

BILAN DES FLUX TELLURIQUES
EN MANCHE

F. TURMET
Maîtrise de Géologie, 1998
Université de Caen.

Rapport de Stage Professionnel.

BILAN DES FLUX TELLURIQUES EN MANCHE

F. TURMET
Maîtrise de Géologie, 1998
Université de Caen.

Rapport de Stage Professionnel.

SOMMAIRE.



INTRODUCTION, PRESENTATION GENERALE	2
1. MATÉRIELS ET MÉTHODES	4
1.1. LA BANQUE DE DONNÉES HYDROMÉTRIQUES :	4
1.1.1. <i>Le contenu</i>	4
1.1.2. <i>Provenance</i>	4
1.1.3. <i>Elaboration</i>	5
1.2. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNÉES:	6
1.2.1. <i>Principes de reconstitution des historiques</i>	6
1.2.2. <i>L'étude du cycle de l'eau</i>	8
1.2.2.1. Notion de climatologie : Climat et précipitations	8
1.2.2.2. Les précipitations atmosphériques	9
Origine et facteurs dictant les précipitations	9
Les différents types de précipitations, définition et mesures	10
1.2.2.3. L'eau à la surface du sol :	10
L'évapotranspiration	11
Le ruissellement ou l'écoulement de surface et l'infiltration	12
1.2.2.4. Notion de bassin versant et d'hydrosystème	14
1.2.2.5. Conclusion, bilan dans l'hydrosystème	15
1.2.3. <i>Modèles hydrodynamiques et types d'aquifères associés, Aide à la détermination du choix des stations</i>	17
1.2.3.1. <i>Tendance générale des bassins versants français de la Manche</i>	17
1.2.3.2. <i>Détails des débits mensuelles interannuels, plusieurs comportements hydrologiques différents</i>	18
Les nappes libres	20
Les nappes captives	22
1.2.3.4. <i>Conclusion sur les critères de recherche des stations "ciblées"</i>	24
1.3. ESTIMATION DES FLUX, RECONSTITUTION DES DÉBITS BRUTS	25
1.3.1. <i>Principe d'élaboration des cartes</i>	25
1.3.2. <i>Méthode, les différentes étapes</i>	25
1.3.3. <i>Condition de réalisation des cartes d'isoruissellement</i>	27
1.3.3.1. Condition propre à la banque de données hydrométriques :	27
1.3.3.2. Condition propre au logiciel <i>Surfer</i> :	27
1.3.3.3. L'élaboration des fichiers	29
2. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	31
2.1. RÉSULTATS OBTENUS D'APRÈS LES CARTES RÉALISÉES	31
2.1.1. <i>Méthodes et principes</i>	31
2.1.2. <i>Résultats</i>	31
2.2. DISCUSSION SUR LES LIMITES DE LA MÉTHODE	31
2.2.1. <i>Erreurs réalisées sur les cartes d'isoruissellement</i>	31
2.2.2. <i>Erreurs sur la reconstitution</i>	32
2.2.2.1. Erreurs sur la lecture de la carte réalisée	32
2.2.2.2. Erreurs sur les calculs de la superficie des bassins versants	33
2.3. CONCLUSION SUR LA QUALITÉ DES RÉSULTATS OBTENUS	33
3. CONCLUSION DE L'ÉTUDE ET PERSPECTIVES	34
BIBLIOGRAPHIE	35
CONTACTS ET REMERCIEMENTS	36
ANNEXES	

Introduction, présentation générale ...

Dans le cadre du programme de recherche scientifique : "Contribution du puits des carbonates au bilan du cycle du carbone en Manche", du Groupe de Recherche Manche, il a été souhaité d'établir un bilan physico-chimique de la production sédimentaire carbonatée à l'échelle de la mer de la Manche. Ce travail de recherche fondamentale, a pour but de cerner les raisons pour lesquelles la mer de la Manche est le seul espace maritime à cette latitude à présenter de telles teneurs excédentaires en carbonates dans ses sédiments.

Plusieurs pistes de recherche ont été envisagées afin de trouver l'origine de cette anomalie en carbonates de la plate-forme Manche, qui de part sa latitude et sa configuration présente des taux qui ne se rencontrent que sur les plates-formes des zones intertropicales.

.Une origine biologique : Il s'agit là d'une piste encore assez vague puisque la production planctonique et sa contribution au puits carbonaté restent des éléments relativement peu connus. Certes, la production biologique autant benthique que planctonique est importante mais les études mettant en évidence l'élaboration ou le piégeage des carbonates par les organismes, se cantonnent à des études locales, notamment la mise en relation $\text{CaCO}_3/\text{CO}_2$ sur les organismes benthiques calciques (Colonies d'ophiures et Mollusques, ...).

.L'érosion côtière ainsi que l'histoire géologique du bassin. Le cycle d'évolution du bassin témoigne d'une succession verticale de dépôts carbonatés et semble apparemment dépourvu de subsidence. Il est composé essentiellement de dépôts actuels Holocène.

.Une origine hydrochimique : Le flux résiduel Entrées/Sorties sur une coupe synoptique en Manche Ouest a déjà fait l'objet d'une étude sur un modèle numérique. La campagne "Flux Manche 1" a permis plusieurs mesures du Ca^{2+} dissous ou particulaires sur la radiale Ile de Wight - Cherbourg. "Flux Manche 2" devra réaliser de multiples mesures mais en utilisant cette fois ci le Ca^{2+} comme piègeur ou relâcheur de polluants (Cu, Mn, ...). Cette campagne permettra de déterminer la contribution et la signature des eaux atlantiques en mer de la Manche sur une radiale Brest - Cap Lizard. De plus, l'analyse des rapports Mg/Ca caractérisés par des temps d'échange longs peut permettre de déterminer l'origine de certains flux (signature des eaux atlantique, Seine, ...).

. Une origine tellurique : Pour cela, il est nécessaire de s'intéresser plus particulièrement à l'étude des apports carbonatés continentaux constants afin de vérifier s'il ne contribue pas eux aussi, à l'anomalie constatée en carbonates. Il s'agit donc de quantifier le volume moyen annuel de calcium dissous d'origine tellurique apporté par les eaux douces, de constater son influence et de déterminer si oui ou non, il tient une part prépondérante dans le développement de l'anomalie en carbonates.

L'appréciation des débits des principaux cours d'eau qui se jettent dans la mer de la Manche est une préoccupation importante afin d'estimer la contribution tellurique aux apports en toutes sortes d'éléments, notamment dans le cas qui nous intéresse plus particulièrement, en calcium dissous. Cet ouvrage réunit donc les éléments d'une étude qui a eu pour but de réaliser une estimation des débits liquides aux exutoires d'un maximum de fleuves et rivières principales sur les côtes Françaises et de Grande Bretagne.

A cet effet, l'élaboration de plusieurs cartes a été nécessaire. Le grand nombre de stations de mesure sur les principaux cours d'eau Français et Anglais d'une part, la validité des chiffres traités du fait des longues périodes d'études d'autre part, permettent de dresser un constat des flux en Manche évaluant un débit moyen interannuel théorique à chaque embouchure des fleuves et rivières concernés.

De plus, les mesures mensuelles fournissent des cartes et des graphiques qui permettent de comprendre, d'analyser et de modéliser le comportement des différents cours d'eau et de leur hydrosystème en fonction des contextes climatologiques, géologiques et topographiques des terrains drainés. Les paramètres ruissellement, pluviométrie et évapotranspiration, apparaissent alors toujours en étroite relation.

Les cartes ont été réalisées à l'échelle des grands bassins versants de la Manche qui drainent les territoires de France et de Grande-Bretagne (Cf. Annexe I p. 2 et Annexe II p.31). Elles ont été établies en collaboration avec les différents services régionaux (Direction Régionale de l'Environnement / Service Eau et Milieux Aquatiques, Institute of hydrology - British Geological Survey) à partir des données disponibles et pour des périodes d'études au moins supérieures à 10 ans.

En complément des cartes, cet ouvrage présente de manière détaillée :

- Les caractéristiques prises en compte des points de mesures constituant la banque de données hydrométriques ayant servi à l'estimation des différents débits.
- Toute la méthodologie suivie pour la mise à jour des cartes.
- Des rappels essentiels en hydrogéologie afin de mieux comprendre le fonctionnement de l'hydrosystème à l'intérieur même d'un bassin versant et pour apprécier au mieux un bilan hydrologique.
- Les différentes cartes.
- De nombreux commentaires sur l'interprétation et la validité des résultats obtenus.
- Des conclusions sur les résultats obtenus.

1. Matériels et méthodes.

L'objectif principal est l'élaboration de cartes présentant des valeurs chiffrées de débits bruts moyens interannuels aux embouchures de chaque principaux cours d'eau appartenant aux bassins versants de la mer de la Manche. Pour cela, une série de plusieurs cartes servant de support de travail ont été établies à l'aide du logiciel *Surfer* : il s'agit de cartes d'isourissement exprimé en mm.an^{-1} ou en $\text{l.sec}^{-1}.\text{km}^{-2}$ de bassin versant.

1.1. La banque de données hydrométriques :

1.1.1. Le contenu.

Afin de mener au mieux l'étude en question, la banque de données hydrométriques nécessite de comporter des paramètres précis. Les paramètres pris en compte sont détaillés ci-après :

- Les noms respectifs de la station de jaugeage et du cours d'eau mesuré.
- Une localisation précise de la station en coordonnées de référence (Lambert II étendu).
- La superficie en km^2 du bassin versant en amont de la station de jaugeage.
- La période de mesure des flux, d'étude et d'observation de la station.

Les valeurs de débits en $\text{m}^3.\text{sec}^{-1}$ transformées respectivement en $\text{l.sec}^{-1}.\text{Km}^{-2}$ puis en mm . Ces valeurs de débits seront au mieux sous la forme de moyennes mensuelles annuelles sinon en moyennes mensuelles interannuelles pour les stations Françaises ou seulement sous la forme d'une moyenne interannuelle avant 1985 puis détaillée en moyenne annuelle de 1985 à 1995 pour l'Angleterre.

Code	Rivière	Station	BV (Km^2)	Début	Fin	Coord Lambert		Module			Débits bruts mensuels interannuels			
						X Coord	Y Coord	$\text{m}^3.\text{sec}^{-1}$	$\text{l.sec}^{-1}.\text{km}^{-2}$	mm	Jan	Fév	Mars	...
I3612010	LAIZE	St Germain le Vasson	96	73	97	405800	2448450	0,46	4,75	149,83	1,30	1,37	1,14	...
I3712010	ODON	Epinay s/Odon	76,3	91	97	384250	2456950	0,59	7,78	245,54	2,10	1,68	0,93	...
I3521010	ORNE	Grimbosq	2230	65	87	395100	2452000	10,19	4,57	144,21	38,60	47,10	33,80	...
I3521020	ORNE	Thury Harcourt	2166	85	97	393600	2447300	9,98	4,61	145,41	49,23	37,10	29,30	...
I3621010	ORNE	May s/Orne	2500	83	97	401100	2460300	10,73	4,29	135,39	55,90	45,10	32,00	...
I3741010	ORNE	Caen	2710	90	97	403620	2464740	12,14	4,48	141,32	60,22	49,24	34,29	...

Fig. 1 Illustration d'une partie de la Banque de données hydrométriques.

1.1.2. Provenance.

La plupart des données hydrométriques pour la France proviennent des services de la DIREN/S.E.M.A de Basse Normandie (valeurs pour les régions Nord-Pas-de-Calais, Picardie, Haute et Basse Normandie et Bretagne). Des investigations auprès des autres DIREN/S.E.M.A et Agences de l'eau des régions et bassins versants concernés ont été nécessaires afin d'obtenir des résultats complémentaires, notamment pour le positionnement des stations de jaugeage en coordonnées Lambert II étendu ainsi que pour les valeurs des superficies des bassins versants en amont des stations, lesquelles ont parfois dû être calculées par planimétrie à partir de cartes du réseau hydrographique fourni par les organismes cités précédemment. Par ailleurs, le Service Maritime de la Seine-Maritime (3ème section) / Service de la Navigation de la Seine (4ème section) a permis de réunir une chronique de mesure des débits de la Seine qui s'étend sur plus de 50 années. L'intérêt tout particulier pour une aussi longue période de

mesure réside dans le fait que la Seine représente environ 55% des débits liquides français en mer de la Manche pour un bassin versant qui correspond à 67% de la superficie totale française drainée vers la Manche. Il est donc impératif de connaître précisément et sur la période d'étude la plus longue possible, la lame d'eau écoulée par la Seine.

La coopération à cette étude de l'Institute of Hydrology et du British Geological Survey a permis d'obtenir les mesures des débits des principales rivières du sud de l'Angleterre ainsi que la superficie des bassins versants en amont des stations de jaugeage. Ces valeurs de débits sont accompagnées, pour chaque point de mesure, d'une valeur des précipitations et des pertes (évapotranspirations). Ceci a permis sur la même zone d'étude et à partir des mêmes points de mesure, de réaliser plusieurs cartes afin de mettre en relation Ruissellement / Précipitation / Evapotranspiration (Cf. Annexe II p 33-38). L'Environment Agency a permis l'acquisition de cartes du réseau hydrographique.

1.1.3. Elaboration.

Dans tous les cas, l'écoulement correspond à la quantité d'eau circulant dans le réseau hydrographique mesurée aux stations de jaugeage. Il s'agit de la collecte du ruissellement (qui échappe à l'infiltration et à l'évapotranspiration) et du déversement des nappes souterraines (déversement des réserves emmagasinées dans l'aquifère). Cette mesure est effectuée en continu, le volume total d'eau qui traverse une section droite du lit de la rivière au niveau de la station de jaugeage est alors appelé "débit brut instantané". Il est exprimé en $m^3 \cdot sec^{-1}$. Par souci de comparaison et de compatibilité des mesures de débits entre les différents cours d'eau et bassins versants, il est préférable d'exprimer l'écoulement en unité de volume par unité de surface drainée. Le "débit spécifique" est alors exprimé en $l \cdot sec^{-1} \cdot Km^{-2}$ (q) ou en lame d'eau écoulée, soit une hauteur (h) en mm directement corrélable avec les mesures des précipitations et de l'évapotranspiration : $h = \text{Volume d'eau écoulé} / \text{Surface du Bassin Versant en } km^2$

On a

$$(q) 1 l \cdot sec^{-1} \cdot Km^{-2} = 1 m^3 \cdot sec^{-1} \times \frac{10^3}{\text{surface du bassin versant en } km^2}$$

$$(h) 1 mm \cdot an^{-1} = \frac{q \times t}{10^6} \text{ avec } t = \text{nbre de secondes dans une année } (31,5576 \times 10^6)$$

$$(h) 1 mm \cdot mois^{-1} = \frac{q \times t'}{10^6} \text{ avec } t' = \text{nbre de secondes dans un mois } (2,6 \times 10^6)$$

Dans l'optique de la réalisation des cartes d'isoruissellement, il est impératif de disposer de plus grands nombres de données possibles et ceci afin de réduire l'effet des variations climatiques d'une année sur l'autre définies par l'intermédiaire du coefficient d'hydrolicité qui caractérise un mois ou une année sèche ou humide à faible ou fort débit.

$$\text{coefficient d'hydrolicité} = \frac{\text{Débit moyen annuel}}{\text{Débit moyen interannuel}} \text{ ou } \frac{\text{Débit moyen mensuel}}{\text{Débit moyen mensuel interannuel}}$$

Ainsi, la période minimale de mesure retenue pour l'élaboration des cartes a été au minimum supérieure ou égale à 10 ans. Comme certaines stations de jaugeage présentent des chroniques d'observation inférieure aux 10 ans requis, un traitement statistique de données hydrométriques a été nécessaire (cf. chap. 1.2.). Il a permis la reconstitution des historiques en approchant les valeurs de débits manquants par corrélation avec les mesures d'autres stations. Cette reconstitution n'a été nécessaire seulement pour les valeurs concernant les cours d'eau français, les mesures anglaises fournies ayant au préalable déjà fait l'objet d'un travail de reconstitution.

1.2. Traitement statistique des données :

1.2.1. Principes de reconstitution des historiques.

Les mesures de débits bruts des cours d'eau français constituent pour chaque station de jaugeage, des banques de données numériques établies sous la forme figurée ci dessous :

	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
1974	6	14	7.5	2.18	1.49	0.7	0.37	0.23	0.35	1.72	7.56	3.39
1975	6.5	3.8	4.2	5.56	3.77	0.83	0.33	0.11	0.31	0.24	1	0.79
1976	1.1	2.6	1.7	0.69	0.31	0.12	0.07	0.08	0.24	1.12	2.34	6.82
1977	5.7	11	5.2	3.7	3.01	1.43	0.89	0.57	0.39	0.44	1.59	2.77
1978	5.3	3.3	2	3.8	4.32	0.93	0.54	0.74	0.27	0.25	0.33	2.12
1979	5.7	10	9	7	3.24	1.49	0.42	0.33	0.19	0.42	0.66	3.97

Fig. 2 Exemple : Echantillon des mesures de débits bruts en $m^3 \cdot sec^{-1}$ de la Rance à Rophemel, Côtes-d'Armor.

Pour que le résultat final soit probant (cartes d'isouruisselement), une limite minimale de 10 ans de mesure a été requise. Cependant, nombreux sont les cours d'eau qui ne possèdent pas de stations avec de grandes chroniques de mesures tels que les grands cours d'eau aménagés comme la Rance. Pour toutes les stations de mesure ne remplissant pas la condition vue précédemment, le travail de reconstitution consiste à trouver parmi les séries de mesures disponible, une station d'un cours d'eau étudié depuis plus de 10 ans et qui semble posséder au cours du temps, le même type de "comportement hydrologique" (Cf. Chap. 1.2.3) que celui dont la station comprend la série de mesures à reconstituer. Après avoir mis en relation les parties communes des deux séries, même si les valeurs sont très différentes vis à vis des ordres de grandeur des valeurs, une étude de courbes régressives affectées d'un coefficient de corrélation permet de déterminer si oui ou non, les deux cours d'eau ont un comportement similaire concernant leurs réponses aux divers événements météorologiques (exemple : 96% de corrélation). L'équation de corrélation à tendance soit linéaire, logarithmique, exponentielle ou bien encore puissance permet de reconstituer les valeurs manquantes de la station concernée. L'historique "fictif" de cette dernière propose désormais une période d'étude supérieure à 10 ans qui sera considérée comme "fiable" pour l'élaboration des cartes d'isouruisselement.

Pour l'étude en question, une valeur arbitraire de 95% de corrélation a été définie comme étant le coefficient minimum pour que deux stations soient corrélables (9,5 chances sur 10 pour que les deux cours d'eau aient réellement le même type de comportement).

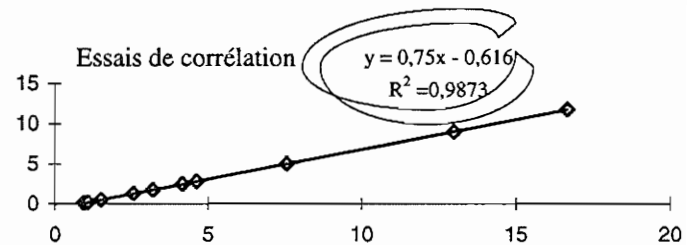
	Série à reconstituer	Série "ciblée"
janv-74	13,00	9,03
févr-74	16,66	11,8
mars-74		12,6
avr-74	7,58	5,03
mai-74	3,21	1,74
juin-74		1,63
juil-74		0,27
août-74	1,51	0,51
sept-74	0,95	0,11
oct-74	1,08	0,19
nov-74		0,61
déc-74	2,57	1,3
janv-75	4,63	2,82
févr-75		2
mars-75		4,44
avr-75	4,17	2,5
mai-75		2,75
etc.		

Calage temporel des deux séries de mesures.

	Série à reconstituer	Série "ciblée "
janv-74	13,00	9,03
févr-74	16,66	11,8
mars-74	17,76	12,6
avr-74	7,58	5,03
mai-74	3,21	1,74
juin-74	3,02	1,63
juil-74	1,19	0,27
août-74	1,51	0,51
sept-74	0,95	0,11
oct-74	1,08	0,19
nov-74	1,65	0,61
déc-74	2,57	1,3
janv-75	4,63	2,82
févr-75	3,52	2
mars-75	6,80	4,44
avr-75	4,17	2,5
mai-75	4,52	2,75
etc.		

Mise en relation des valeurs communes aux deux séries.

13,00	9,03
16,66	11,8
7,58	5,03
3,21	1,74
1,51	0,51
0,95	0,11
1,08	0,19
2,57	1,3
4,63	2,82
4,17	2,5



Détermination du coefficient de corrélation R^2 et de l'équation de corrélation associée, exemple pour une corrélation linéaire.

Grâce à l'équation de corrélation, on peut effectuer une reconstitution de l'historique de la station aux valeurs manquantes:

Reconstitution des parties manquantes de la station à reconstituer

Fig. 3 Illustration des procédures successives permettant les reconstitutions

Au total, après reconstitution des historiques, la banque de données hydrométriques servant de support à la réalisation des cartes d'isoruissellement présente respectivement 204 et 533 points de mesures exploitables pour la France et la Grande-Bretagne (Cf. Annexe I p.3 et Annexe II p.32). Néanmoins, afin d'effectuer les meilleures corrélations possibles, il a été nécessaire de prendre en compte les caractéristiques de chaque bassin versant (précipitations, géologie, ..) car les stations ont dû être choisies en fonction des paramètres qui influencent le régime des cours d'eau qu'elles mesurent. Pour cela, une bonne connaissance du cycle de l'eau mais surtout des notions de bases en hydrogéologie ont été déterminantes dans le choix des stations "ciblées".

1.2.2. L'étude du cycle de l'eau.

1.2.2.1. Notion de climatologie : Climat et précipitations.

Dans un premier temps, s'il y a évaporation pour créer les précipitations, c'est sous l'action de l'énergie solaire. Ce sont les mers qui, à cause de leur immense surface, donnent lieu le plus abondamment au phénomène. De même, les lacs, les marécages, les fleuves et toutes les eaux imprégnant la surface du sol, contribuent pour leur part à l'émission de vapeur d'eau dans l'atmosphère mais dans une moindre mesure. La vapeur d'eau formée grâce à la chaleur solaire s'élève dans l'atmosphère où elle peut subsister à l'état gazeux. Selon la température et le degré de saturation de l'air, la vapeur d'eau tend à subir une condensation en particules très fines sous forme de brouillard, en masse de gouttelettes liquides ou de minuscules cristaux de glace, constituant les nuages, lesquels restent en suspension dans l'air. Selon les circonstances, les nuages peuvent donner lieu à des précipitations d'eau liquide ou solide.

La présence de l'eau sous toutes ses formes en plus ou moins grande abondance dans l'atmosphère, et par conséquent, sa redistribution dans le ruissellement, dépend avant tout du régime de transport à partir des mers, de la condensation et de la réévaporation, donc du climat. Inversement, la présence et le mouvement de l'eau constituent des facteurs primordiaux du climat en un lieu donné.

Le climat peut être défini comme étant l'ensemble des propriétés de l'atmosphère à une légère distance du sol où il y a interaction étroite entre le milieu gazeux et le milieu solide. Le processus en cause est étroitement lié à la géographie ; à cet égard, non seulement la latitude, l'altitude, la nature de la surface terrestre et la topographie des lieux, mais aussi la végétation et même parfois l'activité des animaux supérieurs et surtout de l'homme, contribuent à modeler et à délimiter les climats. Ceux-ci sont d'une extrême diversité et leur étendue géographique fort variable. La classification des climats constitue un problème assez complexe à cause de la relativité des critères envisagés. La température et la pluviométrie sont les paramètres prédominants qui interviennent pour la définition des climats types (tropicaux, arides, tempérés, polaires). Cependant, il existe de nombreux climats qui réunissent à la fois les caractères de plusieurs des climats types. Selon l'échelle à laquelle interviennent ces facteurs, il s'agit de zones de climats, d'aires climatiques, de climats régionaux, de climats locaux ou de microclimats.

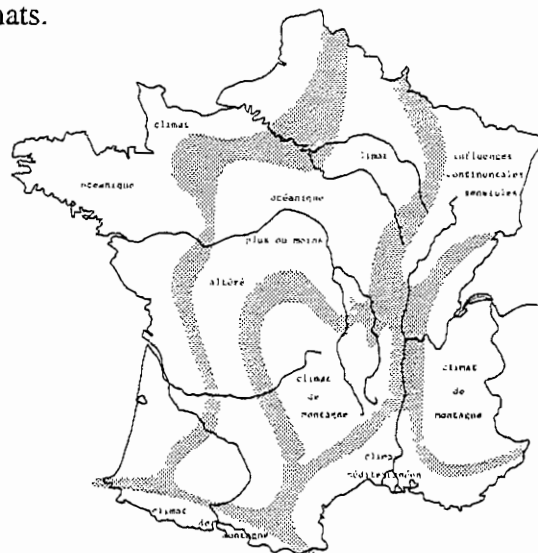


Fig. 4 Les régions climatiques françaises, (d'après l'Atlas climatique de la France, Météo. Nat.).

- Pour l'étude qui nous intéresse, l'ensemble des bassins versants alimentant la mer de la Manche seront traités dans le cadre de modèles hydrologiques de climat tempéré océanique. (cf. fig.4). Ainsi, toutes les stations de la banque de données, pour la reconstitution des historiques, sont considérées comme soumises aux mêmes caractéristiques climatiques en général.

Dans cette aire climatique, les différents processus qui influent sur la répartition qualitative et quantitative de l'eau dans le réservoir atmosphérique sont conditionnés par les facteurs suivants :

- . l'existence même de l'air atmosphérique avec ses caractéristiques.
- . la pression atmosphérique.
- . la température, liée à l'apport d'énergie solaire et qui résulte d'autre part de la présence des grandes masses d'eau liquide superficielles dans la région considérée.
- . la lumière et autres radiations.
- . l'électricité atmosphérique.
- . les vents dont le régime dépend de la pression, de la température et du relief.
- . la géologie.
- . la présence même de l'eau qui en quelque sorte réagit sur elle-même dans le conditionnement de l'atmosphère, en particulier la nébulosité.

1.2.2.2. Les précipitations atmosphériques.

Origine et facteurs dictant les précipitations.

Il y a précipitation lorsque les particules solides ou liquides d'eau en suspension dans l'atmosphère atteignent une taille telle que leur chute vers le sol se manifeste avec une vitesse sensible et atteignent ce dernier. La condition nécessaire essentielle pour qu'il y ait précipitation, est que le degré d'humidité de l'atmosphère, sous la forme de vapeur d'eau (état gazeux) ou sous la forme d'eau liquide ou solide, soit assez élevé. On conçoit que la teneur en eau de l'atmosphère soit tributaire directement de son transport à la surface du globe à des altitudes variables.

. L'examen des différents facteurs intervenant pour conditionner les précipitations comporte donc, en premier lieu, l'étude des mouvements de l'atmosphère : En ce qui nous concerne, dans les régions tempérées, l'existence même de masses océaniques et des continents, entraîne l'apparition de zones de hautes et basses altitudes avec une trajectoire circulaire des vents sur le pourtour de ces zones. Les vents dominants soufflent de l'ouest et leur structure, voisine du Gulf Stream marin, est cause du transport de la chaleur et de l'humidité de la région des Antilles vers l'Europe occidentale.

. Aussi, les précipitations sont grandement tributaires de la géographie, les grandes régions maritimes connaissent des régimes de précipitations différents de celui des régions continentales. De plus, l'orientation des façades continentales conditionne la pluviosité ainsi que les courants marins qui, s'il sont chauds, provoquent une recrudescence de précipitations tandis que bien souvent, les côtes longées par des courants froids sont désertiques. Les reliefs interviennent aussi à la fois par des différences d'altitudes et les différences d'orientation. Les sommets sont plus arrosés que les régions inférieures et les versants des chaînes de montagnes exposés à l'influence océanique reçoivent toujours davantage de précipitations que les versants opposés.

. La végétation et les structures géologiques puisqu'elles ne sont pas sans intervenir indirectement sur la nature du couvert végétal dont elles sont responsables, influent elles aussi sur la répartition des précipitations. Il est établi que les pluies sont plus abondantes au-dessus des forêts que dans les régions à végétation pauvre.

Les différents types de précipitations, définition et mesures.

Un type de précipitation est caractérisé par son état liquide ou solide, le diamètre des particules la constituant et la vitesse de chute de celle-ci, ainsi que par sa durée ou sa discontinuité. Qu'il s'agisse de crachin, de pluie forte, d'averse, de grêle ou de neige, la mesure s'effectue à l'aide d'un pluviomètre, son analyse est transposée sur un hyétoGramme fournissant le profil d'une averse (intensité en fonction du temps). Il apparaît que pour les hydrologues préoccupés par les fleuves, les rivières et les lacs, la façon dont l'eau tombe importe plus que la quantité d'eau qui tombe, car les inondations, l'érosion des sols, la pénétration dans le sol sont liés intimement à la nature des chutes de pluie et à leur répartition, plus qu'aux hauteurs d'eau totale observées.

Les précipitations sont exprimées comme une quantité totale d'eau météorique qui tombe sur une zone déterminée, le bassin versant. L'eau précipitée est estimée en hauteur d'eau en mm, par unité de surface et par unité de temps.

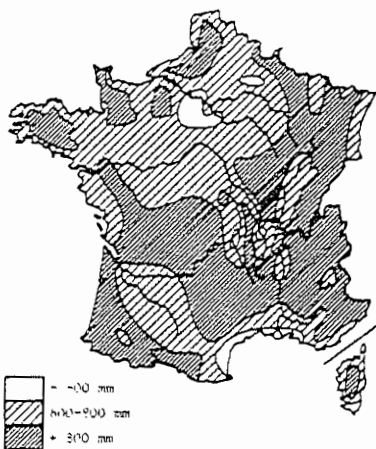


Fig. 5 Précipitations moyennes annuelles simplifiées

➤ Comme elles sont plus ou moins corrélables avec les mesures de ruissellement, les valeurs de précipitations constituent un facteur primordial dans le choix des stations servant à la reconstitution des historiques inférieurs à 10 ans. La recherche de stations présentant les mêmes ordres de grandeur des précipitations passe par l'analyse des cartes pluviométriques isohyètes. Ce facteur implique souvent un choix de corrélation basé sur la proximité des stations les unes par rapport aux autres. Une bonne corrélation est souvent une corrélation entre deux stations proches géographiquement étant soumises aux mêmes conditions atmosphériques, géologiques et au même couvert végétal donc au même régime des précipitations.

Si ces précipitations retombent sur la mer, dans un lac ou dans un fleuve, le cycle de l'eau est terminé, mais une grande partie de l'eau condensée arrive sur la terre ferme et son cheminement peut suivre plusieurs destinées différentes

1.2.2.3. L'eau à la surface du sol :

La première étape, après la précipitation, du retour de l'eau vers l'océan, est le contact avec le sol. A ce stade, trois phénomènes fondamentaux se produisent : rééVaporation, ruissellement et pénétration dans le sol. En France, environ 25% ruissent à la surface du sol sans y pénétrer et cheminent vers les rivières et les fleuves, puis ceux-ci aboutissent aux lacs et à la mer. Une autre partie des précipitations, soit environ 55 % s'évaporent immédiatement après l'arrivée au sol ou bien à partir du trajet fluvial. A cette eau évaporée, s'ajoute celle

résultant de la transpiration des animaux et surtout des plantes. Il s'agit donc de 55% d'eau qui ne rentre pas dans le système hydrogéologique, c'est en fait une perte colossale. Une troisième partie, c'est à dire environ 20 % pénètrent dans le sol grâce aux vides qui s'y rencontrent, c'est l'infiltration efficace alimentant les aquifères à une période particulière de l'année. Généralement, il y a réapparition à la surface des eaux infiltrées qui rejoignent alors à nouveau les eaux de ruissellement. Le trajet souterrain au lieu d'aboutir directement à une source, peut se compliquer de phénomènes de condensation de l'air humide superficiel s'engouffrant dans les cavités plus ou moins profondes du sous-sol ; cela aboutit à l'entretien de l'humidité du sol et, à grande profondeur, la circulation de cette eau de condensation peut provoquer la formation de petites rivières intégralement souterraines. La circulation souterraine comporte aussi les pertes de rivières de surface dont le cours se trouve ainsi soustrait au cycle de surface jusqu'au point de résurgence.

Le premier facteur gouvernant la relation évaporation / ruissellement / infiltration, est l'état physique de la précipitation. Pour une même quantité d'eau reçue au sol, une pluie très fine et continue donne lieu à une répartition entre les trois voies possibles différentes de celle qui correspond à l'arrivée d'une averse violente et de courte durée. Les paramètres qui rentrent en jeu sont l'intensité de la précipitation, les dimensions des gouttes de pluie et la durée de la précipitation. Les grandes crues ont surtout pour origine des averses exceptionnelles de par leur intensité, leur extension, leur durée ou leur succession immédiate (le pourcentage infiltré est alors faible) dans une atmosphère très humide. Une courte pluie de faible intensité peut donner un ruissellement peu abondant ou pratiquement nul si la pénétration est importante.

L'évapotranspiration

Lors de l'évapotranspiration, deux mécanismes entrent en jeu : la vaporisation physique de la lame d'eau précipitée et la transpiration par les plantes des grandes quantités d'eau ayant déjà commencé à pénétrer dans la partie superficielle du sol.. Ainsi, c'est à cause de l'évapotranspiration qu'une partie plus ou moins considérable de précipitations retourne toujours directement à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau. Elle est principalement fonction des températures moyennes et des apports en eau puisque c'est le degré d'humidité du sol soit la teneur en eau des couches superficielles qui contrôle ce phénomène.

Cependant, dans le détail, des facteurs physiques ;

- pouvoir évaporant de l'atmosphère (déficit pluviométrique de l'air, température, vitesse et turbulence des vents,...).
- état évaporant du sol (granulométrie, porosité, couverture végétale, richesse en eau : nappe phréatique à proximité).
- nature du sol (les sols argileux retiennent davantage l'eau que les sols sablonneux).
- la géographie locale (l'altitude contrôle la pluviométrie).
- le climat.

interfèrent avec des facteurs physiologiques :

- présence d'espèces végétales.
- nature et âge des espèces végétales (les forêts de conifères ont un sous-bois moins apte à la rétention que les forêts d'arbres à feuilles caduques).
- présence de feuillage.
- profondeur des racines... .

Le mécanisme du rôle humidifiant joué par les forêts est assez complexe. Généralement, on admet que le sous-bois est favorable à la rétention de l'eau et qu'il y a une régulation continue de l'évaporation par suite de la transpiration végétale. Les forêts favorisent donc la constitution des réserves souterraines aquifères et des RFU (réserves facilement utilisables par les végétaux). En réalité, le feuillage des arbres empêche aussi l'eau de pluie d'accéder au sol et la grande surface foliaire facilite une réévaporation intense directe.

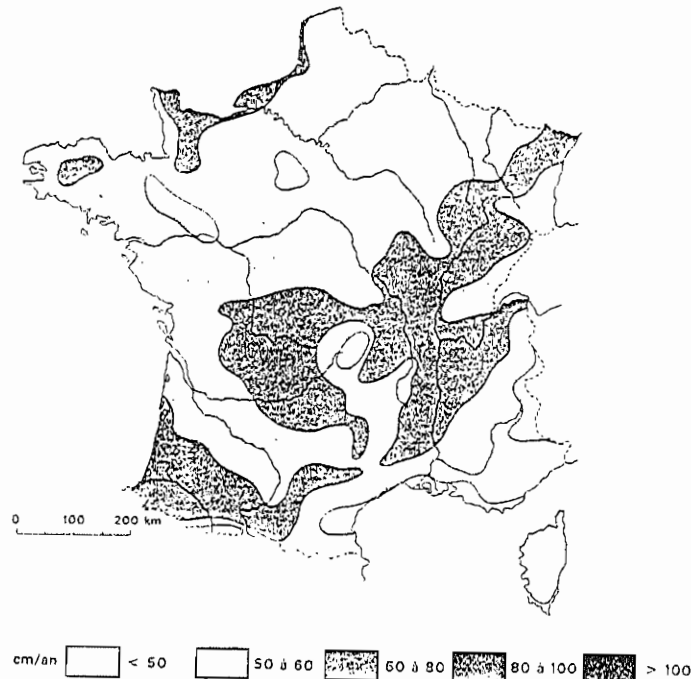


Fig. 6 Evapotranspiration réelle (hauteurs moyennes annuelles en cm)

Le ruissellement ou l'écoulement de surface et l'infiltration.

L'eau qui ne s'est pas évaporée s'écoule de façon purement superficielle, en proportion d'autant plus considérable que la perméabilité du sol est faible, les sols argileux compacts provoquent beaucoup de ruissellement et peu d'infiltration contrairement aux sols sableux et fracturés. L'eau qui au fur et à mesure constitue le cours d'eau peut provenir de différentes origines :

- Précipitations sur le lit de la rivière.
- Saturation du sol puis ruissellement en surface toujours fonction de la géologie du terrain, ce phénomène provoque le retard au ruissellement ; décalage entre le moment où tombe la pluie et l'enregistrement du débit à l'exutoire.
- Infiltration de faible profondeur qui rencontre une couche imperméable suivi d'un déplacement latéral qui provoquent le ruissellement hypodermique retardé.
- Ecoulement souterrain dans l'aquifère jusqu'à la source puis la rivière.

L'infiltration est la composante verticale du ruissellement qui chemine sous les couches affleurantes du sol pour réapparaître à la surface à des distances plus ou moins éloignées. Il s'agit de l'écoulement hypodermique ou ressuyage. Son importance est directement liée à la nature du sol superficiel et à l'existence en faible profondeur d'une couche imperméable. Il est évident que l'écoulement hypodermique constitue un ruissellement

retardé et se fait au détriment des nappes profondes. L'infiltration en profondeur contribue à l'écoulement en général, plus ou moins directement et pour une part plus ou moins considérable, par l'intermédiaires des sources qui donnent naissances à des affluents ou même bien souvent, surgissent dans le lit même des cours d'eau ou des lacs.

Plusieurs facteurs sont susceptibles d'influencer le comportement du réseau hydrographique, dans la relation Ruissellement / Infiltration, notamment :

- La nature géologique des terrains drainés. En effet, la qualité physique du sol et du sous-sol conditionne la perméabilité, donc l'infiltration et de surcroît, le ruissellement. Ce dernier est inversement proportionnel à la perméabilité du terrain. Le coefficient de ruissellement est de la forme : $\text{Ruissellement (mm)} / \text{Précipitations (mm)}$.

Ainsi, dans les régions à terrains perméables, le réseau hydrographique est très serré (régions de socle, ex : Bretagne) alors qu'il est très lâche lorsque les terrains sous-jacents sont perméables (bassins sédimentaires, ex : Pays de Caux) (Cf. Fig. 7).

- Le ruissellement est d'autant plus intense que la pente est plus forte.
- Si le sol est saturé en eau, le ruissellement est plus important que si le sol, de par la sécheresse, est susceptible d'absorber les précipitations.
- La végétation qui, par ailleurs est susceptible de favoriser l'infiltration, s'oppose au ruissellement en empêchant l'écoulement trop rapide de l'eau et par la même, s'oppose à l'entraînement des terres meubles, tandis que les racines des plantes permettent à l'eau de pénétrer plus facilement dans le sol.



Fig. 7 Le réseau hydrographique français

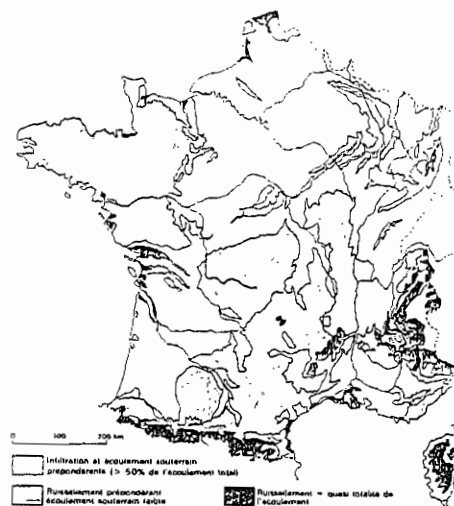


Fig. 8 France ruisselante et la France Absorbante

➤ Dors et déjà, en observant la carte des régions absorbantes et des régions ruisselantes, et celle du réseau hydrographique français, on note le rôle prédominant de la géologie dans le comportement des différents systèmes hydrogéologiques. Les limites des régions ruisselantes et absorbantes correspondent à peu de choses près aux limites des grandes unités géologiques (socle cristallin, bassins sédimentaires, ...). La similitude des terrains composant le substrat des cours d'eau est l'un des plus important facteurs dont il faudra tenir

compte pour la reconstitution des historiques de mesures des stations. En effet, il est assimilé désormais que les différents cours d'eau présentent des réponses différentes vis à vis des événements pluviométriques en fonction de la nature des terrains composant les aquifères. Un chapitre concernant les différents types d'aquifères rencontrés lors de l'étude, la dynamique hydrologique des cours d'eau associée à chacun de ces différents terrains rencontrés et donc l'importance de ce critère pour les corrélations sera développé ultérieurement dans cet ouvrage (Cf. Chap. 1.2.3)

1.2.2.4. Notion de bassin versant et d'hydrosystème

Globalement, les paramètres évapotranspiration, ruissellement et infiltration, dans chacune de leurs variantes qualitatives et quantitatives, sont à considérer dans l'étendue de terrain sur laquelle ils sont en étroite interdépendance. Cette unité de territoire est le bassin versant d'un cours d'eau ou "bassin hydrologique de surface". Il s'agit de l'impluvium alimenté par les précipitations efficaces, c'est la surface qui recueille les précipitations dont les limites correspondent aux lignes de crêtes qui contrôlent le ruissellement. Il contient le réseau hydrographique témoignant de ce ruissellement. Les bassins versants peuvent faire l'objet de classifications en fonction des caractéristiques qui leurs sont propres :

•Le chapitre précédent a montré qu'en fonction du substrat géologique, le réseau hydrographique apparaissait très dispersé ou bien au contraire très resserré. Il s'agit là en fait d'une notion de densité de drainage des bassins versants (Cf. Fig. 7).

•L'organisation d'un réseau hydrographique, sous la dépendance des traits géomorphologiques, renvoie pourtant dans une certaine mesure à des lois mathématiques. Pour traduire cette hiérarchisation, une codification a été proposée par Horton, Schumm et Stralher. Elle établit qu'un chenal ne change d'ordre que lorsqu'il reçoit un autre ordre équivalent. Ainsi, l'expérience montre aussi que les superficies drainées par les cours d'eau des ordres successivement croissants, s'ordonnent approximativement en progression géométrique tout comme les longueurs moyennes des tronçons des cours d'eau correspondants. Il est d'ailleurs possible à partir de cette hiérarchisation de proposer des évaluations de l'étendue des bassins versants selon des fourchettes très larges que dictent la variabilité des topographies, des substrats et des climats.

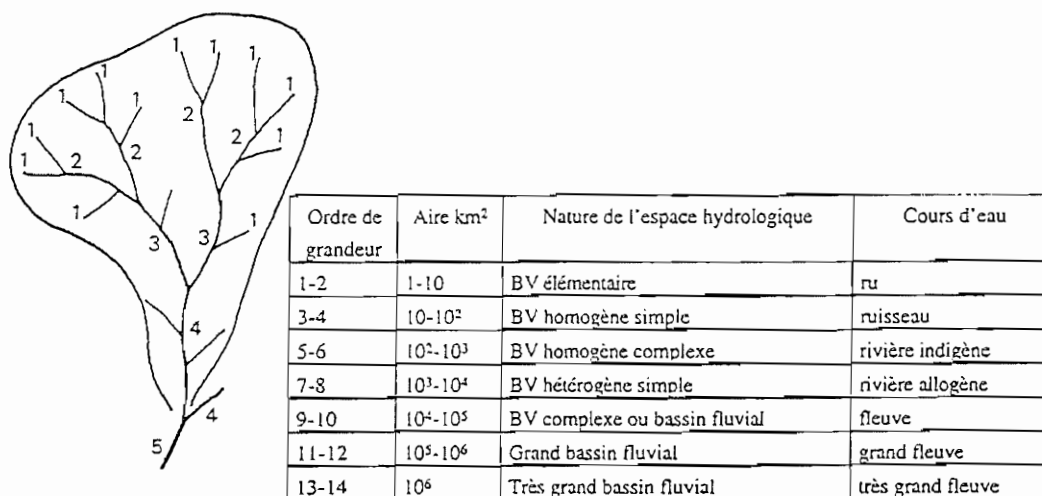


Fig.9 La hiérarchisation du réseau hydrographique

L'aspect du bassin versant influe directement sur le déroulement des crues qui sont fonction des confluences, c'est à dire que lui aussi participe aux modes de réponses des cours d'eau face aux événements météorologiques. Le réseau de type peuplier étale davantage les crues par rapport aux réseaux de type chêne ou pin parasol. Cette conséquence n'est seulement valable que pour les grandes échelles (de 1000 à 100 000 km²). Pour des superficie moindre, la concentration des eaux est trop peu décalée dans le temps et si elles sont supérieures, les conditions météorologiques s'avèrent différentes sur les diverses parties du bassin versant.

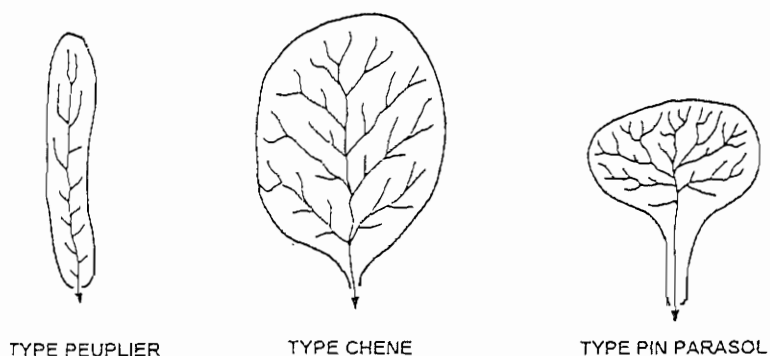


Fig. 10. Les styles de réseaux hydrographiques.

- Comme nous le verrons par la suite, ces paramètres caractérisant les bassins versants tiennent eux aussi une importance dans le choix des stations pour les corrélations et notamment dans l'aspect hypsométrique des bassins versants qui sera développé ultérieurement.

L'hydrosystème, c'est l'espace fini, à trois dimensions, déterminé à une échelle locale ou régionale, sur une zone géographique et durant une durée limitée, afin d'appréhender des bilans hydrologiques. Dans ce système, les influences extérieures peuvent se propager librement (déplacement de quantités d'eau, transmission des variations de pressions). Ce système clos ou avec des échanges, est constitué non seulement par le bassin versant mais aussi par le bassin hydrogéologique (sous la surface du sol, alimenté par des infiltrations efficaces arrivant dans l'aquifère, et non saturé en eau), ainsi que parfois par l'aquifère (système qui contient l'eau, la nappe, il est alimenté par la descente de l'infiltration efficace (percolation), qui sature l'aquifère en eau). A l'intérieur de l'aquifère, les différences de pressions provoquent l'écoulement souterrain.

1.2.2.5. Conclusion, bilan dans l'hydrosystème.

En France, le volume moyen des précipitations est d'environ 440.109 m³.an⁻¹. Si ces précipitations étaient uniformément réparties; cette moyenne serait de 800 l.m². soit environ une couche de 800 mm.an⁻¹ de lame d'eau. Cependant, cette eau n'est pas distribuée uniformément et les précipitations sont variables en fonction des saisons.

Lors de la réalisation du bilan hydrologique, l'enjeu principal est de connaître le cycle de l'eau à l'intérieur de l'hydrosystème, c'est le seul moyen de contrôler la cohérence des données, le rapport Entrée / Sortie.

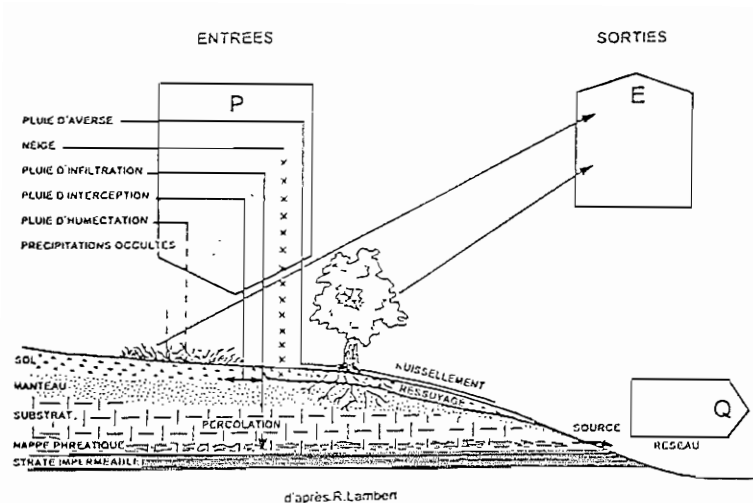


Fig. 11. Les composantes de l'hydrosystème

Soit le déficit d'écoulement et d'infiltration (D), la proportion d'eau totale qui retourne à l'atmosphère par rapport à la quantité d'eau totale précipitée en un lieu donné. Cette eau est complètement perdue pour la surface de territoire donné, on a $D = P - Q$ avec les précipitations (P) et (Q) le ruissellement aux exutoires. A longue échelle, le déficit d'écoulement et d'infiltration correspond à l'évapotranspiration réelle (E) soit $E = P - Q$

On néglige l'infiltration (I) car celle-ci se ramène en fait, généralement, à un écoulement différé, on a donc en généralisant : $Q = R + I$. Dans ce cas précis, l'infiltration est assimilée à un écoulement souterrain vers les sources, alimentant les nappes qui rejoignent les cours d'eau secondairement.

Si l'hydrosystème est analysé plus en détails, l'infiltration peut correspondre à des "exhaustions" (Pompes et forages) ou bien faire figure de transit et d'alimentation vers les bassins versants voisins. Cette partie de l'infiltration (I) quitte l'hydrosystème et est donc assimilée à des pertes. Ainsi, le ruissellement (Q), c'est à dire l'alimentation des cours d'eau (ruisseaux, rivières, fleuves), des étangs, des lacs, se ramène à la différence qui existe entre l'intensité des précipitations reçues (P), d'une part, et de la réévaporation et la pénétration, d'autre part qui constituent les pertes, soit :

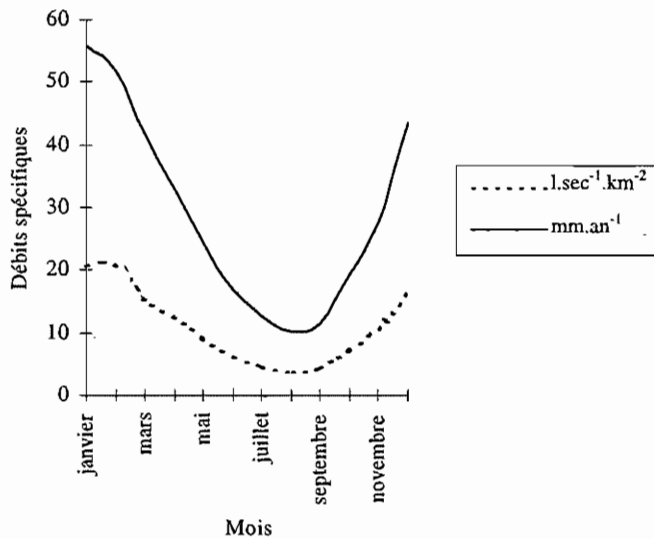
$$P = \text{Perte} (E + I') + \text{Précipitations efficaces} (Q + I)$$

Normalement, sur une année moyenne, les réserves restent globalement constantes et le bilan Entrées / Sorties est équilibré. Les années sèches correspondent à un volume d'entrée d'eau inférieur à celui de la sortie avec puisement dans les réserves, alors qu'une année pluvieuse permet la reconstitution des réserves par un volume d'eau entré excédentaire sur celui des sorties.

1.2.3. Modèles hydrodynamiques et types d'aquifères associés, Aide à la détermination du choix des stations.

1.2.3.1. Tendence générale des bassins versants français de la Manche.

Fig. 12 Moyennes des débits spécifiques mensuels interannuels



C'est au travers des valeurs de la banque de données que l'on peut mettre en évidence les différents comportements des cours d'eau face aux événements météorologiques et donc tenter d'analyser ces comportements. Dans le graphique ci-contre (Fig. 12), l'ensemble des mesures de débits spécifiques interannuels de toutes les stations sont représentées sous la forme d'une moyenne. Ce résultat donne la tendance générale de la dynamique des cours d'eau à l'échelle des bassins versants français qui se jettent dans la mer de la Manche. On y observe globalement un épisode de crue durant les périodes hivernales ainsi qu'un épisode d'étiage durant les périodes estivales.

L'action brutale du ruissellement se produit lors des crues. Pour un bassin versant donné, les crues présentent un caractère de régularité plus ou moins prononcé, là encore, il faut noter que certains facteurs géologiques ou topographiques agissent dans le sens soit de la régularité du ruissellement avec des phénomènes de crues peu marqués, soit dans le sens d'une périodicité des crues. En outre, il existe une probabilité statistique plus ou moins grande de crues exceptionnelles liées à la possibilité d'averses anormales de par leur intensité, leur extension et leur durée et se produisant aux hasard. Généralement, il existe une régularité des crues en fonction du rythmes des saisons, c'est le cas des crues consécutives aux périodes de pluviosité, ou à la fonte des neiges.

Globalement, on retiendra :

- Une 1ère période du mois d'Avril au mois d'Août où les poussées des débits restent très limitées, en Août, ces derniers s'amenuisent jusqu'à cesser. La pluie n'est pas absente mais les températures sont élevées et la sécheresse atmosphérique bien établie. La réserve hydrique du sol tend à s'épuiser, l'eau précipitée est bue par la végétation, c'est la période d'étiage et de tarissement, c'est l'été hydrologique.

- Une 2ème période de Septembre à Novembre où les eaux restent très basses voire même absentes dans les cours d'eau mais c'est la fin de la sécheresse. L'excédent hydrique qui se dégage est tout entier utilisé pour la reconstitution de la capacité au champs (RFU). Cette période dure tant que la saturation n'est pas atteinte, c'est l'automne hydrologique.

- Une 3ème période du mois de Novembre au mois de Février : Les débits de haut niveau fluctuent sans cesse. Chaque épisode pluvieux déclenche une crue. Les températures sont basses et le bilan hydrique excédentaire. Le bassin versant apparaît saturé en permanence

et si surplus hydrologique il y a, son évacuation s'effectue par ruissellement et réessuyage : c'est l'hiver hydrologique.

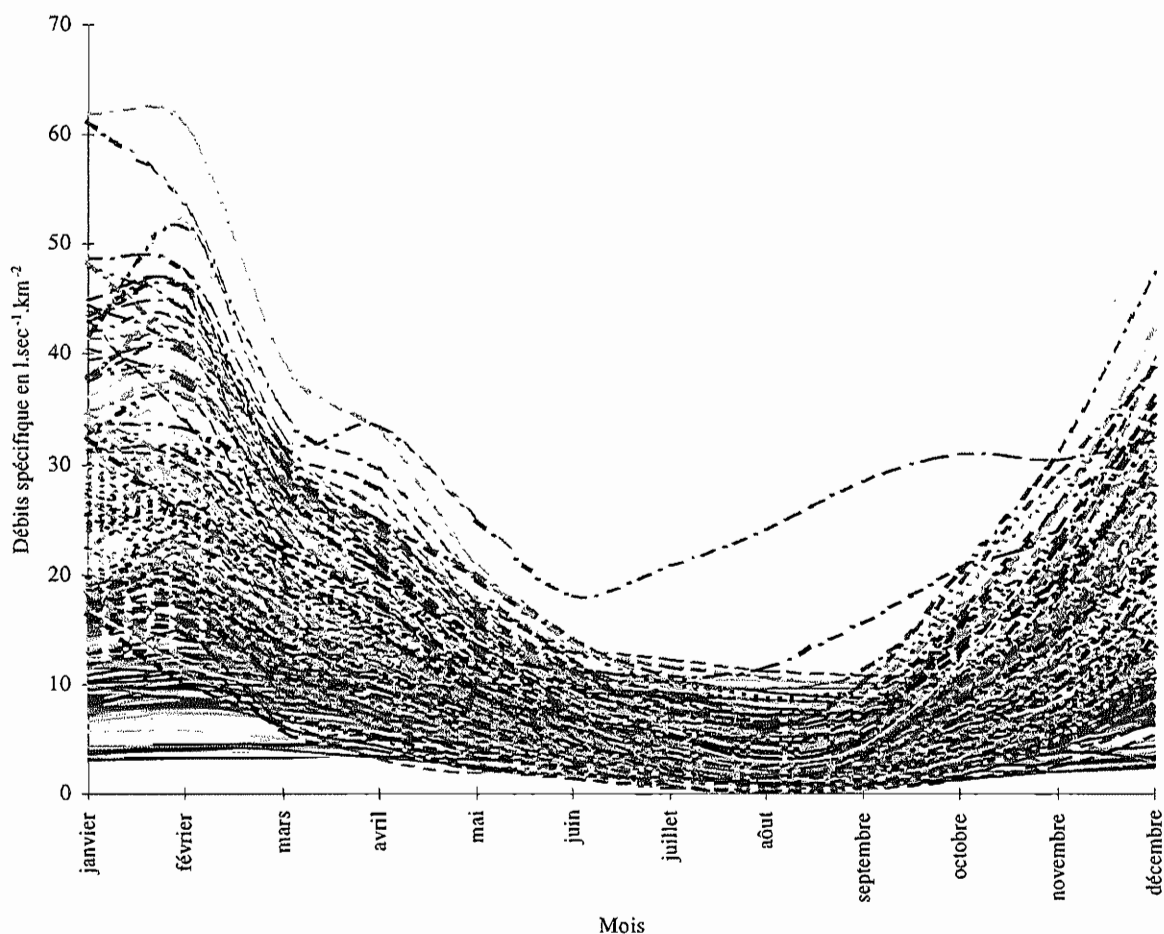
•Enfin, une 4ème période de Février à Mars où les crues s'espacent et perdent de leur ampleur. Les précipitations sont toujours excédentaires sur l'évapotranspiration réelle mais la végétation en plein développement en retient l'essentiel, sauf les pluies les plus intenses qui saturent momentanément le sol.

Lors du bilan hydrologique, l'année hydrologique se situe entre deux étiages qui à nos latitudes correspondent aux basses eaux d'Août et de Septembre. Les crues des hautes eaux au mois de Février. La fluctuation (Crue/Etiage) de l'écoulement $Q = R + I$ est due aux précipitations maximums en automne et en hiver pour les climats tempérés océaniques engendrant avec retard les hautes eaux.

Cet hydrogramme permet de traduire sur l'année, la réponse des bassins versants français aux sollicitations météorologiques. Cependant, lorsque au lieu de moyenner les résultats des différents cours d'eau pour observer les tendances générales, on individualise les détails des débits de chacun d'entre eux, il est aisé de s'apercevoir rapidement du nombre important de comportements différents de leur part face aux événements pluviométriques.

1.2.3.2. Détails des débits mensuelles interannuels, plusieurs comportements hydrologiques différents.

Fig. 13. Détails des débits spécifiques mensuels interannuels

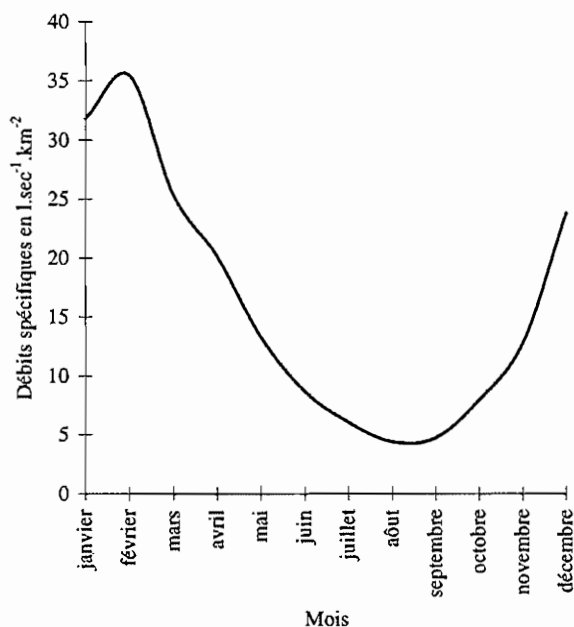


A une petite échelle, beaucoup de modèles sont différents car c'est l'état du bassin versant qui conditionne les courbes de crue et de décrue (pentes, cultures, forme du réseau hydrographique, ..). En effet, le graphique (Fig.13) montre différents types de comportements des cours d'eau, directement liés aux paramètres caractérisant le bassin versant. Ces comportements s'individualisent non seulement au niveau de l'intensité des débits observés mais surtout vis à vis des périodes où interviennent les débits d'étiage ou de crue. Ils apparaissent plus ou moins décalés dans le temps en fonction des différents types d'aquifères rencontrés lors de l'étude. L'évolution des comportements hydrologiques au cours des mois en fonction des régions est observable sur la succession des cartes de débits spécifiques moyen mensuels interannuels réalisées (Cf. Annexe I p. 6 à 29).

Il faut cependant être prudent dans l'interprétation de telles données, à savoir qu'il s'agit ici de moyennes mensuelles interannuelles et qu'il n'est pas fréquent de constater d'égales durées entre les saisons hydrologiques d'une année sur l'autre. En plus de cette relative mobilité, il n'est pas rare même qu'une des quatre saisons ne soit pas présente. Le cycle de l'eau est un phénomène irrégulier, son calendrier est flexible. Il existe un autre danger qui est celui de la schématisation. L'utilisation de valeur de débits mensuels a longtemps semblé un moyen efficace pour repérer les types d'organisations temporelles des transits fluviaux mais il apparaît que les traitements mensuels masquent parfois des fluctuations très prononcées et de grandes brutalités à des dates d'occurrences parfois très changeantes, surtout pour les petits cours d'eau.

Dans l'ensemble, parmi les modèles hydrogéologiques rencontrés lors de l'étude, on retiendra :

Fig.14. Débits spécifiques mensuels interannuels
Cas de l'Abert Ildut à Keringar Plouarzel



- ◆ Les régions de socle du massif armoricain présentent un substrat granitoïdique dur, peu perméable obligeant l'eau à rester en surface. Le réseau hydrologique y est très dense, très serré (cf. fig. 7). Le contrôle structural sur ces massifs anciens influence la forme des bassins hydrologiques et l'interférence des caractères lithologiques et tectoniques laisse à la zone côtière une morphologie très découpée, formée de caps et de rias. Ainsi, les cours d'eau bretons sont de type fluvial pur, le bassin versant en relief bas et assez peu contrasté n'est quasiment alimenté que par les pluies. Son écoulement dépendant de pluies et de l'évaporation est donc calqué très précisément sur les régimes pluviaux. L'absence d'aquifère au sens strict (réserves) engendre des hautes eaux importantes (peu de stockage) en saisons froides, sans retard à l'écoulement (Février), des basses eaux assez prononcées l'été (Août).

Il ne faut cependant pas exagérer la pondération des cours d'eau bretons, le régime de l'écoulement en année particulière peut être fortement différent de l'allure du régime moyen. Les apports fluviaux sont en effet irréguliers d'une année sur l'autre de sorte que les étiages profonds peuvent apparaître même en façade océanique après un printemps peu pluvieux et un été sec et tout comme peuvent éclater de fortes crues si les pluies sont excessives et le sol saturé.

- ◆ Mise à part la Bretagne ainsi qu'une bonne partie de la Basse Normandie qui sont des régions dépourvues d'aquifères ou seulement avec quelques aquifères libres locaux, les autres régions sont globalement caractérisées par des terrains présentant des aquifères à nappes. Les nappes correspondent à des réservoirs dont l'alimentation descendante s'effectue par infiltration et percolation de l'eau au travers des couches sus-jacentes. La capacité de contenance de ces réservoirs est très variable, ceci en fonction :
 - De la lithologie d'une part, qui permet des passages plus ou moins aisés à la circulation des eaux. Comme la présence d'interstices sableux ou, comme en Bretagne, de roches granitiques diaclasées dont des joints laissent passer l'eau, contrairement aux formations plus schisteuses et imperméables.
 - De la tectonique dans le sens où la distension « fabrique » des roches perméables et la compression des roches « fermées ». Elle organise notamment les réseaux de circulations souterraines.
 - De la stratigraphie qui dicte l'épaisseur des couches aquifères et leurs éventuelles répétitions comme dans le bassin de Paris.

Finalement, la lame d'eau contenue dans une nappe peut être nulle, se limiter à quelques dizaines de millimètres (roches peu perméables ou en compression), ou bien atteindre des centaines de millimètres (roches cristallines diaclasées, grès filtrants, calcaires fissurés).

- Au travers de l'analyse des terrains drainés, dans le soucis du travail de reconstitution des historiques, tous les différents types de nappes existantes en fonction des contextes géologiques ont pu être rencontrés. Chacune d'entre elles induisent des dynamiques hydrologiques différentes des hydrosystèmes face aux sollicitations météorologique.

Les nappes libres

Les nappes libres sont les réservoirs ne possédant pas de toit imperméable. Elles se différencient en nappes encaissantes (ou nappes vives) : La partie supérieure est recoupée par la surface topographique ou communique avec les cours d'eau qui les drainent et / ou les alimentent selon leurs niveaux respectifs. Correspondent à ces types de nappes, les plaines alluviales, les eaux emmagasinées dans une roche perméable affleurante et de grande épaisseur comme par exemple la craie picarde. Les nappes perchées communiquent par écoulement aérien avec leur encaissant.



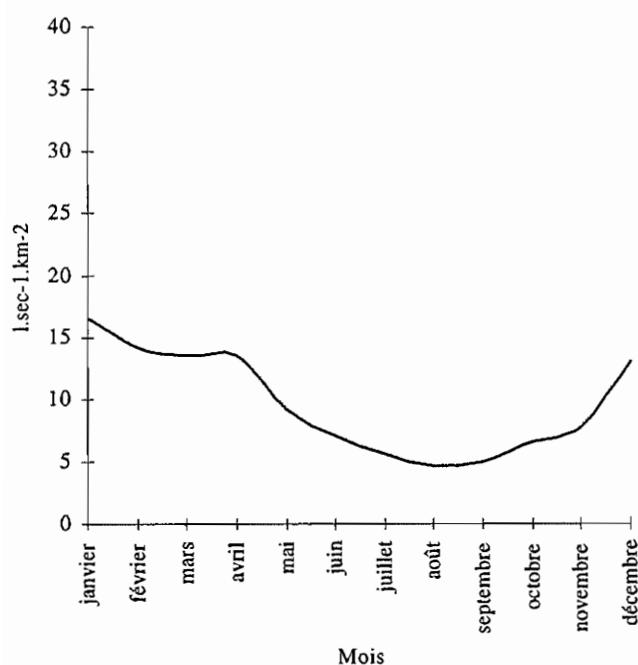
Fig.15 Les nappes libres

Les aquifères libres monocouches comme la craie dans le bassin de la Somme en Picardie, ou bien encore les séries crayeuses de Haute Normandie sont localisés dans des séries calcaires poreuses ou fissurées. C'est dans de telles séries qu'il est fréquent de rencontrer des aquifères karstiques.

La craie est l'aquifère alimentant une bonne partie du bassin parisien, En lui même, un bloc de craie ne présente qu'une faible porosité (environ 40%) et la seule eau présente est de l'eau de rétention. L'absence d'eau libre fait que les débits sont faibles, environ $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Les fortes productions d'eau sont dues à la présence de karst composé, soit par des gros conduits individualisés, soit de beaucoup de petits conduits (drains karstiques). C'est la dissolution des roches calcaires par les eaux météoriques chargées en gaz carbonique qui est à l'origine de la formation de ces aquifères de type karstique. Dans ce cas, le débit est très important (environ $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) et la circulation descendante des eaux est très rapide, raison pour laquelle le pouvoir filtrant de la craie est faible.

Dans le pays de Caux par exemple, le système karstique est très présent, les quelques rares ruisseaux en surface forment un réseau hydrographique très lâche, isolé et la perméabilité du sol et du sous-sol permettant les infiltrations laisse souvent les limons à sec. Du fait de cette infiltration importante, le système karstique est caractérisé par des exurgences et sources au débit très important en contrebas des zones dépourvues de réseaux hydrographiques.

Fig. 16 La Béthune à St Aubin le Cauf



L'organisation si particulière de cette unité de drainage des eaux souterraines explique l'énorme variabilité de son comportement hydrologique selon les périodes de crues et d'étiages. Les roches fracturées et les diaclases sont élargies en lapiaz par dissolution et l'écoulement est organisé et hiérarchisé dans des réseaux de drain. De plus, la présence d'une matrice poreuse (système annexe) confère à l'aquifère karstique une hétérogénéité au point de vue de la perméabilité mais aussi du coefficient d'emmagasinement. Ainsi, en période d'étiage, les systèmes annexes libèrent le stock d'eau contenu dans les nappes épikarstiques, ce qui confère à l'aquifère un rôle tampon du point de vue des variations de l'intensité des débits de ruissellements entre les saisons sèches et humides, ainsi qu'un petit retard des pointes de crues et d'étiages.

Au sein même des séries calcaires, les comportements hydrologiques des terrains peuvent complètement différer. Dans un autre modèle que les aquifères karstiques du pays de Caux, les plateaux calcaires Normands et Haut Normands sont constitués eux aussi par des aquifères monocouches à surface libre, cependant, leurs dynamiques hydrologiques ne se ressemblent pas. C'est la topographie qui est à l'origine de cette différence, les plaines

calcaires de Normandie, basses topographiquement ne présentent un contraste de relief alors que les séries calcaires de Haute Normandie forment des plateaux crayeux qui bordent des vallées encaissées. Dans le premier cas, les pentes sont faibles, le rôle diminué de la gravité implique des faibles valeurs de ruissellement comparé à des valeurs d'infiltration importantes (Cf. Fig. 17). Dans le second cas, la pluie qui a plus tendance à tomber sur les sommets des plateaux, s'infiltré certes dans les calcaires (plus ou moins altérés plus les silex noduleux) mais ruisselle aussi fortement sur les rebords des vallées très encaissées. La gravité participe à l'augmentation du ruissellement .

Fig. 17. La Dives à St Pierre du Jonquet (Hernetot)

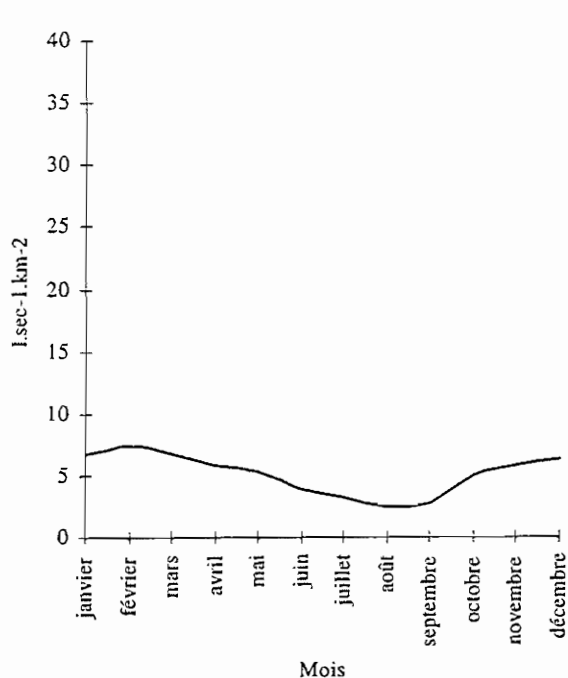
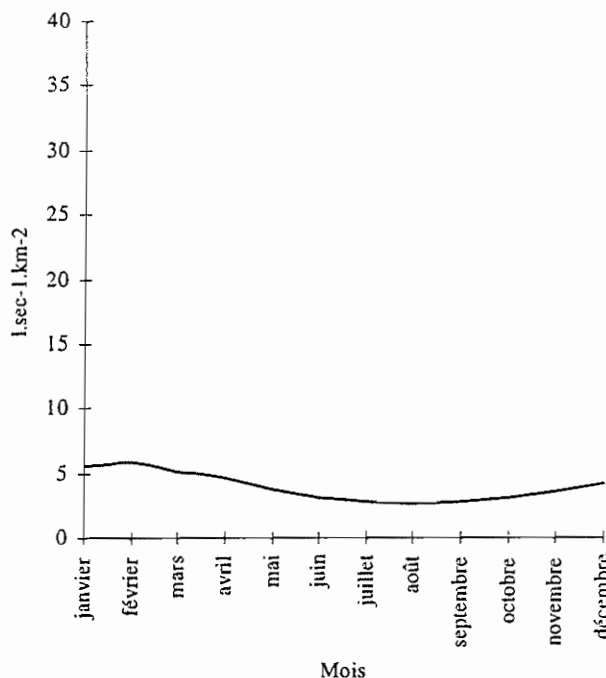


Fig. 18. L'Eure à Incarville



Les nappes captives

Les nappes captives sont des nappes surmontées d'un toit imperméable, l'eau y est donc sous pression, phénomène qui modifie le mode de retour de l'eau vers l'extérieur.

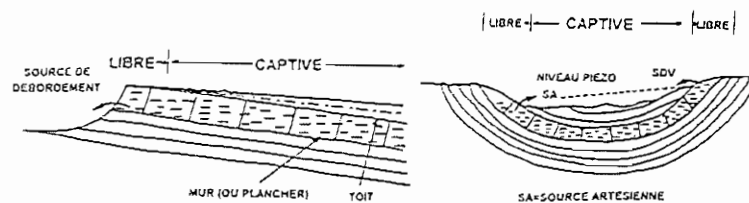


Fig.19 Les nappes captives

Le bassin parisien s'illustre particulièrement dans la superposition stratigraphique des différents aquifères. Cet aquifère multicouches à nappes captives se compose entre autre des Sables de Bracheux et de la Craie du Soissonais (tertiaire) (Cf. Fig. 22 (2)), des Sables Verts (Crétacé) (5), des calcaires du Jurassique supérieur et moyen (9)... . Le fleuve qui traverse cet

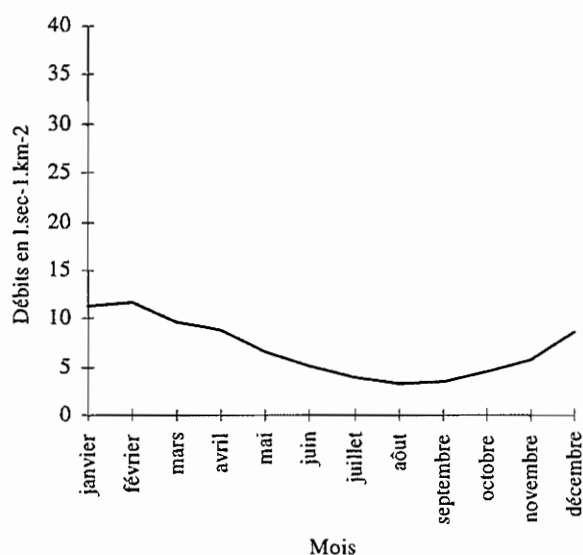
unité sur 776 km, de part la puissance de ses débits (environ $450 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$), la superficie de son bassin versant ($78\,650 \text{ km}^2$) et son influence incontestable sur les résultats obtenus dans la représentation de la "moyenne des débits spécifiques mensuels interannuels" (Cf. fig.12), méritait que l'on s'attarde sur la description de son comportement hydrologique..

La Seine draine un bassin aux conditions climatiques homogènes (influence uniformément océanique) et aux topographies d'ensemble équivalentes. Les principales rivières du réseau prennent leur source à de modestes altitudes, environ 500 m pour la Marne et la Seine. L'Yonne issue du Morvan naît un peu plus haut. Les pentes sont faibles sur les cours d'eau moyens et inférieurs ($10 \text{ cm} \cdot \text{km}^{-1}$) entre Paris et l'embouchure. La convergence du réseau vers le centre du bassin facilite la conjonction des crues, il en est de même des concentrations humaines qui artificialisent l'écoulement par aménagement des lits, la multiplication des barrages et l'imperméabilisation des sols urbains. Elle perd son écoulement naturel, au moins dans la partie moyenne et aval de son cours. Cependant, comme tout les cours d'eau artificialisés, l'écoulement reprend ses droits au dessus des valeurs moyennes de débits. Les crues de la Seine et de ces affluents sont atténuées par l'ampleur des terrains perméables (craie et calcaire) à l'amont de Paris.

Les pluies apparaissant de temps en temps en été, peuvent parfois prendre le dessus par rapport aux pluies d'hiver mais l'évaporation estivale est si importante que ce n'est que durant les périodes froides que le bilan hydrique est le plus important (d'autant plus que les précipitations d'hiver s'exaltent sur les reliefs orientaux), l'écoulement majeur s'effectue donc durant les saisons froides.

Outre la répartition saisonnière des précipitation et les rythmes thermiques, il apparaît dans l'écoulement du bassin de la Seine, le rôle des réserves du sol et du sous sol. En ce sens où il n'est pas sans intérêt de constater le décalage d'un mois qui existe entre les rythmes thermiques (climatologiques) et le rythme hydrologique. Les températures les plus basses sont placées en milieu tempéré semi continental sur Janvier et les plus hautes sur Juillet.(condition du bassin parisien).

Fig. 20 Débits spécifiques mensuels interannuels Cas de la Seine à Poses (Eure)



Or le régime hydrologique de la Seine connaît ses hautes eaux moyennes en Février et ses basses eaux moyennes en Août. Autrement dit, le régime pluvio-évaporal du fleuve se combine avec les conditions établies dans le sol et le sous sol de son bassin. A savoir, une décharge des réserves du sol et du sous-sol par sollicitation évaporatoire durant l'été donnant un minimum des eaux en Août. Une recharge par un volume d'eau qui ne va pas immédiatement à l'écoulement durant la fin de l'Automne. Une abondance des eaux en Février, par la recharge des mois précédent (fin automne jusqu'au début de l'hiver) durant lesquelles, l'évaporation est faible et les précipitations importantes (Décembre, Janvier, Février)

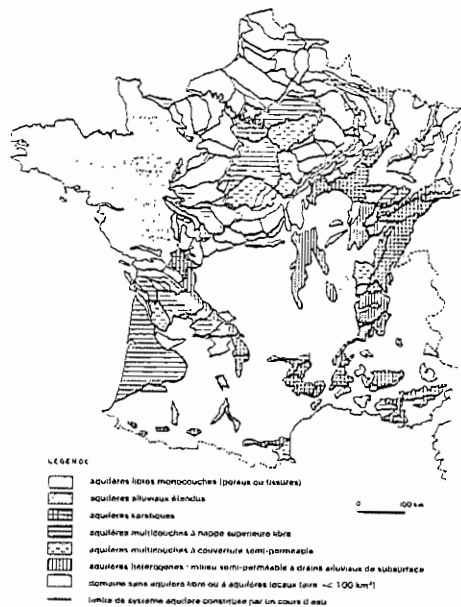


Fig. 21 Principaux aquifères à nappe libre du territoire français

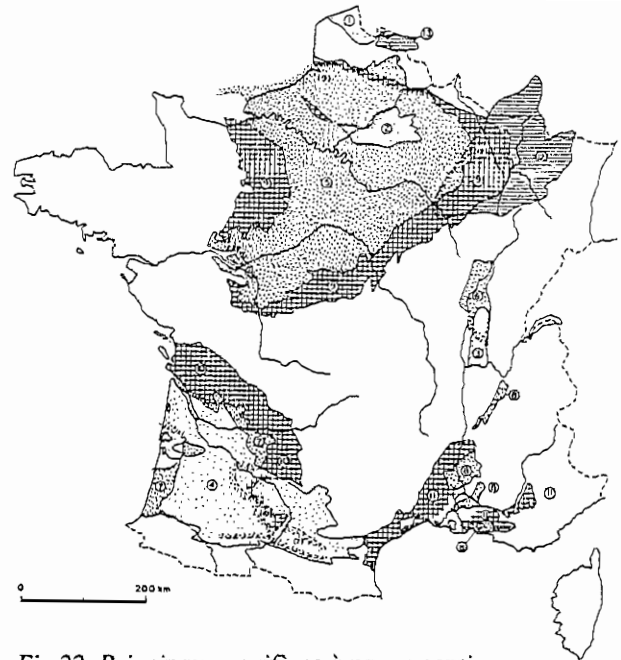


Fig.22. Principaux aquifères à nappe captive du territoire français

1.2.4. Conclusion sur les critères de recherche des stations "ciblées".

Les quelques notions en hydrogéologie abordées précédemment montrent quels sont les facteurs principaux dont il a fallu tenir compte pour essayer de faire la meilleure corrélation possible entre deux stations de jaugeage sur deux cours d'eau différents.

- Dans un premier temps, un régime météorologique commun entre 2 stations (précipitations, températures, durées d'ensoleillements, ...).
- Une géographie similaire des deux bassins versants dictée par des paramètres influençant le régime de cours d'eau :
 - la superficie du bassin versant drainé qui globalement reste proportionnelle à la quantité d'eau écoulee par ruissellement
 - les reliefs et morphologie : l'altitude et la topographie sont des paramètres importants à prendre en compte dans la caractérisation des bassins versants. Le premier par le fait qu'elle influence la pluviométrie, le second par le fait qu'en fonction de la pente, l'eau est plus encouragée à ruisseler (par l'intermédiaire de la gravité) qu'à s'infiltrer ou inversement. La variabilité des pentes influe sur la collecte des eaux, traduisant selon les cas des dynamiques hydrologiques différentes.

La quantification des paramètres topographiques afin de comparer deux bassins versants différents, s'effectue à l'aide de courbes hypsométriques (calcul de surfaces de bassins versants comprises entre des tranches altitudinales).

- La géologie des bassins versants donnant lieu à une diversité des comportements hydrologiques.
- Dans tous les cas, la carte des précipitations et la carte géologique sont des outils indispensables dans la détermination du choix des stations, et de ce fait, privilégient souvent des corrélations basées sur le principe de proximité des stations les unes par rapport aux autres (exemple : tous les cours d'eau bretons ont été corrélés ensembles).

1.3. Estimation des flux, reconstitution des débits bruts.

L'intérêt de l'étude consiste à attribuer une valeur de flux hydrométrique interannuel moyen en $m^3 \cdot sec^{-1}$ aux embouchures d'un maximum de cours d'eau qui se jettent en mer de la Manche. Etant donné le manque relatif de mesures vis à vis des vastes réseaux hydrographiques, ceci autant en France qu'en Grande Bretagne, et le positionnement souvent trop en amont de stations de jaugeage par rapport aux exutoires, la solution retenue a été de réaliser des modèles numériques. Il s'agit de cartes d'isoruissellement ou "isodébits spécifiques" élaborées à partir des mesures de la banque de données entièrement reconstituées.

Ainsi, ces cartes permettent d'attribuer une valeur de ruissellement en tout point de l'espace et notamment aux exutoires des fleuves et rivières qui en étaient dépourvu. Comme on s'intéresse à des débits moyens interannuels, les cartes ayant servi de supports principaux pour la reconstitution des débits sont celles figurées en annexe I p. 4 et 5 ainsi qu'en annexe II p. 36 et 37. Cependant, pour mieux se rendre compte de l'évolution mensuelle du ruissellement, en étroite relation avec celle de la pluviométrie et des températures, des cartes de débits mensuels interannuels ont été réalisées (Cf. Annexe I p. 6 à 29).

1.3.1. Principe d'élaboration des cartes.

Les modèles hydrologiques sont des outils très fréquemment utilisés dans le domaine de l'évaluation, de la valorisation et de la gestion des ressources en eau. L'informatique permet de réaliser certains traitements de manière automatique, ses applications peuvent servir notamment à la réalisation de cartes. Le logiciel *Surfer*, utilisant les principes de calcul de gradients, permet par exemple à l'hydrogéologue de concevoir simplement différents modèles. *Surfer* a été développé au sein de l'environnement Windows, ce qui permet de bénéficier des qualités ergonomiques de l'environnement graphique Windows et d'une réelle aisance quand à l'élaboration des fichiers nécessaires à la conception de ces cartes.

1.3.2. Méthode, les différentes étapes.

X Coord	Y Coord	mm.ans ⁻¹
81516	2407222	511,22
102358	2413054	567,32
105692	2413537	605,54
115191	2396658	676,54
115600	2405830	669,83
122014	2407348	650,96
125432	2381692	699,58
...

Le fichier principal importé est celui contenu dans la banque de données, à savoir, les coordonnées géographiques (longitude et latitude) de chaque point de mesure ainsi que la valeur de ruissellement qui y est associée (module interannuel ou valeurs mensuelles interannuelles).

Dans cet exemple, les stations sont irrégulièrement réparties dans l'espace. De nombreuses superficies ne contiennent aucune valeur.

Fig. 23. Le fichier principal.

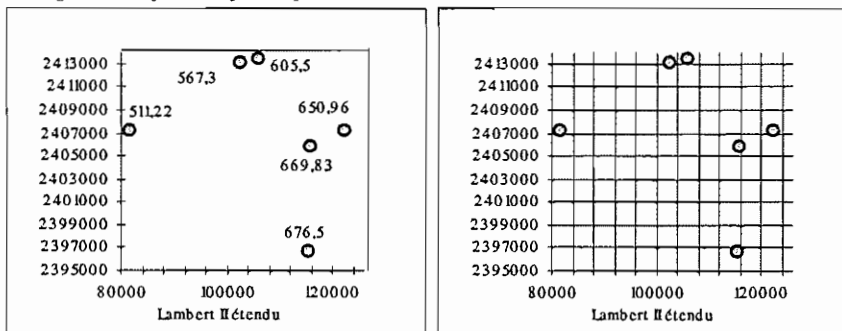


Fig. 24. Etablissement de la grille.

La méthode gridding de *Surfer* se propose de superposer une maille à l'ensemble. A chaque noeud de cette grille, gridding extrapole une valeur de ruissellement qui pourra être différente selon la méthode de calcul utilisée.

Les trois méthodes principales de calcul sont:

Inverse distance

Soit Z, la valeur attribuée à un noeud de la maille,

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i / (D_i)^P}{\sum_{i=1}^n 1 / (D_i)^P} \text{ avec } \begin{array}{l} P = \text{Inverse distweighting power (2,3,...)} \\ Z_i = \text{valeur du point voisin} \\ D_i = \text{distance du point voisin} \\ n = \text{nombre de points voisins considérés} \end{array}$$

On constate que l'influence de la valeur du point voisin est inversement proportionnel au carré de sa distance avec le noeud.

Krigging

Les valeurs au noeud sont calculées de façon linéaire en utilisant des fonctions algorithmes.

Minimum curvature

Cette méthode, dans un premier temps, calcule des valeurs initiales pour chaque noeud de la grille à partir des valeurs de la banque de données. Ensuite, un traitement par équations répétées (itérations) tend à égaliser les valeurs de chaque noeud de la grille. Ceux-ci sont recalculés jusqu'à ce que les paramètres "Minicurv maximum absolute error" ou "Minicurv maximum number of Iteration" soient vérifiés.

Il existe également d'autres méthodes qui ne seront pas développées ici, à savoir Radial Basis Functions, Shepard's Method, Triangulation with Linear interpolation.

A chaque méthode de calcul est associée une méthode de recherche des points s'intégrant dans les calculs :

Normal Search Method : c'est la méthode par défaut. Les valeurs des points les plus proches du noeud à reconstituer vont être pris en compte dans le calcul. Leur nombre est spécifié par les options Search Radius in X data et Number of nearest point.

Quadrant Search Method : l'espace est divisé en quatre aires, dans chacune d'elles, les valeurs des points les plus proches du noeud vont être pris en compte dans le calcul.

Octan Search Method : elle est similaire à la méthode vue précédemment à la différence que cette fois-ci, l'espace est divisé en huit aires similaires.

All : cette méthode intègre tous les points du fichier principal XYZ pour le calcul des valeurs de chaque noeud de la grille.

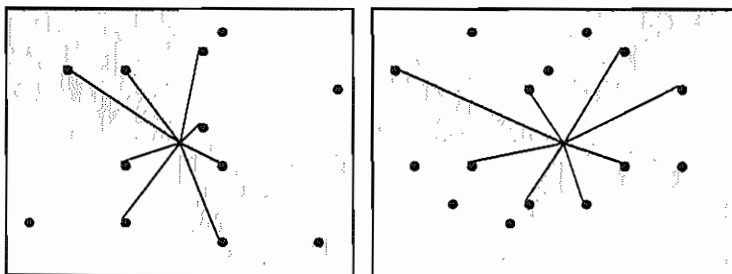


Fig. 25. Quadrant et Octan Search Method.

Dans ces ensembles, les deux points les plus proches dans chaque *quadrant* participent au calcul de la valeur du noeud pour la Quadrant Search Method (gauche) alors que dans la méthode Octant Search Method (droite), seulement un point dans chaque *octant* est pris en compte.

- Search radius in X data correspond au rayon du cercle dans lequel doit se trouver les points intégrés dans le calcul. Cette valeur est calculée par défaut selon les paramètres de la banque de données (distance moyenne interstation) ou peut être fixée par l'utilisateur. Dans certaines conditions même, ce cercle peut être transformé en ellipse.
- Number of nearest points correspond au nombre de points les plus proches voisins du noeud, compris dans le cercle de recherche, dont les valeurs vont être intégrées dans les calculs par les différentes méthodes. La valeur par défaut est 10 mais peut s'étendre jusqu'au maximum de points contenus dans une banque de données.

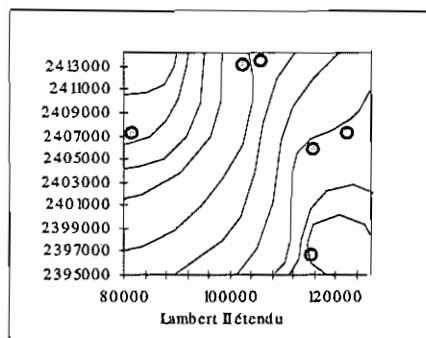


Fig.26. Tracé des courbes de mêmes valeurs.

Lorsque chaque noeud de la grille possède une valeur, tout l'espace est régulièrement caractérisé par une valeur de ruissellement. *Surfer* peut alors tracer des courbes d'isovaleurs dont les paramètres (intervalles, fréquences, labels, couleurs, ... etc.) sont définis préalablement par l'utilisateur pour obtenir l'information la plus lisible possible. Ces paramètres resteront constants par soucis de comparaison entre les différentes cartes (fréquences, épaisseurs des courbes ... etc.).

1.3.3. Condition de réalisation des cartes d'isoruissellement.

1.3.3.1. Condition propre à la banque de données hydrométriques :

- ◇ L'ensemble des stations doit posséder la même référence géographique. A cet effet, toutes les stations de jaugeage au territoire français ont été répertoriées en coordonnées Lambert II étendu. A l'origine, les stations de jaugeage du territoire de Grande-Bretagne ont été fournies dans le système géographique de référence Anglais. Chacune de ces stations ont été retranscrites en coordonnées Lambert II étendu par analogie graphique.
- ◇ Pour que les cartes soient interprétables, *Surfer* ne peut en aucun cas élaborer directement les grilles avec des valeurs de débits en $\text{m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$. Il n'y aurait aucun intérêt à calculer des gradients entre des mesures de débit brut dont les ordres de grandeur différent complètement en fonction des superficies des territoires drainés. La cohérence des résultats sur l'ensemble des territoires concernés implique l'utilisation de mesures de ruissellement rapportées à des valeurs unitaires de bassin versant, soit l'utilisation de valeurs de débit spécifique ($\text{mm} \cdot \text{an}^{-1}$ ou $\text{l} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$).
- ◇ Chaque station utilisée pour l'élaboration des grilles comporte un historique initial ou reconstitué au moins supérieur à 10 ans.

1.3.3.2. Condition propre au logiciel *Surfer* :

Afin de pouvoir comparer les cartes les unes par rapport aux autres et notamment dans l'analyse des évolutions mensuelles du ruissellement et de ses relations avec les paramètres précipitation, évapotranspiration, ... , chaque carte a été élaborée avec le même type de grilles, à savoir, une distance internoeuds constante. Dans les conditions optimum, la distance

internoeuds doit correspondre environ au tiers de la distance moyenne entre chaque point de mesures. En effet, la dimension de la maille d'une grille peut être assimilée à un filtre : Si le pas est grand, les cartes ne montrent seulement que des tendances aux échelles régionales, inversement, plus un maillage diminue et plus l'information locale est mise en évidence. Il faut toutefois prêter attention à ne pas prendre un maillage trop réduit comparé aux distances moyennes interstations, ce qui risquerait d'engendrer la formation d'artefacts. La réduction du maillage afin d'obtenir de trop bonnes précisions crée souvent l'inverse de l'effet désiré.

C'est en tenant compte de ces arguments que pour l'élaboration des cartes, le maillage arbitrairement choisi a été de 5 Km sur 5 Km.

Chaque méthode de calcul a ses avantages et ses inconvénients. Inverse distance est certes une méthode rapide mais donne vraisemblablement, dans la plupart des cas, des résultats moins précis que Krigging ou Minimum Curvature dont les résultats apparaissent plus fiables dans les zones dépourvues de données. La figure 27 ci-dessous montre l'importance du choix de la méthode à utiliser, elle conditionne manifestement les résultats obtenus, et ceci à partir du même fichier initial.

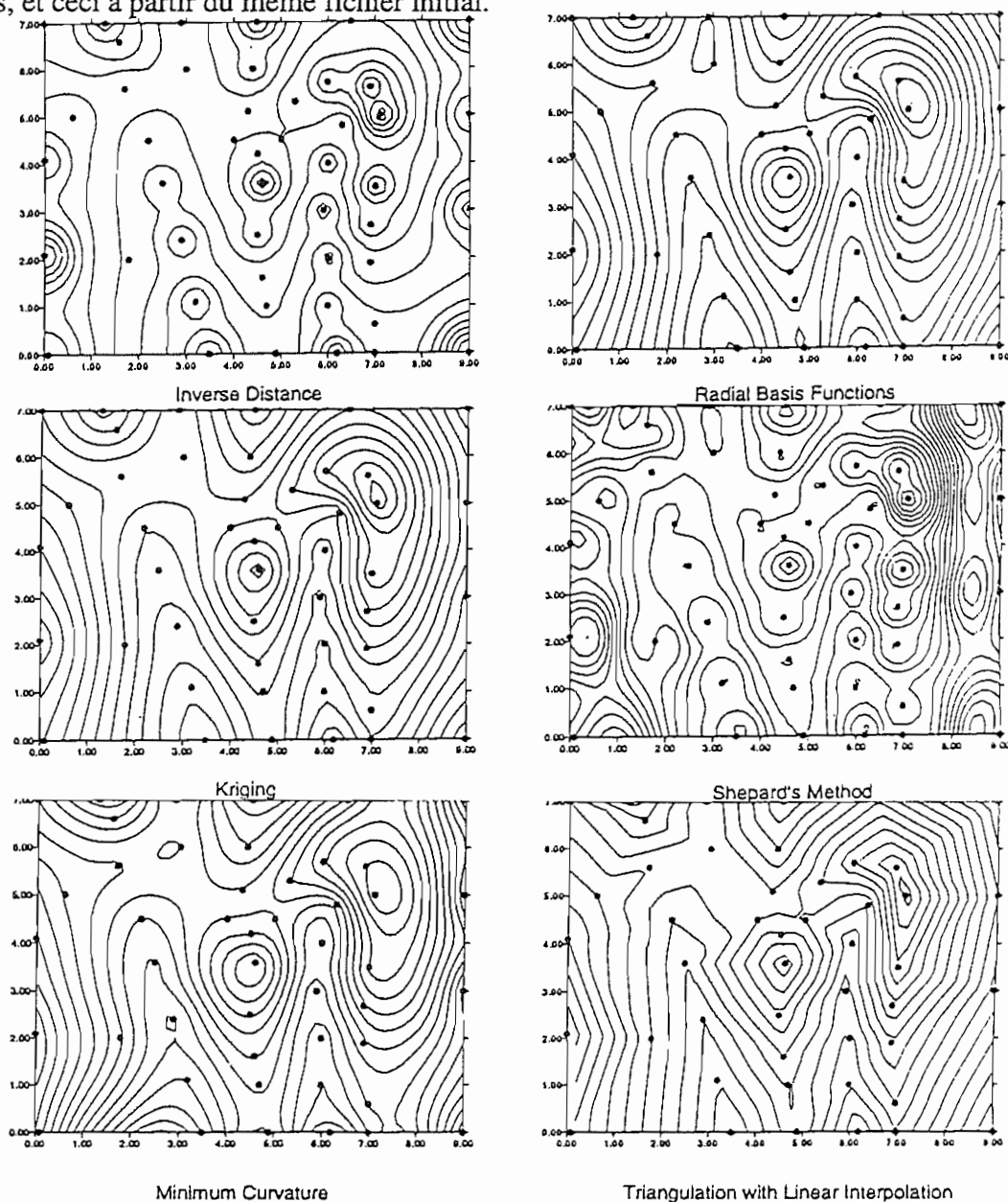


Fig. 27. Illustration de la diversité des résultats obtenus en fonction de la méthode de calcul utilisée.

Pour la création des cartes d'isouruissement, l'irrégularité de la répartition des stations de jaugeage a fait que la méthode Krigging a été retenue.

Le choix de la méthode de recherche des plus proches voisins est lui aussi déterminant. Quadrant et Octant Search Method sont des méthodes normalement utilisées pour traiter des données à intervalles très courts, alignées sur des radiales largement séparées les unes des autres (exemple : semis radial en Bathymétrie). Ainsi, ces méthodes forcent le logiciel à aller chercher des points voisins rayonnant autour du noeud de la grille. Parce que le type de rayonnement n'est pas aussi rigoureux que pour Octant, Quadrant Search Method peut parfois engendrer la formation d'anomalies. Normal Search Method semble plus destinée à calculer une grille dans une direction privilégiée de l'espace. Le passage Normal à Quadrant jusqu'à Octant Search Method montre une augmentation du lissage des courbes.

Là encore, le choix de la méthode de recherche des points voisins est un paramètre capital à prendre en compte tant son influence sur les résultats obtenus est incontestable. Pour la réalisation des cartes, All est la plus appropriée au problème posé.

La détermination du nombre de points voisins à intégrer dans le calcul de la valeur à chaque noeud a elle aussi son importance : un trop grand nombre de points entraîne un lissage très important des valeurs donc des courbes d'isouruissement. A l'inverse un très faible nombre de points engendre souvent la formation de gradients très irréguliers et de courbes abruptes. Pour l'élaboration des cartes, la valeur par défaut de 10 sera retenue.

1.3.3.3. L'élaboration des fichiers .

Pour parvenir à la mise en forme des cartes, la réalisation de nombreux fichiers propres au logiciel *Surfer* a été nécessaire. A chaque fois, il s'agit de fichiers "data type (X,Y)". Ces fichiers sont lus par le logiciel de la manière suivante : chaque point répertorié en (X,Y) par ses coordonnées Lambert II étendu est relié d'un trait au point qui le succède dans le fichier. Tous ces fichiers sont le résultat de numérisations de documents scannés ayant été consciencieusement dessinés au préalable.

Le fichier principal correspond au support cartographique. Il dessine les traits de côtes qui englobent les régions françaises et de Grande-Bretagne concernées.

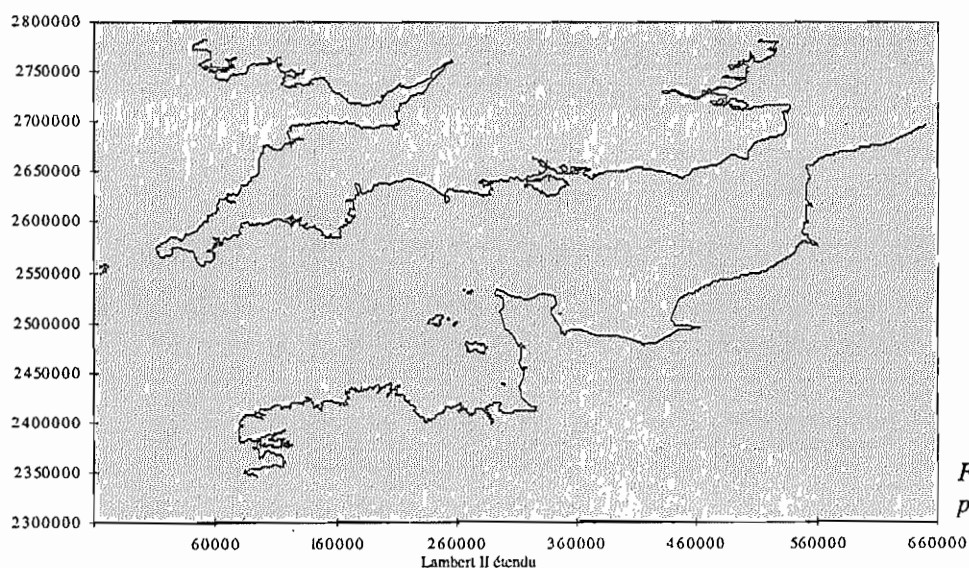


Fig. 28. Le fichier principal.

Les fichiers auxiliaires correspondent aux dessins venants se superposer aux fonds cartographiques, il s'agit en fait des limites de bassins, du tracé de certains cours d'eau, ... etc.

Les fichiers "blank" ne participent pas à la représentation graphique proprement dite. Ils délimitent des polygones à l'intérieur desquels les courbes d'isoruissellement seront représentées et non à l'extérieur. Ceci tient du fait que lors de l'élaboration de grilles, certains noeuds de la maille se trouvent dans l'espace maritime de la Manche. Le logiciel calcule alors des valeurs pour chacun de ces noeuds selon les gradients en direction des stations sur le continent. Celles-ci sont aberrantes vis à vis de l'éloignement des stations sur le continent et n'ont aucun sens compte tenu du fait qu'il n'existe aucun ruissellement fluvial à proprement parlé en mer de la Manche. Le but des fichiers "blank" est donc d'inhiber ces valeurs "virtuelles" et erronées en les masquant tout simplement.

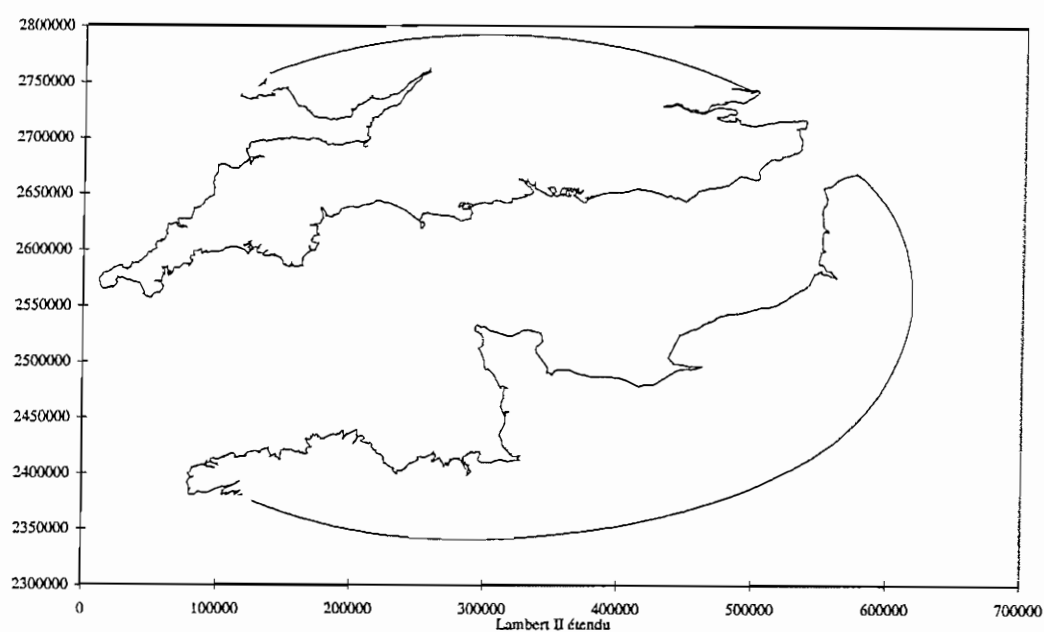


Fig. 29. Limites des fichiers "blank" utilisés.

2. Résultats et discussions.

2.1. Résultats obtenus d'après les cartes réalisées.

2.1.1. Méthodes et principes .

La méthode consiste à réexploiter les cartes créées sous *Surfer* (Cf. Annexes I et II). Comme elles montrent des valeurs de ruissellement dans tout l'espace littoral de la mer de la manche, il suffit pour reconstituer un débit brut en $\text{m}^3.\text{sec}^{-1}$ à un exutoire, de multiplier sa valeur de débit spécifique obtenue par extrapolation (en mm ou en $\text{l}.\text{sec}^{-1}.\text{Km}^{-2}$) par la superficie du bassin versant du cours d'eau concerné.

$$\text{m}^3.\text{sec}^{-1} = \frac{\text{l}.\text{sec}^{-1}.\text{km}^{-2} \cdot \text{Superficie du bassin versant}}{1\ 000} \qquad \text{m}^3.\text{sec}^{-1} = \frac{\text{mm}.\text{an}^{-1} \cdot \text{Superficie du bassin versant}}{31548.96}$$

La difficulté est donc, à ce stade de l'étude, de connaître la superficie des bassins versants non plus en amont des stations de jaugeage mais cette fois, aux embouchures des cours d'eau intéressés. Pour certains d'entre eux, ces valeurs ont été fournies par la DIREN de Basse Normandie, sinon, un calcul par planimétrie et calcul vectoriel assisté par ordinateur ont été réalisés à partir des cartes de bassins versants fournies par l'Agence de l'eau, la DIREN, l'Institute of Hydrology, British Geological Survey et l'Environment Agency.

2.1.2. Résultats.

Les mesures de débits bruts reconstitués lors de l'étude aux embouchures des principaux cours d'eau sont illustrées à la fin de cet ouvrage (Cf. Annexe III p. 40,41,42,43,44.). Les valeurs de débits supérieures à $1\text{m}^3.\text{sec}^{-1}$ ont été mises en avant par rapport à celles qui y sont inférieures. Cependant, comme le montre la brève analyse statistique des résultats (Cf. Annexe IV p. 46,47,48,49.), il conviendra de ne pas négliger l'importance des petits cours d'eau pour les interprétations à suivre.

2.2. Discussion sur les limites de la méthode.

Les méthodes utilisées lors de cette étude auraient pu renfermer plusieurs sources d'erreurs possibles, cependant, à chaque étape, des moyens de vérification ont permis de confirmer la validité des résultats obtenus.

2.2.1. Erreurs réalisées sur les cartes d'isoruissellement

Que ce soit pour la méthode de calcul utilisée d'une part, la dimension des grilles utilisées d'autre part, les choix qui ont été faits de manière plus ou moins arbitraire, l'ont été dans le but d'obtenir des cartes les plus représentatives possibles, sans artefacts mais sans trop lisser les courbes non plus. Cependant, l'importance de ces choix est primordiale vis à vis de

la grande variabilité des résultats obtenus d'une méthode à l'autre (Cf. Chap. 1.3.3.2. et Fig. 27).

les stations de jaugeage :

- ◇ Là encore, le temps minimum d'étude de 10 ans correspond à une limite fixée plus ou moins arbitrairement. La question et de savoir si cette durée est vraiment assez représentative ne serait ce qu'en prenant en compte le processus de sécheresse engagé depuis quelques années.
- ◇ De plus, il existe une hétérogénéité certaine dans la représentativité des mesures servant à l'élaboration des cartes. En effet, certaines stations ne possèdent seulement qu'un historique de 10 ans et qui de plus est le résultat d'une reconstitution par corrélation à 95% avec une autre station. (En notant d'ailleurs que les reconstitutions effectuées sont plus ou moins rigoureuses en fonction de l'importance de la chronique de mesures en commun entre les deux stations). A coté de cela, certaines stations servant à l'élaboration des mêmes cartes possèdent des historiques de mesures trentenaire et plus, et sont donc de surcroît, beaucoup plus représentatives..
- ◇ Le nombre de stations par unité de surface apparaît variable dans l'espace, certaines régions sont très bien représentées alors que d'autres beaucoup moins. Ce contraste dans la densité d'information est observable aussi bien en Grande Bretagne qu'en France, ne serait ce que par exemple entre la Basse Normandie et la Picardie qui présente un réseau de mesures beaucoup moins dense (Cf. Annexe. I p. 3).

➤ Dans tous les cas, même si l'échelle des cartes d'isoruissellement est grande, le fait qu'elles servent de support pour reconstituer des débits en des endroits très localisés, nous a contraint a appliquer un maximum de rigueur dans l'obtention de ces cartes.

Il existe une méthode qui permet de confirmer la validité de ces cartes. Cette étape obligatoire consiste à superposer les cartes de ruissellement obtenues avec celles des précipitations et d'évapotranspirations, sachant que globalement à long terme, l'équation s'écrit : Ruissellement = Précipitation - Evapotranspiration (Cf. Chap. 1.2.2.).

D'ailleurs, la superposition quasi parfaite entre les cartes des précipitations issues des valeurs d'eau précipitée aux stations de jaugeage de Grande Bretagne (Cf. Annexe II p.33,34,35.) avec les cartes des précipitations faisant l'objet de publications, a confirmé la validité des techniques utilisées pour les cartes d'isoruissellement à partir de ces mêmes stations.

2.2.2. Erreurs sur la reconstitution.

2.2.2.1. Erreurs sur la lecture de la carte réalisée.

Outre les erreurs de lecture dues à la plus ou moins bonne appréciation des différentes courbes de niveaux sur les cartes, il est important de choisir judicieusement, pour un endroit donné, la valeur de ruissellement qui va servir à la reconstitution de son débit brut : Du fait des raisons évoquées dans le chapitre 1.3.3.3. "Elaboration du fichier Blank", un phénomène plus ou moins paradoxal apparaît. En effet, contrairement aux régions non côtières, internes, où le nombre de stations est important et donc où les cartes de valeurs de ruissellement sont assez précises, les zones côtières qui nous intéressent, risquent d'être les moins précises et les

moins fiables. D'une part, parce que le nombre réduit de stations de mesures et donc l'espacement considérable entre chacune d'entre elles, induit un manque de précision lors des calculs par le logiciel. Ce phénomène est d'ailleurs renforcé par le fait qu'il n'y ait aucune valeur dans l'espace maritime voisin, ce qui d'autre part, implique des calculs de gradients tendant vers 0 du continent vers le large, perturbations pouvant se faire ressentir assez loin vers l'amont.

C'est pourquoi, il faudra rester prudent dans l'interprétation des résultats à la lecture des cartes et choisir judicieusement des points qui ne soient pas situés trop près de la côte lors de la conversion en débit brut. Ainsi, une valeur de ruissellement un peu plus en retrait dans les terres est parfois préférable, même si celle-ci est un peu sous-estimée par rapport à sa réelle valeur à l'embouchure.

2.2.2.2. Erreurs sur les calculs de la superficie des bassins versants.

Mise à part les quelques valeurs fournies par la DIREN, la plupart des superficies des bassins ont été calculées par planimétrie et par les logiciels de dessin vectoriel après numérisation de superficies concernées. Les deux méthodes sont complémentaires dans la mesure où elles permettent de valider les résultats de l'une par rapport à l'autre.

➤ Le seul moyen existant pour contrecarrer les erreurs sur la reconstitution est de comparer les valeurs de débits bruts reconstitués avec des valeurs mesurées à des stations de jaugeage aux mêmes endroits ou bien un peu plus en amont, et ceci en quelques points remarquables. Dans la plupart des cas, les résultats sont similaires ou du même ordre de grandeur.

2.3. Conclusion sur la qualité des résultats obtenus.

Pour cette étude, l'intérêt était seulement d'avoir une idée sur la lame d'eau tellurique totale écoulee en mer de la Manche et sur l'importance de chacun des débits brut en essayant de les reconstituer le plus fidèlement possible.

Bien entendu, l'ensemble de tous les cours d'eau n'ont pas été pris en compte et le constat établi ne se veut pas totalement exhaustif. En France, la majorité des fleuves et des rivières ont été reconstituées alors que pour l'Angleterre, l'absence d'information sur les plus petits bassins versants a amené à ne considérer que les cours d'eau principaux les plus importants.

Néanmoins, autant pour la France que pour la Grande Bretagne, l'influence des fleuves et des rivières prédominants qui contribuent le plus à l'élaboration du flux total est nettement remarquable (Cf. Annexe IV p 46,47 et 48). Ce sont ces cours d'eau qui seront à prendre en compte prioritairement pour établir un constat du flux tellurique de Ca^{2+} .

3. Conclusion de l'étude et perspectives.

En dressant un constat des flux telluriques en mer de la Manche, cette étude permet de connaître la part des apports liquides des principaux cours d'eau français et anglais.

Ce constat est donc un outil indispensable pour l'analyse quantitative du transit par les fleuves et les rivières, de n'importe quel type d'élément à condition de connaître ses concentrations dans les cours d'eau concernés. Cette étude a permis de mettre en évidence les informations indispensables pour la réalisation de divers types de bilans (physico-chimiques, sédimentologiques, écologiques, ...) dans l'espace maritime de la Manche.

En ce qui concerne le Calcium, même s'il s'agit de données publiques comme pour le ruissellement, le problème tient du fait qu'en général il n'existe que peu de mesures. Les analyses restent coûteuses et on ne trouve globalement qu'une mesure d'un mois sur l'autre, sur des cours d'eau généralement différents en fonction des laboratoires d'analyses.

Grâce à cette étude et à la banque de données déjà existante sur le Ca^{2+} , une estimation de la quantité de calcium dissous ou particulaire d'origine continentale, arrivant par unité de temps dans la mer de la Manche, pourra être réalisée. Ainsi, il sera déterminé si les apports carbonatés continentaux participent ou non à l'anomalie en carbonate de la plateforme Manche, ou si son origine vient des autres pistes de recherches envisagées.

Bibliographie.

- CABIOCH L, SALOMON JC, CHABERT D'HIERES G, BOXALL S, GUEGUERIAT P, STATHOM P. 08 1993, Hydrodynamics and Biogeochemical Fluxes in the Eastern Channel, Fluxes into the North Sea. 174 pp.
- INSTITUTE OF HYDROLOGY. BRITISH GEOLOGICAL SURVEY. 1993, Hydrological Data United Kingdom. Hydrometric register and Statistics 1986-90. 190 pp.
- ENVIRONMENT AGENCY .09-97 The quality of Rivers and Canals in England and Wales 1995. pp 1-36.
- A MORETTE .1964, Précis d'Hydrologie. 532 pp.
- P PAGNEY. 1988, Climats et cours d'eau de France. 248 pp.
- JP VIGEAU . 1996, L'eau Atmosphérique et Continentale. 190 pp.
- J.BODELLE, J.MARGAT. 1980, L'eau souterraine en France. 208pp.

Contacts et Remerciements.

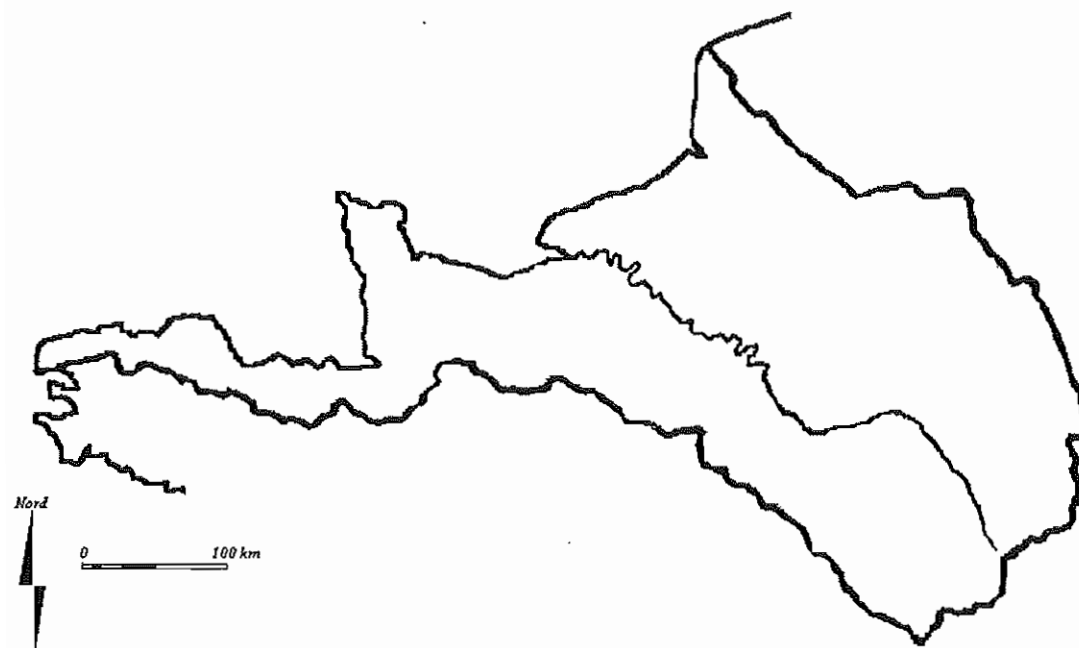
F Gresselin, H Caplet (DIREN Basse-Normandie) - R Lemaire (Agence de l'eau, Seine Normandie) - F Mortreux (Agence de l'eau, Seine Normandie) - V Aubron, Y Pellarin (DIREN Bretagne) - JM Sarthou (Service de la Navigation de la Seine (4ème section) - Service maritime de la Seine Maritime (3ème section) - Subdivision de navigation et de lutte contre la pollution) - MF Bazerque (DIREN Picardie) - B Briquet (DIREN Nord-pas-de-Calais) - M. Bihannic (DIREN Haute Normandie) - JP Decroix (SEMA Haute Normandie) - A Beauchat (Agence de l'eau Loire Bretagne).

M Lees (National Water Archive / Institute of Hydrology) - D Mills (Environment Agency) -C Manby, C Slack(Southern Water) - N Brodrick (Institution of Water and Environment) - L Cook (Environment Agency).

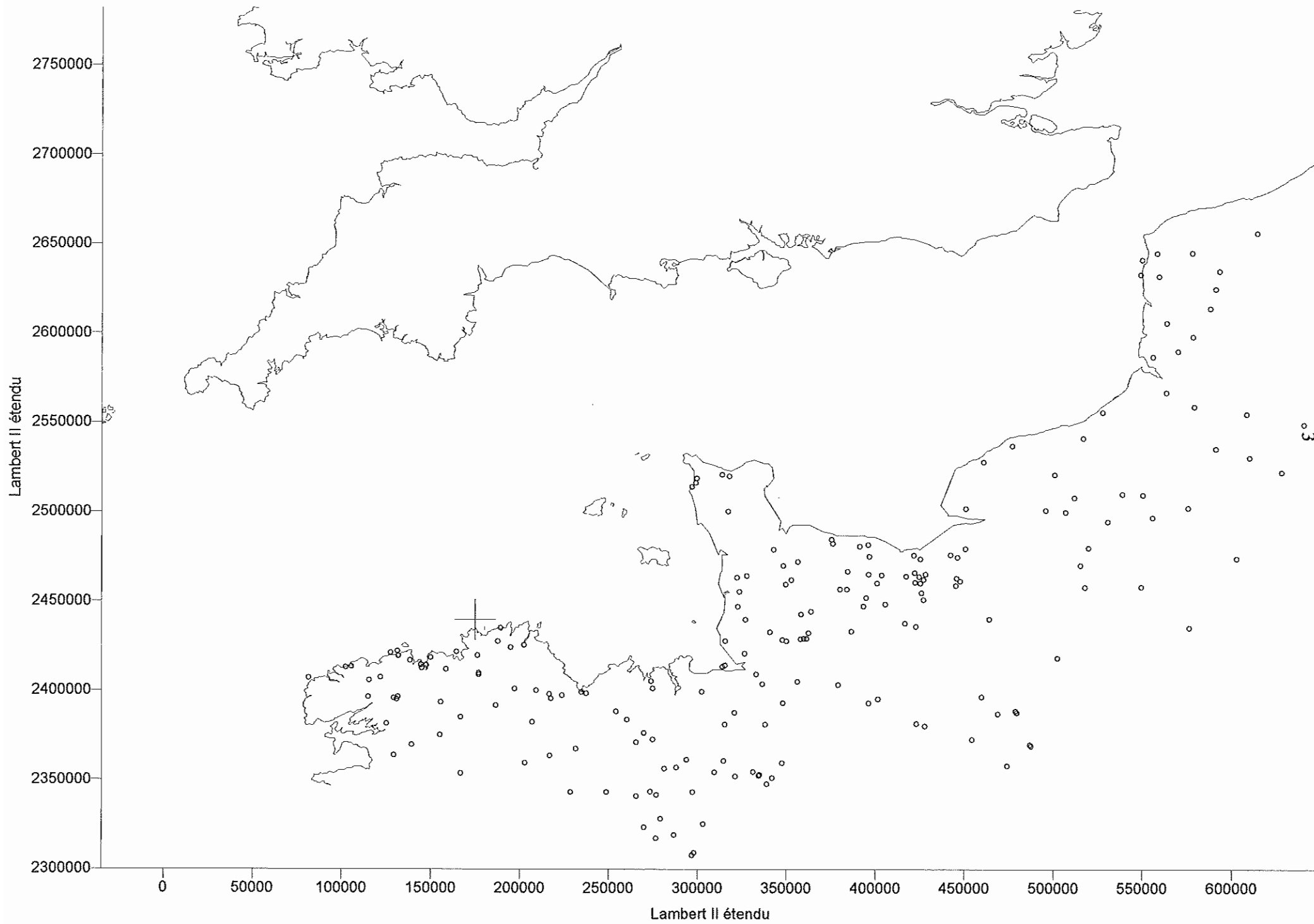
JP Auffret et N Poupinet.

ANNEXE I

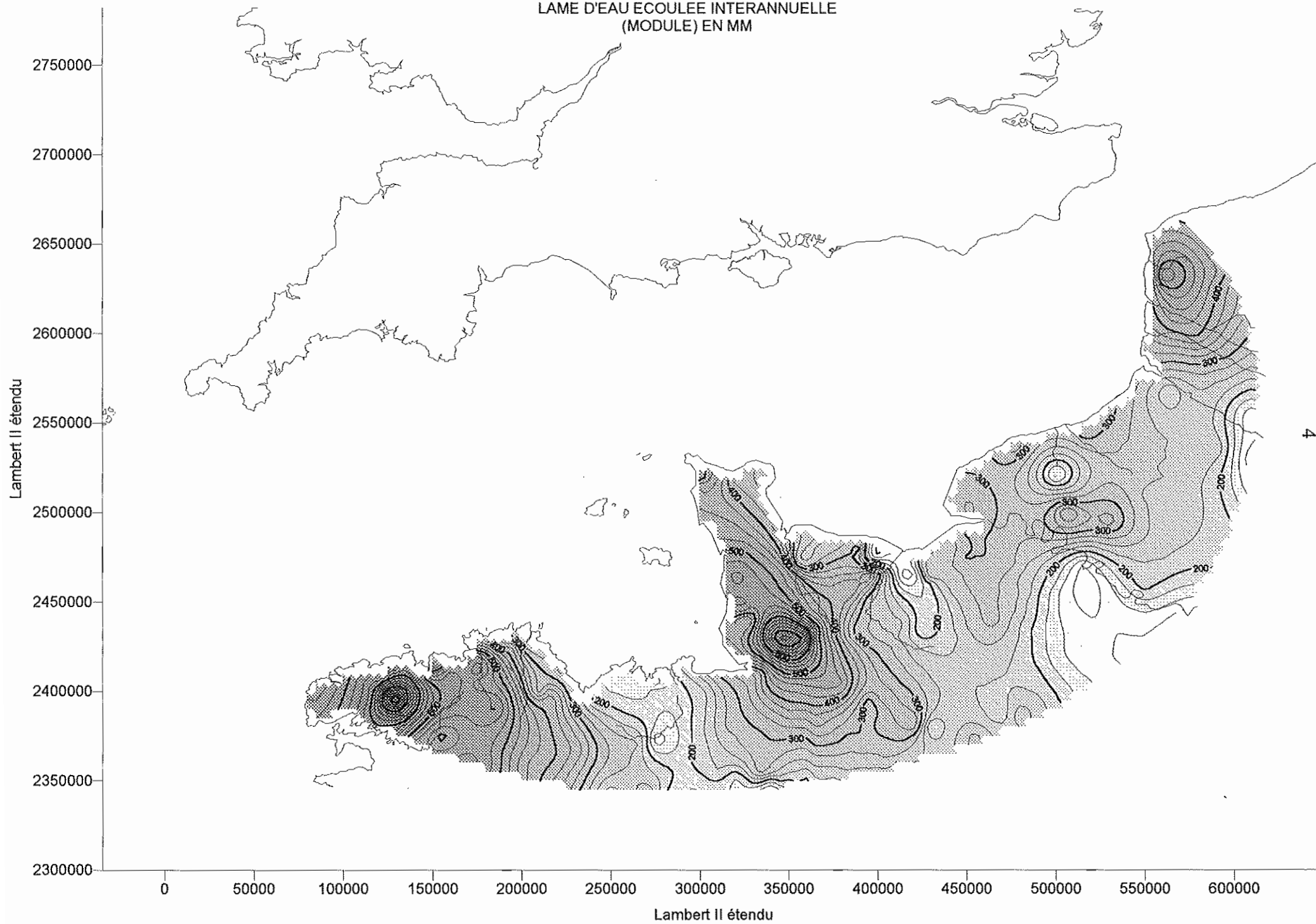
**SUPERFICIES,
LOCALISATION DES STATIONS DE JAUGEAGE
ET CARTES DE DEBITS SPECIFIQUES
DES BASSINS VERSANTS FRANCAIS**



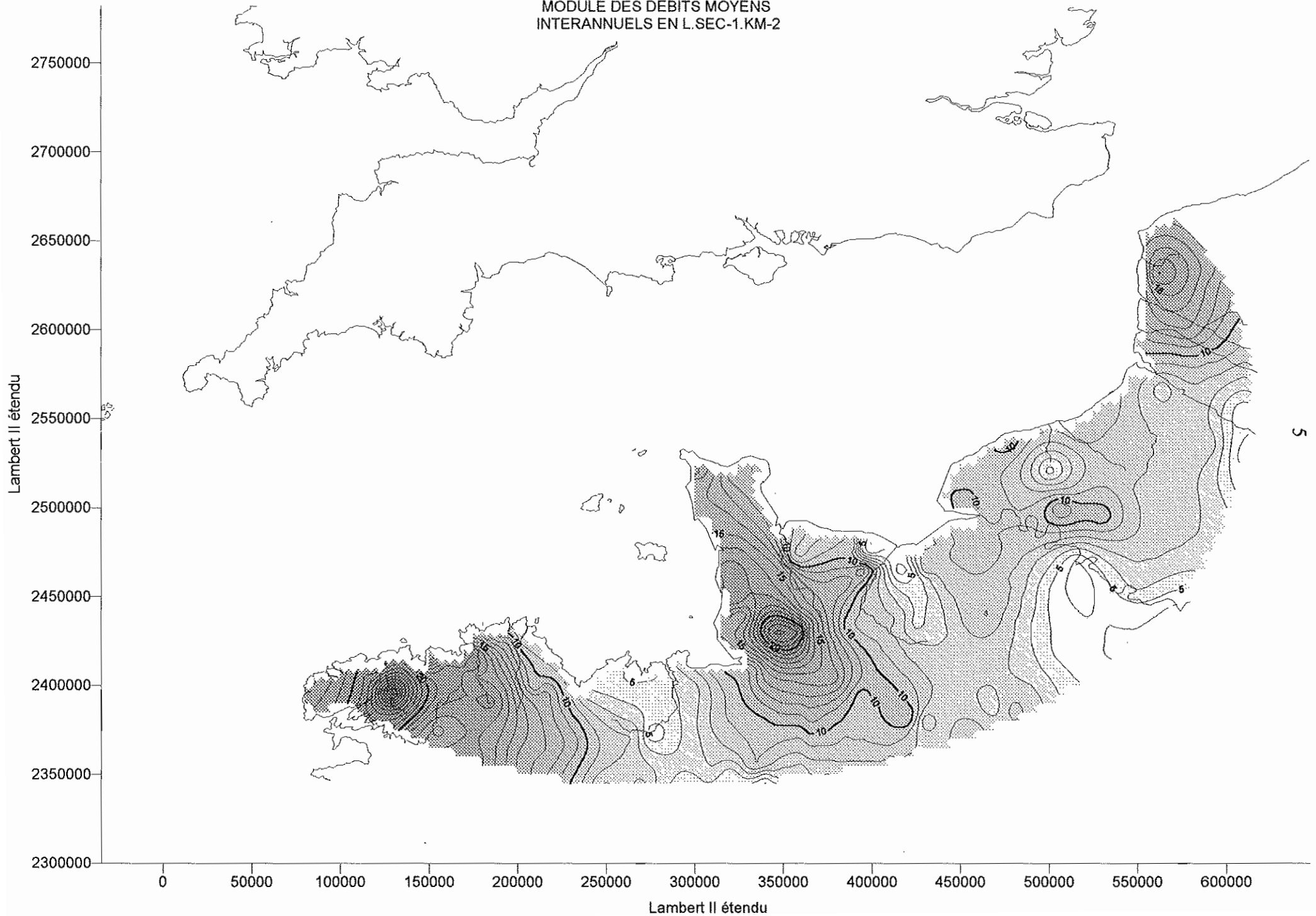
Carte de situation de l'ensemble des bassins versants de la Manche pour la France.



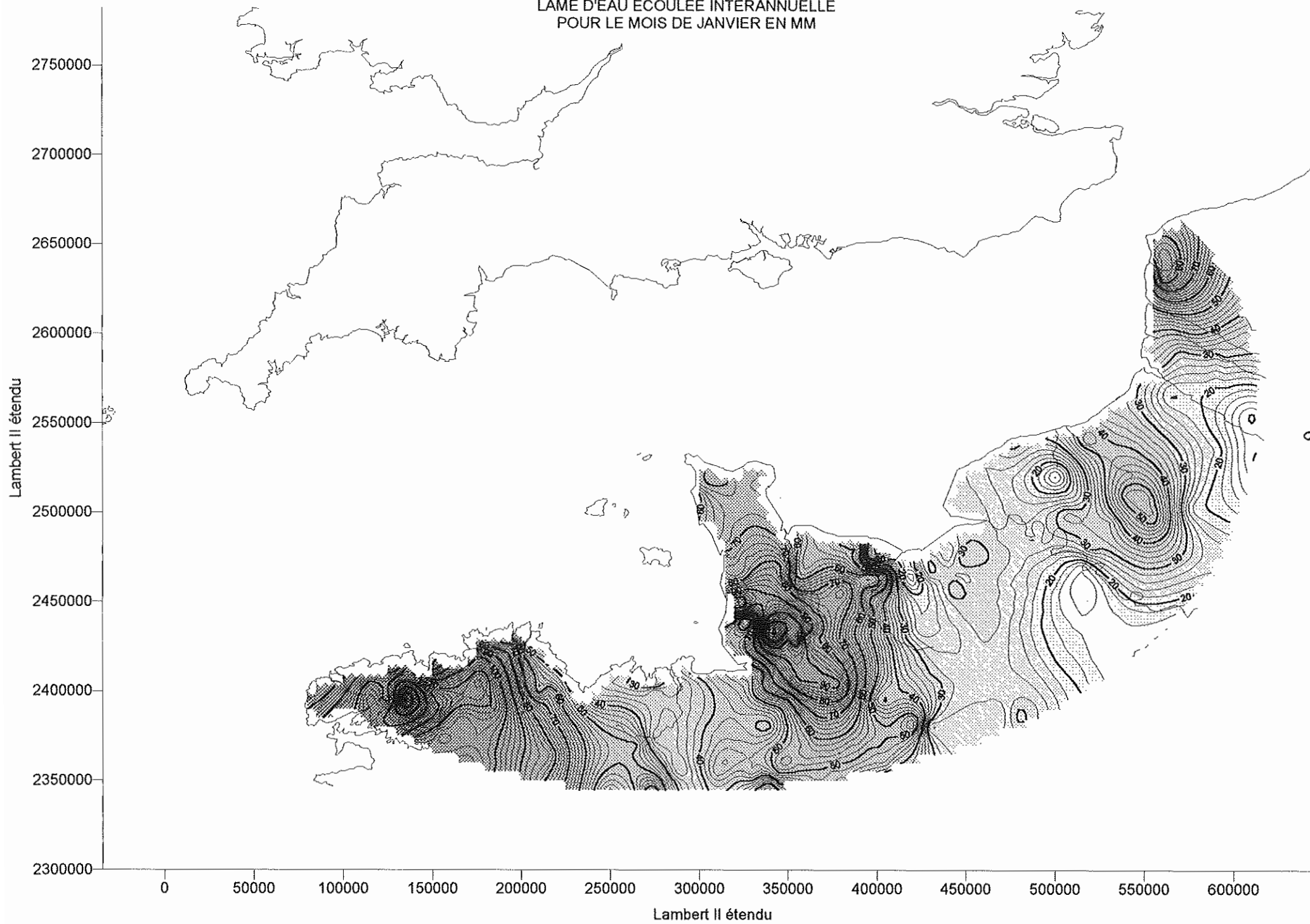
LAME D'EAU ECOULEE INTERANNUELLE
(MODULE) EN MM



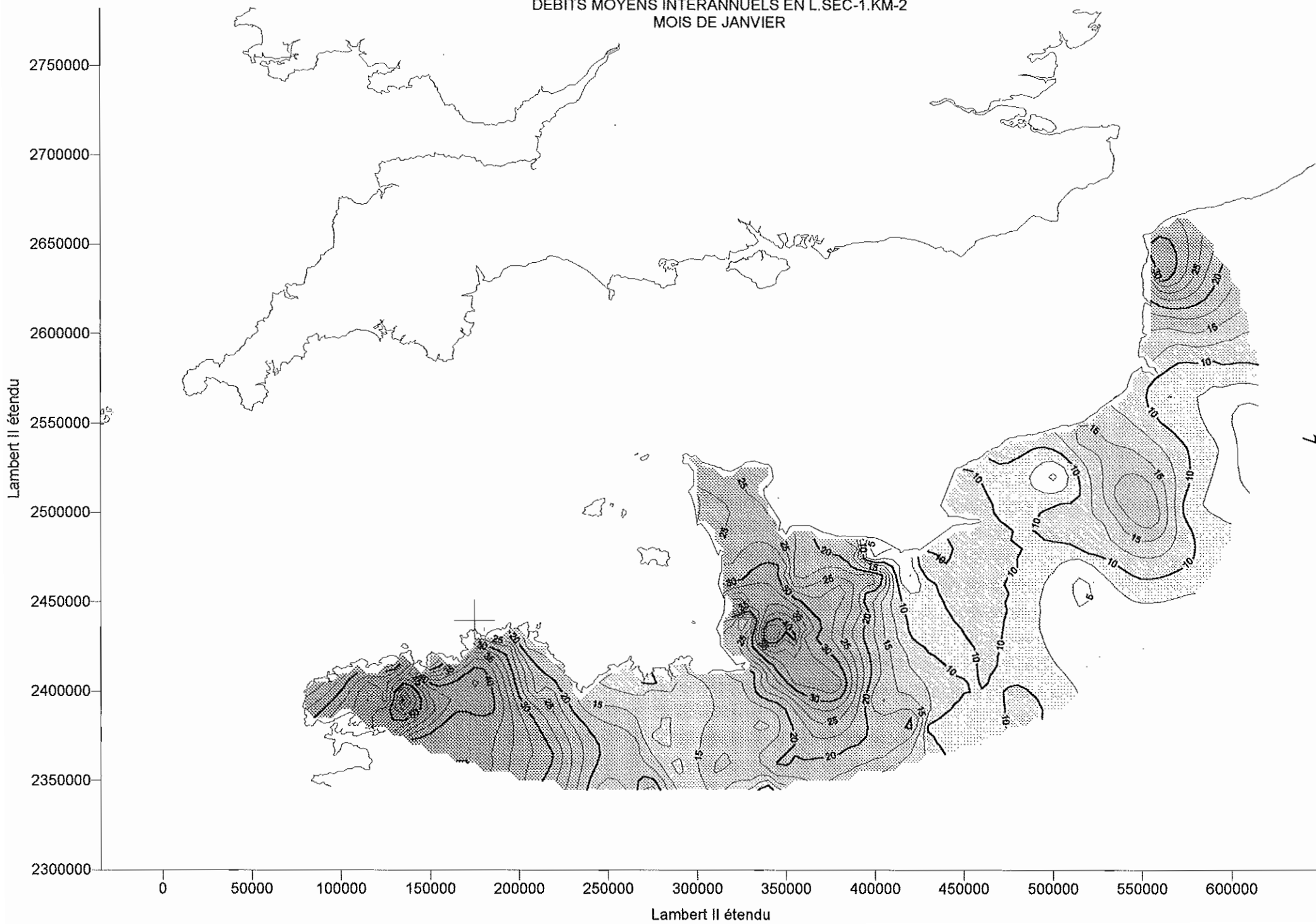
MODULE DES DEBITS MOYENS
INTERANNUELS EN L.SEC-1.KM-2



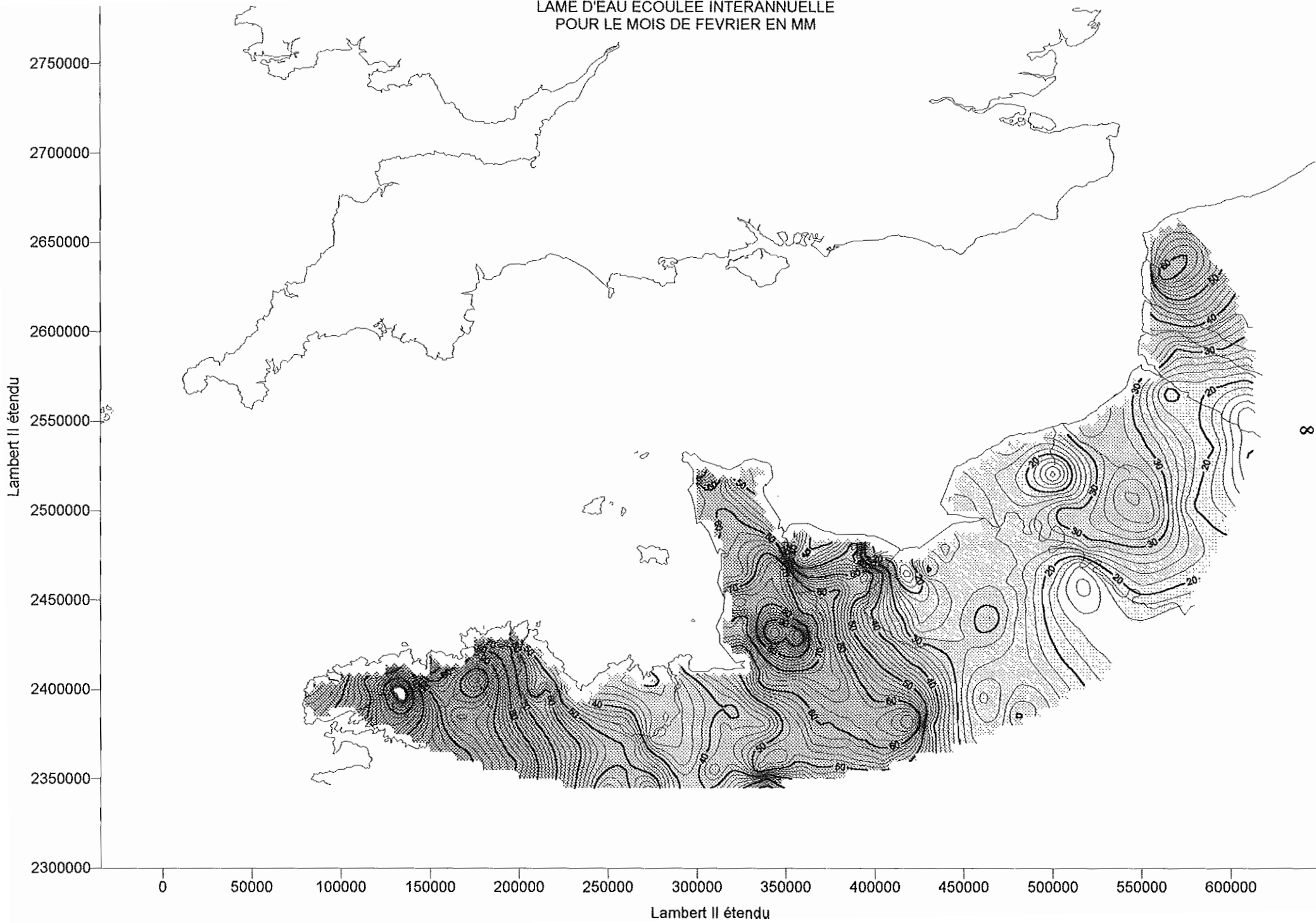
LAME D'EAU ECOULEE INTERANNUELLE
POUR LE MOIS DE JANVIER EN MM



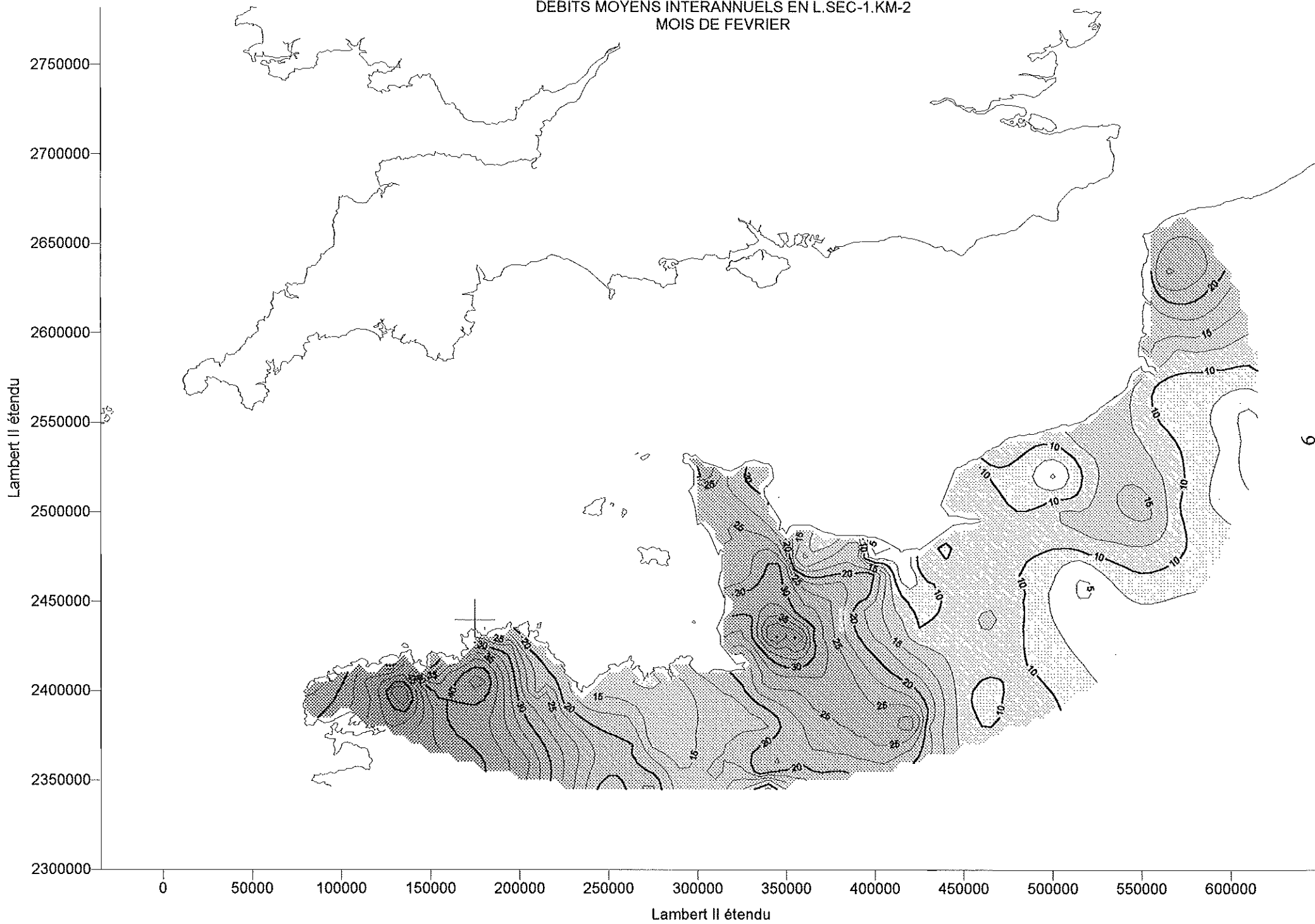
DEBITS MOYENS INTERANNUELS EN L.SEC-1.KM-2
MOIS DE JANVIER



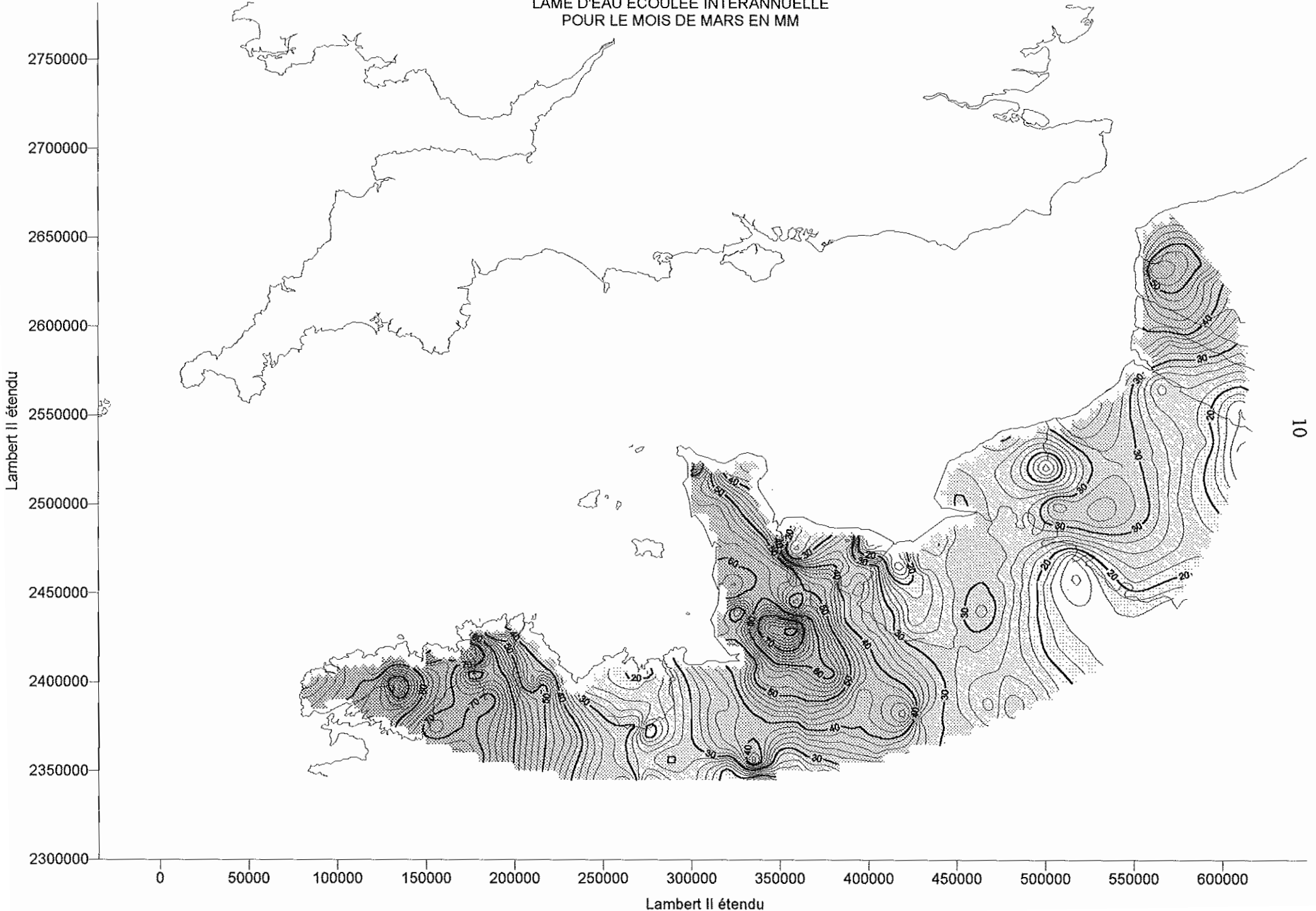
LAME D'EAU ECOULEE INTERANNUELLE
POUR LE MOIS DE FEVRIER EN MM



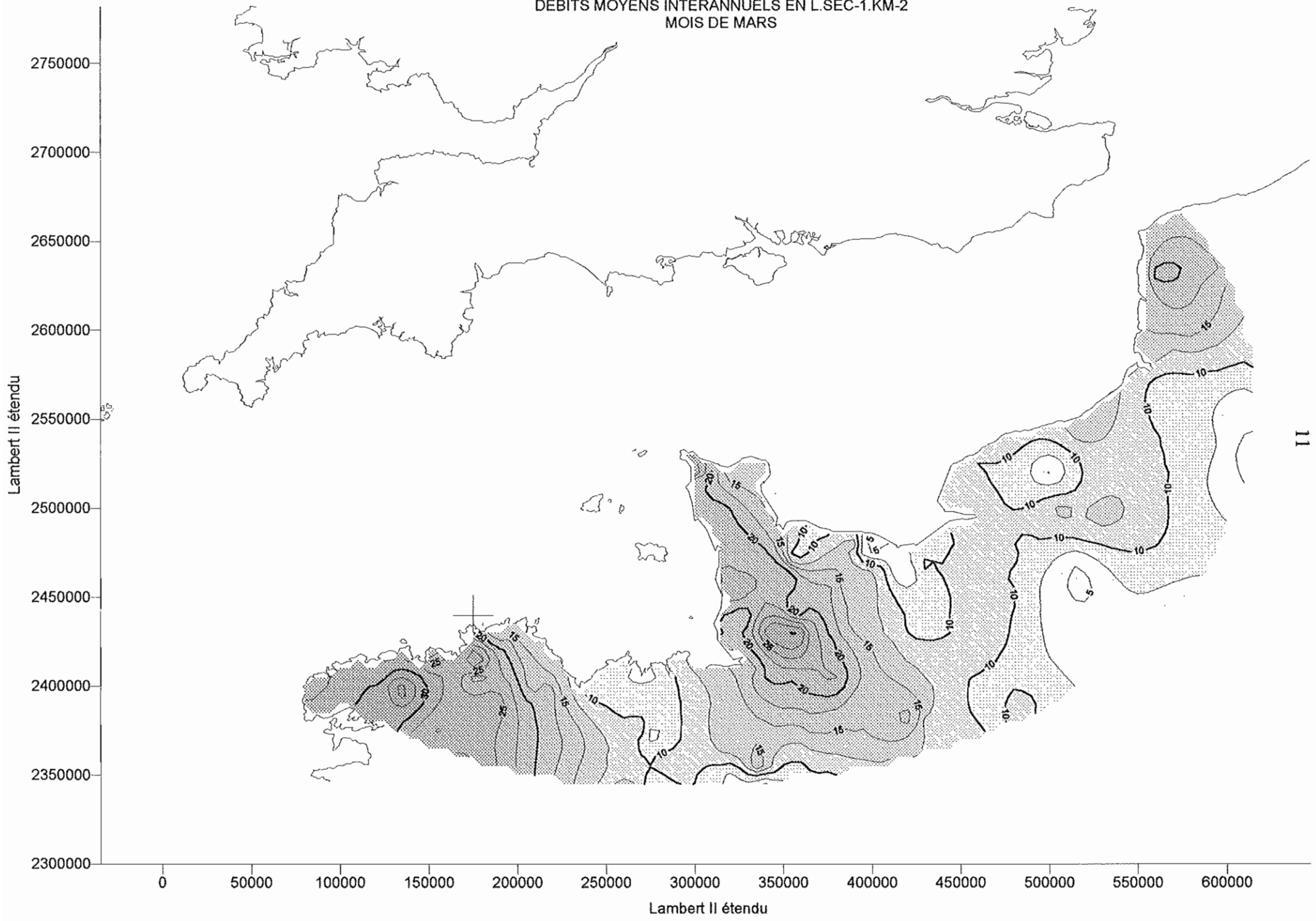
DEBITS MOYENS INTERANNUELS EN L.SEC-1.KM-2
MOIS DE FEVRIER



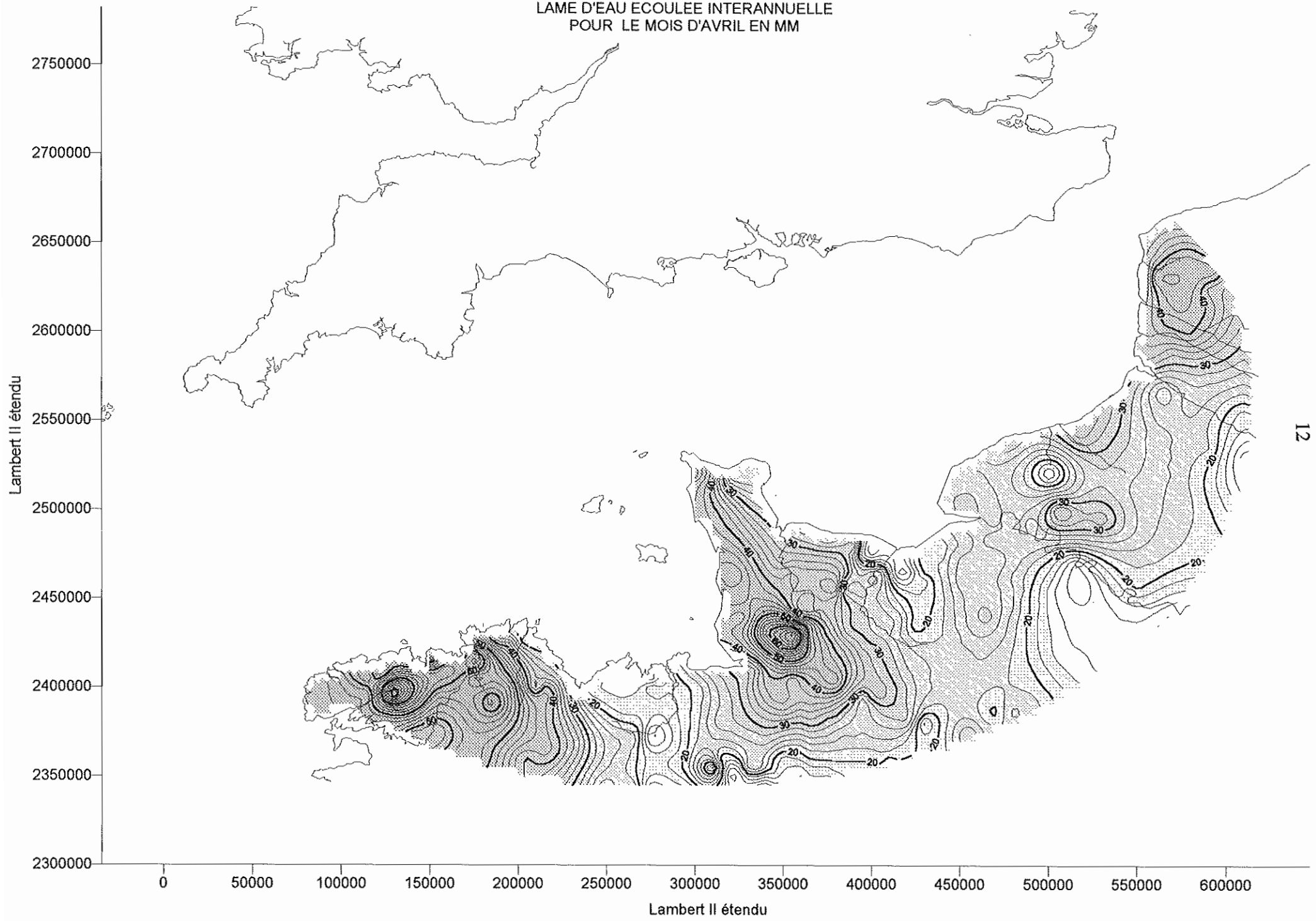
LAME D'EAU ECOULEE INTERANNUELLE
POUR LE MOIS DE MARS EN MM



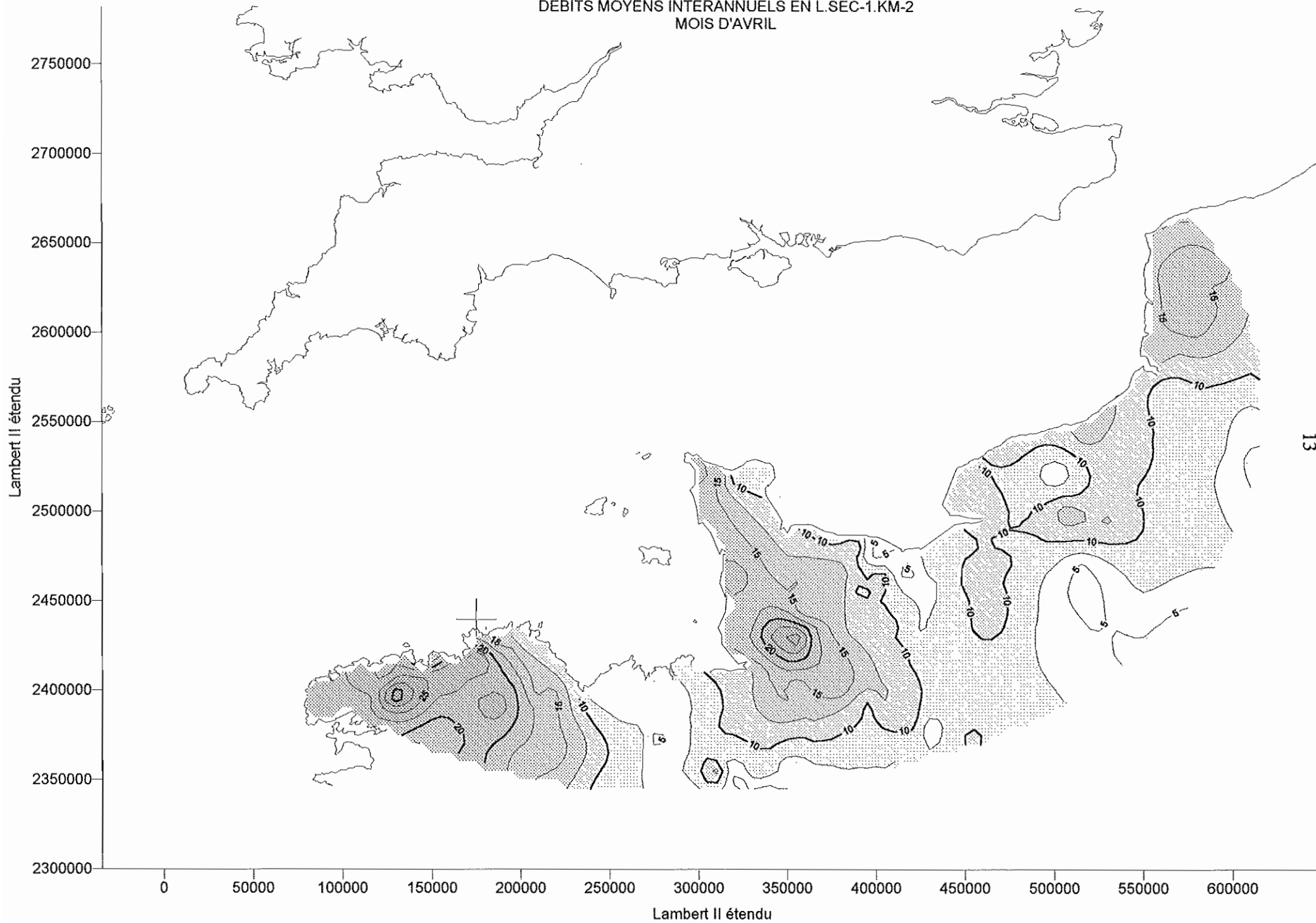
DEBITS MOYENS INTERANNUELS EN L.SEC-1.KM-2
MOIS DE MARS



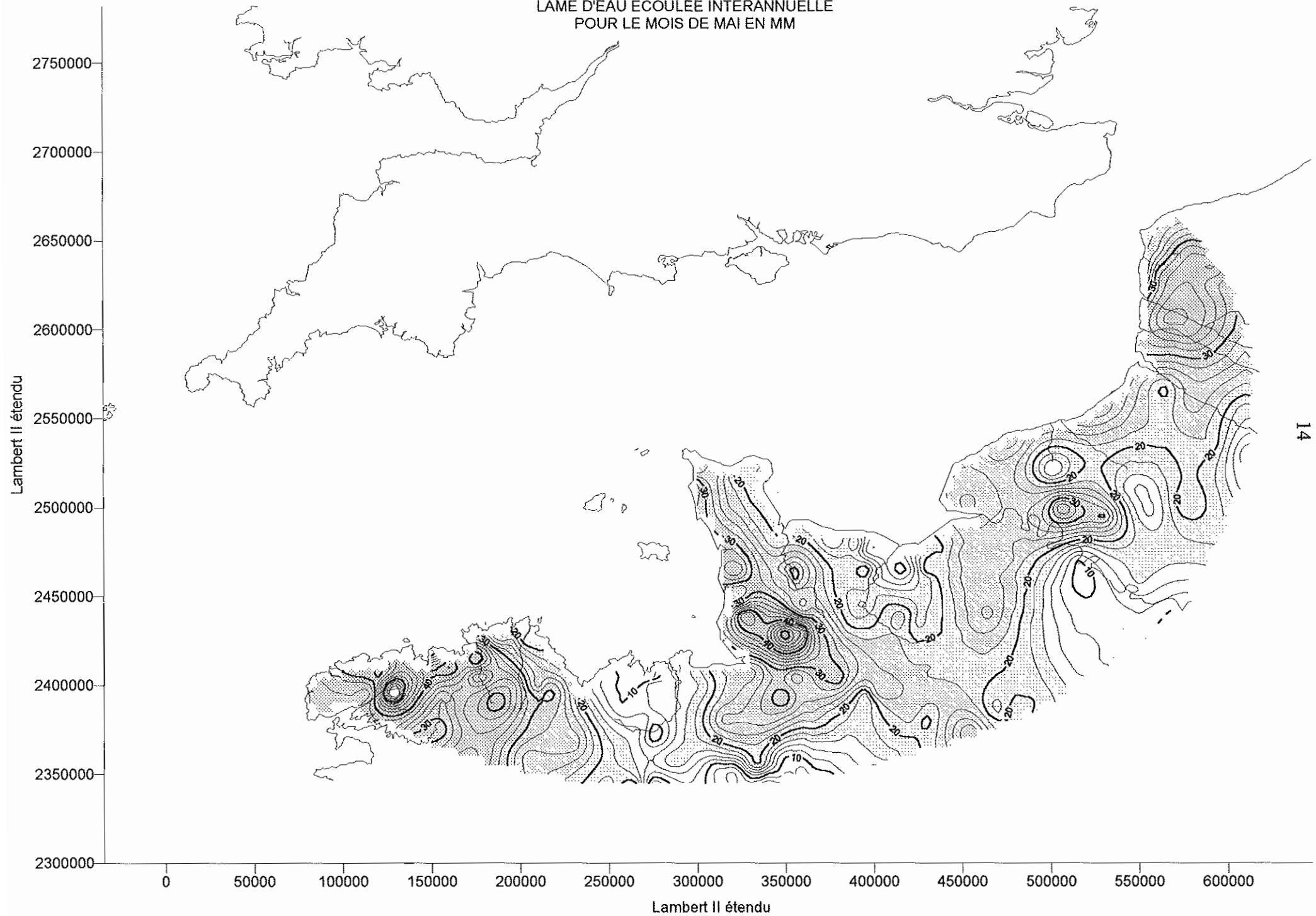
LAME D'EAU ECOULEE INTERANNUELLE
POUR LE MOIS D'AVRIL EN MM



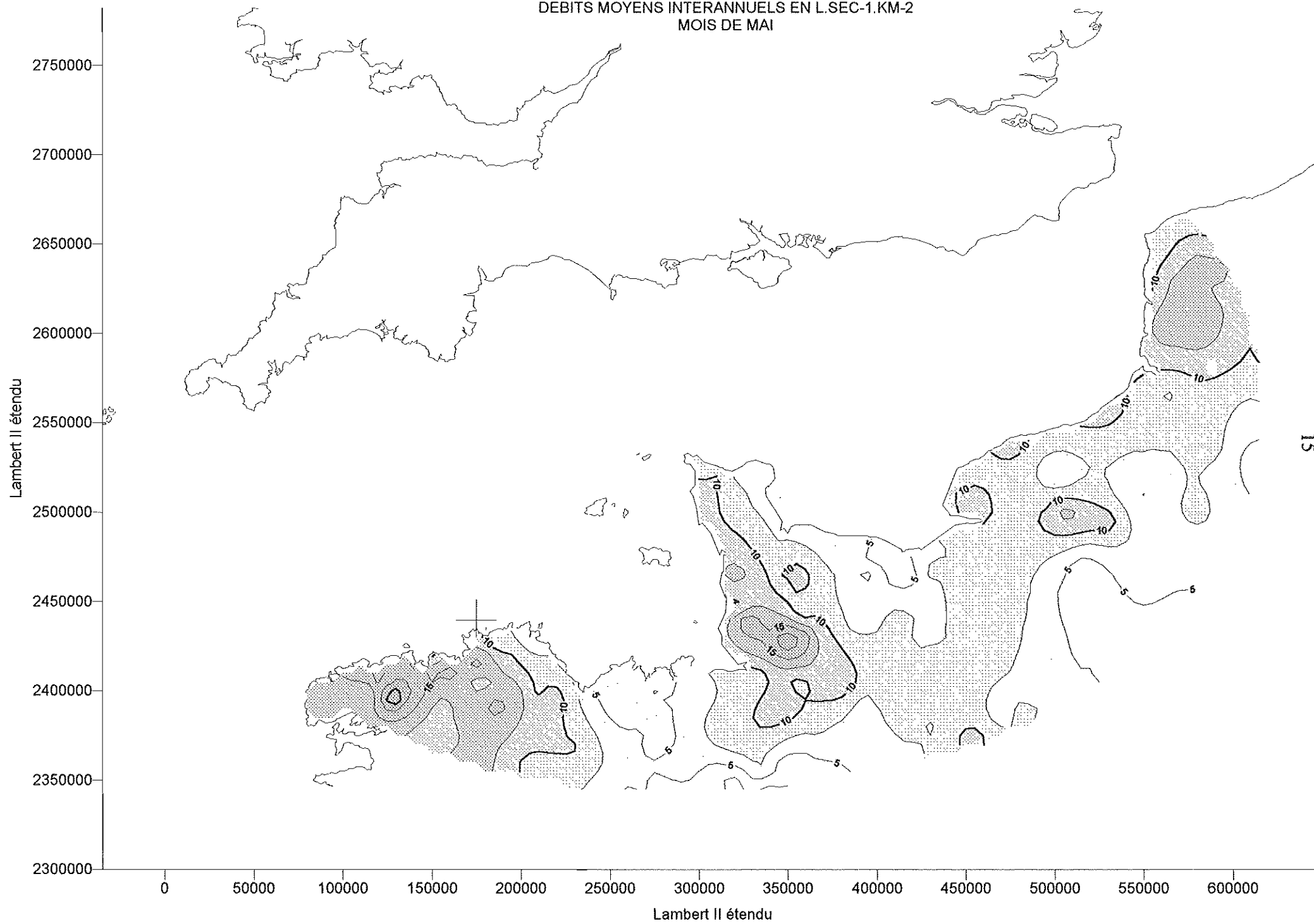
DEBITS MOYENS INTERANNUELS EN L.SEC-1.KM-2
MOIS D'AVRIL



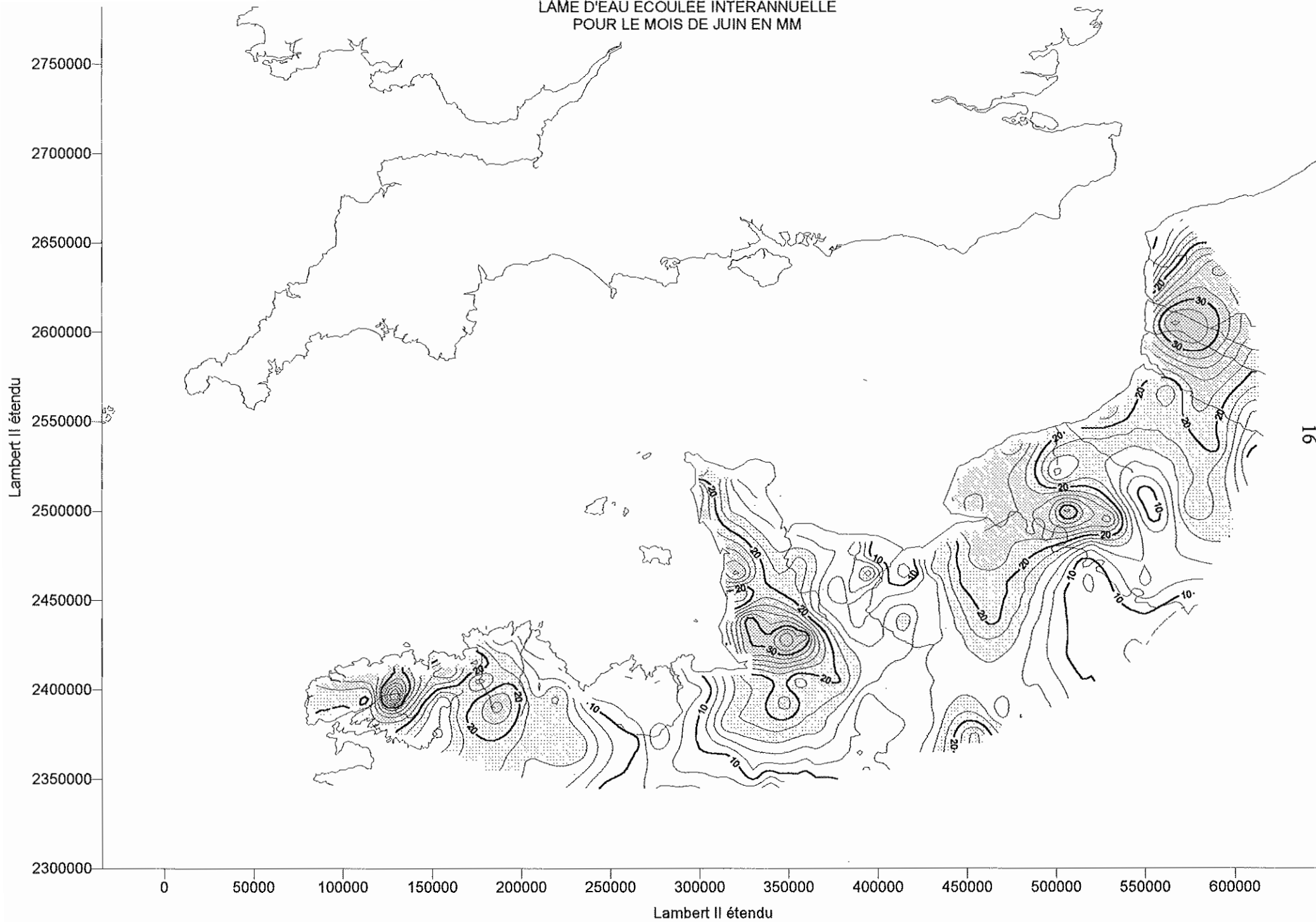
LAME D'EAU ECOULEE INTERANNUELLE
POUR LE MOIS DE MAI EN MM



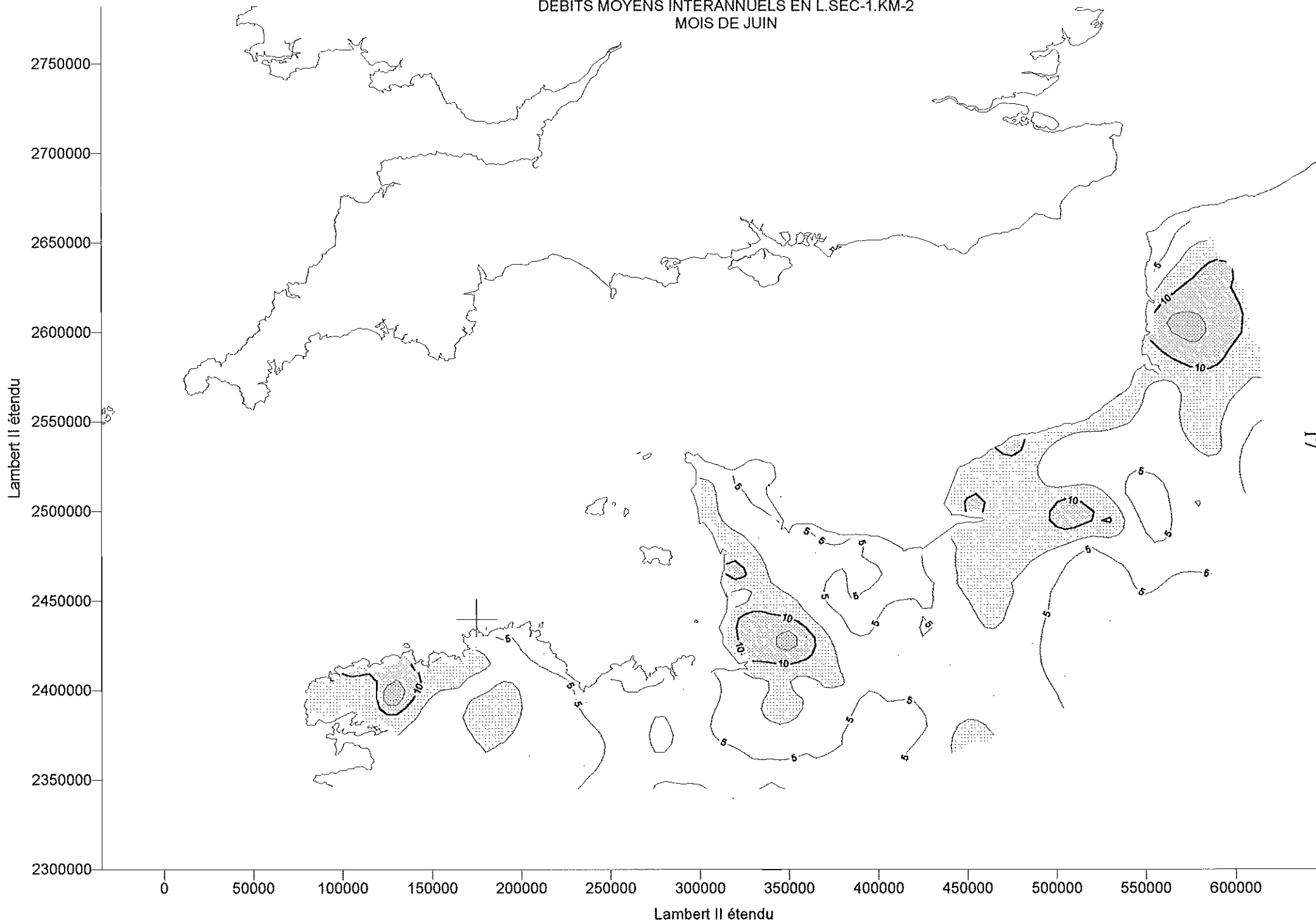
DEBITS MOYENS INTERANNUELS EN L.SEC-1.KM-2
MOIS DE MAI



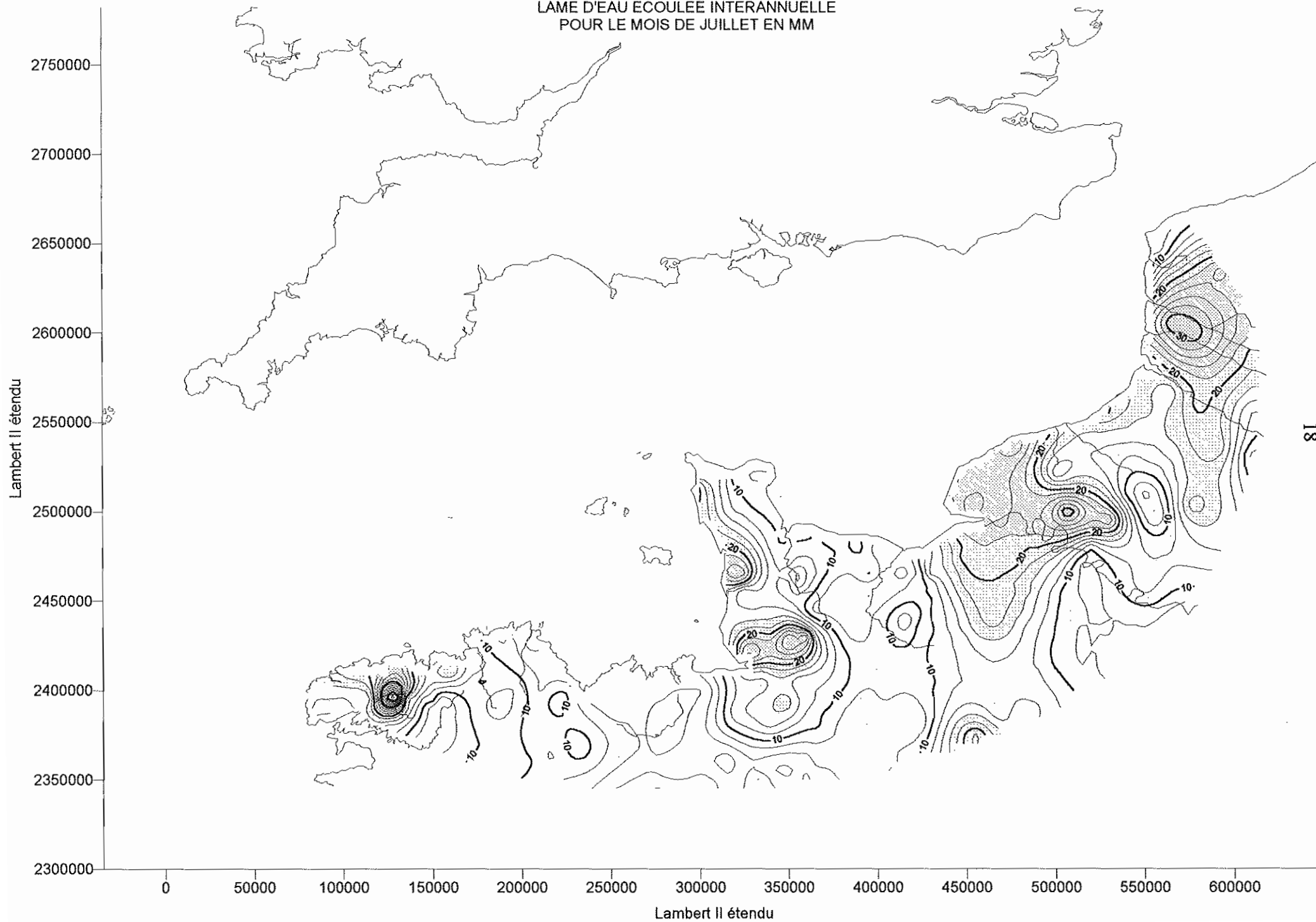
LAME D'EAU ECOULEE INTERANNUELLE
POUR LE MOIS DE JUIN EN MM



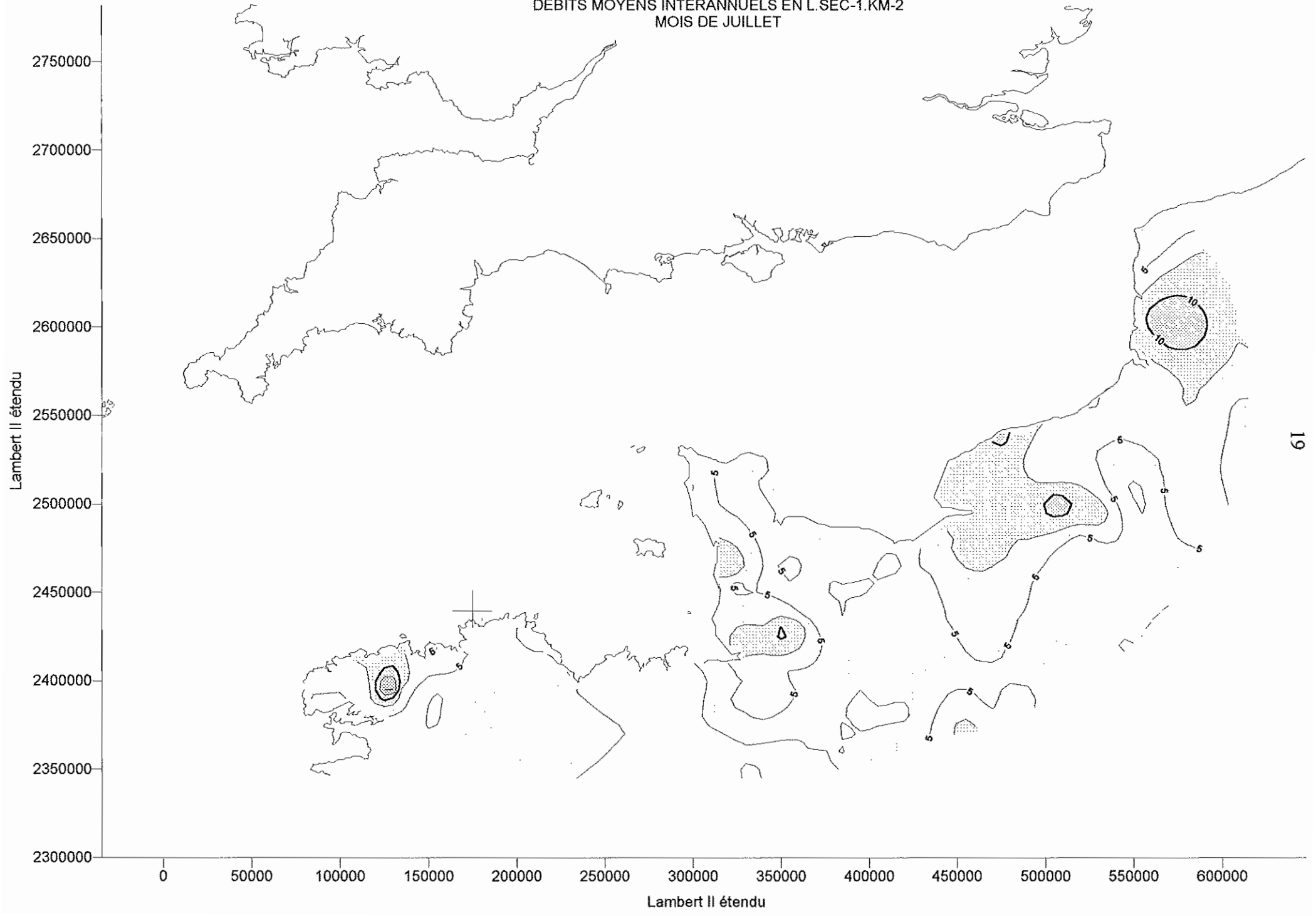
DEBITS MOYENS INTERANNUELS EN L.SEC-1.KM-2
MOIS DE JUIN



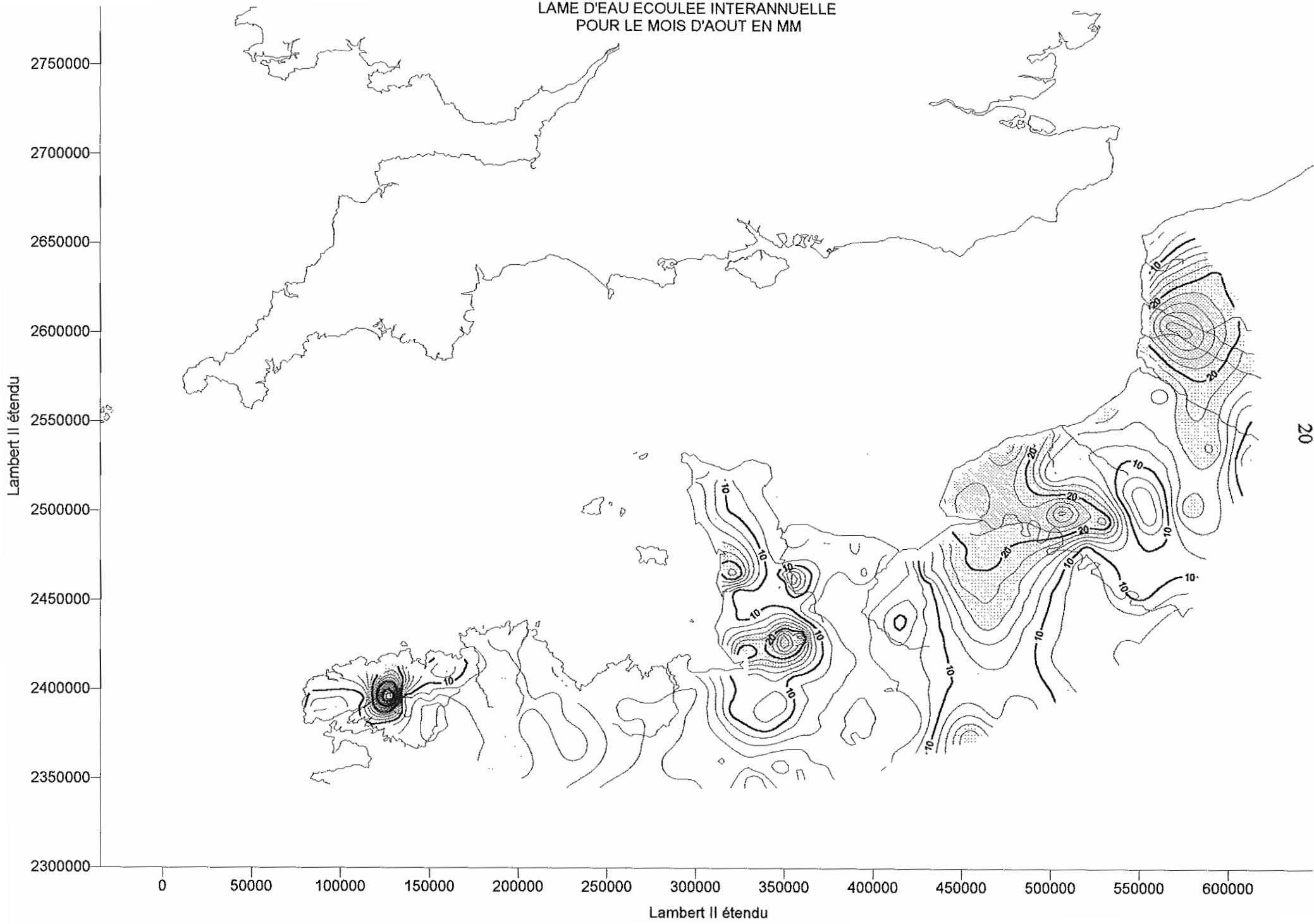
LAME D'EAU ECOULEE INTERANNUELLE
POUR LE MOIS DE JUILLET EN MM



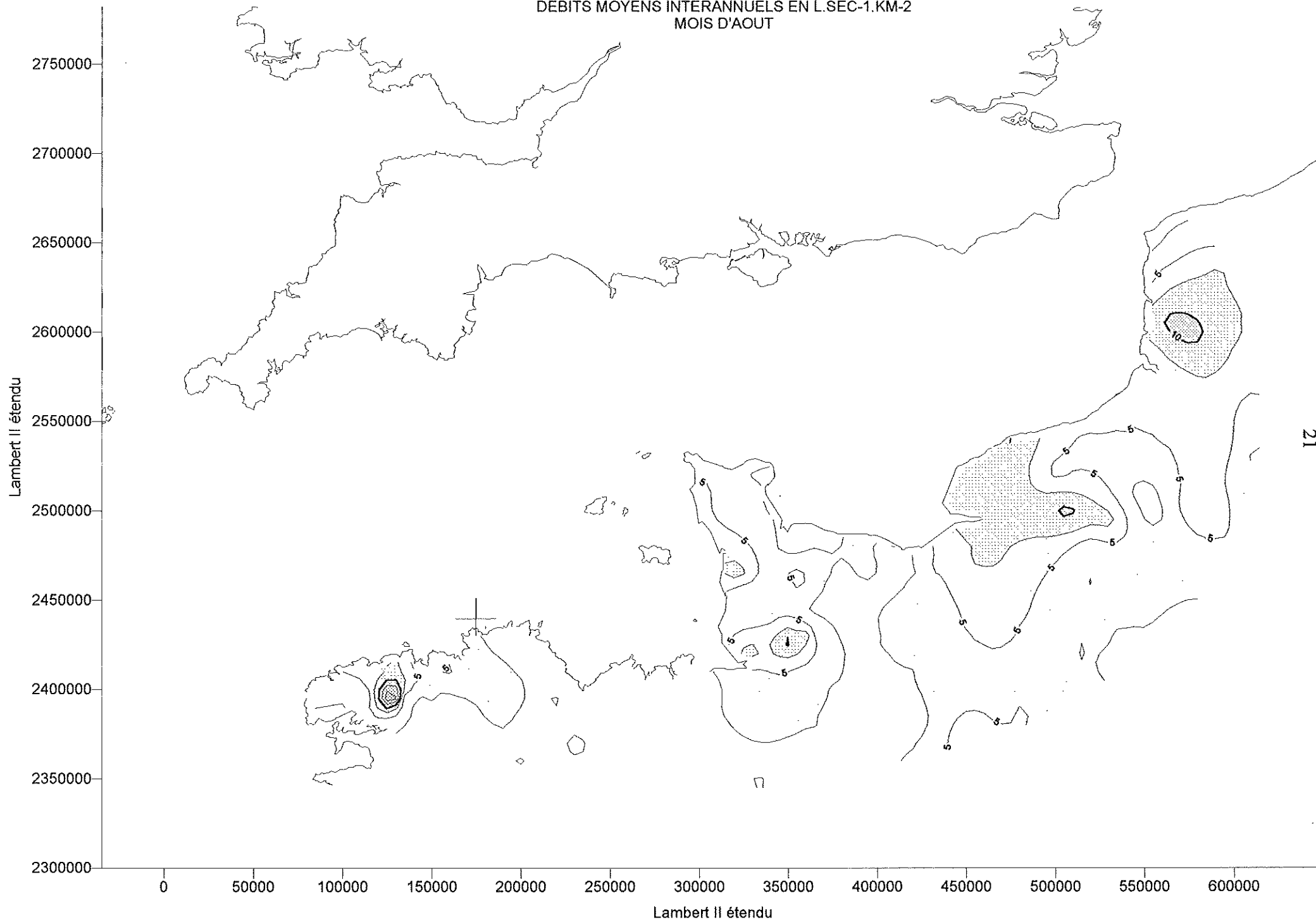
DEBITS MOYENS INTERANNUELS EN L.SEC-1.KM-2
MOIS DE JUILLET



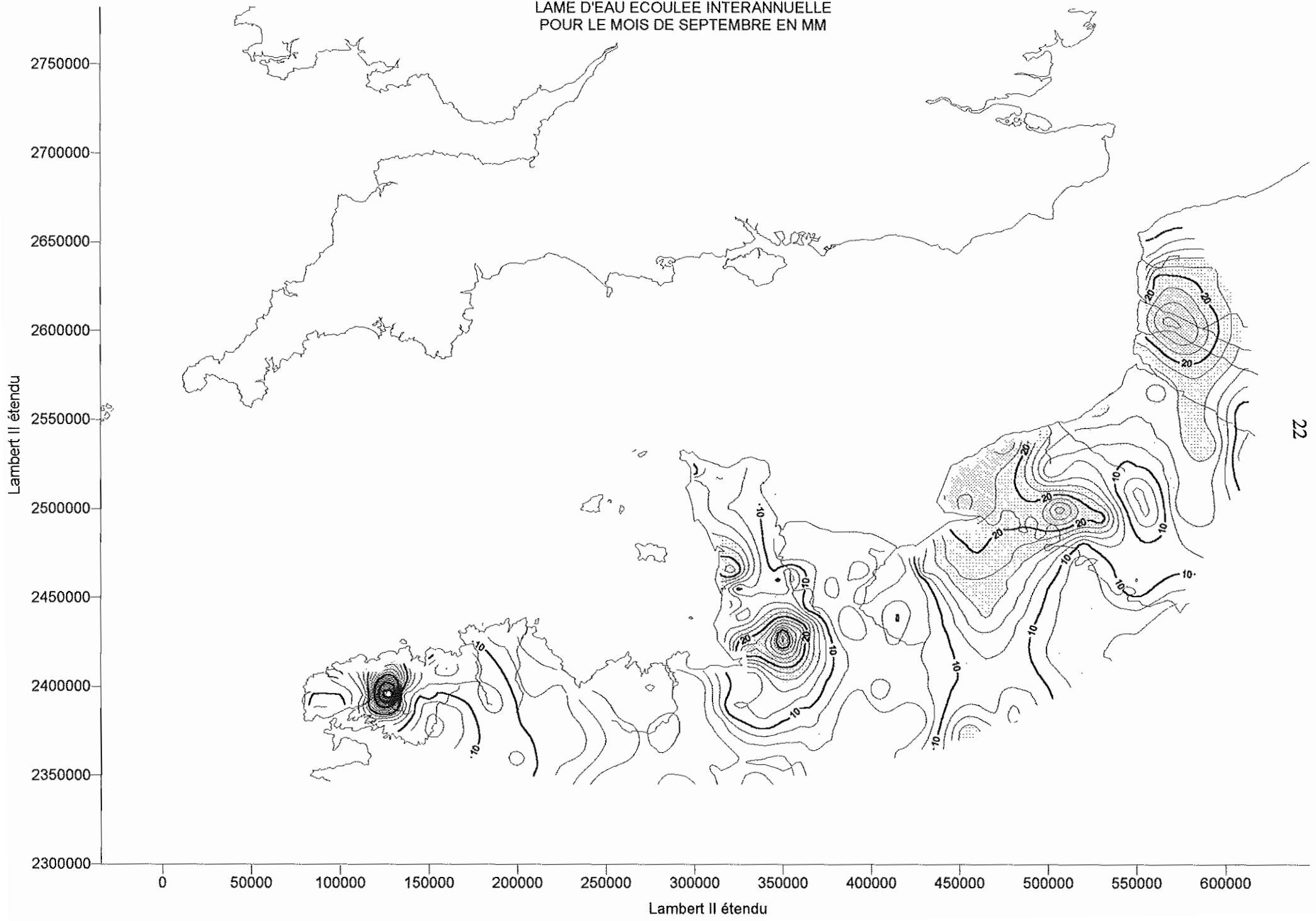
LAME D'EAU ECOULEE INTERANNUELLE
POUR LE MOIS D'AOUT EN MM



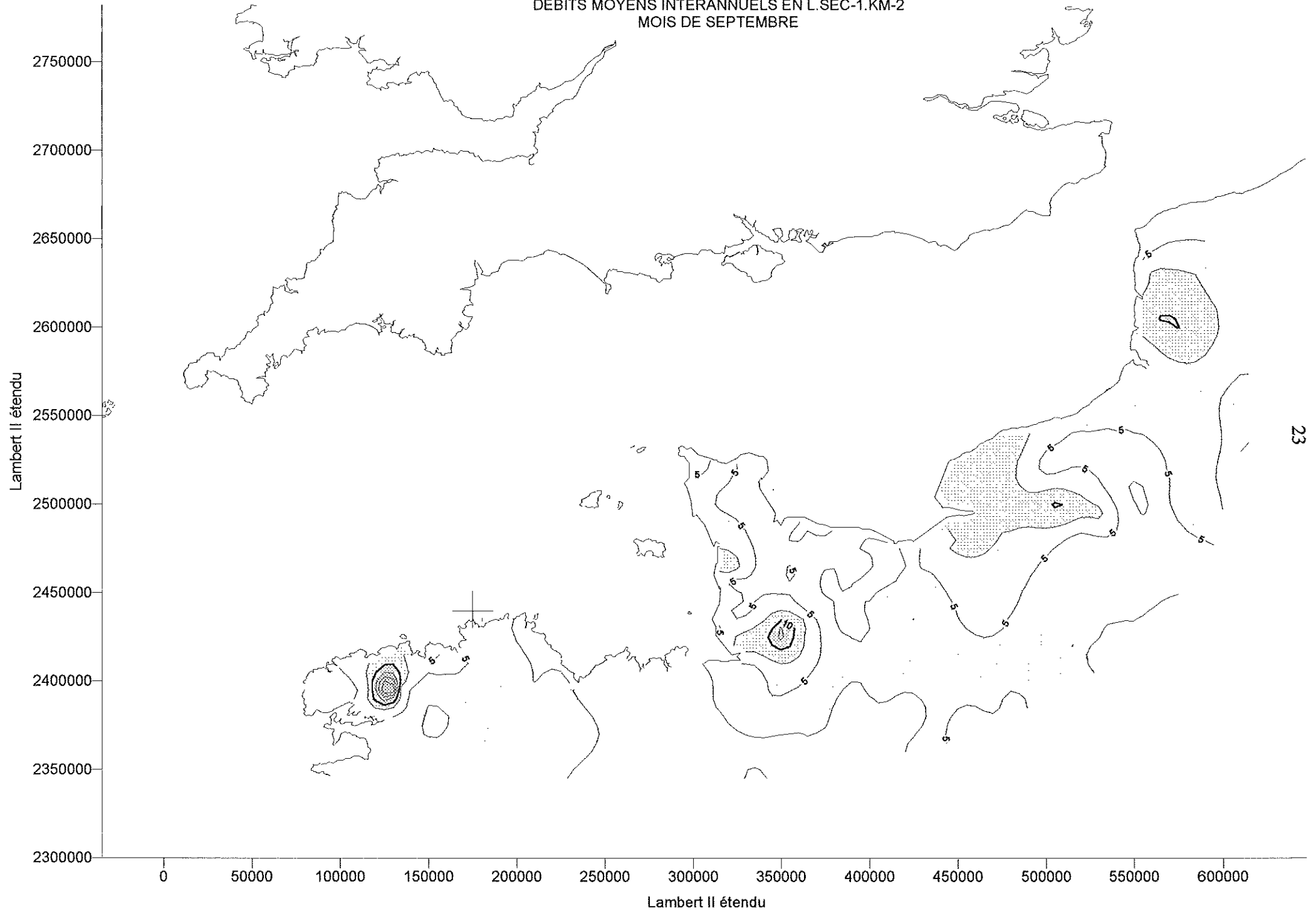
DEBITS MOYENS INTERANNUELS EN L.SEC-1.KM-2
MOIS D'AOUT



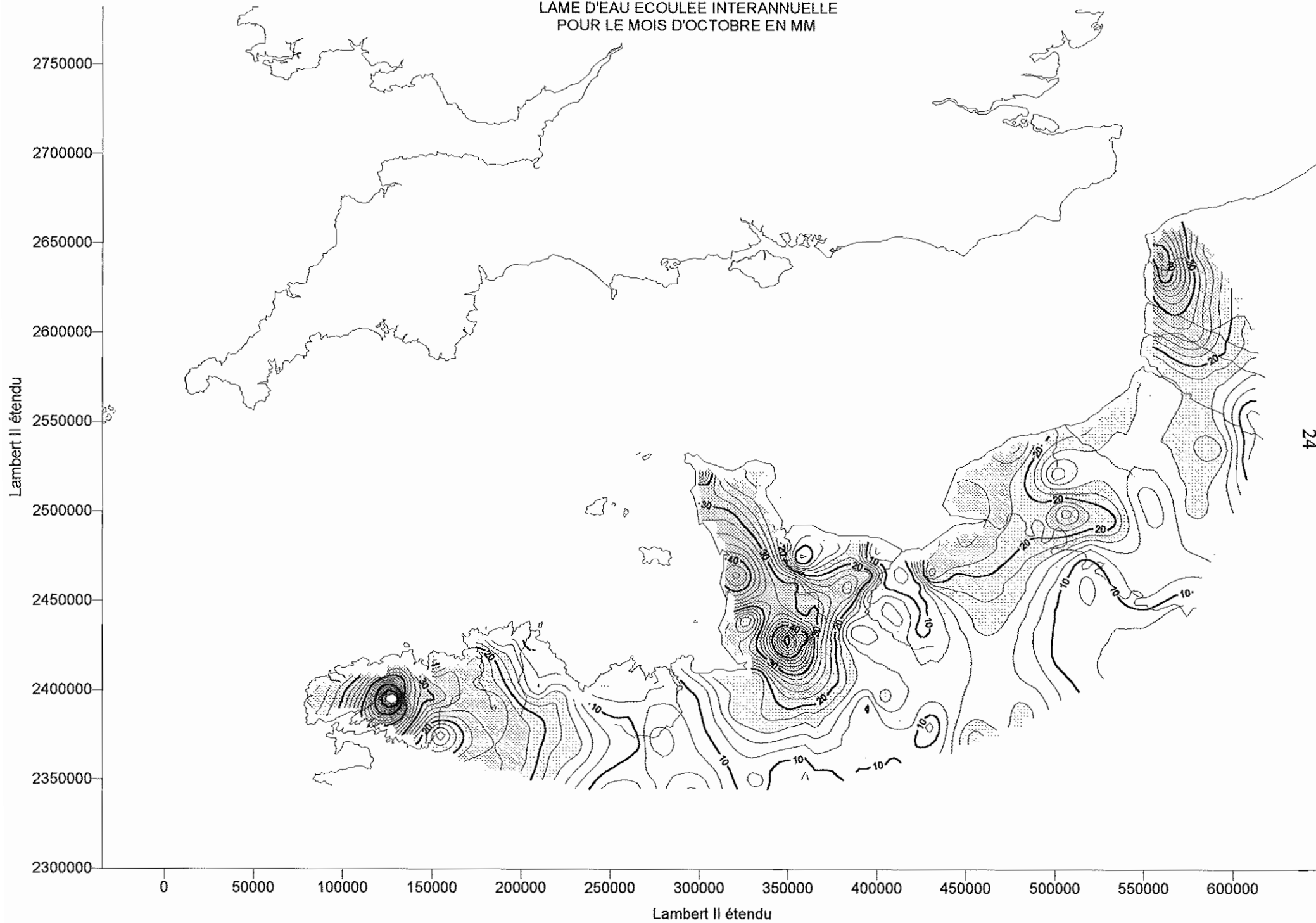
LAME D'EAU ECOULEE INTERANNUELLE
POUR LE MOIS DE SEPTEBRE EN MM



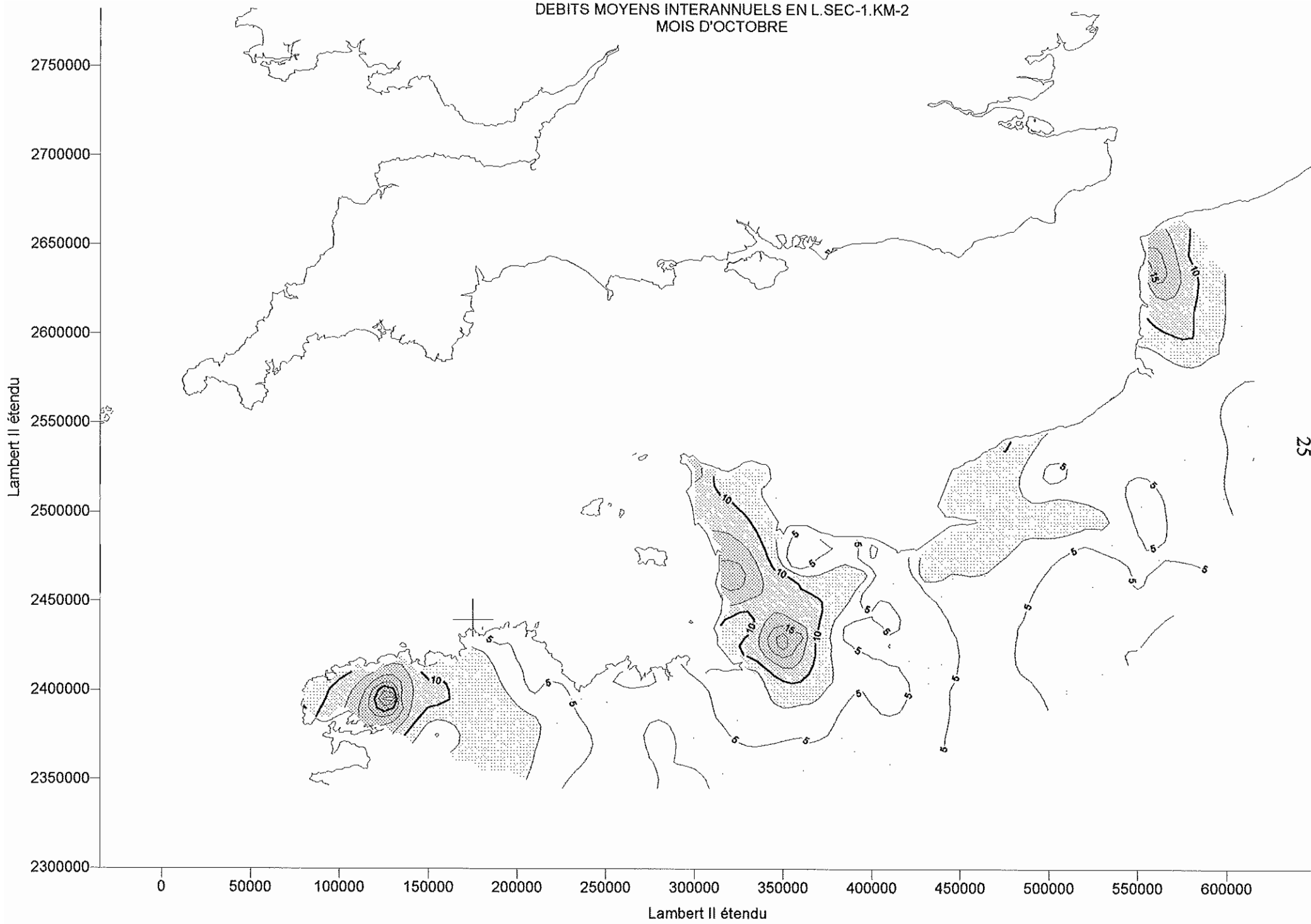
DEBITS MOYENS INTERANNUELS EN L.SEC-1.KM-2
MOIS DE SEPTEMBRE



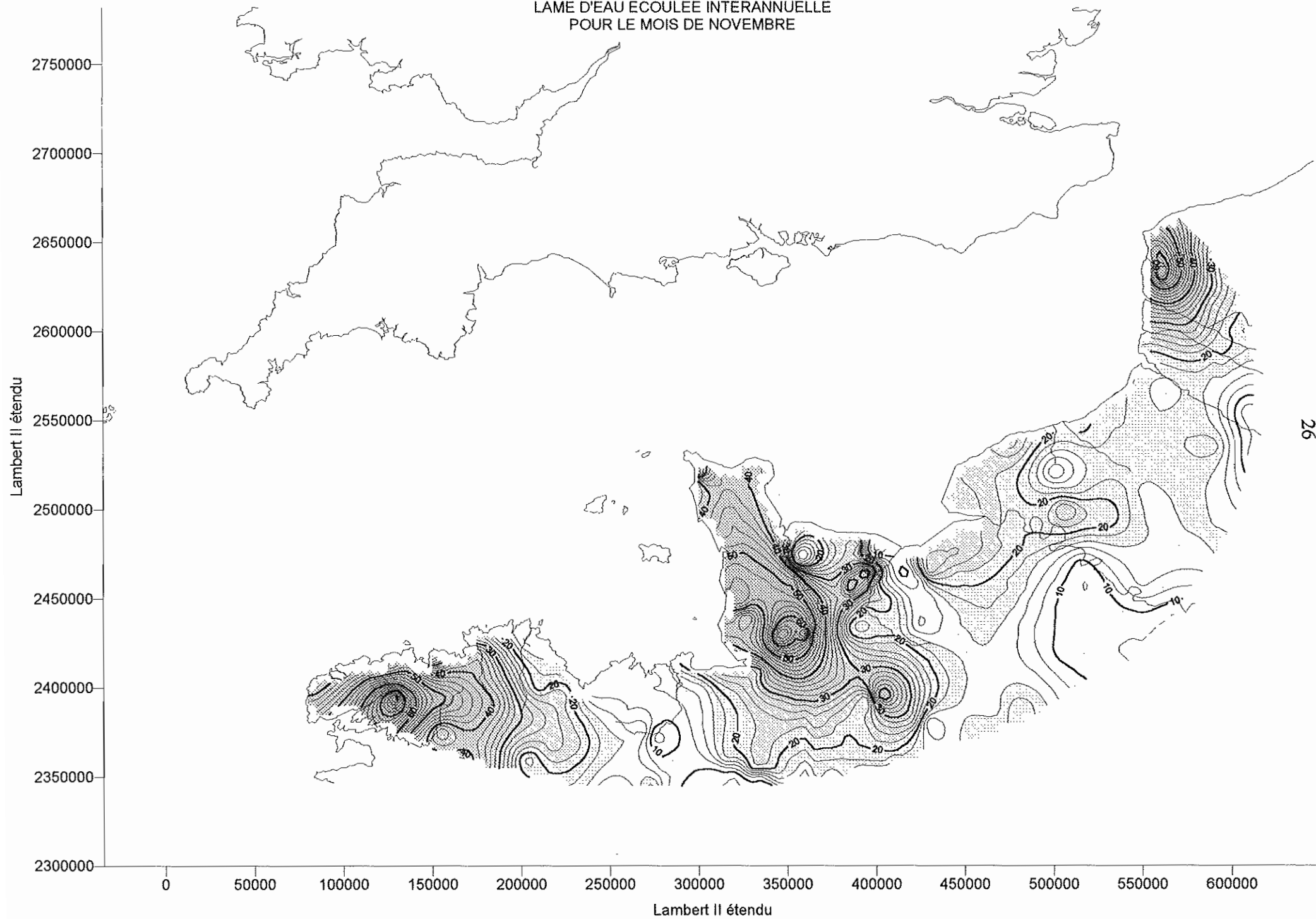
LAME D'EAU ECOULEE INTERANNUELLE
POUR LE MOIS D'OCTOBRE EN MM



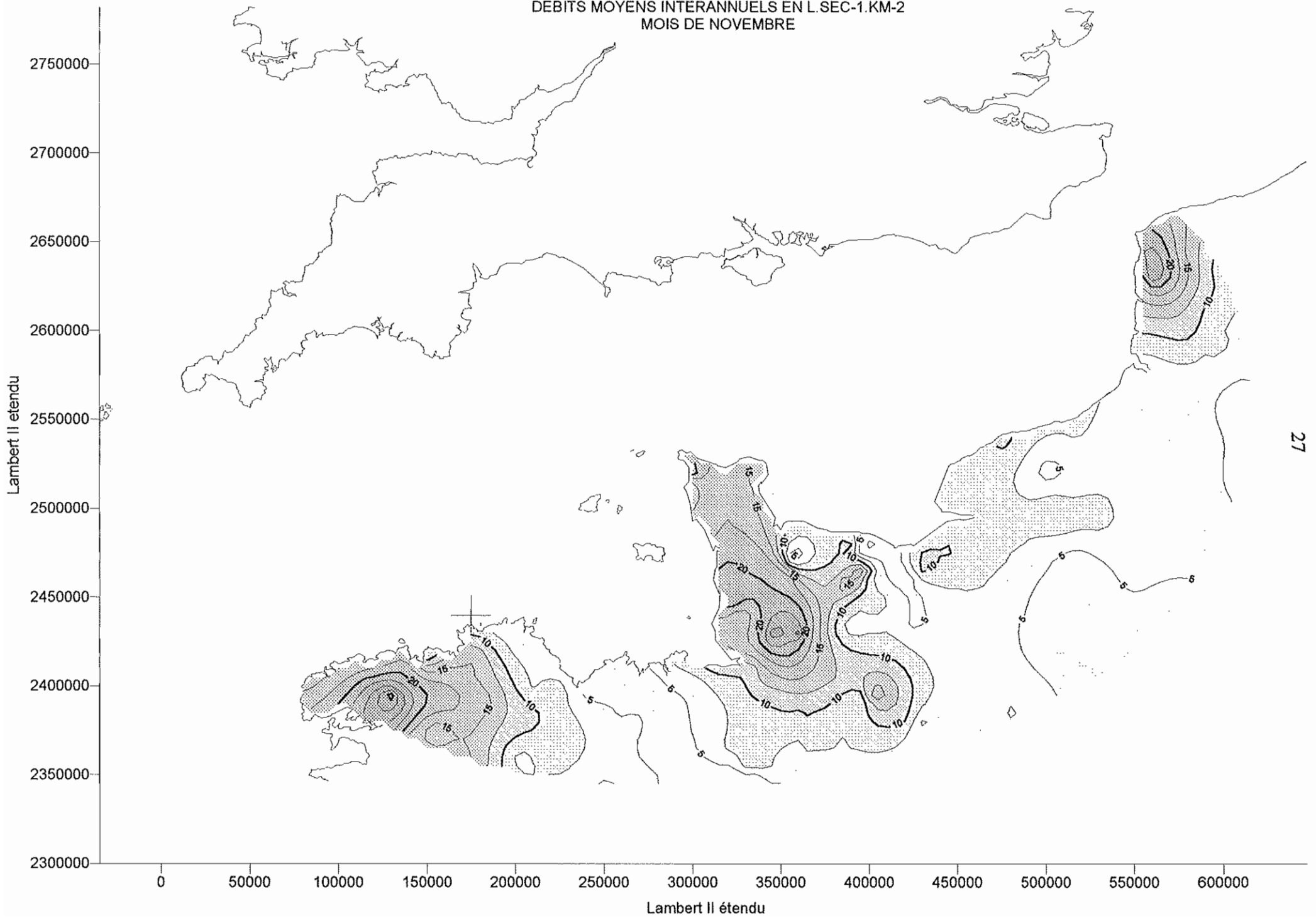
DEBITS MOYENS INTERANNUELS EN L.SEC-1.KM-2
MOIS D'OCTOBRE



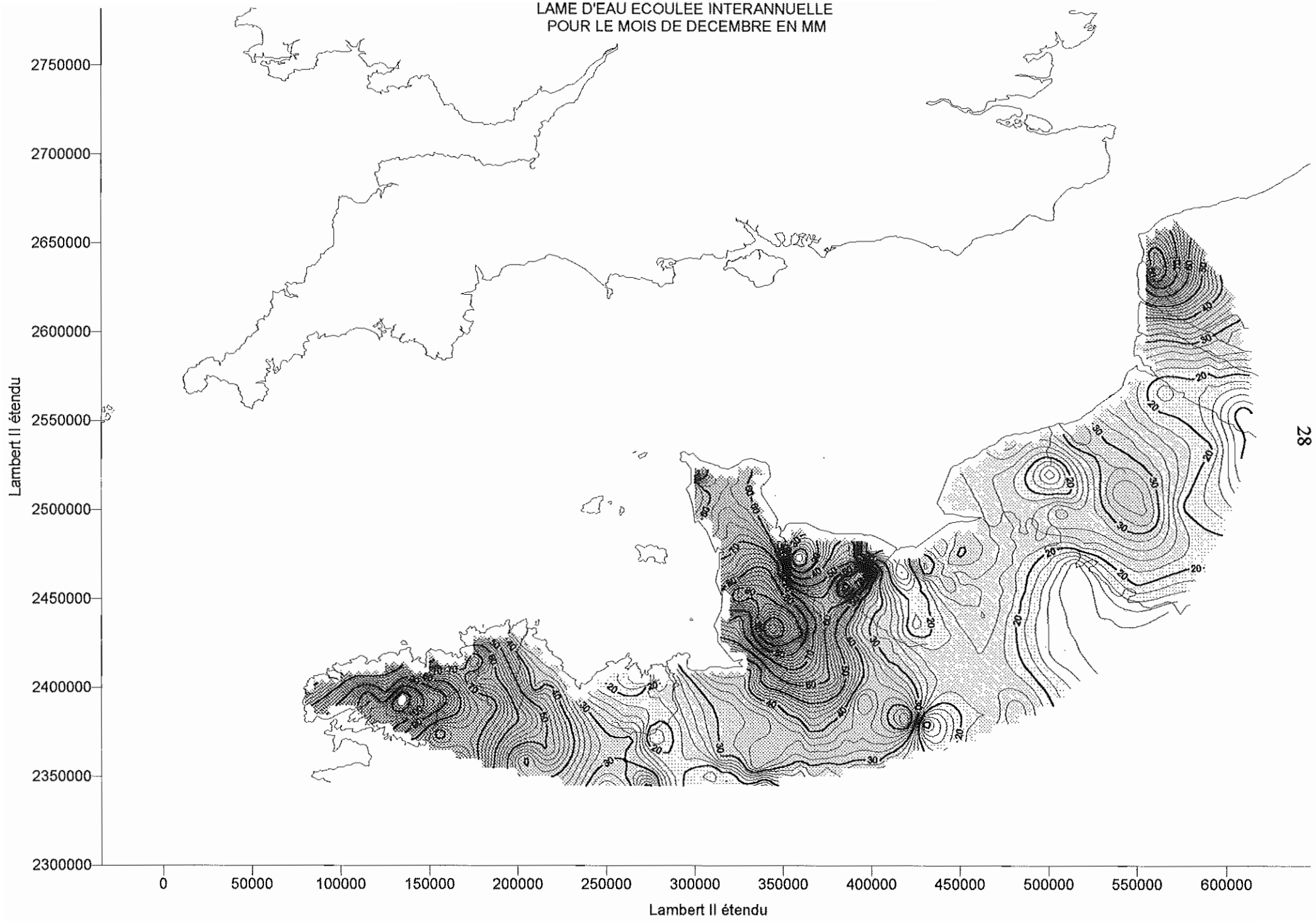
LAME D'EAU ECOULEE INTERANNUELLE
POUR LE MOIS DE NOVEMBRE



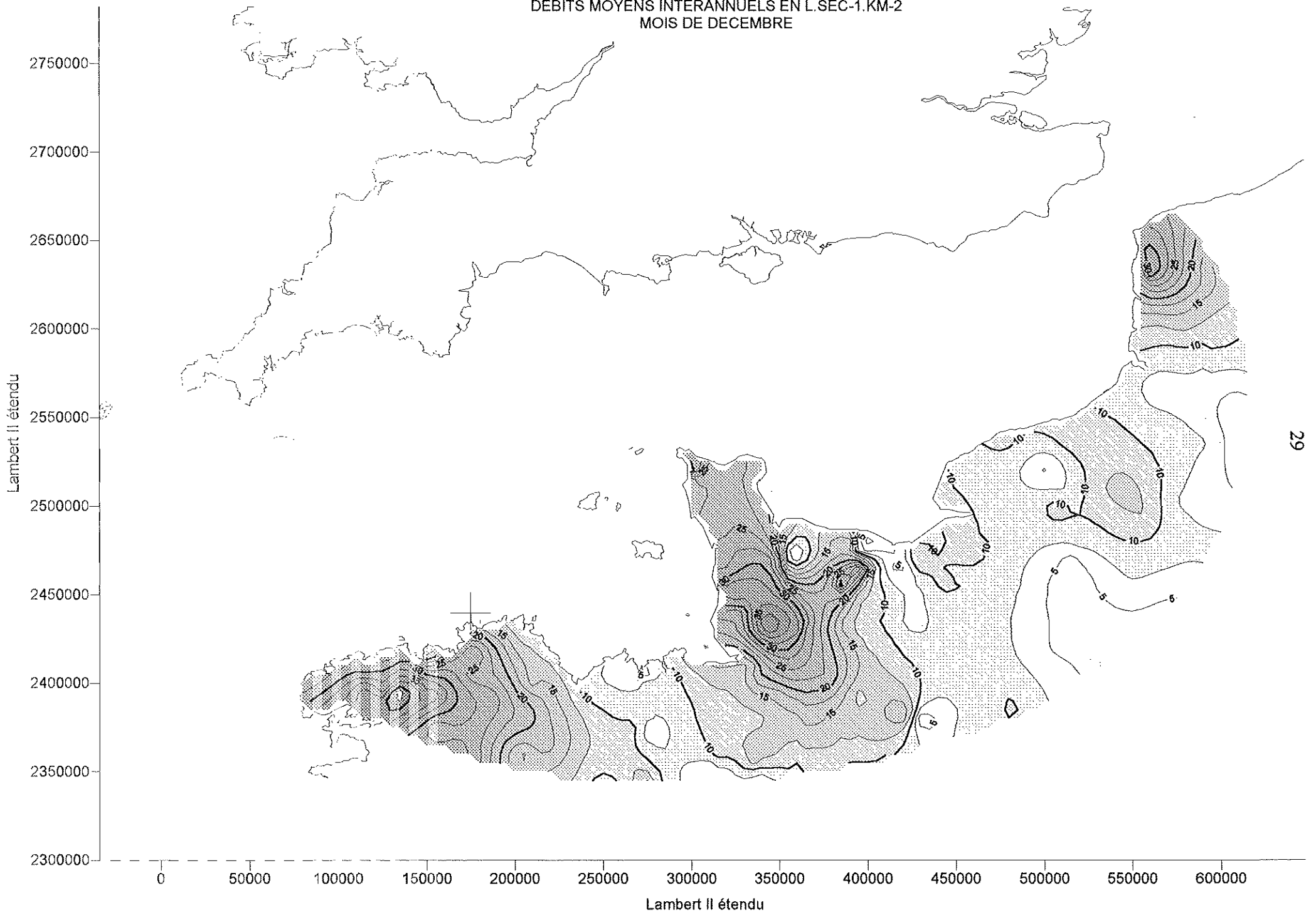
DEBITS MOYENS INTERANNUELS EN L.SEC-1.KM-2
MOIS DE NOVEMBRE



LAME D'EAU ECOULEE INTERANNUELLE
POUR LE MOIS DE DECEMBRE EN MM

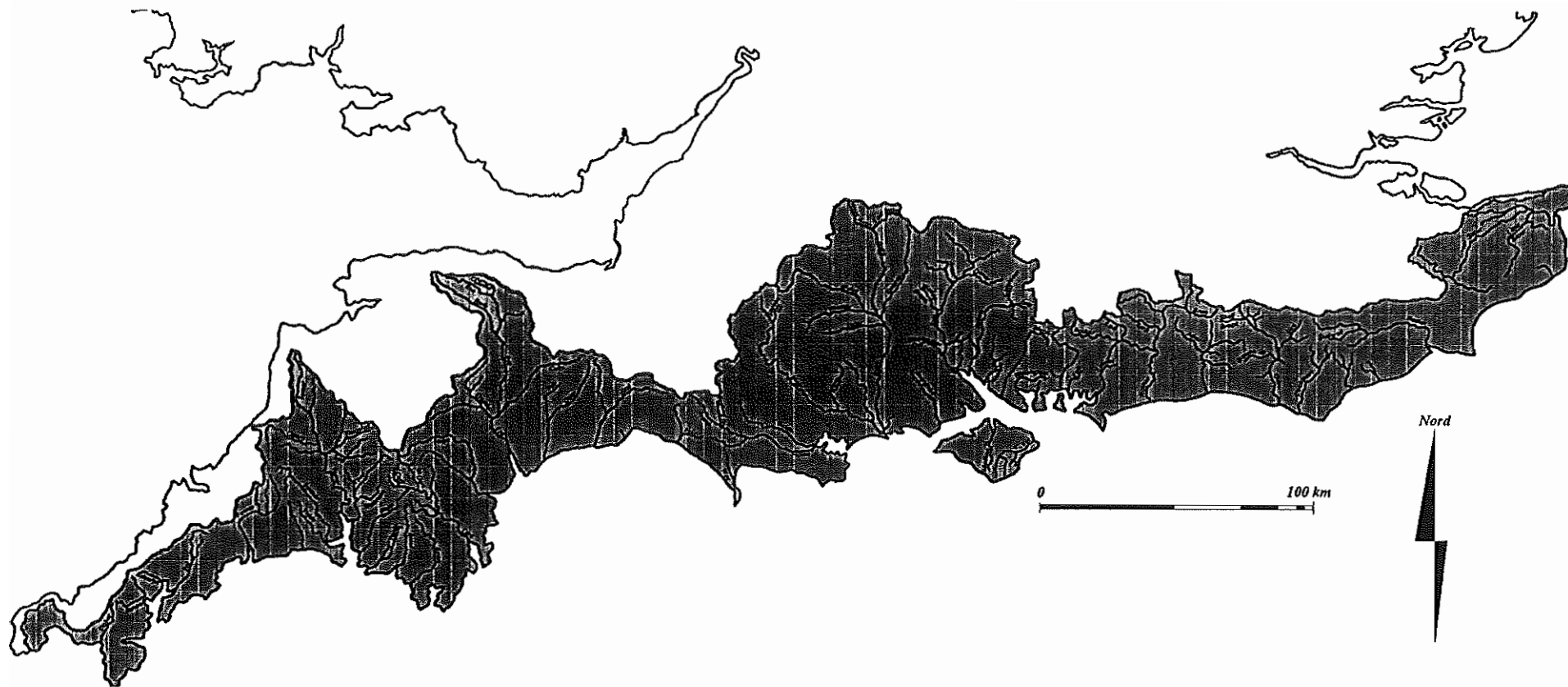


DEBITS MOYENS INTERANNUELS EN L.SEC-1.KM-2
MOIS DE DECEMBRE

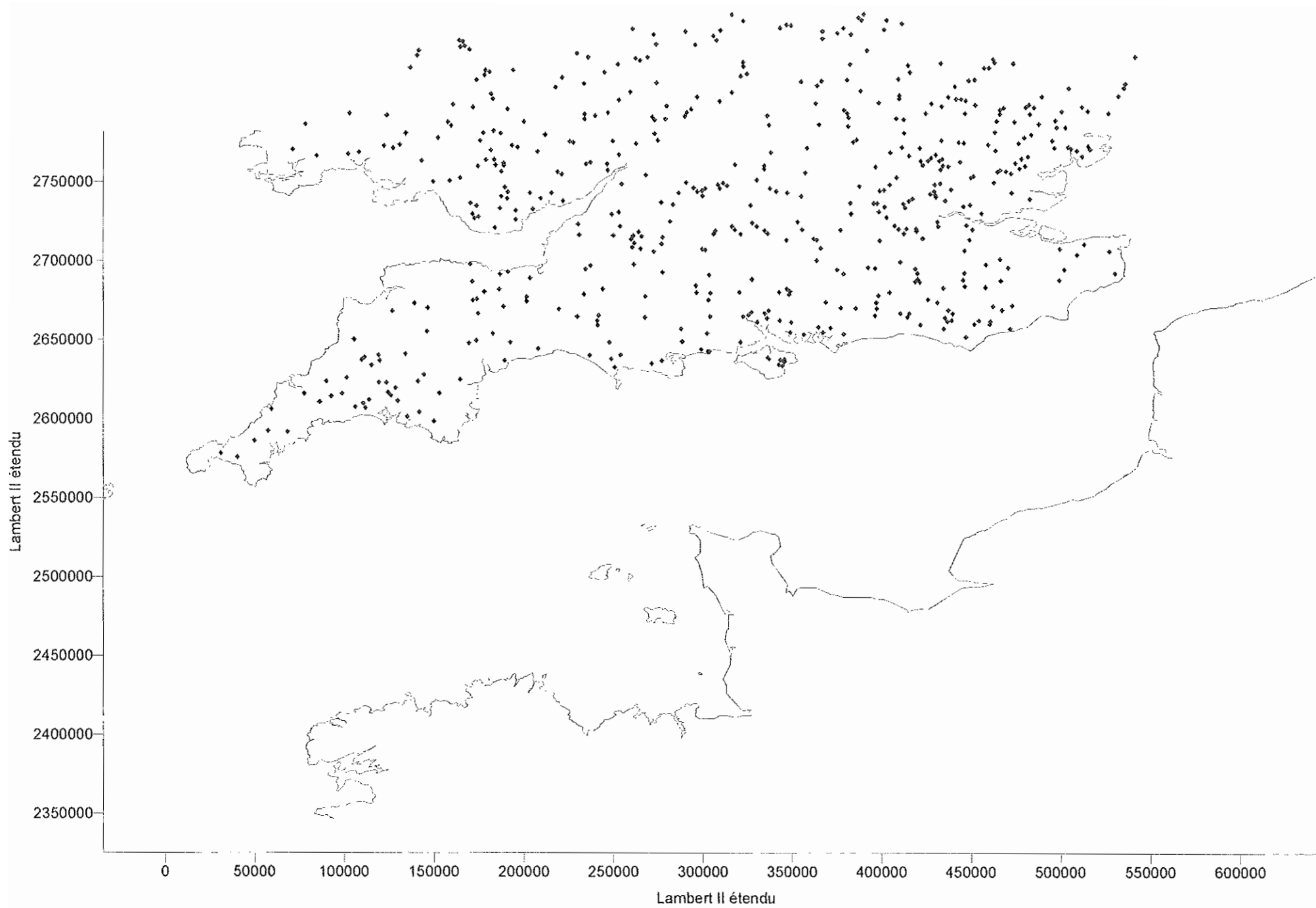


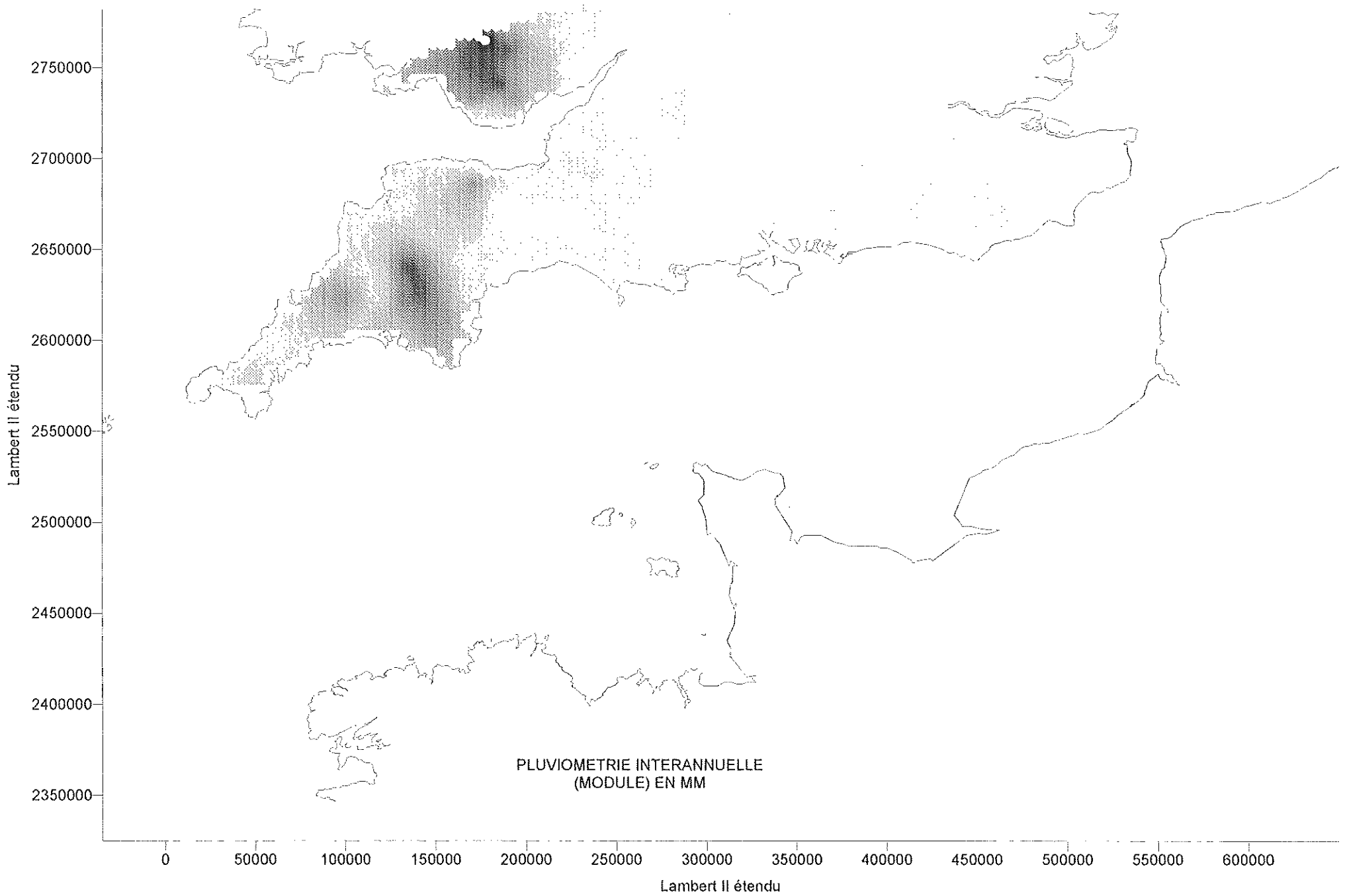
ANNEXE II

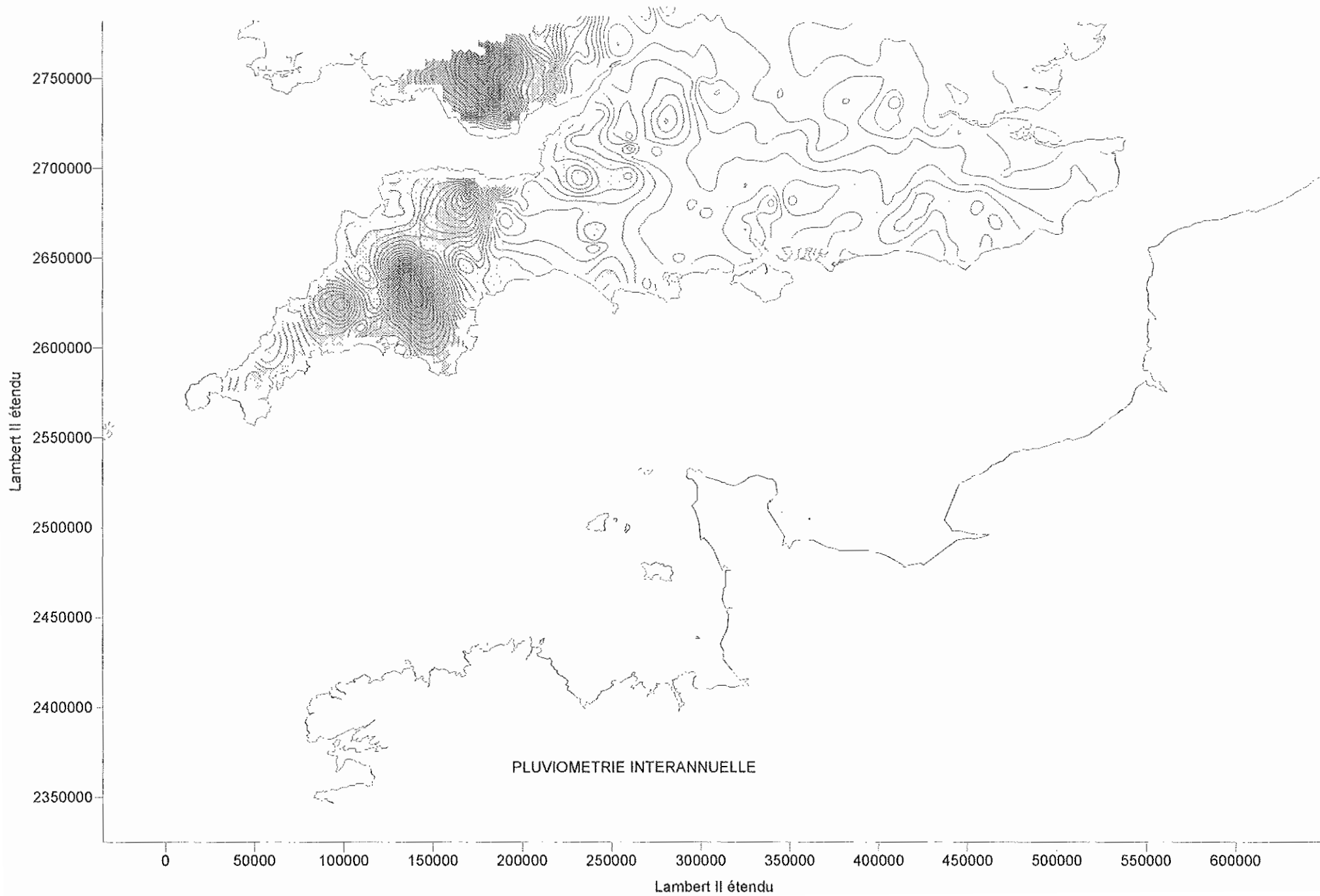
**SUPERFICIES,
LOCALISATION DES STATIONS DE JAUGEAGE
ET CARTES DE DEBITS SPECIFIQUES
DES BASSINS VERSANTS DE GRANDE BRETAGNE**

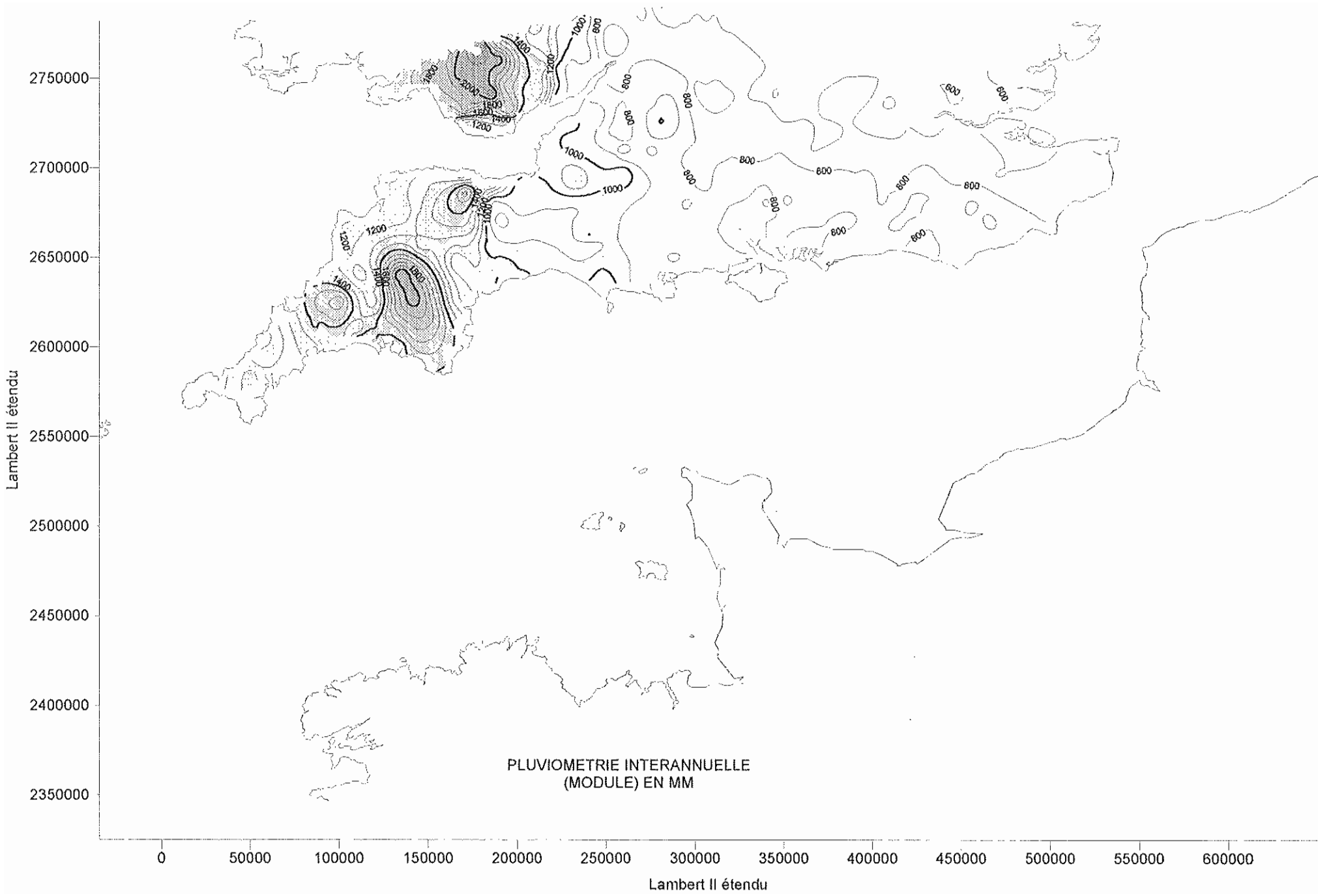


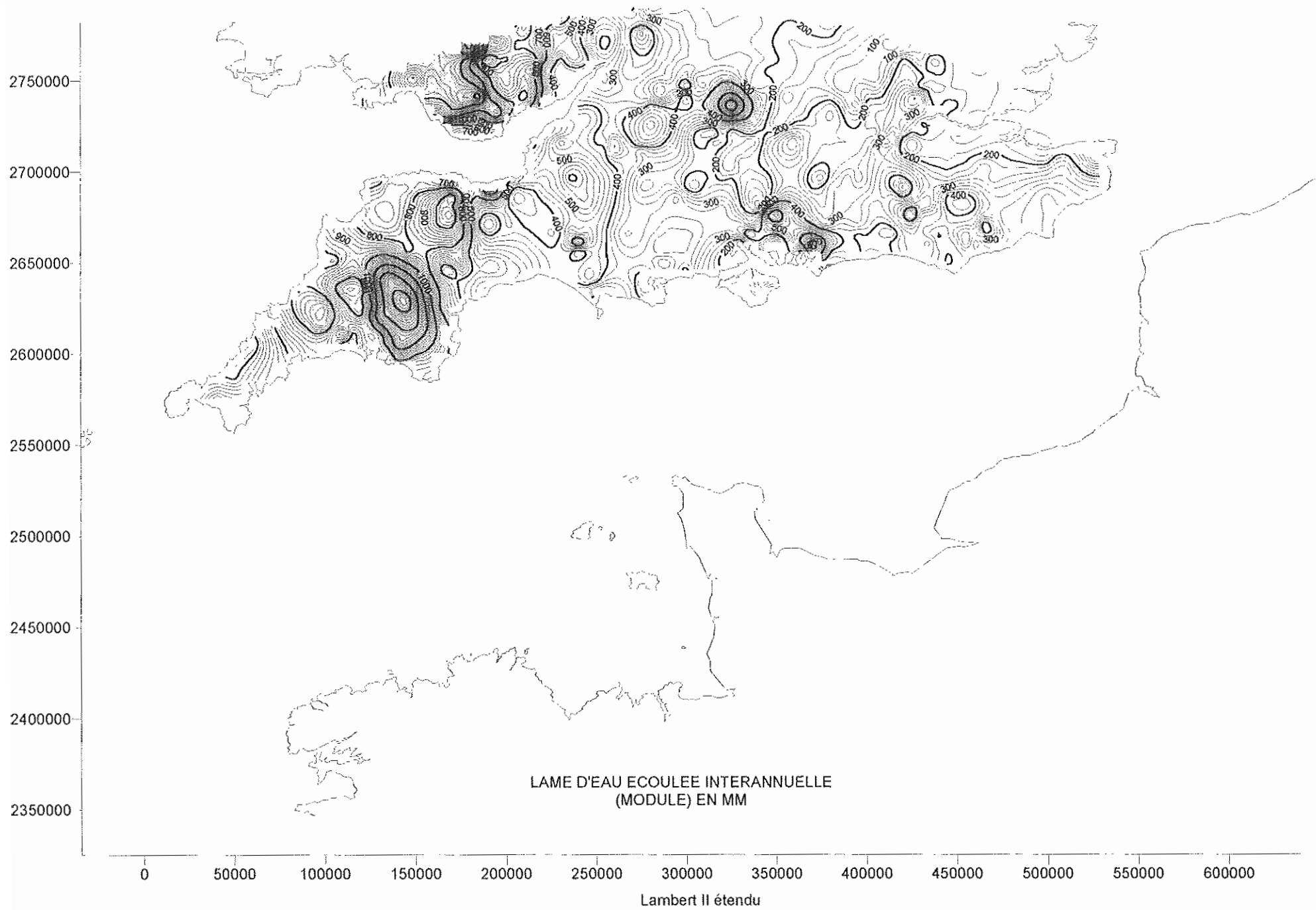
Carte de situation de l'ensemble des bassins versants de la Manche pour l'Angleterre.

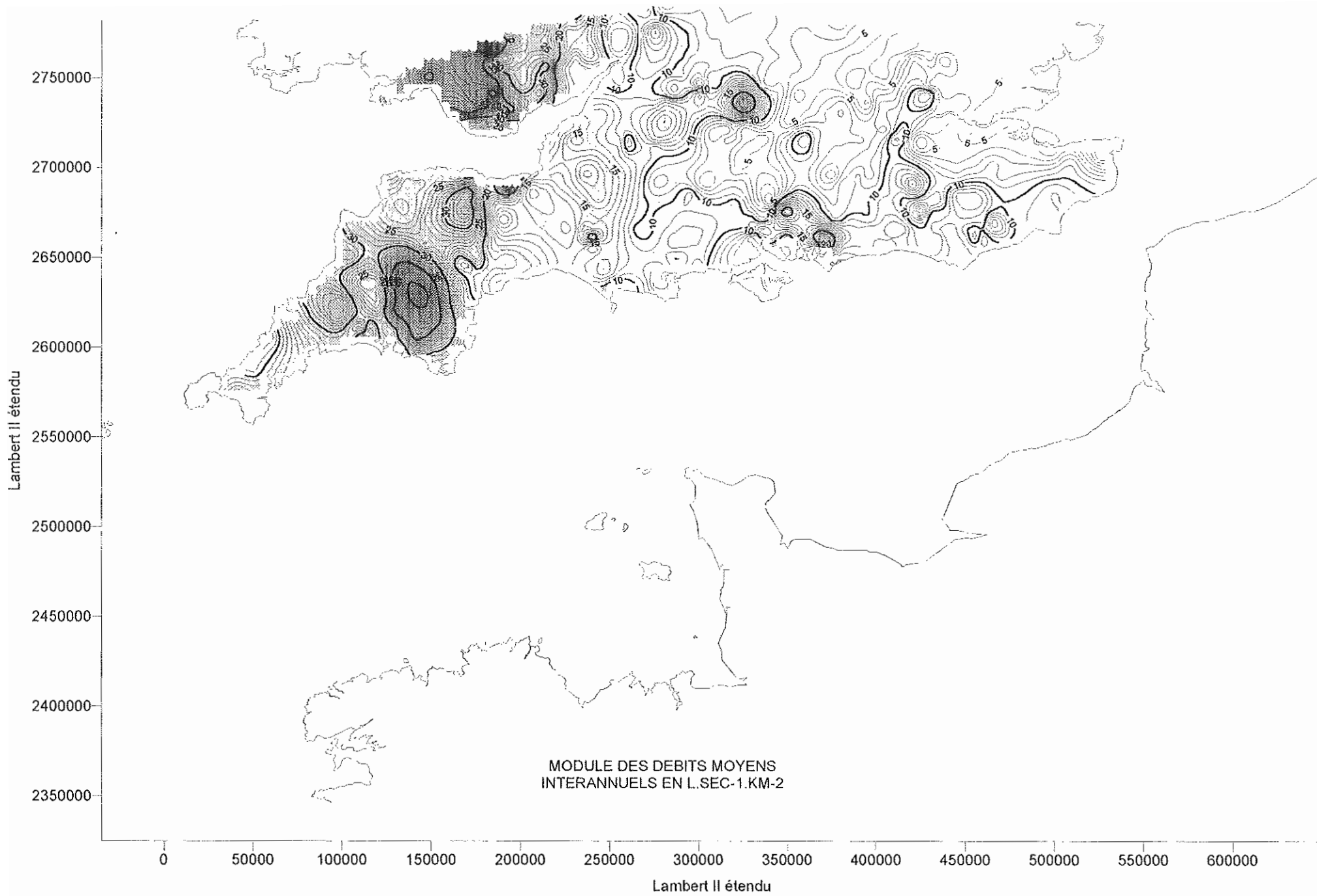


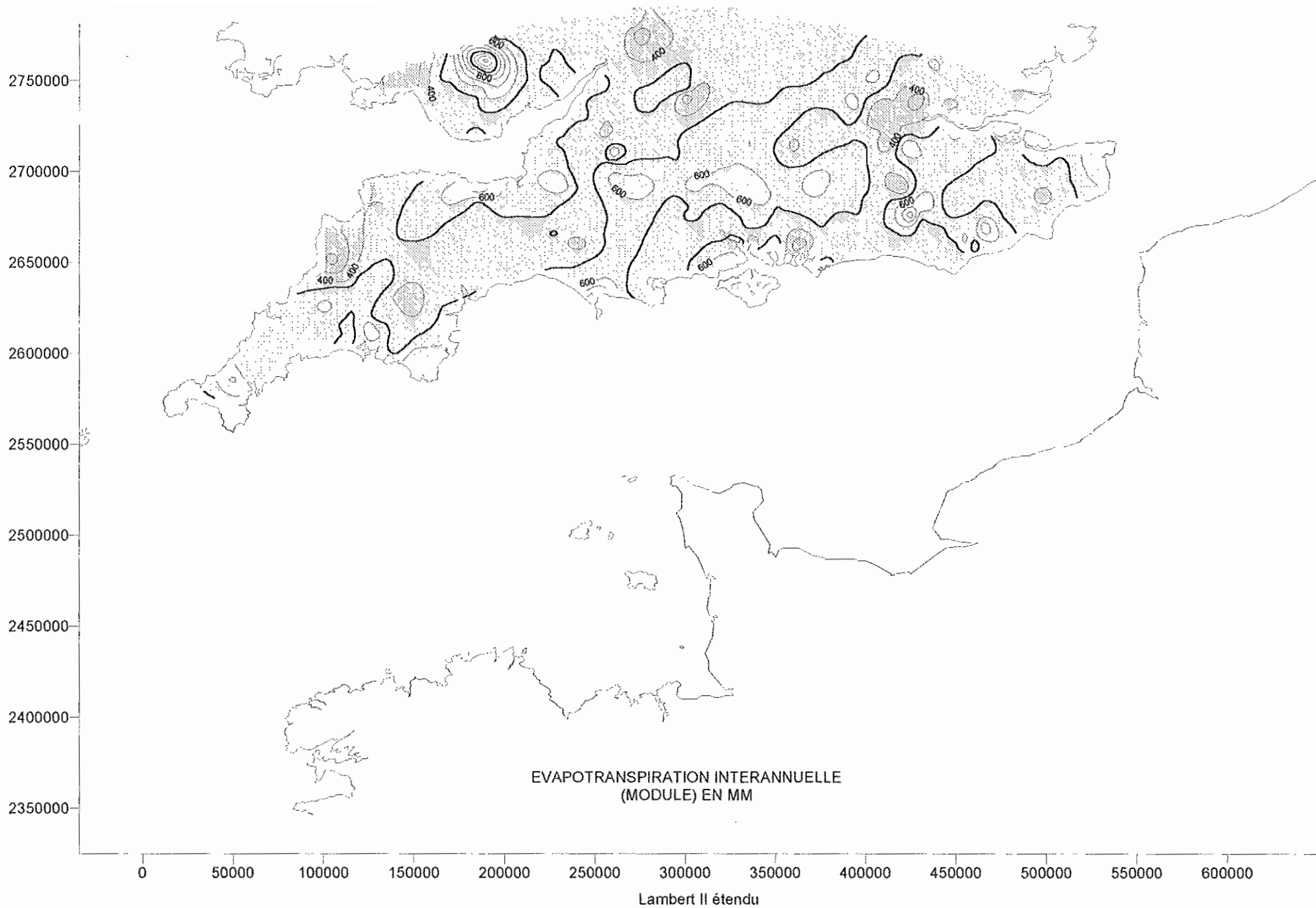










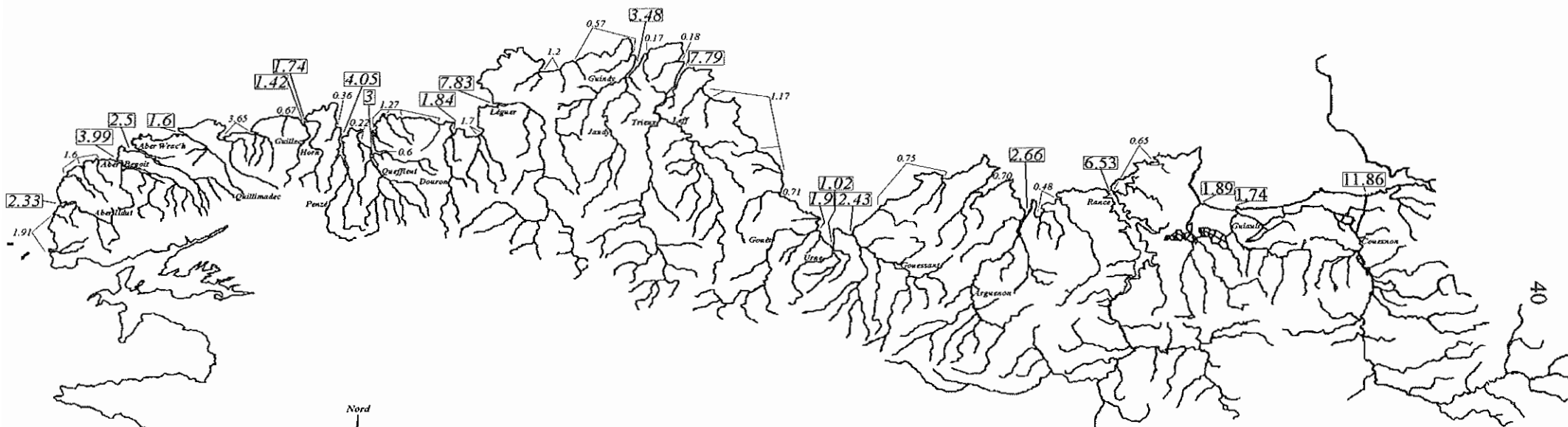


ANNEXE III

CARTES DES DEBITS BRUTS RECONSTITUES

Région Bretagne

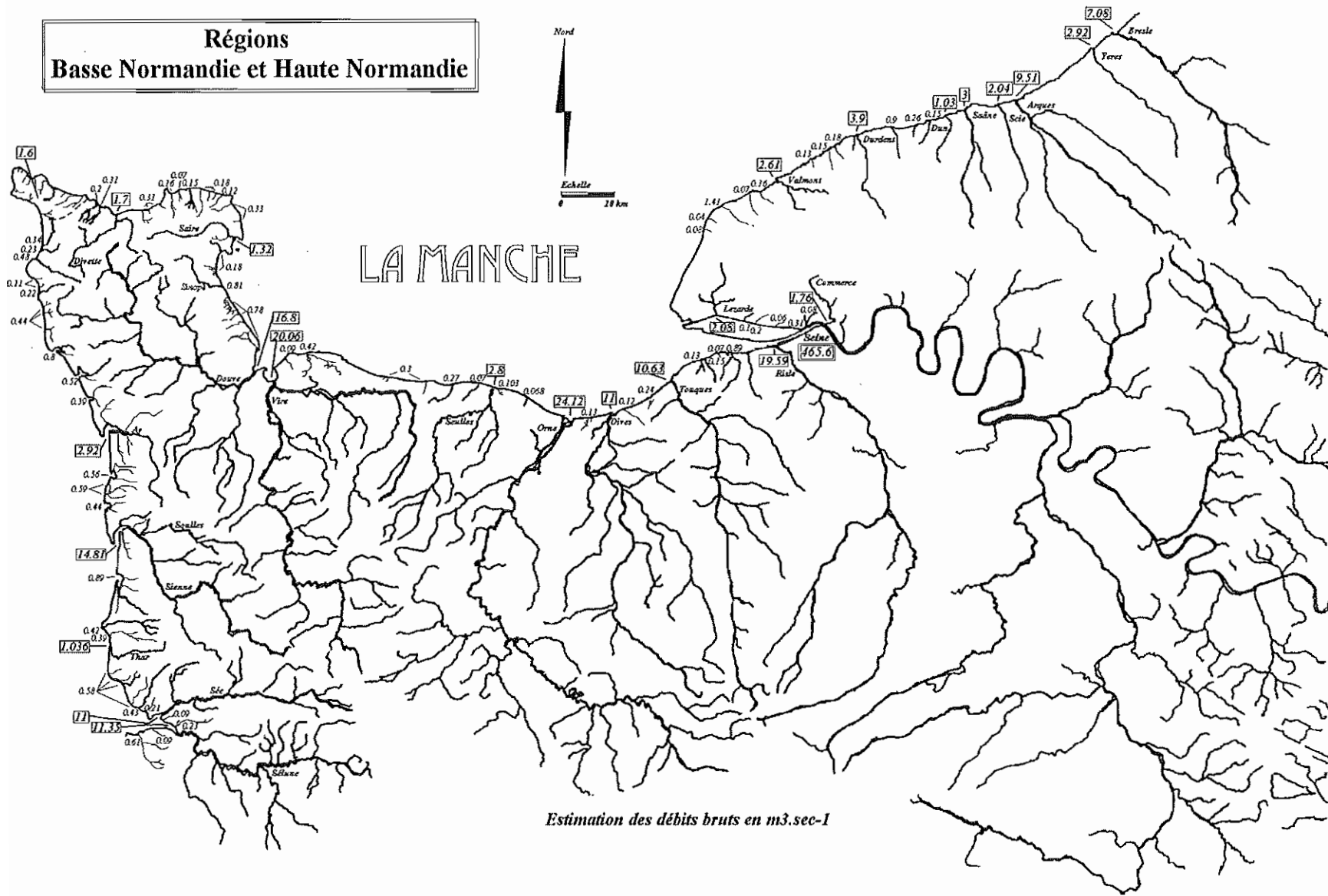
LA MANCHE

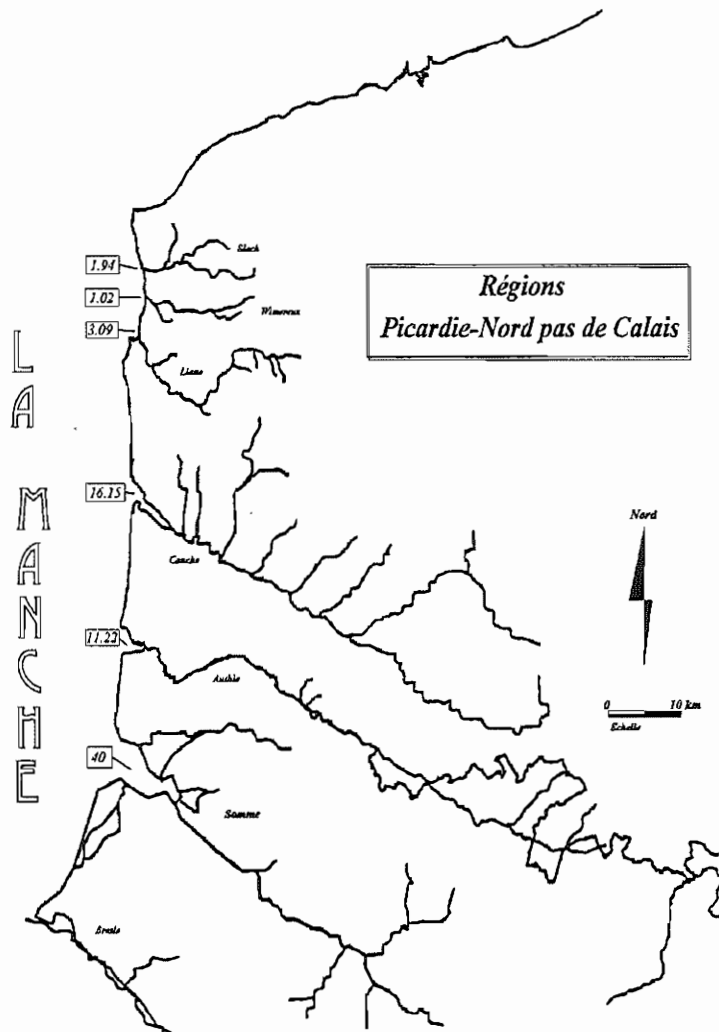


0 10 km
Echelle

Estimation des débits bruts en m³.sec⁻¹

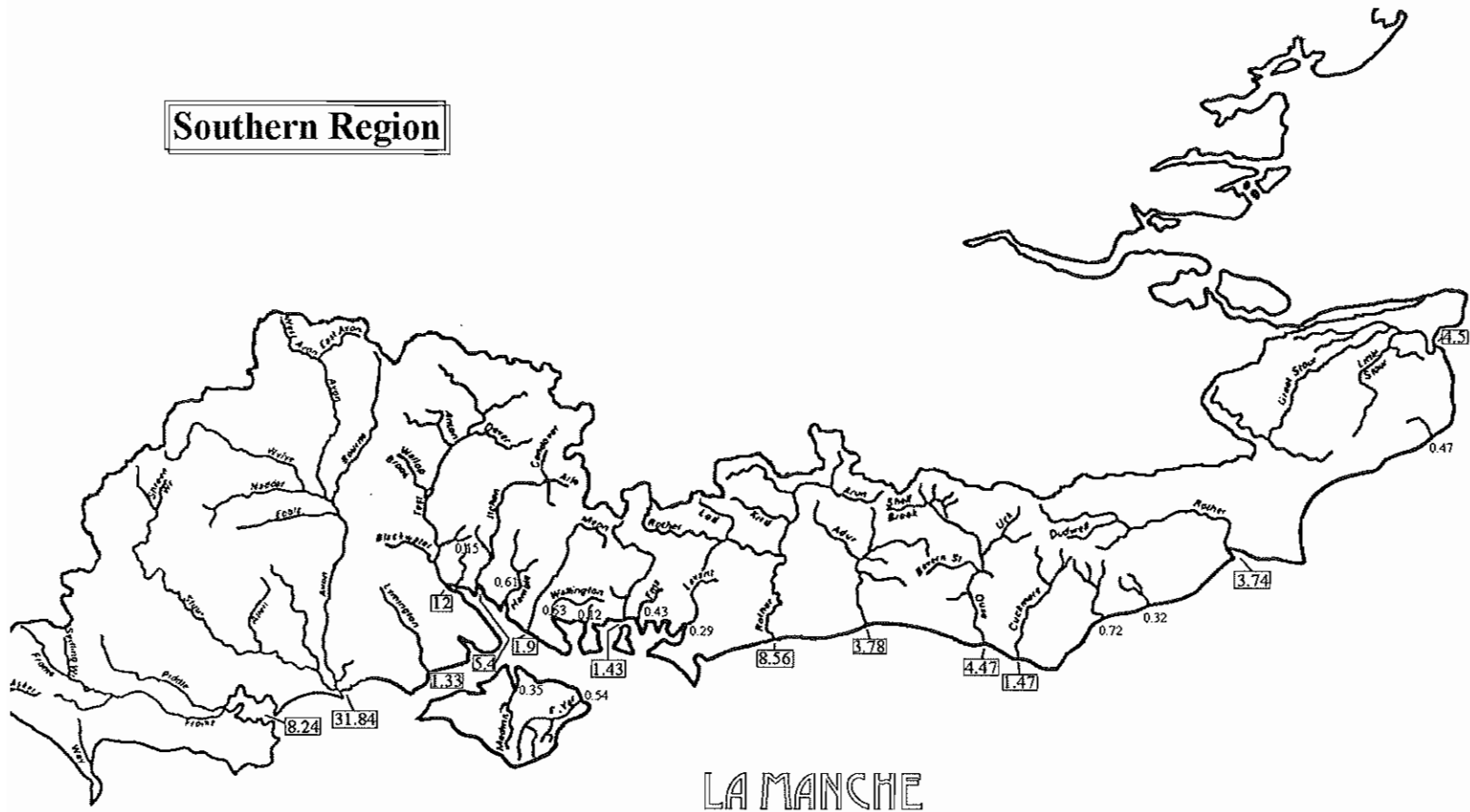
Régions
Basse Normandie et Haute Normandie



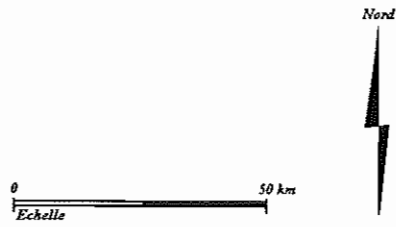


Estimation des débits bruts en $m^3 \cdot sec^{-1}$

Southern Region



LA MANCHE



Estimation des débits bruts en $m^3 \cdot sec^{-1}$

ANNEXE IV

ANALYSE STATISTIQUE DES RESULTATS

Principaux exutoires	BV (km ²)	Influence	Débits spécifiques reconstitués en mm.an ¹	Débits Bruts (m ³ .sec ⁻¹)	Influence
Wimereux	78	0,07%	413	1,02	0,12%
Urne	143	0,12%	225	1,02	0,12%
Dun	102	0,09%	318	1,03	0,12%
Thar	82	0,07%	397	1,036	0,12%
Saire	123	0,11%	338	1,32	0,16%
Guillec	74	0,06%	606	1,42	0,17%
Pointe de la Hague	102	0,09%	495	1,6	0,19%
Quillimadec	82	0,07%	616	1,6	0,19%
Divette	142	0,12%	379	1,7	0,20%
Guiault	200	0,17%	275	1,74	0,21%
Horn	91	0,08%	603	1,74	0,21%
Rivière du Commerce	171	0,15%	324	1,76	0,21%
Douron	114	0,10%	509	1,84	0,22%
Baie de Cancale	238	0,21%	251	1,89	0,23%
Gouët	249	0,22%	241	1,9	0,23%
Slack	153	0,13%	400	1,94	0,23%
Scie	215	0,19%	299	2,04	0,24%
Lézarde	211	0,18%	311	2,08	0,25%
Aber Ildut	134	0,12%	549	2,33	0,28%
Gouessant	415	0,36%	185	2,43	0,29%
Aber Wrac'h	137	0,12%	576	2,5	0,30%
Valmont	279	0,24%	295	2,61	0,31%
Arguenon	601	0,52%	140	2,66	0,32%
Seulles	429	0,37%	206	2,8	0,33%
Yeres	307	0,27%	300	2,92	0,35%
Ay	181	0,16%	508	2,92	0,35%
Saône	304	0,26%	312	3	0,36%
Queffleut	235	0,20%	403	3	0,36%
Liane	244	0,21%	400	3,09	0,37%
Guindy et Jaudy	377	0,33%	291	3,48	0,42%
Durdent	368	0,32%	335	3,9	0,47%
Aber Benoit	229	0,20%	550	3,99	0,48%
Penzé	206	0,18%	620	4,05	0,48%
Rance	1084	0,94%	190	6,53	0,78%
Bresle	745	0,64%	300	7,08	0,85%

Leff et Trieux	844	0,73%		291	7,79	0,93%
Léguer	494	0,43%		500	7,83	0,94%
Arques	1035	0,89%		290	9,51	1,14%
Touques	1291	1,12%		260	10,63	1,27%
Dives	1754	1,52%		198	11	1,32%
Sée	458	0,40%		757	11	1,32%
Authie	984	0,85%		360	11,22	1,34%
Sélune	1009	0,87%		355	11,35	1,36%
Couesnon	1134	0,98%		330	11,86	1,42%
Sienne et Souilles	747	0,65%		626	14,81	1,77%
Canche	1274	1,10%		400	16,15	1,93%
Douve	1480	1,28%		358	16,8	2,01%
Somme Débits < 1m ³ .sec ⁻¹ (Bretagne)	1672	1,45%	Moyenne Pondérée des mm.an-1 ou par déduction :	350	18,56	2,22%
Risle	1994	1,72%		310	19,59	2,34%
Vire	1930	1,67%		328	20,06	2,40%
Somme Débits < 1m ³ .sec ⁻¹ (Normandie)	1948	1,68%	Moyenne Pondérée des mm.an-1 ou par déduction :	325	20,091	2,40%
Orne	2928	2,53%		260	24,12	2,89%
Somme	5560	4,81%		250	40	4,79%
Seine	78268	67,68%		300	465,6	55,70%
Total :	115649	100,00%	Moyenne Pondérée des mm.an-1 ou par déduction :	228	835,937	100,00%

Principaux exutoires	BV (km ²)	Influence	Débits spécifiques reconstitués en mm.an ⁻¹	Débits Bruts (m ³ .sec ⁻¹)	Influence
Seaton	39	0,27%	825	1,03	0,51%
Cober	43	0,30%	775	1,05	0,52%
Asker	92	0,63%	375	1,09	0,54%
Lymington	140	0,97%	300	1,33	0,66%
Hermitage	100	0,69%	450	1,43	0,71%
Cuckmere	143	0,99%	325	1,47	0,73%
Erme	50	0,35%	1150	1,82	0,90%
Meon	200	1,38%	300	1,9	0,94%
Yealm	68	0,47%	900	1,95	0,97%
Fal	90	0,62%	700	1,99	0,99%
Plym	90	0,62%	900	2,57	1,28%
Somme débits < 1m ³ .sec ⁻¹ (SouthWest)	118	0,81%	<i>Moyenne Pondérée des mm.an-1 ou par déduction :</i> 750	2,795	1,39%
Avon	107	0,74%	950	3,23	1,61%
Otter	209	1,45%	500	3,31	1,65%
Rother	337	2,33%	350	3,74	1,86%
Adur	298	2,06%	400	3,78	1,88%
Lynher	139	0,96%	1000	4,41	2,19%
Ouse	403	2,79%	350	4,47	2,22%
Great Stour	406	2,81%	350	4,5	2,24%
Somme débits < 1 m ³ .sec ⁻¹ (Southern)	649	4,49%	<i>Moyenne Pondérée des mm.an-1 ou par déduction :</i> 225	4,63	2,30%
Fowey	169	1,17%	925	4,95	2,46%
Axe	333	2,30%	500	5,27	2,62%
Itchen	852	5,89%	200	5,4	2,69%
Tavy	208	1,44%	900	5,93	2,95%
Frome and Piddle	650	4,50%	400	8,24	4,10%
Rother	600	4,15%	450	8,56	4,26%
Teign	395	2,73%	750	9,39	4,67%
Dart	344	2,38%	1000	10,89	5,41%
Test	1893	13,10%	200	12	5,97%
Exe	1241	8,58%	575	22,612	11,24%
Tamar	959	6,63%	775	23,54	11,70%
Avon and Stour	3092	21,39%	325	31,84	15,83%
Total	14457	100,00%	<i>Moyenne Pondérée des mm.an-1 ou par déduction :</i> 439	201,117	100,00%

Bilan total Manche	Flux entrant (m³sec⁻¹)		superficie drainée		mm.an⁻¹	Hauteur *
France	836	80,62%	115649	88,89%	228,1054352	29,77
Grande Bretagne	201	19,38%	14457	11,11%	439,010157	7,16
Total :	1037	100,00%	130106	100,00%	251,5	36,93

(*) Hauteur d'eau en cm par an, relative à la superficie de la Manche : Environ 88628 km²