

COMMISSARIAT A L'ÉNERGIE ATOMIQUE
AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

31-33, Rue de la Fédération - 75015 PARIS

stockage de déchets radioactifs en formations géologiques

CONFIRMATION DES CARACTÉRISTIQUES FAVORABLES

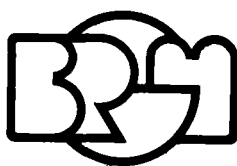
— 1^{ère} phase, 1^{ère} partie —

RÉGION DE CHEMILLÉ
HYDROGÉOLOGIE GÉNÉRALE

par

S. COTTEZ, H. ÉTIENNE, C. FILIPI, J.J. SEGUIN

avec la collaboration de G. BROSSIER



BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Mission stockages
B.P. 6009
45060 Orléans Cedex
Tél. (38) 63.80.01

Service géologique régional Pays-de-la-Loire
10, rue Henri Picherit
44300 Nantes
Tél. (40) 29.36.00

Département eau
B.P. 6009
45060 Orléans Cedex
Tél. (38) 63.80.01

Rapport du B.R.G.M.

83 SGN 868 STO

Février 1984

A V E R T I S S E M E N T

L'Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs a chargé le Bureau de Recherches Géologiques et Minières de l'inventaire et de la sélection technique des sites de stockage de déchets radioactifs en formations géologiques profondes.

La première étape des études a consisté en l'inventaire, sur documents, des formations favorables en vue de la présélection des sites (1982).

L'objet de la deuxième étape est de confirmer les caractères favorables des régions présélectionnées. Cette confirmation est réalisée en deux phases successives :

- La première, qui est composée de plusieurs parties, comprend les études détaillées des données disponibles et leur vérification in situ par des techniques légères appropriées. En première partie une étude géophysique ("Etude gravimétrique du massif granitique de Chemillé, avec compléments électriques" : rapport BRGM 83 SGN 396 GPH) et une étude par télédétection ("Etude du granite de Chemillé par télédétection" : rapport BRGM 83 SGN 406 GE0) ont été réalisées.

- à la deuxième phase correspondra la reconnaissance des caractéristiques en profondeur par des travaux lourds.

La présente étude a été effectuée dans le cadre des travaux de confirmation de la première phase, 1ère partie (complément) et 2ème partie (année 1983) sur le site de Chemillé ; ils comprennent :

- une étude hydrogéologique (présent rapport),
- une étude géologique et la synthèse des résultats (83 SGN 745 GE0),
- une étude géophysique comprenant la modélisation globale et l'interprétation synthétique de la gravimétrie et de l'électrique (rapport BRGM 83 SGN 676 GPH).

R É S U M É

Dans le cadre des études préliminaires de confirmation des caractéristiques favorables de sites de stockage en formation géologique, le BRGM a réalisé pour le compte de l'Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs, l'étude hydrogéologique des aquifères superficiels des formations métamorphiques de la région de Chemillé-Craon.

A partir de mesures in situ des paramètres physico-chimiques des eaux superficielles et souterraines, des cartes de températures et de conductivité des eaux souterraines et de température des eaux de surface ont été réalisées. Aucune anomalie fiable à des circulations profondes au droit des axes tectoniques majeurs préalablement reconnus n'a pu être identifiée. En utilisant les données de jaugeage disponibles relatives à la rivière Hyrôme, une modélisation hydrologique a permis d'attribuer à l'infiltration profonde une valeur annuelle moyenne de 70 mm soit environ 50 % des précipitations efficaces moyennes annuelles.

Le modèle a calculé par ailleurs un temps de réponse de la nappe aux précipitations en période de recharge qui est de l'ordre de 0,5 mois, ce qui est très rapide, mais aussi un temps de restitution au réseau de drainage de l'ordre de 2 mois pour la moitié de la lame d'eau infiltrée. Ainsi les réserves accumulées pendant la période annuelle de recharge seraient restituées à l'étiage suivant.

Ces valeurs sont caractéristiques d'une nappe phréatique proche du sol dans un aquifère de faible épaisseur et peu capacitif. Cette conclusion confirme l'étude hydrochimique qui montre d'une part l'identité des eaux superficielles et souterraines sur le plan du faciès chimique et d'autre part l'absence de tout indice de stratification des eaux dans l'aquifère bien que de nombreux forages dépassent 30 m de profondeur.

Le débit de ces forages est globalement très faible, de l'ordre de 10 à quelques dizaines de m^3/j et aucune alimentation en eau publique n'est assurée par le captage d'eaux souterraines.

Plusieurs sondages de reconnaissance minière ont été réalisés dans cette zone ou à proximité, mais ils ne nous ont pas fourni d'information sur les venues d'eau éventuellement recoupées et leur profondeur.

S O M M A I R E

	pages
<u>I - INTRODUCTION</u>	1
<u>II - CONSISTANCE DES TRAVAUX ET ÉTUDES RÉALISÉES</u> <u>EN 1983</u>	2
<u>III - RÉSULTATS DES CAMPAGNES DE MESURE SUR LE</u> <u>TERRAIN</u>	8
1. PIEZOMETRIE	8
2. TEMPERATURE DES EAUX SOUTERRAINES	9
3. CONDUCTIVITES ELECTRIQUES	9
4. COMPARAISON ENTRE LES TEMPERATURES DES EAUX DE SURFACE ET SOUTERRAINES	10
5. CONCLUSIONS	12
<u>IV - ÉTUDE HYDROCHIMIQUE</u>	14
1. TRAITEMENT STATISTIQUE	15
2. DIAGRAMME DE PIPER	23
3. CAS DE L'ARSENIC	26
4. CONCLUSIONS	30
<u>V - MODÉLISATION DES DÉBITS DE L'HYRÔME À CHANZAUX</u>	31
1. OBJECTIFS ET METHODE DE LA MODELISATION	31
2. PRINCIPE DU MODELE GARDENIA	31
3. DONNEES HYDROLOGIQUES DISPONIBLES	31
4. MODELISATION DES DEBITS DE L'HYROME	38
5. CONCLUSIONS	42
<u>VI - CONCLUSIONS GÉNÉRALES</u>	44

FIGURES DANS LE TEXTE

- 1 - Carte de situation des points de prélèvement des eaux analysées.
- 2 - Corrélation HCO_3/Ca .
- 3 - Corrélation Mg/Ca .
- 4 - Cercle des corrélations.
- 5 - Projection de l'ensemble des analyses dans le plan des deux premiers axes principaux.
- 6 - Diagramme de Piper (position des échantillons selon leur origine).
- 7 - Diagramme de Piper (par N° d'échantillon).
- 8 - Carte de situation des anomalies hydrochimiques en arsenic.
- 9 - Schéma de principe du modèle "GARDENIA".
- 10 - Pluies mensuelles à Chemillé 1967-1979.
- 11 - Débits moyens mensuels de l'Hyrôme à Chanzaux (1967-1979).
- 12 - Calage du modèle mensuel.
- 13 - Calage du modèle pentadaire.

T A B L E A U X

- 1 - Tableau récapitulatif des caractéristiques topographiques des points d'eau inventoriés (puits et forages).
- 2 - Tableau récapitulatif des caractéristiques principales des points d'eau inventoriés (puits et forages).
- 3 - Inventaire et situation des points de mesure sur les eaux de surface.
- 4 - Analyse de variance : eaux de surface.
- 5 - Analyse de variance : eaux de forages.
- 6 - Matrice de corrélation : eaux de surface.
- 7 - Matrice de corrélation : eaux de nappe.
- 8 - Analyse factorielle en composantes principales.
- 9 - Pluies mensuelles - Evapotranspiration potentielle à Angers (1967-1979).
- 10 - Statistiques sur les débits moyens mensuels observés et calculés.
- 11 - Répartition par année des écoulements en écoulements rapides et lents (modèle mensuel).
- 12 - Statistiques sur les débits moyens pentadaires observés et calculés.
- 13 - Répartition par année des écoulements en écoulements lents et rapides (modèle pentadaire).

ANNEXES HORS TEXTE

- 1 - Carte de situation des points d'eau 1/25 000.
- 2 - Carte piézométrique 1/25 000.
- 3 - Carte des températures des eaux souterraines.
- 4 - Carte des conductivités des eaux souterraines 1/25 000.
- 5 - Carte des températures des eaux de surface 1/25 000.

ANNEXE DANS LE TEXTE

- 6 - Hydrochimie.
 - 6.1. Liste des points et résultats d'analyses.
 - 6.2. Techniques d'interprétation.

I - INTRODUCTION

La présente étude hydrogéologique entre dans le cadre des études de confirmation des caractéristiques favorables des sites de déchets radioactifs en formations géologiques profondes, confiées au BRGM par l'Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs.

La région étudiée autour de Chemillé (Maine-et-Loire) couvre une superficie d'environ 200 km². Il s'agit d'un contexte géologique de type "granite sous schiste".

En l'absence de sondages de reconnaissance, la présente étude hydrogéologique a utilisé un certain nombre de puits et forages existants dont on a fait l'inventaire pour y effectuer d'une part des mesures in situ des paramètres physiques des eaux (température et conductivité électrique) et d'autre part des prélèvements pour analyse chimique. L'étude a comporté en outre une campagne de mesures de température et de conductivité des eaux de surface. Enfin, une modélisation hydrologique des débits de l'Hyrôme à Chanzaux a été réalisée pour déterminer l'alimentation moyenne annuelle des aquifères superficiels drainés par le bassin de l'Hyrôme.

II - CONSISTANCE DES TRAVAUX ET ÉTUDES RÉALISÉES EN 1983

L'inventaire concerne les puits, sources et forages existants. Sachant qu'il existe au moins un puits dans chaque lieudit, le nombre de puits à inventorier était trop important pour obtenir un état exhaustif des puits existants. En conséquence la maille choisie semblant suffisamment représentative à l'échelle du 1/50 000 (échelle retenue pour présenter les résultats) est de 3 km de côté environ. A partir de ce maillage, il a été possible de choisir un puits pour chaque écart proche d'un noeud de la maille. Cette méthode présente l'avantage de fournir un échantillonnage régulier ne privilégiant pas une zone au détriment d'une autre.

En ce qui concerne plus spécialement les forages, les documents archivés au BRGM ont été complétés par des enquêtes sur le terrain ainsi qu'auprès des entreprises de forage et des propriétaires des ouvrages. Lorsque cela était possible, on a choisi un forage de préférence à un puits.

41 points d'eau dont 12 forages ont été ainsi recensés. Tous les renseignements les concernant ont été réunis dans deux tableaux, l'un fournissant les données topographiques, l'autre les mesures exécutées. Chaque point d'eau a été identifié par un numéro (indice de classement national) conformément aux règles en vigueur au B.R.G.M.

Les relevés se sont échelonnés du 4 au 10 août 1983 avec des vérifications et contrôles (en particulier pour les températures et les conductivités) le 30 août 1983.

Pour chaque point les données suivantes ont été recueillies :

- identification :
 - . indice de classement national
 - . lieudit, commune
 - . coordonnées Lambert } calculées à partir des cartes
 - . altitude du sol } I.G.N. au 1/25 000
- type du point d'eau
- choix du repère avec description et hauteur par rapport au sol
- mesure de la profondeur totale par rapport au sol
matériel utilisé : profondimètre Seba
- mesure du niveau piézométrique pour le calcul de l'altitude des équipotentielles
matériel utilisé : sonde électrique Ott KLT 100
- mesure de la température en deux points de la tranche d'eau (à 0,1°C près)
matériel utilisé : sonde électrique Ott KLT 100
- mesure de la conductivité: en général dans le puits, parfois au robinet de distribution (exprimée en μ S/cm à 20°C)
matériel utilisé : conductivimètre WTW Aquadata LF 90
- observations diverses (proximité d'une mare, dépôt de fumier, etc.)

En septembre une campagne de mesures concernant les eaux de surface a été entreprise sur soixante points (3 points se rapportent à des puits ou forage). Le but consistait à rechercher les émergences de nappe dans des thalwegs (les sources à proprement parler n'existent pas). Les informations recueillies sont les suivantes :

- mesures de pH et de conductivité (sur certains points seulement)
- mesures de la température (en général de nombreuses mesures ont été effectuées pour chaque point ; la valeur retenue est une moyenne)
- mesures de débit (estimations) lorsque cela était possible (ces mesures sont exécutées le plus près possible de l'émergence).

Par ailleurs un certain nombre de prélèvements ont été exécutés pour diverses analyses (chimie, isotopes, traces, etc.) qui font l'objet d'une note complémentaire.

Enfin deux campagnes de prélèvements ont eu lieu dans les puits et les forages recensés : la première le 25 novembre 1983 dans douze points d'eau, la seconde le 20 janvier 1984 dans neuf points d'eau. La première série de prélèvements a été orientée selon une direction NE-SW passant par Chemillé et recoupant la plupart des formations tandis que la seconde série complétait les valeurs obtenues en utilisant les ouvrages les plus profonds (forages essentiellement).

Les analyses chimiques de type I ont été exécutées par le Laboratoire départemental d'hygiène de Loire-Atlantique à Nantes et comportent les paramètres suivants :

- turbidité, pH, conductivité, oxygène dissous
- extraits sec à 110° et 550°
- matières organiques (demande en oxygène)
- dureté totale, TA, TAC
- NH₄, NO₂, NO₃, Cl, SO₄, PO₄, CO₃, HCO₃, SiO₃
- Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Al, As.

L'arsenic a été dosé car des analyses géochimiques pour la recherche minière ont mis en évidence des teneurs relativement élevées, apparemment en relation avec l'existence du granite en profondeur.

Il y a lieu de noter que les concordances entre les conductivités mesurées sur le terrain lors de l'inventaire et celles des analyses chimiques sont satisfaisantes : rapport compris entre 0,75 et 0,95 pour 14 cas sur 18.

TABEAU 1

Secteur : CHEMILLE

**TABEAU RECAPITULATIF DES
CARACTERISTIQUES TOPOGRAPHIQUES DES POINTS D'EAU INVENTORIES**

INDICE DE CLASSEMENT NATIONAL	COORDONNEES LAMBERT		ALTITUDE NGF DU SOL (m)	NATURE DE L'OUVRAGE	COMMUNE		LIEU-DIT	RENOI
	X	Y			Nom	Code INSEE		
483-6-1	352.660	251.460	108,50	F	Beaupréau	023	Le Bois de Longueduc	1
483-7-1	354.980	252.720	93,50	F	La Poitevinière	243	La Billauderie	
483-7-3	358.980	248.890	87,50	F	Jallais	162	La Varanne	
483-7-5	360.750	251.625	104,50	P	Jallais	162	La Petite Blanchardière	
483-7-6	358.085	252.925	105,50	P	La Poitevinière	243	La Roche Cantin	
483-7-7	355.875	250.150	94,00	P	Jallais	162	L'Ortonnière	
483-7-8	354.725	247.285	101,00	P	La Jubaudière	165	Le Mesnil	
483-7-9	358.265	246.900	103,50	P	Jallais	162	Le Grand Bois Chauvigné	
483-7-10	359.940	245.045	100,00	P	Jallais	162	Les Noues	
483-7-11	360.030	245.170	85,00	F	Jallais	162	Les Noues	
483-8-1	365.440	247.270	90,00	F	Saint-Georges-des-Gardes	281	Le Cormier	
483-8-2	366.350	253.140	100,00	F	Chemillé	092	La Verdonnière	
483-8-3	365.970	249.570	96,50	P	Chemillé	092	La Vrillière	
483-8-4	362.750	250.150	101,00	P	La Chapelle-Rousselin	074	Le Petit Aulnay	
483-8-5	363.050	247.125	120,30	P	Saint-Georges-des-Gardes	281	La Drouitière	
483-8-6	363.465	252.925	105,00	P	Chemillé	092	La Rousselière	
483-8-7	366.800	251.900	83,50	P	Chemillé	092	La Mitaudière	
483-8-8	364.650	246.650	101,00	P	Saint-Georges-des-Gardes	281	La Pierre Blanche	
483-8-9	364.260	247.030	107,50	P	Saint-Georges-des-Gardes	281	La Borde	
484-1-5	369.350	255.530	97,00	F	Chemillé	092	Le Plessis	2
484-5-1	369.220	250.480	101,00	F	Chemillé	092	La Croix Renaudeau	
484-5-4	371.190	252.375	84,25	F	Chemillé	092	La Brohonnière	
484-5-5	372.120	247.030	104,50	P	Cossé-d'Anjou	111	La Grande Louettière	
484-5-6	368.565	247.585	116,00	P	Melay	199	Les Brosses	
484-5-7	368.750	252.140	64,00	P	Chemillé	092	La Basse Roche	
484-5-8	372.525	249.830	95,75	P	Valanjou	153	La Cotonnerie	
484-5-9	372.475	252.425	81,50	P	Valanjou	153	La Grande Tinaudière	
484-5-10	369.125	250.600	101,25	P	Chemillé	092	La Croix Renaudeau	
484-5-11	372.325	247.260	102,50	P	Cossé-d'Anjou	111	La Flèche	
484-5-12	372.700	249.700	95,50	P	Valanjou	153	La Guignardière	
484-5-13	368.650	251.450	86,50	P	Chemillé	092	L'Ormeau (La Combrion)	
484-5-14	368.675	251.700	87,50	P	Chemillé	092	L'Ormeau (La Combrion)	
484-5-15	371.100	252.390	83,50	F	Chemillé	092	La Brohonnière	
510-3-7	354.685	244.250	116,00	P	Le May-sur-Evre	193	La Jarrie	3
510-3-8	358.675	243.740	120,00	P	Le May-sur-Evre	193	Le Désert	
510-4-3	362.340	240.740	129,00	F	Trémentines	355	Les Croix Blanches	
510-4-5	365.300	243.300	165,00	F	Saint-Georges-des-Gardes	281	Maison de Retraite	
510-4-6	365.900	244.040	135,50	P	Saint-Georges-des-Gardes	281	La Picoulière	
510-4-7	363.325	244.150	137,50	P	Saint-Georges-des-Gardes	281	La Roche	
511-1-1	369.290	243.295	184,50	P	La Tourlandry	351	L'Ampintière	
511-1-2	371.700	243.000	203,00	P	La Tourlandry	351	La Vollerie	

* F = forage / P = puits

- 1) hors des limites de l'étude proprement dite / à l'ouest de la Poitevinière
- 2) " " " " " " / au nord de Chemillé
- 3) " " " " " " / au NW de Trémentines

TABLEAU 2
TABLEAU RECAPITULATIF DES
CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES POINTS D'EAU INVENTORIES

Secteur : CHEMILLE

Indice de classement national	Altitude du sol (m)	Niveau piézométrique par rapport au sol (m)	Altitude du niveau piézométrique (m)	Date des relevés (1983)	Profondeur totale par rapport au sol (m)	Hauteur d'eau (m)	Analyse chimique complète	Température de l'eau (°C)				Conductivité à 20° C (µ S/cm)
								Surface S	Fond F	Différence entre S et F		
										négative -	positive +	
483-6-1 **	108,50	7,60	100,90	4-8	F 76,00	68,40	oui/II	12,3	-	--	-	129
483-7-1	93,50	2,85	90,65	4-8	F 34,00	31,15	oui/II	14,0	12,3	1,7	-	-
483-7-3	87,50	3,25	84,25	4-8	F 37,00	33,75	oui/II	12,6	-	-	-	440
483-7-5	104,50	9,00	95,50	9-8	P 15,20	6,20	-	12,6	12,6	0	0	455
483-7-6	105,50	13,85	91,65	9-8	P 30,00	~16,00	-	12,7	12,5	0,2	-	452
483-7-7	94,00	2,10	91,90	9-8	P 6,50	4,40	-	15,1	12,3	2,8	-	698
483-7-8	101,00	2,70	98,30	9-8	P 11,95	9,25	-	16,5	12,6	3,9	-	665
483-7-9 **	103,50	12,55	90,95	9-8	P 13,95	1,40	oui/I	13,3	13,3	0	0	1045
483-7-10 **	100,00	10,30	89,70	9-8	P 14,20	3,90	-	13,9	13,9	0	0	546
483-7-11 **	85,00	-	-	9-8	F 55,00	-	oui/I	-	-	-	-	-
483-8-1	90,00	0,95	89,05	10-8	F 39,00	38,05	-	14,7	12,9	1,8	-	-
483-8-2	100,00	4,25	95,75	10-8	F 40,00	35,75	oui/II	13,0	12,3	0,7	-	540
483-8-3	96,50	6,10	90,40	8-8	P 9,70	3,60	oui/I	12,7	12,5	0,2	-	532
483-8-4	101,00	1,75	99,25	8-8	P 4,05	2,30	-	15,8	14,2	1,6	-	584
483-8-5	120,30	2,95	117,35	8-8	P 6,15	3,20	oui/I	14,6	13,1	1,5	-	583
483-8-6	105,00	6,55	98,45	8-8	P 10,50	3,95	-	12,6	12,5	0,1	-	319
483-8-7	83,50	2,20	81,30	8-8	P 7,65	5,45	-	13,7	12,4	1,3	-	412
483-8-8	101,00	0,20	100,80	30-8	P 2,50	2,30	-	12,8	12,3	0,5	-	205
483-8-9	107,50	-	-	30-8	P -	-	oui/I	-	-	-	-	402
484-1-5	97,00	-	-	4-8	F 34,00	-	oui/II	-	-	-	-	525
484-5-1	101,00	2,00	99,00	4-8	F 39,00	37,00	oui/II	16,0	12,4	3,6	-	-
484-5-4 **	84,25	2,65	81,60	10-8	F 39,00	36,35	oui/II	13,0	12,7	0,3	-	1345
484-5-5 **	104,50	2,80	101,70	8-8	P 6,20	3,40	oui/I	14,3	13,7	0,6	-	642
484-5-6 **	116,00	17,40	98,60	8-8	P 21,00	3,60	oui/I	12,1	12,0	0,1	-	955
484-5-7	64,00	0,70	63,30	8-8	P 3,10	2,40	-	16,4	15,0	1,4	-	443
484-5-8 **	95,75	4,25	91,50	8-8	P 8,90	4,65	-	13,3	12,0	1,3	-	1310
484-5-9	81,50	1,65	79,85	9-8	P 15,30	13,65	oui/I	16,7	12,3	4,4	-	281
484-5-10	101,25	3,15	98,10	4-8	P 14,05	10,90	-	14,3	13,2	1,1	-	515
484-5-11	102,50	4,70	97,80	30-8	P 8,95	4,25	-	13,2	12,7	0,5	-	601
484-5-12	95,50	2,10	93,40	30-8	P 9,90	7,80	oui/I	14,1	11,5	2,6	-	593
484-5-13	86,50	1,95	84,55	30-8	P 8,80	6,85	oui/I	16,6	12,4	4,2	-	534
484-5-14	87,50	3,35	84,15	30-8	P 10,00	6,65	-	14,4	12,3	2,1	-	606
484-5-15	83,50	-	-	30-8	F 40,00	-	oui/I	-	-	-	-	1010
510-3-7	116,00	6,70	109,30	9-8	P 9,80	3,10	oui/I	12,9	12,7	0,2	-	668
510-3-8	120,00	3,30	116,70	9-8	P 6,20	2,90	-	13,4	12,6	0,8	-	570
510-4-3	129,00	4,90	124,10	5-8	F 41,00	36,60	oui/II	12,5	-	-	-	387
510-4-5	165,00	-	-	4-8	F 40,00 ?	-	oui/II	-	-	-	-	-
510-4-6	135,50	5,00	130,50	5-8	P 11,00	6,00	-	12,3	11,4	0,9	-	365
510-4-7	137,50	7,70	129,80	5-8	P 9,20	1,50	-	12,5	12,5	0	0	421
511-1-1	184,50	2,95	181,55	5-8	P 9,40	6,45	-	16,4	11,6	4,8	-	356
511-1-2	203,00	3,30	199,70	5-8	P 12,00	8,70	-	13,7	11,6	2,1	-	535

- F = forage / P = puits I = première série d'analyses le 25.11.83 II = deuxième série d'analyses le 20.01.84

** VALEURS COMPLEMENTAIRES

483-6-1 conductivité mesurée le 30-8 = 138

483-7-9 conductivité mesurée le 12-9 = 996

483-7-10 nouvelles mesures le 30-8 : N.P. = 9,90 / Z du N.P. : 91,10 / H.E. = 4,30 / Températures S = 14,2 F = 13,5 Δ = 0,7 / conductivité = 589

483-7-11 conductivité mesurée le 30-8 = 570

484-5-4 Conductivité mesurée le 30-8 = 1280

484-5-5 nouvelles mesures le 30-8 : Températures S = 15,2 F = 13,0 Δ = 2,2

484-5-6 nouvelles mesures le 30-8 : N.P. = 17,30 / Z du N.P. = 98,70 / H.E. = 3,70 / Température F = 12,2 / Conductivité = 782

484-5-8 conductivité mesurée le 30-8 = 696

III - RÉSULTATS DES CAMPAGNES DE MESURE SUR LE TERRAIN

Les résultats sont présentés sous deux formes :

- tableaux I et II (pages 6 et 7)
- cartes 1 à 5 à l'échelle du 1/50 000 (hors-texte) dont les commentaires suivent.

1. PIEZOMETRIE

Carte n° 2

Une construction rigoureusement géométrique des équipotentiellles ne tenant compte que des valeurs des points mesurés n'aurait aucun sens vu l'allure de la topographie, le réseau hydrographique et l'espacement entre les points de mesure.

Comme le niveau piézométrique suit en règle générale assez fidèlement la pente des terrains, il en résulte que la carte piézométrique à l'échelle du 1/50 000 reflète l'allure topographique générale, les rivières drainant la nappe qui circule dans les terrains altérés et dans les zones fissurées. A l'échelle de la carte les diverses zones de circulation des eaux souterraines peuvent être considérées comme formant un ensemble homogène constituant un seul aquifère.

L'échelle de la carte permet également de ne pas tenir compte des niveaux d'eau influencés par des pompages, car ces pompages ne modifieraient pas la piézométrie générale d'une façon suffisamment sensible. Au demeurant les pompages, à faible débit, sont peu nombreux et généralement de courte durée.

2. TEMPERATURE DES EAUX SOUTERRAINES

Carte n° 3

La pratique a montré qu'il était intéressant de mesurer la température (si possible à 0,1° près) en deux points de la tranche d'eau : une température de surface à environ 0,5 m au-dessous du niveau piézométrique et une température de fond à environ 0,5 m au-dessus du radier du puits. Pour les forages la température de fond est en général mesurée entre 5 et 10 m au-dessous du niveau piézométrique.

La connaissance de ces valeurs, la profondeur du niveau piézométrique par rapport au sol et l'épaisseur de la tranche d'eau permettent de choisir la valeur la plus représentative. En règle générale c'est la température du fond qui est prise en considération, mais il arrive que celle-ci ne soit pas représentative et que la température de surface semble alors valable.

La carte tient compte de ces observations : dans la plupart des cas ce sont les températures du fond qui ont été retenues. Les puits présentant une très faible épaisseur d'eau avec de surcroît un niveau piézométrique proche du sol ont été éliminés.

Les températures varient de 11,4 à 13,5°. La carte montre une zone "chaude" (supérieure à 12,5°) assez bien centrée sur le granite de Chemillé (l'isotherme 13° repose sur trois mesures seulement). A l'Est de Chemillé des anomalies de température apparaissent ; elles sont probablement à mettre en relation avec la topographie plus contrastée (cours de l'Hyrôme) et peut-être avec des formations géologiques plus variées.

3. CONDUCTIVITES ELECTRIQUES

Carte n° 4

La plupart des mesures de conductivité de terrain ont été utilisées ; seules quelques valeurs semblant aberrantes ont écartées. Lorsque plusieurs mesures ont été faites sur le même point (par exemple à la suite d'un contrôle), la valeur la plus faible a été généralement choisie.

Les conductivités retenues s'échelonnent de 129 à 1280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C.
La carte montre trois zones :

1) dans la partie occidentale l'éventail des conductivités va de 129 (6-1) à 996 (7-9). En faisant abstraction du point 6-1 qui représente probablement un point singulier (Pliocène ?) la zone est assez homogène, avec des valeurs comprises entre 450 et 700 environ à l'exception du point 7-9 où l'on a mesuré 996 et 1045 (à noter que l'eau de ce puits semble bien représentative de la nappe, non perturbée par des effluents de surface).

2) un vaste secteur central s'étendant entre Jallais et Chemillé montre des conductivités assez homogènes allant de 300 à 600 avec un point singulier non utilisé (puits 8-8 : 205, valeur explicable par le fait que cet ouvrage est situé dans un thalweg où des eaux de surface stagnent fréquemment).

3) enfin, dans la partie orientale, à l'est d'une ligne N-S passant par Chemillé, des disparités très importantes (conductivités allant de 300 à plus de 1000) apparaissent. Dans ce secteur on observe une zone de forte conductivité orientée NW-SE qui souligne très certainement les formations carbonatées existant dans cette région. Par contre le point 5-6 apparaît comme singulier avec 782 (et 955), mais cependant en concordance avec une mesure plus à l'est où l'on trouve 642 dans le 5-5.

Il est certain que la minéralisation globale des eaux souterraines est liée aux formations géologiques dans lesquelles elles circulent, mais il n'est pas possible en l'état des connaissances de préciser ces relations, en particulier parce que la situation des puits au point de vue géologique reste trop imprécise.

On n'observe aucune relation apparente entre la carte des conductivités et celle des températures.

4. COMPARAISON ENTRE LES TEMPERATURES DES EAUX DE SURFACE ET SOUTERRAINES

Carte n° 5

Soixante points de surface (en général des émergences d'eau dans les zones amont des thalwegs) ont fait l'objet de mesures de tem-

pératures (en général des moyennes pour chaque point) ; quelques-uns ont également fait l'objet de mesures de conductivité. A noter que trois points correspondent à des puits et forages recensés précédemment (double numérotation sur la carte). Toutes ces mesures sont reportées sur la carte au 1/50 000. Les relevés ont eu lieu en septembre 1983.

Pour les isothermes -indicatives- deux coupures ont été choisies, l'une à 15°, l'autre à 18°. Ce choix est basé sur le nombre de mesures :

- 12 mesures inférieures à 15°
- 34 mesures comprises entre 15,0 et 17,9°
- 14 mesures supérieures à 18°

Certaines valeurs se trouvant dans la zone comprise entre 15 et 18° ont été négligées : ainsi le point 13 avec 18,0° ou encore 36 avec 18,7°.

Grossièrement on observe deux zones "froides" (inférieures à 15°), l'une au nord de Jallais, l'autre à l'est du May-sur-Evre (entre Chemillé et le May-sur-Evre) et deux zones "chaudes" (supérieures à 18°), l'une au NW de Jallais et l'autre au SE de Chemillé avec un petit secteur "froid" à l'intérieur. Une très grande zone orientée sensiblement NE-SW et s'étendant de part et d'autre de Jallais comporte les températures intermédiaires (entre 15 et 18°).

Apparemment on n'observe aucune relation entre les températures de surface et celles des eaux souterraines. Cela s'explique par le fait qu'il est très difficile dans la région étudiée de trouver des émergences de nappe qui ne soient pas perturbées par des éléments extérieurs comme des rejets de drainage agricole, l'exposition au soleil des eaux diffuses, etc.

5. CONCLUSIONS

Les diverses mesures effectuées et les cartes qui en sont tirées fournissent un état initial assez complet des eaux souterraines peu profondes. Mais la nappe circulant dans des formations superficielles très diverses et en général à faible profondeur ne reflète apparemment pas, ou de manière très complexe, la géologie profonde ; elle est en effet fortement perturbée par des facteurs comme la température de l'air, les infiltrations des eaux superficielles, les rejets du drainage agricole, la topographie, l'hydrographie, etc.

Cette première étude limitée aux horizons superficiels ne lève donc aucune inconnue sur les caractères hydrogéologiques des horizons profonds. Par conséquent il reste indispensable de procéder à des investigations en profondeur.

TABLEAU 3 - INVENTAIRE ET SITUATION DES POINTS DE MESURE SUR LES EAUX DE SURFACE

	Coordonnées LAMBERT		Débit estimé	Température °C	Conductivité uS/cm	N° des échantillons analysés	
	X	Y					
1	354,70	2252,40	2	18,2			
2	353,90	2251,05	-	15,5			
3	355,15	2253,30	5	16,4			
4	358,50	2252,60	-	16,3			
5	356,65	2252,20	3	14,3			
6	358,00	2252,30	4	17,7			
7	357,80	2249,70	-	17,5	327	(1)	
8	358,85	2248,90	-	17,0	669	(10)	Puits
9	356,35	2247,20	-	16,8	367	(13)	
10	355,00	2246,40	-	18,0			
11	354,65	2245,90	-	16,9			
12	355,10	2245,20	1	16,3			
13	357,80	2244,90	-	18,0			
14	357,40	2244,10	0,25	15,2	344	(7)	
15	358,60	2242,85	-	14,9			
16	355,50	2242,00	2	16			
17	355,95	2240,95	-	16,3			
18	356,25	2240,25	-	17,2	510	(4)	
19	359,70	2252,65	50	13,8	276	(11)	
20	360,45	2252,15	4	14,2			
21	364,00	2252,50	20	16,1	268	(12)	
22	359,60	2250,80	-	16,1			
23	362,80	2250,30	3	15,7			
24	359,20	2248,80	-	15,1			
25	361,95	2248,40	1	15,4			
26	362,85	2247,90	-	15,5			
27	361,60	2247,00	-	14,1			
28	362,15	2246,05	5	14,3	262	(9)	
29	359,85	2245,10	-	14,8	+476	(8)	Puits
30	360,00	2243,20	-	13,0			
31	360,90	2242,20	-	14,0			
32	362,55	2242,20	0,75	14,4			
33	362,95	2240,90	0,25	15,3			
34	364,90	2254,05	25	17,9			
35	366,20	2251,75	50	16,1	301	(13)	
36	364,50	2250,80	2	18,7			
37	364,70	2250,50	0,25	17,8			
38	366,00	2248,70	-	14,4			
39	364,45	2243,90	0,25	17,8			
40	365,50	2244,20	3	19,9			
41	366,90	2244,90	0,5	18,2			
42	365,20	2241,80	-	16			
43	366,85	2241,95	-	16,3	440	(5)	
44	365,10	2241,20	0,25	16,4			
45	368,85	2252,05	200	17,4	339	(16)	
46	372,90	2252,05	2	18,7			
47	372,65	2251,90	10	16,0	448	(14)	
48	370,05	2250,70	-	19,4			
49	371,25	2250,50	-	17,1			
50	371,90	2248,35	3	18,0			
51	369,45	2246,70	0,5	18,9			
52	371,20	2246,55	2	16,8			
53	371,85	2246,25	2	17,4			
54	372,20	2245,90	0,25	18,8			
55	368,85	2245,50	2	18,1			
56	370,20	2242,90	-	14,6			
57	371,50	2241,10	-	19,5			
58	369,00	2240,45	-	15,8	457	(6)	
59	354,0	2254,05	-	18,1	319	(2)	
60	371,10	2252,35	-	15,8	1107	(15)	Forage

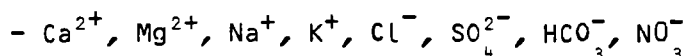
IV - ÉTUDE HYDROCHIMIQUE

Trente sept points d'eau dont la localisation est précisée sur la figure 1 ont été retenus aux fins d'analyses.

Les échantillons prélevés se répartissent en deux groupes :

- eaux de surface : 16 échantillons (codés E.S par la suite)
- eaux de forage : 21 échantillons (codés E.F)

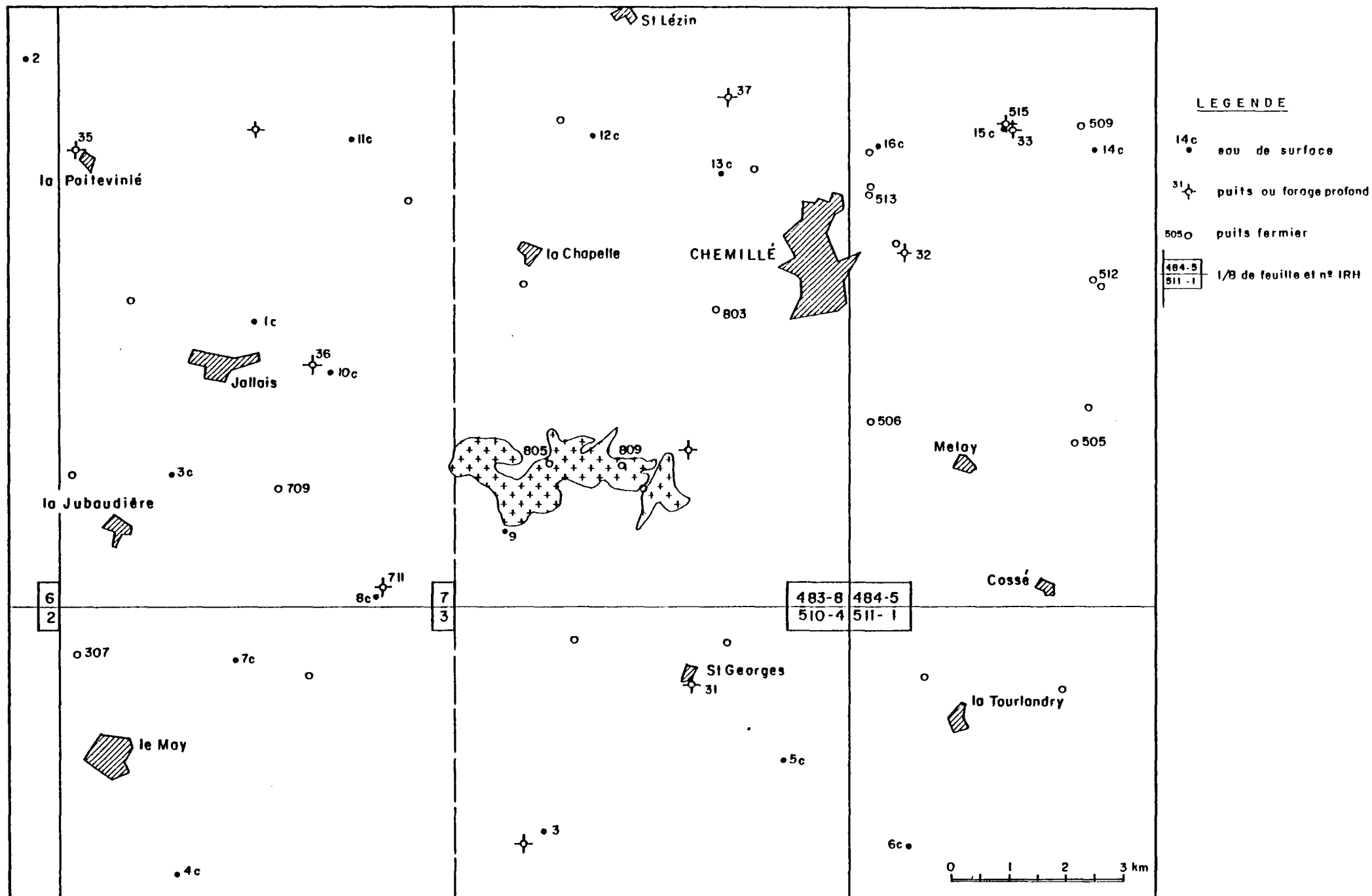
Les analyses, réalisées par le Département Minéralogie-Géochimie - Analyses du B.R.G.M., ont porté en particulier sur les 8 éléments suivants (éléments majeurs) :



Les informations nécessaires à la caractérisation du "faciès" chimique de ces eaux et à la détection d'éventuelles anomalies ont été extraites :

- de traitements statistiques : histogrammes, analyses de variance, analyse en composantes principales,
- de la représentation graphique des résultats à l'aide du diagramme de PIPER.

La liste des points d'eau et les résultats d'analyses pour chacun d'eux, figurent en annexe 1. L'annexe 2 décrit sommairement les techniques d'analyse de variance et d'analyse en composantes principales ainsi que le mode de représentation des analyses d'eau par un diagramme de PIPER.



Hydrochimie de Chemillé - Carte de situation et numération des points de prélèvement des eaux analysées

FIGURE 1

1. TRAITEMENT STATISTIQUE

1.1. Analyses élémentaires : moyennes, écarts-type.

Pour les 8 éléments considérés, les résultats obtenus figurent dans les tableaux 4 et 5 dont l'examen fait ressortir :

- la forte variabilité des teneurs en sulfate (SO_4) dans les eaux de surface (le coefficient de variation est de 1.1)

- la forte dispersion des valeurs pour les nitrates (NO_3) et le potassium (K) dans les eaux de forage (coefficients de variation respectivement de 1.13 et 0.96). De fortes concentrations en ces éléments (jusqu'à 184 mg/l pour les nitrates et 17 mg/l pour le potassium) indiquent vraisemblablement une pollution d'origine domestique ou agricole.

1.2. Analyse de variance

L'analyse a été réalisée sur valeurs logarithmiques et le test sur l'hypothèse d'égalité des moyennes des 2 groupes pour chacun des 8 éléments considérés a été appliqué à deux niveaux de risques : 5 % et 1 %. Les résultats du test figurent dans le tableau suivant :

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO_4	HCO_3	NO_3
F calculé	3.67	2.51	4.46	3.06	1.02	1.17	0.37	0.35
F tabulé seuil de 5 % F(1,35)	4 13							
F tabulé seuil de 1 % F(1,35)	7 44							

La comparaison des valeurs prises par la variable F de Fischer Snedecor (cf. annexe) aux valeurs tabulées théoriques conduit :

- au seuil de 5 % à rejeter l'hypothèse d'égalité des moyennes pour Na^+ , mais à garder cette hypothèse au seuil de 1 % (différence non hautement significative).

Tableau 4 - Eaux de surface

NOMS DES VARIABLES	NOMBRE D INDIVIDUS TRAITES	VALEURS MINIMUM		VALEURS MAXIMUM		MOYENNES		ECARTS - TYPE	
		NATURELLES	LOGARITHM.	NATURELLES	LOGARITHM.	NATURELLES	LOGARITHM.	NATURELLES	LOGARITHM.
CA	16	13.100		88.700		27.763		18.355	
MG	16	4.000		30.000		9.744		5.989	
NA	16	18.900		89.500		34.713		17.125	
K	16	1.100		14.800		6.088		3.958	
CL	16	30.500		173.000		53.825		33.036	
SO4	16	5.000		100.000		21.875		23.706	
HC03	16	33.000		235.000		100.688		50.968	
NO3	16	7.900		56.000		22.469		12.589	

Tableau 5 - Eaux de forage

NOMS DES VARIABLES	NOMBRE D INDIVIDUS TRAITES	VALEURS MINIMUM		VALEURS MAXIMUM		MOYENNES		ECARTS - TYPE	
		NATURELLES	LOGARITHM.	NATURELLES	LOGARITHM.	NATURELLES	LOGARITHM.	NATURELLES	LOGARITHM.
CA	21	6.500		88.000		41.962		22.200	
MG	21	2.200		30.000		14.086		8.197	
NA	21	14.000		185.000		62.043		46.624	
K	21	0.900		16.600		4.310		4.130	
CL	21	20.000		210.000		81.124		62.464	
SO4	21	0.100		132.000		40.100		32.731	
HC03	21	12.000		295.000		139.114		83.259	
NO3	21	0.100		184.000		43.405		49.279	

Les eaux de surface ne diffèrent donc statistiquement des eaux de nappe que par leur moindre teneur en sodium (moyenne de 32 mg/l contre 49 mg/l pour les eaux de nappe), la différence n'étant toutefois significative qu'au seuil de 5 %.

1.3. Analyse en composantes principales

Elle a été réalisée sur valeurs logarithmiques. La matrice des coefficients de corrélation pour l'ensemble des échantillons est la suivante :

Ca	1,00	1,0						
Mg	0,87	1,00						
Na	0,55	0,55	1,00					
K	0,05	-0,13	-0,11	1,00				
Cl	0,60	0,67	0,90	-0,12	1,00			
SO ₄	0,71	0,56	0,50	0,14	0,48	1,00		
HCO ₃	0,58	0,51	0,21	0,11	0,13	0,46	1,00	
NO ₃	0,00	-0,01	0,34	0,20	0,32	0,30	-0,37	1,00
	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃

Elle permet de détecter une très bonne liaison entre *Calcium et Magnésium* ($r = 0.87$), *Sodium et Chlorure* ($r = 0.90$). Cette très bonne corrélation se retrouve au niveau de chacun des deux groupes traités séparément (tab. 6 et 7, fig. 2 et 3).

Les eaux de surface présentent en outre une bonne liaison de SO₄ avec Ca, Na et Cl, différant en cela des eaux de nappe où cette liaison est nettement plus faible.

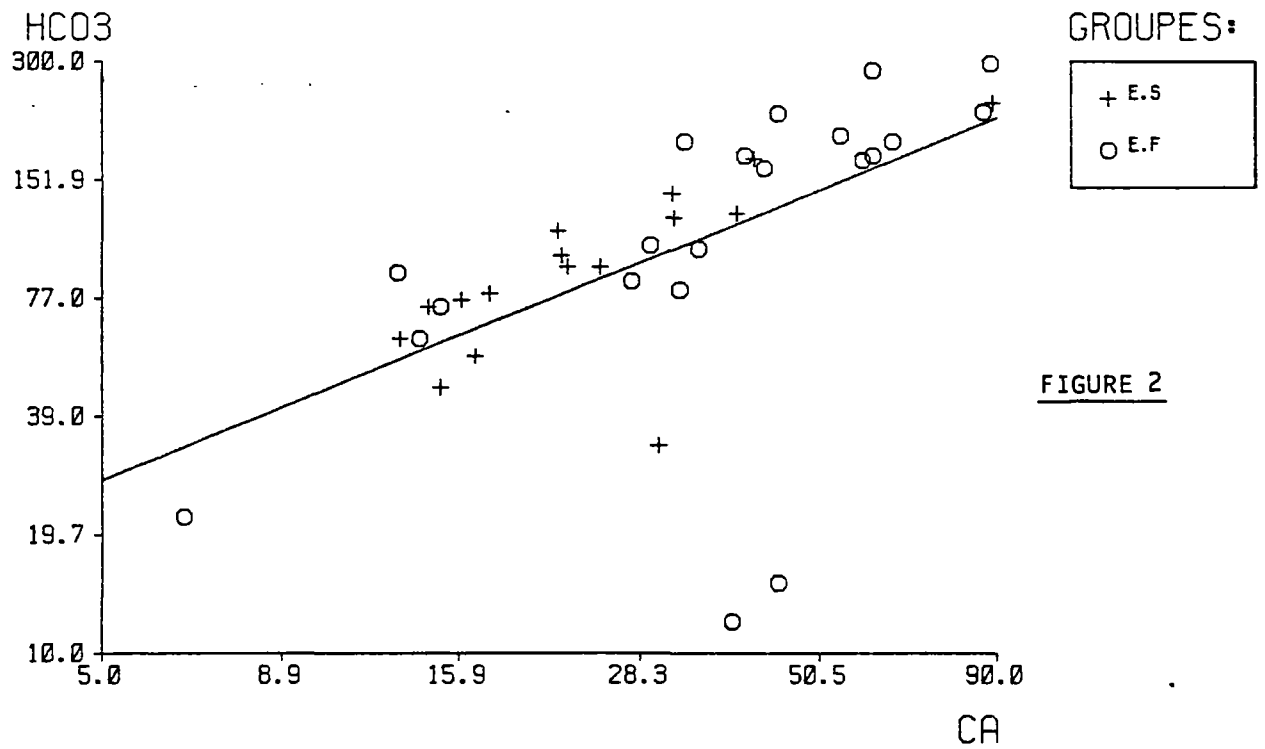
Le tableau 8 qui suit, contient l'information obtenue par projection sur 3 axes factoriels et met en évidence un certain nombre d'associations ou d'oppositions (cf. également fig. 4).

Tableau 6 - Matrice de corrélation - Eaux de surface

CA	1.00								
MG	0.88	1.00							
NA	0.55	0.32	1.00						
K	0.10	-0.18	-0.14	1.00					
CL	0.81	0.72	0.86	-0.22	1.00				
SO4	0.81	0.57	0.80	0.09	0.82	1.00			
HCO3	0.71	0.65	0.28	0.17	0.40	0.51	1.00		
NO3	-0.48	-0.43	-0.19	-0.03	-0.25	-0.28	-0.86	1.00	
	CA	MG	NA	K	CL	SO4	HCO3	NO3	

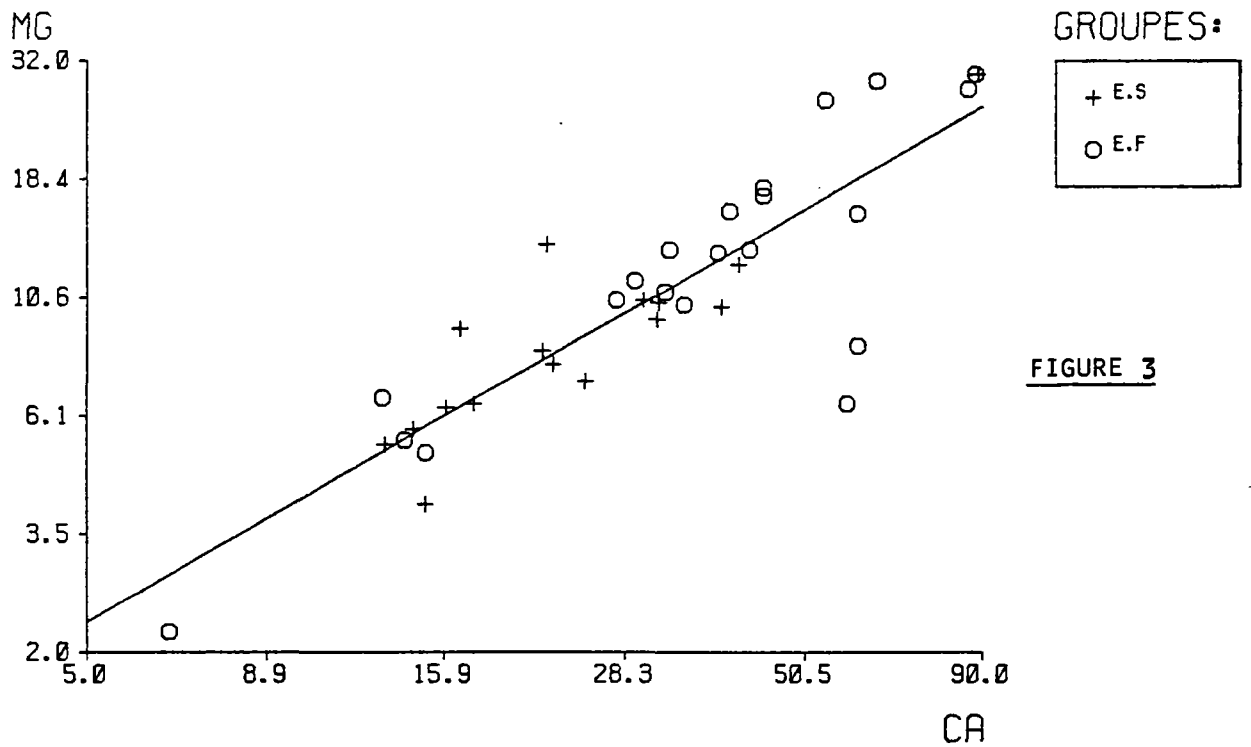
Tableau 7 - Matrice de corrélation - Eaux de nappe

CA	1.00								
MG	0.85	1.00							
NA	0.50	0.57	1.00						
K	0.18	-0.01	0.02	1.00					
CL	0.54	0.65	0.91	-0.02	1.00				
SO4	0.67	0.54	0.41	0.24	0.40	1.00			
HCO3	0.55	0.46	0.17	0.14	0.06	0.44	1.00		
NO3	0.11	0.07	0.46	0.25	0.40	0.40	-0.32	1.00	
	CA	MG	NA	K	CL	SO4	HCO3	NO3	



CHEMILLE

$$HC03 = 0.719E+00 \text{ CA} + 0.214E+01$$



CHEMILLE

$$MG = 0.835E+00 \text{ CA} + -0.507E+00$$

m	F 1	F 2	F 3
Valeur propre	3,856	1,602	1,220
Pourcentage de variance expliquée	48,203	20,029	15,246
Coefficients de corrélation entre axes et variables			
f(Ca)	0,902	-0,245	0,091
f(Mg)	0,874	-0,213	-0,145
f(Na)	0,806	0,366	-0,206
f(K)	-0,018	0,058	0,922
f(Cl)	0,829	0,367	-0,245
f(SO ₄)	0,785	0,022	0,327
f(HCO ₃)	0,538	-0,700	0,216
f(NO ₃)	0,196	0,857	0,289

Tableau 8 - Analyse factorielle en composantes principales (traitement sur valeurs logarithmiques)

- Suivant l'axe F1 : on observe le regroupement de 5 variables : Ca, Mg, Na, Cl, SO₄ ; Les coefficients de corrélation de ces variables avec l'axe sont élevés, compris entre 0.75 et 0.90. Les variables NO₃ et K se démarquent nettement (tableau 8 et fig. 4).

- Suivant l'axe F2 : on observe notamment l'opposition HCO₃/NO₃ (beaucoup plus marquée dans les eaux de surface que dans les eaux de nappe comme le montrent les tableaux 6 et 7). On notera une assez forte corrélation négative entre ce deuxième axe et HCO₃⁻, ce qui se traduit sur la figure 5 par le regroupement de 5 points (6C, 36, 509, 513, 711) caractérisés par leurs fortes teneurs en HCO₃⁻.

En définitive, le faciès dominant de ces eaux semble être de type *chloruré et sulfaté, calcique et magnésien*, la tendance sulfatée se révélant surtout dans les eaux de nappe. Un faciès secondaire *chloruré et sodique* se manifeste surtout dans les eaux de nappe (comme le précise d'ailleurs l'analyse de variance relativement à Na).

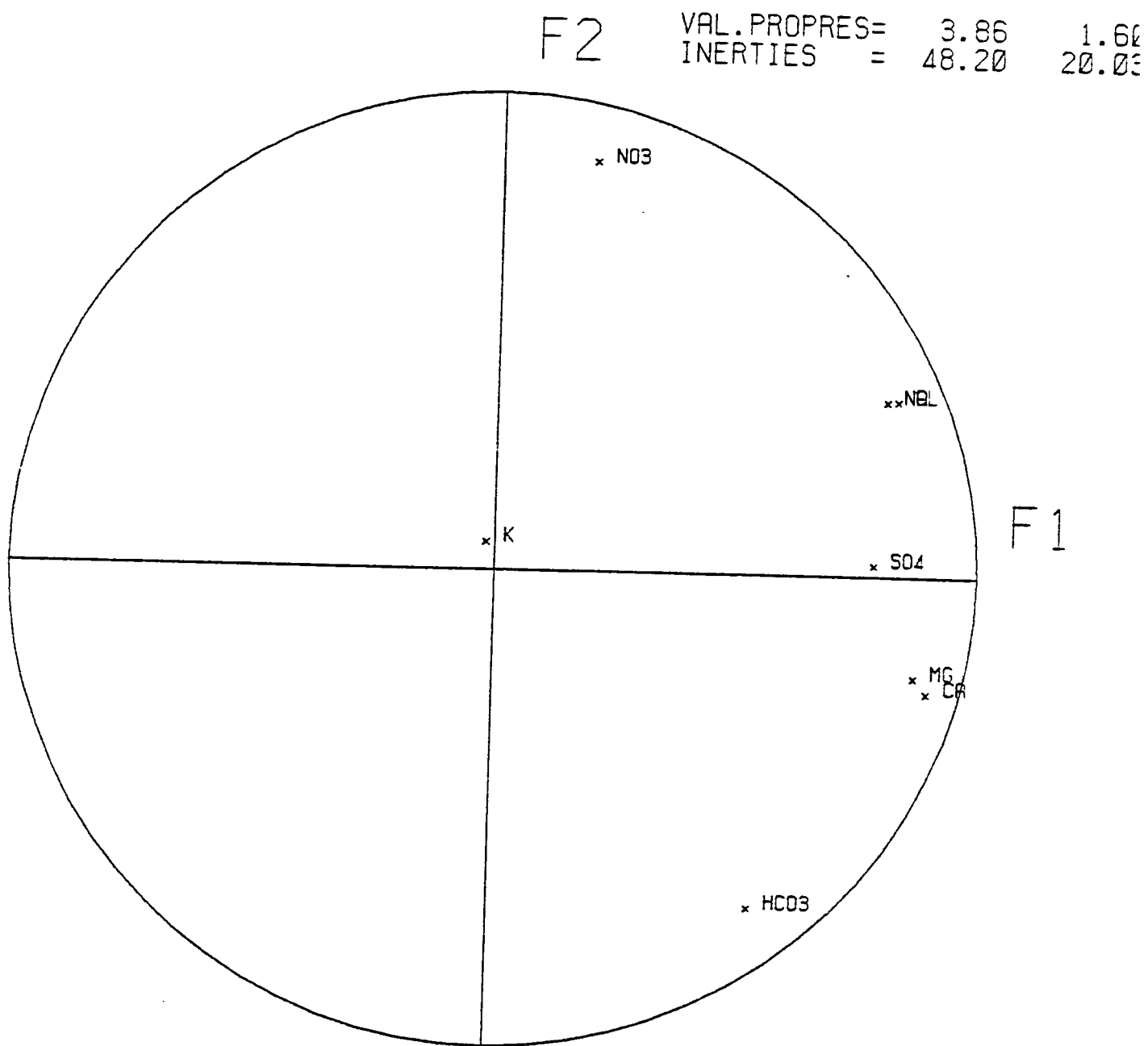


FIGURE 4 - Cercle des corrélations - axes F₁, F₂ et variables

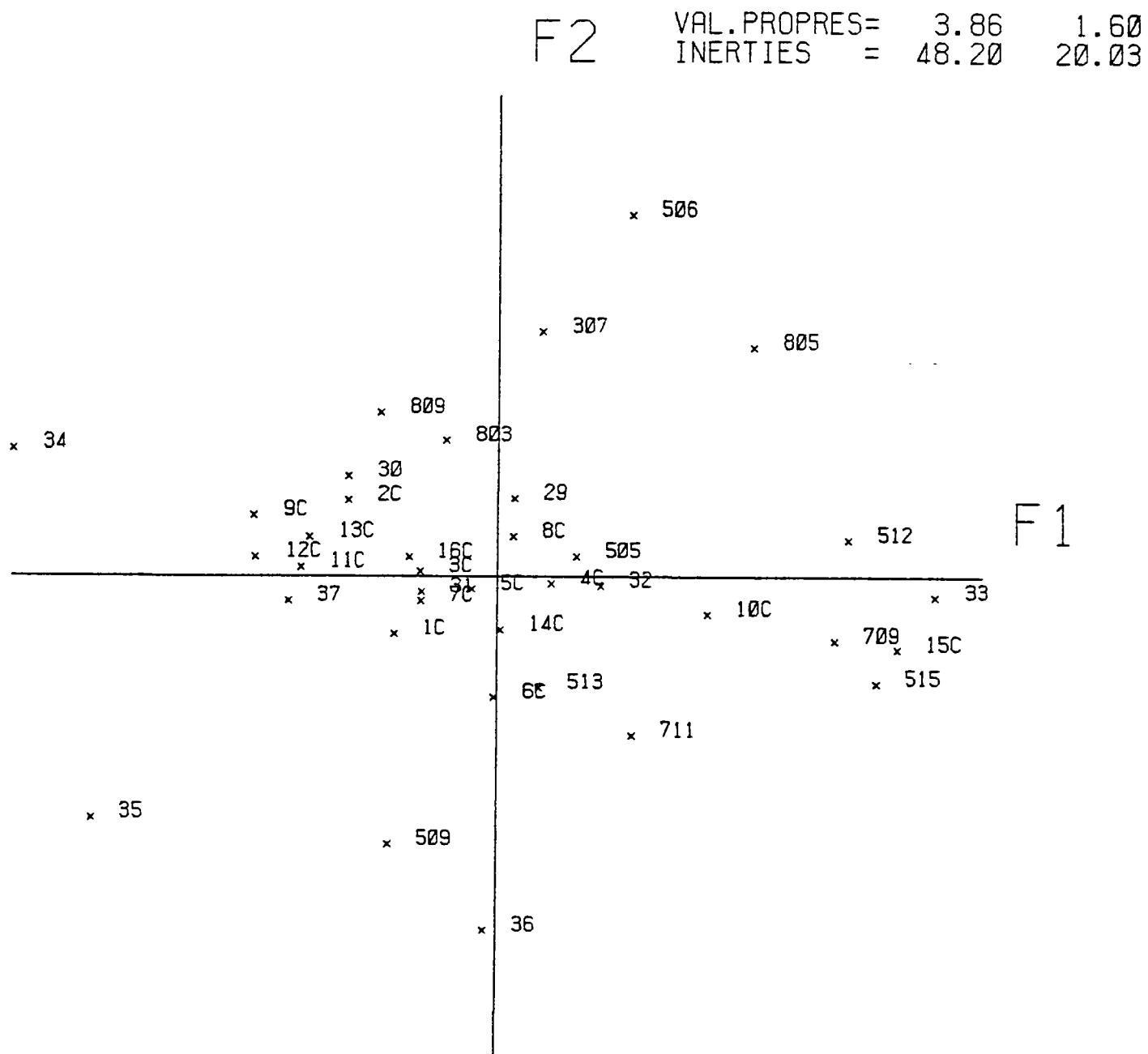


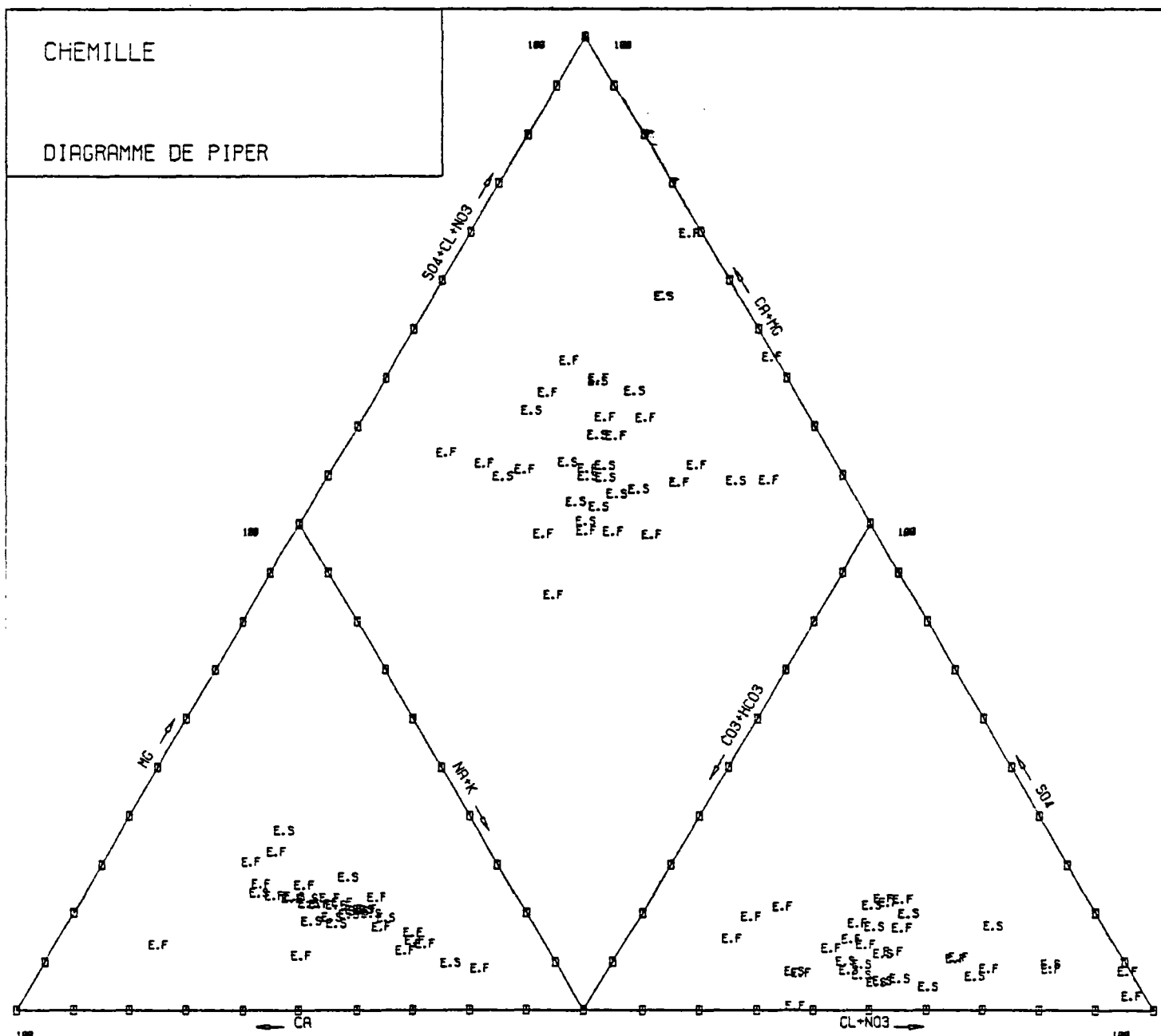
FIGURE 5 - Projection de l'ensemble des analyses dans le plan des deux premiers axes principaux

2. DIAGRAMME DE PIPER

L'examen des diagrammes (fig. 6 et 7) permet de constater que les eaux de surface présentent une composition chimique plus homogène que les eaux de forage. Au niveau des triangles de base du diagramme, ces eaux se regroupent majoritairement dans les secteurs "pas d'anions dominants" et "pas de cations dominants" (cf. annexe A2). Globalement, elles peuvent être rattachées au faciès *chloruré et sulfaté, calcique et magnésien*.

Par contre, on observe une assez forte hétérogénéité au niveau des eaux de forage et la moitié des points environ se rangent dans le secteur chloruré et le secteur bicarbonaté du triangle des anions et dans le secteur sodique du triangle des cations. Il en résulte deux faciès secondaires "*chloruré-sodique*" et "*bicarbonaté-calcique-magnésien*" accompagnant un faciès "*chloruré et sulfaté calcique et magnésien*" dominant.

L'analyse de variance confirme la tendance sodique de ces eaux de forage (au seuil de 5 %) et l'analyse en composantes principales, les associations calcium-magnésium et sodium-chlorure. On remarquera que les points situés dans le secteur bicarbonaté ont pu être mis en évidence par la projection sur les deux premiers axes principaux (fig. 5), (points 509, 36, 513, 711, eaux de forage, et 60, eaux de surface). Ces points sont géographiquement éloignés les uns des autres et n'ont pu être reliés à un faciès géologique particulier.

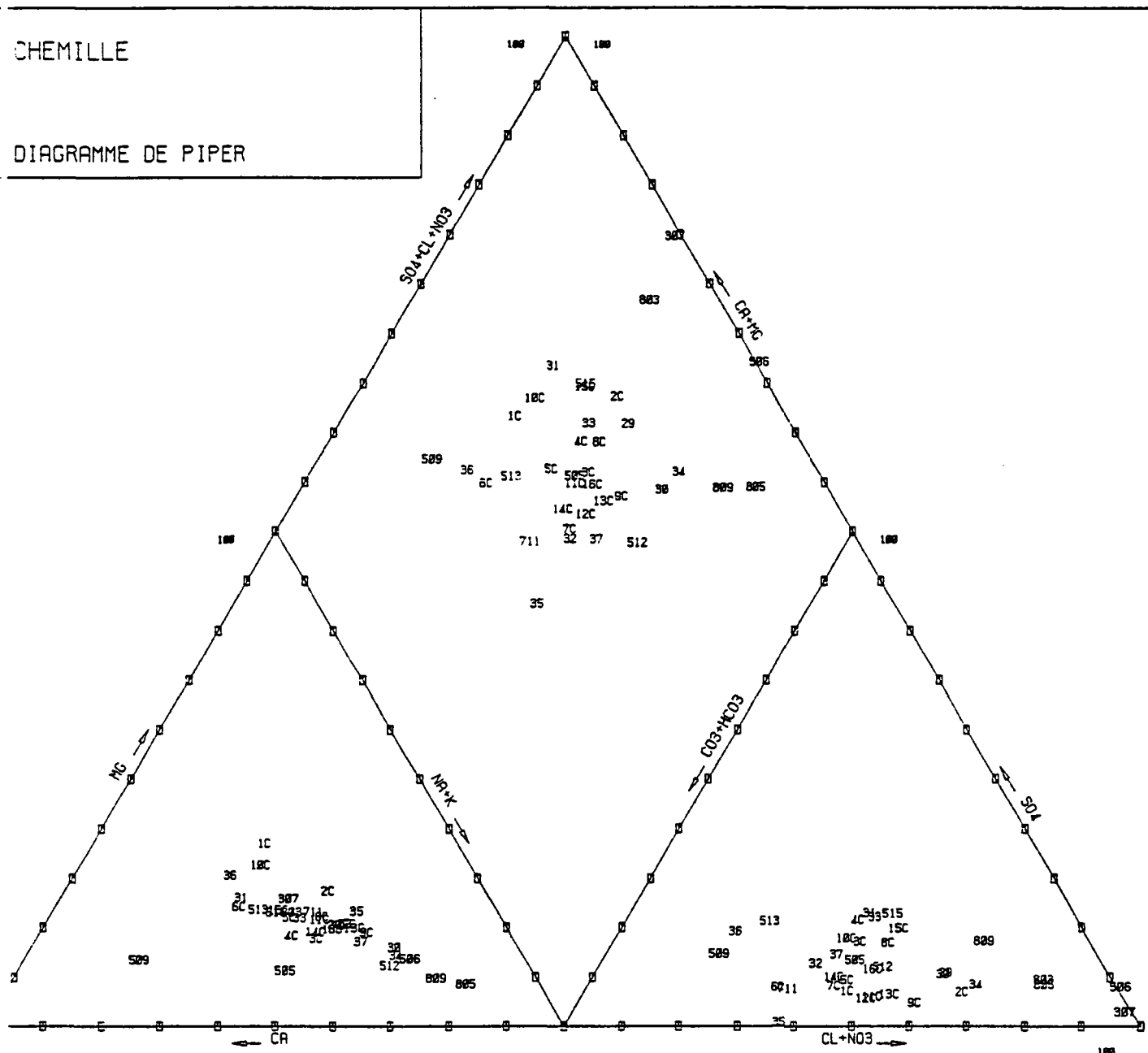


E.S : eaux de surface
E.F : eaux souterraines

FIGURE 6

CHEMILLE

DIAGRAMME DE PIPER



31 : N° de l'échantillon

FIGURE 7

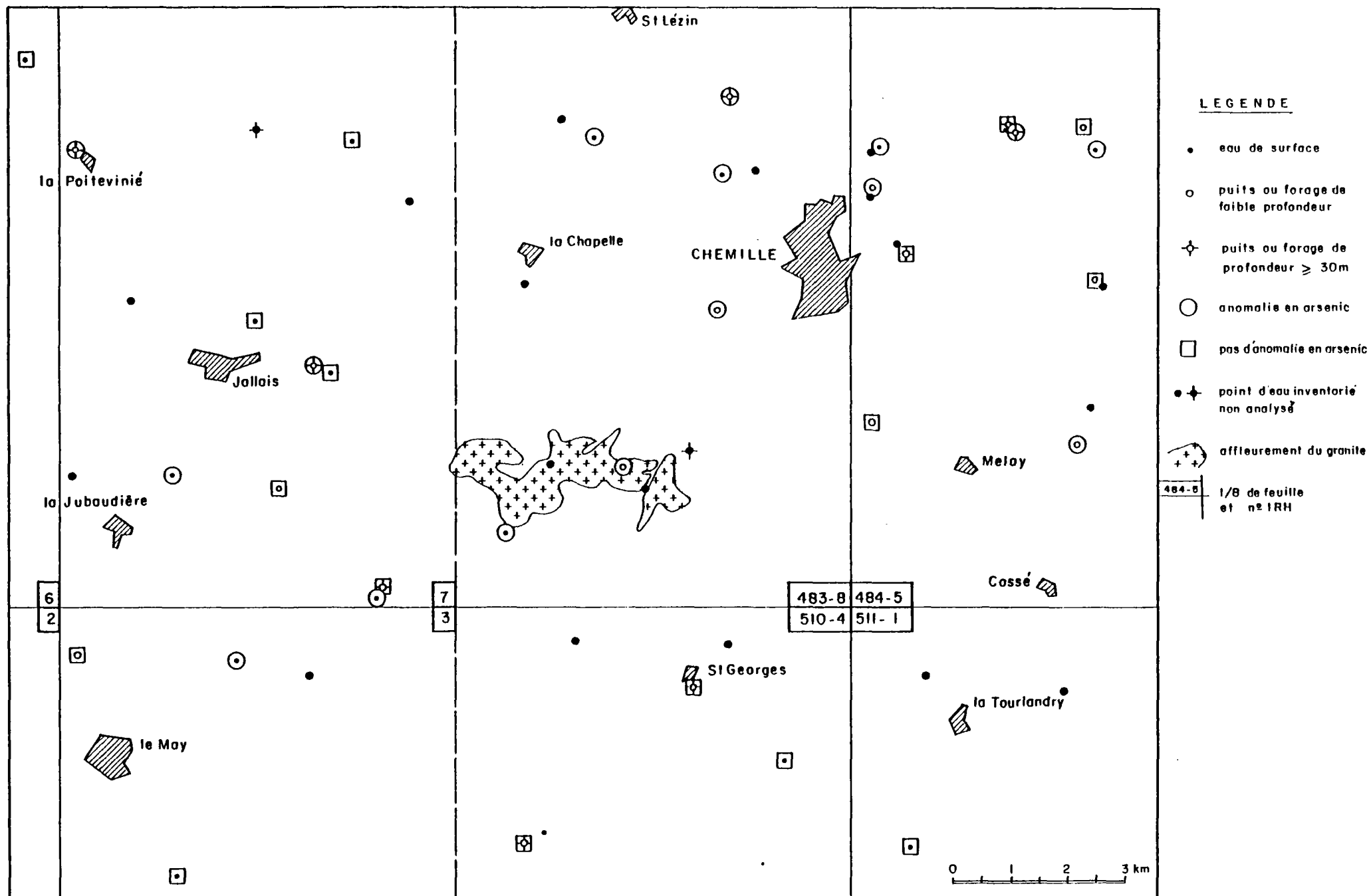
3. CAS DE L'ARSENIC

Les circulations hydrothermales qui se sont produites dans l'encaissant au moment de la mise en place du granite ont, en particulier, enrichi cet encaissant en arsenic.

L'analyse de l'arsenic dans les eaux prélevées (superficielles et souterraines) montre des anomalies qui se corrélaient bien aux anomalies géochimiques sol (cf. fig. 5 du rapport Chemillé géologie et synthèse).

La carte (fig. 8) montre la situation géographique de ces anomalies.

Les tableaux suivants donnent les teneurs mesurées en arsenic rapportées en pourcentage du résidu sec pour les eaux des puits et forages d'une part et les eaux de surface d'autre part.



Hydrochimie de Chemillé - Carte de situation des anomalies hydrochimiques en arsenic

FIGURE 8

CHEMILLE

Désignation du puits ou forage	Profondeur de l'ouvrage	Teneurs* en arsenic
484 - 5 - 15	40,0	3.10^{-4}
484 - 5 - 9	13,6	$< 4.10^{-4}$
484 - 5 - 13	6,8	2.10^{-3}
484 - 5 - 12	7,8	$< 1,5 \times 10^{-4}$
484 - 5 - 5	3,4	$1,7.10^{-3}$
484 - 5 - 6	3,6	$1,7.10^{-4}$
483 - 8 - 3	9,7	$1,7.10^{-3}$
483 - 8 - 9	-	3.10^{-2}
483 - 8 - 5	6,1	$< 1,4 \times 10^{-4}$
483 - 7 - 11	55,0	$5,6.10^{-4}$
483 - 7 - 9	14	$1,6.10^{-4}$
510 - 3 - 7	9,8	$< 2.10^{-4}$
484 - 1 - 5	34,0	3.10^{-4}
510 - 4 - 3	41,0	8.10^{-4}
510 - 4 - 5	40,0 ?	2.10^{-3}
484 - 5 - 1	39,0	$1,1.10^{-3}$
484 - 5 - 4	39,0	$1,8.10^{-3}$
483 - 6 - 1	76,0	$1,7.10^{-3}$
483 - 7 - 1	34,0	$4,3.10^{-3}$
483 - 7 - 3	37,0	$3,2 \times 10^{-3}$
483 - 8 - 2	40,0	$1,7 \times 10^{-2}$

Teneurs en arsenic
dans les puits et forages
exprimées en % du résidu sec

CHEMILLE

Désignation du prélèvement	Teneurs en arsenic
1C	$4,8.10^{-4}$
2C	5.10^{-4}
3C	$2,8.10^{-3}$
4C	$1,3.10^{-3}$
5C	$4,4.10^{-4}$
6C	$< 1,4.10^{-4}$
7C	$1,8.10^{-3}$
8C	$6,8.10^{-3}$
9C	$4,5.10^{-3}$
10C	8.10^{-4}
11C	$< 2.10^{-4}$
12C	8.10^{-3}
13C	1.10^{-2}
14C	$1,1.10^{-3}$
15C	$6,8.10^{-4}$
16C	$7,4.10^{-3}$

Teneurs en arsenic
des eaux de surface
exprimées en % du résidu sec

4. CONCLUSIONS

Le tableau suivant synthétise les principaux résultats issus de cette étude.

	Eaux de surface 16 points	Eaux de surface 21 points
Appartenance première à une classe du diagramme de PIPER	CHLORUREE ET SULFATEE CALCIQUE ET MAGNESIENNE (12 points)	CHLORUREE ET SULFATEE CALCIQUE ET MAGNESIENNE (9 points)
Appartenance secondaire	CHLORUREE SODIQUE ET POTASSIQUE (3 points)	CHLORUREE SODIQUE ET POTASSIQUE (5 points) BICARBONATEE CALCIQUE ET MAGNESIENNE (5 points)
Influence des ions : > ~ plus riche		Na ⁺ E.N > E.S différence significative au seuil de 5 %
Corrélations entre éléments	Ca et Mg (r = 0,88) Ca et SO ₄ (r = 0,81) Na et Cl (r = 0,86)	Ca et Mg (r = 0,85) Na et Cl (r = 0,91)

L'étude précédente montre donc que les eaux souterraines sont en définitive en relation étroite avec les eaux superficielles, ce qui conduit à la conclusion d'une nappe phréatique généralisée en équilibre avec le réseau superficiel qui la draine.

Aucune anomalie chimique ne peut être mise en évidence qui témoignerait d'une remontée d'eau profonde par le biais d'accidents.

Par ailleurs, l'analyse des teneurs en arsenic de ces eaux permet de dégager la dépendance de ces teneurs vis-à-vis des anomalies géochimiques en arsenic, anomalies liées à la mise en place du granite de Chemillé.

V - MODÉLISATION DES DÉBITS DE L'HYRÔME À CHANZAUX

1. OBJECTIFS ET METHODE DE LA MODELISATION

La modélisation des débits de l'Hyrôme a été effectuée afin de connaître le bilan hydrologique global sur l'ensemble du bassin versant de Chanzaux - en incluant apports, pertes et sorties - à partir des données de pluie ; des évapotranspirations potentielles (ETP) et des débits. Elle doit conduire à une décomposition des écoulements observés dans le cours d'eau en écoulements rapides et différés au pas de temps adopté lors de la modélisation.

Le modèle GARDENIA du BRGM a été choisi pour simuler les débits de l'Hyrôme au pas de temps mensuel de 1968 à 1979. Les données introduites dans le modèle sont les pluies et les ETP mensuelles sur toute la période de modélisation. Le modèle calcule alors les débits mensuels sur la même période et le calage du modèle consiste à ajuster les paramètres pour obtenir un ajustement le plus satisfaisant possible entre débits calculés et débits observés sur la même période.

2. PRINCIPE DU MODELE GARDENIA

Le modèle GARDENIA est un modèle global des simulations pluie-débit. Les pluies sont schématisées par des lames d'eau uniformes sur l'ensemble du bassin versant. L'eau transite alors dans une succession de réservoirs correspondant aux écoulements à l'échelle du bassin versant : rétention de l'eau dans les premiers mètres du sol et reprise par évapotranspiration, écoulement rapide vers les cours d'eau ou infiltration vers les nappes, recharge et tarissement de celles-ci produisant un écoulement différé ou lent dans les rivières. La figure 9 représente ces réservoirs avec leurs alimentations et leurs exutoires respectifs.

3. DONNEES HYDROLOGIQUES DISPONIBLES

3.1. Les précipitations

Les données utilisées sont les précipitations journalières de 1967 à 1979 à la station météorologique de Chemillé.

MODELE. GARDENIA - Modèle de fonctionnement

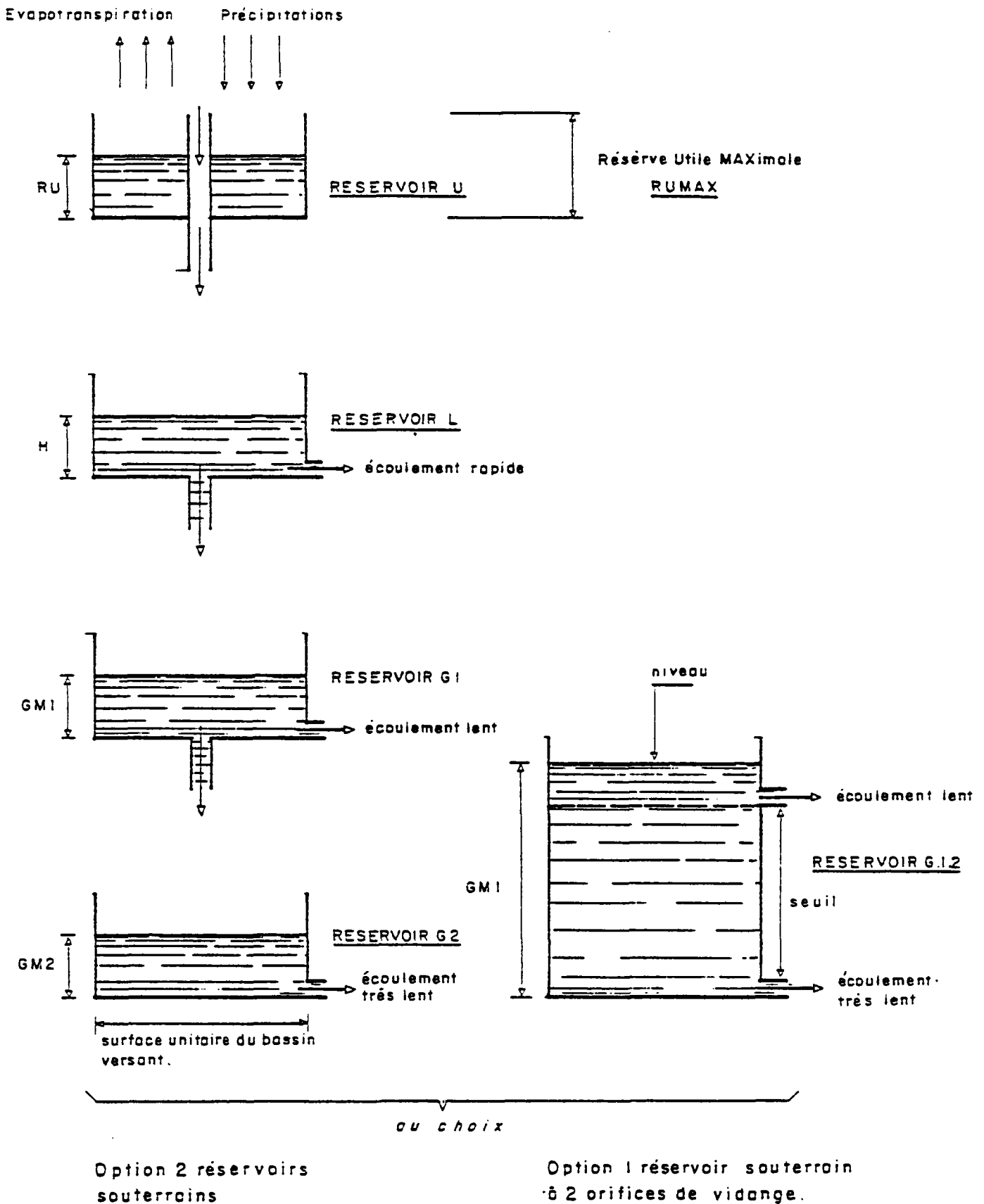


FIGURE 9

La pluie moyenne annuelle pour cette période est de 630 mm avec un écart-type de 75 mm. Cette période de 1967-1979 a comporté des années de forte hydraulicité et des années très déficitaires. Elle est représentative des conditions de précipitation moyenne que connaît cette région à l'échelle d'un historique de plusieurs dizaines d'années. La figure 10 représente les pluies mensuelles sur cette période.

3.2. Estimation de l'évapotranspiration potentielle

Une estimation des ETP peut être obtenue à l'aide de la formule mensuelle de L. TURC à partir des données mensuelles de température, d'insolation et éventuellement d'humidité relative de l'air.

La station climatologique la plus proche est celle d'Angers pour laquelle on dispose des données de températures et d'insolations mensuelles. Le tableau 9 présente les ETP mensuelles et annuelles sur la période de 1967 à 1979. L'ETP moyenne annuelle atteint 706 mm sur les treize années considérées avec un écart-type de 39 mm.

3.3. Les données de débit

On dispose de la chronique des débits journaliers de l'Hyrôme de 1967 à 1979 relevés à la station de Chanzaux du Ministère de l'Agriculture.

La figure 11 représente l'évolution des débits moyens mensuels sur cette période. Les années 1980 à 1982 ont été exclues du fait du changement de site de la station, installée plus à l'aval, à Chauveau en 1980 et couvrant un bassin versant nouveau de 151 km² au lieu des 140 km² pour la station de Chanzaux.

L'examen rapide des débits moyens mensuels met en évidence la très grande variabilité interannuelle des débits moyens mensuels. Les débits moyens mensuels maximaux (hautes eaux) varient dans des rapports de 5 à 6 entre années excédentaires (1971, 1977 et 1979) et années déficitaires (1973 et 1976). L'existence d'années de pluviosité bien différenciées dans la période de modélisation considérée (1965 à 1979), mais aussi d'années moyennes, rend l'échantillon des observations particulièrement représentatif du comportement du bassin versant et des relations entre les pluies et les débits observés.

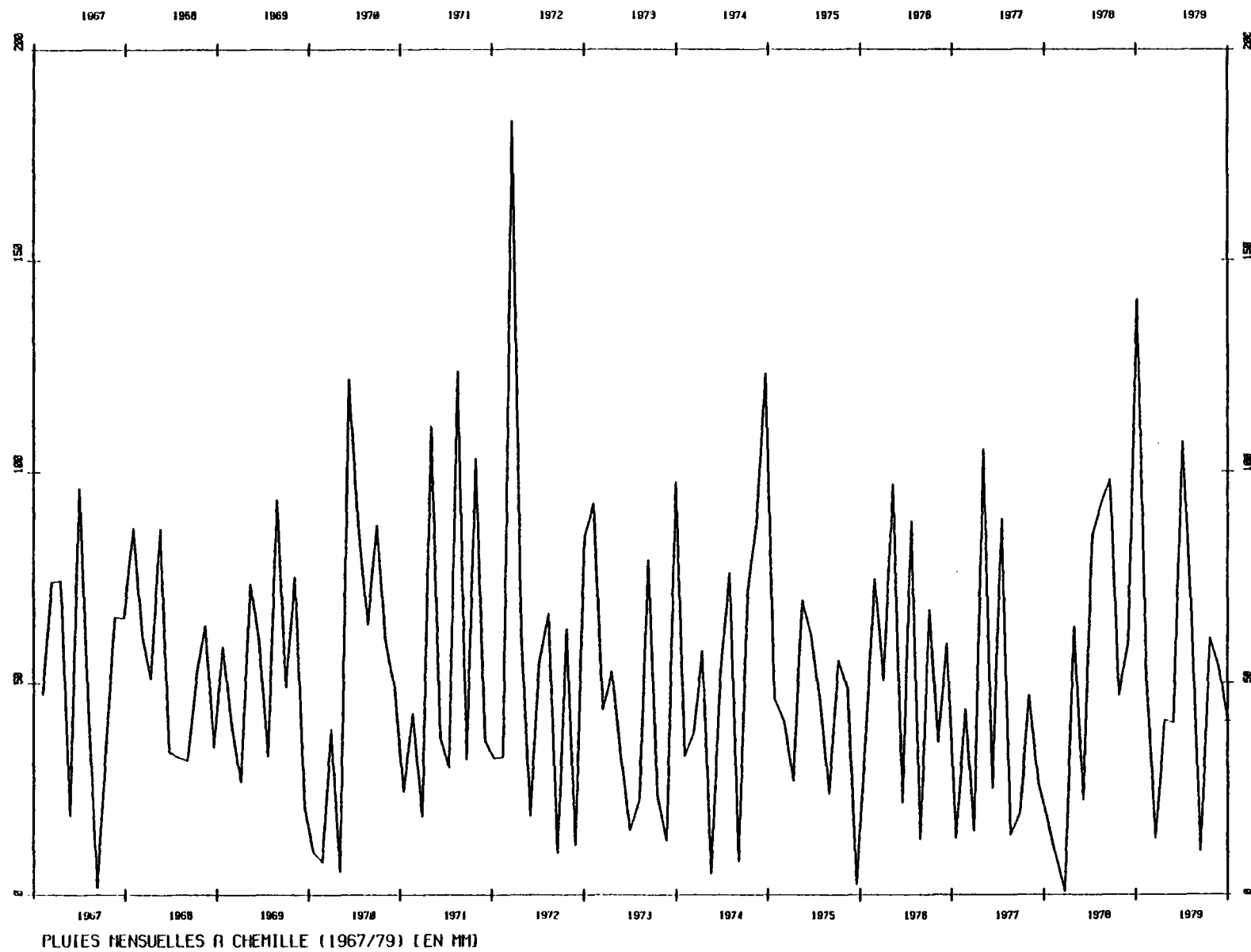


FIGURE 10

*** ANNEES 1967/79 - PLUIES MENSUELLES A CHEMILLE ***

47.4	73.9	74.2	18.9	96.3	44.7	1.7	34.8	65.5	65.3	86.7	61.5	*	670.8	1967
51.0	86.6	33.8	32.6	31.9	51.8	63.6	34.9	58.5	40.0	26.9	73.4	*	585.0	1968
59.8	32.7	93.6	49.1	74.9	20.8	10.0	7.7	39.2	5.4	121.9	87.5	*	602.7	1969
63.8	87.4	59.8	48.9	24.5	42.9	18.7	110.7	37.2	30.2	123.7	32.1	*	679.9	1970
103.2	36.5	32.3	32.5	183.0	62.3	18.9	54.4	66.4	9.9	62.9	11.7	*	674.0	1971
84.7	92.7	43.8	52.7	32.2	15.3	22.5	79.1	23.7	12.8	97.7	32.8	*	589.9	1972
38.2	57.5	5.1	52.8	76.0	7.8	70.7	88.3	123.2	46.5	40.8	27.0	*	633.8	1973
69.5	61.2	45.5	24.1	55.3	48.4	2.6	36.8	74.5	50.7	97.2	21.8	*	587.6	1974
88.5	13.1	67.3	35.9	59.2	13.4	43.8	15.1	105.0	25.4	89.0	14.3	*	570.0	1975
19.6	47.1	26.4	18.5	9.3	0.8	63.3	22.5	85.1	92.6	98.1	47.1	*	530.4	1976
59.3	140.9	50.2	13.5	41.2	40.6	107.0	60.6	10.3	60.6	53.5	41.0	*	686.6	1977
105.4	74.5	49.4	31.3	32.2	36.4	35.2	5.0	17.0	2.3	18.7	146.5	*	553.8	1978
63.4	119.6	105.2	61.6	80.5	25.5	31.3	25.6	27.0	112.5	55.3	116.9	*	824.2	1979

65.7	71.0	52.8	36.3	61.3	31.6	37.6	44.9	56.3	42.6	74.8	54.9	*	629.9	

ETP mensuelles en MAINE et LOIRE - 1967/79

13.3	19.9	43.6	67.4	91.3	118.4	135.0	99.7	69.7	45.6	17.1	8.7	*	729.7	1967
12.8	15.2	37.3	71.6	82.6	104.0	120.6	85.7	65.2	40.9	19.1	3.6	*	663.6	1968
14.5	13.1	34.0	71.4	87.4	106.7	132.8	103.6	64.2	59.1	21.0	6.5	*	714.3	1969
12.7	16.9	29.9	52.0	99.7	120.2	116.6	95.6	81.6	40.5	26.3	5.5	*	697.5	1970
13.2	17.2	30.1	73.7	81.9	88.3	144.0	98.1	81.5	51.1	19.5	10.1	*	708.7	1971
9.6	17.4	49.8	54.4	72.3	92.3	114.0	94.3	68.8	42.7	19.9	14.4	*	649.9	1972
8.1	11.1	45.9	53.5	90.1	131.2	109.1	111.0	85.2	41.2	21.4	9.3	*	717.1	1973
17.1	23.0	37.9	67.9	92.6	123.4	129.1	122.0	67.7	30.4	20.4	16.5	*	748.0	1974
15.2	27.6	29.6	64.2	75.9	123.0	136.4	117.7	65.7	39.9	17.9	4.3	*	717.4	1975
11.4	18.0	37.7	76.1	106.6	163.2	130.6	116.9	72.2	42.5	18.0	8.4	*	801.6	1976
11.3	21.8	44.2	62.8	80.2	87.0	102.5	105.1	81.7	48.1	22.5	16.0	*	683.2	1977
10.4	16.3	38.3	50.6	83.9	101.4	106.2	106.1	86.2	46.3	27.4	12.4	*	685.5	1978
3.1	14.5	31.6	51.4	88.8	104.7	126.9	88.3	78.8	36.5	21.9	15.5	*	662.0	1979

11.7	17.8	37.7	62.8	87.2	112.6	123.4	103.4	74.5	43.4	21.0	10.5	*	706.0	

TABLEAU 9

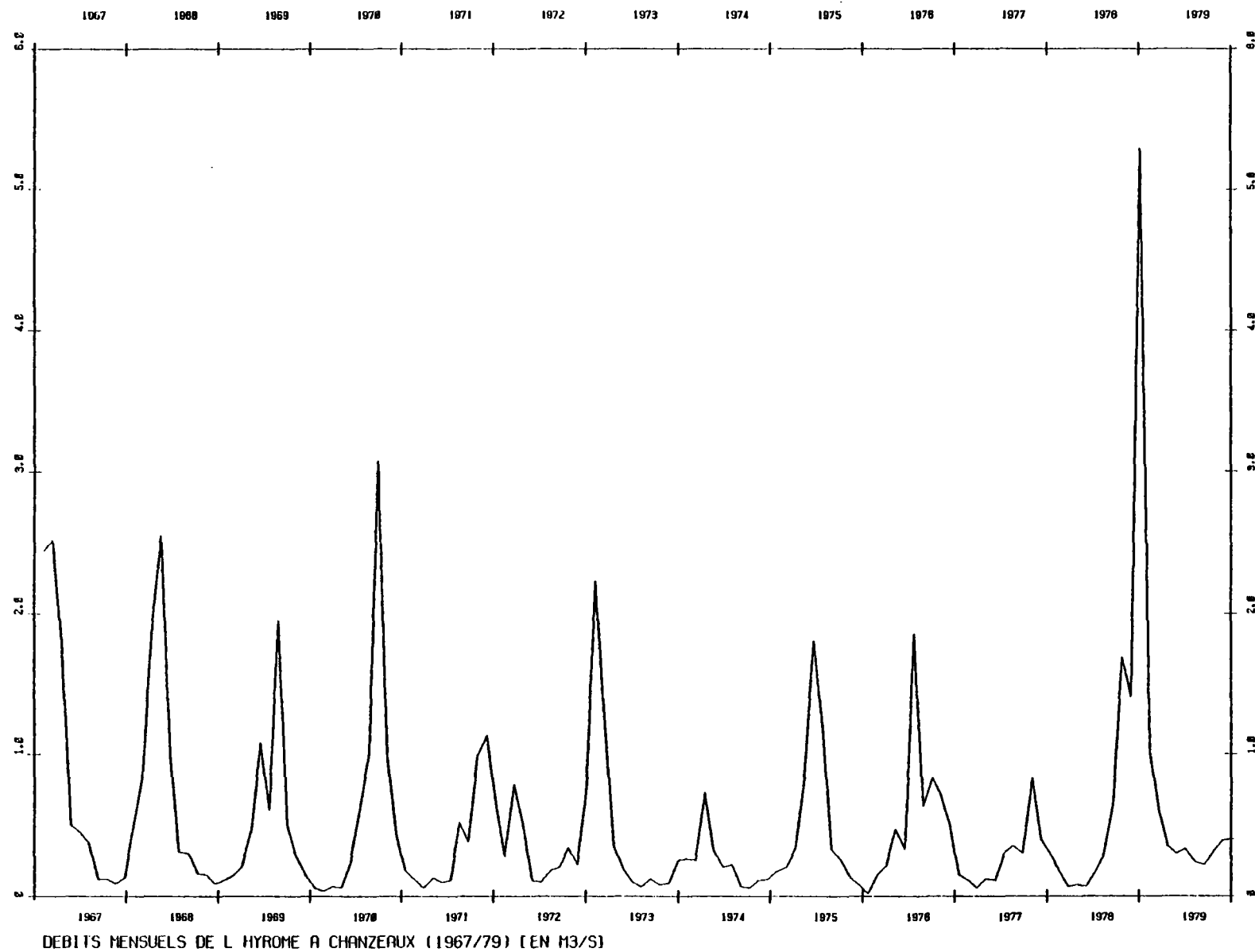


FIGURE 11

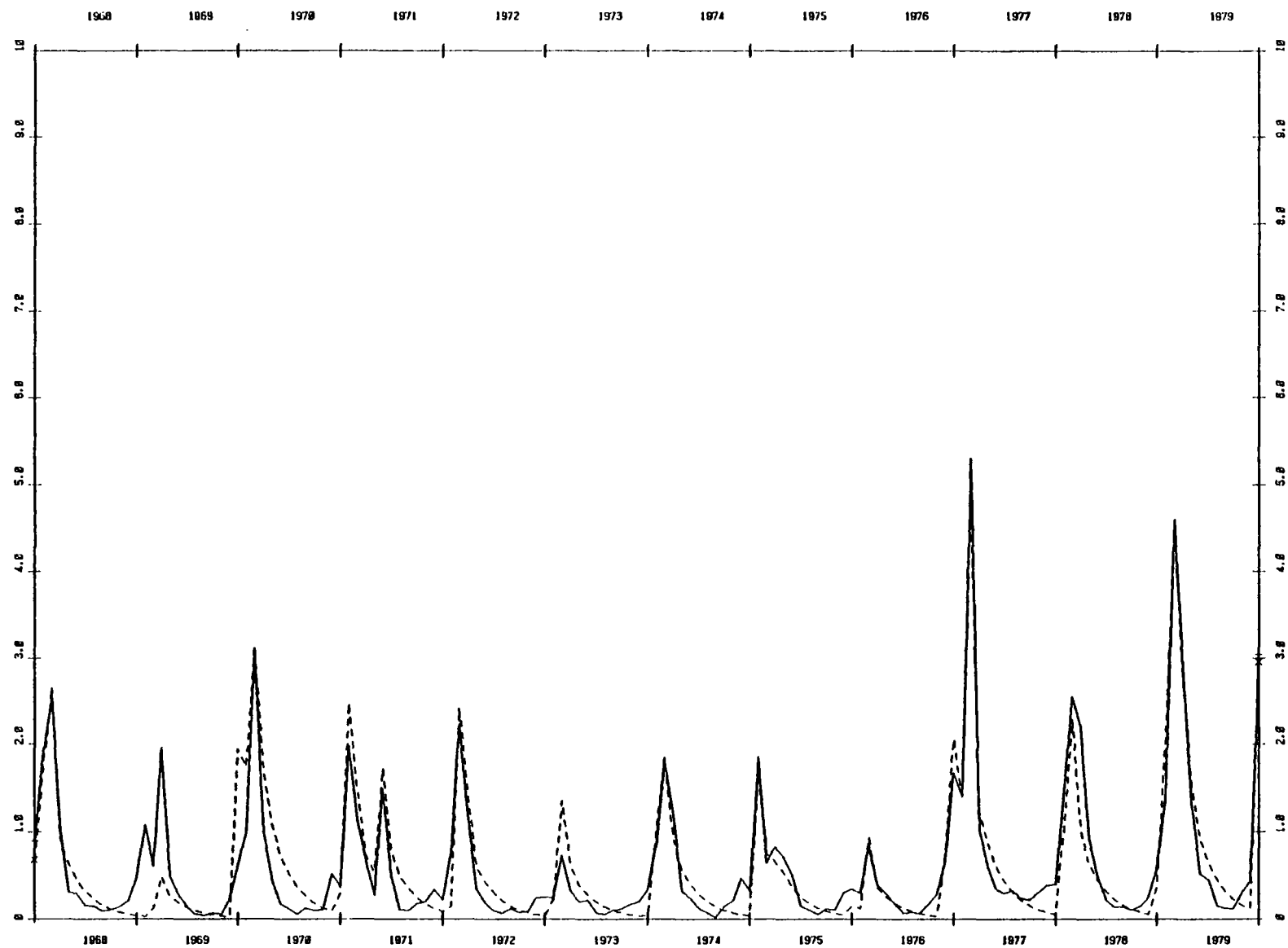


FIGURE 12 - CALAGE DU MODELE MENSUEL

—— débits observés
 ---- débits calculés

4. MODELISATION DES DEBITS DE L'YROME

4.1. Modèle mensuel

La figure 12 représente le calage du modèle au pas de temps mensuel. Le coefficient de corrélation est de 0,922 sur 144 valeurs comparées.

Les paramètres du modèle après calage sont les suivants :

- Coefficient de correction sur les pluies : 0 %
- Coefficient de correction sur l'ETP : + 6,5 %
- Capacité de rétention du sol dans la zone soumise à l'évapotranspiration : 107 mm
- Hauteur de pluie mensuelle donnant lieu à des volumes ruisselés et percolés égaux : 20,4 mm
- Temps de "demi-remontée" (temps de concentration) : 0,38 mois
- Temps de demi-tarissement souterrain : 2 mois
- Surface du bassin versant : 140 km²

La comparaison des valeurs moyennes et extrêmes des débits calculés et observés est indiquée dans le tableau 10 et reflète l'équilibre entre écoulements totaux observés et simulés sur la période de calage avec un écart de 2 %.

	OBSERVE	CALCULE
Débit mensuel:		
minimal	0,02	0,02
moyen	0,61	0,62
maximal	5,29	4,88
Ecart-type	0,83	0,84

TABLEAU 10 - Statistiques sur les débits moyens mensuels observés et calculés (en m³/s)

Le tableau 11 présente la décomposition de l'écoulement total à l'exutoire du bassin versant en écoulements rapides et lents. Les écoulements lents résultent des infiltrations profondes vers les nappes et de leur tarissement progressif par décharge dans les cours d'eau.

Année	ÉCOULEMENT				Part de l'écoulement lent %
	LENT	RAPIDE	TOTAL		
			calculé	observé	
1968	78	60	138	139	56,5
1969	27	38	65	119	41,5
1970	116	77	193	134	60,1
1971	91	82	173	141	52,6
1972	60	52	113	108	53,1
1973	41	25	67	53	61,2
1974	63	44	107	109	58,9
1975	54	38	92	107	58,7
1976	39	56	94	94,5	41,5
1977	103	92	195	213	52,8
1978	65	61	126	195	51,6
1979	133	185	318	324	41,8
moyenne	m 73 σ 31	m 68 σ 40	m 140 σ 68	m 145 σ 74	52

TABLEAU 11 - Répartition par année des écoulements en écoulements rapides et lents (en mm) (modèle mensuel)

La part moyenne des écoulements lents dans l'écoulement total est évaluée à 52 % par le modèle au pas de temps mensuel. Il convient toutefois de remarquer que la rapidité de réponse du bassin versant aux pluies n'est pas nécessairement liée à la prédominance des ruissellements sur les écoulements souterrains, mais peut provenir aussi de temps de recharge et de tarissement des nappes relativement courts. Le modèle mensuel prévoit effectivement des temps de demi-montée et de demi-tarissement des nappes de 0,4 et 2 mois respectivement.

4.2. Modèle pentadaire

L'ajustement au pas mensuel donne des résultats satisfaisants, mais montre quelques distorsions lorsque l'on compare l'écoulement calculé à l'écoulement mesuré à la station de Chanzaux pour les années 1969, 1971 et 1978.

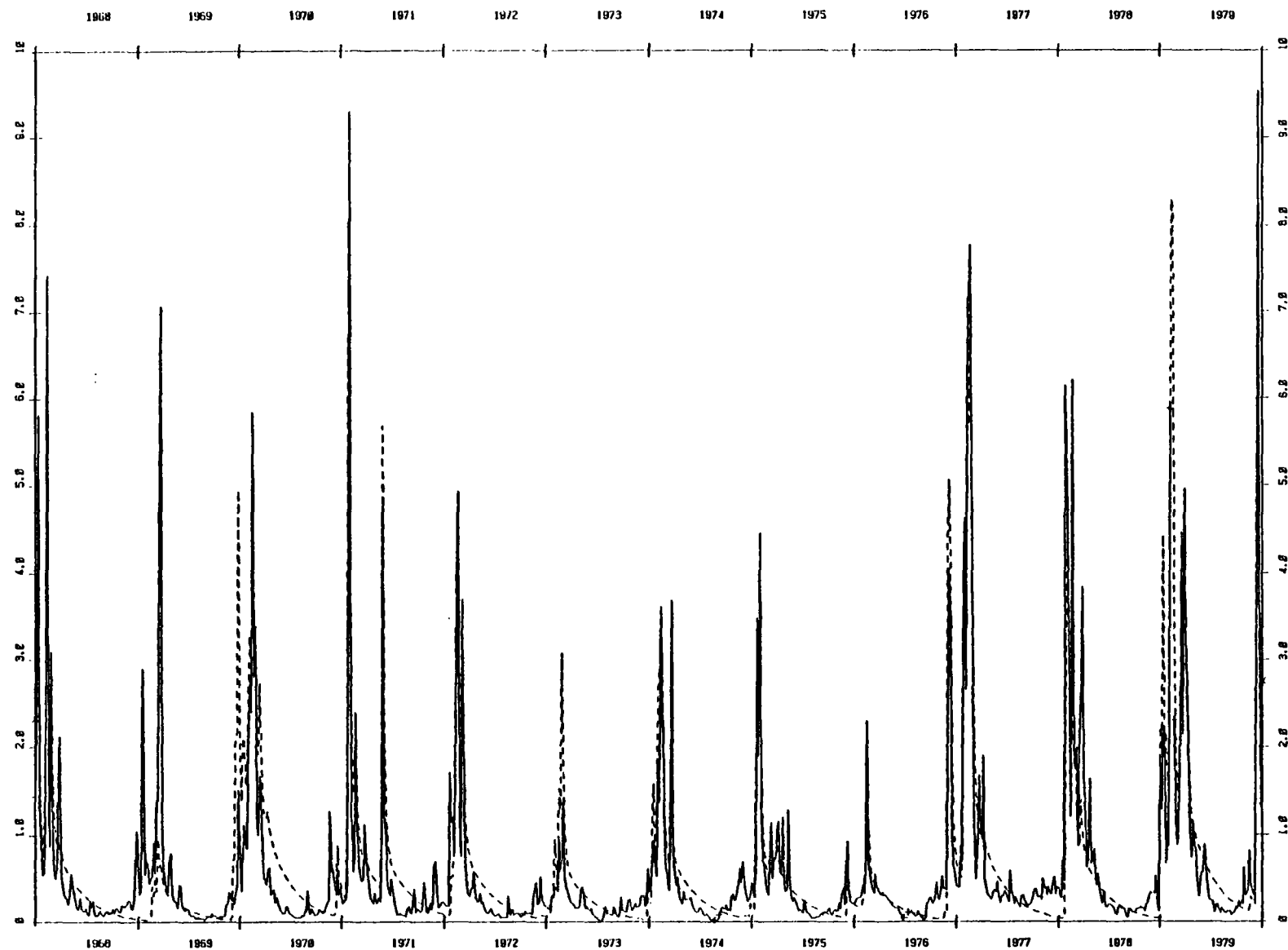


FIGURE 13 - CALAGE DU MODELE PENTADAIRE

—— débits observés
 ---- débits calculés

Disposant de pluies journalières à Chemillé, on a alors réalisé une nouvelle modélisation au pas pentadaire.

Les paramètres du modèle après calage sont les suivants :

- Coefficient de correction sur les pluies : 0 %
- Coefficient de correction sur l'ETP : + 4,4 %
- Capacité de rétention du sol dans la zone soumise à l'évapotranspiration : 102 mm
- Hauteur de pluie (pentadaire) donnant lieu à des volumes ruisselés et percolés égaux : 19,5 mm
- Temps de "demi-montée" (temps de concentration) : 0,60 mois
- Temps de demi-tarissement souterrain : 2,00 mois
- Surface du bassin versant : 140 km²

Le coefficient de corrélation sur 855 valeurs est de 0,837. La valeur plus faible du coefficient de corrélation provient de ce que le nombre de valeurs à ajuster est multipliée par 6 sans qu'interviennent de nouveaux paramètres de calage. Il est plus facile de ne restituer les débits mensuels, soit des volumes écoulés chaque mois, que leur répartition pentade par pentade. La figure 13 compare les valeurs observées et calculées des débits pentadaires de 1968 à 1979. Le tableau 12 compare les valeurs moyennes et extrêmes des séries de débits pentadaires observés et calculés.

	OBSERVE	CALCULE
Débit pentadaire :		
minimal	0,00	0,02
moyen	0,62	0,64
maximal	9,54	7,46
Ecart-type	0,90	0,68

TABLEAU 12 - Statistiques sur les débits moyens pentadaires observés et calculés (en m³/s)

Le modèle de simulation pentadaire restitue de manière satisfaisante les variations extrêmement rapides des débits, si on accepte certaines distorsions sur les débits de pointe.

En effet, l'ajustement des moyennes observées et calculées (0,62 et 0,64 m³/s) sur la période garantit que le modèle restitue bien la totalité des écoulements observés sur le bassin avec un excédent extrêmement faible de 3 %.

Le tableau 13 indique les contributions des composantes lentes et rapides à l'écoulement total calculé par le modèle pentadaire.

Année	ÉCOULEMENT				Part de l'écoulement lent %
	LENT	RAPIDE	TOTAL		
			calculé	observé	
1968	74	71	145	139	51,0
1969	29	46	75	119	38,7
1970	105	94	200	134	52,5
1971	88	93	181	141	48,6
1972	58	62	120	108	48,3
1973	42	32	74	53	56,8
1974	62	54	115	109	53,9
1975	57	47	104	107	54,8
1976	41	64	105	94,5	39,0
1977	95	103	198	213	48,0
1978	61	74	135	195	45,2
1979	120	209	328	324	36,6
Moyenne	m 69	m 77	m 148	m 145	m 47
Ecart-type	27	44	68	74	

TABLEAU 13 - Répartition par année des écoulements en écoulements lents et rapides (en mm) (pentadaire)

5. CONCLUSIONS

La modélisation des débits au pas de temps mensuel et pentadaire a permis de reconstituer assez fidèlement les débits observés à la station de Chanzaux pour la période 1967-1979.

L'apport important de cette modélisation est d'analyser les composantes du cycle de l'eau sur le bassin dont les débits à l'exutoire ne donnent qu'une image globale. Les réactions rapides aux précipitations enregistrées sur les hydrogrammes apparaissent ainsi reliées autant aux ruissellements directs qu'à des processus de recharge et de tarissement des aquifères superficiels très rapides : 0,40 mois pour le temps de montée de la nappe en réponse aux infiltrations et 2 mois pour le tarissement de la moitié des volumes infiltrés pendant la période de précipitations efficaces.

Globalement, l'écoulement lent assimilable au drainage des aquifères superficiels représente 50 % de l'écoulement total à l'exutoire, mais il apparait clairement que ce qui s'infiltré pendant la période annuelle de recharge correspondant à l'hiver est restitué à l'issue de l'étiage et qu'il n'y a pas régulation interannuelle des écoulements par le jeu de variations des réserves des aquifères superficiels.

Cette analyse de l'écoulement donne des aquifères du bassin de l'Hyrôme une image qui confirme celle fournie par l'analyse de caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines et superficielles : aquifères faiblement capacitifs sans extension profonde et sans réserves régulatrices.

VI - CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Les différentes mesures in situ réalisées sur les eaux superficielles et souterraines de la région de Chemillé fournissent un état initial assez complet de l'hydrogéologie superficielle des formations métamorphiques. La nappe phréatique a un comportement propre qui ne traduit pas d'influences d'écoulements profonds aussi bien sur le plan du chimisme que sur celui des paramètres physiques (température et conductivité).

Chimiquement les faciès des eaux superficielles et de la nappe sont identiques et cela doit être interprété comme un indicateur de faible développement en profondeur de l'aquifère, donc de la fracturation utile du substratum précambrien.

Cela est confirmé par la modélisation des débits de l'Hyrôme qui conclut à une lame d'eau moyenne annuelle infiltrée de l'ordre de 70 mm dont la moitié est déjà restituée au réseau de drainage dans les deux mois suivant la période de recharge.

On a affaire ainsi à un aquifère superficiel assez typique d'une lithologie dominée par les micaschistes et leur couverture d'altération à dominante argileuse. Les formations détritiques pliocènes ne semblent pas jouer de rôle régulateur des écoulements et ne doivent constituer finalement que des placages discontinus d'épaisseur réduite.

On ne possède pas de données sur des venues d'eau profonde en forage ; leur occurrence est vraisemblablement d'une probabilité faible, mais cette hypothèse devra être confirmée par des sondages de moyenne profondeur (150 à 200 m). En définitive, cette phase de confirmation des qualités du site sélectionné, confirme sur le plan hydrogéologique l'intérêt de la configuration de type "granite sous schistes" ; les schistes se comportant en effet déjà sur le plan des aquifères superficiels comme un réservoir fissuré médiocre, on peut supposer qu'en profondeur, sous l'effet des contraintes, ce milieu d'une certaine plasticité perd progressivement toute fissuration résiduelle ouverte et donc sa perméabilité utile plus rapidement encore qu'une roche plus compétente comme le granite.

6. ANNEXE HYDROCHIMIE

6.1. LISTE DES POINTS ET RESULTATS D'ANALYSES

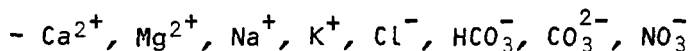
INDR	GR01	CA	MG	NA	K	CL	SO4	HCO3	CO3	NO3	PO4	SI02 *
1C	E.S	22.000	13.500	18.900	1.100	40.500	10.000	98.000	0.000	17.000	0.100	30.000
2C	E.S	16.700	9.100	26.000	3.500	45.600	9.000	55.000	0.000	39.800	0.100	18.000
3C	E.S	24.900	7.100	30.900	9.200	41.800	28.000	92.000	0.000	17.400	1.600	16.000
4C	E.S	38.500	10.100	36.800	14.800	55.800	50.000	125.000	0.000	22.300	0.400	17.000
5C	E.S	31.400	10.300	30.000	10.700	46.500	17.000	122.000	0.000	27.600	2.400	27.000
6C	E.S	40.600	12.300	24.200	9.000	46.400	16.000	171.000	0.000	7.900	0.100	24.000
7C	E.S	21.700	8.200	37.200	2.300	45.500	13.000	113.000	0.000	11.900	0.100	25.000
8C	E.F	29.200	11.400	39.200	10.100	44.300	35.000	104.000	0.000	52.100	0.500	18.000
9C	E.S	13.100	5.300	26.900	5.100	39.000	5.000	61.000	0.000	21.500	0.200	20.000
10C	E.F	54.000	26.500	43.200	3.200	62.300	58.000	195.000	0.000	57.200	0.100	22.000
11C	E.S	17.500	6.400	23.700	3.400	36.000	7.000	79.000	0.000	20.000	0.100	23.000
12C	E.S	14.400	5.700	24.300	4.000	30.500	6.000	73.000	0.000	19.900	0.100	26.000
13C	E.S	16.000	6.300	27.200	7.900	38.000	8.000	76.000	0.000	24.300	0.300	22.000
14C	E.S	31.300	9.500	37.800	10.400	58.000	20.000	140.000	0.000	8.000	0.100	15.000
15C	E.S	88.700	30.000	89.500	1.800	173.000	100.000	235.000	0.000	8.800	0.100	21.000
16C	E.S	22.400	7.700	32.000	7.800	42.600	18.000	92.000	0.000	23.100	2.200	20.000
515	E.F	86.000	28.000	85.000	1.800	160.000	112.000	224.000	0.000	4.000	0.100	19.000
509	E.F	58.000	6.400	14.000	4.000	24.000	27.000	170.000	0.000	1.000	0.100	12.600
513	E.F	42.000	13.200	35.000	1.200	30.000	46.000	162.000	0.000	13.000	0.200	16.500
512	E.F	60.000	15.600	155.000	1.900	164.000	61.000	284.000	0.000	39.000	0.100	11.400
505	E.F	60.000	8.400	56.000	16.600	32.000	38.000	174.000	0.000	104.000	3.400	21.500
506	E.F	38.000	13.000	120.000	3.200	151.000	28.000	12.000	0.000	184.000	0.400	20.200
803	E.S	30.000	10.400	32.000	4.000	64.000	15.000	33.000	0.000	56.000	0.100	24.000
809	E.S	15.000	4.000	58.000	2.400	58.000	28.000	46.000	0.000	34.000	0.900	35.000
805	E.F	34.000	10.200	185.000	4.100	218.000	40.000	102.000	0.000	128.000	0.400	30.400
711	E.F	44.000	17.000	60.000	2.000	69.000	20.000	222.000	0.000	2.000	0.100	22.800
709	E.F	64.000	29.000	95.000	2.600	145.000	68.000	189.000	0.000	6.000	0.300	27.800
307	E.F	44.000	17.600	48.000	1.600	127.000	6.000	15.000	0.000	108.000	0.200	31.600
29	E.F	27.500	10.400	43.000	8.000	69.000	22.000	85.000	0.000	45.000	0.000	35.000
30	E.F	14.000	5.400	40.000	1.600	48.000	15.000	61.000	0.000	32.000	0.000	44.000
31	E.F	32.000	10.800	21.000	4.400	25.000	37.000	80.500	0.000	42.000	0.200	16.500
32	E.F	32.500	13.200	61.000	1.500	52.000	34.000	189.000	0.000	40.000	0.300	18.000
33	E.F	88.000	30.000	108.000	5.800	172.000	132.000	295.000	0.000	29.000	0.700	25.000
34	E.F	6.500	2.200	18.500	0.900	20.000	5.000	21.900	0.000	20.000	0.100	33.000
35	E.F	13.000	6.600	27.000	1.800	28.000	0.100	89.000	0.000	0.100	0.000	20.000
36	E.F	39.500	15.800	24.000	2.000	29.000	40.000	174.000	0.000	0.100	0.000	25.000
37	E.F	15.000	5.100	25.000	12.200	34.000	18.000	73.000	3.000	5.000	0.100	12.500

6.2. TECHNIQUES D'INTERPRETATION

1. Le diagramme de PIPER

. Présentation : Le diagramme de PIPER est un outil de classification des résultats d'analyses d'eau : de lecture aisée, il permet de comparer rapidement les compositions chimiques de différents types d'eau.

Les éléments concernés sont au nombre de 9 :



et doivent être exprimé en *milliéquivalents*^{*} (még.).

Dans une analyse complète d'un échantillon, le nombre de milliéquivalents négatifs doit être égal à celui des milliéquivalents positifs. Dans le cas contraire, la quantité :

$$\text{ER} = 100 \frac{\text{rp} - \text{rn}}{\text{rp} + \text{rn}}$$

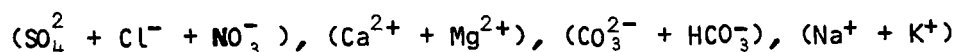
où rp est la somme des milliéquivalents positifs et rn celle des milliéquivalents négatifs, caractérise le déséquilibre ionique.

Une valeur de E supérieure à 5 (en valeur absolue) indique généralement une erreur d'analyse ou de calcul.

. Constructions : Le diagramme (fig. 1) est constitué par :

- deux triangles équilatéraux, l'un pour les anions, l'autre pour les cations ; les côtés de ces triangles, divisés en 10 parties égales, sont gradués en pourcentages d'ions (ou de la somme de deux ions) par rapport à la somme des ions de même signe (en még.),

- un losange, construit sur ces deux triangles, dont les côtés sont gradués (de 0 à 100) en fonction des 4 groupements suivants rapportés également à la somme des ions de même signe :



* L'équivalent d'un élément est la masse de cet élément divisée par sa valence. Le nombre de milliéquivalents pour un élément donné s'obtient en divisant la concentration de l'élément, exprimée en mg/l, par l'équivalent.

DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU

d'après PIPER (U.S. Geological Survey)

Elaboration du diagramme

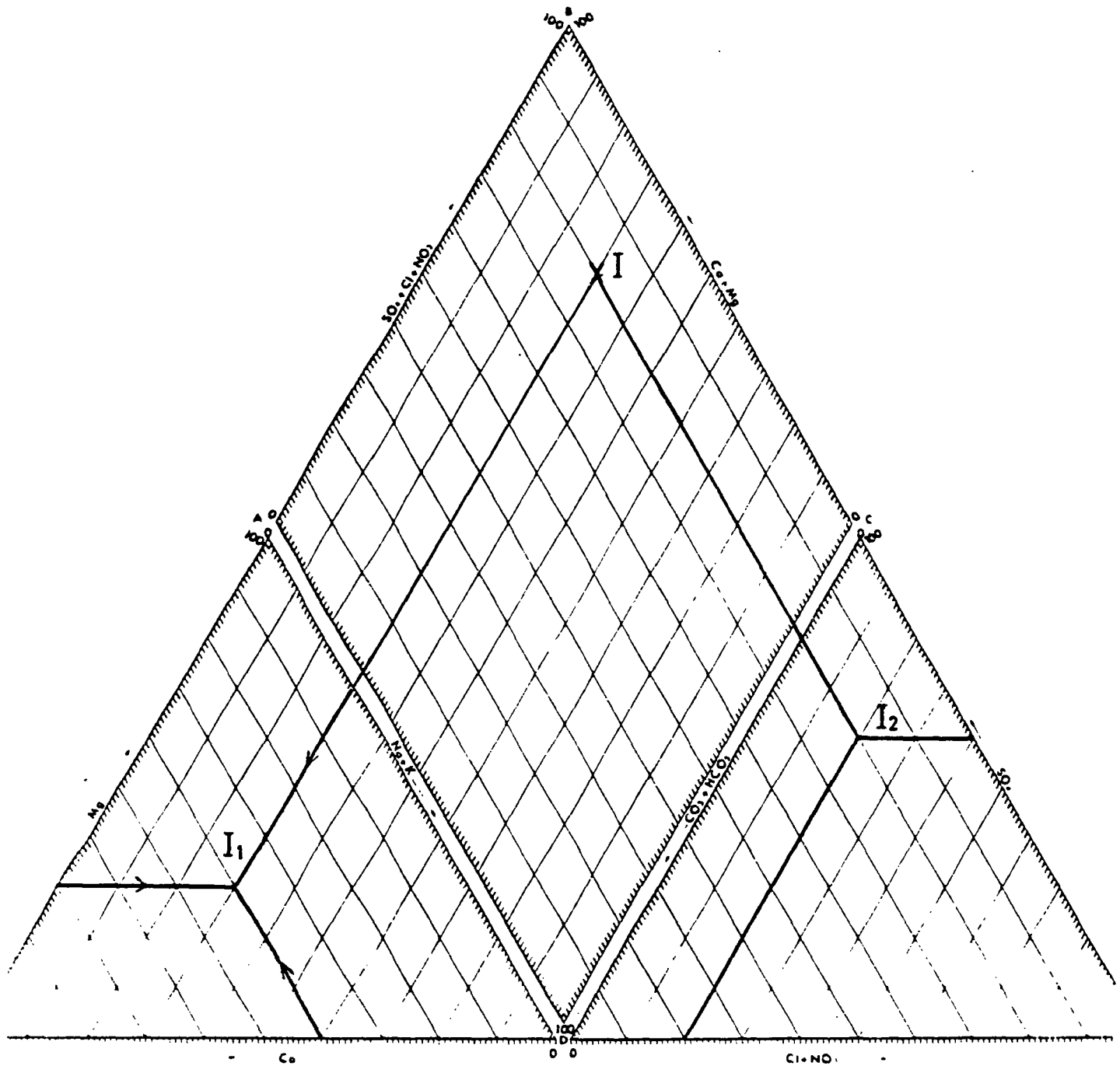


FIGURE 1

. Report des points : Les calculs et le report sont effectués automatiquement à l'aide du programme PIPER.

La position d'un point dans chacun des triangles est déterminée par le rapport de l'ion considéré à la somme totale des ions de même signe (fig. 1, points I.1 et I.2).

Pour obtenir le point représentatif de la composition chimique de l'échantillon, il suffira de mener deux droites issues des 2 points précédents parallèlement aux côtés des triangles ; le point cherché se trouve à l'intersection de ces droites (point I, fig. 1).

. Classification des eaux (fig. 2)

4 grands faciès hydrochimiques peuvent être distingués :

- chlorurés et sulfatés, calciques et magnésiens,
- chlorurés sodiques et potassiques ou sulfatés sodiques,
- bicarbonatés calciques et magnésiens,
- carbonatés sodiques et potassiques.

Des faciès particuliers, souvent anormaux, ont été distingués dans les zones à 90-100 % du pourtour du losange : carbonatés sodiques, hyper-chlorurés calciques ou hyper-sulfatés calciques.

. Autres applications du diagramme

Il peut mettre en évidence certains phénomènes affectant le chimisme des eaux : précipitation de Ca CO_3 , de Ca SO_4 , réduction des sulfates, échanges de bases, mélanges d'eau ...

DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU

d'après PIPER (U.S. Geological Survey)

PROPOSITION DE CLASSIFICATION

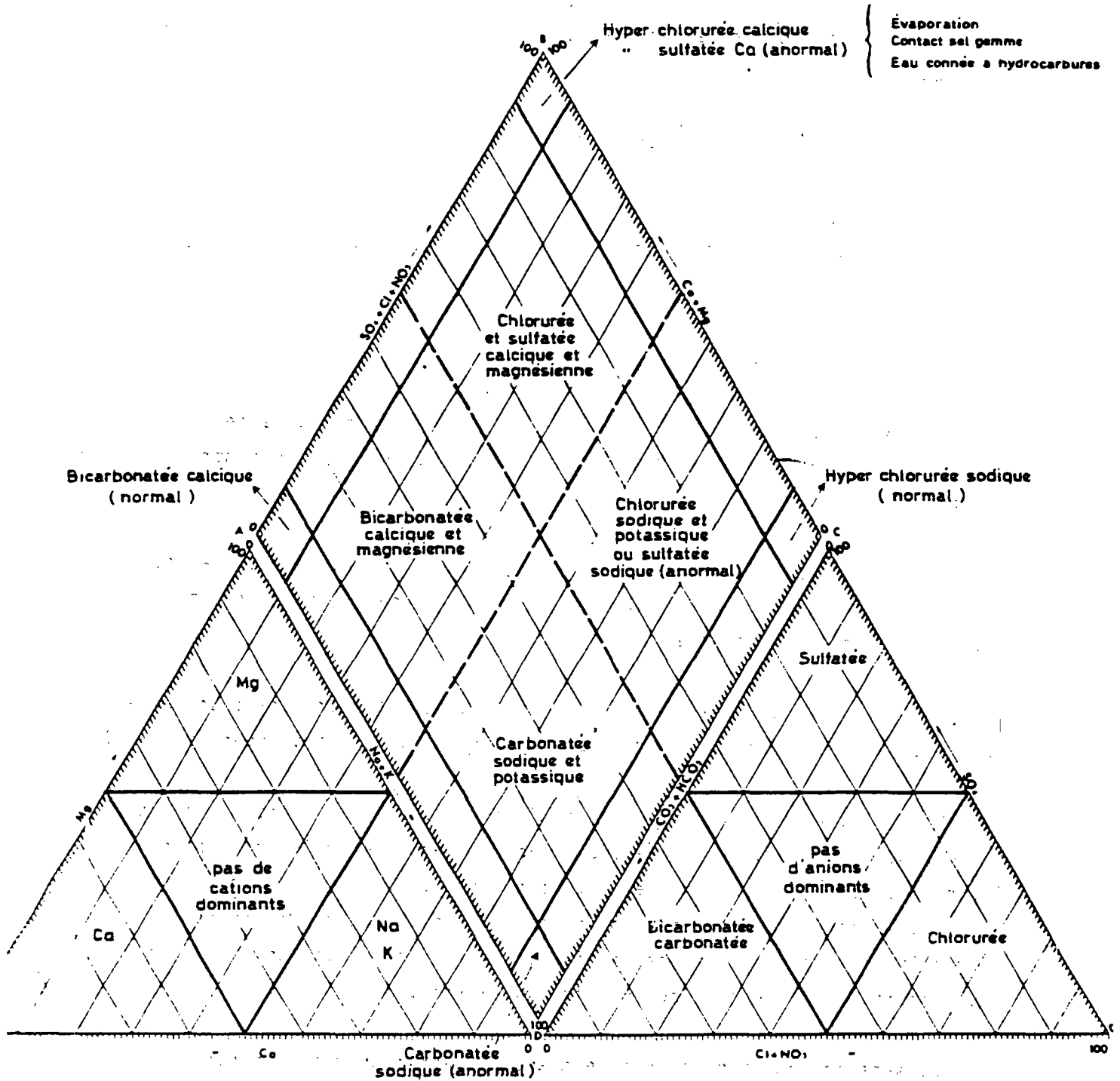


FIGURE 2

2. Analyse de la variance

Elle a pour but la comparaison des moyennes de plusieurs populations*. Il s'agira donc de *tester* l'hypothèse d'égalité des moyennes de ces populations (= "hypothèse nulle").

L'application de cette méthode est en principe subordonnée aux trois conditions suivantes :

- Le facteur étudié suit une *distribution normale* dans chacune des populations.
- Les échantillons* traités sont *aléatoires* et *indépendants* les uns des autres.
- Les populations ont *même variance*.

En pratique, ces conditions, qui n'entrent en jeu que lors de la formulation du test d'hypothèse, peuvent ne pas être respectées, on montre en effet :

- que l'analyse de variance est peu sensible à la "non normalité" des populations (à moins que les distributions de celles-ci ne soient très différentes d'une distribution normale),
- que l'hypothèse d'égalité des variances est d'importance secondaire lorsque les effectifs des échantillons sont tous égaux (ou tout au moins voisins).

Pour tenter de satisfaire les conditions imposées, il sera néanmoins parfois possible d'effectuer une transformation de variables qui assurera une certaine normalité ou une certaine égalité des variances. Une transformation logarithmique s'imposera par exemple pour une distribution loganormale et pourra de surcroît assurer une certaine stabilisation des variances (en particulier s'il y a proportionnalité entre moyenne et écart-type).

Il sera ici question du modèle d'analyse applicable à un nombre limité de populations dans chacune desquelles un échantillon a été prélevé ("modèle fixe" par opposition ou "modèle aléatoire" concernant un nombre quasi-infini de populations).

* un sens statistique

La méthode repose sur la décomposition de la somme des carrés des écarts par rapport à la moyenne générale de l'ensemble des individus en deux sommes :

- une somme des carrés des écarts *factorielle* ou "entre échantillons" définie à partir des écarts entre les moyennes des différents échantillons et la moyenne générale ($= SCE_f$),

- une somme des carrés des écarts *résiduelle* ou "dans les échantillons", fonction des écarts entre les valeurs observées et la moyenne de l'échantillon correspondant ($= SCE_r$).

$$SCE_t = SCE_f + SCE_r$$

soient n le nombre total d'individus et p le nombre d'échantillons. On définit, à partir des sommes précédentes :

- le carré moyen total : $CM_t = \frac{SCE_t}{n - 1}$

- le carré moyen factoriel : $CM_f = \frac{SCE_f}{p - 1}$

- le carré moyen résiduel : $CM_r = \frac{SCE_r}{n - p}$

Quand l'hypothèse nulle H_0 est vraie, on montre que le rapport du carré moyen factoriel au carré moyen résiduel est une valeur observée d'une variable F de Fischer Snedecor à $p - 1$ et $n - p$ degrés de liberté.

$$F_{obs} = \frac{FM_f}{CM_r} \xrightarrow{\text{si } H_0 \text{ vraie}} F(p - 1, n - p)$$

Si l'on admet un risque d'erreur α ($\alpha = 5\%$ ou $\alpha = 1\%$ par ex.), l'hypothèse nulle sera rejetée si :

$$F_{obs} \geq F_{1 - \alpha}$$

3. Analyses en composantes principales

Cette technique peut être utilisée pour tenter de dégager des relations entre une série de variables interdépendantes. Elle aboutit au remplacement des variables initiales par des variables non corrélées, plus faciles à traiter ; ces dernières, combinaisons linéaires des variables initiales, sont appelées *facteurs principaux* ou *composantes principales*.

L'analyse de ces composantes, en particulier le calcul de leur variance, permet souvent de réduire le nombre des composantes à prendre en considération : les composantes sont classées en fonction des valeurs de leur variance, suivant une progression décroissante et les dernières peuvent généralement être négligées (dans certains cas, la première composante, la plus "explicative" peut seule être retenue).

Le calcul des coefficients de corrélation entre les variables originales et les facteurs principaux fournit parfois une interprétation de ceux-ci en mettant en évidence leur liaison avec certaines des variables de départ.

Point de vue mathématique

Les observations relatives à un échantillon de n individus sur lesquels ont été mesurés p caractères (les variables) peuvent être organisées sous la forme d'un tableau à p lignes et n colonnes.

Ce tableau peut théoriquement être représenté en reportant les n points-individus dans l'espace R^p (à p dimensions) des caractères (chaque coordonnée étant alors associée à un caractère).

Un tel mode de représentation n'étant guère d'un grand secours dans l'interprétation des données (ressemblances entre individus, associations entre variables), on est conduit à chercher dans l'espace R^p des sous-espaces de dimension 1, 2, ... $p - 1$ dans lesquels les projections (en général orthogonales) des n points individus forment un "nuage" aussi voisin que possible du "nuage" initial. (Le cas extrême est celui où le tableau initial des données est "décrit" à peu près exhaustivement par un espace de dimension 1).

On montre que ces sous-espaces sont engendrés par les vecteurs propres associés aux valeurs propres de la matrice des covariances des p variables. Plus précisément, les sous-espaces qui donnent les nuages projetés les plus proches du nuage initial, correspondent aux plus grandes valeurs propres de la matrice des covariances. On montre également que les axes définissant ces sous-espaces, axe principaux ou composantes principales, ont pour paramètres directeurs, les composantes des vecteurs propres associés et que les valeurs propres correspondantes, sont les variances des composantes principales. Il apparaît donc que la composante de variance maximale est celle qui traduit le mieux l'information initiale comme il a été indiqué précédemment.

Stockage des déchets radioactifs en formations géologiques

RÉGION DE CHEMILLE

CONFIRMATION DES CARACTÉRISTIQUES FAVORABLES

1^{ère} phase 1^{ère} partie

CARTE DE SITUATION DES POINTS D'EAU

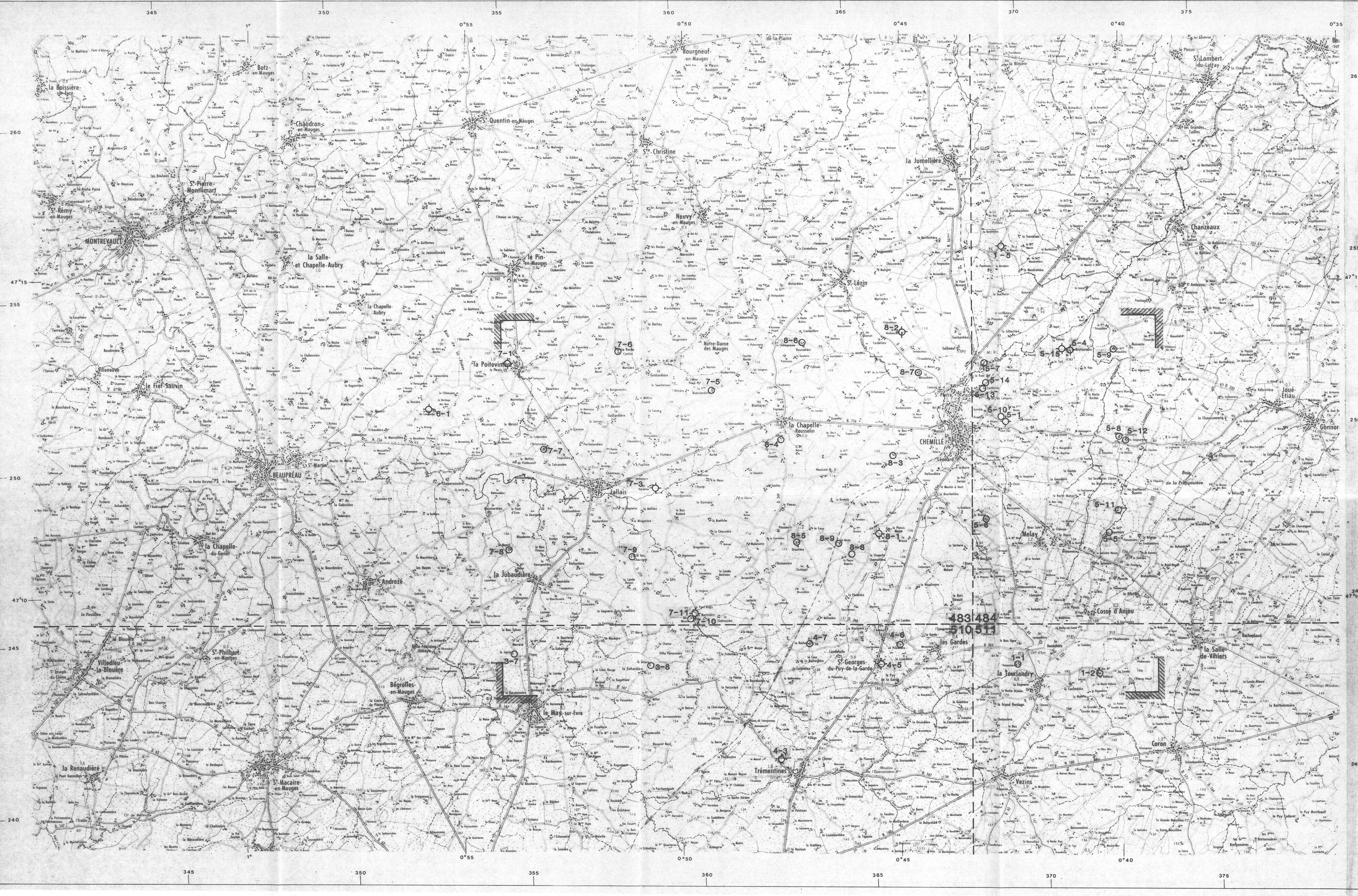
ECHELLE : 1/50 000	LE 1983
DESSINE A NANTES	ANNEXE
SGR/PAL 84-01	1

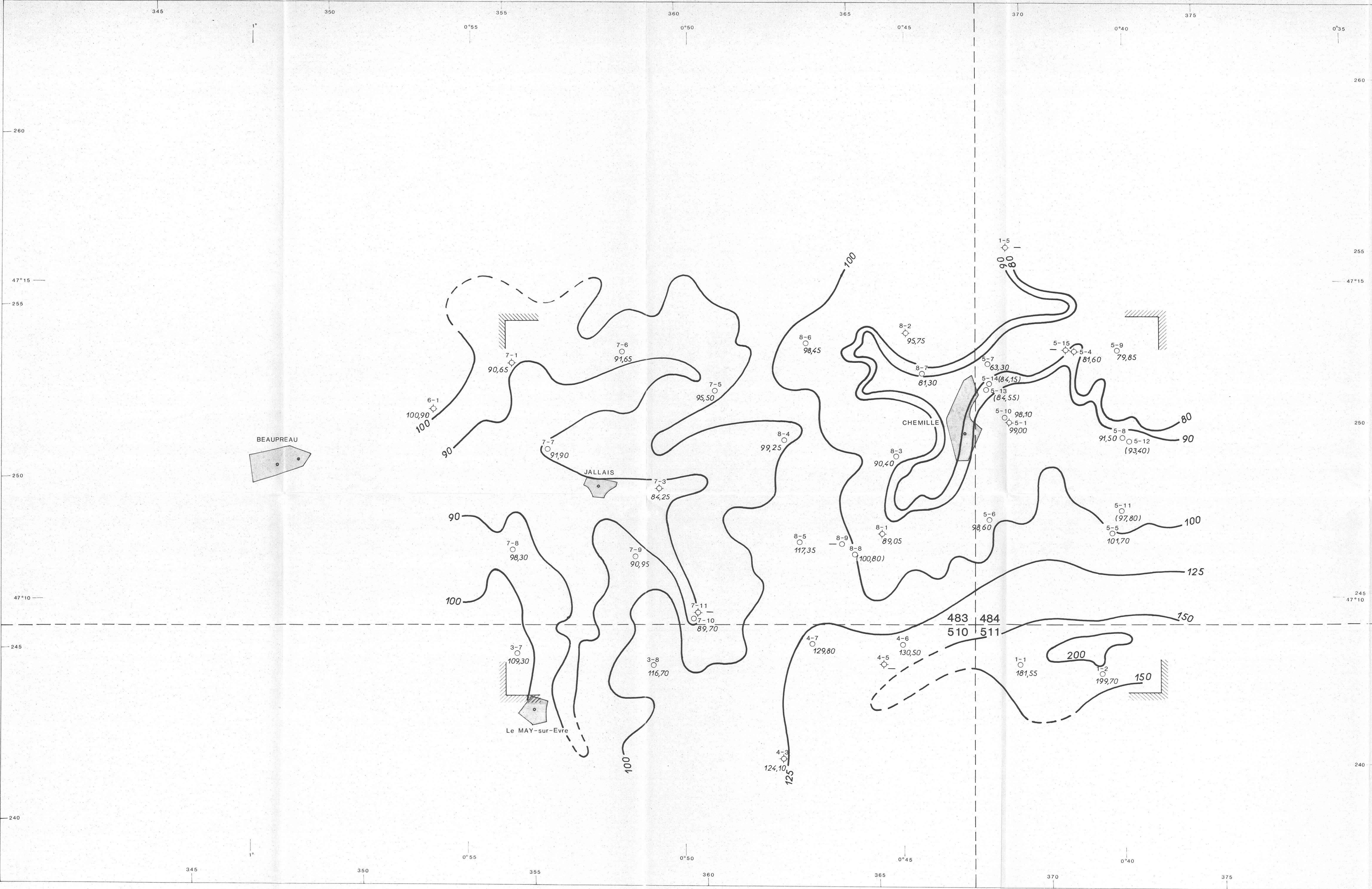
LEGENDE

- 8-2 Forage avec son indice de classement national 483-8-2 et 483-8-3
- 8-3 Puits

Limites de la zone étudiée

Chemillé Thouarcé
483 484
510 511
Cholet Vihiers





COMMISSARIAT A L'ÉNERGIE ATOMIQUE
AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Stockage des déchets radioactifs en formations géologiques

RÉGION DE CHEMILLE

CONFIRMATION DES CARACTÉRISTIQUES FAVORABLES

1^{ère} phase 1^{ère} partie

CARTE PIEZOMETRIQUE

Relevé du 4 au 10 août 1983

RAPPORT BRGM 83 50N

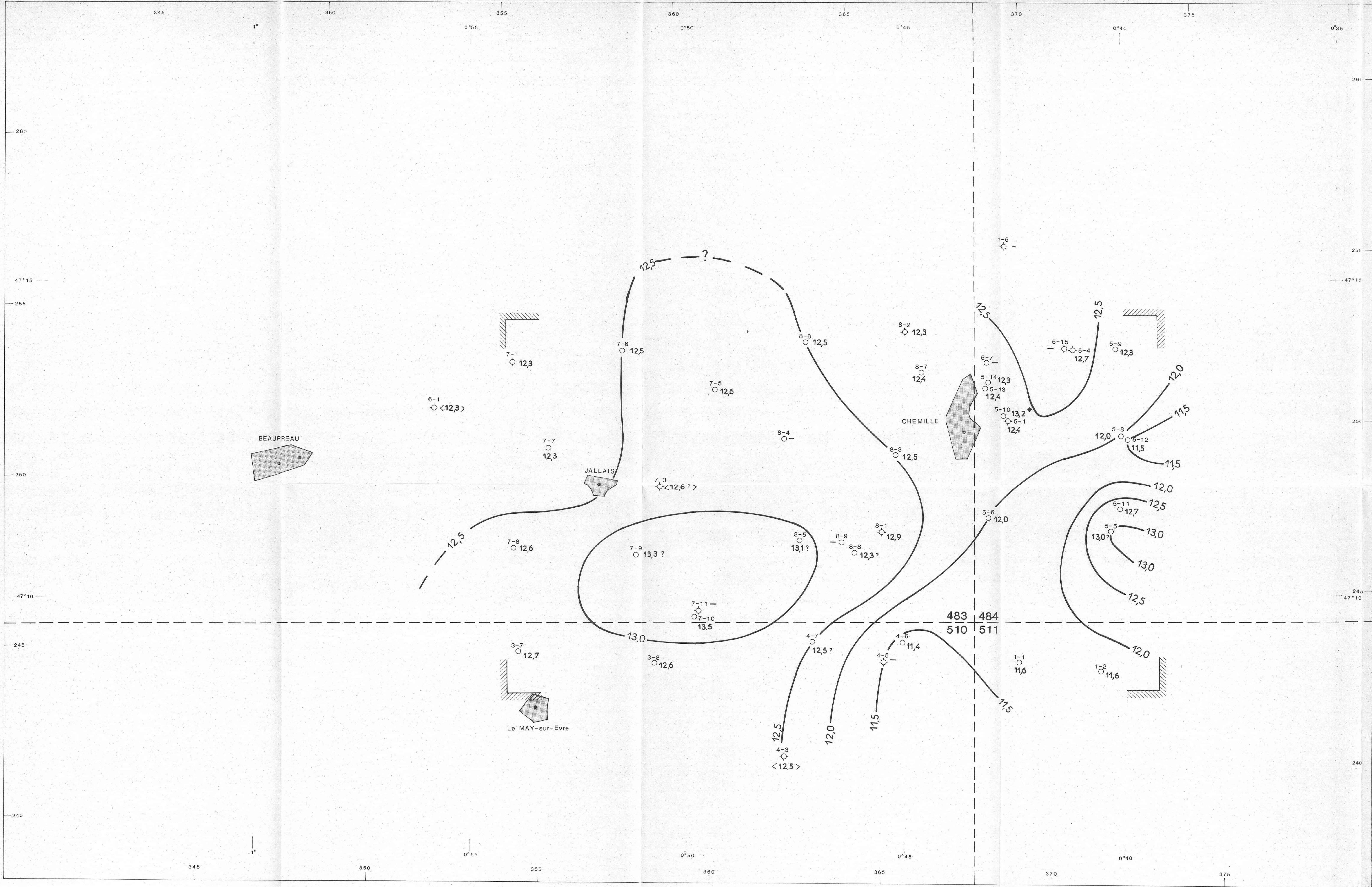
SGR/PAL 84-01

ECHELLE	1/50 000		
DESSINÉ A	NANTES	LE	1983
ANNEXE			2

LEGENDE

- 8-2 Forage) avec son indice la valeur (altitude)
- 95,75) de classement national et de l'équipotentielle
- 8-3 Puits) 483-8-2 et 483-8-3 en m (en italique)
- 90,40
- 100 Courbe équipotentielle
- 100- Courbe équipotentielle extrapolée ou supposée
- 5-11 Niveau piézométrique mesuré le 30 août 1983
- (97,80)

N.B.: le dessin des équipotentielle tient compte de la topographie



COMMISSARIAT A L'ÉNERGIE ATOMIQUE
AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Stockage des déchets radioactifs en formations géologiques

RÉGION DE CHEMILLE
CONFIRMATION DES CARACTÉRISTIQUES FAVORABLES
1^{ère} phase 1^{ère} partie

CARTE DES TEMPERATURES

RAPPORT BRGM 83 5GN

ECHELLE 1/50 000
DESSINÉ A NANTES LE 1983
ANNEXE

SGR / PAL 84-01

3

LEGENDE

8-2
○
12,3

8-3
○
12,5

Forage

Puits

avec son indice
de classement national

et
483-8-2 et 483-8-3

la valeur
de la température
en ° C

12,5

Courbe isotherme

12,5

Courbe isotherme extrapolée ou supposée

—

absence de mesure ou mesure non représentative

12,3 ?

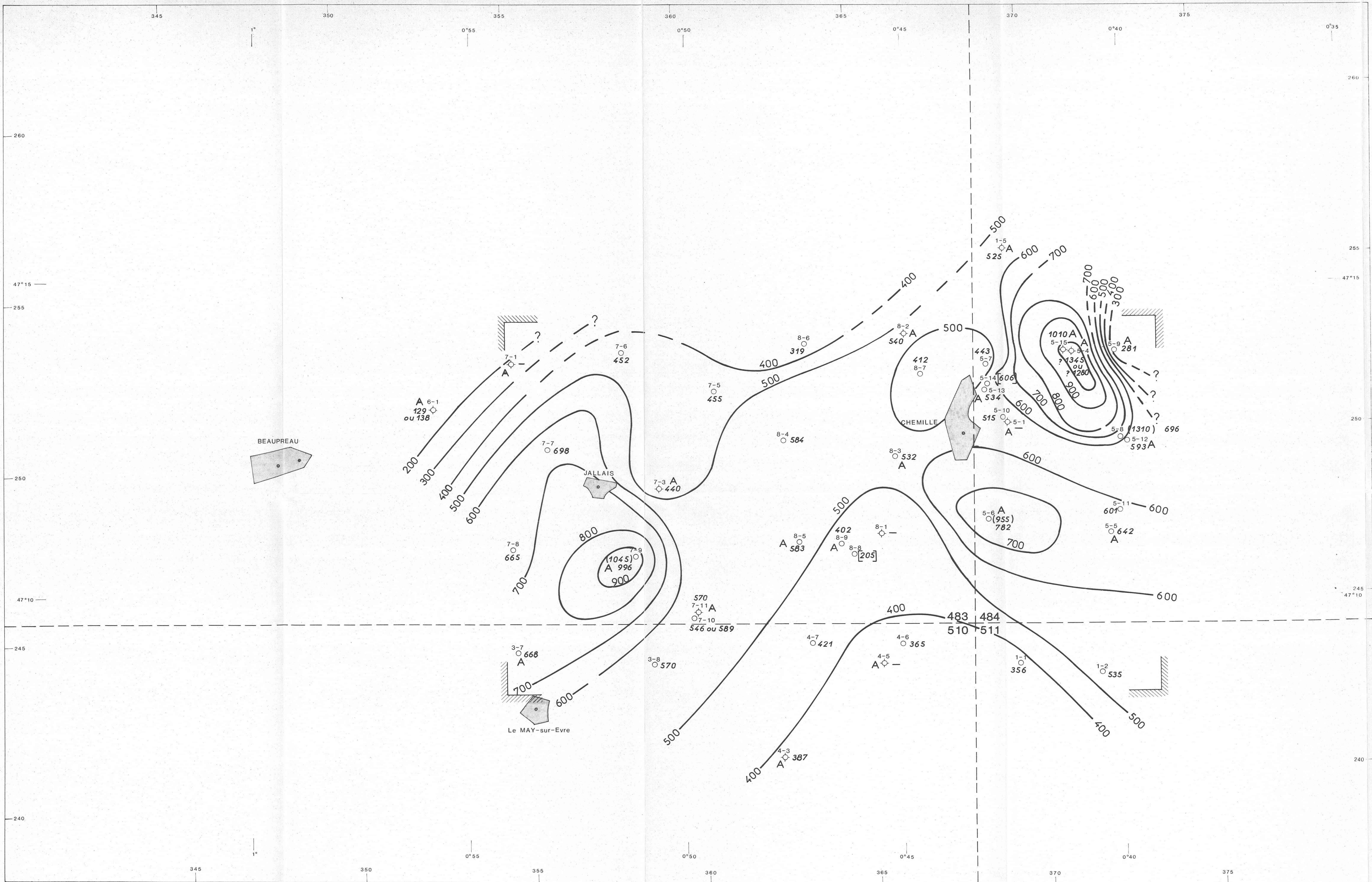
valeur discutable, mais paraissant représentative (utilisée)

< 12,3 >

température de surface paraissant représentative (utilisée)

13,2*

valeur non utilisée singulière



COMMISSARIAT A L'ÉNERGIE ATOMIQUE
AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Stockage des déchets radioactifs en formations géologiques

RÉGION DE CHEMILLE

CONFIRMATION DES CARACTÉRISTIQUES FAVORABLES

1^{ère} phase 1^{ère} partie

CARTE DES CONDUCTIVITES

RAPPORT BRGM 83 SGN	ECHELLE 1/50 000	DESSINE A NANTES	LE	1983
SGR / PAL 84 - 01	ANNEXE			4

LEGENDE

- 8-2 Forage } avec son indice de classement national et la valeur de la conductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C (en italique)
- 8-3 Puits } 483-8-2 et 483-8-3
- 400 Courbe d'égale conductivité
- 400 Courbe d'égale conductivité extrapolée ou supposée
- absence de mesure
- 1280 ? valeur douteuse ou inexplicable (non utilisée)
- 129 ou 138 deux valeurs utilisées pour le même point
- (955) valeur non utilisée (dans le cas où deux mesures existent pour le même point)
- [205] valeur non utilisée mais paraissant valable
- A point d'eau ayant fait l'objet d'une analyse chimique de type I

Stockage des déchets radioactifs en formations géologiques

RÉGION DE CHEMILLE

CONFIRMATION DES CARACTÉRISTIQUES FAVORABLES

1^{ère} phase 1^{ère} partie

Eaux de Surface

TEMPÉRATURES

CONDUCTIVITÉS

RAPPORT BRGM 83 SGN

SGR / PAL 84-01

ECHELLE : 1/50 000	
DESSINE A NANTES	LE 1983
ANNEXE	5

LEGENDE

- 8-2 Forage } avec son indice
8-3 Puits } de classement national
483-8-2 et 483-8-3
- Point de mesure d'eau de surface
262 14,3 - température en °C
conductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C
- 18 Courbe isotherme indicative (15°C et 18°C)

