



*Transfert des polluants
par ruissellement et écoulement souterrain
sur le bassin versant de la rade de Brest (Finistère)
Rapport de fin de phase 1*

Etude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 2001-EAU-724

B. Mougin

Septembre 2001
BRGM/RP-51032-FR



Mots clés : hydrogéologie, eau souterraine, infiltration, ruissellement, modélisation Gardénia, rade de Brest.

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

MOUGIN B. (2001) - Transfert des polluants par ruissellement et écoulement souterrain sur le bassin versant de la rade de Brest (Finistère) - BRGM/RP-51032-FR - Rapport de fin de phase 1 - 47 pages, 24 figures, 8 tableaux.

© BRGM, 2001, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce rapport présente l'état d'avancement (fin de phase 1) de l'opération « transfert des polluants par ruissellement et écoulement souterrain sur le bassin versant de la rade de Brest » engagée sur une partie du bassin versant de la rade de Brest, à la demande du Conseil Général du Finistère et de la Communauté Urbaine de Brest (fiche programme n°2001-EAU-724).

Le secteur d'étude a été défini en accord avec les partenaires ; il porte sur les bassins versants de l'Elorn au droit de la station de Pont ar Bled (commune de Plouedern) et de l'Aulne au droit de la station de Pont Pol Ty Glass (commune de Châteauneuf-du-Faou).

L'objectif final de cette opération est d'établir des cartes présentant de façon quantifiée ou semi-quantifiée :

- les ressources en eaux souterraines,
- l'aptitude à l'infiltration et à l'écoulement souterrain,
- la vulnérabilité au ruissellement.

Ces cartes permettront de hiérarchiser les actions à entreprendre sur le milieu physique, d'orienter les décisions d'aménagements et de création d'activités en fonction de la nature des risques de pollution, des besoins en eau et des divers contextes.

Le présent rapport détaille, pour chaque bassin versant, les étapes réalisées :

- cartographie de l'intérêt des formations aquifères de socle,
- cartographie de la perméabilité du sous-sol,
- une étude des ratios ruissellement-infiltration, en évaluant les débits souterrains suite à une modélisation des hydrogrammes de rivière (modélisation Gardénia).

Les cartographies, détaillées ci-dessus, mettent en évidence que le bassin de l'Aulne est plus sensible au ruissellement (formations géologiques très peu conductrices), tandis que celui de l'Elorn est divisé en un secteur amont peu perméable et favorable au ruissellement, et un secteur aval plus conducteur et plus sensible à l'infiltration.

Les résultats de la modélisation indiquent que la lame d'eau écoulée aux stations hydrométriques est alimentée, en moyenne, par les eaux souterraines à hauteur de 52 % pour l'Elorn et 50 % pour l'Aulne.

L'ensemble des informations obtenues au cours de la phase 1 (présence et facilité à mobiliser l'eau souterraine, perméabilité des formations aquifères, participation - annuelle et mensuelle - de l'eau souterraine à l'écoulement global), sera croisé, au cours de la phase 2, avec les résultats des analyses chimiques d'eau brute prélevée aux exutoires des deux bassins versants. Au cours de cette seconde phase, des cartes d'aptitude des terrains aux phénomènes de ruissellement et d'infiltration seront également éditées.

Sommaire

1. RAPPEL DE LA PROBLÉMATIQUE DE L'ÉTUDE	6
1.1. MODE DE POLLUTION DES EAUX LORS DES PHÉNOMÈNES DE RUISSELLEMENT ET D'INFILTRATION	6
1.2. BUT DE L'ÉTUDE	7
1.3. LES OUTILS UTILISÉS.....	7
2. PERMÉABILITÉ DU SOUS-SOL ET INTÉRÊT HYDROGÉOLOGIQUE DES AQUIFÈRES DE SOCLE.....	8
2.1. PRINCIPE DE LA CARTOGRAPHIE DE LA PERMÉABILITÉ DU SOUS-SOL.....	8
2.2. VALORISATION DES DONNÉES DE FORAGE - PRINCIPE DE L'APPROCHE STATISTIQUE.....	8
2.3. ÉTUDE DU BASSIN VERSANT DE L'ÉLORN EN AMONT DE LA STATION DE PONT AR BLED	8
2.3.1. Localisation et contexte géologique du bassin versant.....	8
2.3.2. Altération et fracturation des terrains.....	10
2.3.3. Perméabilité du sous-sol et intérêt hydrogéologique des aquifères de socle	10
2.4. ÉTUDE DU BASSIN VERSANT DE L'AULNE EN AMONT DE LA STATION DE PONT POL TY GLASS.....	18
2.4.1. Localisation et contexte géologique du bassin versant.....	18
2.4.2. Altération et fracturation des terrains.....	20
2.4.3. Perméabilité du sous-sol et intérêt hydrogéologique des aquifères de socle	20
3. EVALUATION DES DÉBITS SOUTERRAINS - RATIOS RUISSELLEMENT- INFILTRATION	29
3.1. PRINCIPE DE LA MODÉLISATION GARDÉNIA	29
3.2. DONNÉES DISPONIBLES	31
3.2.1. Données hydrométriques	31
3.2.2. Données climatiques.....	32
3.3. VALIDATION ET MISE EN FORME DES DONNÉES.....	32
3.3.1. Validation des données de départ.....	32
3.3.2. Mise en forme des données.....	33
3.3.3. Comparaison de la lame d'eau et des pluies efficaces	35
3.4. CALAGE DES PARAMÈTRES DU MODÈLE.....	35
3.4.1. Paramètres du modèle.....	35
3.4.2. Influence des différents paramètres.....	37
3.5. RÉSULTATS SUR LE BASSIN VERSANT DE L'ÉLORN.....	37
3.6. RÉSULTATS DU BASSIN VERSANT DE L'AULNE.....	41
3.7. CONCLUSION ET COMPARAISON DES BASSINS VERSANTS.....	43
4. PLANIFICATION DU TRAVAIL DE PHASE 2	46
4.1. CROISEMENT DES INFORMATIONS AVEC LES ANALYSES D'EAU.....	46
4.2. CARTE D'APTITUDE AU RUISSELLEMENT ET À L'INFILTRATION.....	46

Liste des figures

- Figure 1 : Localisation du bassin versant de l'Elorn
- Figure 2 : Carte géologique synthétique du bassin versant de l'Elorn
- Figure 3 : Localisation des forages sur les communes du bassin versant de l'Elorn
- Figure 4 : Intérêt potentiel des aquifères de socle sur le bassin versant de l'Elorn (raisonnement par groupes de formations géologiques)
- Figure 5 : Cartographie des débits des forages sur le bassin versant de l'Elorn
- Figure 6 : Localisation du bassin versant de l'Aulne
- Figure 7 : Carte géologique synthétique du bassin versant de l'Aulne
- Figure 8 : Localisation des forages sur les communes du bassin versant de l'Aulne
- Figure 9 : Intérêt potentiel des aquifères de socle sur le bassin versant de l'Aulne (raisonnement par groupes de formations géologiques)
- Figure 10 : Cartographie des débits des forages sur le bassin versant de l'Aulne
- Figure 11 : Modèle Gardénia et cycle de l'eau
- Figure 12 : Modèle Gardénia et organisation des réservoirs
- Figure 13 : Schéma du cycle de l'eau
- Figure 14 : Découpage des bassins versants de l'Elorn et de l'Aulne selon la carte des normales de pluies annuelles sur la période 1961-1990 (origine Météo France)
- Figure 15 : Comparaison entre pluie efficace et lame d'eau pour l'Elorn
- Figure 16 : Comparaison entre pluie efficace et lame d'eau pour l'Aulne
- Figure 17 : Modélisation Gardénia - Bassin de l'Elorn - Calage des paramètres (1990-1991)
- Figure 18 : Modélisation Gardénia - Débits mesurés et calculés du bassin de l'Elorn (1985-1995)
- Figure 19 : Bassin de l'Elorn - Débits annuels rapides et souterrains (1986-1995)
- Figure 20 : Bassin de l'Elorn - Débits mensuels moyens interannuels (1986-1995)
- Figure 21 : Modélisation Gardénia - Bassin de l'Aulne - Calage des paramètres (1990-1991)
- Figure 22 : Modélisation Gardénia - Débits mesurés et calculés du bassin de l'Aulne (1984-1995)
- Figure 23 : Bassin de l'Aulne - Débits annuels rapides et souterrains (1985-1995)
- Figure 24 : Bassin de l'Aulne - Débits mensuels moyens interannuels (1985-1995)

Liste des tableaux

- Tableau 1 : Répartition des formations géologiques sur le bassin versant de l'Elorn
- Tableau 2 : Résultats de l'approche statistique sur les groupes de formations géologiques du bassin versant de l'Elorn
- Tableau 3 : Répartition des formations géologiques sur le bassin versant de l'Aulne
- Tableau 4 : Résultats de l'approche statistique sur les groupes de formations géologiques du bassin versant de l'Aulne
- Tableau 5 : Bassin de l'Elorn - Paramètres de la modélisation Gardénia
- Tableau 6 : Modélisation Gardénia - Bassin de l'Elorn - Période 1985-1995
- Tableau 7 : Bassin de l'Aulne - Paramètres de la modélisation Gardénia
- Tableau 8 : Modélisation Gardénia - Bassin de l'Aulne - Période 1984-1995

Introduction

Au débouché de ses deux principaux fleuves, l'Aulne et l'Elorn, Brest, sa rade et son « pays » sont confrontés à différents problèmes liés à, ou concernant, l'eau et les milieux aquatiques :

- pollution par des métaux lourds ⁽¹⁾,
- dégradation de la qualité (notamment en nitrates et pesticides) au niveau des prises d'eau de Pont ar Bled et de Bizernic.

La maîtrise de ces problèmes implique que les causes et les origines géographiques et hydrogéologiques en soient identifiées ainsi que les moyens d'y remédier.

L'objectif de l'opération engagée sur le bassin versant de la rade de Brest, à la demande du Conseil Général du Finistère et de la Communauté Urbaine de Brest (CUB), est d'établir des cartes présentant de façon quantifiée ou semi-quantifiée :

- les ressources en eaux souterraines,
- l'aptitude à l'infiltration et à l'écoulement souterrain,
- la vulnérabilité au ruissellement.

Ces cartes permettront de hiérarchiser les actions à entreprendre sur le milieu physique, d'orienter les décisions d'aménagements et de création d'activités en fonction de la nature des risques de pollution, des besoins en eau et des divers contextes.

Le secteur d'étude a été défini en accord avec les partenaires ; il porte sur les bassins versants de l'Aulne et de l'Elorn.

Cette opération est complémentaire du programme « Comportement hydrodynamique des roches altérées de la surface sur le bassin versant de la rade de Brest » qui appréhende l'altération de surface et le milieu fissuré profond (par différentes représentations cartographiques) dans le but de quantifier la porosité des différents réservoirs et d'en déduire les volumes d'eau souterrains stockés (rapport RP-51031-FR et fiche programme n°2001-EAU-603).

Ce rapport de fin de phase 1 présente :

- un rappel de la problématique de l'étude,
- l'intérêt hydrogéologique des formations aquifères de socle du secteur, et la réalisation d'un travail de cartographie de la perméabilité du sous-sol,
- une évaluation des débits souterrains en modélisant les hydrogrammes de rivière.

Le travail restant à réaliser pour la suite de cette opération et son organisation chronologique est détaillé en fin de rapport.

⁽¹⁾ B. Lemièr, B. Clozel (2000) - Etude de l'origine des pollutions métalliques naturelles du bassin versant de la rade de Brest - Etat des données disponibles pour l'interprétation géochimique des eaux de surface (phase 1) - Rapport BRGM/RP-50027-FR

1. Rappel de la problématique de l'étude

1.1. MODE DE POLLUTION DES EAUX LORS DES PHENOMENES DE RUISSELLEMENT ET D'INFILTRATION

Le ruissellement, l'infiltration et l'écoulement souterrain induit contribuent à l'alimentation des cours d'eau, de façon inégale selon les conditions locales (topographie, géologie, occupation des sols, organisation du paysage...) et les variations saisonnières (climat, état de la végétation...). Les deux processus interdépendants (conditions locales et variations saisonnières) sont liés aux mêmes paramètres qui, lorsqu'ils favorisent l'un, défavorisent l'autre. Dans des conditions climatiques équivalentes et pour des bassins de mêmes dimensions, les quantités d'eau écoulées en un an à l'exutoire sont les mêmes. Dans les zones à ruissellement prépondérant, les écoulements sont concentrés en période hivernale et les étiages sont faibles ; et dans les zones où l'infiltration est importante, les crues sont écrêtées et les étiages sont soutenus.

Le cheminement suivi par un polluant et sa nature influent sur son impact pour le cours d'eau :

- les transports par ruissellement sont rapides, les temps se comptent en heures ou en jours, ils peuvent concerner des produits dissous, mais en raison de l'énergie développée, le ruissellement est le véhicule privilégié des pollutions particulières (matières en suspension, pesticides, phosphore, métaux...),
- l'infiltration et l'écoulement souterrain sont des processus lents, les temps se comptent en mois ou en années. Sauf exception, on ne trouve pas de pesticides dans l'eau souterraine, qui est le véhicule privilégié des polluants dissous (nitrates par exemple).

Les pollutions dues au ruissellement sont des phénomènes temporaires de courte durée (mais répétés souvent) entraînant de fortes et rapides variations de la composition ; en contre-partie, la suppression d'une source de pollution a un effet immédiat sur la qualité du cours d'eau.

La pollution de l'eau souterraine est un phénomène durable, qui peut perdurer des années après la suppression de la source en raison de l'inertie des aquifères. Au cours de son trajet, l'eau infiltrée dans la nappe est mélangée au stock préexistant ; sa composition est homogénéisée et varie peu à l'exutoire (ou du moins pas de façon brusque) mais de façon linéaire (nitrates par exemple). Les phénomènes de dénitrification naturelle, relativement fréquents en sous-sol, peuvent en améliorer la qualité.

La réduction des pollutions implique deux modes d'action :

- sur le milieu humain, la réduction ou de meilleures utilisations des produits potentiellement polluants,
- sur le milieu physique, la modification des ratios infiltration - ruissellement.

L'aménagement du paysage peut dans une certaine mesure ralentir le ruissellement pour diminuer son énergie et limiter ou supprimer les entraînements particuliers. La limitation du ruissellement favorise l'infiltration et risque d'aggraver durablement la concentration de l'eau souterraine en sels dissous (nitrates).

Il n'existe pas de solutions universelles applicables en toutes circonstances avec la même efficacité, mais seulement des solutions plus ou moins adaptées au contexte physique qui règlent l'importance relative du ruissellement et de l'infiltration, et au contexte humain, dont dépend le type de pollution à résorber prioritairement.

Hiérarchiser les actions pouvant être entreprises sur le milieu physique revient à prévoir et évaluer leurs impacts sur les pollutions (atténuation ou aggravation) et leurs transferts (durée, phénomènes modificateurs) dans les différents contextes pouvant être identifiés.

1.2. BUT DE L'ETUDE

L'objectif final de l'étude est de réaliser des cartes synthétiques sur les deux principaux bassins versants de la rade de Brest (Aulne et Elorn). Ces cartes constitueront des documents d'aide aux décisions en matière de reconquête de la qualité des eaux souterraines et donc des eaux superficielles.

Ces cartes présenteront les éléments suivants :

- état des ressources en eau souterraine (présence et importance des écoulements souterrains, facilités de mobilisation des eaux souterraines),
- aptitude des terrains à l'infiltration et à l'écoulement souterrain,
- vulnérabilité au ruissellement.

1.3. LES OUTILS UTILISES

Les étapes chronologiques suivantes seront nécessaires pour chaque bassin versant :

- localisation et définition du contexte géologique,
- altération et fracturation des terrains,
- perméabilité du sous-sol et intérêt hydrogéologique des aquifères de socle,
- évaluation des débits souterrains par modélisation des hydrogrammes des rivières, et approche des ratios ruissellement-infiltration,
- corrélation entre les analyses chimiques (mesurées à l'exutoire des bassins versants) et le comportement hydrodynamique des aquifères de socle.

Dans ce rapport, les quatre premiers points (chapitre 2 pour les trois premiers et chapitre 3 pour le quatrième) sont détaillés, et le principe du cinquième est évoqué en fin de rapport (chapitre 4).

2. Perméabilité du sous-sol et intérêt hydrogéologique des aquifères de socle

2.1. PRINCIPE DE LA CARTOGRAPHIE DE LA PERMEABILITE DU SOUS-SOL

La perméabilité du sous-sol exprime la plus ou moins grande facilité de circulation de l'eau souterraine. En ce qui concerne le transfert des pollutions dissoutes, c'est un paramètre explicatif, complémentaire de la porosité et des volumes d'eau stockés dans les formations aquifères (étude « comportement hydrodynamique des roches altérées de la surface sur le bassin versant de la rade de Brest »).

Les débits instantanés fournis par les forages au moment de leur réalisation (foration par la technique du « marteau fond de trou ») sont représentatifs des perméabilités locales des roches traversées. Ces débits sont extrêmement variables, mais leur analyse statistique montre une organisation, calquée sur la géologie et l'histoire structurale, en zones dont les caractéristiques moyennes de perméabilité sont significativement différentes de celles des zones voisines.

Le but est de procéder à un découpage en zones d'isoperméabilité aussi fin que possible, la finesse et la précision des découpages possibles étant liées au nombre d'informations disponibles (forages) et à leur représentativité statistique.

2.2. VALORISATION DES DONNEES DE FORAGE - PRINCIPE DE L'APPROCHE STATISTIQUE

Une approche statistique sur les forages d'eau du secteur peut être réalisée pour caractériser l'intérêt hydrogéologique des aquifères de socle (présence et importance des écoulements souterrains, facilités de mobilisation des eaux souterraines).

Cette partie est détaillée dans le rapport RP-51031-FR du « comportement hydrodynamique des roches altérées de la surface sur le bassin versant de la rade de Brest ».

2.3. ETUDE DU BASSIN VERSANT DE L'ELORN EN AMONT DE LA STATION DE PONT AR BLED

2.3.1. Localisation et contexte géologique du bassin versant

L'Elorn est un fleuve, situé au nord du Finistère, qui prend sa source dans les Monts d'Arrée à une altitude de 285 m, et se jette dans la rade de Brest à l'aval de la ville de Lanterneau.

Le bassin versant de l'Elorn (cf. figure 1), a une superficie de 260 km² au droit de la station de jaugeage de Pont ar Bled sur la commune de Plouedern (station J3413030).

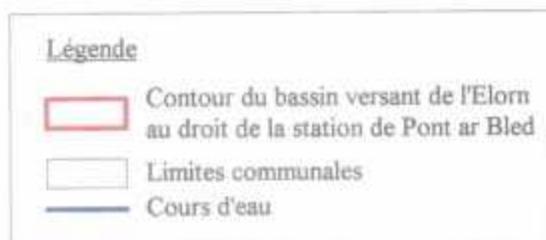
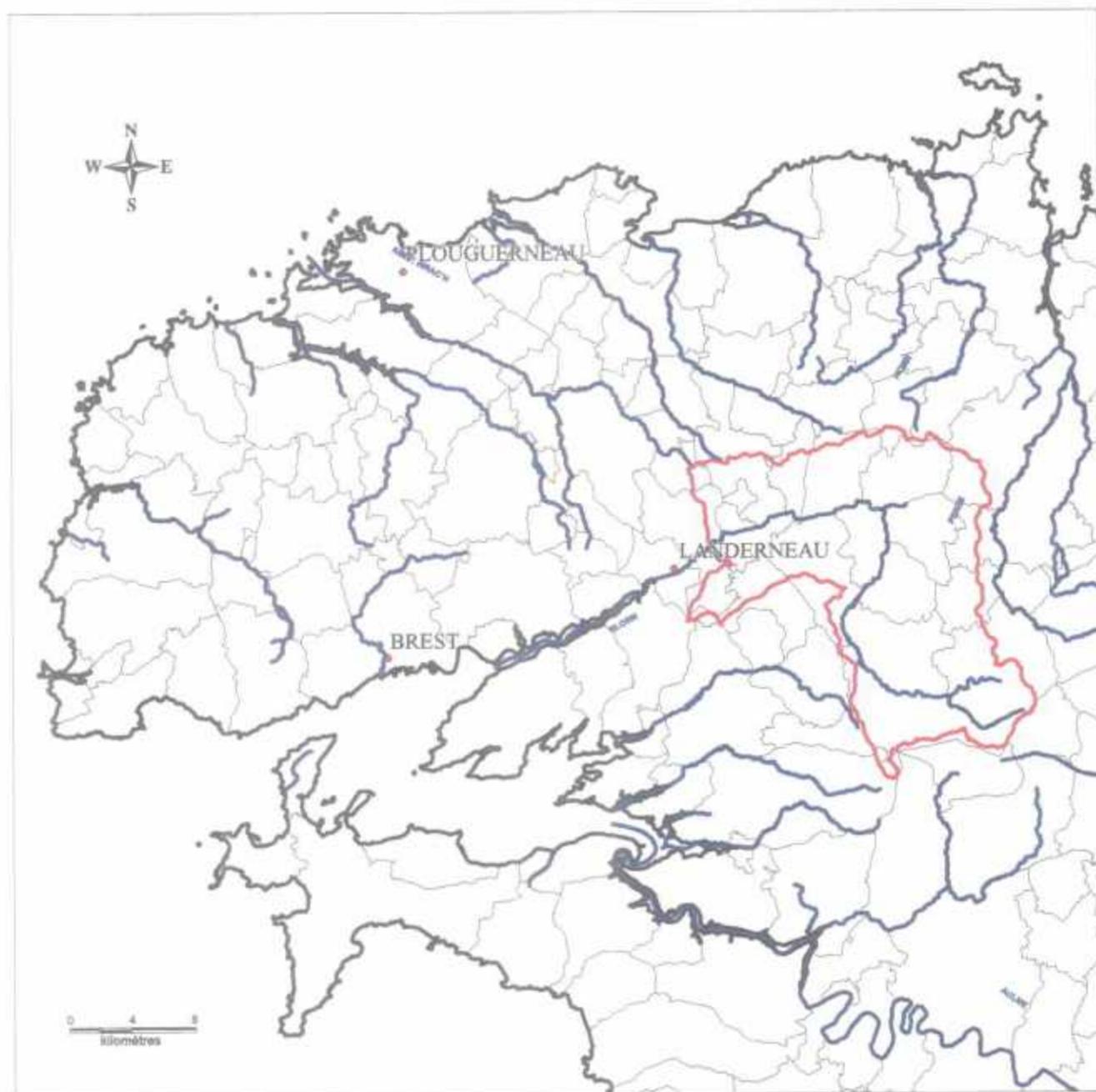


Figure 1 : Localisation du bassin versant de l'Elorn

Les précipitations arrosant le bassin sont en moyenne de l'ordre de 1100 mm/an, avec 1000 mm/an dans la partie nord-est, et 1200 mm/an dans la partie sud-est. Les précipitations efficaces (définition p.33, chapitre 3.3.1.) sont supérieures à 500 mm/an.

La géologie du bassin versant de l'Elorn est assez hétérogène puisque elle est composée :

- de formations Primaires (Ordovicien-Silurien-Dévonien) prépondérantes sur le bassin versant,
- de formations gneissiques : gneiss de Brest et de Lesneven au nord, et orthogneiss de Plougouven à l'est,
- de formations granitiques : granite de Kersaint au nord-ouest et granite de Commana au sud,
- des micaschistes du Conquet au nord,
- et des schistes Briovériens de l'Elorn.

La figure 2 présente une carte géologique synthétique avec des contours détaillés à l'échelle du 1/250 000. Sa légende indique les noms usuels des formations rencontrées sur le bassin versant.

Le tableau 1 rassemble les superficies occupées par les formations géologiques et leurs pourcentages d'occupation du bassin versant de l'Elorn.

2.3.2. Altération et fracturation des terrains

Le secteur d'étude est recoupé par une majorité de failles de directions N160, postérieures à la faille de l'Elorn de direction moyenne N80-90.

Les informations concernant l'altération et la fracturation des terrains du secteur d'étude seront disponibles dès la fin de la modélisation des formations altérées et du milieu fissuré, à partir de points d'affleurements et de forages, réalisée en phase 2 de l'étude du « comportement hydrodynamique des roches altérées de la surface sur le bassin versant de la rade de Brest ».

2.3.3. Perméabilité du sous-sol et intérêt hydrogéologique des aquifères de socle

2.3.3.1. Approche statistique

En raison du manque de forages implantés sur les formations géologiques du bassin versant étudié (19 forages pour la formation la mieux représentée), une approche statistique a été menée sur les groupes de formations géologiques détaillés dans le tableau 1, à deux niveaux d'échelle :

- sur tout le territoire des communes du bassin versant de l'Elorn (si le nombre de forages recensés sur le groupe de formation était supérieur à 40 forages),
- sur le secteur de la rade de Brest (dans le cas contraire).

La figure 3 localise les 238 forages recensés sur les communes du bassin versant.

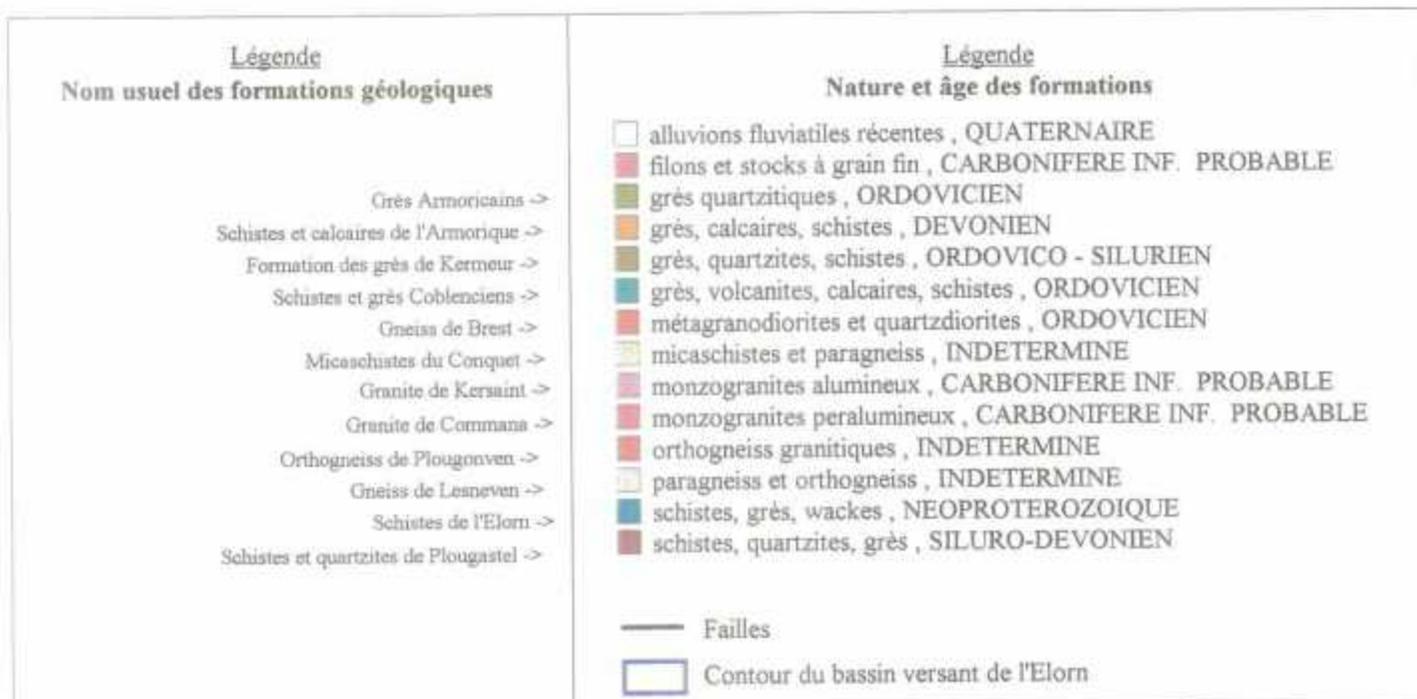
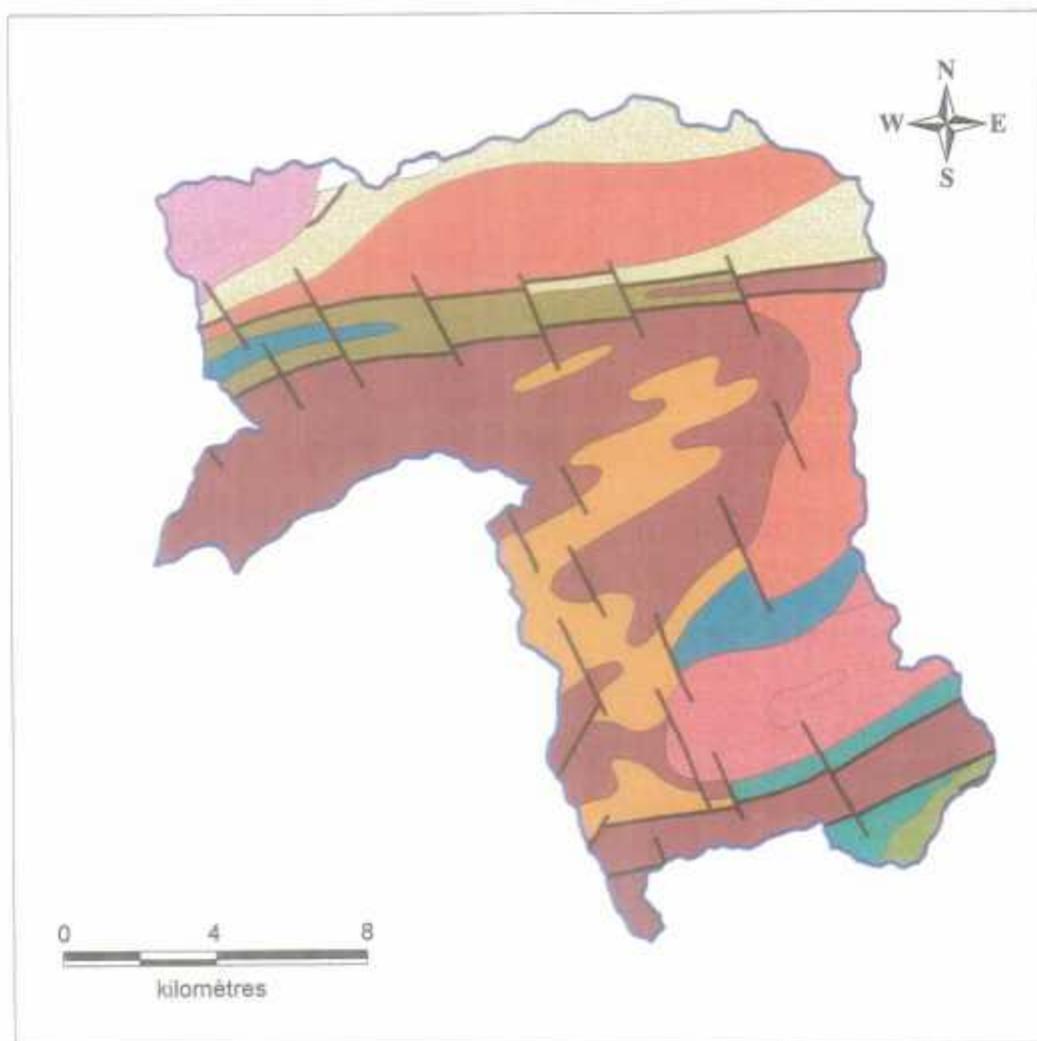


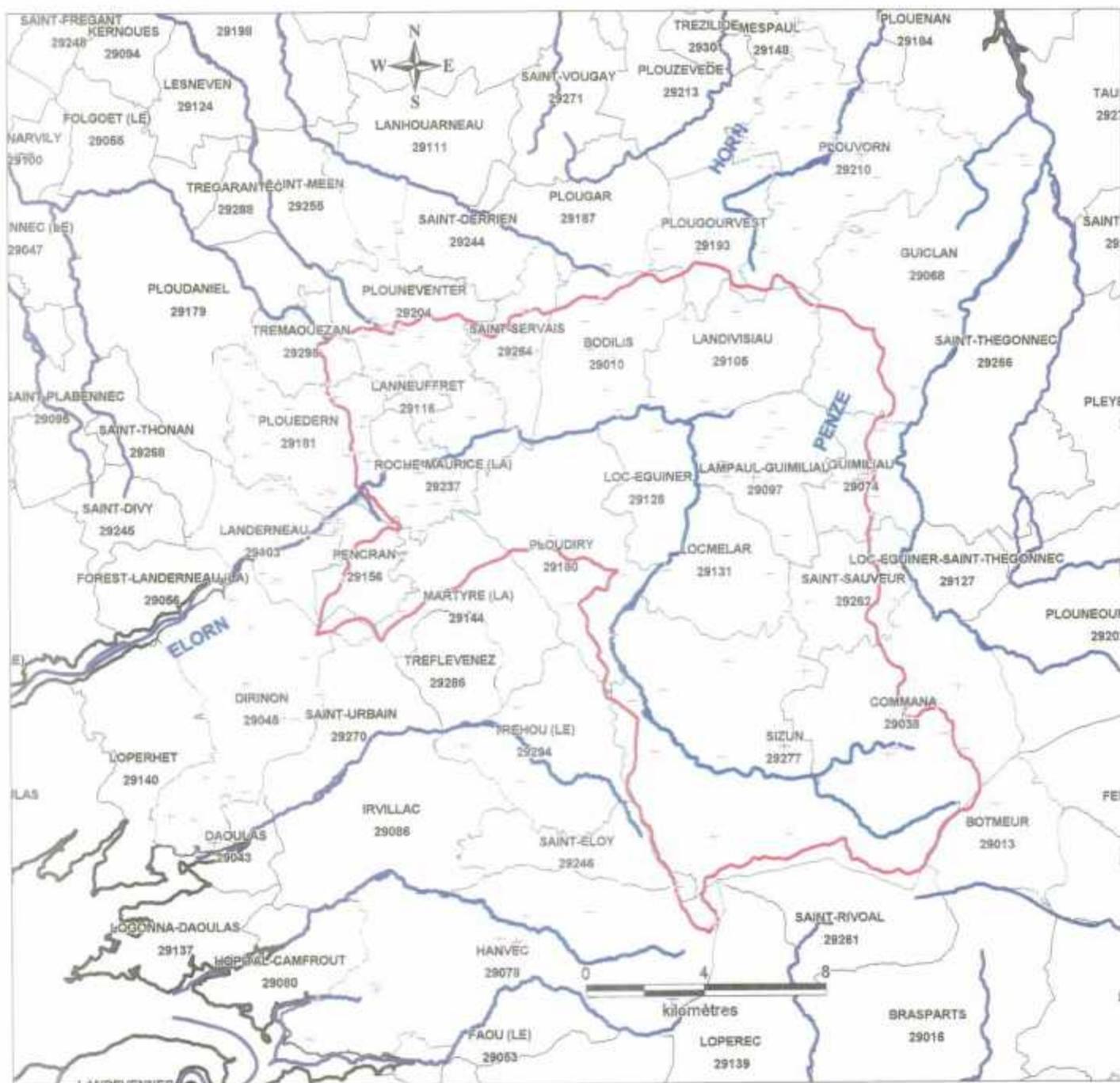
Figure 2 : Carte géologique synthétique du bassin versant de l'Elorn

Transfert des polluants sur le bassin versant de la rade de Brest

Formation	Code géologique	Groupe de formations	Superficie (km2)	% du BV
Gneiss de Brest	N000	Gneiss Nord	34.9	13.4
Orthogneiss de Plougonven	N005	Gneiss Nord	15.7	6.0
Gneiss de Lesneven	N009	Gneiss Nord	0.8	0.3
Micaschistes du Conquet	O000	Micaschistes Nord	24.9	9.6
Granite de Kersaint	G015	Granite Nord	9.3	3.6
Granite de Commana	G010	Granite Nord	21.1	8.1
Grès Armoricaïns	E003	Schistes et Grès Primaires	2.4	0.9
Schistes et calcaires de l'Armorique	E007	Schistes et Grès Primaires	29.5	11.3
Formation des grès de Kermeur	Z001	Schistes et Grès Primaires	14.5	5.6
Schistes et grès du Coblencien	E066	Schistes et Grès Primaires	6.9	2.7
Schistes et quartzites de Plougastel	E001	Schistes et Grès Primaires	91.0	34.9
Schistes de l'Elorn	E000	Schistes Briovériens	9.5	3.7
			260.7	100.0

Groupe de formations	Superficie (km2)	% du BV
Gneiss Nord	51.4	19.7
Micaschistes Nord	24.9	9.6
Granite Nord	30.4	11.7
Schistes et Grès Primaires	144.3	55.4
Schistes Briovériens	9.5	3.7
	260.7	100.0

Tableau 1 : Répartition des formations géologiques sur le bassin versant de l'Elorn



Légende :

- Nom et numéro de commune
- Contour du bassin versant
- Cours d'eau
- Forages d'eau

Figure 3 : Localisation des forages sur les communes du bassin versant de l'Elorn

Les résultats de cette approche statistique sont détaillés dans le tableau 2.

Un indice global a été calculé pour chaque groupe en multipliant le pourcentage de forages ayant fourni un débit instantané au moins égal à 10 m³/h, par le débit moyen des 25 % « meilleurs forages ». Les indices des groupes « Gneiss nord » et « Schistes Briovériens » ont dû être corrigés en supprimant des statistiques 3 forages créant un important « effet de pépite ». Ces sondages ont été implantés à l'aide de critères scientifiques (par le BRGM), et ils fournissent un débit supérieur à 80 m³/h.

La figure 4 illustre, en cartographiant les classes d'indice global, les résultats de l'approche statistique par groupe de formations géologiques. Le mode de représentation des couleurs des groupes est détaillé au niveau de la légende de la figure.

Cette figure met en évidence un découpage du bassin en deux secteurs :

- la partie amont du bassin versant de l'Elorn (sud et ouest) est contrôlée par des formations (schistes et grès Primaires, granites Nord) peu conductrices (indice global de 4-5) où les déstockages par le milieu fissuré profond doivent être lents,
- la partie aval du bassin versant (nord et est) est occupée par des formations plus conductrices (indice > 8) où la vidange des stocks d'eau et le renouvellement des réserves doivent être plus rapides.

L'approche statistique menée sur les formations géologiques de la rade de Brest (rapport BRGM RP-51031-FR) confirme cette tendance amont/aval car les formations situées au sud de la faille de l'Elorn ont un indice global proche de 4-5 : granite de Commana (3,5) et orthogneiss de Plougven (5,3).

2.3.3.2. Cartographie de la perméabilité du sous-sol

Les communes du bassin versant de l'Elorn comportent un nombre suffisant de forages (238) pour qu'une cartographie de la perméabilité du sous-sol soit approchée.

Les débits instantanés des forages d'eau (débit exhauré, par l'émulsion air-eau produite par la méthode du marteau fond de trou) fournissent une bonne image de la perméabilité locale du sous-sol.

La figure 5 présente une cartographie⁽²⁾ des débits instantanés (en m³/h) des forages d'eau situés sur les communes du bassin versant de l'Elorn. La sectorisation a été dessinée grâce à une interpolation sommaire calculée à partir des débits affectés à chaque forage d'eau.

⁽²⁾ Cette figure est un document factuel correspondant à des constats. La réalité y subit sans doute quelques distorsions liées à des biais provenant de la qualité inégale des informations fournies par les foreurs, de la densité non homogène des points recensés, et de la méthode utilisée pour tracer les plages d'iso-valeurs.

Département: FINISTERE
SECTEUR DU BV DE L'ELORN

FORAGES EXISTANTS : DONNEES & RESULTATS

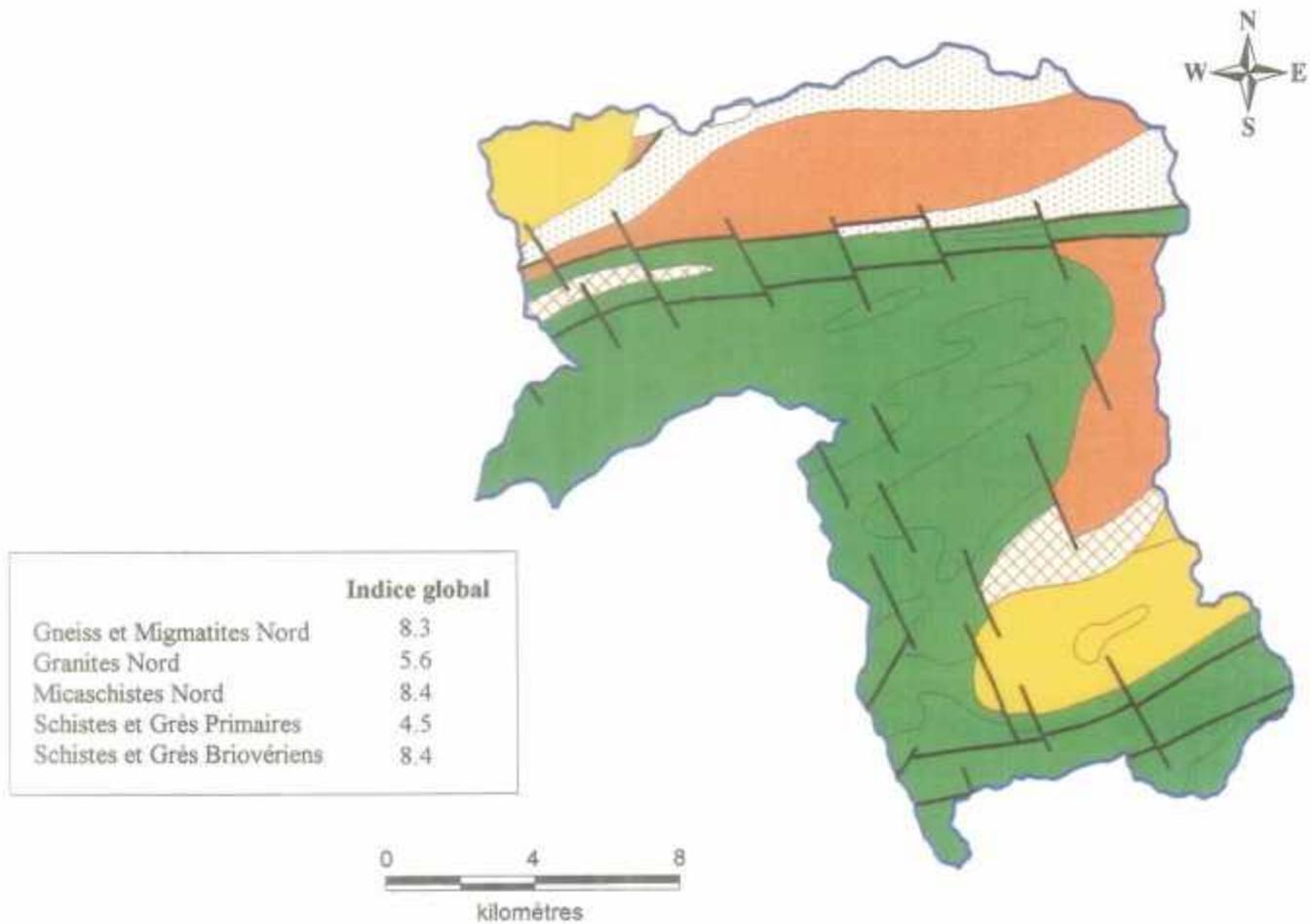
Les débits annoncés sont des débits instantanés; les débits effectivement exploitables peuvent être plus faibles.

Groupe de formations géologiques	DONNEES BRUTES				FREQUENCE DES RESULTATS POSITIFS								Indice global (* corrigé)
	Nombre de forages	Débit moyen	Profondeur moyenne	I=Q/P moyenne	% de forages > 10 m3/h	Moyenne des débits>10 m3/h	Moyenne des profondeurs des forages dont Q>10 m3/h	I=Q/P moyenne des Q > 10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile	Profondeur moyenne du meilleur quartile	I=Q/P moyenne du meilleur quartile		
		m3/h	m	m3/h/m	(1)	m3/h	m	m3/h/m	m3/h (2)	m	m3/h/m	(1)x(2)	
Gneiss nord	68	10.5	52.0	0.296	35.3	23.2	58.9	0.655	28.2	62.6	0.807	8.3 (*)	
Granite nord	50	8.1	41.2	0.269	28.0	19.3	41.6	0.644	20.0	36.4	0.687	5.6	
Micaschistes nord	25	7.9	38.3	0.226	24.0	17.4	34.8	0.494	17.4	34.8	0.494	4.2	
Schistes Briovériens	22	17.1	64.7	0.266	40.9	36.7	101.0	0.510	55.2	136.6	0.700	9,1 (*)	
Schistes et Grés Primaires	73	7.2	47.5	0.185	21.9	22.3	50.6	0.585	20.7	52.9	0.535	4.5	
<i>Ensemble</i>	238	9.3	48.1	0.246	29.0	23.5	56.8	0.603	25.5	58.7	0.647	6.1 (*)	

SECTEUR DU BV DE LA RADE DE BREST

Statistiques sur la rade de Brest												
Formation géologique	Nombre de forages	Débit moyen	Profondeur moyenne	I=Q/P moyenne	% de forages > 10 m3/h	Moyenne des débits>10 m3/h	Moyenne des profondeurs des forages dont Q>10 m3/h	I=Q/P moyenne des Q > 10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile	Profondeur moyenne du meilleur quartile	I=Q/P moyenne du meilleur quartile	Indice global (* corrigé)
		m3/h	m	m3/h/m	(1)	m3/h	m	m3/h/m	m3/h (2)	m	m3/h/m	(1)x(2)
	Schistes de L'Elorn	63	10.6	58.4	0.201	28.6	27.1	75.1	0.470	29.2	79.9	0.489
Micaschistes du Conquet	41	10.2	42.9	0.256	36.6	19.5	52.2	0.451	23.0	58.5	0.488	8.4

Tableau 2 : Résultats de l'approche statistique sur les groupes de formations géologiques du bassin versant de l'Elorn



Classes d'intérêt	1	2	3	4	5	
Indice global	> 10	7,5 à 10	5 à 7,5	2,5 à 5	< 2,5	
Populations statistiquement représentatives						Classement défini dans les formations du secteur considéré
Populations insuffisantes pour être statistiquement représentatives						Formation affectée de son classement défini à une échelle plus large
						Tendance supérieure au classement défini à une échelle plus large
						Tendance inférieure au classement défini à une échelle plus large
	30 à 54%	31 à 38%	25 à 35%	17 à 28%	4 à 15%	% de débits > 10 m ³ /h
	30 à 85 m ³ /h	23 à 27 m ³ /h	18 à 25 m ³ /h	10 à 23 m ³ /h	7 à 16 m ³ /h	Débit moyen en m ³ /h du meilleur quartile

Figure 4 : Intérêt potentiel des aquifères de socle sur le bassin versant de l'Elorn (raisonnement par groupes de formations géologiques)

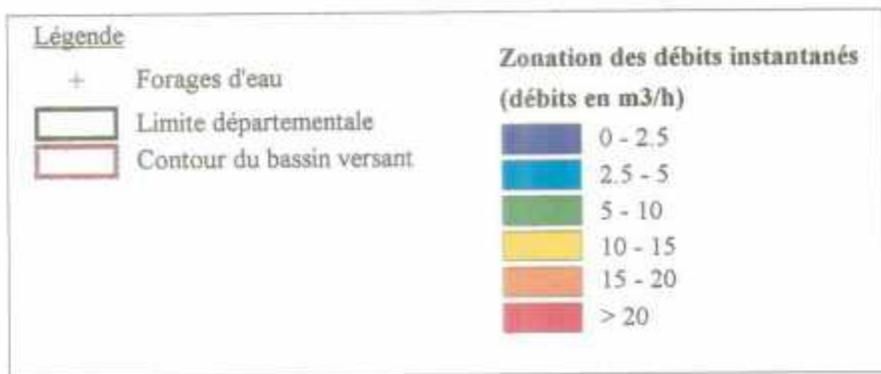
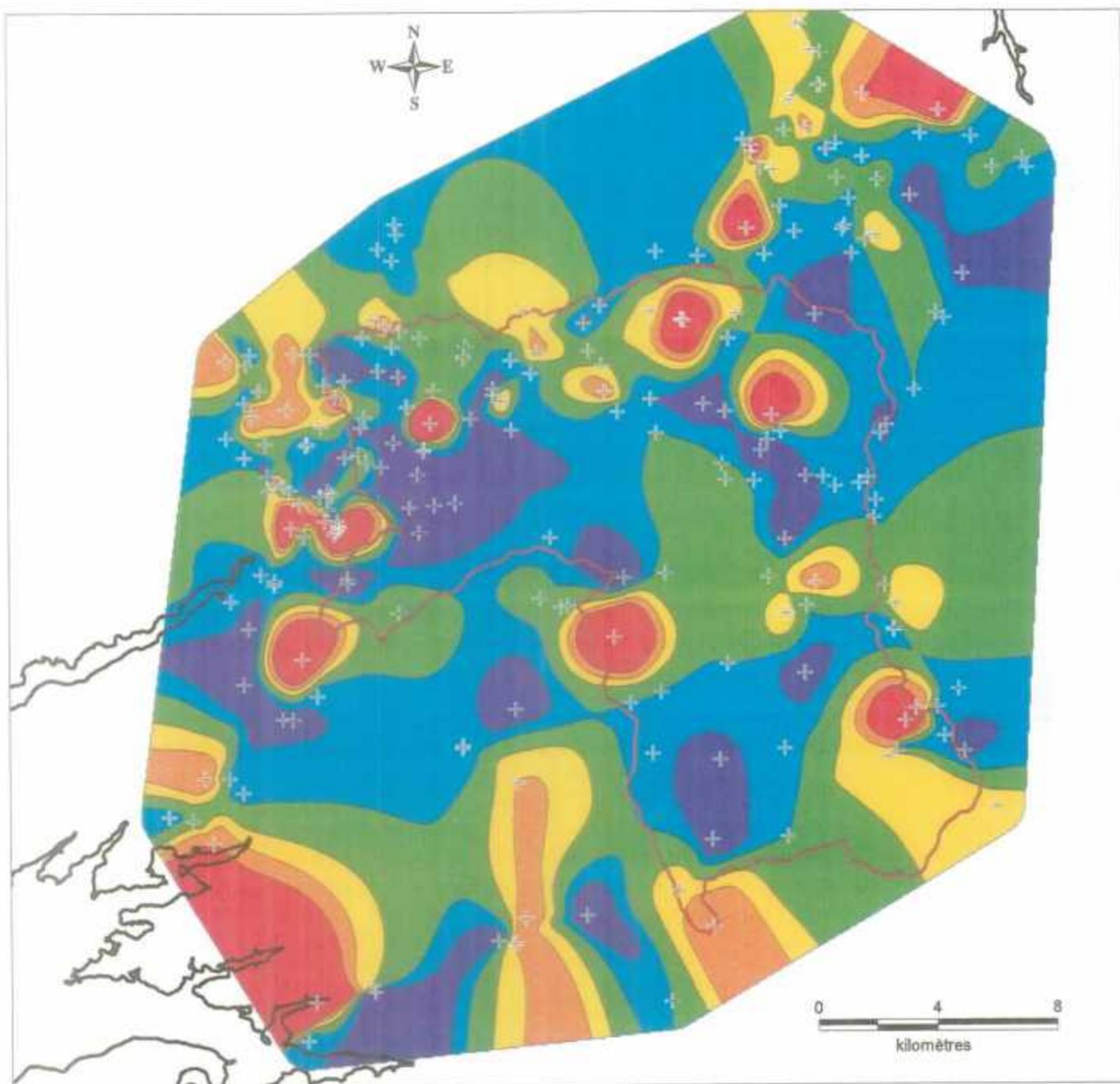


Figure 5 : Cartographie des débits des forages sur le bassin versant de l'Elorn

Cette figure met en évidence les points suivants :

- les débits instantanés supérieurs à 15 m³/h sont le plus souvent liés aux fractures de direction N150-160 (corrélation de la figure avec la carte géologique synthétique),
- les groupes de formations géologiques à l'amont du bassin versant (schistes et grès Primaires, granites Nord) peuvent présenter localement des débits supérieurs à 20 m³/h, malgré un indice global relativement faible,
- les débits des forages d'eau sont, en moyenne, plus importants dans la partie nord du bassin versant que dans la partie sud ; ceci confirme le découpage d'une partie aval présentant des formations géologiques plus conductrices que dans la partie amont du bassin versant.

La cartographie actuelle sera affinée avec celle qui sera réalisée par krigeage (interpolation géostatistique) à l'échelle de la rade de Brest dans le cadre de la phase 2 du programme « comportement hydrodynamique des roches altérées ».

2.4. ETUDE DU BASSIN VERSANT DE L'AULNE EN AMONT DE LA STATION DE PONT POL TY GLASS

2.4.1. Localisation et contexte géologique du bassin versant

L'Aulne est un fleuve, situé au centre du Finistère et au sud-ouest des Côtes d'Armor, qui prend sa source au sud de Guerlesquin près de la forêt départementale de Beffou à une altitude de 260 m, et se jette dans la rade de Brest à proximité de la ville de Châteaulin.

Le bassin versant de l'Aulne (cf. figure 6) a une superficie de 1224 km² au droit de la station de jaugeage de Pont Pol Ty Glass sur la commune de Châteauneuf-du-Faou (station J3811810). Ce bassin versant englobe celui de la rivière l'Hyères et la partie aval du canal de Nantes à Brest (de Glomel à la confluence avec l'Hyères).

Les précipitations arrosant le bassin sont assez hétérogènes : elles sont comprises entre 1400 mm/an dans la partie nord-ouest à proximité de Brennilis, et 900 mm/an au sud-est vers Carhaix. Les précipitations efficaces sont en moyenne supérieures à 500 mm/an.

La géologie du bassin versant de l'Aulne est assez variée puisqu'il est constitué :

- de schistes, quartzites et grès Primaires prépondérants sur le bassin versant (70 %) et subdivisés en deux ensembles :
 - le bassin Carbonifère de Châteaulin sur environ la moitié du bassin,
 - des formations diverses d'âge Ordovicien, Silurien, Dévonien (environ 20 %) au nord, nord-ouest et sud du bassin,
- de formations granitiques (environ 13 %) : granite de Huelgoat au nord-ouest et granite de Quintin à l'est,
- des schistes Briovériens (environ 11 %) : les séries de Lamballe au nord-est et la formation de la Baie de Douarnenez au nord-ouest,
- des roches volcaniques au nord (environ 3 %),
- des cornéennes et micaschistes (2,5 %), non représentés sur la carte géologique (figure 7), issus du métamorphisme de contact à proximité du granite de Quintin,
- de roche basique : gabbro de Trégomar en lentille au nord.

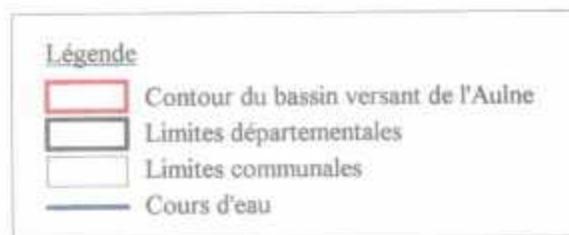
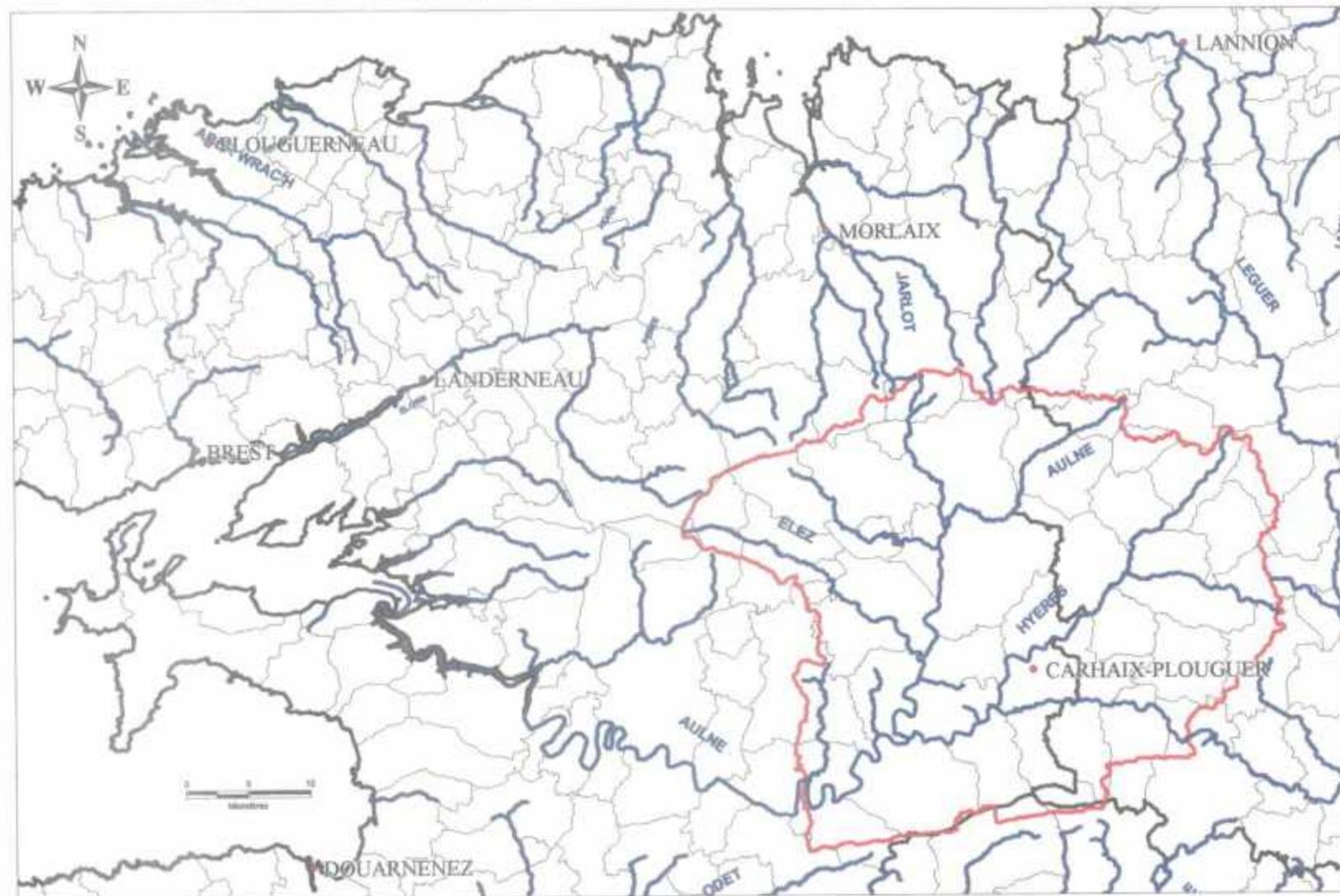


Figure 6 : Localisation du bassin versant de l'Aulne

La figure 7 présente une carte géologique synthétique avec des contours détaillés à l'échelle du 1/250 000. Sa légende indique les noms usuels des formations rencontrées sur le bassin versant.

Le tableau 3 rassemble les superficies occupées par les formations géologiques et leurs pourcentages d'occupation du bassin versant de l'Aulne.

2.4.2. Altération et fracturation des terrains

Le secteur d'étude est recoupé par plusieurs familles de failles : au nord et au sud-est des failles orientées N25, au sud le cisaillement centre Armoricaïn à N80-90, au nord-ouest deux familles à N60-70 et à N130-140, la dernière se trouvant également au sud-ouest.

Les informations concernant l'altération et la fracturation des terrains du secteur d'étude seront disponibles dès la fin de la modélisation des formations altérées et du milieu fissuré, à partir de points d'affleurements et de forages, réalisée en phase 2 de l'étude du « comportement hydrodynamique des roches altérées de la surface sur le bassin versant de la rade de Brest ».

2.4.3. Perméabilité du sous-sol et intérêt hydrogéologique des aquifères de socle

2.4.3.1. Approche statistique

Seules les formations géologiques du bassin Carbonifère de Châteaulin : E052 et E008 (cf. tableau 3) rattachées au groupe « Grès et quartzites Primaires », et I004 au groupe « Schistes Primaires », sont suffisamment bien représentées au niveau des forages d'eau. Les statistiques ont alors été menés sur ces forages du bassin versant pour les deux groupes de formations (avec respectivement 211 et 69 forages).

En raison du manque de forages implantés sur les autres formations géologiques du bassin (12 forages pour la formation la mieux représentée), une approche statistique a été menée sur les groupes de formations géologiques détaillés dans le tableau 3, à deux niveaux d'échelle :

- sur la totalité du territoire des communes du bassin versant de l'Aulne (si le nombre de forages alors recensés sur le groupe de formation était supérieur à 40 forages),
- sur les formations des départements (dans le cas contraire).

La figure 8 localise les 238 forages recensés sur les communes du bassin versant.

Les résultats de cette approche statistique sont détaillés dans les tableaux 4. Le premier tableau rassemble les résultats détaillés d'après les informations des forages situés sur les communes du bassin, et le second tableau précise, à différentes échelles (bassin versant, communes, et département), le choix de l'indice global selon le nombre de forages d'eau recensés dans le groupe de formations géologiques.

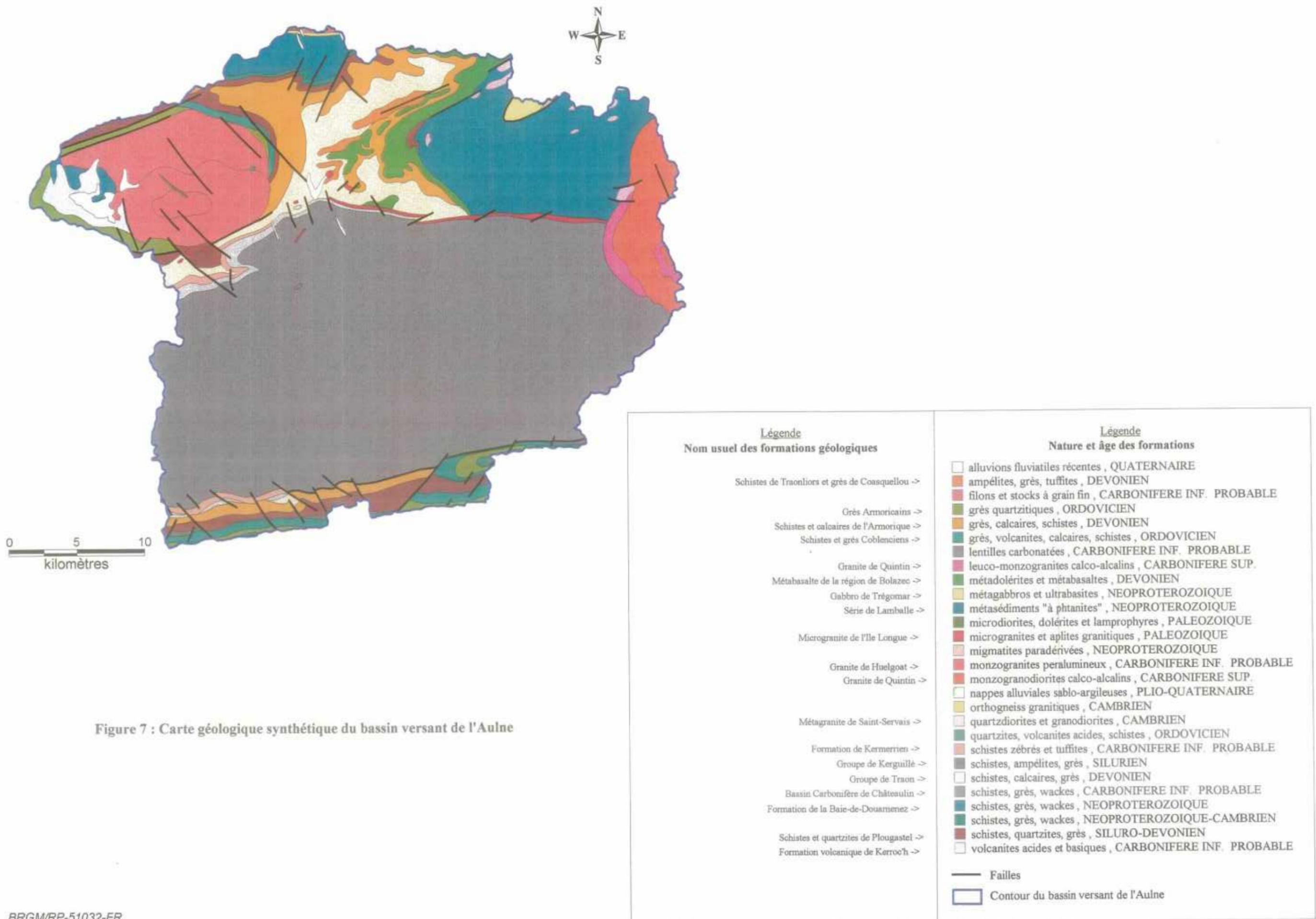


Figure 7 : Carte géologique synthétique du bassin versant de l'Aulne

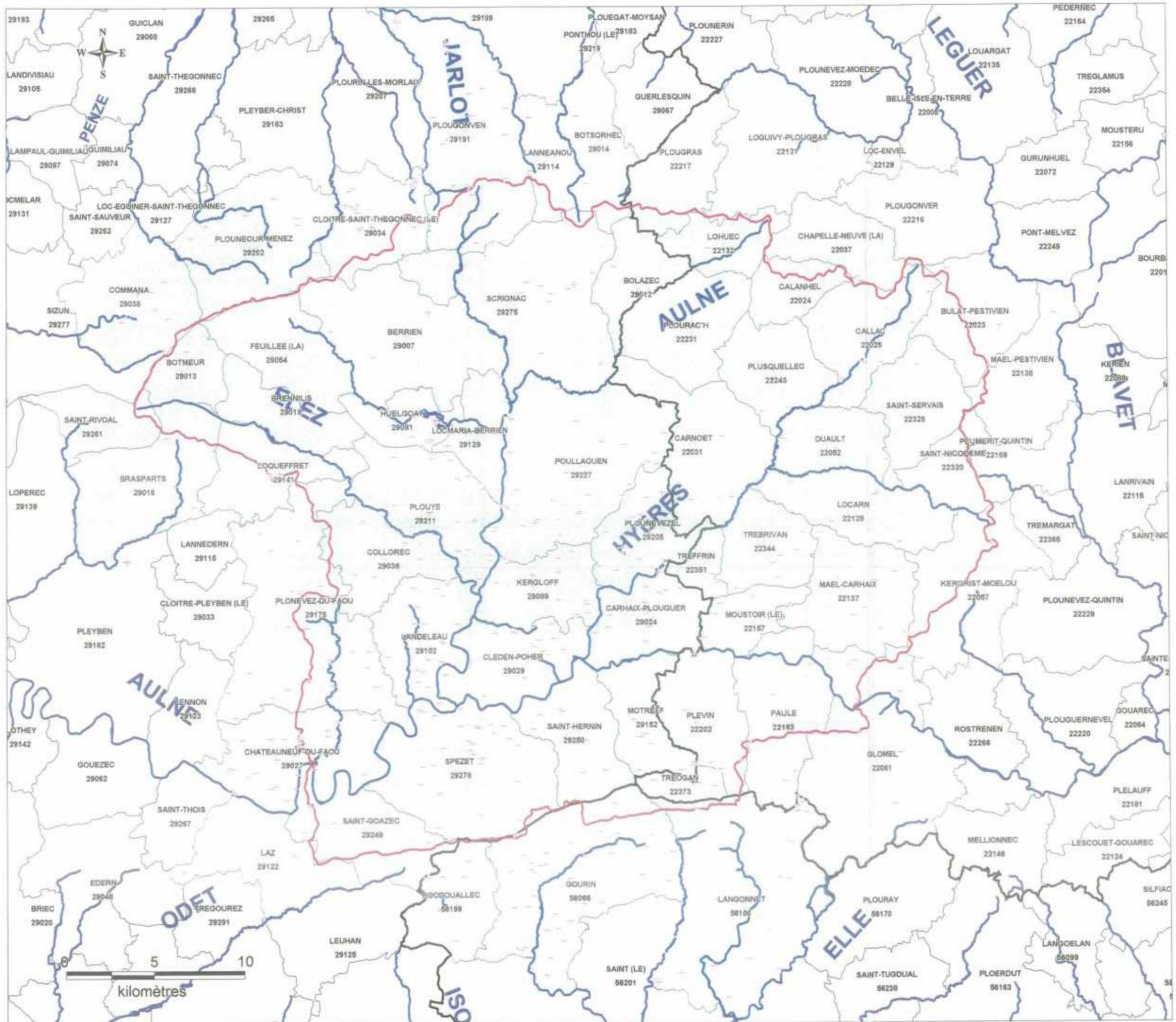
Transfert des polluants sur le bassin versant de la rade de Brest

Formation	Code géologique	Groupe de formations	Superficie (km2)	% du BV
Série de Lamballe	S008	Schistes Briovériens	99.4	8.3
Formation de la Baie-de-Douarnenez	E000	Schistes Briovériens	29.6	2.5
Grès Armoricaains	E003	Grès et quartzites Primaires	30.8	2.6
Bassin Carbonifère de Châteaulin	E052 et E008	Grès et quartzites Primaires	376.8	31.6
Schistes de Traonliors et grès de Coasquellou	E055	Schistes et Grès Primaires	6.9	0.6
Schistes et grès Coblencien	E066	Schistes et Grès Primaires	23.1	1.9
Groupe de Kerguillé	E005	Schistes et Grès Primaires	1.4	0.1
Groupe de Traon	R001	Schistes et Grès Primaires	61.7	5.2
Schistes et quartzites de Plougastel	E001	Schistes et Grès Primaires	48.7	4.1
Cornéennes et schistes tachetés	C003	Cornéennes et micaschistes	30.0	2.5
Microgranite de l'île Longue	G002	Granites Nord	6.4	0.5
Granite de Huelgoat	G013	Granites Nord	101.3	8.5
Métagranite de Saint-Servais	G009	Granites Nord	4.0	0.3
Schistes et calcaires de l'Armorique	E007	Schistes Primaires	69.9	5.9
Formation de Kermerrien	E051	Schistes Primaires	8.2	0.7
Schistes ardoisiers de Châteaulin	I004	Schistes Primaires	207.5	17.4
Métabasaltes de la région de Bolazec	V002	Roches volcaniques	27.3	2.3
Formation volcanique de Kerroc'h	V003	Roches volcaniques	11.0	0.9
Gabbro de Trégomar	D003	Roches basiques	3.3	0.3
Granite de Quintin	G033	Granites Hercyniens	46.7	3.9

Groupe de formations	Superficie (km2)	% du BV
Schistes Briovériens	129.0	10.8
Grès et quartzites Primaires	407.6	34.1
Schistes et grès Primaires	141.8	11.9
Cornéennes et micaschistes	30.0	2.5
Granites Nord	111.7	9.4
Schistes Primaires	285.6	23.9
Roches volcaniques	38.3	3.2
Roches basiques	3.3	0.3
Granites Hercyniens	46.7	3.9

Tableau 3 : Répartition des formations géologiques sur le bassin versant de l'Aulne

Transfert des polluants
sur le bassin versant
de la rade de Brest



Départements : Finistère, Côtes d'Armor et Morbihan
SECTEUR DU BV DE L'AULNE

FORAGES EXISTANTS : DONNEES & RESULTATS

Les débits annoncés sont des débits instantanés; les débits effectivement exploitables peuvent être plus faibles.

Statistiques détaillées sur les forages des communes du bassin versant de l'Aulne

Groupe de formations géologiques	DONNEES BRUTES				FREQUENCE DES RESULTATS POSITIFS							
	Nombre de forages	Débit moyen	Profondeur moyenne	I=Q/P moyenne	% de forages > 10 m3/h	Moyenne des débits > 10 m3/h	Moyenne des profondeurs des forages dont Q > 10 m3/h	I=Q/P moyenne des Q > 10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile	Profondeur moyenne du meilleur quartile	I=Q/P moyenne du meilleur quartile	Indice global (* corrigé)
		m3/h	m	m3/h/m	(1)	m3/h	m	m3/lv/m	m3/h (2)	m	m3/h/m	(1)x(2)
Grès et quartzites Primaires	247	5.5	49.7	0.130	16.2	16.0	46.6	0.386	13.3	47.0	0.320	2.1
Schistes Primaires	88	6.6	52.7	0.134	18.2	18.4	57.3	0.349	15.5	56.4	0.296	2.8
Schistes Briovériens	49	7.4	54.5	0.131	18.4	24.0	65.0	0.342	20.1	65.5	0.290	3.7
Granites Nord	49	5.6	42.2	0.167	12.2	20.1	42.7	0.553	13.9	55.3	0.339	1.7
Schistes et grès Primaires	29	13.8	45.7	0.317	34.5	32.2	53.2	0.723	38.2	55.4	0.854	7,5 (*)
Cornéennes et micaschistes	28	7.2	47.4	0.141	14.3	29.8	67.6	0.488	19.6	59.1	0.310	2.8
Granites Hercyniens	9	4.1	40.8	0.110	11.1	10.0	40.0	0.250	8.4	33.5	0.249	0.9
Roches volcaniques	5	7.8	53.0	0.155	40.0	12.0	56.5	0.230	12.0	72.0	0.167	4.8
Roches basiques	1	11.0	45.0	0.244	100.0	11.0	45.0	0.244	-	-	-	-

Calcul de l'indice global affecté aux groupes de formations géologiques

Groupe de formations géologiques	Statistiques sur le bassin versant				Statistiques sur les communes du bassin				Statistiques sur les départements			
	Nombre de forages	% de forages > 10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile	Indice global	Nombre de forages	% de forages > 10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile	Indice global (* corrigé)	Nombre de forages	% de forages > 10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile	Indice global
			m3/h				m3/h				m3/h	
Grès et quartzites Primaires	211	14.2	12.0	1.7	-	-	-	-	-	-	-	-
Schistes Primaires	69	20.3	15.9	3.2	-	-	-	-	-	-	-	-
Granites Nord	10	-	-	-	49	12.2	13.9	1.7	-	-	-	-
Schistes Briovériens	7	-	-	-	49	18.4	20.1	3.7	-	-	-	-
Cornéennes et micaschistes	7	-	-	-	28	14.3	19.6	2.8	238	36.5	29.8	10.9
Schistes et grès Primaires	14	-	-	-	29	34.5	38.2	7.5 (*)	199	22.6	8.5	1.9
Granites Hercyniens	3	-	-	-	9	11.1	8.4	0.9	170	21.2	29.5	6.2
Roches basiques	1	-	-	-	1	-	-	-	42	21.0	14.3	3.0
Roches volcaniques	5	-	-	-	5	40.0	12.0	4.8	18	28.0	14.0	3.9

Tableau 4 : Résultats de l'approche statistique sur les groupes de formations géologiques du bassin versant de l'Aulne

Un indice global a été calculé pour chaque groupe en multipliant le pourcentage de forages ayant fourni un débit instantané au moins égal à 10 m³/h, par le débit moyen des 25 % « meilleurs forages ». L'indice du groupe « Schistes et grès Primaires » a dû être corrigé en supprimant des statistiques 2 forages créant un important « effet de pépité ». Ces sondages ont été implantés à l'aide de critères scientifiques (par le BRGM), et ils fournissent des débits de 75 et 55 m³/h.

La figure 9 illustre, en cartographiant les classes d'indice global, les résultats de l'approche statistique par groupe de formations géologiques. Le mode de représentation des couleurs des groupes est détaillé au niveau de la légende de la figure. Le contour du groupe des « cornéennes et micaschistes » a été ajouté au contact du granite de Quintin. Le bassin Carbonifère de Châteaulin a été séparé en deux suivant la limite entre les départements du Finistère et des Côtes d'Armor. En effet, les formations géologiques situées à l'est sont des schistes ardoisiers et ils ont été rattachés au groupe « schistes Primaires », tandis que les formations à l'ouest appartiennent au groupe « grès et quartzites Primaires ».

Cette figure met en évidence un bassin homogène en terme d'intérêt des aquifères de socle : le bassin versant de l'Aulne, excepté le secteur est, est contrôlée par des formations très peu conductrices (indice global inférieur à 2 pour 55 % de la superficie, et compris entre 3 et 4 pour 38 %) où l'infiltration de l'eau dans le sous-sol et les déstockages par le milieu fissuré profond doivent être lents.

La partie est du bassin versant est occupée par des formations plus conductrices (indices de 6,2 et 10,9) où la vidange des stocks d'eau et le renouvellement des réserves doivent être plus rapides. Ces formations sont drainées par un affluent de l'Aulne : la rivière l'Hyères.

Les résultats obtenus en terme d'indice global sont localement inférieurs à ceux obtenus lors de l'approche statistique menée sur les formations géologiques de la rade de Brest (rapport BRGM RP-51031-FR) ; c'est le cas pour les formations suivantes : schistes Briovériens (indice de 3,7 par rapport à 8,4), schistes et calcaires de l'Armorique (3,2 / 7,7), et grès Armoricaux (1,7 / 3,2). Cette différence peut s'expliquer par le rattachement de ces formations à un groupe dans lequel se trouvent les roches peu conductrices du bassin de Châteaulin, qui occupent une grande surface du bassin et comportent donc davantage de forages d'eau.

Les formations géologiques sont donc localement moins conductrices que celles situées sur le bassin versant de la rade de Brest.

2.4.3.2. Cartographie de la perméabilité du sous-sol

Les 57 communes du bassin versant de l'Aulne (32 dans le Finistère, 22 dans les Côtes d'Armor et 3 dans le Morbihan) comportent un nombre suffisant de forages (505) pour qu'une cartographie de la perméabilité du sous-sol soit approchée.

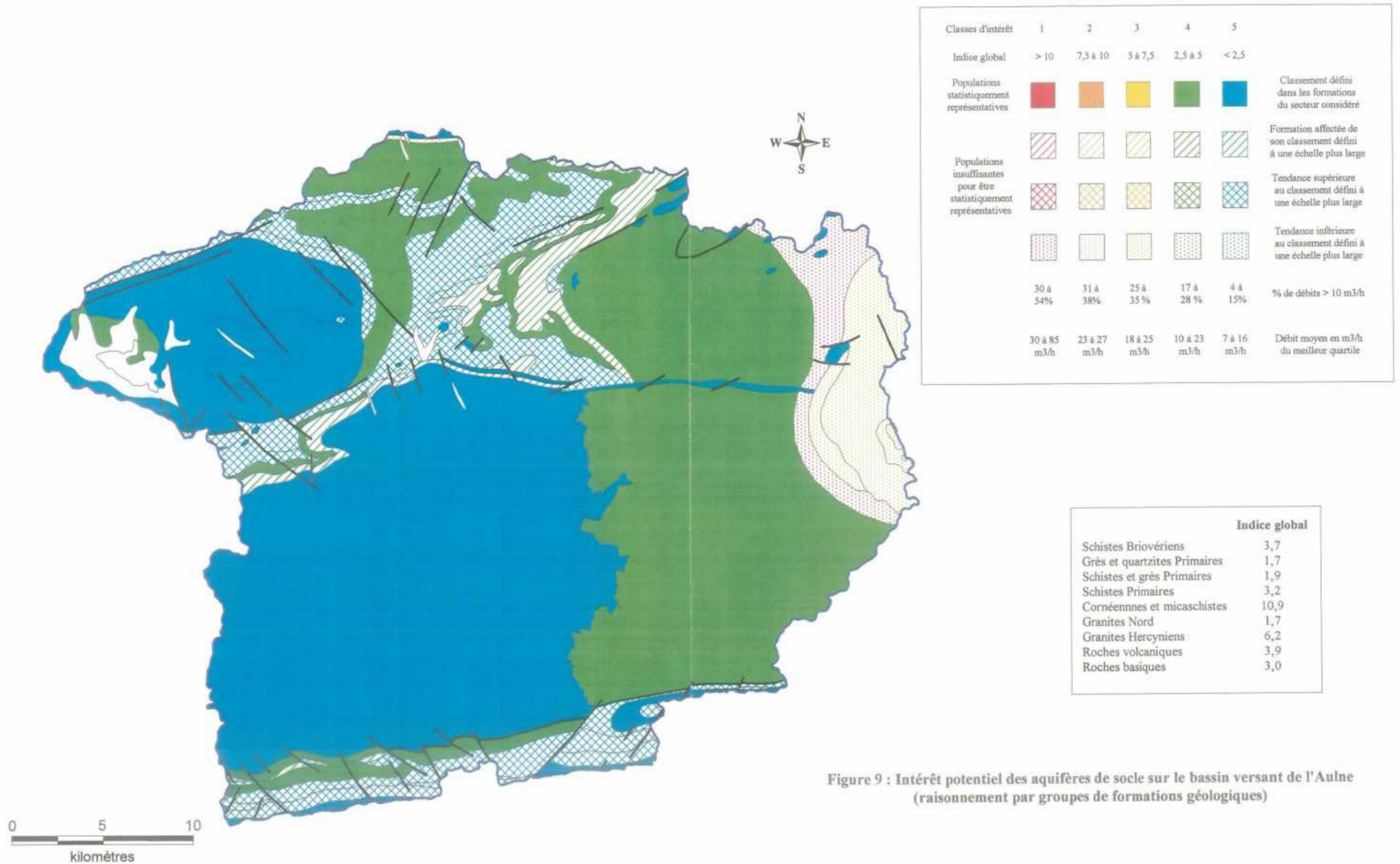


Figure 9 : Intérêt potentiel des aquifères de socle sur le bassin versant de l'Aulne (raisonnement par groupes de formations géologiques)

Les débits instantanés des forages d'eau (débit exhauré, par l'émulsion air-eau produite par la méthode du marteau fond de trou) fournissent une bonne image de la perméabilité locale du sous-sol.

La figure 10 présente une cartographie des débits instantanés (en m³/h) des forages d'eau situés sur les communes du bassin versant de l'Aulne. La sectorisation a été dessinée grâce à une interpolation sommaire calculée à partir des débits affectés à chaque forage d'eau.

Cette figure met en évidence les points suivants :

- la majeure partie du bassin versant est constituée par des zones peu perméables (couleurs bleu clair, bleu foncé et vert) où les débits des forages sont inférieurs à 10 m³/h (82 % des forages), voire à 5 m³/h (56 % des forages),
- les forages, assez isolés, présentant les plus forts débits ne sont pas corrélés aux failles existantes,
- certaines formations géologiques du bassin versant (par exemple : schistes ardoisiers et groupe de Châteaulin) peuvent présenter localement des débits supérieurs à 20 m³/h (cas de 4 forages isolés), malgré un indice global faible.

La cartographie actuelle sera affinée avec celle qui sera réalisée par krigeage à l'échelle de la rade de Brest dans le cadre de la phase 2 du programme « comportement hydrodynamique des roches altérées ».

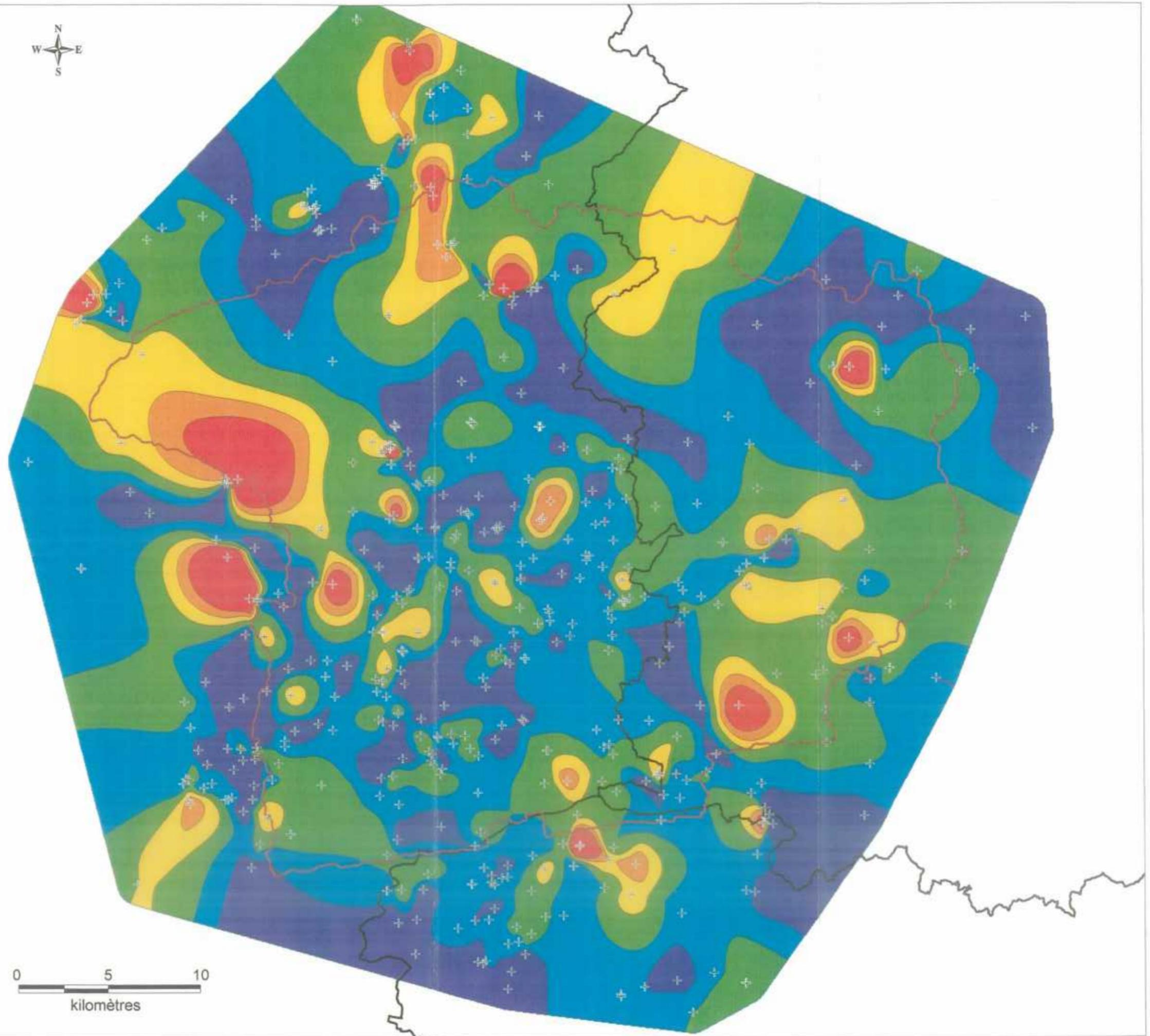
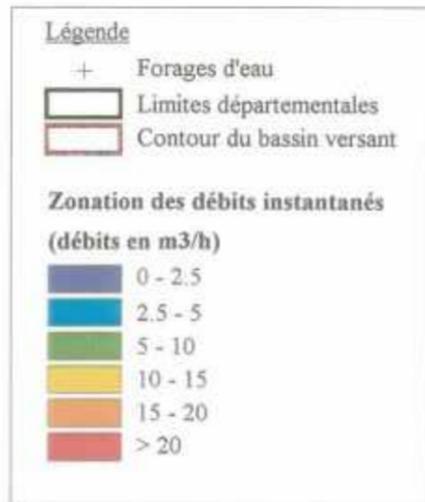


Figure 10 :
Cartographie des débits des forages
sur le bassin versant de l'Aulne

3. Evaluation des débits souterrains - Ratios ruissellement-infiltration

Une modélisation des écoulements mesurés dans les cours d'eau aux stations hydrométriques de Pont ar Bled (Elorn) et de Pont Pol Ty Glass (Aulne) a été effectuée avec le logiciel Gardénia, développé par le BRGM, afin d'évaluer la participation du ruissellement et des écoulements souterrains à l'écoulement global.

La modélisation des bassins versants a été réalisée 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.

3.1. PRINCIPE DE LA MODELISATION GARDENIA

Le débit qui s'écoule dans une rivière est à tout moment la résultante de deux composantes essentielles (cf. figure 11) :

- l'écoulement de surface qui totalise :
 - le ruissellement proprement dit,
 - les écoulements « hypodermiques » (écoulements retardés),
 - la pluviométrie sur les surfaces d'eau libre,
- et l'écoulement souterrain.

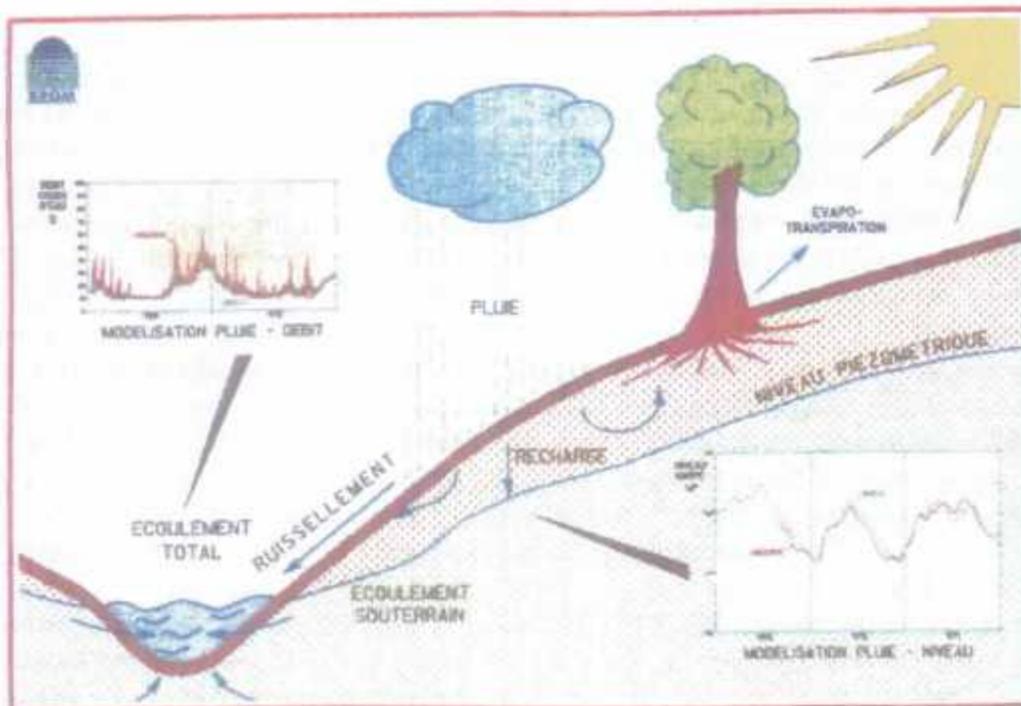


Figure 11 : Modèle Gardénia et cycle de l'eau

Gardénia est un logiciel de prévision hydrologique. Il utilise un modèle global sous forme de réservoirs souterrains (cf. figure 12). A partir de chroniques connues de pluies, de débits et d'évapotranspiration potentielle (ETP) sur un bassin versant, il calcule des paramètres caractérisant les réservoirs ; paramètres qui permettront ensuite de simuler le débit à partir des données de pluie et d'ETP seulement.

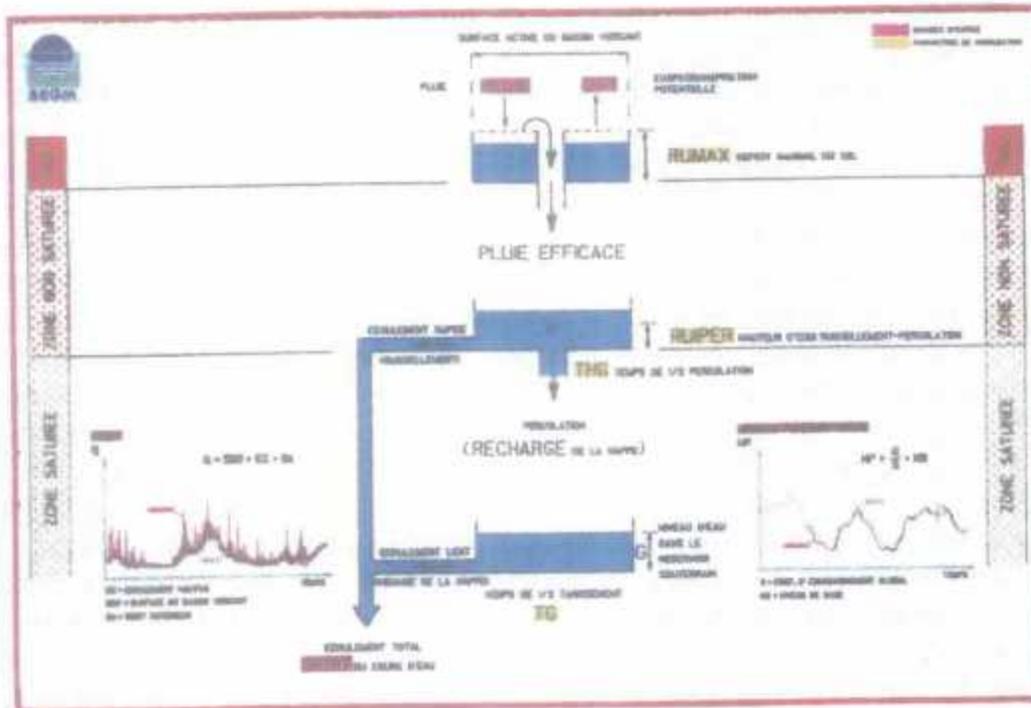


Figure 12 : Modèle Gardénia et organisation des réservoirs

Gardénia est régi par le principe « fonction production - fonction transfert » (cf. figure 12).

La fonction « production » détermine quelle quantité d'eau sera apportée au modèle et quelle quantité d'eau sera évaporée ou s'infiltre dans les horizons inférieurs pour ressortir « plus tard ». Le réservoir superficiel est au cœur de cette fonction « production ». Il correspond à la partie du sol dans laquelle l'évapotranspiration s'effectue. La hauteur dans le réservoir superficiel RU, correspond à l'eau restante lorsque la pluie s'est infiltrée dans le sol alors que l'évapotranspiration a eu lieu. Si l'évapotranspiration est plus importante que la pluie infiltrée, le niveau dans le réservoir superficiel diminue. De plus, le comportement de ce réservoir est régi par le seuil RUMAX, valeur de rétention. Si la hauteur dans le réservoir, RU, est supérieure à ce seuil, l'excédent ALIMH s'écoule dans le réservoir intermédiaire.

La fonction « transfert » est composée du réservoir intermédiaire et du réservoir souterrain (il y a possibilité d'ajouter un deuxième réservoir souterrain, plus profond). Le réservoir intermédiaire est caractérisé par deux écoulements en sortie : l'écoulement extérieur sous forme de « débit retardé » QH, et la percolation vers le réservoir souterrain sous forme de vidange exponentielle ALIMG. Ces deux écoulements sont

liés, le « débit retardé » étant favorisé lorsque la hauteur H dans le réservoir est grande, et inversement. Le « débit retardé » dépend du paramètre RUIPER qui est la hauteur H pour laquelle la percolation et l'écoulement sont égaux. Pour sa part, le réservoir souterrain correspond à l'aquifère. Son écoulement en sortie QG1 suit aussi une loi de vidange exponentielle.

Les équations régissant les différents réservoirs souterrains sont les suivantes :

Réservoir superficiel : $ALIMH = RU - RUMAX$

Réservoir intermédiaire : $ALIMG = H \cdot dt / THG$ (dt = pas de temps)

$QH = H \cdot dt / (THG \cdot RUIPER / H)$

Réservoir souterrain : $QG1 = G1 dt / TG1$

Gardénia nécessite l'utilisation de chroniques de pluies, débits et d'ETP sur une longue période (typiquement dix ans), afin de connaître le comportement du bassin sur chaque type d'année (pluvieuse, moyenne ou sèche). Gardénia effectue d'abord un calage des paramètres hydrologiques caractérisant les réservoirs souterrains sur quelques années (souvent deux années suffisent), en utilisant les données de pluie, d'ETP et de débits. Il utilise ensuite ces paramètres pour simuler les débits cette fois-ci simplement à partir des données de pluies et d'ETP. Il compare les simulations de débits avec la chronique des débits mesurés et fournit alors la corrélation entre les deux séries de valeurs. Une bonne corrélation signifie que les paramètres sont bien calés et fiables.

La méthode d'optimisation est une adaptation de l'algorithme non linéaire de Rosembrock. Il s'agit de minimiser une fonction critère F en faisant varier successivement p paramètres. Une bonne corrélation signifie que les paramètres sont bien calés et fiables. Une fois le calage effectué, les paramètres hydrologiques obtenus donnent une bonne idée de la réalité du comportement des réservoirs du bassin versant, et notamment des temps de transfert.

Après calage des paramètres, Gardénia fournit les valeurs de pluie efficace sur le bassin versant, et les débits de sortie des différents réservoirs, ce qui permet de connaître la répartition entre l'eau souterraine et l'eau de surface, ainsi que les constantes de tarissement des réservoirs.

3.2. DONNEES DISPONIBLES

3.2.1. Données hydrométriques

Les données suivantes ont été obtenues auprès de la DIREN :

- Elorn : débits journaliers à la station de Pont Ar Bled à Plouédern (superficie du bassin : 260 km²) de 1985 à 1995 (10 ans),
- Aulne : débits journaliers à la station de Pont Pol Ty Glass à Châteauneuf-du-Faou (superficie du bassin : 1224 km²) de 1984 à 1995 (11 ans)

3.2.2. Données climatiques

Les données suivantes ont été achetées à Météo France :

- pour le bassin de l'Elorn :
 - pluies journalières à : Landerneau (1985-1995), Sizun (1985-1995), Saint-Servais (1985-1995),
 - ETP journalières à Saint-Servais (1985-1995),
- pour le bassin de l'Aulne :
 - pluies journalières à : Scrignac (1984-1995), Plonévez-du-Faou (1984-1995), Carhaix-Plouguer (1984-1995),
 - ETP journalières à Plonévez-du-Faou (1984-1995).

3.3. VALIDATION ET MISE EN FORME DES DONNEES

3.3.1. 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 écoulée sur le bassin versant (volume d'eau écoulé au niveau de l'exutoire divisé par la surface du bassin) à la totalité des pluies efficaces.

L'ETP (cf. figure 13) représente la quantité d'eau théorique (elle peut être mesurée en $10^{\text{ème}}$ de millimètres), 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).

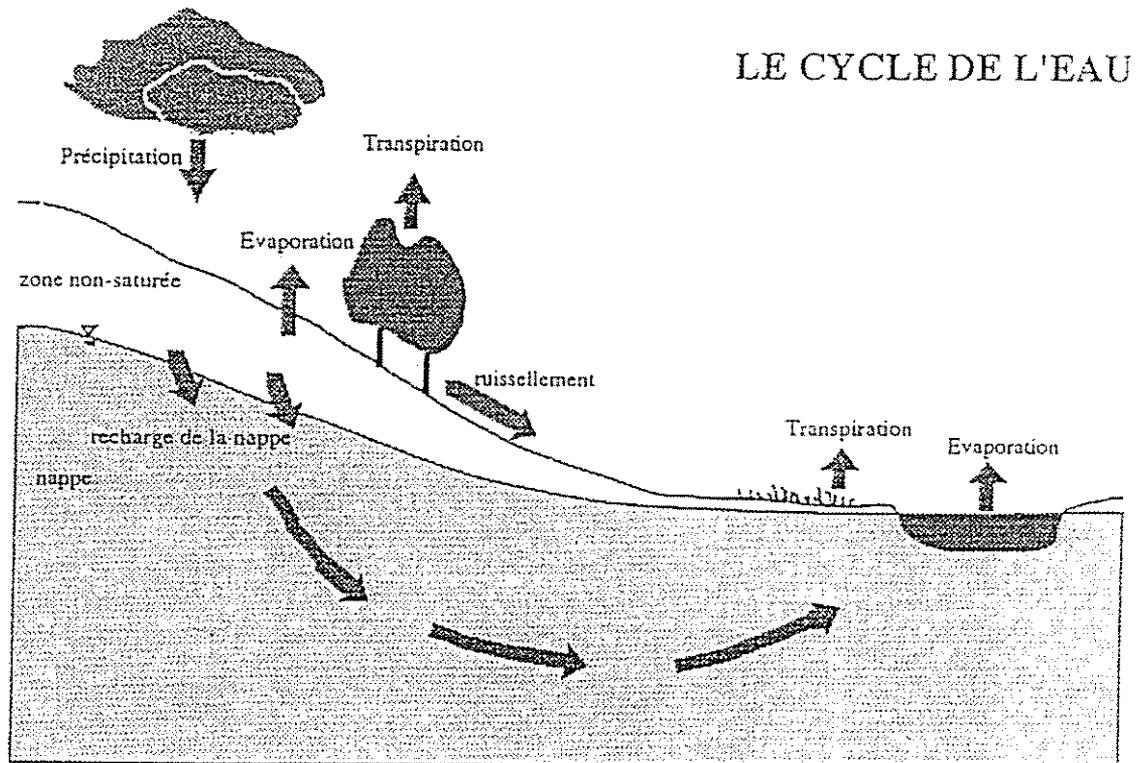


Figure 13 : Schéma du cycle de l'eau

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 de la figure 12). 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.

3.3.2. 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 été ainsi 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. La figure 14 présente ce découpage des deux bassins versants.

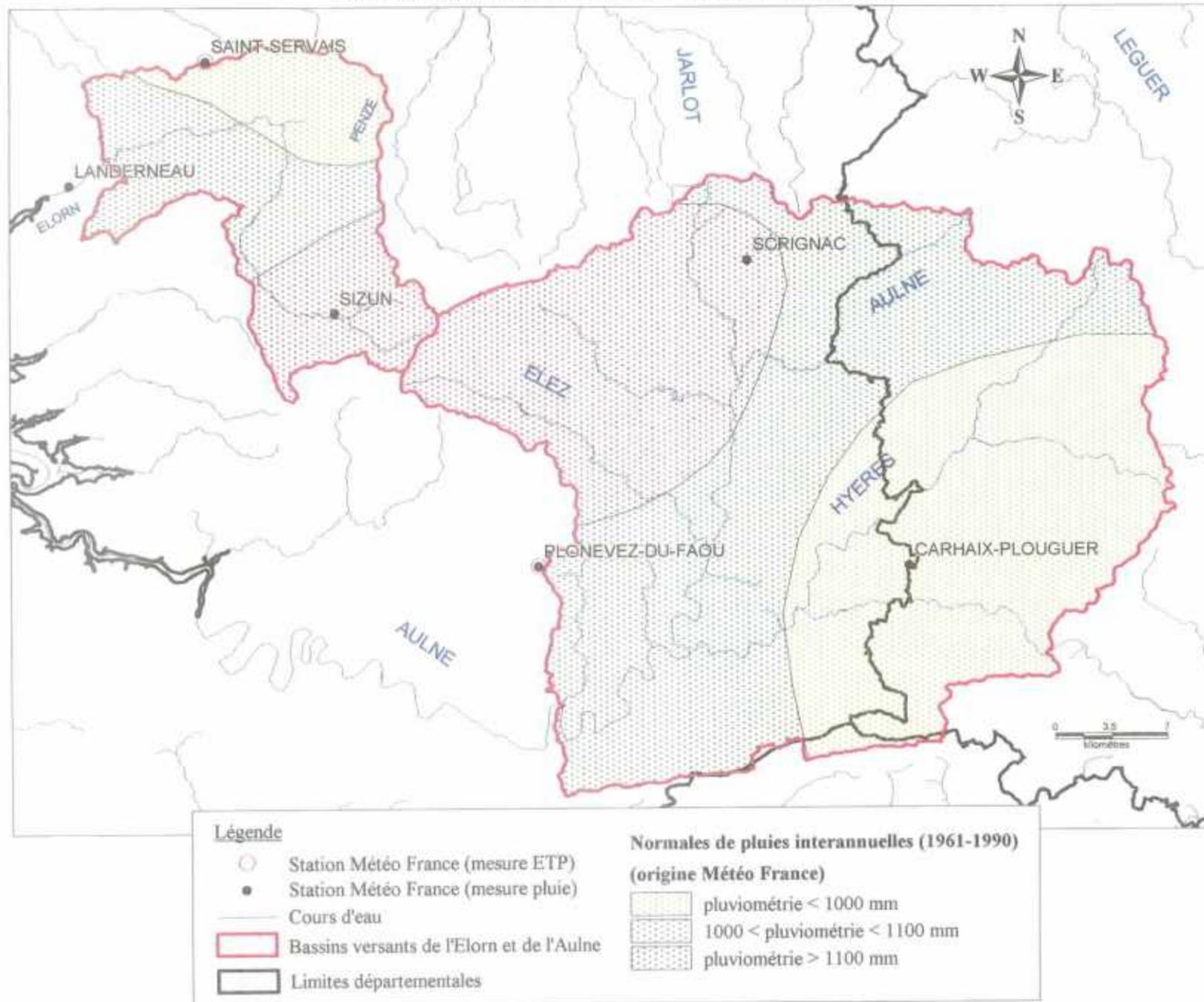


Figure 14 : Découpage des bassins versants de l'Elorn et de l'Aulne selon la carte des normales de pluies annuelles sur la période 1961-1990 (origine Météo France)

Les régressions obtenues pour les deux bassins versants sont les suivantes :

➤ bassin de l'Elorn :

$$P \text{ Elorn} = 0,4506 P \text{ Saint-Servais} + 0,3769 P \text{ Sizun} + 0,1725 P \text{ Landerneau}$$
$$ETP \text{ Elorn} = ETP \text{ St-Servais}$$

➤ bassin de l'Aulne :

$$P \text{ Aulne} = 0,3932 P \text{ Scrignac} + 0,3034 P \text{ Carhaix} + 0,3034 P \text{ Plonévez-du-Faou}$$
$$ETP \text{ Aulne} = ETP \text{ Plonévez-du-Faou}$$

3.3.3. 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 1986 se déroule du 01/09/1985 au 31/08/1986). 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 figures 15 et 16 présentent la comparaison pour les deux bassins versants.

L'adéquation entre la pluie efficace et la lame d'eau n'est pas tout à fait parfaite pour deux raisons principales :

- d'une part, le calcul de la pluie efficace utilise arbitrairement une RFU pour l'ensemble du bassin versant (100 mm pour l'Elorn et 150 mm pour l'Aulne), 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.

3.4. CALAGE DES PARAMETRES DU MODELE

3.4.1. 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.

Figure 15 : Comparaison entre pluie efficace et lame d'eau pour l'Elorn

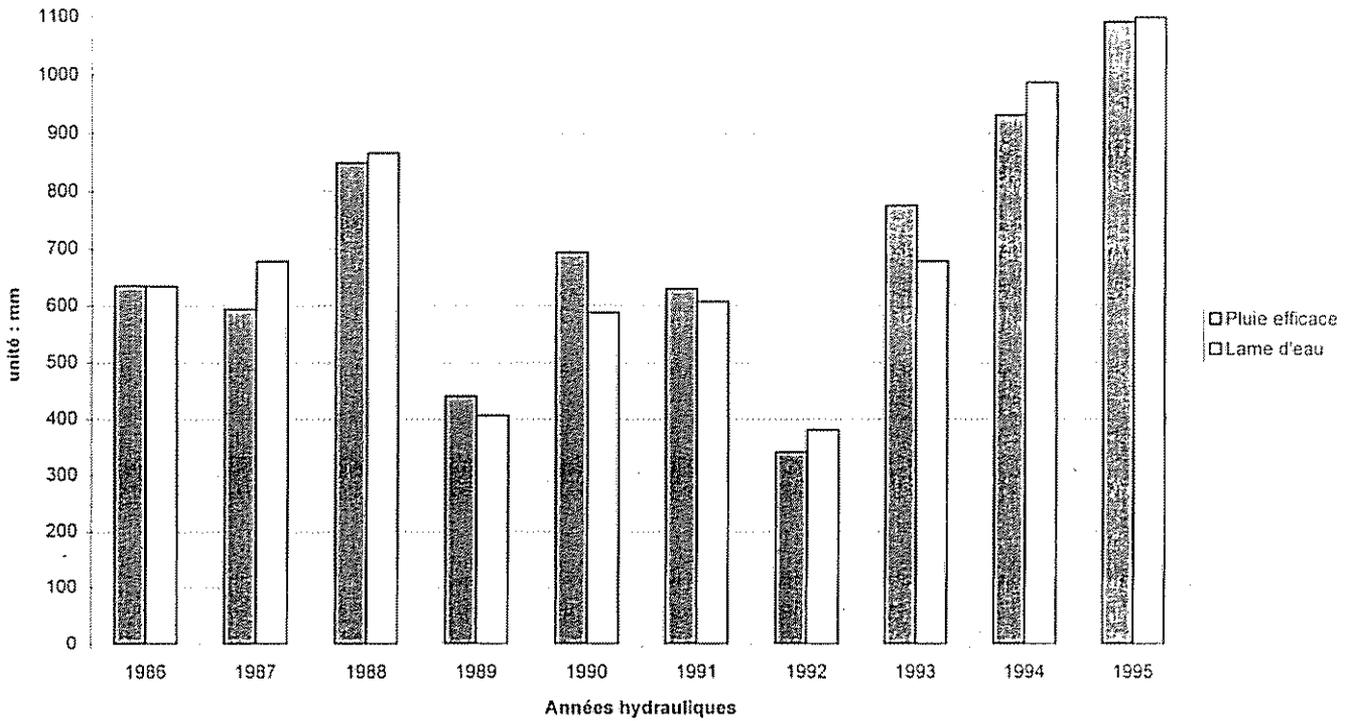
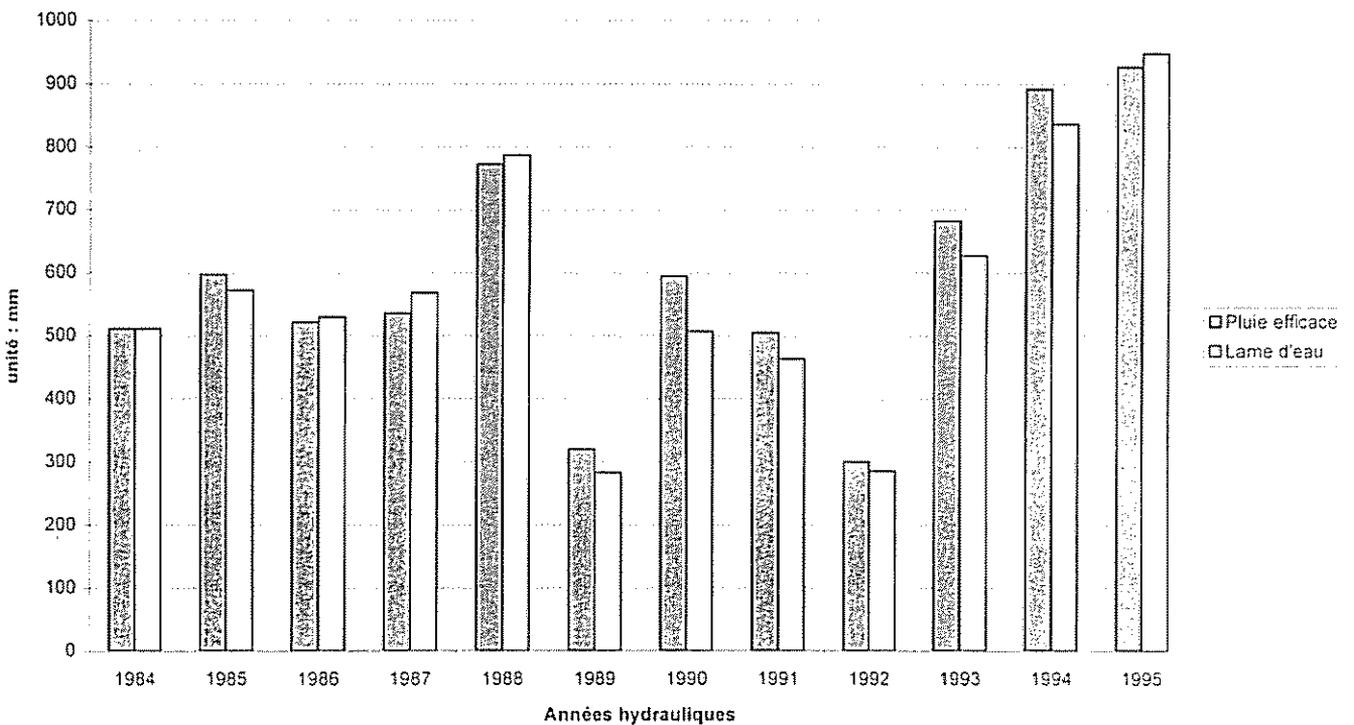


Figure 16 : Comparaison entre pluie efficace et lame d'eau pour l'Aulne



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 :

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

3.4.2. Influence des différents paramètres

Pour illustrer le rôle de chaque paramètre, des simulations ont été effectuées en faisant varier chacun à leur tour un seul des différents paramètres. Les points ci-dessous détaillent ainsi l'influence des paramètres :

- RUMAX (RFU moyenne à l'échelle du bassin) : une diminution de RUMAX entraîne une augmentation des pluies efficaces et donc une surestimation des débits souterrains,
- RUIPER (hauteur moyenne de débordement) : le rôle de ce paramètre se comprend à partir de la relation suivante :
$$\frac{Q_{rapide}}{Q_{percolation}} = \frac{h_{surface}}{RUIPER}$$
 Lorsque la hauteur d'eau à la surface est petite par rapport à RUIPER, l'essentiel de l'eau percole vers la nappe : $Q_{percolation} \geq Q_{rapide}$. Au contraire, lorsque la hauteur d'eau à la surface dépasse RUIPER, $Q_{percolation} \leq Q_{rapide}$. Une diminution du paramètre RUIPER entraîne une proportion d'eau souterraine moins importante, et un temps de décroissance du débit rapide plus court,
- TPER1 (temps caractéristique de percolation de l'eau de la surface vers la nappe) : plus on augmente ce paramètre, plus la nappe réagit lentement aux augmentations de pluie efficace. Un retard de réaction de la nappe provoque un débit d'étiage surestimé et un débit de crue sous-estimé,
- TAR1 et TAR2 (temps de demi-tarissement du réservoir profond) : si l'on augmente ce paramètre, la pente de l'hydrogramme du débit souterrain obtenu sera plus faible à l'étiage,
- TPER2 (temps de percolation de l'eau du réservoir 1 au réservoir 2) : plus on augmente ce paramètre, plus la nappe profonde réagit lentement aux augmentations des infiltrations provenant du réservoir supérieur, et plus le débit du deuxième réservoir est faible.

3.5. RESULTATS SUR LE BASSIN VERSANT DE L'ELORN

La simulation suivante a été testée : aquifère souterrain à 2 réservoirs, pas de temps journalier.

Compte-tenu de la disponibilité des données, la modélisation a été réalisée pour la période 1985-1995, après un calage des paramètres lors des années 1990 et 1991. Les ajustements susceptibles de représenter au mieux la réalité ont été obtenus en considérant les paramètres suivants :

Paramètre	RUMAX	RUIPER	TPERI	TARI	TPER2	TAR2
Unité	mm	mm	mois	mois	mois	mois
Valeur	125	50	0.5	0.55	0.5	2

Tableau 5 : Bassin de l'Elorn - Paramètres de la modélisation Gardénia

Les figures 17 et 18 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 1990-1991 et 1985-1995.

Les corrélations finales sont de 93,7 % pour la période 1990-1991 et de 92,9 % pour 1985-1995.

Pour la période considérée, les précipitations tombées sur le bassin représentent une lame d'eau moyenne de 1219 mm par an, l'évapotranspiration est de 543 mm par an en moyenne et les précipitations efficaces, solde restant disponible pour le ruissellement et/ou l'infiltration, sont en moyenne de 676 mm par an, se répartissant en 325 mm (48 %) arrivant à la rivière après un cheminement rapide (ruissellement, écoulement retardé) et 351 mm (52 %) après un cheminement lent (écoulement souterrain). La tableau ci-dessous rassemble les résultats ultimes de cette modélisation :

Pluie totale mm/an	Evapo- transpiration mm/an	Pluie efficace mm/an	Ecoulement à Plouédern				
			Rapide		Lent		Total mm/an
			mm/an	%	mm/an	%	
1210	541,5	668,5	321	48	347,5	52	668,5
			Lent réservoir 1		Lent réservoir 2		
			mm/an	%	mm/an	%	
			166	25	181,5	27	

Tableau 6 : Modélisation Gardénia - Bassin de l'Elorn - Période 1985-1995

La contribution des eaux souterraines au régime de l'Elorn s'élève donc à plus de la moitié de l'écoulement total.

Les figures 19 et 20 montrent l'influence de l'écoulement souterrain durant les années hydrauliques 1986 à 1995, 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).

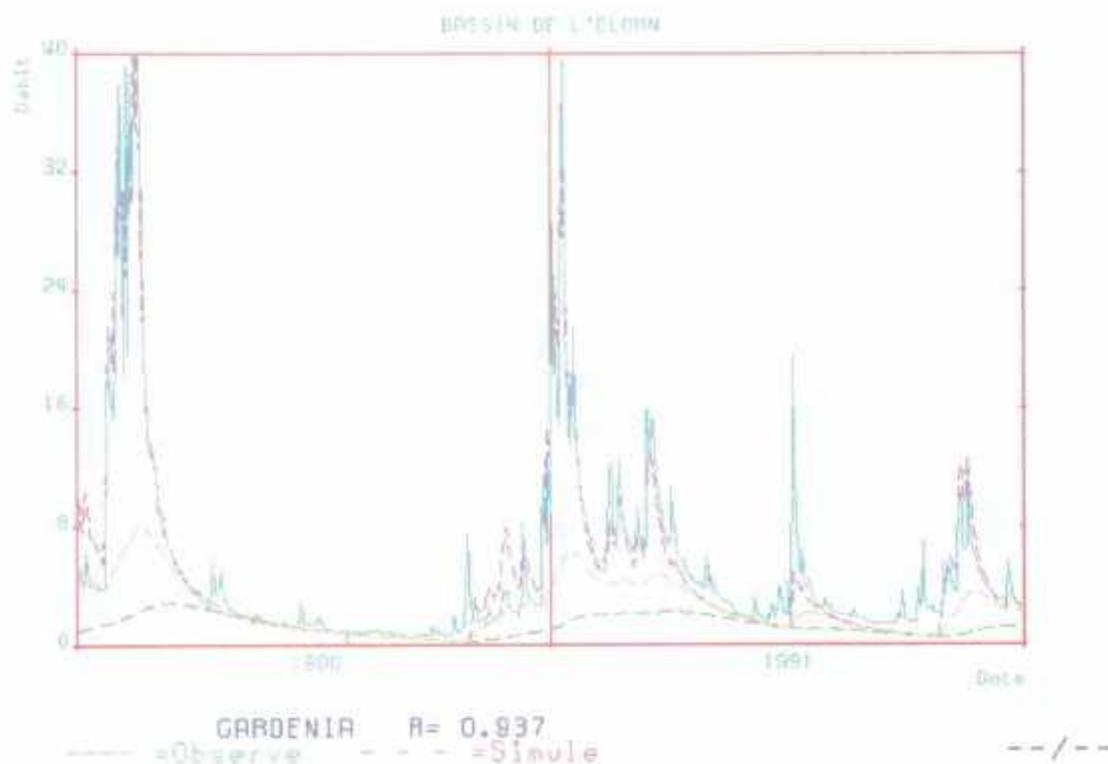


Figure 17 : Modélisation Gardénia - Bassin de l'Elorn
Calage des paramètres (1990-1991)

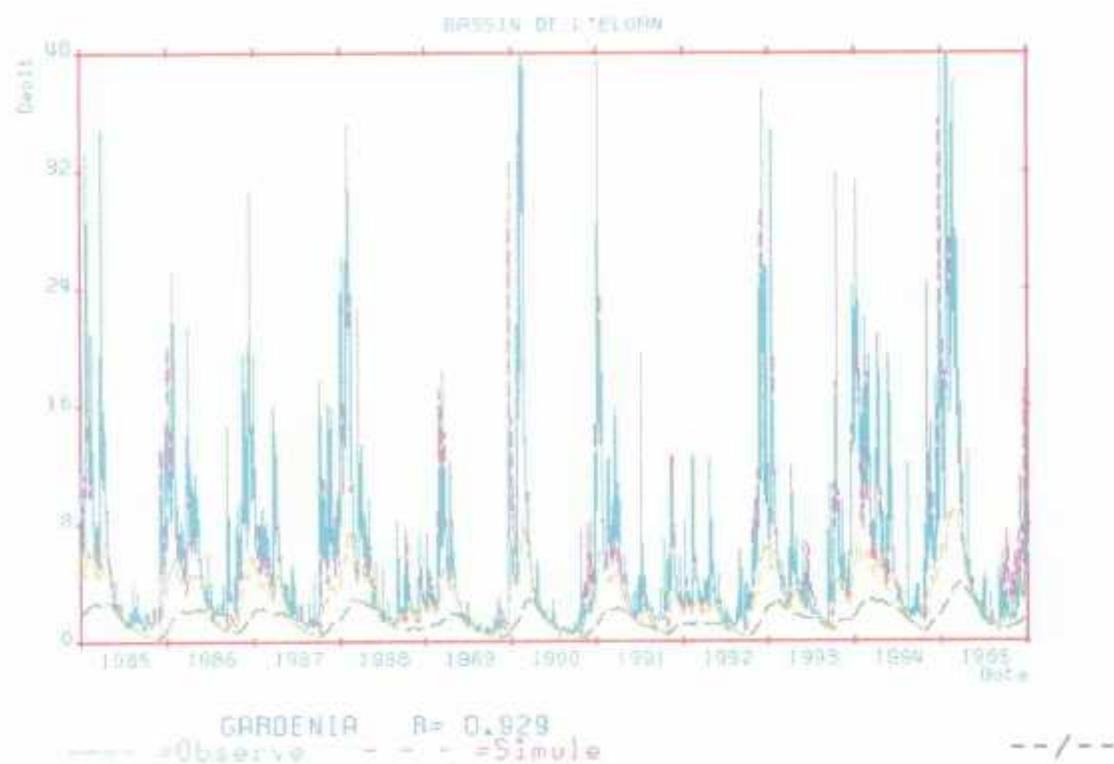


Figure 18 : Modélisation Gardénia
Débits mesurés et calculés du bassin de l'Elorn (1985-1995)

Figure 19 : Bassin de l'Elorn - Débits annuels rapides et souterrains (1986-1995)

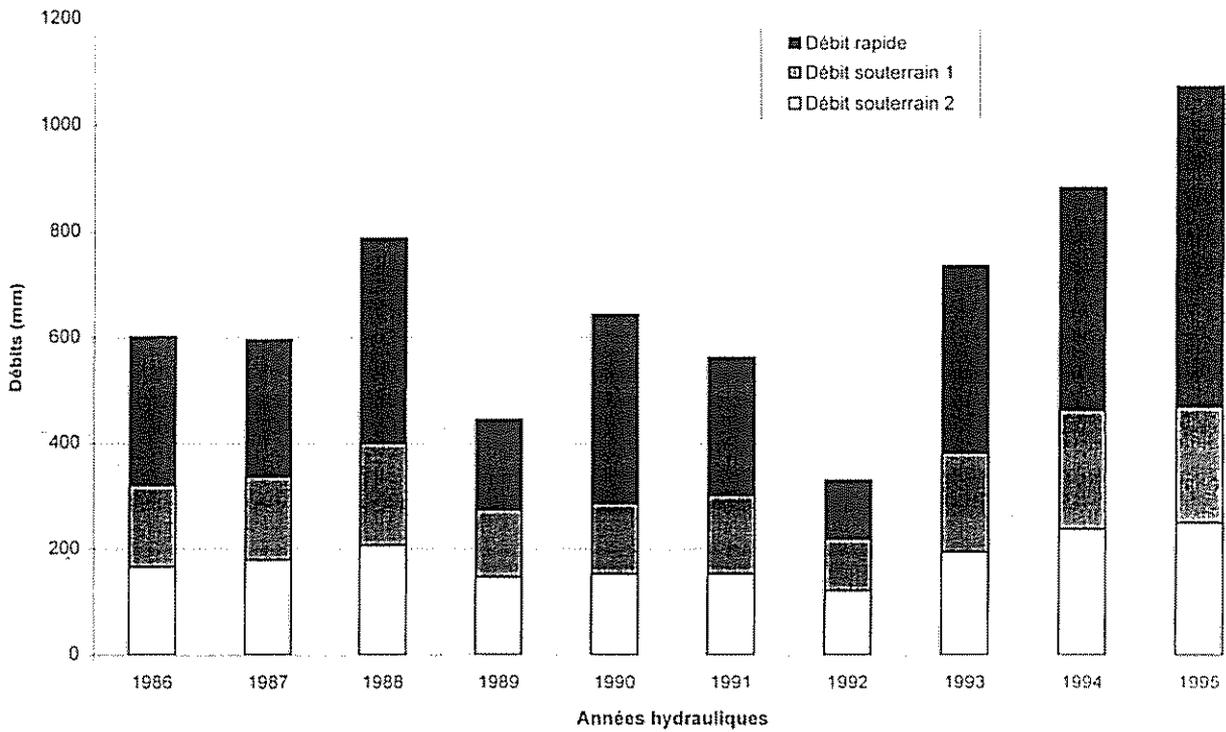
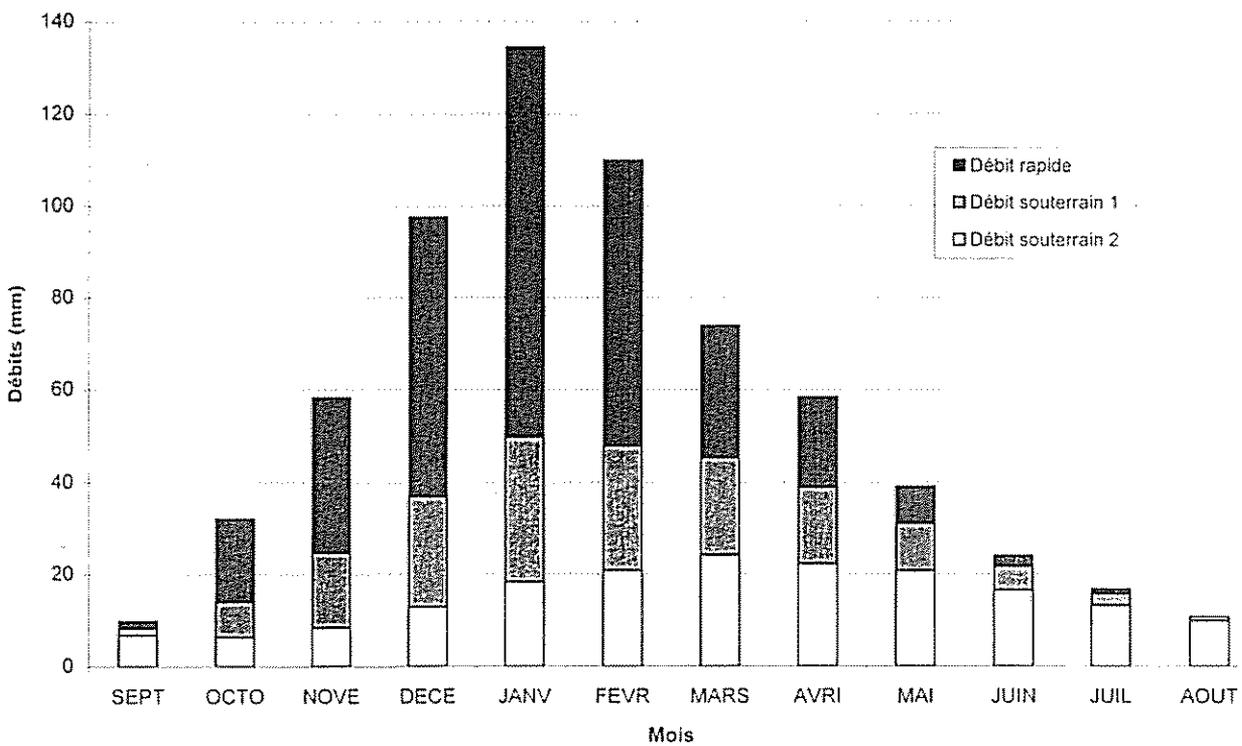


Figure 20 : Bassin de l'Elorn - Débits mensuels moyens interannuels (1986-1995)



La figure 19 détaille l'importance que prend l'écoulement souterrain lors des années sèches 1989 et 1992 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. Cette figure met également en évidence une participation équivalente (environ 26 % chacun d'après le tableau 6) des deux réservoirs souterrains à l'écoulement global mesuré à l'exutoire.

La figure 20 montre une influence prépondérante du réservoir souterrain inférieur (2), par rapport au réservoir supérieur (1), lors de la période d'étiage : du mois de mai 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 80 % de l'écoulement global) atteint même son paroxysme au mois d'août 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 vers 37 %.

3.6. RESULTATS DU BASSIN VERSANT DE L'AULNE

La simulation suivante a été testée : aquifère souterrain à 2 réservoirs, pas de temps journalier.

Compte-tenu de la disponibilité des données, la modélisation a été réalisée pour la période 1984-1995, après un calage des paramètres lors des années 1990 et 1991. Les ajustements susceptibles de représenter au mieux la réalité ont été obtenus en considérant les paramètres suivants :

Paramètre	RUMAX	RUIPER	TPER1	TAR1	TPER2	TAR2
Unité	mm	mm	mois	mois	mois	mois
Valeur	150	30	0.3	0.3	0.5	1.2

Tableau 7 : Bassin de l'Aulne - Paramètres de la modélisation Gardénia

Les figures 21 et 22 illustrent l'ajustement du débit total calculé au débit mesuré à la station hydrologique, et les débits des deux réservoirs souterrains lors des périodes 1990-1991 et 1984-1995.

Les corrélations finales sont de 91,9 % pour la période 1990-1991 et de 91,4 % pour 1984-1995.

Pour la période considérée, les précipitations tombées sur le bassin représentent une lame d'eau moyenne de 1137 mm par an, l'évapotranspiration est de 542 mm par an en moyenne et les précipitations efficaces, solde restant disponible pour le ruissellement et/ou l'infiltration, sont en moyenne de 595 mm par an, se répartissant en 298 mm (50 %) arrivant à la rivière après un cheminement rapide (ruissellement, écoulement retardé) et 297 mm (50 %) après un cheminement lent (écoulement souterrain). La tableau ci-dessous rassemble les résultats ultimes de cette modélisation :

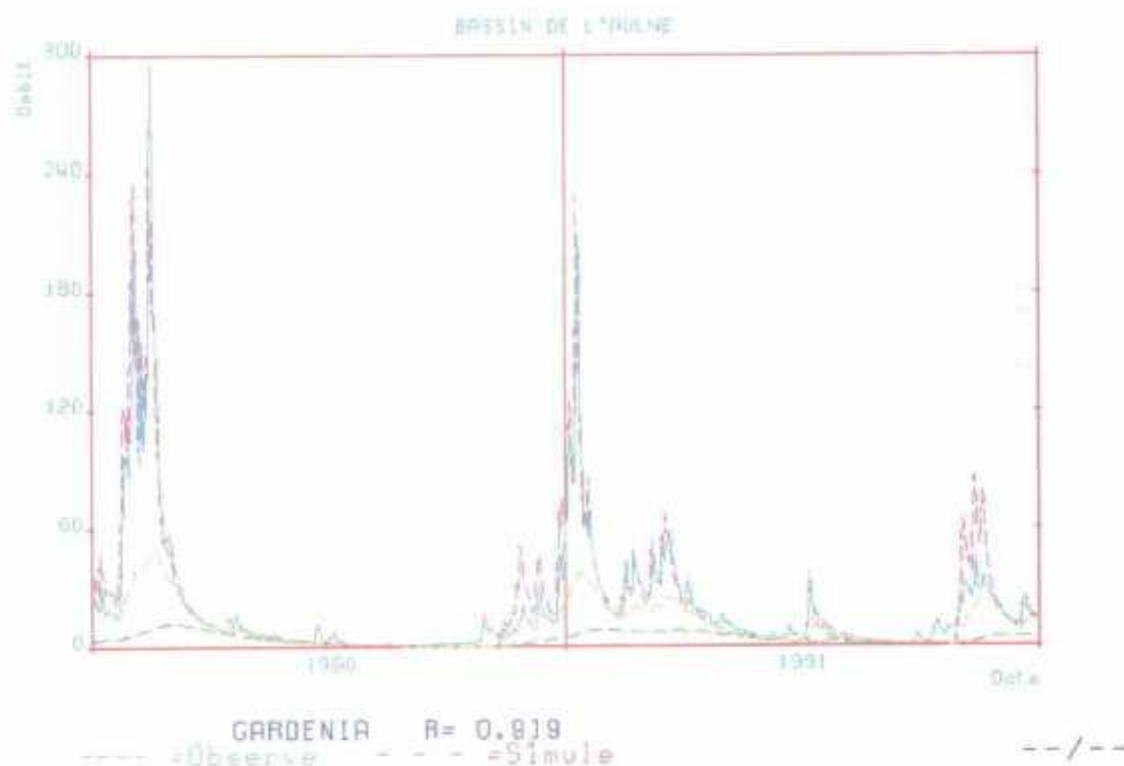


Figure 21 : Modélisation Gardénia - Bassin de l'Aulne
Calage des paramètres (1990-1991)

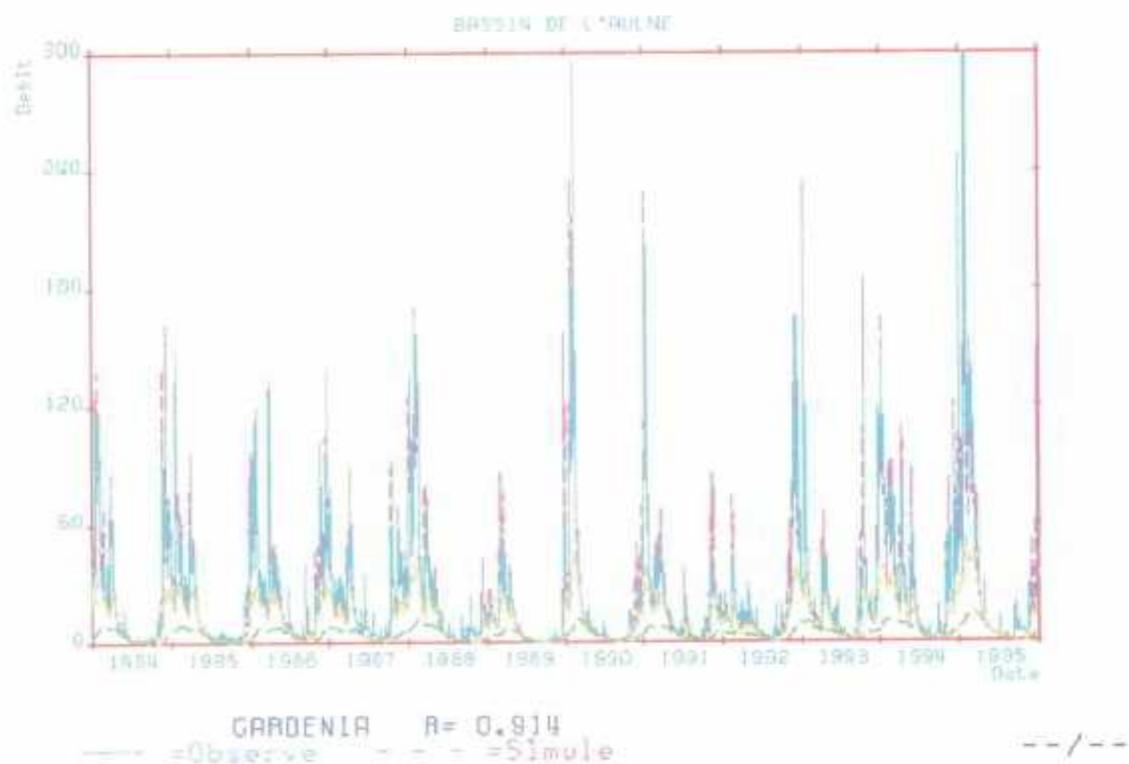


Figure 22 : Modélisation Gardénia
Débits mesurés et calculés du bassin de l'Aulne (1984-1995)

Pluie totale mm/an	Evapo- transpiration mm/an	Pluie efficace mm/an	Ecoulement à Plouédern				
			Rapide		Lent		Total mm/an
1137	542	595	mm/an	%	mm/an	%	
			298	50	297	50	
			Lent réservoir 1		Lent réservoir 2		
			mm/an	%	mm/an	%	
			184.5	31	112.5	19	

Tableau 8 : Modélisation Gardénia - Bassin de l'Aulne - Période 1984-1995

La contribution des eaux souterraines au régime de l'Aulne s'élève donc à la moitié de l'écoulement total.

Les figures 23 et 24 montrent l'influence de l'écoulement souterrain durant les années hydrauliques 1985 à 1995, et durant les mois de ces années.

La figure 23 illustre un soutien, identique à celui de l'Elorn, de la nappe de l'Aulne en période de sécheresse (années 1989 et 1992). Cette figure met également en évidence une participation plus importante du réservoir souterrain supérieur (un peu plus de 30 % d'après le tableau 8) par rapport au réservoir inférieur (moins de 20 %) à l'écoulement global mesuré à l'exutoire.

La figure 24 montre une influence prépondérante du réservoir souterrain inférieur (2), par rapport au réservoir supérieur (1), 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 80 % de l'écoulement global, du mois de mai au mois de septembre) atteint même son paroxysme au mois d'août où la totalité (100 %) de l'écoulement de la rivière provient de l'écoulement souterrain. Pendant la période de crue (octobre à janvier) ce pourcentage diminue vers 40 %.

3.7. CONCLUSION ET COMPARAISON DES BASSINS VERSANTS

Les résultats de la modélisation indiquent que la lame d'eau écoulée aux stations hydrométriques est alimentée, en moyenne, par les eaux souterraines à hauteur de 52 % pour le bassin de l'Elorn et 50 % pour celui de l'Aulne.

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 du mois d'août),
- et en année « sèche » : par exemple, pour l'année hydrologique 1992, l'Elorn est alimenté à 66 % par les apports souterrains, et l'Aulne l'est à hauteur de 60 %.

Figure 23 : Bassin de l'Aulne - Débits annuels rapides et souterrains (1985-1995)

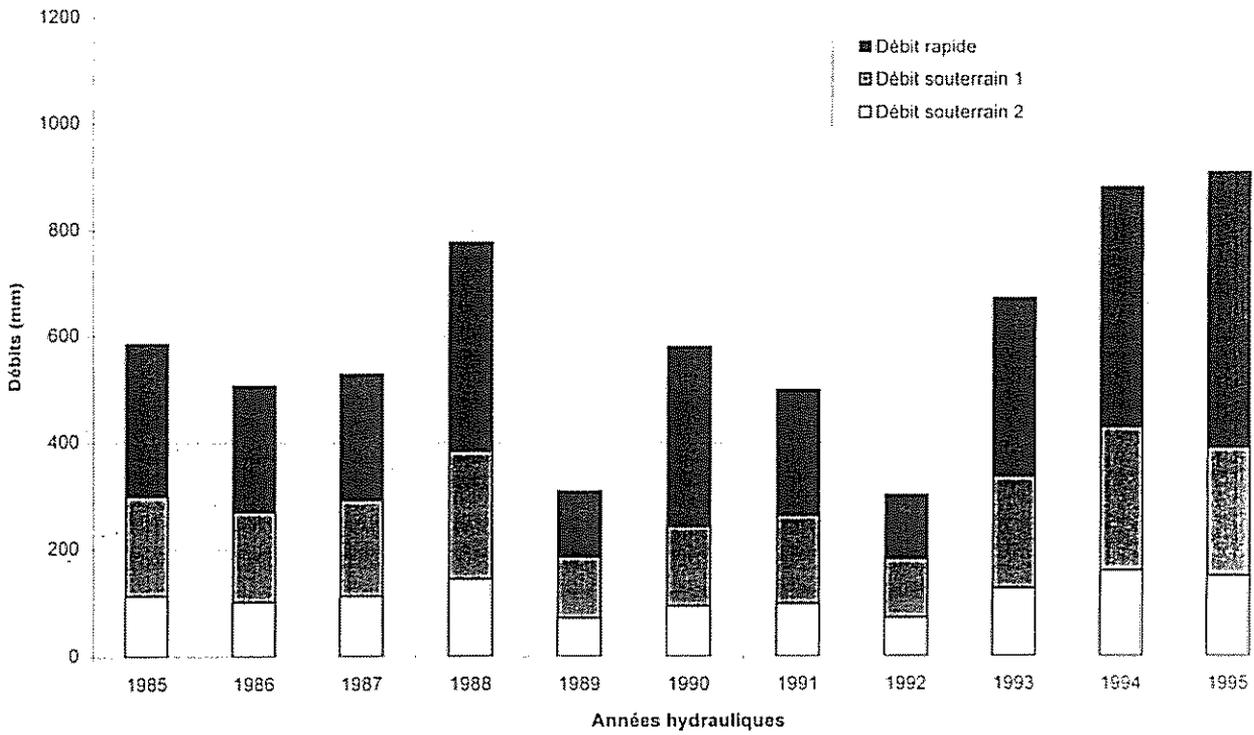
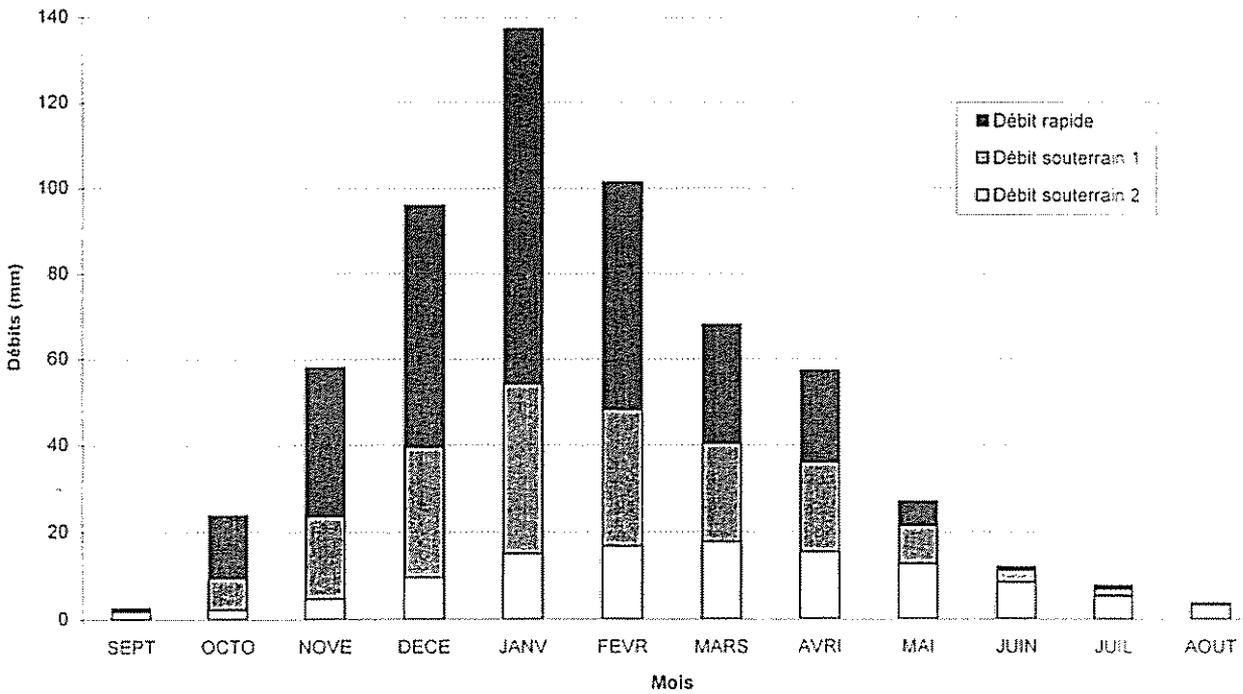


Figure 24 : Bassin de l'Aulne - Débits mensuels moyens interannuels (1985-1995)



En conséquence de l'importance des écoulements souterrains lents, il faut s'attendre à un décalage important (10 à 15 ans ?) entre la mise en œuvre effective de mesures destinées à réduire les sources de polluants solubles et l'observation de leurs effets dans les cours d'eau. Ceci rend d'autant plus nécessaire la hiérarchisation des différents secteurs des bassins versants en fonction de l'inertie probable des aquifères souterrains.

Les figures 20 et 24 expriment les débits mesurés en millimètres afin de pouvoir comparer les deux bassins versants. Ces figures mettent en évidence que l'Aulne présente des étiages moins soutenus que l'Elorn (débits en mm inférieurs de mai à octobre). Le bassin versant de l'Aulne est donc plus influencé par les phénomènes de ruissellement que celui de l'Elorn. Ceci est confirmé par le paramètre RUIPER de l'Aulne, inférieur à celui de l'Elorn (30 et 50 mm), qui favorise l'écoulement rapide donc le ruissellement.

Par ailleurs, les temps de demi-tarissement des réservoirs souterrains de l'Aulne sont moins importants que ceux de l'Elorn (0,3 et 0,55 pour le premier réservoir, 1,2 et 2 pour le second). Ceci entraîne un renouvellement plus rapide de l'eau souterraine du bassin de l'Aulne.

4. Planification du travail de phase 2

4.1. CROISEMENT DES INFORMATIONS AVEC LES ANALYSES D'EAU

L'ensemble des informations obtenues au cours de la phase 1 (présence et facilité à mobiliser l'eau souterraine, perméabilité des aquifères, participation - annuelle et mensuelle - de l'eau souterraine à l'écoulement global), sera croisé avec les résultats des analyses chimiques d'eau brute prélevée aux exutoires des deux bassins versants.

Les analyses effectuées à la prise d'eau de la CUB à Pont ar Bled (Elorn) et de Bizernic (Aulne) devront être récupérées. Les teneurs moyennes journalières (ou mensuelles) des paramètres suivants seront nécessaires pour le raisonnement : nitrates, chlorures, sulfates, MES, cations et anions majeurs, et éléments traces...

Les relations existant sur les bassins versants entre les pluies, les débits des cours d'eau, les concentrations et les flux de nitrates, les entraînements particuliers, seront approchées à partir de l'analyse fine (pas de temps journalier) et du croisement des paramètres climatiques (précipitations, évapotranspiration), hydrométriques (débits des cours d'eau) et qualitatifs (sels dissous - nitrates en priorité - et matières en suspension ou paramètre équivalent).

4.2. CARTE D'APTITUDE AU RUISSELLEMENT ET A L'INFILTRATION

Cette carte sera réalisée à partir des résultats de l'opération « comportement hydrodynamique des roches altérées de la surface sur le bassin versant de la rade de Brest » selon les zones géographiques en commun (bassin de l'Elorn et une partie de celui de l'Aulne).

Les cartes d'épaisseur des horizons aquifères (milieux altéré et fissuré) seront croisées avec la carte des iso-valeurs de débits instantanés des forages d'eau, pour chaque bassin versant, afin d'établir des cartes présentant de façon quantifiée ou semi-quantifiée l'aptitude à l'infiltration et à l'écoulement souterrain, la vulnérabilité au ruissellement des terrains rencontrés sur les deux bassins versants.

Ces documents permettront de hiérarchiser les actions à entreprendre sur le milieu physique, d'orienter les décisions d'aménagements et de création d'activités en fonction de la nature des risques de pollution, des besoins en eau et des divers contextes.

Conclusion

Ce rapport de fin de phase 1 présente un état d'avancement de l'opération « transfert des polluants par ruissellement et écoulement souterrain sur le bassin versant de la rade de Brest ».

Il détaille le travail accompli au cours de la phase 1 sur les bassins versants de l'Elorn et de l'Aulne au droit des stations de Pont ar Bled et de Pont Pol Ty Glass :

- contexte géologique des bassins,
- approche statistique et cartographie de l'intérêt des aquifères de socle,
- cartographie de la perméabilité du sous-sol,
- évaluation des débits souterrains par modélisation des hydrogrammes de rivières.

Les résultats de cette modélisation indiquent la part d'eau souterraine participant à l'écoulement global du cours d'eau : 52 % pour le bassin de l'Elorn et 50 % pour celui de l'Aulne.

Une comparaison des résultats obtenus sur les deux bassins versants permet de mettre en évidence les points suivants :

- le bassin versant de l'Aulne semble plus sensible au ruissellement : étiages moins soutenus, formations très peu conductrices (indice global < 4), zones peu perméables (infiltration lente), et paramètres de la modélisation favorisant les écoulements rapides (ruissellement),
- le bassin de l'Elorn montre un découpage :
 - amont peu conducteur (indice 4-5), peu perméable et favorable au ruissellement,
 - aval plus conducteur (indice > 8), perméable, et sensible à l'infiltration.

Ce rapport présente également le travail ultérieur prévu au cours de la phase 2 de l'opération :

- croisement des résultats obtenus (comportement des aquifères souterrains) avec les analyses d'eau (nitrates, chlorures, sulfates, MES...) mesurées aux exutoires des bassins,
- utilisation des résultats de l'opération « comportement hydrodynamique des roches altérées de la surface sur le bassin versant de la rade de Brest » : cartographie de l'épaisseur des aquifères souterrains,
- croisement des données avec les cartes de perméabilité du sous-sol,
- édition de cartes d'aptitude des terrains au ruissellement et à l'infiltration.

A l'issue de cette étude, le rapport de synthèse constituera un document d'aide aux décisions en matière de reconquête de la qualité des eaux (souterraines et superficielles) sur chacun des deux bassins versants.