



**ETUDE PAR THERMOGRAPHIE AERIENNE DU DEPLACEMENT
COTIER DES EAUX TERRIGENES AU LARGE DE CABOURG**



**AGENCE DE L'EAU
SEINE-NORMANDIE**

RAPPORT D'ETUDE

Demandeur : AGENCE DE L'EAU SEINE-NORMANDIE
Direction du Littoral Normand
21 rue de l'homme de bois
14600 HONFLEUR

Date de la demande : 08/11/95 - Commande n° 95.97.110

Objet : Etude par thermographie aérienne du déplacement
côtier des eaux terrigènes au large de Cabourg

Référence LNE : 5070544 DEMA/1

**ETUDE PAR THERMOGRAPHIE AERIENNE
DU DEPLACEMENT COTIER
DES EAUX TERRIGENES AU LARGE DE CABOURG**

SOMMAIRE

1. METHODOLOGIE.....	1
2. ACQUISITION DES THERMOGRAPHIES.....	2
3. PRELEVEMENTS.....	3
4. RESULTATS DE L'ETUDE	3
4.1. Présentation	3
4.2. Situation de Basse Mer + 3 h.....	3
4.3. Situation de Pleine Mer.....	5
4.4. Situation de Pleine Mer + 3 h.....	6
4.5. Situation de Basse Mer	7
4.6. Zone de Port Guillaume.....	8
5. CONCLUSIONS.....	9

ANNEXES :

- Thermographie aérienne : principes et appareillage utilisé.
- 8 planches et 5 schémas d'interprétation.



ETUDE PAR THERMOGRAPHIE AERIENNE DU DEPLACEMENT COTIER DES EAUX TERRIGENES AU LARGE DE CABOURG

A l'initiative de la Direction des Rivages Normands de l'Agence de l'eau Seine Normandie, le LNE a réalisé une étude par thermographie infrarouge aérienne (TIR) du déplacement des eaux terrigènes sur le littoral compris entre Villers s/mer et Franceville.

Le but de l'étude consiste à visualiser dans des conditions fixées à l'avance la courantologie côtière, responsable des déplacements littoraux, sur un cycle de marées, en utilisant les différences de température entre le milieu récepteur et les eaux d'origine continentale.

1. METHODOLOGIE

La thermographie aérienne (cf en annexe) permet, en utilisant des systèmes d'acquisition adaptés, de visualiser les variations de température des surfaces survolées.

Le détecteur photovoltaïque, associé à un système opticomécanique de balayage, module un courant électrique en fonction du rayonnement IR reçu.

Cette quantité de rayonnement (luminance) est liée à la température propre de l'élément de la surface analysée et à sa nature (émissivité).

Dans le cas d'une surface d'eau libre, milieu homogène en première approximation, on peut considérer que les différences de température vont caractériser des masses d'eaux d'origines diverses.

Au printemps, par exemple, les eaux fluviales et douces rejetées en mer possèdent une température supérieure à celle de l'eau de mer (et inversement en hiver).

La thermographie aérienne va donc permettre de détecter les rejets d'eaux douces littorales et de visualiser leur devenir en mer.

Cette différence de températures peut atteindre quelques degrés suivant la saison.

A titre d'exemple, la planche 1 montre une thermographie obtenue vers 18 h (Basse Mer) sur le littoral de la ville de Deauville et l'embouchure de la Touques.

Sur cette visualisation, on peut observer la distinction entre les eaux telluriques et le milieu marin, permise par le paramètre température. Vers 18h les eaux fluviales sont plus chaudes (plus claires) que le milieu récepteur.

La partie terrestre est, elle, beaucoup plus "chaude" que la zone littorale et elle apparaît saturée en blanc car sa température est supérieure au domaine thermique analysé.

La forme du panache fluvial renseigne sur les mouvements existants à la surface du milieu marin, responsables du déplacement littoral de ces eaux telluriques.

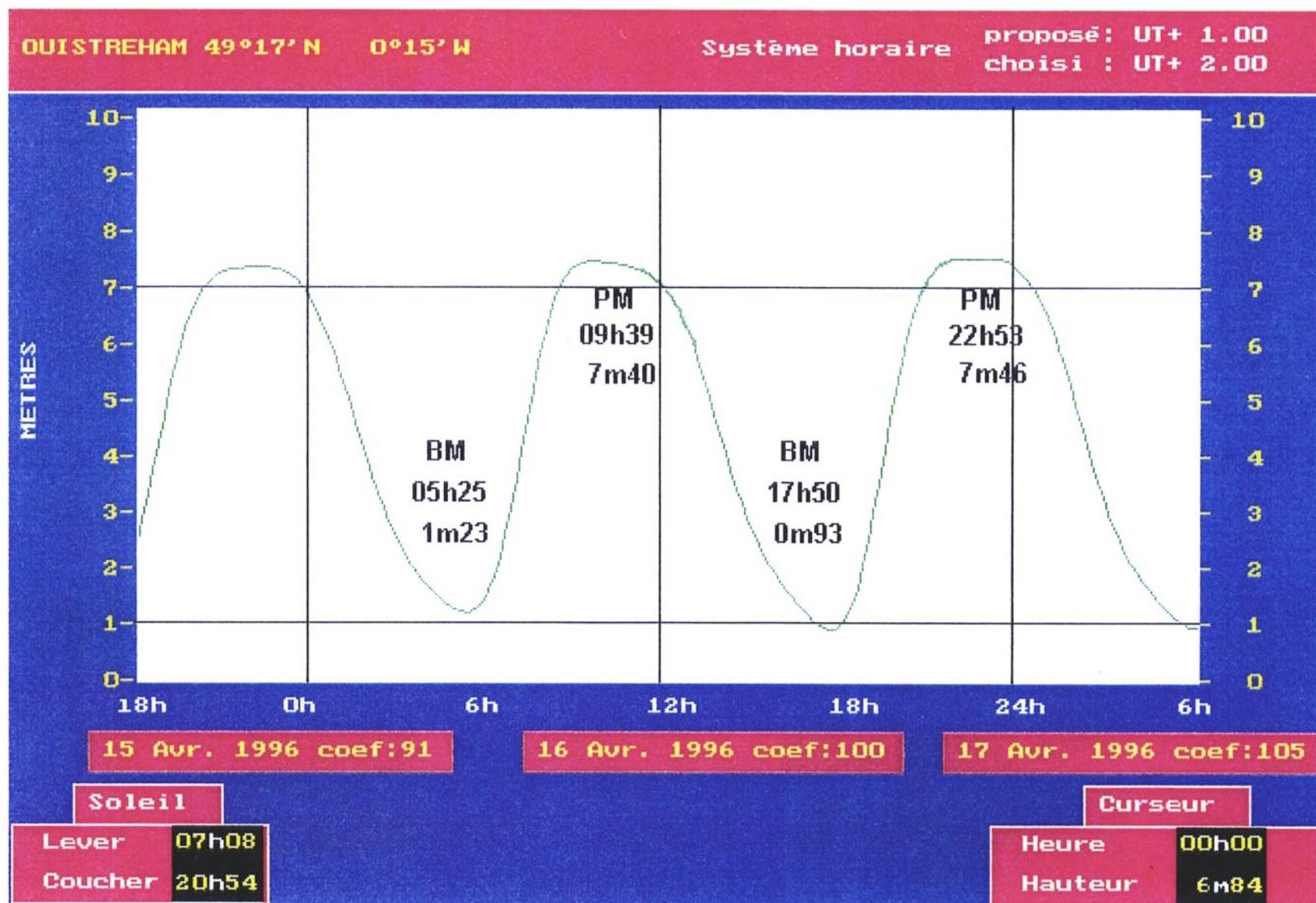
Sur cette thermographie, il est possible de distinguer l'orientation du panache en mer durant les heures précédentes, avec un déplacement vers l'ouest (flèche notée "1") à PM+3, suivi d'un déplacement vers le large dans la période plus proche du passage de l'avion.

Cet exemple montre que la persistance des structures thermiques permet une étude chronologique de la courantologie de surface et met en évidence le fait que les structures thermiques visualisées sont le résultat des déplacements des masses d'eaux durant les heures précédentes.





FIGURE 1



COURBE DE MAREE SUR 24h

2. ACQUISITION DES THERMOGRAPHIES

A l'origine, les conditions d'acquisition des images thermiques nécessaires à cette étude étaient définies de la façon suivante :

Quatre situations de marée ont été retenues :

Basse Mer, Basse Mer + 3 heures, Pleine Mer et Pleine Mer + 3 heures.

Un coefficient moyen de l'ordre de 70 devait permettre d'obtenir des documents représentatifs des phénomènes moyens.

Un débit moyen des fleuves côtiers était nécessaire ainsi qu'une différence de températures maximum entre mer et eaux fluviales.

A ces conditions extérieures s'ajoutent celles favorables à l'acquisition aérienne elle-même : temps calme, plafond nuageux supérieur à 1500 mètres, etc.

Enfin les conditions de mer devaient permettre la sortie d'une embarcation légère afin d'effectuer les prélèvements nécessaires aux analyses prévues.

Le 20 octobre 95, alors que les conditions étaient correctes (la seule restriction concernait le plafond nuageux inférieur à 1200 m), un certain nombre d'axes ont été parcourus dans les conditions requises et les prélèvements en mer effectués (à l'exception de la dernière série, la mer ayant grossi).

A cette occasion, les thermographies ont montré une très faible différence de température entre les eaux continentales et l'eau de mer et aussi que les déplacements de nappes d'eaux concernaient des surfaces étendues jusqu'à plusieurs kilomètres de la côte : la visualisation d'une zone de 2 kilomètres à partir du rivage était insuffisante pour permettre la vision globale des phénomènes et connaître l'origine des masses d'eaux dérivant plus au large.

Le principe d'une deuxième série d'acquisitions a alors été décidé.

Malheureusement les conditions requises n'ont pu être retrouvées durant l'hiver 95/96. Aux bonnes conditions courantologiques (coefficient de marées moyennes durant 2 à 3 jours par mois) ne correspondaient jamais les conditions météorologiques convenables.

Considérant que le cadre des conditions exigées étaient trop contraignantes, en accord avec l'Agence de l'Eau, les conditions liées au coefficient de marées ont été assouplies, en évitant les coefficients inférieurs à 50 et supérieurs à 100.

Le 16 avril 1996, profitant d'une journée de ciel clair et ensoleillée, avec un vent faible de secteur sud (6 à 7 mètres par seconde), les différents enregistrements ont été effectués à une altitude de 2000 mètres (champ couvert au sol 4000 m) au moment des quatre situations retenues.

Parallèlement quatre séries de prélèvements ont été effectuées simultanément aux vols.

Le 16 avril 1996, les conditions de marées étaient les suivantes :

Coefficient de marée : 100, avec un marnage de l'ordre de 6 mètres.

Les situations de marées recherchées se présentaient aux heures suivantes:

Basse Mer	:	5 h 25
Basse Mer + 3	:	8h30
Pleine Mer	:	10h24
Pleine Mer + 3	:	14h00
Basse Mer	:	17h50.



La dissymétrie observée dans les horaires doit être mise en relation avec les courbes de marées de la figure 1 qui montrent une période de hautes-eaux importante.

Compte tenu des horaires, il était obligatoire de commencer le cycle par la situation de Basse Mer + 3 à 8h30, l'ouverture du sas à Ouistreham vers 08h et l'ouverture de l'aéroport à 07h ne permettaient pas le survol de la situation de Basse Mer à 5h30 du matin.

3. PRELEVEMENTS

Simultanément aux survols, quatre campagnes de prélèvements étaient prévues et, à cet effet, un opérateur a parcouru avec une embarcation le trajet défini sur la figure 2 et a, aux mêmes situations de marées, prélevé aux cinq stations un échantillon proche de la surface (0,5 m).

La campagne précédente ayant montré qu'il était impossible compte tenu de l'estran de prélever aux stations 1 et 2 à Basse-Mer en face et dans le chenal de la Dives et la progression des eaux fluviales étant attendue vers l'Est à pleine mer, ces stations ont été déplacées en 1' et 2' à l'Est de la Dives en situation de Basse Mer et de Pleine Mer.

Le tableau récapitule les résultats des analyses par campagne et par échantillon. Les figures 3 à 9 annexées en fin de document donnent sous la forme de graphes l'évolution des numérations ou des concentrations sur le cycle de l'étude.

4. RESULTATS DE L'ETUDE

4.1. PRESENTATION DES RESULTATS

Les enregistrements effectués lors des survols ont été visualisés sous la forme d'images thermiques soit sur écran soit sur papier pour en permettre l'étude ; Certaines des thermographies obtenues figurent sur les planches 1 à 7, les axes les plus au large figurant à la partie supérieure.

La totalité des images n'a pas été reproduite, en effet, certains axes ont été parcourus à plusieurs reprises et des axes supplémentaires ont été réalisés en pleine mer pour visualiser l'extension maximum des panaches (au large de Ouistreham par exemple) reportée sur les schémas d'interprétation. Mais les thermographies les plus importantes visualisant les phénomènes proches du littoral figurent sur ces planches.

Des cartes au 1/50.000ème servent de support à l'interprétation des images thermiques.

Sur ces cartes ont été schématisées les principales structures thermiques correspondant à la position des eaux terrigènes rejetées en mer pour chaque situation de marées avec les indications du sens des courants.

4.2. SITUATION DE BASSE MER +3H

Quatre axes ont été parcourus entre Villers s/Mer et Ouistreham : Le premier à 8h25 et le dernier à 9h06.

Les thermographies (Planche 2) montrent une situation qui correspond à une période de courant faible avec des panaches en mer peu allongés et des limites ondulantes caractéristiques.



RESULTATS DES ANALYSES

Prélev.N°	Analyses	BM +3	PM	PM +3	BM
1	Coliformes thermotolérants /100ml	9	4	93	7
2	Coliformes thermotolérants /100ml	0	4	0	0
3	Coliformes thermotolérants /100ml	0	4	0	43
4	Coliformes thermotolérants /100ml	4	23	0	0
5	Coliformes thermotolérants /100ml	93	93	0	0
1	Streptocoques fécaux/100 ml	9	0	0	0
2	Streptocoques fécaux/100 ml	0	0	0	0
3	Streptocoques fécaux/100 ml	0	0	0	9
4	Streptocoques fécaux/100 ml	0	0	0	0
5	Streptocoques fécaux/100 ml	0	0	0	0
1	Salinité (eau de mer) g/mille	30.79	31.08	30.67	30.74
2	Salinité (eau de mer) g/mille	31.43	31.18	31.25	30.96
3	Salinité (eau de mer) g/mille	31.31	31.48	31.01	28.19
4	Salinité (eau de mer) g/mille	31.55	31.18	30.67	31.01
5	Salinité (eau de mer) g/mille	31.31	30.96	31.18	31.18
1	Matières en suspension mg/l	9.90	5.80	17.10	13.50
2	Matières en suspension mg/l	5.30	4.20	12.80	14.30
3	Matières en suspension mg/l	4.00	4.90	11.50	17.70
4	Matières en suspension mg/l	4.70	6.20	15.80	16.30
5	Matières en suspension mg/l	8.60	7.40	14.80	16.20
1	Nitrates en NO3 mg/l	2.40	2.30	2.30	2.20
2	Nitrates en NO3 mg/l	2.20	2.30	2.20	2.10
3	Nitrates en NO3 mg/l	2.10	2.20	2.20	4.10
4	Nitrates en NO3 mg/l	2.00	2.10	2.20	2.70
5	Nitrates en NO3 mg/l	2.10	2.30	2.10	2.20
1	Orthophosphates en PO4 mg/l	0.10	0.09	0.09	0.07
2	Orthophosphates en PO4 mg/l	0.08	0.08	0.07	0.06
3	Orthophosphates en PO4 mg/l	0.07	0.07	0.06	0.13
4	Orthophosphates en PO4 mg/l	0.06	0.06	0.08	0.08
5	Orthophosphates en PO4 mg/l	0.08	0.08	0.07	0.08

Les valeurs indiquées en rouge correspondent aux prélèvements effectués en 1' et 2'.

TABLEAU RECAPITULATIF

Zone de Ouistreham :

A l'embouchure de l'Orne, la limite entre l'eau de mer, montante, et celles des eaux fluviales est bien marquée (en M).

Du fait de cette pression, les eaux de l'Orne s'écoulent vers l'Est le long du littoral sur les hauts fonds (bancs de Merville) qui viennent d'être recouverts.

La faiblesse du courant (du débit) est attestée par les circonvolutions des limites des nappes d'eaux fluviales.

Au niveau du port des Ferries, une masse d'eau plus chaude vient d'être libérée par l'ouverture du sas du canal de Caen en C ; elle progresse vers le large.

Zone de Cabourg

Trois heures après la Basse Mer (5h25), un courant littoral faible est établi vers l'Est.

Ceci est visible sur l'image de la planche 2 sur laquelle les eaux de la Dives (en blanc D) après le blocage du "montant" progressent le long de la côte devant Houlgate. Il semble qu'il existe d'autres exutoires le long de la côte devant Houlgate.

Plus au large, les limites thermiques correspondent le plus souvent aux régimes courantologiques du cycle de marée précédent :

- limite de la nappe de l'Orne au large des Panoramas (en O-1).
- nappe de la Dives reprise plus au large par le flot (en D-1).

Le schéma d'interprétation n° 1, "BM+3", résume la situation des nappes provenant de la côte, ainsi que la forme des fronts thermiques qui les limitent.

Deux passages successifs sur le même axe à 20 minutes d'intervalle, montre une vitesse de déplacement de 0,6 noeud vers l'Est du front des eaux de l'Orne à 1 km au large de la zone Home-Merville les Dunes.

Les mêmes valeurs peuvent être retrouvées devant la Dives avec une composante plus marquée vers le large dans la zone proche du rivage (tendance favorisée par le vent de secteur sud).

Plus au large, à 3000 m de la côte, les structures indiquent une dérive générale vers l'est avec une vitesse de déplacement supérieure (1,2 noeud).

Analyse des échantillons

En dehors de l'échantillon n°1 au débouché de la Pointe de Cabourg, deux autres prélèvements, face au lieu dit "les Panoramas" (échantillon n°5) et face au Casino de Cabourg (échantillon n°4) dénotent la présence de coliformes thermotolérants (93/100 ml).

La salinité des échantillons reste toujours inférieure à 32 g/mille, la valeur la plus faible appartenant au prélèvement (échantillon n° 1) proche de la Pointe de Cabourg. Les concentrations en nitrates et orthophosphates ainsi que les matières en suspension sont les plus élevées pour cet échantillon.



4.3. SITUATION DE PLEINE MER

Les thermographies correspondant à la situation de Pleine Mer ont été enregistrées entre 10h30 et 11h30 sur la même zone (Ouistreham - Villers s/mer).

Thermiquement, la situation est la suivante : la surface du sol échauffée par l'éclairage solaire montre des températures supérieures à celles du milieu marin. Les nappes d'eaux terrigènes, balayant la zone subissent par rapport à l'eau de mer un échauffement superficiel plus important à cause de la capture du flux thermique sur un volume (ou une épaisseur) réduite, ce qui les rend plus visibles.

Les images thermiques (Planche 3) montrent que l'on retrouve les limites précédemment décrites au large du littoral entre Franceville et Cabourg, front des eaux de l'Orne par le travers du Casino de Cabourg (en 0) à 1 km.

Zone de Ouistreham

La sortie des eaux du canal de Caen depuis le vol précédent s'est poursuivie et le panache en "C" s'est développé (Planche 3 - image 10h45) vers le large et l'ouest d'environ 3 kms.

Sur l'image thermique de 11h18, le panache des eaux de l'Orne est visible dans sa totalité et malgré la situation de Pleine Mer le panache est alimenté par la sortie en mer des eaux fluviales. Elles ne se mélangent pas et, plus légères, flottent à la surface (en "O").

Le front marqué sur la situation précédente est parvenu en face du Casino de Cabourg (vitesse de déplacement d'1,2 noeud).

Zone de Cabourg

Le mouvement général est orienté vers l'est.

Face à la plage de Cabourg, une nappe d'eaux plus chaudes, bloquée à la côte, pourrait correspondre à ce qui reste des eaux de la Dives depuis le cycle précédent. La limite extérieure de cette masse d'eau notée en D (Dives) sur le schéma n° 2 est à environ 1 Km du rivage entre les Panoramas et la pointe de Cabourg.

Cette hypothèse est avancée à partir de l'image de la planche 4 enregistrée lors d'une même situation de Pleine Mer au mois d'octobre 1995. Cette image thermique montre la présence d'une masse d'eau plus froide (à cette saison) dont la limite ouest est située en face des Panoramas. La plus faible altitude de l'avion limite la zone analysée mais il est vraisemblable que cette nappe d'eau froide provienne de la Dives. Sa permanence pourrait être due aux faibles déplacements générés par cette marée de coefficient inférieur à 60 et à de plus forts débits de la Dives.

Sur la partie Est de la zone d'étude, Houlgate -Villers s/mer (Planche 3 - 10h56 et 11h12), la thermographie visualise le rejet en mer, faible, des eaux de la Dives le long de la rive droite de l'embouchure et un mouvement vers le large d'eaux terrigènes provenant de points situés dans la partie Ouest de Houlgate. Il peut s'agir du ruisseau des Drochous ou d'autres rejets autour du Casino de Houlgate.

Le courant général vers l'Est (Flot) est accompagné de dérives littorales inverses et localisées, attestées par la forme des anomalies de températures au droit de la Butte d'Houlgate et du Casino.

Ces eaux ont dérivé, ensuite, vers le large pour rejoindre les grandes nappes (Orne) dérivant vers l'Est dont la limite est parallèle à la côte à une distance de 2 Km. Le vent de secteur sud (6 m/s) favorise, sans doute, cette orientation vers le large.



Jusqu'à Villers s/mer puis Blonville existe une nappe littorale dérivant le long de la côte vers Deauville. Son origine peut être l'embouchure de la Dives ou des éxutoires au niveau des falaises de la Vache Noire ou de Villers s/mer. Sur l'image de 11h12, les sillages de petites embarcations marquent la faible épaisseur de la nappe flottant en surface en "S". Les vitesses de déplacement sont inférieures à 1 noeud.

Analyse des échantillons

Les cinq prélèvements au large de Cabourg - Houlgate montrent la présence de coliformes avec une numération plus importante sur les points 4 et 5.

L'échantillon 5 donne la même valeur que celle obtenue lors des prélèvements précédents (08h45). La salinité a, par contre, légèrement augmenté montrant sans doute le mélange accru avec les eaux du milieu récepteur.

La présence de germes dans les échantillons 4 et 5 confirmerait l'hypothèse émise plus haut. Les échantillons 1 et 2 ont été prélevés à l'est de la pointe de Cabourg (cf. figure 2) dans la direction de la dérive de Pleine Mer.

Les autres résultats des analyses restent du même ordre de grandeur pour les points identiques (5-4-3).

4.4. SITUATION DE PLEINE MER +3

Les enregistrements ont été effectués entre 13h20 et 15h14 (planches 5 et 6).

Les images thermiques grâce à la persistance des nappes d'eaux terrigènes rendent compte des phénomènes courantologiques qui ont affecté le déplacement de ces masses d'eaux entre 11h00 et 13h20.

Zone de Ouistreham

Les premiers axes ont montré que le développement des nappes d'eaux d'origine fluviale était très important vers le large à l'embouchure de l'Orne. Il a donc été nécessaire pour obtenir une vue d'ensemble des phénomènes courantologiques d'analyser des surfaces plus au large sans disposer de points de repères topographiques sur la côte qui est alors située hors du champ d'analyse du scanner infrarouge (champ couvert de 4 Km à 2000 m d'altitude). Les structures des limites eaux fluviales / eau de mer permettent de recalibrer les axes par rapport à la côte. A marée descendante, l'augmentation du débit de l'Orne du à l'effet de "chasse", a favorisé la progression rapide vers le large de la nappe.

A 13h30, la position des nappes fluviales (Orne) indique que dans les heures précédant le survol, les eaux rejetées continuent à suivre un courant vers l'Est. Ensuite, une composante vers le Sud a infléchi le panache de l'Orne vers la côte. Ses limites sont visibles jusqu'au travers du Casino de Cabourg (Planche 5 - 13h20).

Sur le littoral les structures montrent une dérive vers l'ouest et ces thermographies visualisent sans doute le moment de la renverse de courant entre le flot et le jusant.

Ceci expliquerait le rabattement à la côte des nappes de l'Orne observée sur la Planche 5, au début de la "renverse" des courants de marée.

A 14h15 (planche 6), le courant est nettement orienté vers l'ouest sur l'ensemble de la zone littorale.



Zone de Cabourg

A l'embouchure de la Dives, la structure du panache des eaux fluviales en mer est orientée vers l'Est (Houlgate) jusqu'au travers des Falaises de la Vache Noire, ce qui illustre les mouvements entre Pleine Mer et Pleine Mer + 3 h, la limite extérieure se situant à environ 2 Km au large.

Les eaux provenant de l'Orne sont au contact de la limite ouest de celles de la Dives (en H planche 5).

Mais au niveau de la ligne littorale, l'allongement des structures indique une dérive vers l'ouest au moment du survol.

A 14h30-15h, les hauts fonds se découvrent qui, réchauffés, présentent la même température que celles des eaux littorales et fluviales. Les directions des structures sont nettement orientées vers l'ouest sur l'ensemble de la zone côtière. La limite ouest du panache de la Dives a progressé jusqu'au droit du Casino de Cabourg avec une vitesse de progression de l'ordre de 1 noeud.

Les schémas d'interprétation 3 et 4 à PM+3h et PM+4h illustrent ces mouvements.

Analyse des échantillons

Seul l'échantillon n°1, prélevé à l'embouchure de la Dives, démontre la présence de germes (coliformes).

Les matières en suspension montrent une augmentation générale.

4.5. SITUATION DE BASSE MER

Les enregistrements ont été effectués entre 17h et 18h15.

Les images thermiques (Planche 7) montrent les changements courantologiques qui ont affecté la zone littorale depuis les enregistrements précédents.

Zone de Ouistreham

Les eaux de l'Orne sont reprises à environ 3 km du rivage par le courant général vers l'ouest au large.

Le refroidissement de la partie terrestre permet de commencer à distinguer la zone de l'estran découverte et les chenaux de circulation des eaux fluviales au niveau des deux estuaires.

Zone de Cabourg

L'orientation des structures est nettement établie vers l'ouest avec une dérive littorale nettement marquée sur la zone de l'étude entre Villers et Houlgate.

Au droit de Cabourg se dispersent les eaux de la Dives. Elles forment une nappe entre la ligne de rivage jusqu'à 3km en mer.

Au droit des chenaux le courant est en direction du large puis (comme pour la sortie de la Touques sur la planche 1) la nappe s'infléchit vers l'ouest (sa limite est visible sur l'image de 17h48 en "L").

Vers Villers apparaît sur la zone de l'étude une nappe littorale d'origine hypothétique (la Touques ou vidange des marais de Blonville).



Analyse des échantillons

Deux échantillons présentent une salinité minimum (30,67) à l'est de la Dives et en face du Casino (n° 4).

Ceci montre bien le caractère hétérogène de la répartition des eaux terrestres à la surface de la mer.

Les prélèvements effectués au cours de cette situation de Basse Mer montrent à l'Est du "delta" de la Dives en 1 un prélèvement positif de coliformes thermotolérants et un autre au point 3 face à la Dives.

Par contre les points 4 et 5 à l'ouest montrent une augmentation nette des matières en suspension, sans augmentation significative des teneurs en nitrates et orthophosphates, ainsi qu'une absence de germes mais accompagnée d'une salinité légèrement inférieure.

Pour les matières en suspension, la masse maximum est de 17 mg/l trouvés au niveau de l'échantillon n° 1. Il existe aussi pour le point n°4 (Face au Casino de Cabourg) une valeur élevée : 15,8 mg/litre.

Ceci semble indiquer la présence d'une eau d'origine terrestre mais non contaminée par une pollution domestique.

La teneur en nitrates est régulière (2,2 mg/l) ainsi que celle des orthophosphates, ce qui indiquerait une dilution faible jusqu'à (point n° 5) cinq kilomètres du point d'injection dans le milieu marin (voir graphique).

4.6. ZONE DE PORT GUILLAUME

Sur la planche 8 figurent deux enregistrements effectués le 20/10/95, alors que des conditions correctes d'équilibre thermique entre l'eau et la terre autorisaient l'acquisition d'images exploitables sur les deux domaines.

L'échelle de teinte à la partie gauche de la planche donne les variations croissantes des températures radiométriques du bas vers le haut. Les teintes foncées noir et bleu soulignant les basses températures de la scène et les teintes les plus claires jaune-blanc localisent les plus hautes températures.

Sur l'image de pleine mer (8 h), la terre est plus froide que l'eau de mer (en jaune) qui pénètre dans le lit de la rivière sur plusieurs kilomètres.

En "F" une limite thermique, localisant le biseau frontière entre eau douce et eaux marines ou un exutoire (confluent de la Divette). En "St", la station d'épuration dont les effluents sont peu perceptibles. Enfin, en D, une zone hétérogène en température dont l'allure peut ressembler à une zone de déblais ou de décharge.

A basse mer, l'image thermique montre, à l'inverse, les zones recouvertes d'eau par les teintes les plus sombres (les plus froides).

Les élévations de températures différentielles sous l'effet de l'éclairement solaire (15 h) permettent de distinguer :

- Dans le lit de la rivière, en bleu foncé, les zones les plus humides ou recouvertes d'eau ;
- En vert, les sables ou vases émergées mais humides ;



- En rouge, les parties émergées les plus sèches.

Dans la partie inférieure du cours d'eau, ces variations de températures rendues par les différentes teintes sont liées au modelé des bancs de sables et à leur hauteur par rapport au niveau de l'eau.

Les zones présentant l'échauffement maximum (en rouge) sont les parties supérieures découvertes ou asséchées depuis le début de la marée descendante.

On peut constater, par exemple, en R la présence de hauts-fonds à proximité du canal de Port-Guillaume et des zones d'envasements à l'intérieur de la dernière courbe du fleuve .

5. CONCLUSIONS

Les cinq schémas d'interprétation permettent de reconstituer l'ensemble des mouvements affectant les eaux de la frange littorale pendant un cycle de marées.

Les structures observées lors des survols du 16 avril 1996, même si elles ne correspondent pas à une situation de conditions moyennes, peuvent être considérées comme représentatives du cycle des déplacements des eaux côtières en fonction des courants de marées.

Avant la Basse Mer (schéma d'interprétation 5), les panaches des eaux fluviales ont été entraînés par le courant de jusant vers l'ouest.

Sur la zone de Cabourg, cette situation courantologique se traduit par une dérive des eaux de la Dives le long des plages du Casino jusqu'au lieu-dit "Les Panoramas".

A Basse Mer, lors du survol, le mouvement de bascule des panaches est déjà entamé, la nappe de la Dives commence à progresser vers le large et vers l'Est comme en témoigne la salinité relevée aux points 1' et 2' et 3 et la présence de coliformes en 1'. Le panache de l'Orne s'infléchit dans la même direction.

A Basse Mer + 3h, le courant de marée est établi vers l'Est et a entraîné pendant les 3 heures précédentes les nappes d'eaux rejetées lors du jusant précédent (schéma d'interprétation n° 1).

Une grande partie des eaux de la Dives a dérivé vers l'Est jusqu'au niveau des falaises d'Houlgate (D-1 schéma d'interprétation n° 1).

Il en est de même pour la nappe de l'Orne (en 0-1).

Au moment du survol, un blocage des rejets fluviaux est observé au niveau des embouchures.

A Pleine Mer, les nappes sont toujours individualisées et ont progressé vers l'Est, les débits rejetés sont plus importants pour l'Orne et un blocage partiel persiste à l'embouchure de la Dives (schéma d'interprétation n° 2).

A Pleine Mer + 3h, la renverse de courant a eu lieu et a infléchi vers la côte les panaches d'eaux fluviales. Le courant correspondant au jusant est établi et oriente la dérive littorale vers l'Ouest jusqu'à créer la situation décrite sur les images de Basse Mer (schémas d'interprétation n° 3 et 4).



La corrélation est parfois difficile entre les images thermiques et les analyses faites sur des échantillons ponctuels et peu nombreux. Une baisse de la salinité et une augmentation des matières en suspension (MES) pourraient caractériser des eaux d'origine fluviales. On peut noter, par exemple, que, à PM+3, le prélèvement n°4 face au Casino de Cabourg possède une salinité équivalente (30,67 g/mille) à celui du prélèvement n°1 à l'embouchure de la Dives (31,55 g/mille représentant la salinité maximum rencontrée sur la zone sur l'ensemble de la campagne) ainsi qu'un poids de MES de 15,80 mg/litre. Il correspond à la situation visualisée sur les planches 5 et 6 devant Cabourg.

Les figures 3 à 9 montrent l'évolution des paramètres analysés pour les points 3, 4 et 5 situés respectivement, face à la sortie de la Dives, face au Casino de Cabourg, face au "Panoramas".

Au point n°3, la situation de Basse Mer est bien concrétisée par la présence face au rejet de la Dives (planche 7) de coliformes, de streptocoques fécaux, accompagné d'une augmentation des MES et d'une diminution de la salinité (figures 3, 4 et 9) ce qui montre bien à Basse Mer l'orientation vers le large sur la zone littorale des rejets.

Au point n° 4, la corrélation est plus difficile ; la salinité diminue entre Basse Mer +3h et Pleine Mer +3 h ; cette baisse pourrait correspondre au balayage de la zone par les nappes provenant de l'Orne ou de la Dives.

La mesure des matières en suspension (MES) donne des résultats cohérents avec le modèle courantologique déduit des images thermiques (nappe de la Dives) avec une augmentation pour les prélèvements de Pleine Mer +3 h et Basse Mer face au Casino de Cabourg. L'absence de germes (le point 3 donne des résultats positifs pour les mêmes situations) est peut-être due à la distance par rapport à l'origine du rejet.

Au point n°5, la présence de coliformes est détectée à Basse Mer +3 et Pleine Mer (comme au point 4 à Pleine Mer), il s'agirait alors de l'influence des eaux de l'Orne (peu de MES) ou de celle de la nappe plus chaude, déjà signalée, adjacente au rivage sur le schéma d'interprétation n° 2 ou D. Au point n°5 une augmentation des MES (figure 8) est parallèle à celle constatée en 4 à Pleine Mer +3h et Basse Mer.

Appliquée à des études littorales, la thermographie aérienne permet de visualiser, dans le contexte connu des courants de jusant et de flot, les particularités locales de la zone d'étude. Sur la zone de **Cabourg**, les images thermiques montrent la progression le long du rivage, pendant et après la Pleine Mer, des eaux de l'Orne jusqu'au droit du Casino de Cabourg ; le rapprochement vers la plage est favorisé lors de la renverse de courant avant Pleine Mer +3.

Elles visualisent aussi l'orientation de l'écoulement de la nappe de la Dives, de la Pointe de Cabourg vers les plages dans la période entourant la Basse Mer. Certaines de ces observations peuvent être corrélées avec les résultats des analyses sur les prélèvements effectués simultanément aux vols.

La méthodologie utilisée, altitude élevée et multiplication des axes, a permis d'évaluer dans les conditions des survols les vitesses du déplacement des eaux et surtout d'obtenir une analyse globale du devenir en mer des eaux continentales rejetées dans la zone d'études. L'acquisition de thermographies jusqu'à plus de 5000 mètres de la côte a montré l'extension maximale des masses d'eaux fluviales. Enfin, l'étude des séquences d'images a permis d'établir pour la situation analysée la succession des mouvements littoraux en fonction des courants de marées responsables de ces déplacements mais aussi de préciser les parties du littoral affectées par la dérive de ces masses d'eaux d'origine terrestre.



Cette étude, à caractère expérimental, démontre les possibilités de la thermographie aérienne et l'aide apportée pour la compréhension globale des mouvements sur l'ensemble de la zone. La thermographie permet, par l'acquisition rapide d'images sur des surfaces étendues, une vision synthétique de phénomènes dynamiques difficiles à mettre en évidence par des mesures en mer et par là devrait apporter une aide efficace aux techniciens en charge de ces études littorales.

Trappes, le 5 septembre 1996



Réalisation de l'étude

Renaud BURKHALTER



Prélèvements au point N°3 nb/100ml

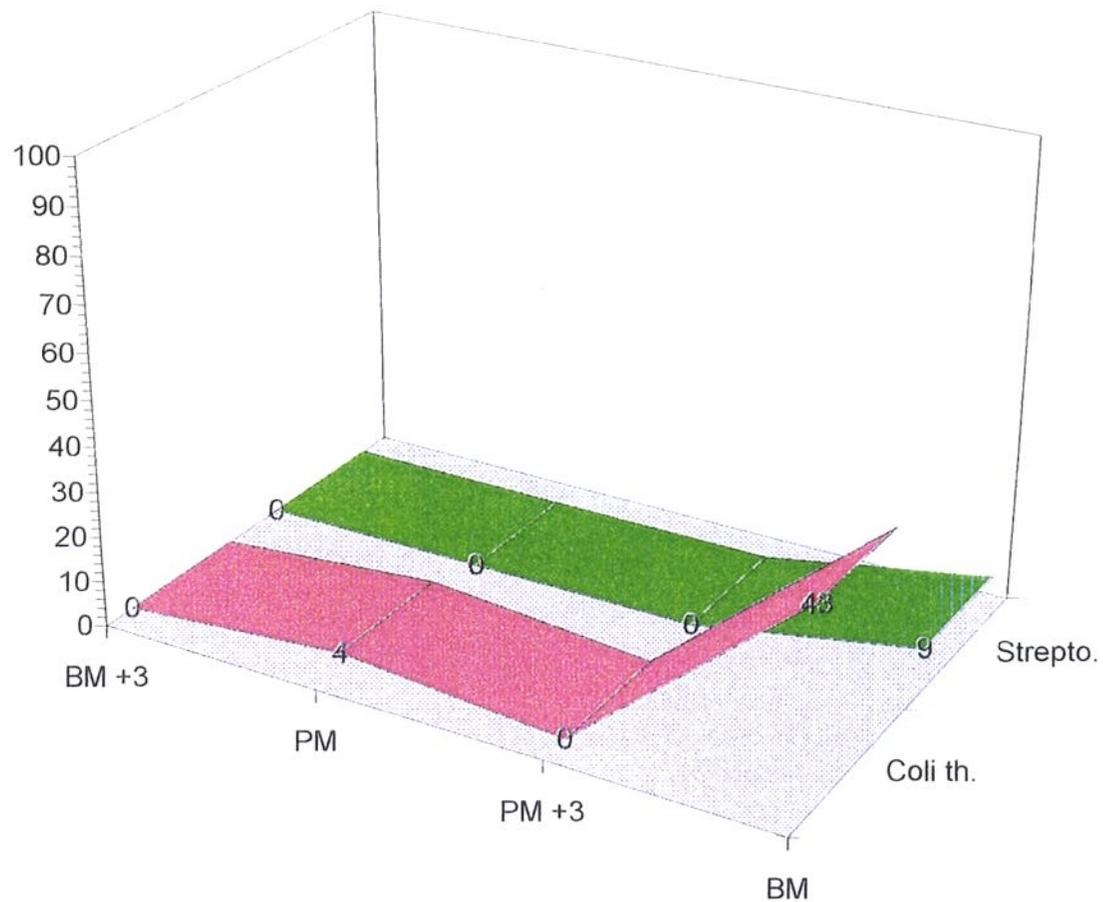


FIGURE 3

Prélèvement au point N°3 en mg/l

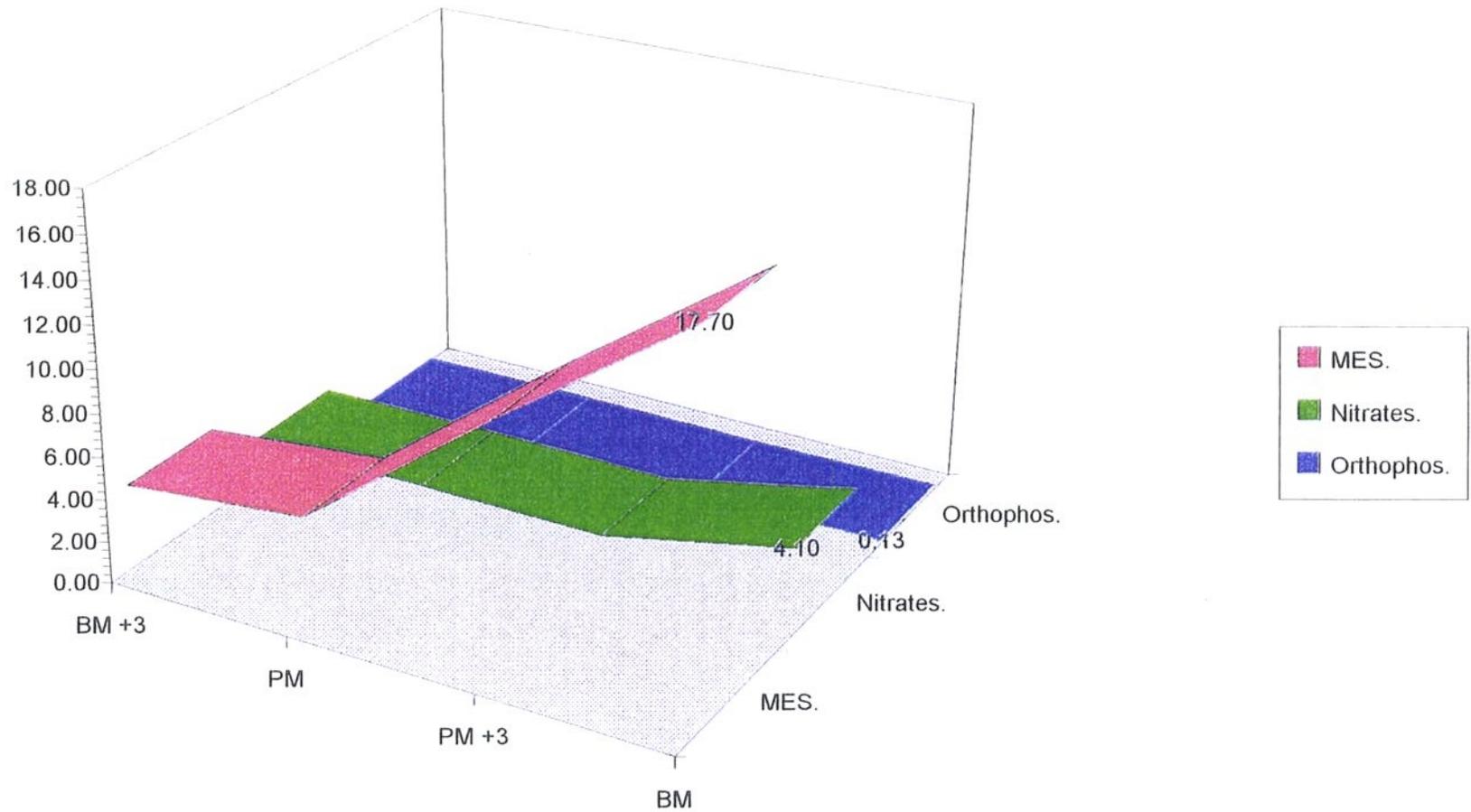


FIGURE 4

Prélèvements au point N°4 nb/100ml

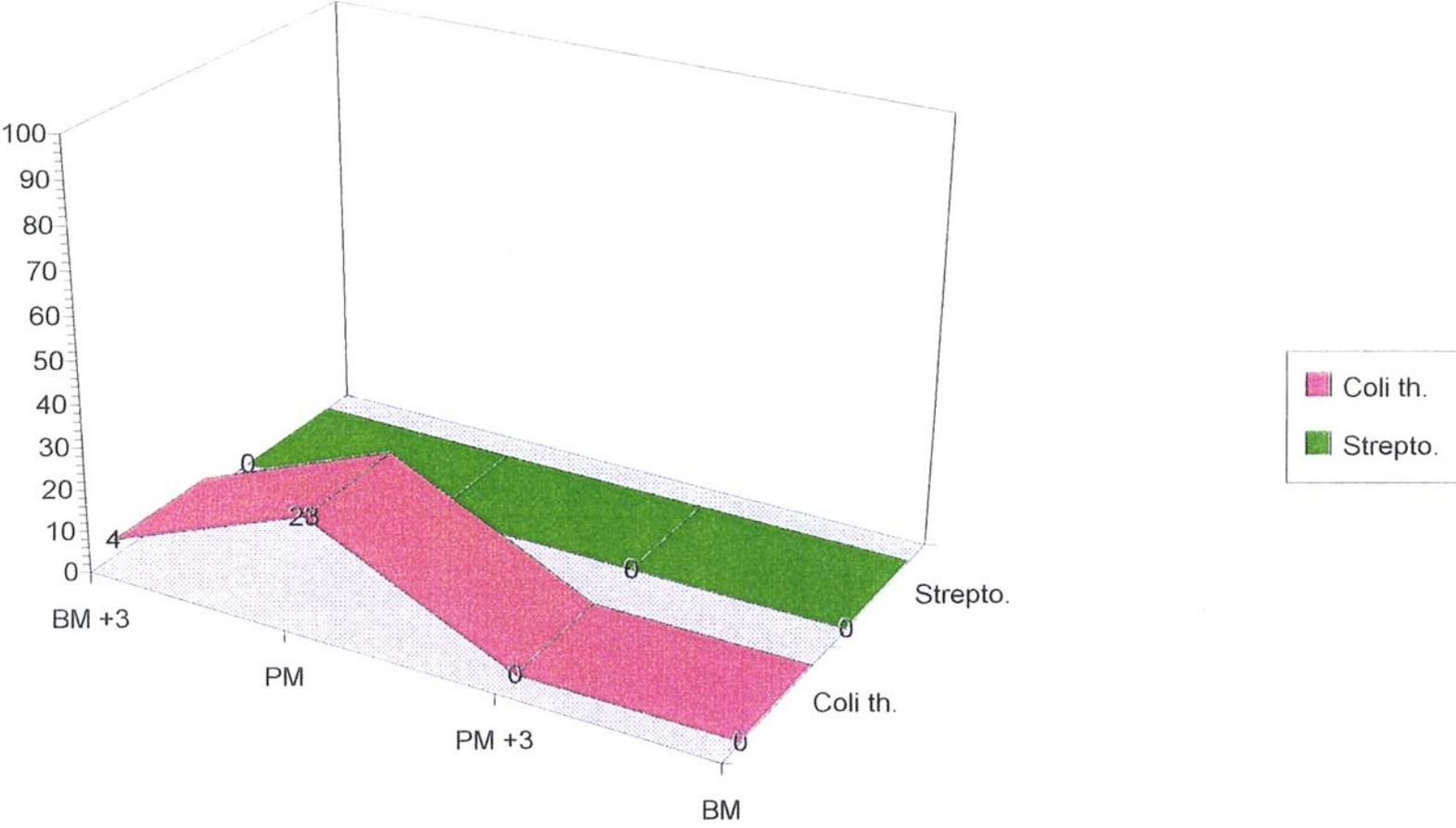


FIGURE 5

Prélèvements au point N°4 en mg/l

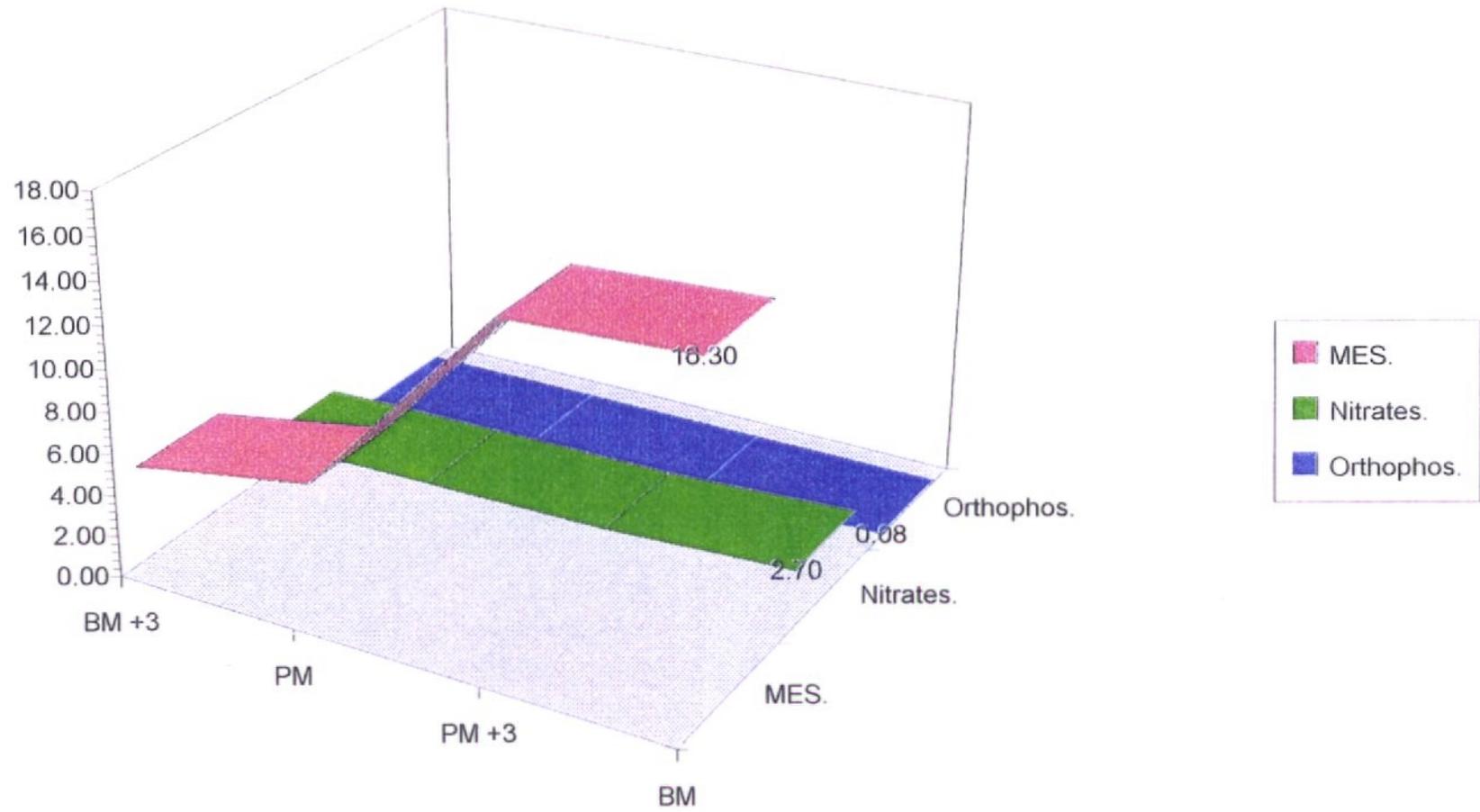


FIGURE 6

Prélèvements au point N°5 nb/100ml

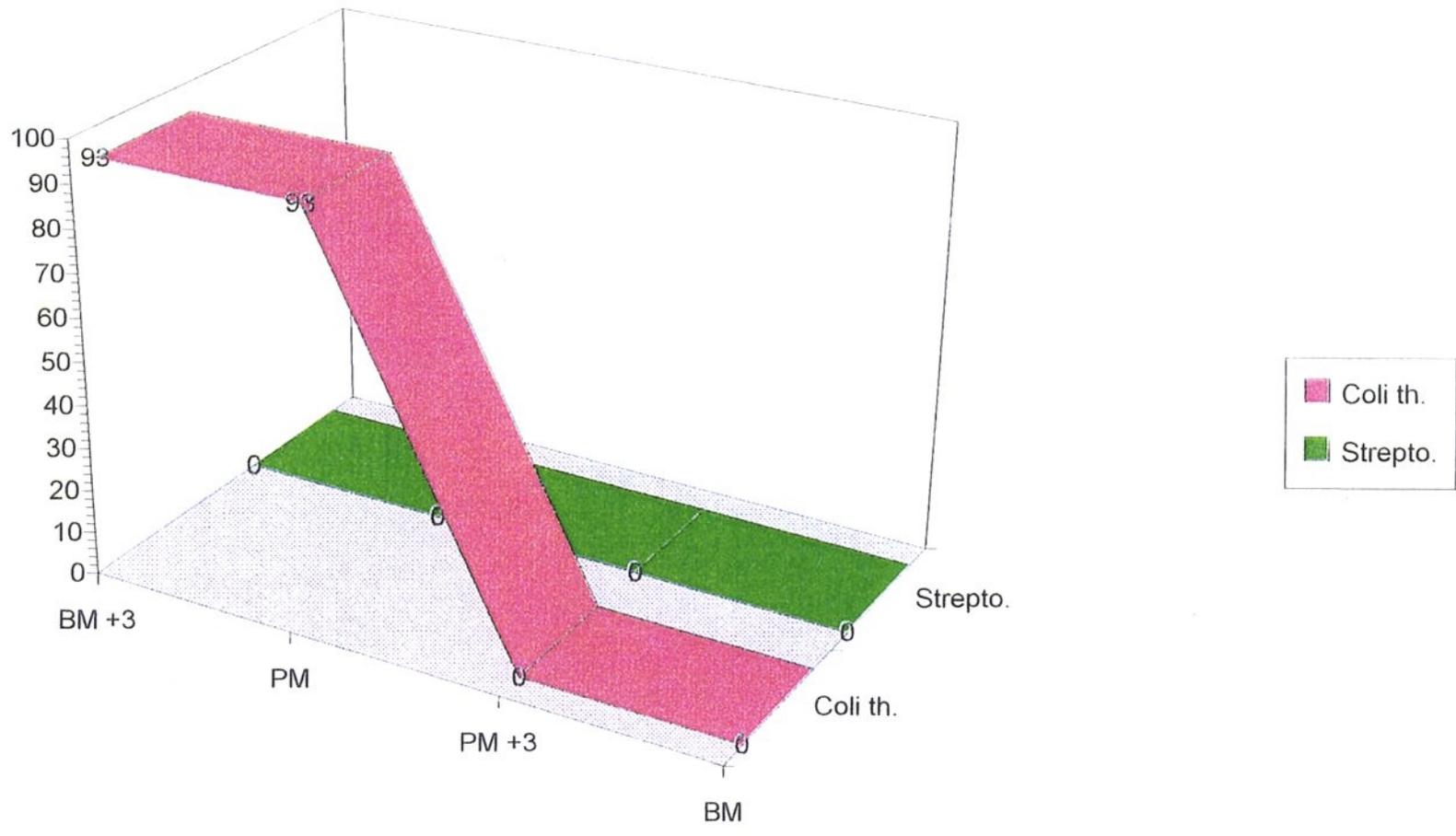


FIGURE 7

Prélèvements au point N°5 en mg/l

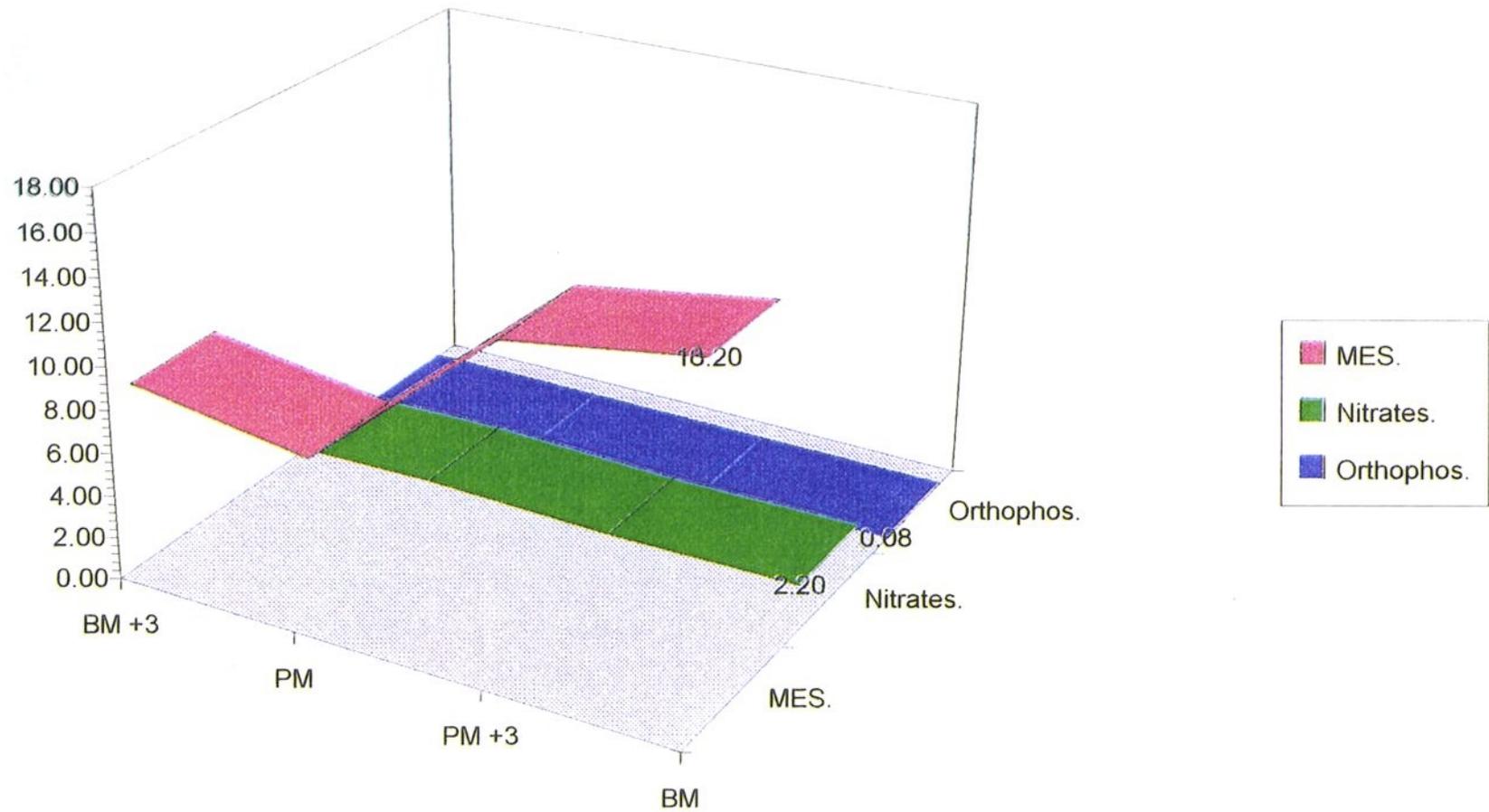


FIGURE 8

Salinité de l'eau de mer en g/mille.

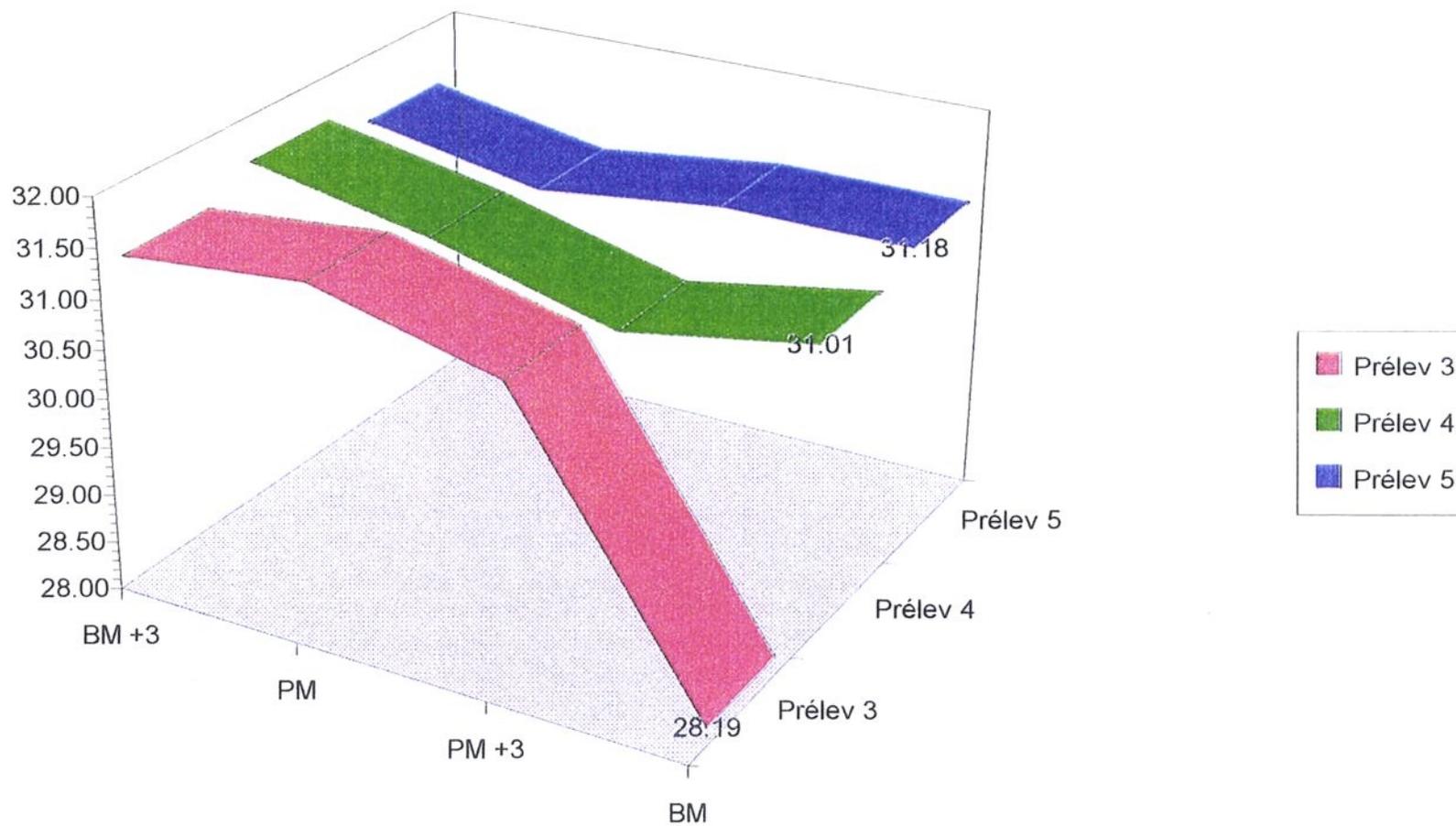


FIGURE 9

ANNEXE au Dossier 5070544/1

THERMOGRAPHIE AERIENNE

1. PRINCIPES

La thermographie infrarouge (TIR) consiste, par l'intermédiaire de l'analyse ou de la mesure de l'énergie de rayonnement émise par un objet dans une bande spectrale donnée (3-5 μm ou 8-12 μm), à visualiser sous forme d'un thermogramme la répartition spatiale des températures apparentes de surface.

Le capteur utilisé est un radiomètre à balayage (ligne ou spatial) qui est un instrument de mesure du flux de rayonnement, pour une longueur d'onde donnée, en provenance d'un élément de surface dans la direction du capteur.

Le signal de sortie d'un radiomètre est une fonction croissante de la température T. Il existe, donc, la possibilité d'étalonner un système de mesures infrarouges devant des sources connues. La grandeur de sortie sera la température apparente de l'objet.

L'analyse thermographique infrarouge fournit, donc, une cartographie des températures apparentes de surface à partir d'une mesure des luminances.

2. APPAREILLAGE UTILISE

Dans le système mis en oeuvre par le L.N.E., le scanner aéroporté balaye une ligne transversale à l'axe optique du capteur à une cadence de 200 lignes/seconde.

L'avancement du vecteur permet d'analyser et d'enregistrer des lignes successives à une vitesse de l'ordre de 200 à 300 kms/h. Le signal-vidéo enregistré est ensuite numérisé, formaté et visualisé ligne par ligne pour reconstituer l'image thermique de la surface balayée.



La figure 1 illustre le principe de fonctionnement de la TIR aéroportée avec l'analyse de la zone survolée par la rotation d'un miroir suivant l'angle de balayage "a" (déterminant la largeur analysée) et avec un angle instantané "b" (déterminant la résolution géométrique du système).

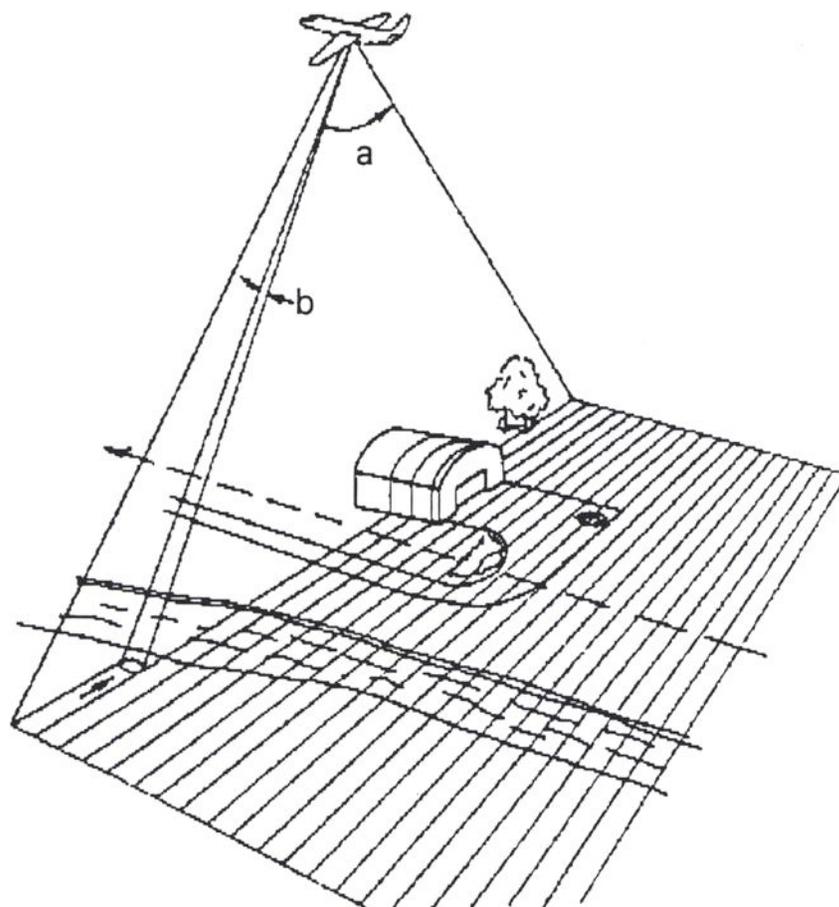


FIGURE 1: PRINCIPE DU SCANNER AEROPORTE

Pour chaque ligne le détecteur (HgCdTe) délivre un signal électrique modulé par les variations du flux de rayonnement incident. Ce signal est enregistré sous la forme d'une vidéo composite pour être restitué de diverses manières (images thermiques ou fichiers numériques).



La figure 2 présente un synoptique des opérations successives qui constituent un examen par Thermographie Infrarouge (TIR).

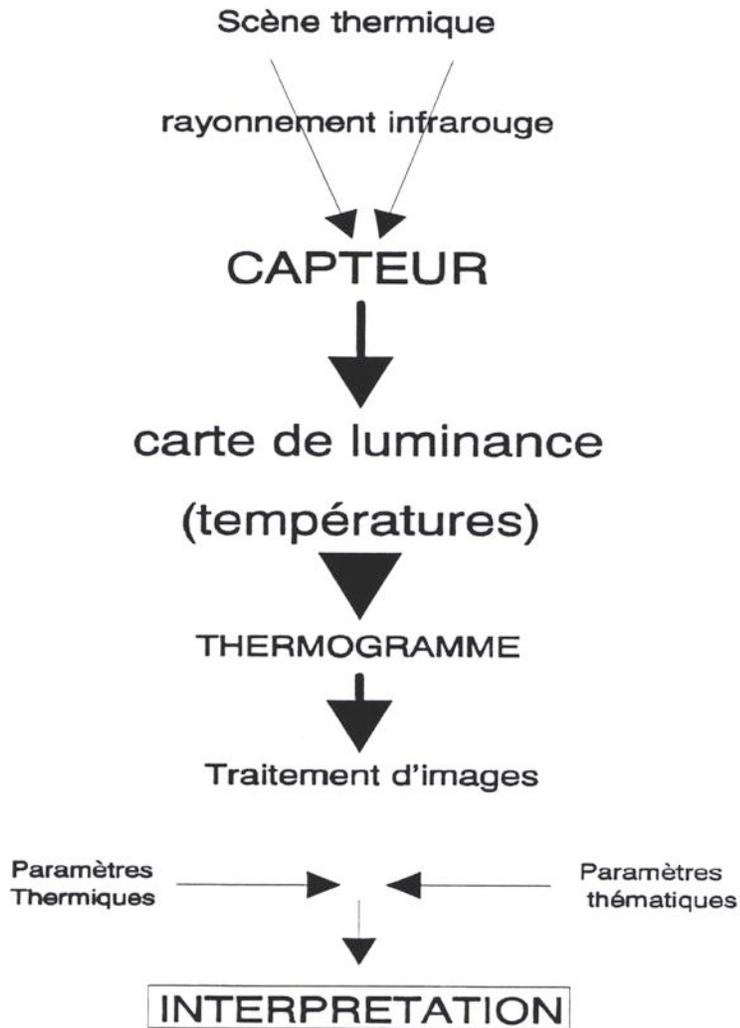


FIGURE 2: SYNOPTIQUE D'UNE TIR

La répartition des températures, l'allure des isothermes à la surface de l'objet doivent être explicités en fonction de phénomènes superficiels ou plus profonds susceptibles de modifier ou d'influencer les transferts thermiques positifs ou négatifs responsables de ces températures.



SYSTEME D'ACQUISITION

Le L.N.E. est équipé d'un système de thermographie aérienne organisé autour d'une tête d'analyse ou scanner infrarouge qui possède les caractéristiques suivantes :

- bande spectrale : 8-12 μm
- angle d'analyse : 90°
- vitesse d'analyse : 200 lignes/seconde
- angle instantané d'analyse : 1,5 mrad
- rapport vitesse/altitude : $0,025 < V/H < 0,35 \text{ S}^{-1}$
- compensation de roulis : $\pm 8^\circ$
- sensibilité thermique (NET) : 0,2°C

Destiné à des recherches méthodologiques ou à des applications pratiques, ce système d'acquisition de mesures infrarouge a été complété par différents sous-ensembles indispensables à une utilisation opérationnelle.

Système de navigation

Un système de localisation GPS permet, par la mémorisation des points d'entrée et de sortie, le suivi des axes en conditions nocturnes avec une précision de l'ordre de la centaine de mètres. Le parcours de l'avion peut être enregistré puis restitué sur ordinateur.

Visualisation en temps réel

Elle permet le contrôle des images thermiques sur un moniteur, pendant le vol d'acquisition.

Calibration du signal

Elle a été réalisée en plaçant un corps noir dans le champ d'analyse du dispositif optique de balayage. L'étalonnage du signal enregistré est obtenu, par comparaison, ligne par ligne. Deux sorties vidéo sont donc disponibles, l'une en réglage automatique (niveau moyen et gain), l'autre en signal calibré d'où peut être obtenue une évaluation des températures analysées.

Transcription d'images

Au retour de l'avion, les bandes magnétiques enregistrées sont lues et transcrites sur un papier développé thermiquement. L'examen de ces images permet le contrôle des axes de vol suivis et celui de la qualité de l'enregistrement. D'éventuelles corrections peuvent être ainsi apportées au fur et à mesure du déroulement de l'opération aussi bien pour les heures du survol, les altitudes ou les réglages adoptés.

RESTITUTION ET TRAITEMENT

Les données thermiques sont enregistrées sur un support magnétique de type KCS20 ; sur ces cassettes d'une durée de vingt minutes figurent, en succession, toutes les lignes analysées (200 lignes/seconde). Le premier traitement consiste à restituer le nombre de lignes nécessaire à la géométrie correcte de l'image en fonction du rapport vitesse/altitude (V/H) du vol d'acquisition. En effet, la plupart du temps la cadence des lignes délivrées par la tête d'analyse est supérieure au nombre nécessaire : il y a donc surlignage. Cette adéquation est faite lors de la visualisation sur moniteur et lors de la transcription sur papier thermique.



Elle doit aussi être réalisée lors du transfert des images sur un film de type photographique à partir duquel des tirages pourront être faits. Généralement les thermographies obtenues sont en mode positif : les luminances les plus élevées sont rendues par les teintes claires de l'image.

Un système de numérisation et de traitement d'images permet, au laboratoire, certains traitements classiques des données (filtrage, tracés de profils, d'isothermes, calcul de surfaces etc..) sur un micro-ordinateur de type P.C..

La numérisation s'effectue en 1024 points par ligne sur 8 bits de profondeur et peut être stockée sous la forme de fichiers 1024 x 1024 (image par image), ou sous la forme de fichier continu (ligne de 1024 points) limité à 60 méga-octets sur cassette de sauvegarde ou sur tout autre type de support.

D'autres transferts sont possibles sous des formats spécifiques.

APPLICATIONS

Surfaces terrestres

- Hydrogéologie : zones de drainage, fracturation, humidité des sols,
- Economie d'énergie : isolation des toitures, fuites thermiques, réseau de chauffage enterré (surveillance), fuites de fluides,
- Géotechnique : études de site (barrage, pont, route....).

Surfaces aquatiques

- Courantologie : courants côtiers de surface(orientation et vitesse),
- Pollution : détection d'hydrocarbures, détection et étude du déplacement (dispersion) d'effluents urbains et industriels,
- Ressources en eau: détection de sources sous-marines ou sous-fluviales.





**ETUDE PAR THERMOGRAPHIE AERIENNE DU DEPLACEMENT
COTIER DES EAUX TERRIGENES AU LARGE DE CABOURG**

(PLANCHES et SCHEMAS)



**AGENCE DE L'EAU
SEINE-NORMANDIE**

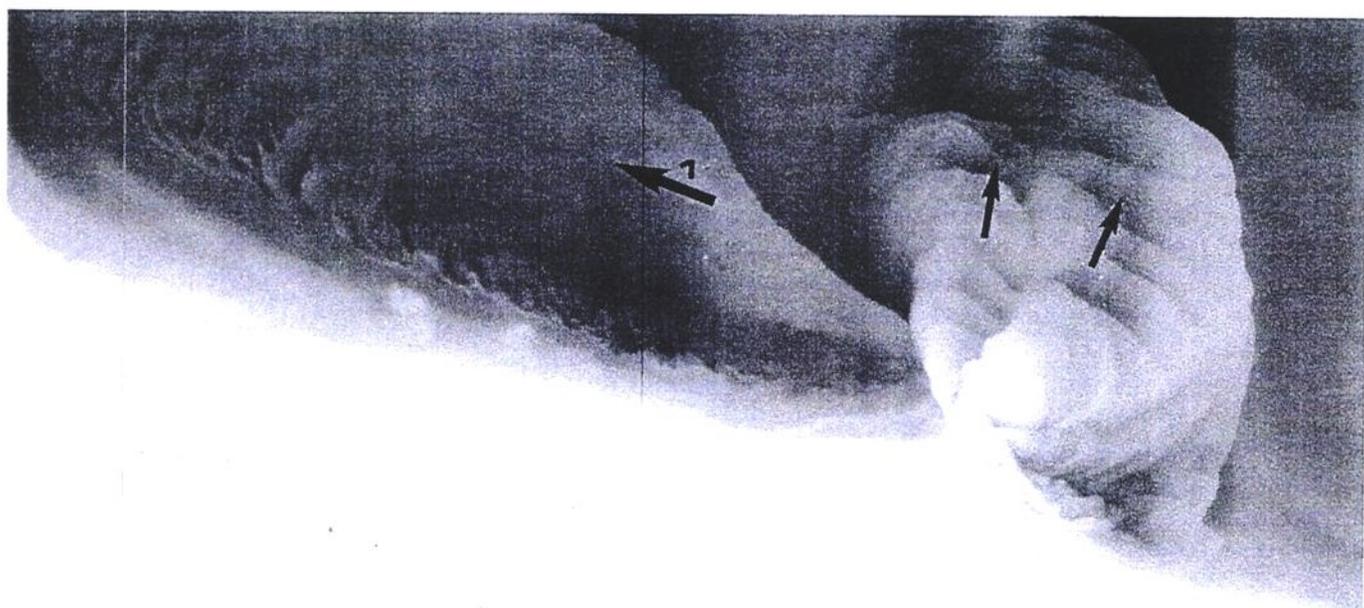
ETUDE PAR THERMOGRAPHIE AERIENNE DU DEPLACEMENT COTIER DES EAUX
TERRIGENES AU LARGE DE CABOURG

PLANCHES (8)



AGENCE DE L'EAU
SEINE-NORMANDIE

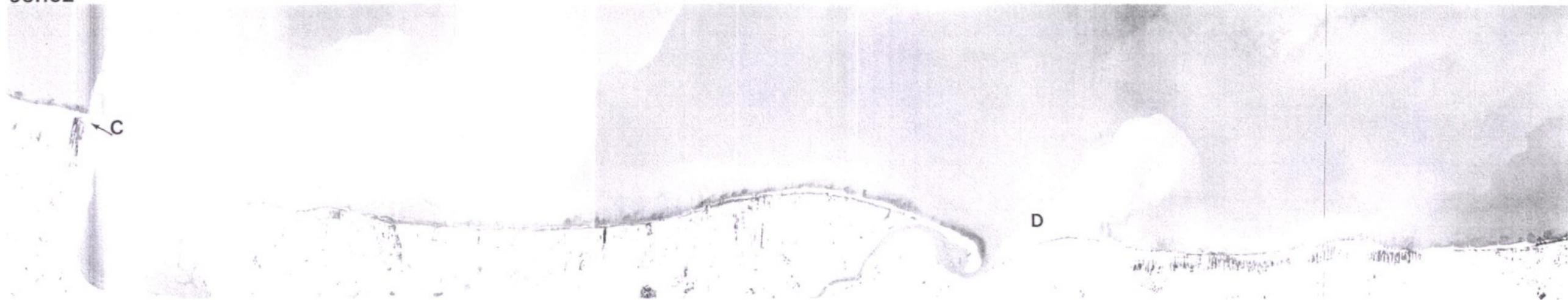
Embouchure de la TOUQUES.



18h04 BASSE MER.

SITUATION BASSE MER +3

08h52



08h25

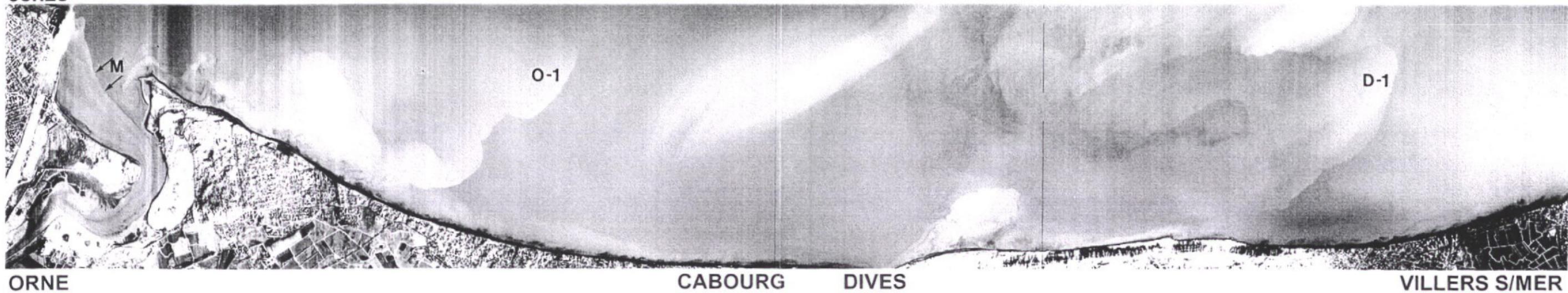
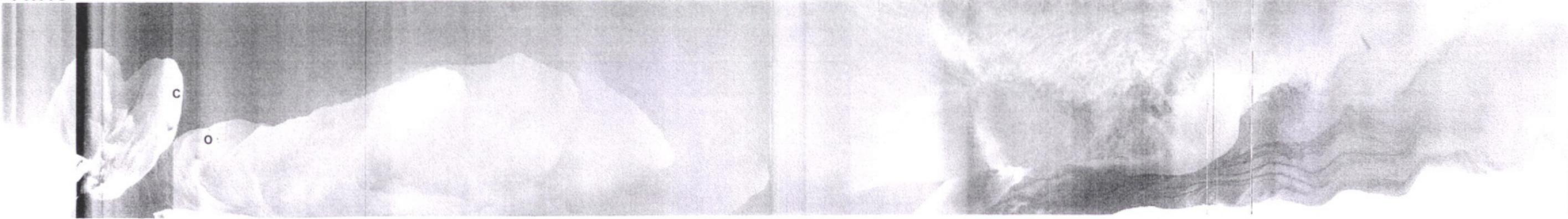


PLANCHE 2

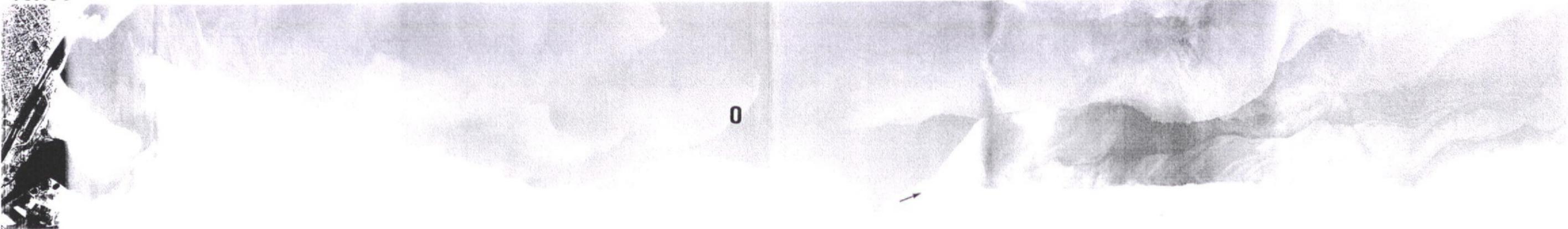
16/04/96

SITUATION PLEINE MER

11h18



10h56



ORNE

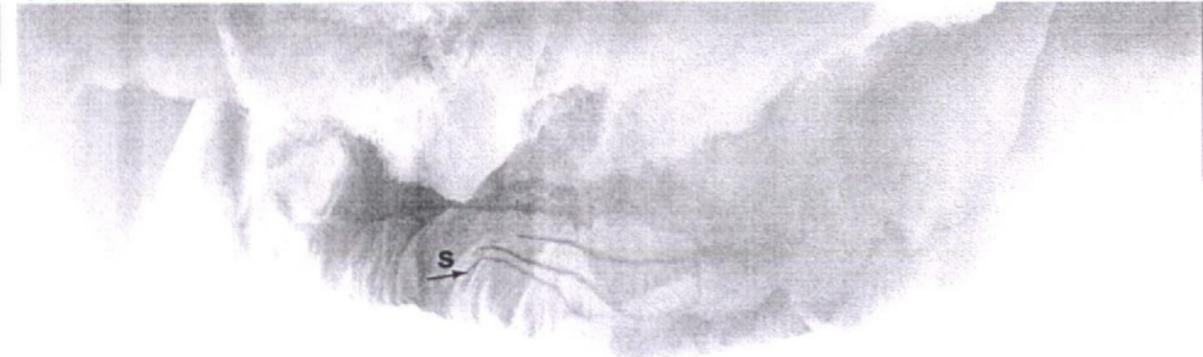
CABOURG DIVES

VILLERS S/MER

11h04

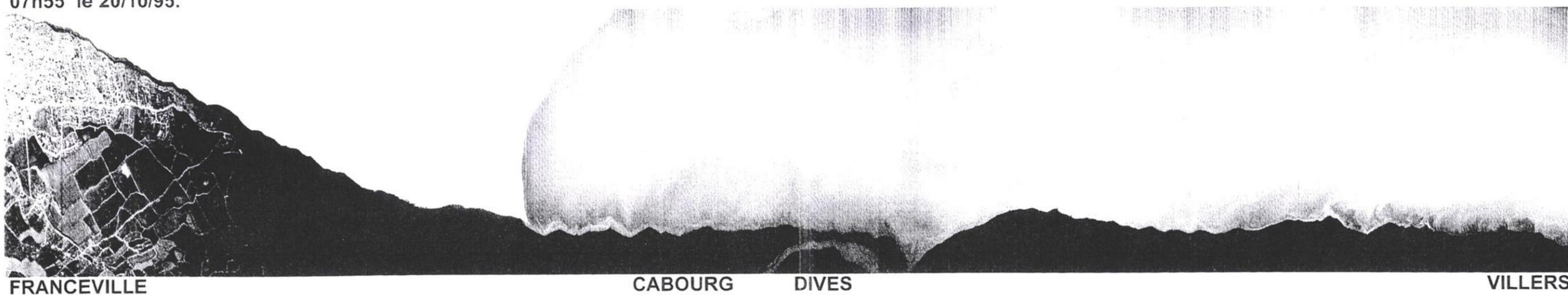


11h12



07h55 le 20/10/95.

SITUATION PLEINE MER.



FRANCEVILLE

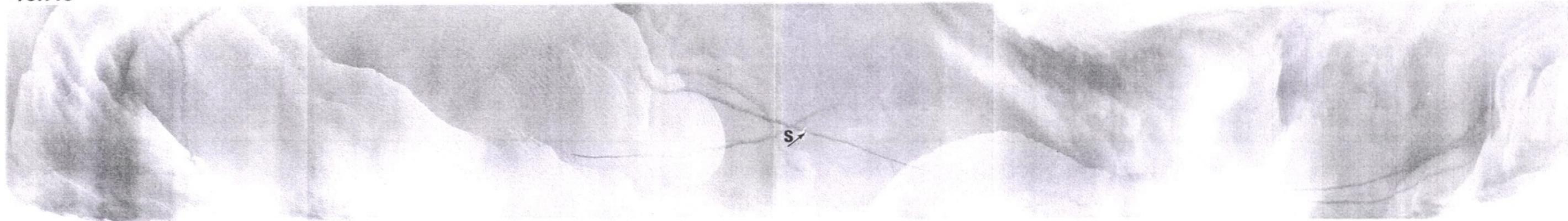
CABOURG

DIVES

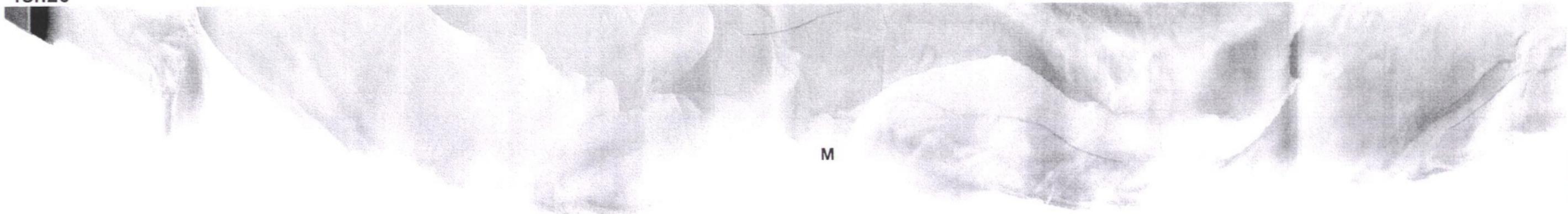
VILLERS

SITUATION PLEINE MER +3

13h45



13h20



ORNE

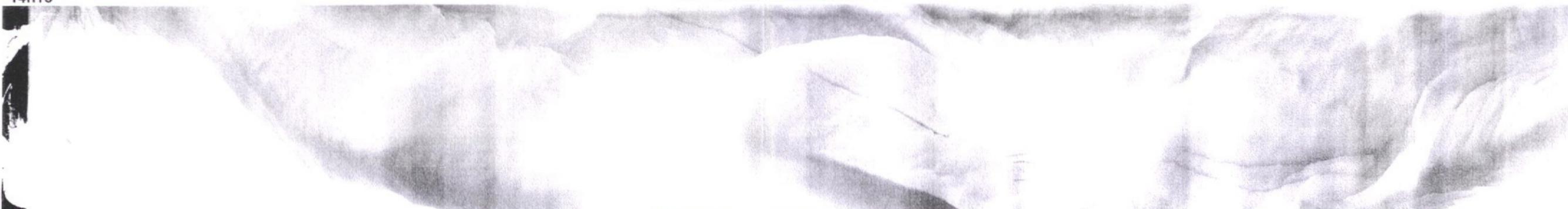
CABOURG DIVES

VILLERS S/MER

PLANCHE 5

14h15

SITUATION PLEINE MER +4



ORNE

CABOURG DIVES

VILLERS

15h14



M

ORNE

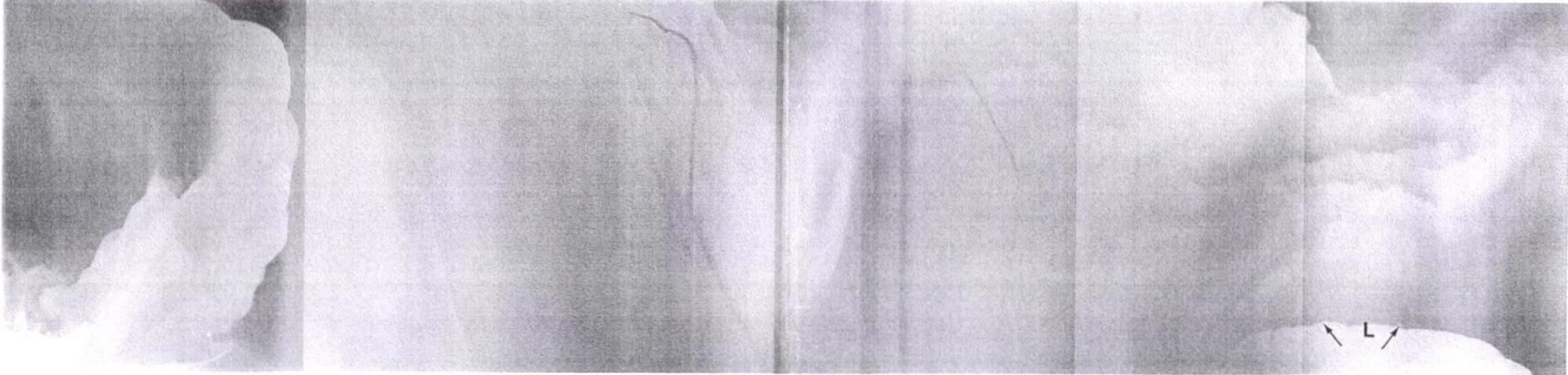
CABOURG DIVES

VILLERS

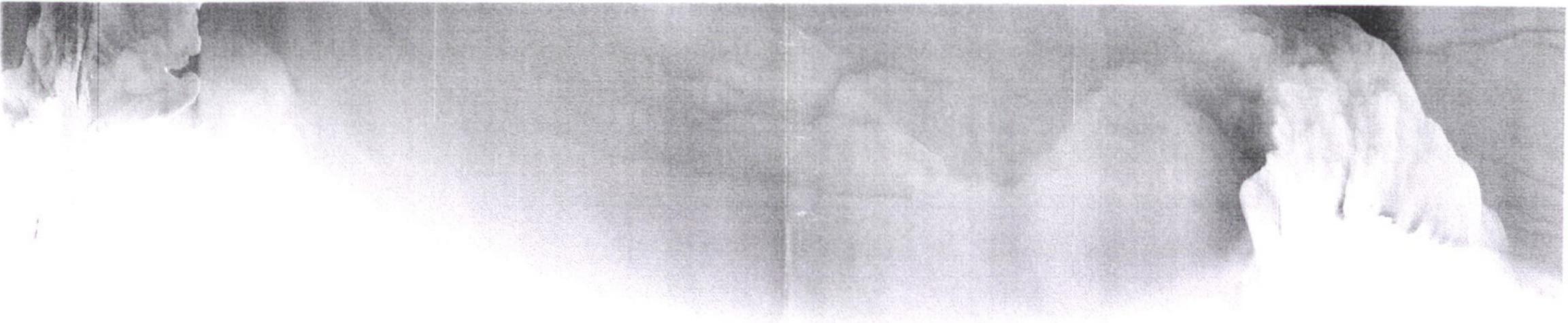
PLANCHE 6

SITUATION BASSE MER.

17h48



18h04



ORNE

CABOURG

DIVES

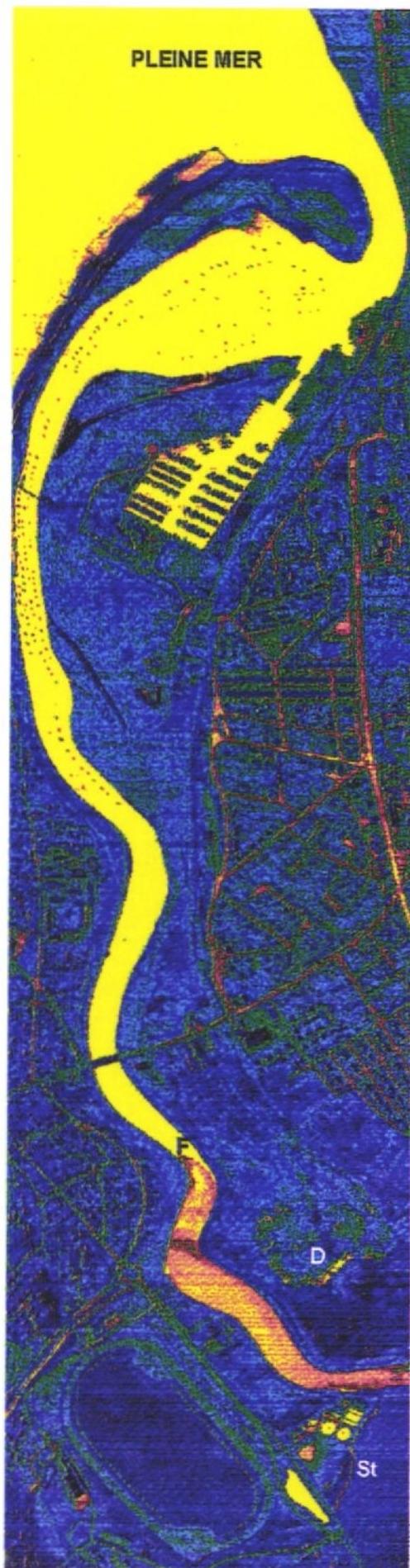


PLANCHE 8

ETUDE PAR THERMOGRAPHIE AERIENNE DU DEPLACEMENT COTIER DES EAUX
TERRIGENES AU LARGE DE CABOURG

SCHEMAS d'INTERPRETATION (5)



**AGENCE DE L'EAU
SEINE-NORMANDIE**



SCHEMA D'INTERPRETATION 1

SITUATION A BM+3 (08h30)



SCHEMA D'INTERPRETATION 2

SITUATION A PM (11h00)



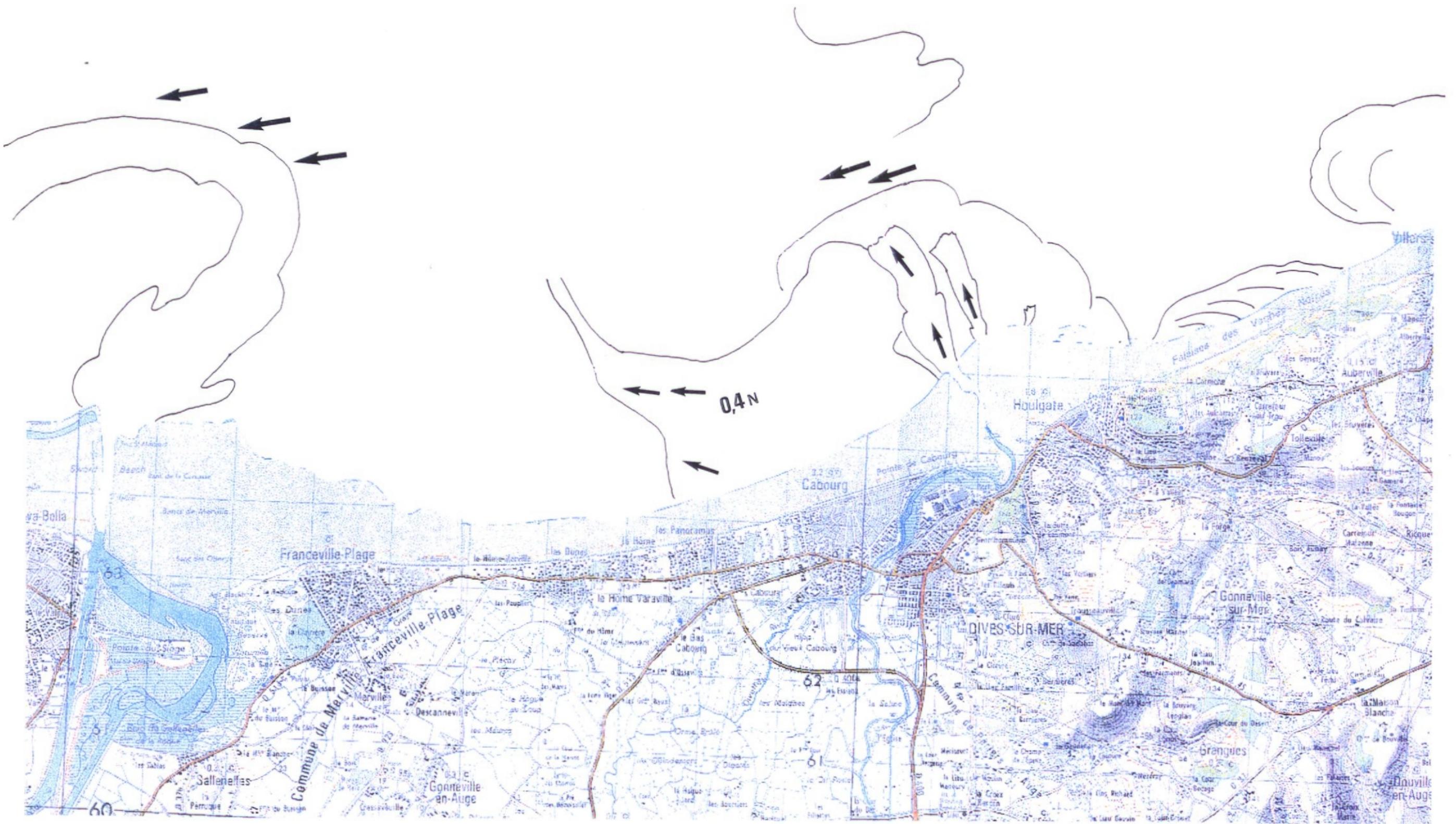
SCHEMA D'INTERPRETATION 3

SITUATION A PM+3 (14h00)



SCHEMA D'INTERPRETATION 4

SITUATION A PM+4 (15h00)



SCHEMA D'INTERPRETATION 5

SITUATION A BM (18h00)