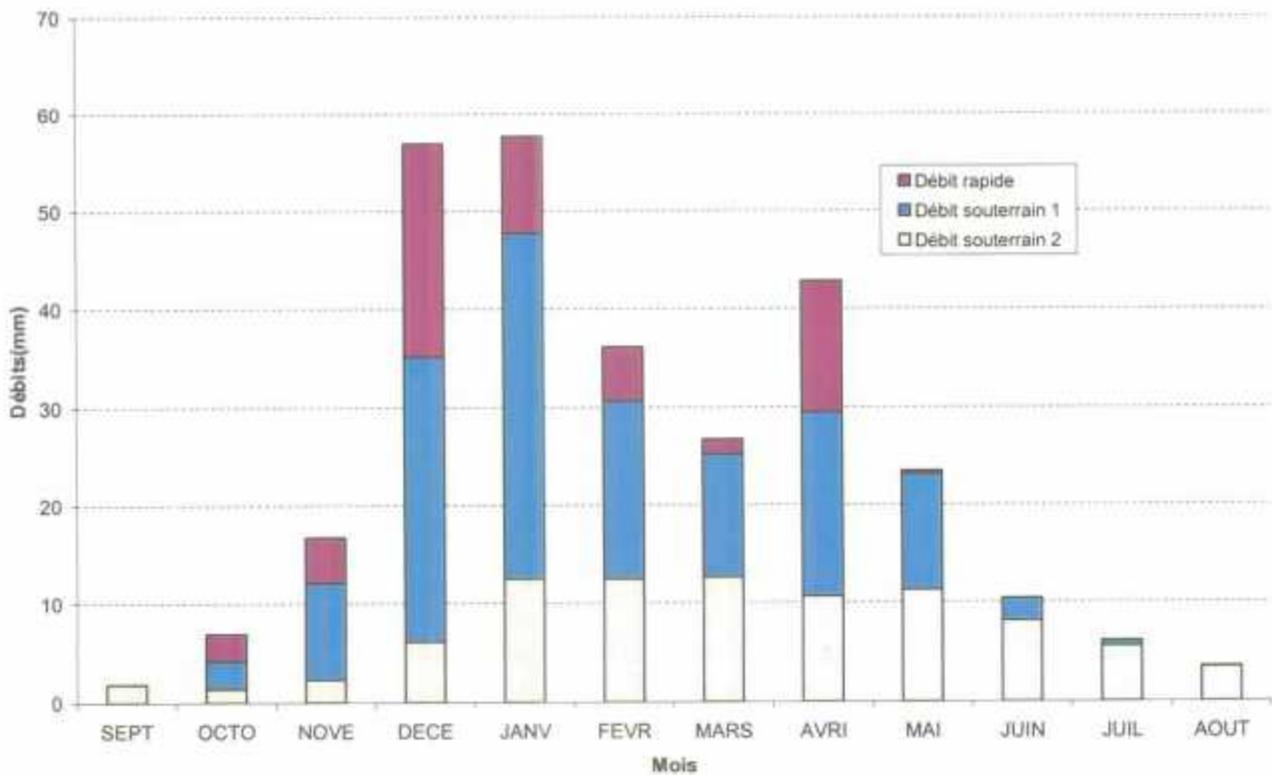


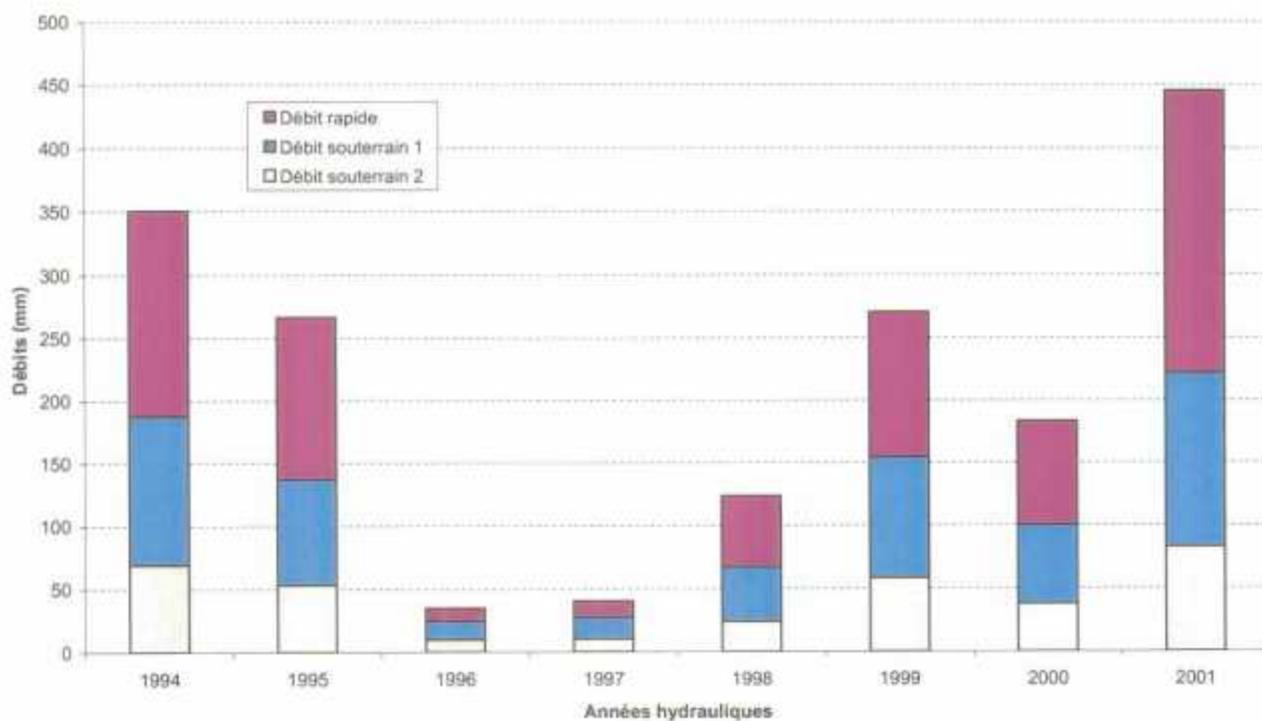
RANCE



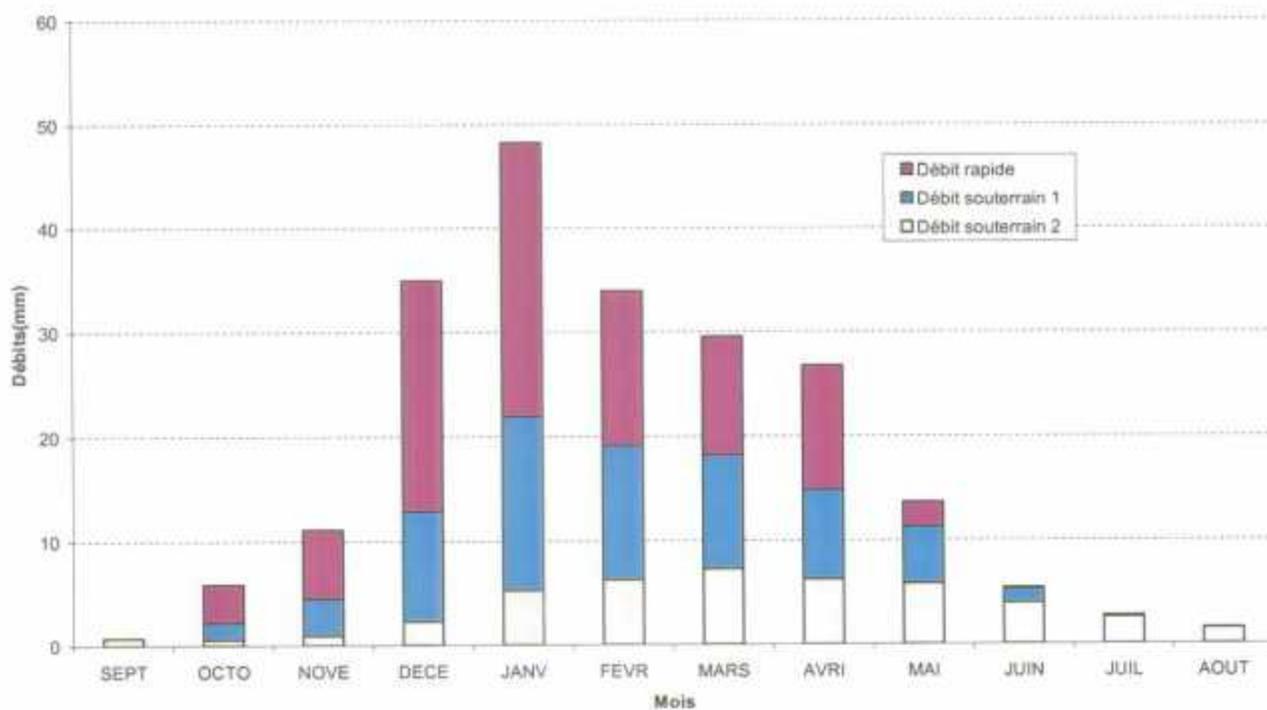


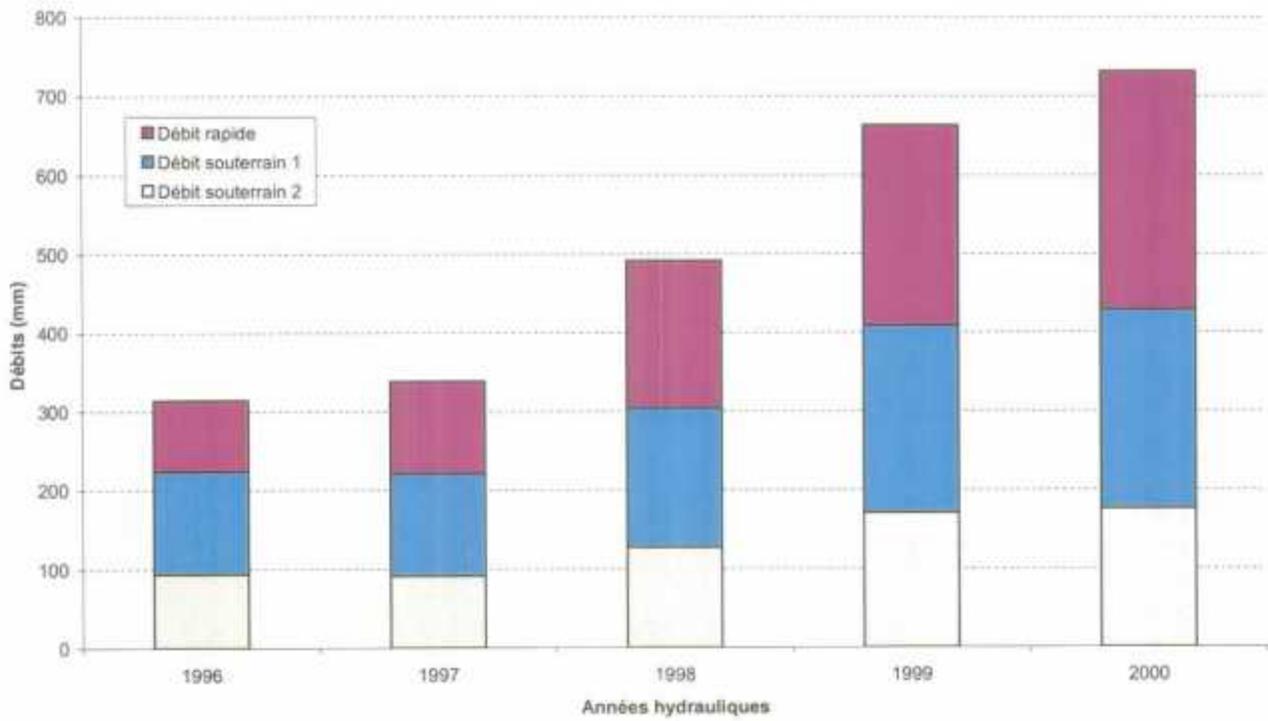
MAUDOUVE



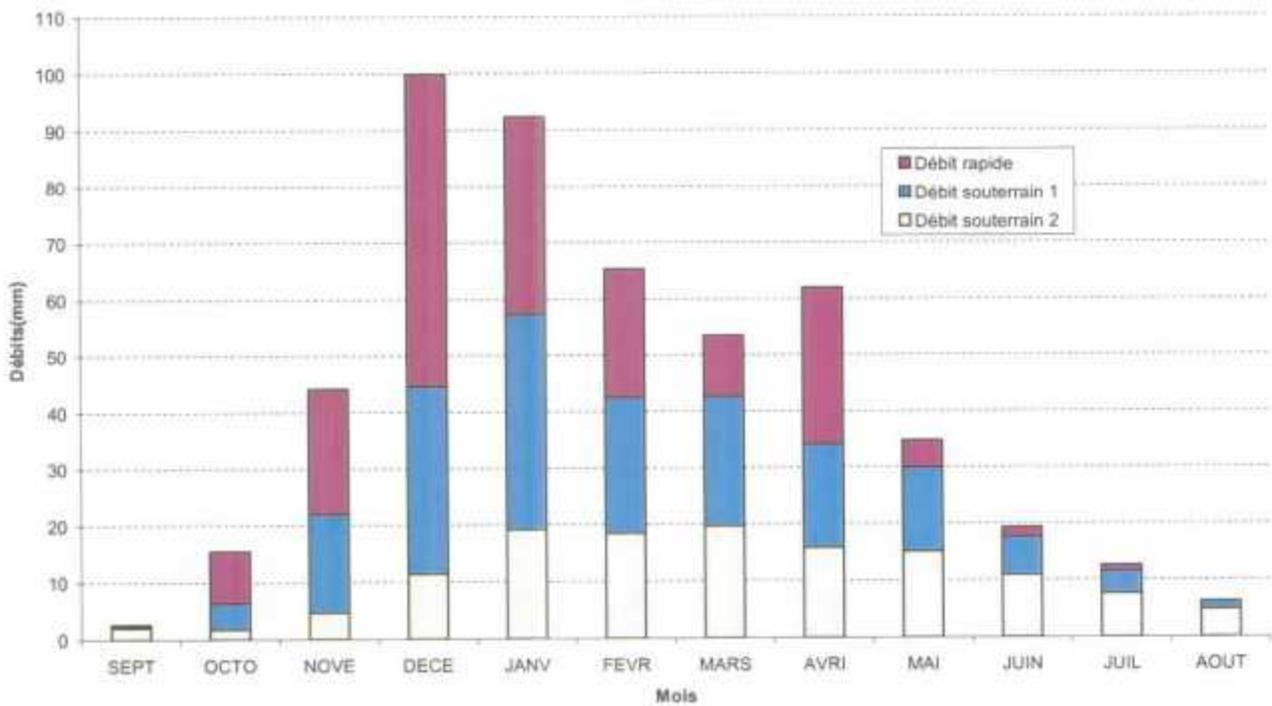


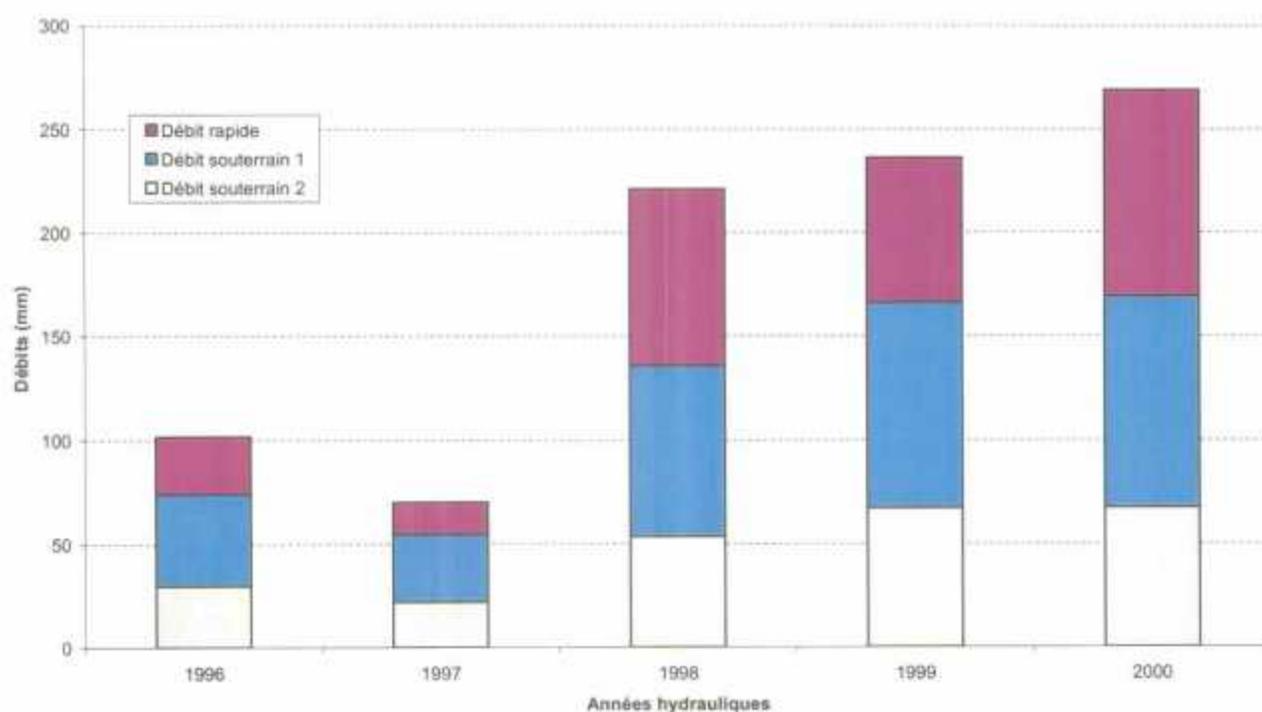
FREMUR



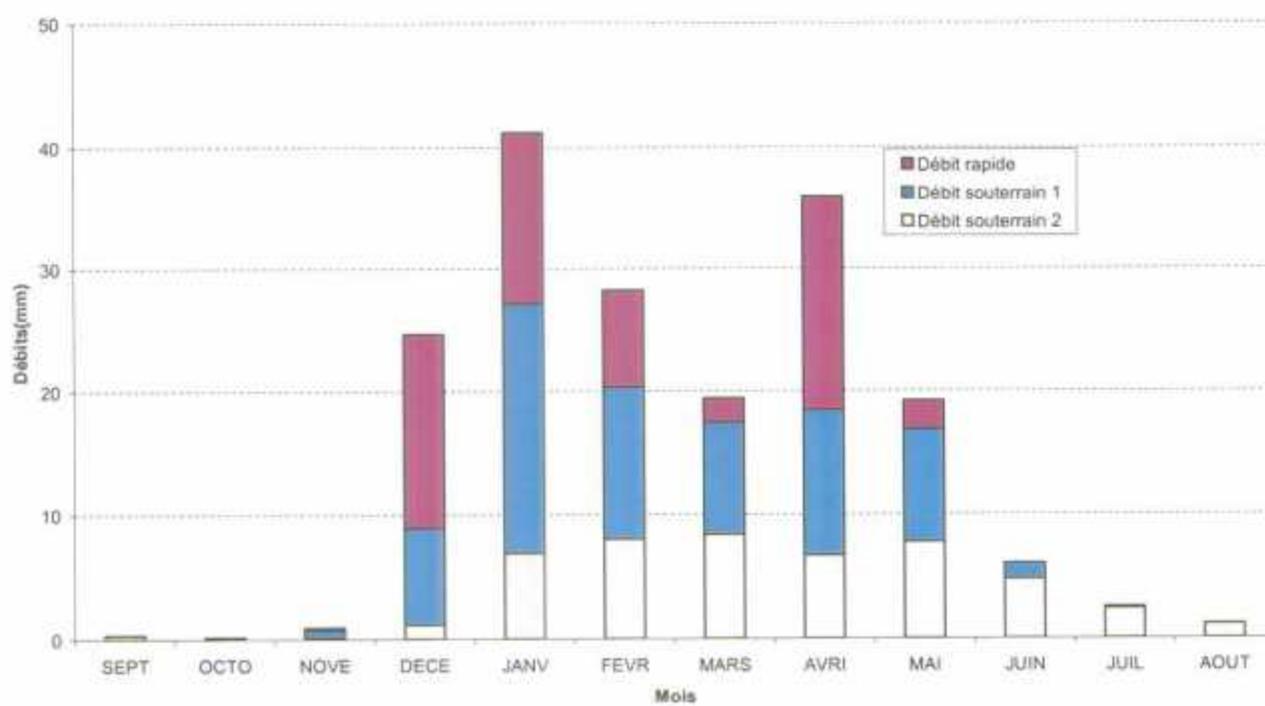


LEGUER

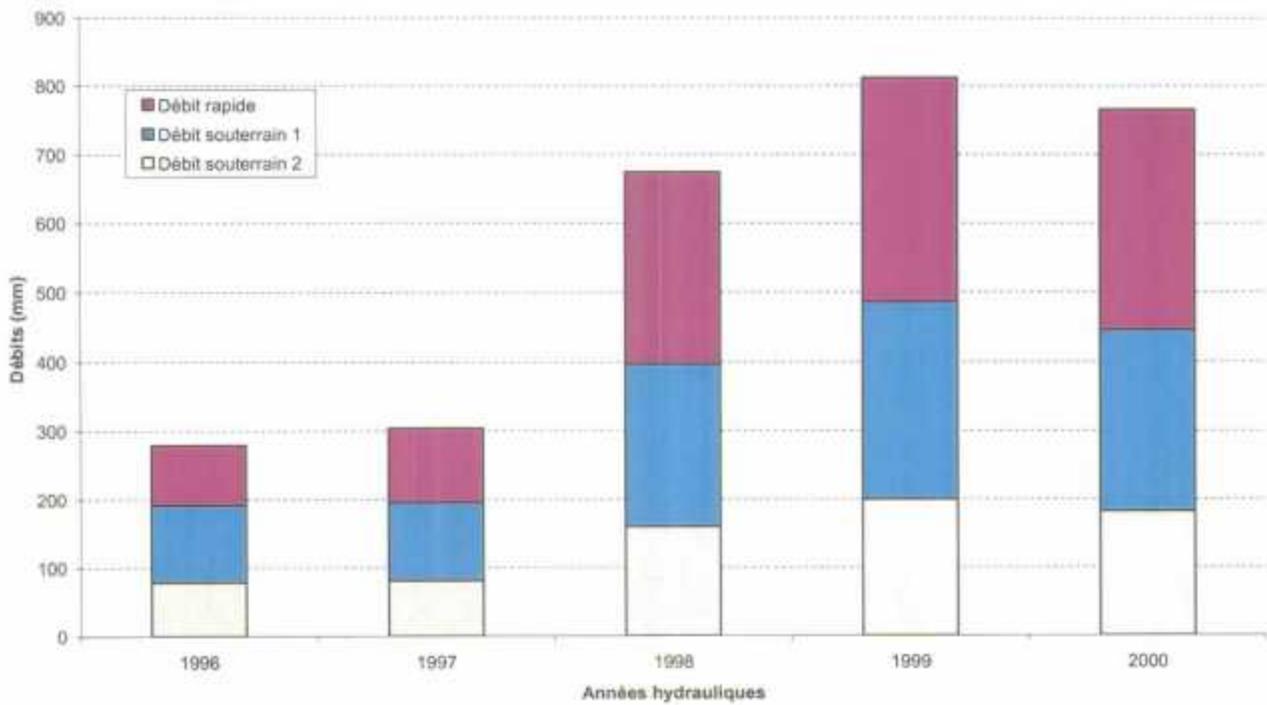




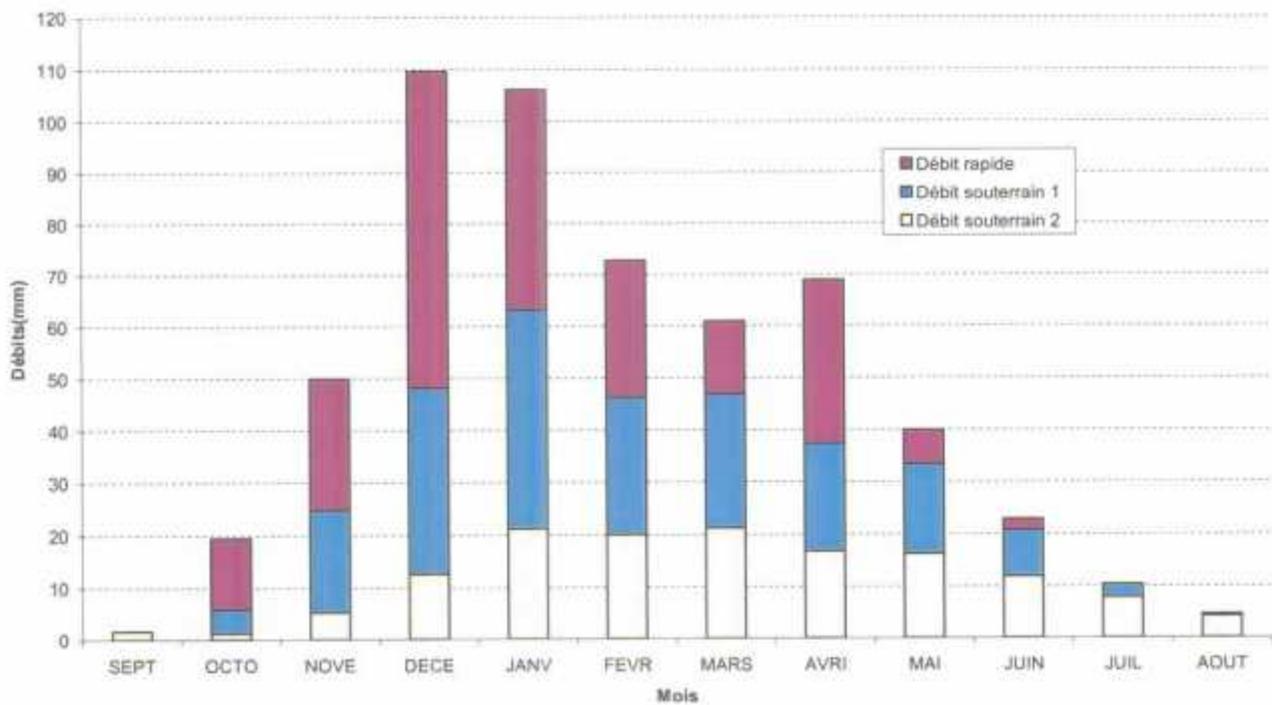
EVRON

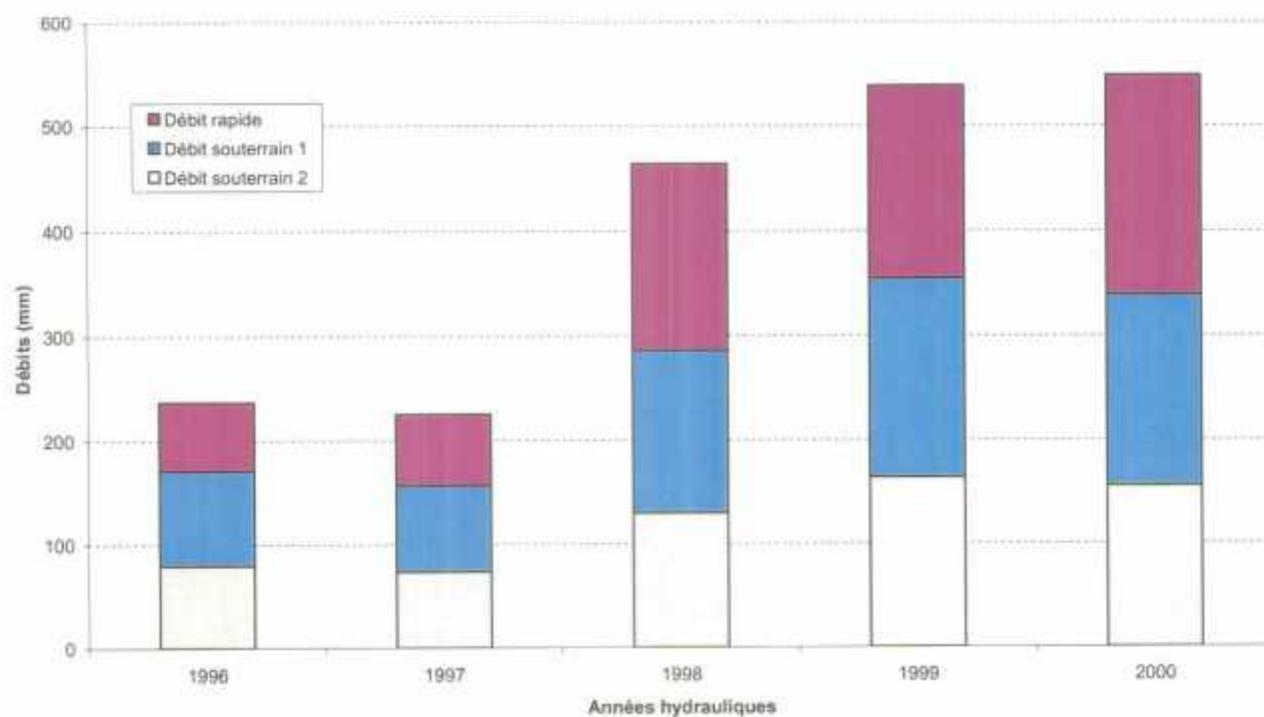


SILURES Bretagne - Etat d'avancement de l'année 2

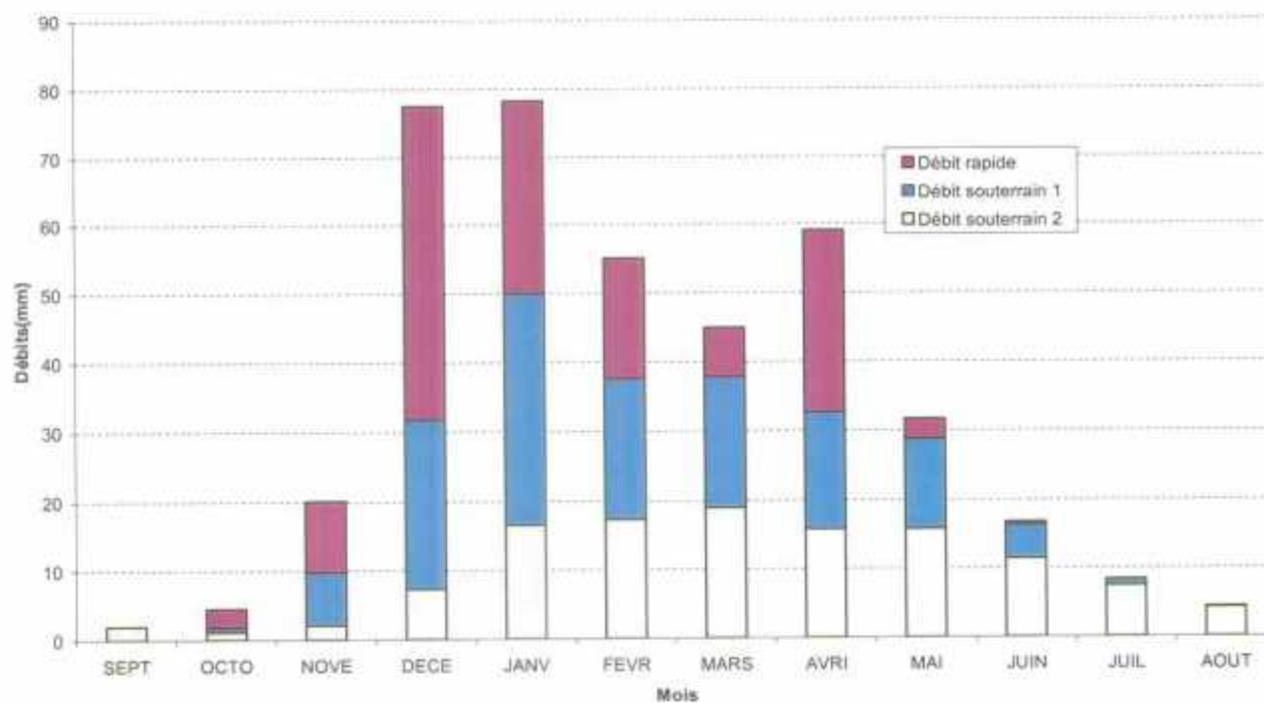


BLAVET

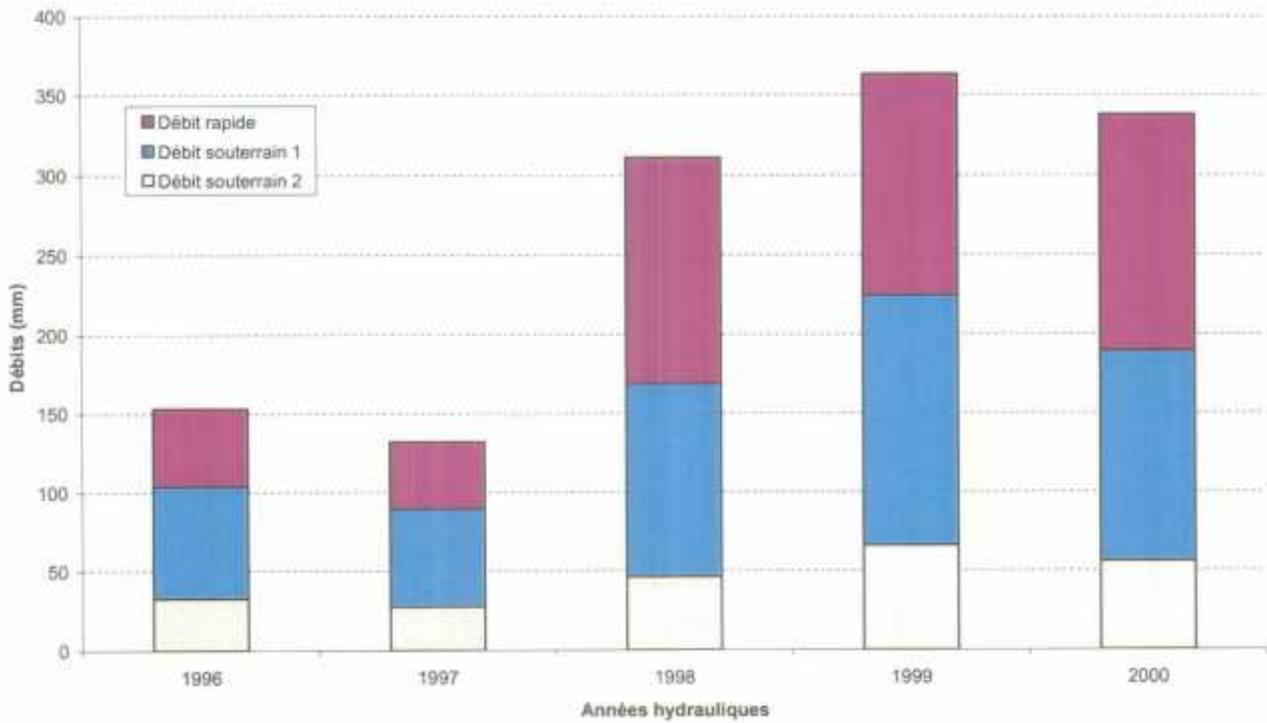




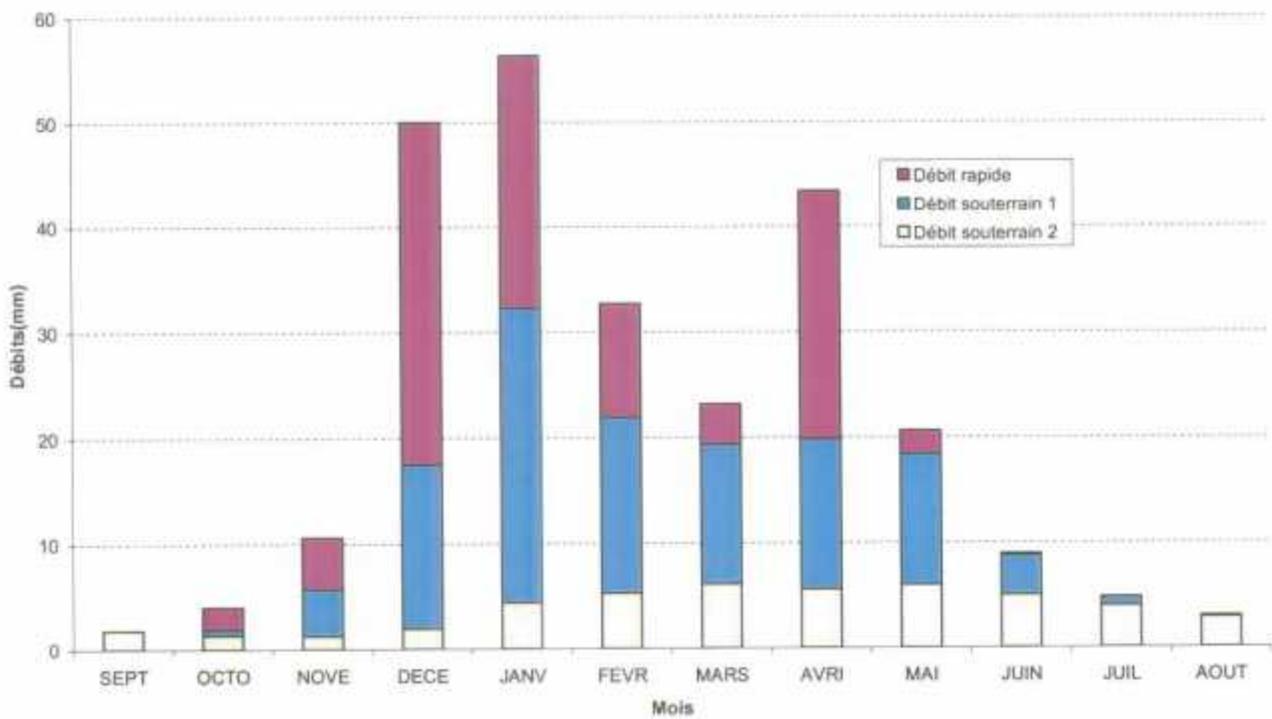
TRIEUX

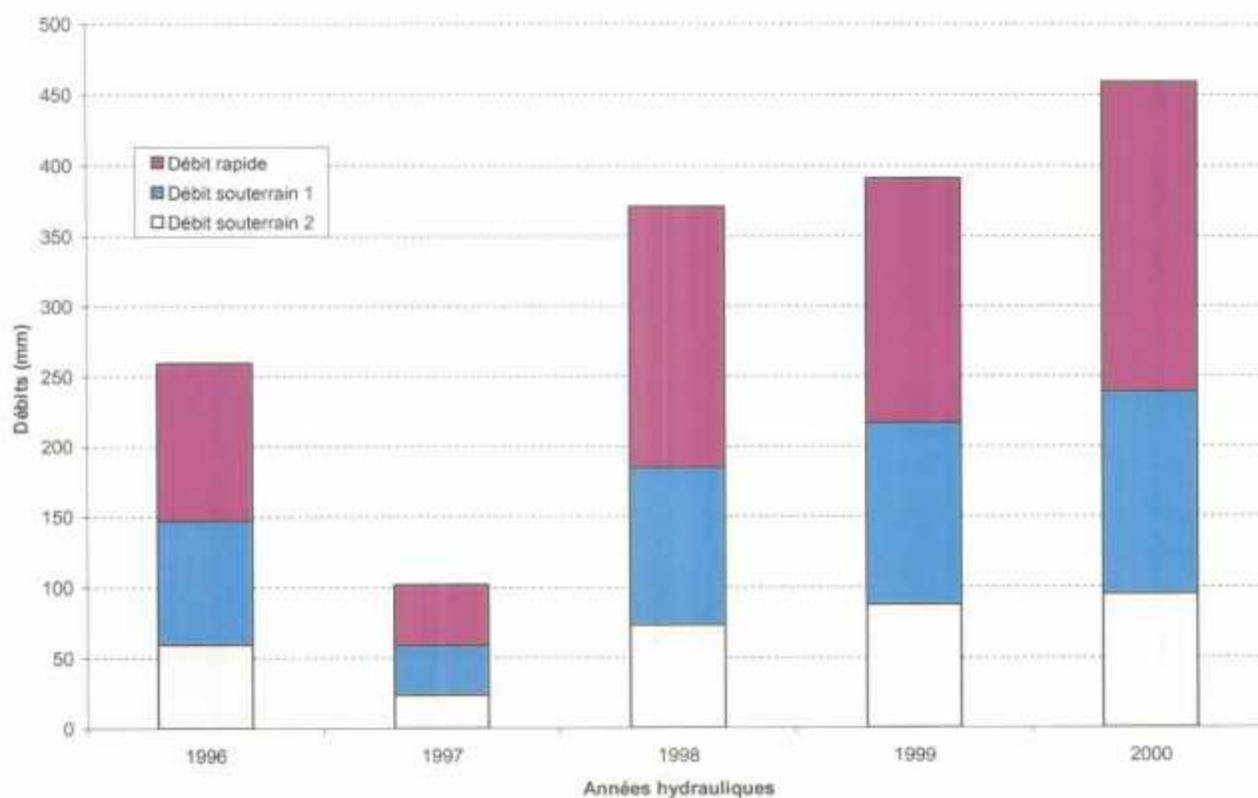


SILURES Bretagne - Etat d'avancement de l'année 2

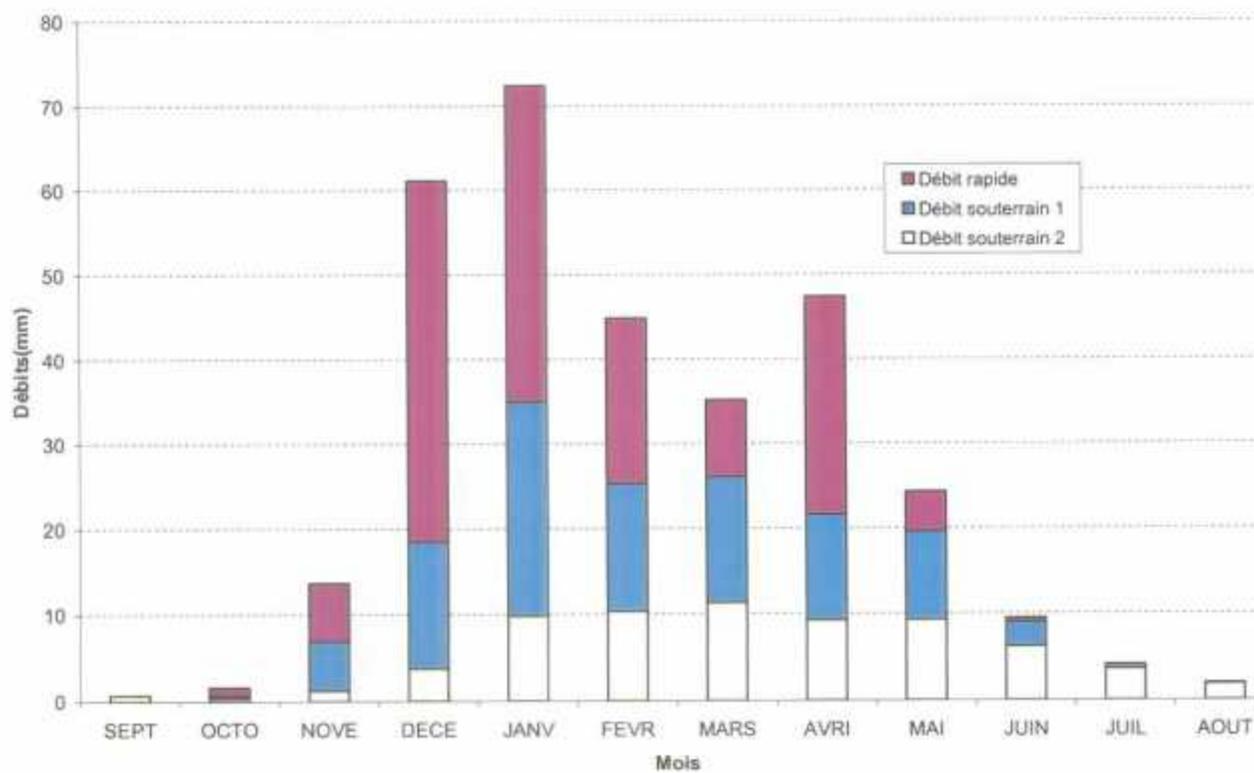


URNE

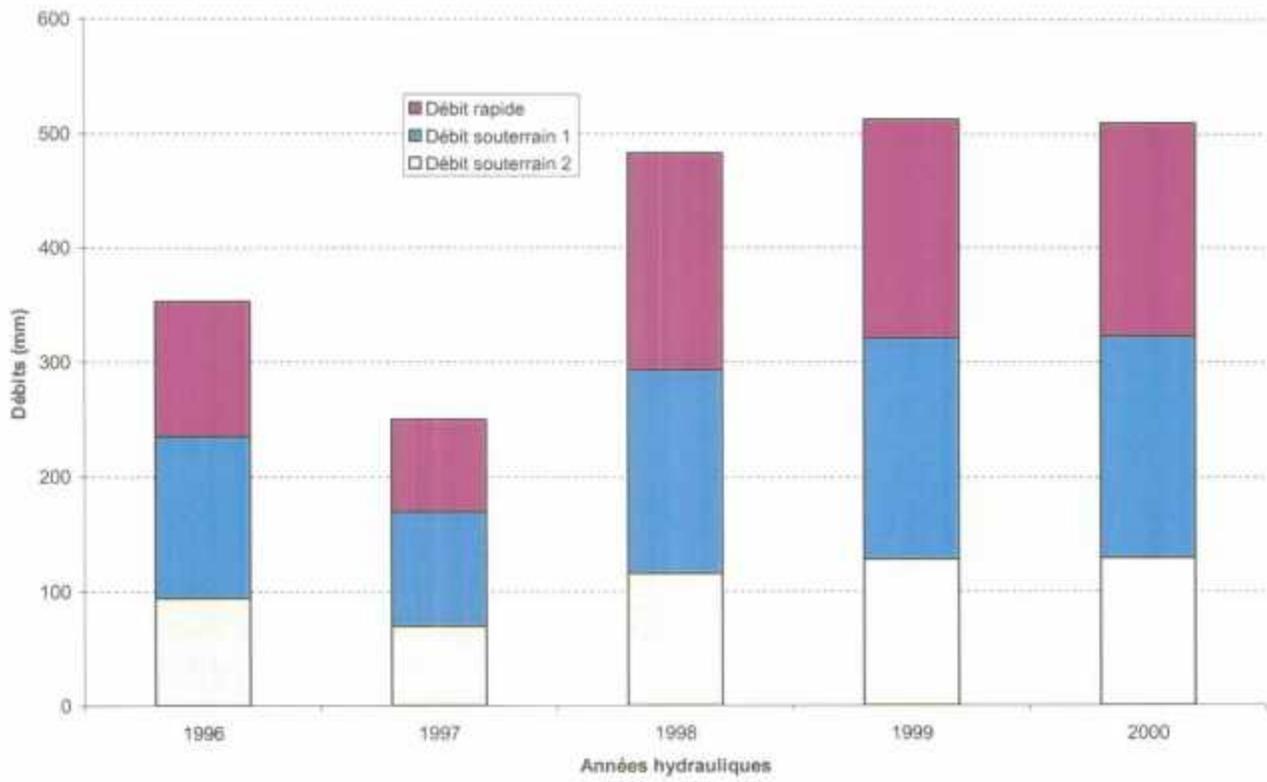




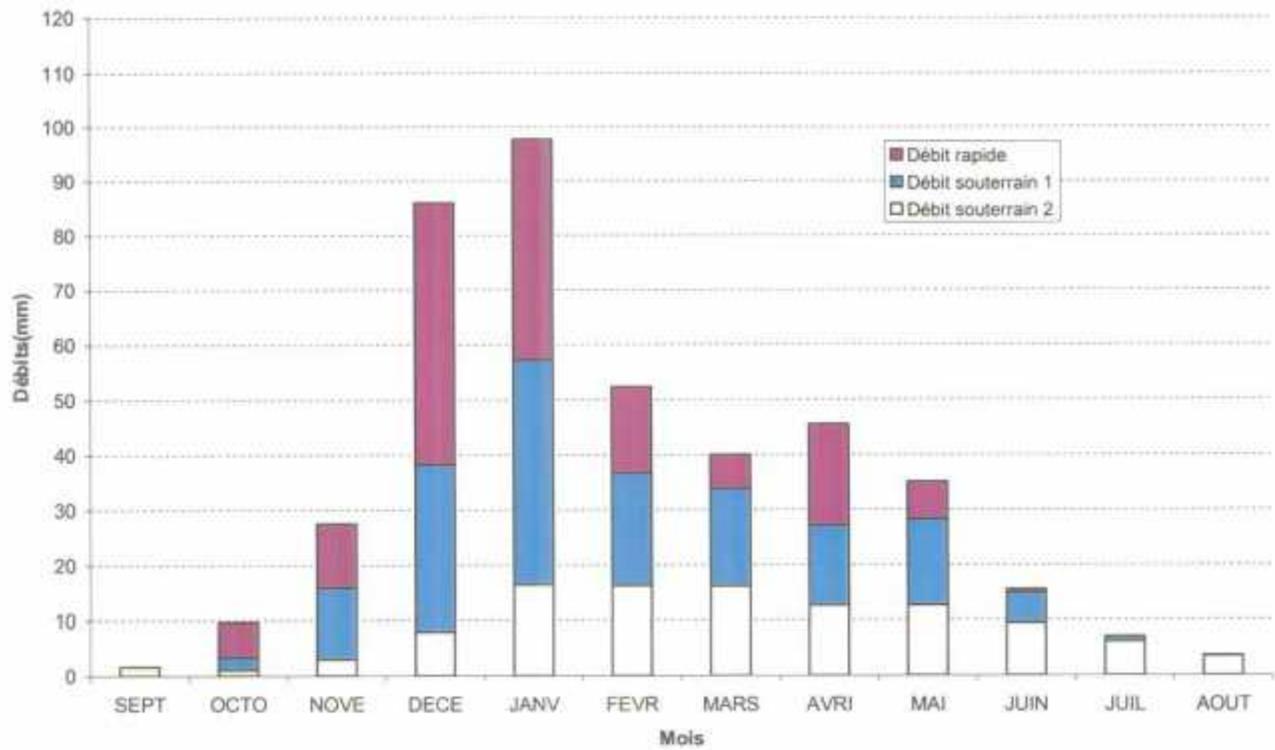
OUST



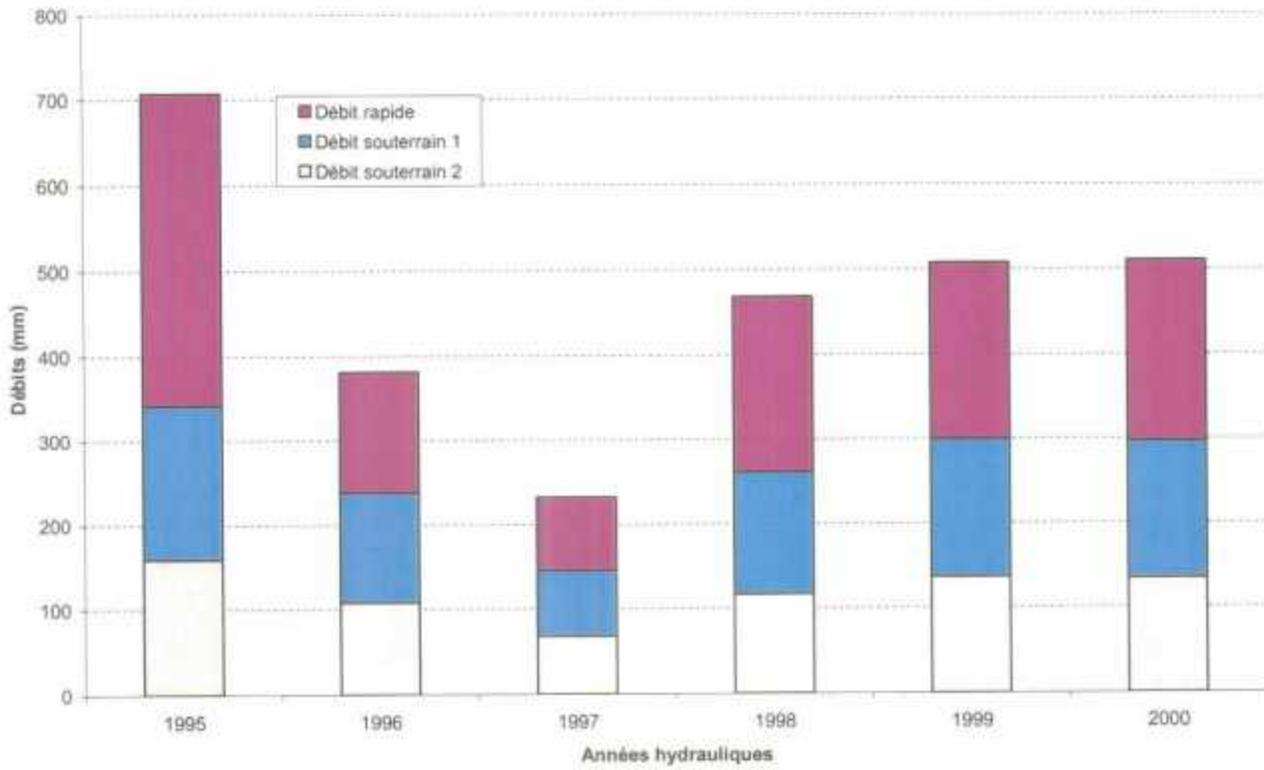
SILURES Bretagne - Etat d'avancement de l'année 2



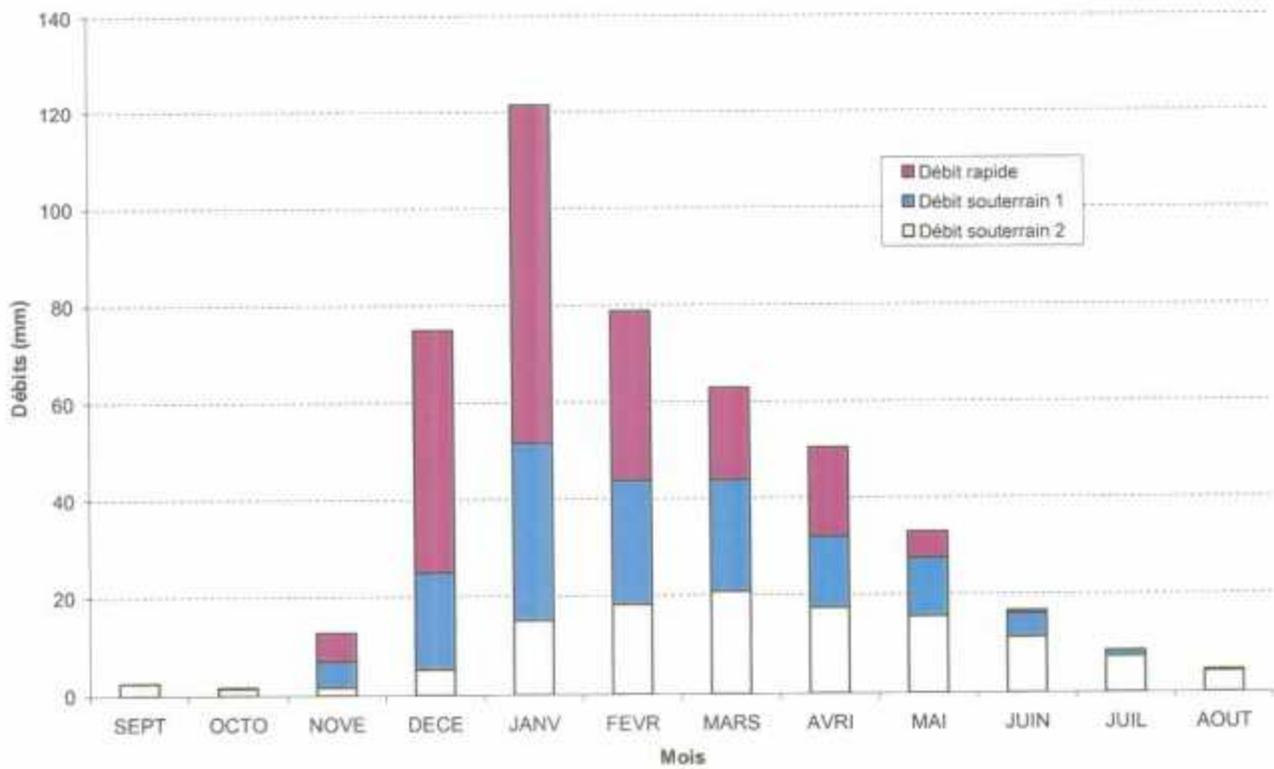
LOC'H



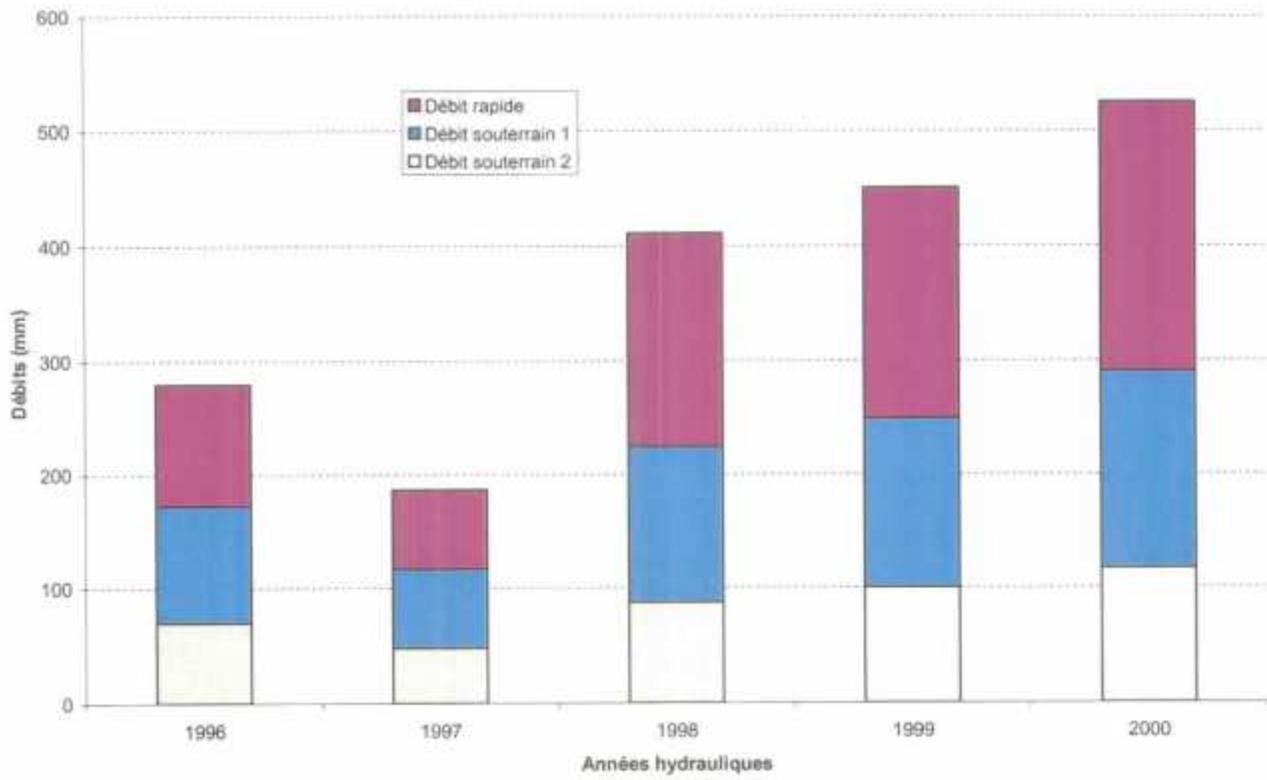
SILURES Bretagne - Etat d'avancement de l'année 2



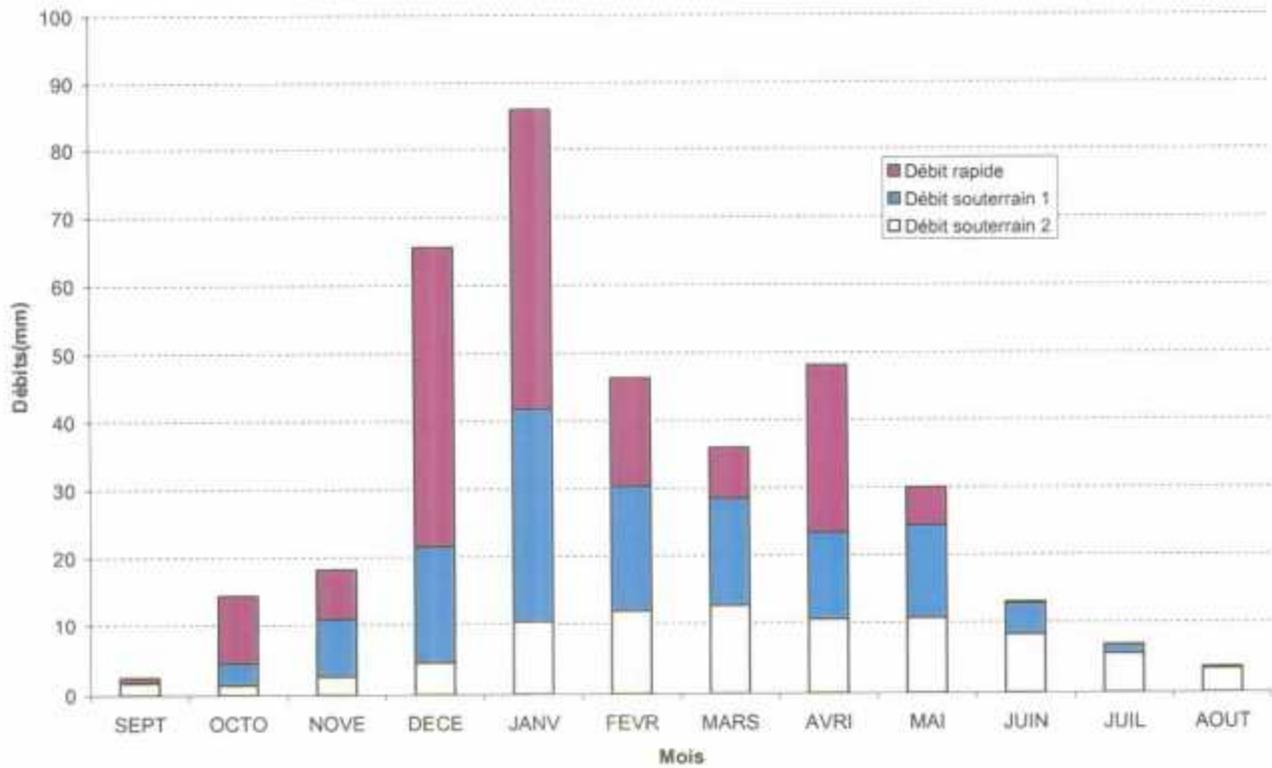
ARZ



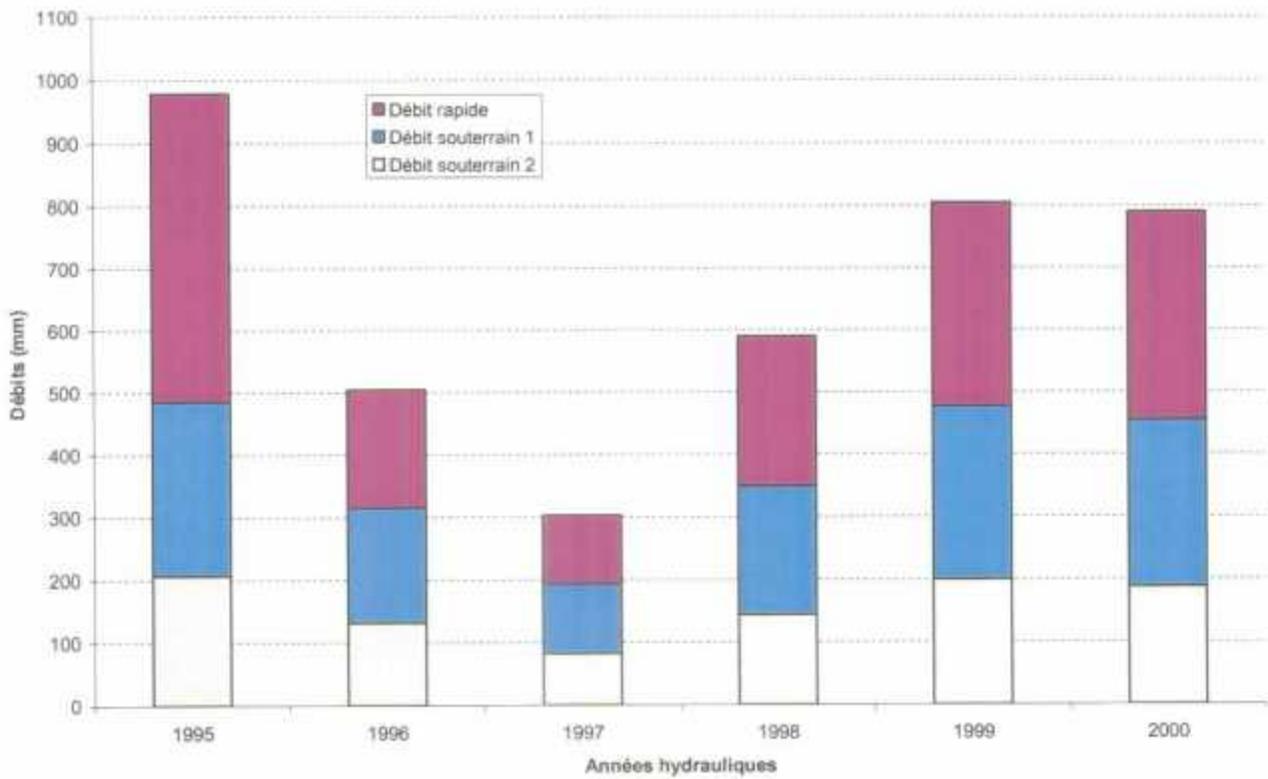
SILURES Bretagne - Etat d'avancement de l'année 2



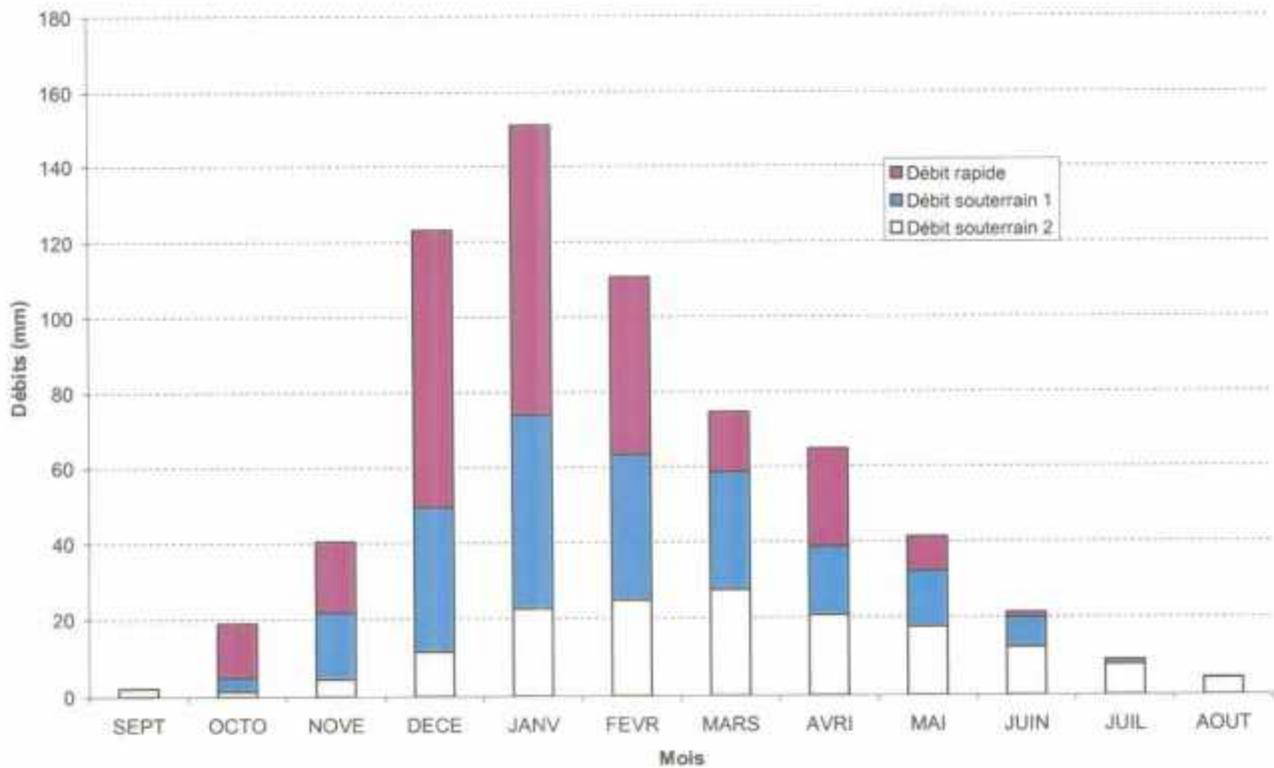
CLAIE



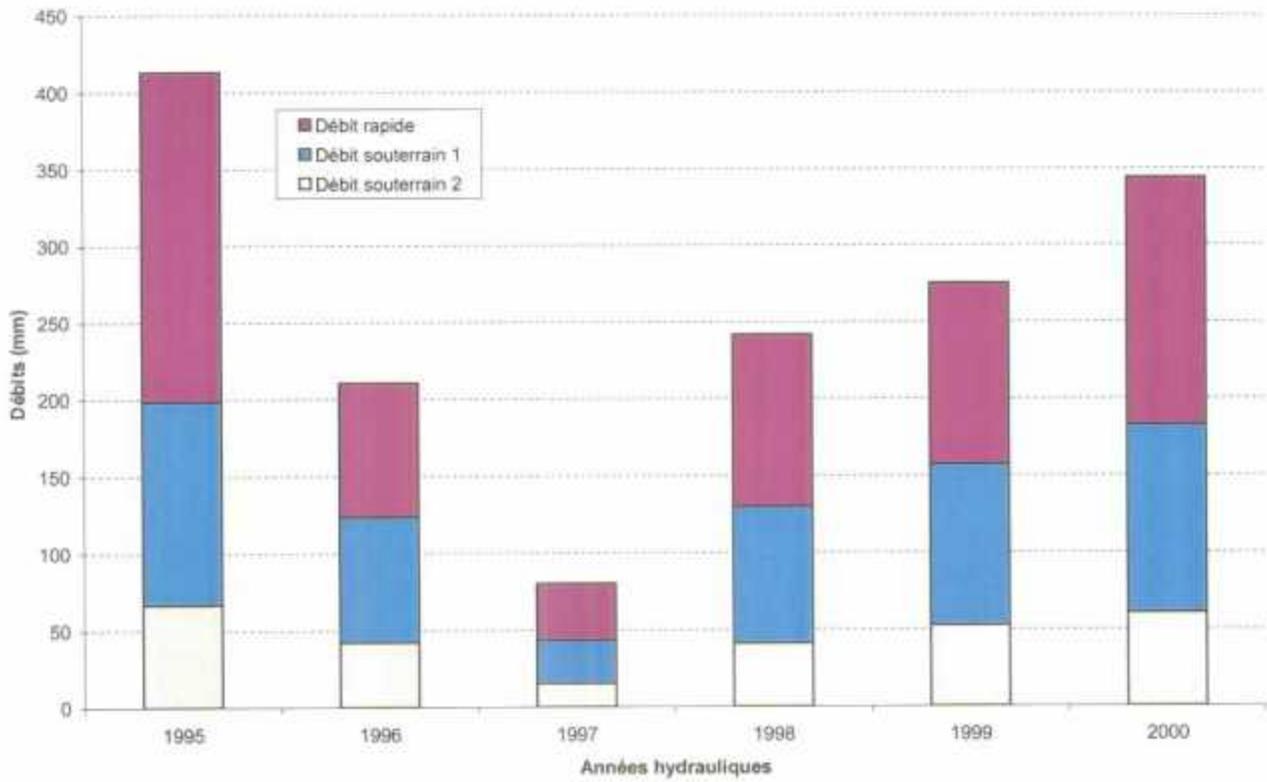
SILURES Bretagne - Etat d'avancement de l'année 2



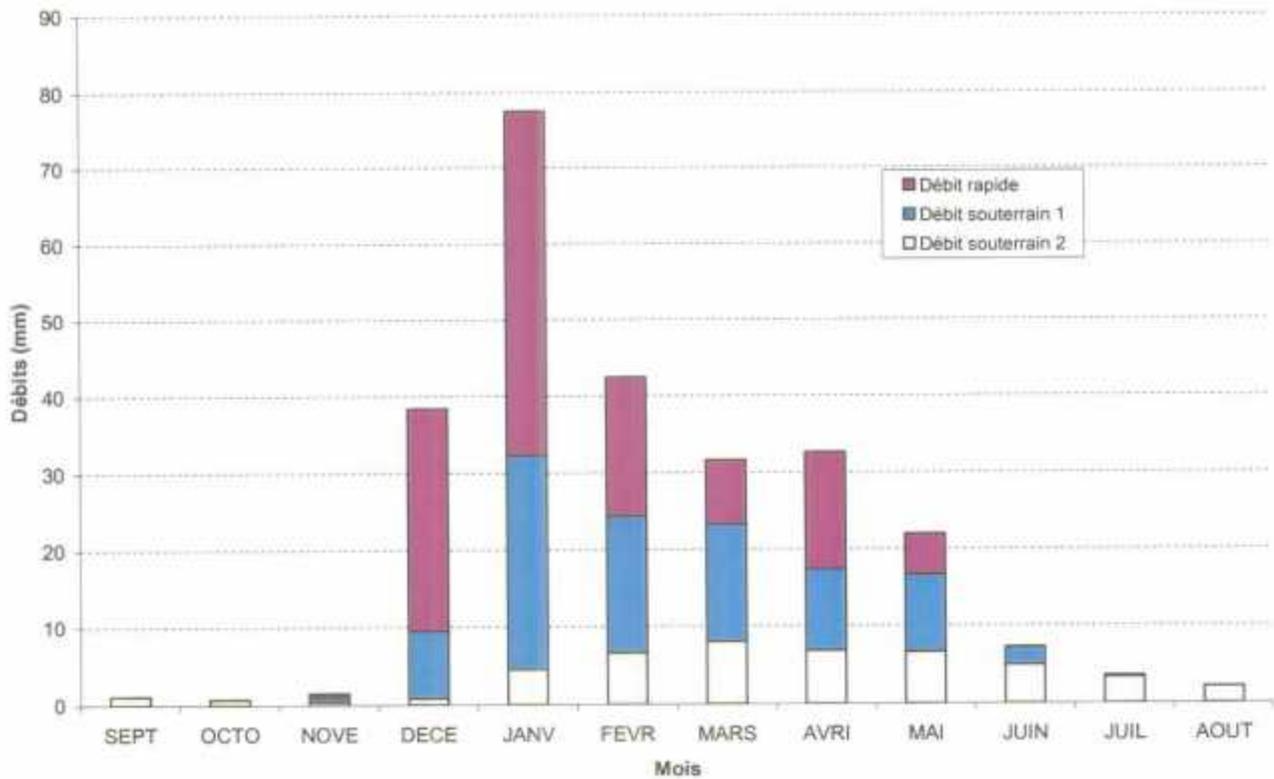
INAM

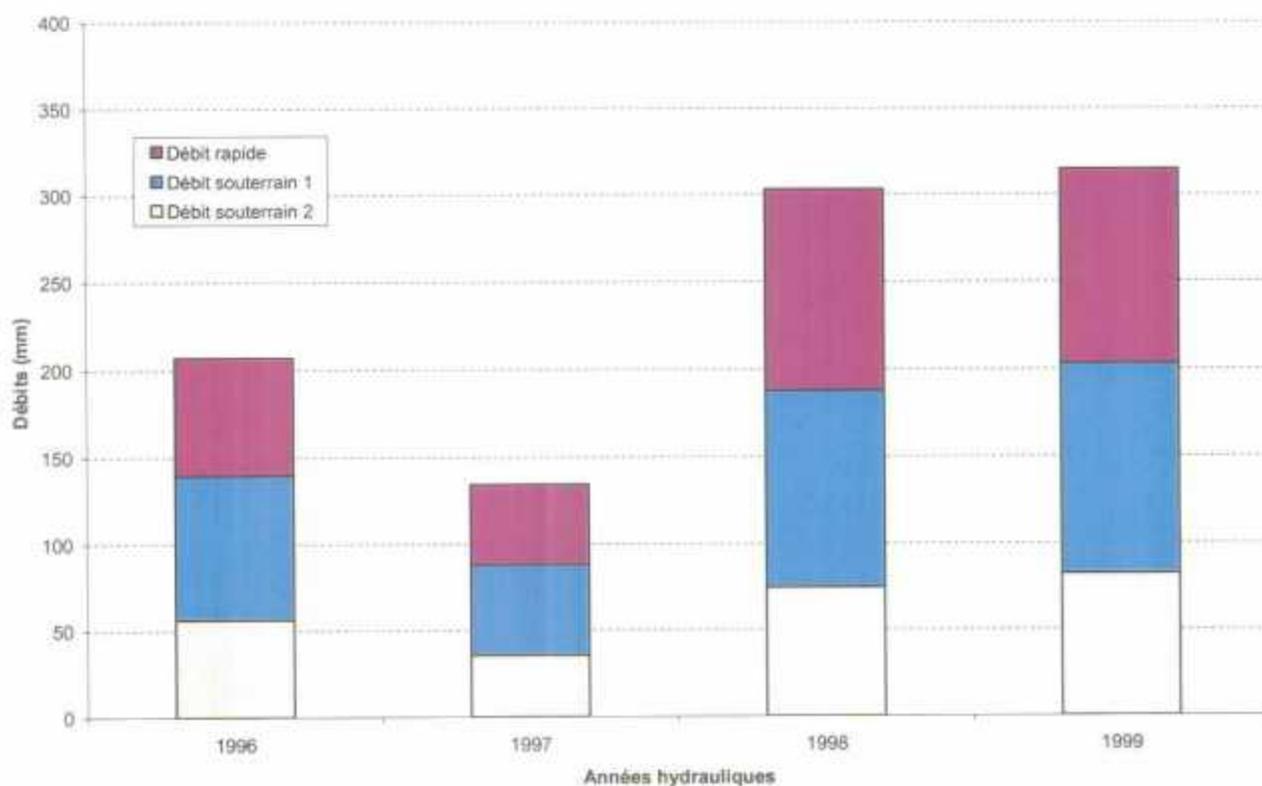


SILURES Bretagne - Etat d'avancement de l'année 2

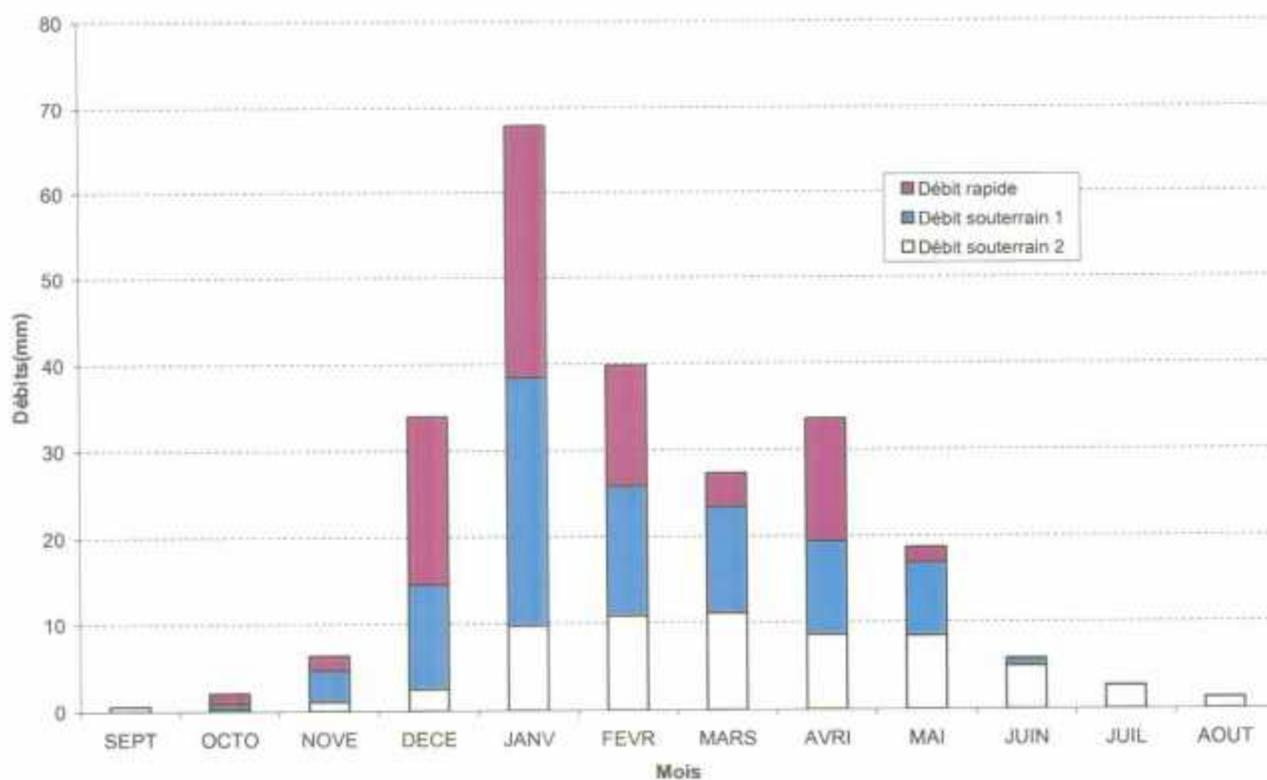


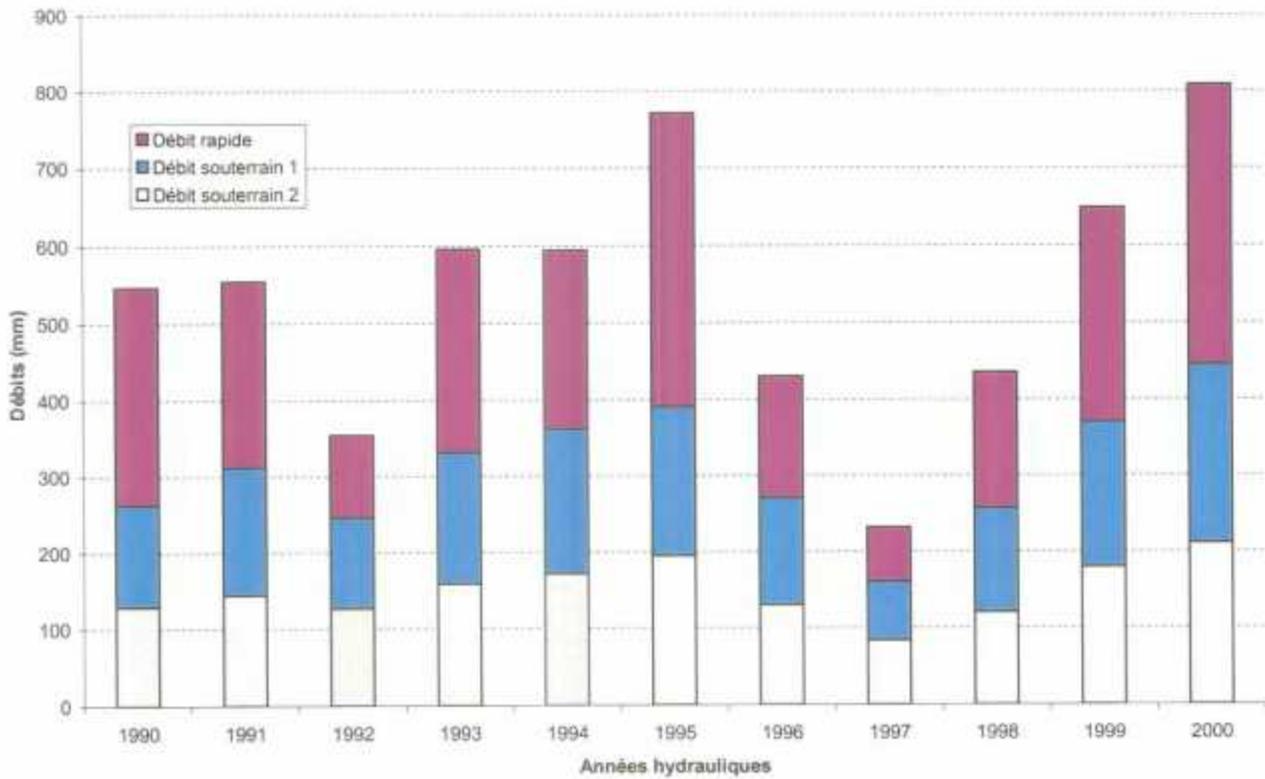
AFF



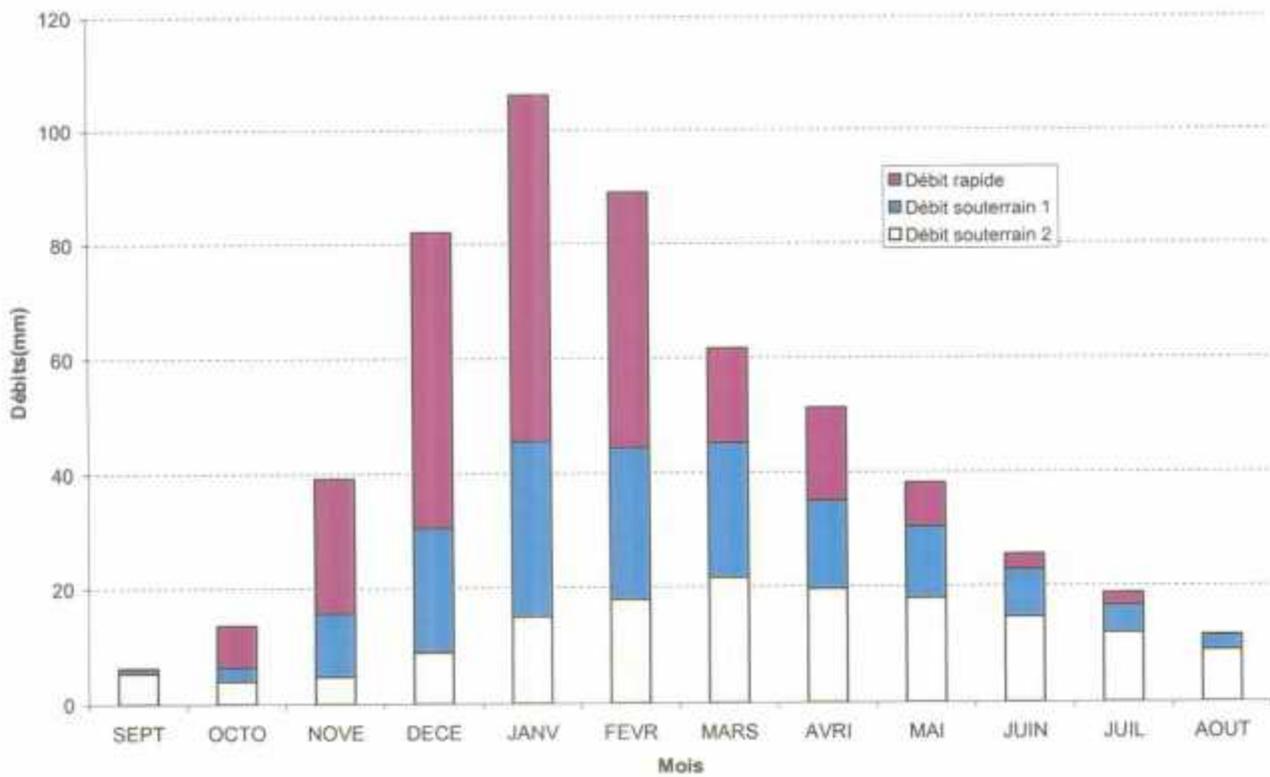


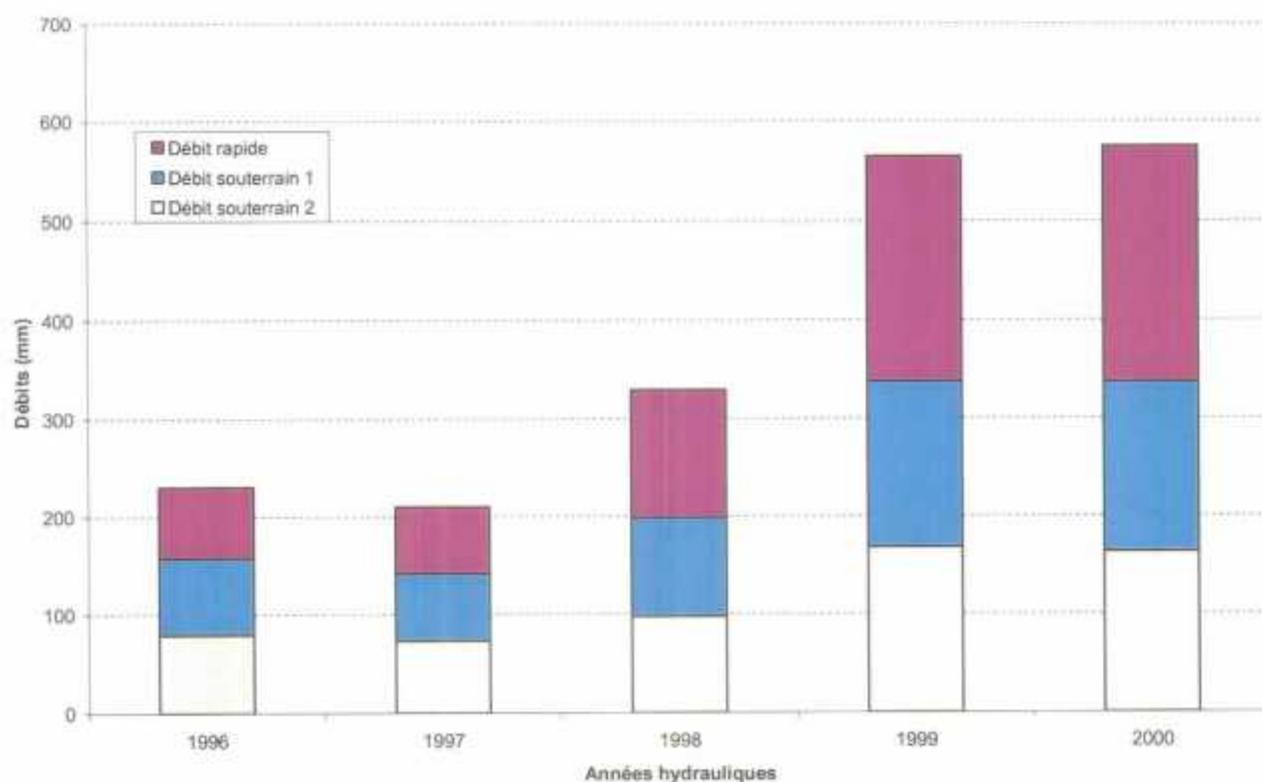
COET DAN



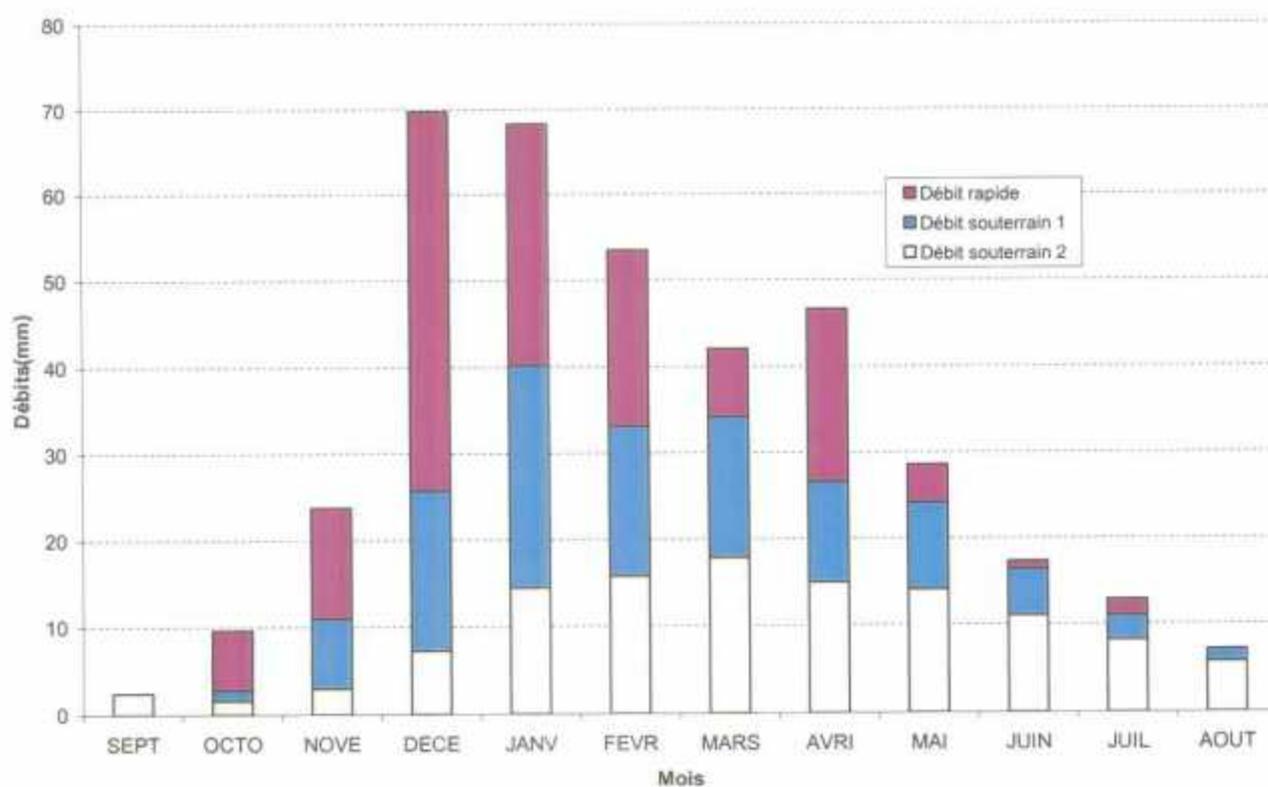


ABER WRAC'H

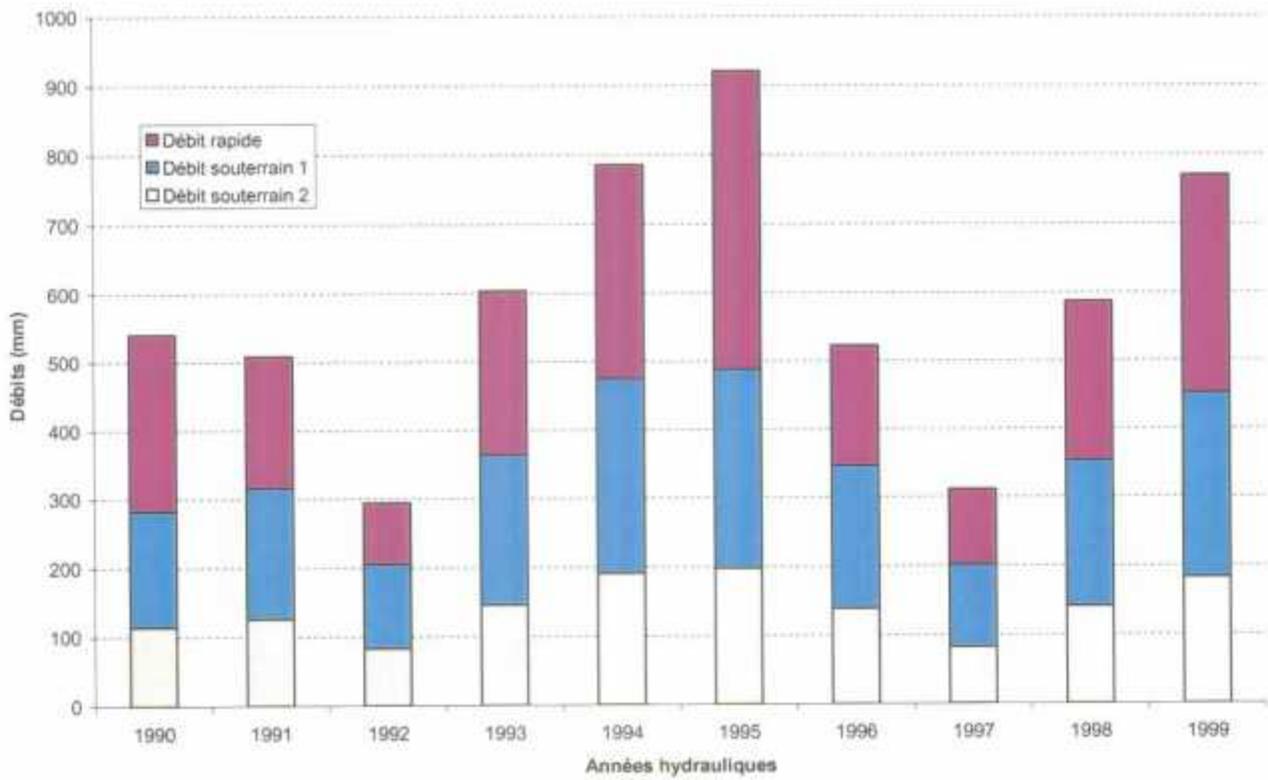




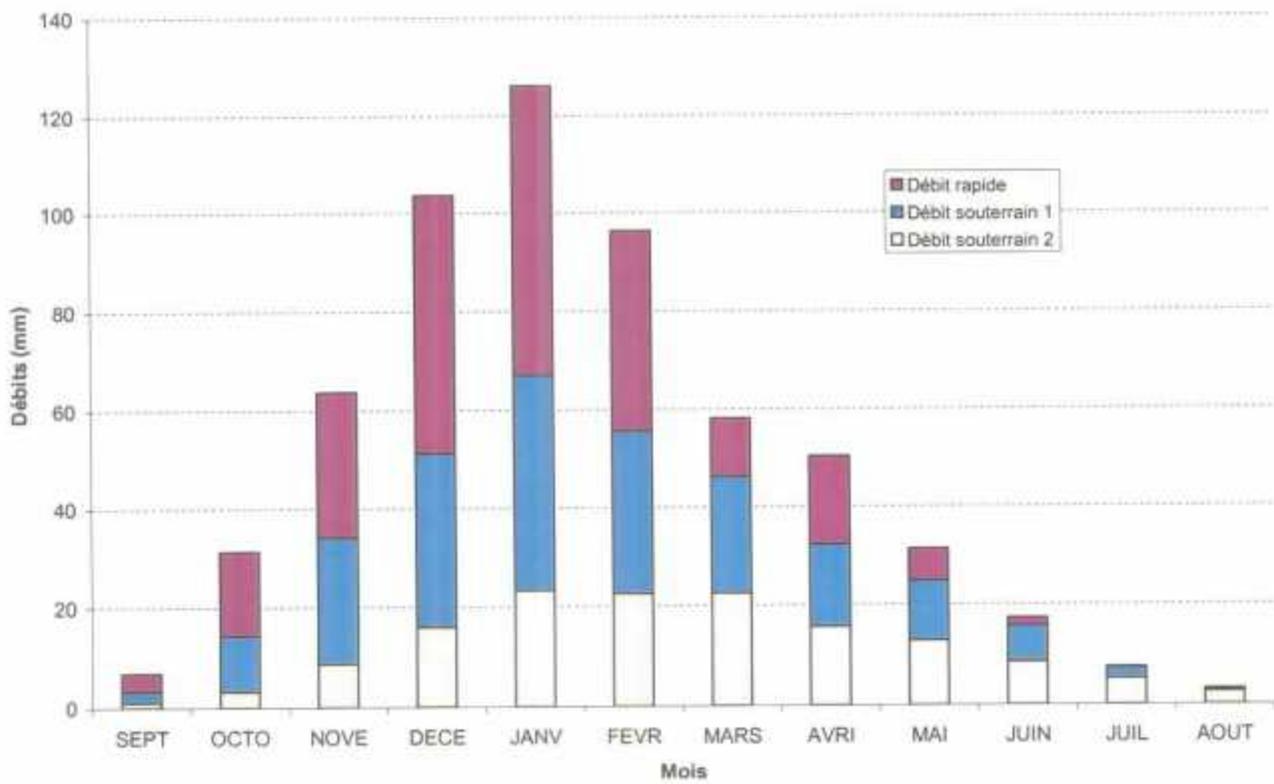
DOURDUFF



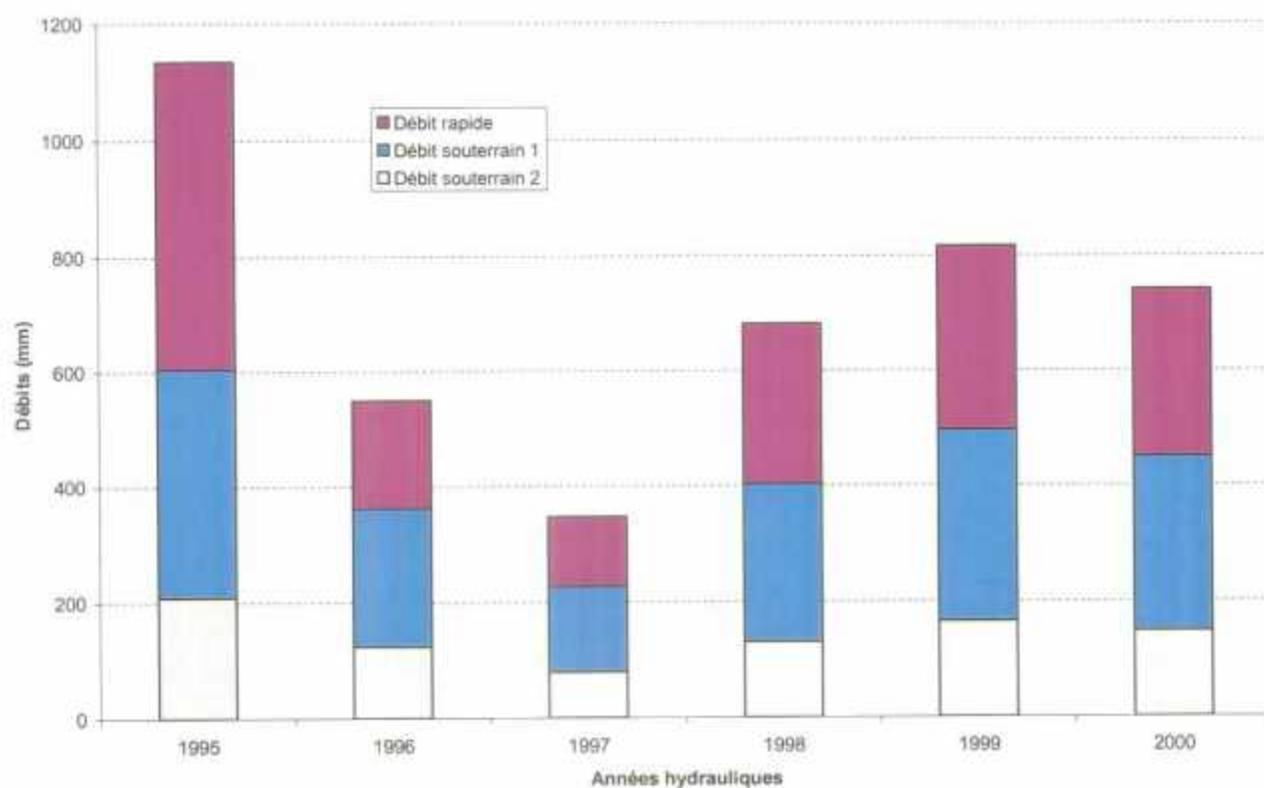
SILURES Bretagne - Etat d'avancement de l'année 2



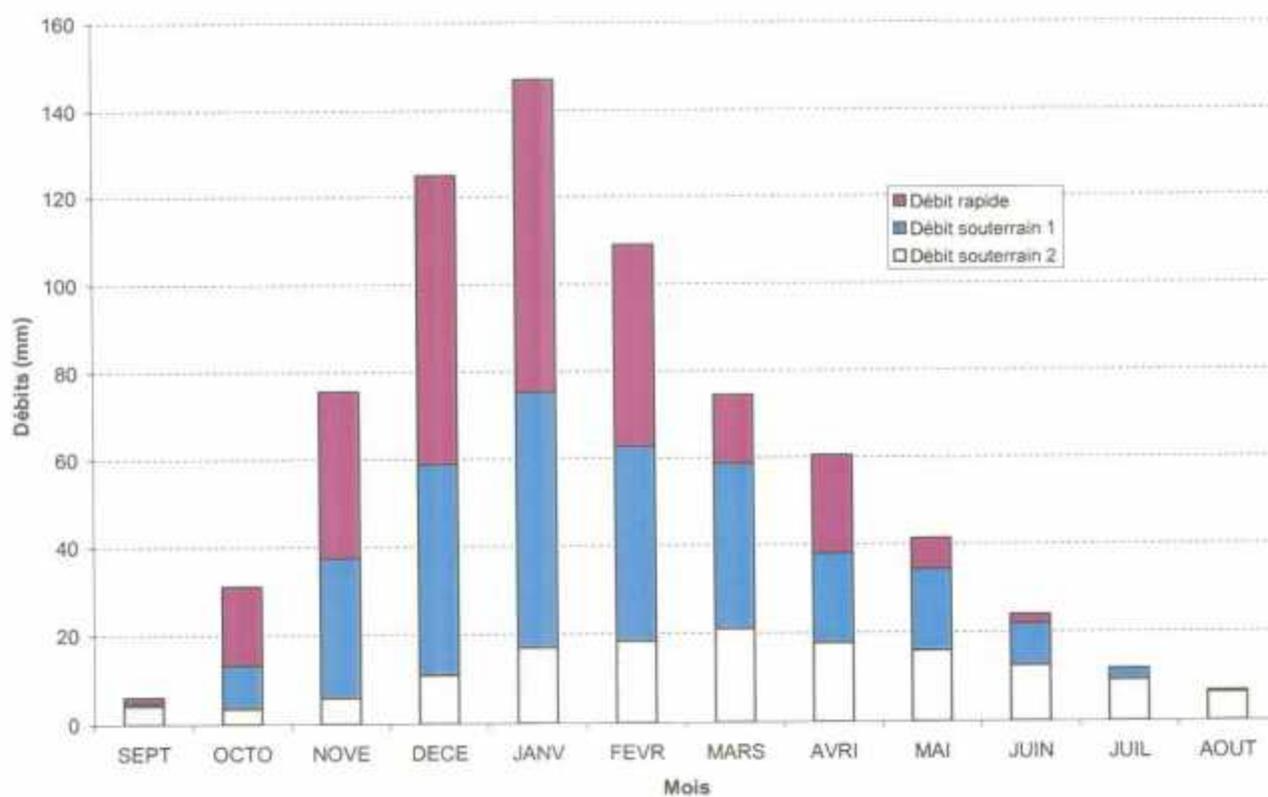
PENZE



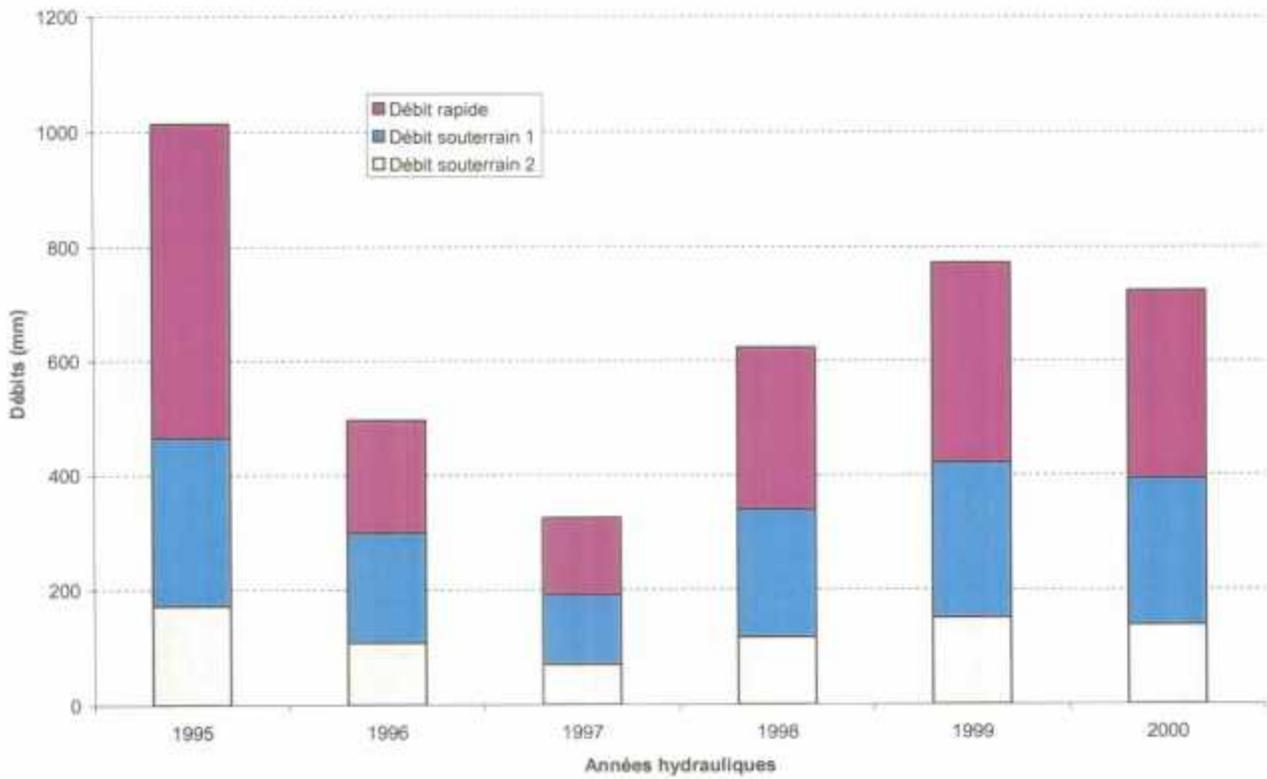
SILURES Bretagne - Etat d'avancement de l'année 2



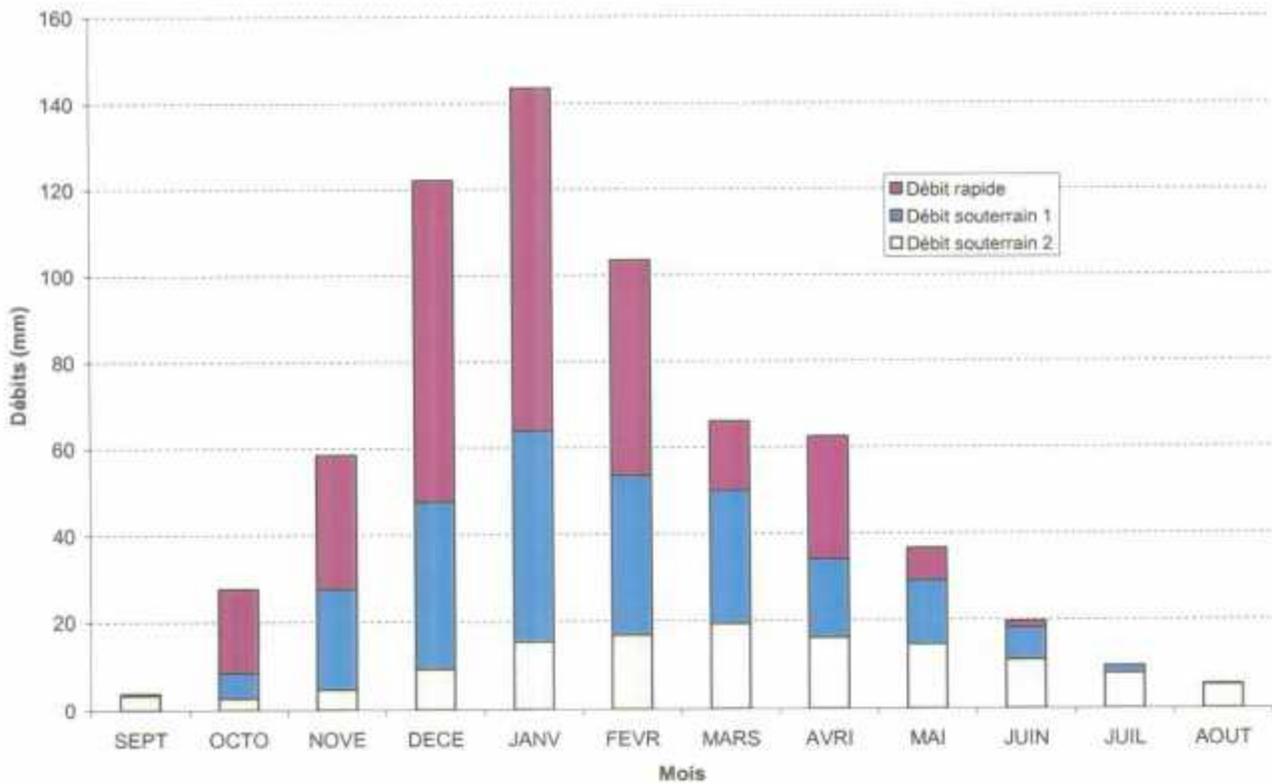
AVEN



SILURES Bretagne - Etat d'avancement de l'année 2



ELLE



Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France

Tél. : 33 (0)2 38 64 34 34

**Service géologique de Bretagne
Atalante Beaulieu**

2 rue de Jouanet
35700 RENNES

Tél. 02 99 84 26 70