

2

EVOLUTION SAISONNIERE DE LA  
SIGNATURE SPECTRALE D'UNE SEBKHA  
A PARTIR DE DONNEES LANDSAT

---

A. COMBEAU ET R. CHAUME

---

ATELIER DE TELEDETECTION de BONDY  
et PEDOLOGIE

MARS 1985

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote: *B\*21299* Ex: *unique*

Fonds Documentaire IRD



010021299

## EVOLUTION SAISONNIERE DE LA SIGNATURE SPECTRALE

### D'UNE SEBKHRA A PARTIR DE DONNEES LANDSAT

---

Ce rapport expose les résultats obtenus dans une étude multitemporelle d'une Sebkhra de Tunisie (la Sebkhra Er Riana, située à 8 km environ au nord de l'aéroport de Tunis, en bordure de mer . Cette sebkhra dont l'extension maximum couvre une trentaine de km<sup>2</sup> , a une forme allongée, le grand axe orienté N.O S.E s'étendant sur une dizaine de kilomètres (Fig.1) Quelques points cotés permettent de situer l'altitude du bord de la sebkhra à 3 mètres environ au-dessus du niveau de la mer . L'ensemble de la surface est occupé par l'eau en hiver, alors que, pendant l'été, toute cette eau disparaît et laisse place à un dépôt de sel .

Le site correspondant apparaît sur les images Landsat 206-034 . Nous disposons de 14 bandes magnétiques, correspondant à des dates d'observation comprises entre mai 1976 et septembre 1981, une quinzième bande remontait au 9.1.1972 . Il a semblé intéressant d'exploiter ces données pour étudier les modalités d'évolution de la signature spectrale d'un tel milieu, éminemment fluctuant au cours de l'année .

1 - Méthode de travail -

a/ Le site et les données -

Il s'agit d'étudier la variation saisonnière de la signature spectrale (luminance des 4 canaux MSS Landsat) de la sebkhra et de ses abords immédiats. La méthode utilisée consiste à définir un transect (orienté sensiblement N.O-S.E ) partant d'une zone exondée, traversant la zone de battement des eaux de la sebkhra, et atteignant le centre de la dépression ; on étudie ensuite les valeurs de luminance canal par canal et pixel par pixel . Le transect mesure 7 km, et comporte 100 pixels (Fig.1) . Ses deux extrémités sont positionnées avec une relative exactitude grâce à leurs coordonnées en lignes et colonnes, en s'appuyant sur 2 amers bien perceptibles : le fond de la baie de Gamart d'une part (généralement bien visible sur le canal 7), le croisement des pistes de l'aéroport d'El AOUINA d'autre part (généralement identifiable sans ambiguïté sur le canal 4) .

On dispose de 14 bandes CCT correspondant aux dates suivantes : 9.11.72, 19.5, 15.6 et 13.9.76, 26.1, 21.3 et 19.6.77, 29.778, 22.5, 27.6 et 2.8.80, 4.7.81, 14.9.81 . Cette répartition permet d'étudier les variations de superficie de la nappe d'eau libre selon les saisons, l'apparition et l'extension du dépôt superficiel des sels en été, les modalités de passage de la phase humide à la phase sèche, et réciproquement

Pour connaître les conditions particulières de chacune des dates étudiées, on peut se référer aux données pluviométriques de la station de Cherfech, situé à une quinzaine de kilomètres du transect, en direction de l'Ouest (données décadaires de 1972 à 1981), communiquées par le laboratoire d'agro-météorologie de P. FRANQUIN.

b/ Présentation des résultats -

Le choix d'un mode de présentation des résultats obtenus avec une telle méthode de travail pose quelques problèmes liés au nombre de données

à traiter : 1 transect de 100 points  $\times$  4 canaux  $\times$  14 dates = 5600 données brutes de luminances auxquelles il convient d'ajouter les valeurs des éventuels rapports inter-canaux . La représentation graphique des valeurs de luminance point par point tout au long du transect de 100 pixels, et ceci pour chaque canal, est évidemment la technique la meilleure, mais elle aboutit à tracer sur chaque graphique 15 courbes de 100 Points . Pour simplifier le tracé et la lecture de ces courbes dans le présent rapport, il a été décidé de calculer les moyennes des valeurs de luminance par segments de 10 pixels consécutifs ce qui aboutit à un lissage des courbes représentatives : la courbe transversale se ramène alors à une courbe tracée sur 10 points, chaque point traduisant la moyenne d'un segment de transect au sol de 700 mètres environ (voir Fig. 4 à 7) . Ce système présente toutefois l'inconvénient majeur d'atténuer les forts gradients de luminance lorsque des transitions interviennent sur une distance de quelques pixels, par exemple sur le canal 7 au contact zone-exondée - zone inondée, ou encore au passage sol-sel . Pour pallier cet inconvénient certaines représentations graphiques particulières seront donc tracées pixel par pixel sur une position de transect (voir Fig. 11 par exemple) afin de mettre en évidence des changements brusques de luminance .

Une difficulté d'un autre ordre affecte surtout l'interprétation des résultats : elle est associée à la variation de l'angle solaire au cours <sup>(de l'année)</sup> (Fig.2) La luminance varie sous l'effet conjugué de la réflectance du milieu et de l'angle d'éclairement . Il s'ensuit que les courbes de luminance obtenues à des dates différentes sur un même transect peuvent apparaître très dispersées en premier examen, sans que cette dispersion traduise nécessairement un changement des caractéristiques du milieu . Pour tenter de restreindre la part de variabilité des résultats imputable à la variation de l'angle solaire, on a déterminé les valeurs de cet angle aux diverses dates d'observation . Les données brutes de la luminance ont alors été corrigées en les multipliant par le facteur  $1 / \sin \alpha$  (tableau 1) . Les valeurs ainsi obtenues seront qualifiées dans le texte de "valeurs corrigées" de la luminance (Les dates d'observation sont désignées par un nombre de 3 chiffres : le premier est celui du mois d'observation, les 2 autres précisent l'année . Exemple : 177 correspond au 21 Janvier 1977 ) .

Tableau 1 - Valeurs de  $\alpha$  et  $1 / \sin \alpha$  aux diverses dates-(TUNIS, 9h30 GMT)

Date	$\alpha$	$1/\sin \alpha$	Date	$\alpha$	$1/\sin \alpha$
177	30°	1,96	679	76°	1,09
377	48°	1,35	781	67°	1,09
576	64°	1,12	780	64°	1,12
579	65°	1,11	778	63°	1,13
680	67°	1,09	879	62°	1,14
676	67°	1,09	976	49°	1,33
677	67°	1,09	981	49°	1,33
			1172	32°	1,90

La qualité des données étudiées s'est avérée bonne en règle générale . Seule la vue du 27.7.80 comporte quelques nuages, dont un à la verticale du secteur ouest de la Sebkhra . Dans ce cas particulier, on s'est borné à relever les données numériques d'un polygone dépourvu de nuages et d'ombres sur la zone centrale occupée à cette date par une croûte de sel .

Enfin, une seule des quinze bandes magnétiques étudiées provenait de l'USGS, et non de Téléspazio. Les résultats qu'elle a fourni seront traités séparément .

c/ Les conditions de la collecte de données -

En définitive, la comparaison systématique des résultats portera sur 13 dates d'observation distinctes . Ces dates, dont une majorité concerne les mois d'été, se répartissent sur plusieurs années, de 1976 à 1981 (sauf la bande USGS du 9.11.72) . Il pouvait donc être intéressant de comparer les conditions climatiques des années concernées : cette comparaison a été réalisée à partir des courbes cumulées des précipitations annuelles de la station de CHERFECH mise en parallèle avec la courbe des moyennes de la même station sur 70 ans (Fig; 3 et 4). Les traits principaux qui ressortent de l'examen de ces courbes peuvent être ainsi résumées :

- dans l'ensemble, la période d'étude est caractérisée par des précipitations supérieures à la moyenne . Une seule année se situe nettement au dessous de cette moyenne : 1981(pluies inférieures à la moyenne

de mars à mai, sécheresse d'été exceptionnelle du 15 mai au 15 octobre, faiblesse des pluies en automne) .

- le printemps de l'année 1977 a été moins arrosé que la moyenne, mais l'équilibre s'est rétabli vers le 15 avril
- l'année 1976 présentait également un léger déficit au printemps, compensé début juin; mais la seconde moitié de l'année a été fortement arrosée, et la durée de la période sèche d'été n'a pas excédé 2 mois . Il résulte de ce fait que les deux observations de septembre dont nous disposons (en 1976 et en 1981) correspondent à des situations très différentes, l'une (1981) de sécheresse extrême, l'autre (1976) d'humidité nettement plus forte que la moyenne .
- les années 1978, 1979 et 1980 sont proches de la moyenne, mais on observe toutefois une durée de sécheresse exceptionnellement longue en 1979 (du 1° Mai au 15 septembre) .

## 2 - Résultats -

### a/ Les transects établis à partir des moyennes de 10 pixels consécutifs-

Les figures 5 . représentent l'évolution des luminances corrigées tout au long du transect sur les 4 canaux Landsat . La partie gauche des graphiques correspond à l'extrémité ouest exondée du transect, la partie droite est proche de l'extrémité sud-est de la sebkhra . Le point le plus bas de cette sebkhra se situe approximativement entre les pixels 70 et 80 . Le secteur toujours exondé du transect est compris entre les pixels 1 et 20 .

#### Canal 4 -

α / à la base du graphique, un ensemble de 8 courbes bien groupées, rassemblent toutes les données comprises entre fin septembre et le 20-25 juin. La limite entre secteur exondé et inondé est toujours comprise entre les pixels 36 et 48. Les luminances de la zone exondée ne sont pas très différentes de celles de la zone inondée .

$\beta$  / un ensemble de 3 courbes : 679, 781 et 976, faisant la transition entre la période d'été et les périodes pluvieuses qui la précèdent ou qui la suivent . Ces courbes sont caractérisées par une augmentation sensible des luminances de la zone temporairement inondée de la sebkhra, dès le pixel 20 en juin-juillet, vers le pixel 35 en septembre . La limite du plan d'eau se situe entre les pixels 53 et 65, le centre de la sebkhra demeure inondé .

$\gamma$  / un ensemble de 3 courbes d'été (778, 879, 981) caractérisées par des valeurs très élevées de la luminance au centre de la sebkhra, alors que les valeurs de la zone exondée ne sont pas sensiblement modifiées . A ce groupe se rattache la luminance de la zone centrale de la sebkhra en juillet 80 . Dans tous les cas, le centre de la sebkhra est alors occupé par un dépôt de sel.

L'antagonisme des mesures de septembre 1976 et septembre 1981 prévisible à l'examen des courbes pluviométriques, est particulièrement net .

#### Canal 5 -

Les commentaires du canal 4 demeurent valables, à quelques remarques près :

$\alpha$  / le groupement des courbes en 3 familles reste le même . Toutefois, dans la seconde famille, la courbe de septembre 1976 tend à prendre une position intermédiaire entre les courbes d'hiver et du début de l'été (679 et 781)

$\beta$  / sur le centre de la sebkhra, la distinction entre les courbes du début de l'été et celles de la période sèche proprement dite, est plus accusée que sur le canal 4 .

#### Canal 6 -

Dans l'ensemble, le classement des valeurs est inchangé par rapport au canal 5 . Toutefois :

- α / sur les courbes d'hiver, apparait une différence appréciable entre zone exondée et zone inondée, cette dernière étant caractérisée par des luminances plus faibles -
- β / la courbe de septembre 1976 se distingue de moins en moins de l'ensemble des courbes d'hiver .
- γ / sur le centre de la sebkhra, la différence s'accuse très sensiblement entre les valeurs de plein été et celles du début de l'été, ces dernières se rapprochant des valeurs d'hiver .

Canal 7 -

L'évolution qui s'est manifestée du canal 4 au canal 6 se poursuit et s'accroît .

- α / la courbe de septembre 1976 ne se distingue pratiquement plus des courbes 679 et 781 .
- β / Ces deux dernières courbes se rapprochent très considérablement du groupe des courbes d'hiver pour ce qui concerne le centre de la sebkhra.
- γ / la différence exondé-inondé est très marquée.
- δ / les valeurs de novembre 1972 (bande USGS) sont nettement décalées vers le bas pour la première moitié (exondée) du transect .

L'ensemble de ces observations peut se résumer et s'interpréter comme suit :

. En hiver et au printemps , d'octobre au 20-25 juin, le plan d'eau de la sebkhra, initialement remplie, occupe une grande superficie . La luminance sur les canaux 4 et 5 ne permet pas de discriminer très nettement les secteurs inondés de ceux qui sont exondés . La discrimination est par contre possible sur le canal 6; et surtout sur le canal 7 (luminance corrigée toujours inférieure à 87) . Sur ce dernier canal, on observe même une décroissance régulière de la luminance depuis l'extrémité exondée du transect jusqu'au contact de l'eau. On peut penser que cette diminution exprime une humidité croissante du sol .Lors de la plus forte extension des eaux, la limite entre exondé et inondé se situe au pixel 37. Les eaux reculent ensuite progressivement jusqu'au pixel 48 .



. A partir du 20-25 juin, la situation évolue rapidement . Dans un premier temps, le niveau d'eau s'abaisse . La limite de la zone inondée recule (pixel 65 le 4.7.81) . La bordure exondée du plan d'eau voit sa luminance augmenter, fortement sur toutes les longueurs d'onde . Le maximum de réflectance est observé sur la zone exondée contigue à la limite inondé-exondé . On peut penser que cette situation traduit le dépôt de sels solubles cristallisés à la surface du sol . Le centre de la sebkhra est encore submergé .

Pour illustrer le début de cette phase cruciale, on a regroupé sur un même graphique en annexe (Fig I) les 4 courbes représentatives de la luminance aux quatre dates de juin dont nous disposons (12, 15, 19 et 27 juin) . Les courbes du 27.6.79 traduisent clairement le début du processus de salinisation de la rive du lac .

Dans un second temps, la sebkhra s'assèche totalement . La luminance de la partie centrale de la dépression est alors maximum sur les 4 canaux . Les bordures asséchées de la sebkhra subissent une évolution dans le même sens, à laquelle échappe seul le secteur totalement exondé des 20 à 30<sup>premiers</sup> pixels du transec

Pour illustrer l'ensemble de l'évolution de la luminance au cours de l'assèchement de la sebkhra, on a sélectionné sur un même graphique les courbes obtenues à trois dates d'une même année (1979) sur les quatre canaux : 22.5.79, 27.6.79, 2.8.79 (Fig II en annexe) .

En septembre, les pluies reprennent . Le fait de ne disposer à ce stade que d'une seule date d'observation (1976) limite la portée des interprétations, d'autant plus que cette année (1976) a vu une distribution très anormale des pluies (été court et arrosé, 26 mm d'eau dans la 1<sup>o</sup> décade de septembre). Toutefois, les résultats du 13.9.76 laissent supposer que la recharge de la sebkhra passe par un stade, sans doute fugace, de présence d'une mince couche d'eau sursaturée sur le dépôt de sel de l'été précédent . A ce stade, le canal 7 révèle la présence d'eau libre (à partir du pixel 53), mais la luminance enregistrée sur les canaux 4 et 5 se rapproche beaucoup des valeurs fournies par les dépôts salins . En outre, il apparaît que le maximum de luminance enregistré à cette date sur les canaux 4 et 5 se situe dans l'eau de la bordure de sebkhra, et non sur la rive encore exondée .

- Commentaires sur la correction d'angle solaire -

L'évolution résumée ci-dessus a été définie à partir des valeurs corrigées de la luminance . Il peut être intéressant de comparer les résultats à ceux fournis par les valeurs brutes . Cette comparaison est traduite sur les graphiques en annexe (Fig. III) pour les canaux 4 et 7 . L'intérêt de la correction d'angle solaire apparait nettement pour les dates les plus éloignées du solstice d'été : les courbes 177 et 377 se rapprochent alors du groupe des courbes d'hiver et de printemps, alors que, sur le canal 4, le sommet de la courbe 976 s'ajuste davantage au groupe des valeurs de début d'été . La courbe 981 s'apparente alors aux valeurs de plein été . On observe également, sur le canal 7, l'identité des courbes 879 et 981, obtenues toutes deux après une longue période de sécheresse . Ces diverses remarques semblent justifier la correction apportée aux valeurs brutes par le coefficient d'ajustement  $1 / \sin \alpha$  .

b/ Les transects pixel par pixel -

Il serait difficile d'étudier point par point les 14 x 4 transects observés , mais il peut être intéressant de se pencher sur quelques problèmes particuliers .

α / La limite exondé-inondé -

La détermination aussi exacte que possible de la limite des eaux est indispensable pour calculer les superficies inondées . Comme on pourrait le prévoir, et conformément aux remarques faites plus haut, c'est le canal 7 qui permet la meilleure discrimination . Toutefois, le problème n'est pas dénué de difficultés : le passage des luminances élevées du sol à la luminance faible des eaux s'opère sur plusieurs pixels (couramment de 10 à 15 pixels, soit sur une distance de 700 mètres environ).

Le passage de la zone exondée au plan d'eau devrait en principe se traduire par une chute rapide de la luminance sur le canal 7 (Fig. 6) : Mais plusieurs paramètres interviennent pour moduler ce schéma :

a/ effet de bordure (fig 6 b) consécutif au positionnement du pixel par rapport à la frontière zone exondée-plan d'eau (Cet effet, lié directement à la résolution spatiale, ne doit affecter qu'un anneau de  $\pm 1$  pixel) .

b/ effet de fond, du à la perception du fond de la sebkhra à travers une mince lame d'eau (fig 6 c). Cet effet, lié à l'épaisseur de la lame d'eau et à la transparence de celle-ci, n'est probablement pas négligeable dans une sebkhra dont la profondeur est toujours faible.

c/ effet humidité du sol (fig 6 d), lié à un accroissement relatif du taux d'humidité du sol au voisinage du plan d'eau du fait de l'existence d'une frange capillaire .

d/ effet turbidité de l'eau (après une crue ou du fait du vent), qui se traduit sur le canal 7 ( à un moindre degré que sur les canaux 4 et 5) par une luminance croissante des eaux avec la charge solide (fig. 6 e) . L'interférence de ces divers facteurs explique la relative progressivité du passage des luminances élevées de la zone exondée aux luminances plus faibles du plan d'eau (fig 6 f) : Il en résulte une certaine imprécision dans la détermination exacte de la frontière, donc dans l'évaluation de la surface du plan d'eau . Il conviendrait d'étudier plus particulièrement l'effet de fond, ce qui revient à préciser l'épaisseur de la lame d'eau au delà de laquelle le fond du lac n'influence plus la signature spectrale de l'eau . Il conviendrait également d'évaluer l'effet humidité du sol, afin de préciser la largeur de la bande de plage affectée par les remontées capillaires .

Une indication nous est fournie sur ce point par l'étude des transects de luminance du canal 7: on observe en effet une diminution systématique de cette luminance lorsqu'on passe de premier groupe de 10 pixels au second (dans la zone toujours exondée) puis aux suivants, lorsqu'on écarte les mesures d'été, aux périodes caractérisées par un accroissement de salinité. Cette évolution pourrait être imputée à une humidité croissante du sol, car il ne semble pas que le facteur végétation joue un rôle important aux abords immédiats du plan d'eau .

La détermination la plus simple de la frontière consiste en un pointage au curseur sur l'image colorée du canal 7. Ce pointage est précis à  $\pm 1$  pixel près, mais s'il permet de se situer assez correctement sur le plan géographique, il laisse une marge d'indétermination appréciable quant à la luminance limite exacte.

Une technique plus complexe peut être appliquée: elle consiste à tracer les isolignes de luminance du canal 7 en partant d'une valeur initiale notoirement trop élevée, puis en abaissant progressivement cette valeur, selon un pas à déterminer (de 1 à 5). Chaque isoligne définit un contour fermé dont on détermine la superficie intérieure par simple comptage des pixels. L'expérience montre que la superficie mesurée diminue rapidement tant que l'eau n'est pas atteinte (Fig. 3). Elle évolue ensuite beaucoup plus lentement au voisinage de la frontière recherchée, puis s'abaisse de nouveau plus rapidement lorsque les isolignes sont à l'évidence comprises à l'intérieur de la zone inondée. Il semble que ce pseudo-palier dans la relation Superficie / Luminance corresponde à la traversée de la frontière: on observe qu'il ne s'étale guère que sur une largeur de 2 à 4 pixels, alors que la luminance subit une décroissance rapide. Cette remarque laisse supposer que les paramètres effet de fond et humidité du sol jouent un rôle moins important que l'effet de bordure proprement dit (pixels mixtes). Elle met aussi en évidence l'intérêt d'une amélioration de la résolution spatiale.

### B / Les variations de la superficie en eau -

On a donc tenté de préciser la superficie en eau aux diverses dates d'observation. Les résultats figurent sur le tableau 2.

Ce résultat peut se traduire sous forme du graphique de l'évolution de superficie en eau en fonction de la saison (Fig. 4). La détermination de la limite zone exondée-plan d'eau ne peut être qu'approximative, et la mesure de surface de la zone inondée est entachée d'une certaine erreur. A titre indicatif, si le périmètre du plan d'eau aux hautes eaux (Mai 1976 par exemple) est de l'ordre de 20 km, une erreur de  $\pm 1$  pixel sur la détermination de la bordure entraîne une erreur d'appréciation de la superficie de  $\pm 300$  pixels environ, soit  $\pm 7,5$  %. En période de basses eaux (septembre 76 par exemple)

le périmètre du lac est de l'ordre de 10 km, et l'erreur de  $\pm 1$  pixel se traduit par une appréciation à  $\pm 150$  pixels près, soit  $\pm 9\%$ . Lorsque l'assèchement est presque total (juillet 81 par exemple), l'erreur d'appréciation devient sans doute plus élevée.

Tableau 2 - Evolution de la surface en eau -

Date	Luminance limite	N° d'ordre du pixel limite	Surface en nb. de pixel	Observations
177	26	36 - 37	5502	
377	42	36 - 37	4648	
576	35	42	4040	
579	40	47 - 48	2834	
680	42	48	2564	
676	41	44 - 45	3829	
677	35	47	3491	
679	87	55 - 56	1506	
781	71	64 - 65	1240	
780			0	!Pas d'eau libre!
778			0	
879			0	
976	37	53 - 54	1650	
981			0	!Pas d'eau libre!
1172	8	53	1850	

Le graphique <sup>8</sup> fait bien ressortir la rapidité de l'assèchement en début d'été. Il met en évidence des variations sensibles d'une année sur l'autre, essentiellement liées aux conditions climatiques qui ont précédé. C'est ainsi que les conditions qui ont régné avant les observations 377, 679, 781 et 1182 étaient plus sèches que la moyenne, alors que la mesure 976 est dans une <sup>8</sup> situation inverse. C'est en fonction de cette remarque qu'a été esquissée, la courbe d'évolution approximative représentée sur la figure <sup>8</sup>.

Les données du tableau 2 permettent également de tracer la figure <sup>9</sup>, qui représente la superficie en eau en fonction du numéro d'ordre sur le transect du pixel limite exondé-inondé.

On vérifie bien l'existence de la relation entre les deux données

mais celle-ci ne semble pas rectilinéaire .Un décrochement se manifeste au passage des pixels 47-48 où l'on peut observer une réduction rapide de superficie de l'ordre de 1/3, ce qui laisse supposer l'existence dans cette partie de la sebkhra, d'une accentuation locale sensible de la pente, sans équivalent sur la rive Est . La carte des extensions successives du plan d'eau vient à l'appui de cette hypothèse (Fig.10)

On notera à ce sujet que l'extension du lac en janvier 1977 semble proche du maximum, si l'on en juge par la submersion de l'extrémité Est de la sebkhra en direction de la Marsa . Les limites du plan d'eau sont alors assez floues . On peut également observer que les données d'évaporation d'une surface d'eau libre à Tunis pour l'ensemble des mois d'Avril, Mai et Juin s'élèvent à 650 mm en moyenne . Il serait intéressant de vérifier si cette valeur est compatible avec la profondeur de la sebkhra .

#### Ø / Comparaison des phases d'assèchement et de remplissage -

Cette question a déjà été évoquée lors de la synthèse des observations concernant l'évolution des 4 canaux au début de l'été . Mais il est intéressant de préciser le phénomène à l'échelle du pixel (et non des moyennes de 10 pixels) . Les figures 11 représente, pixel par pixel, le passage de la périphérie de la sebkhra à la zone centrale pendant les 2 périodes de transition : fin juin début juillet d'une part, septembre d'autre part . Les données sont des luminances corrigées aux dates de 27.6.79, 4.7.81 et 13.9.76 . A ces dates, le centre de la sebkhra comporte une zone inondée de faible superficie.

Fin juin-début juillet, l'assèchement n'est pas encore achevé . Sur le canal 4, lorsqu'on se rapproche du plan d'eau (entre les pixels 30 et 55), on constate une très forte augmentation de luminance, suivie d'une diminution . On observe que la frontière du plan d'eau se situe soit au maximum de la courbe (679) soit dans sa branche descendante (781) . Le canal 5 se comporte comme le canal 4 . Dans le cas du canal 6, le maximum des 2 courbes est assimilable à un palier et la chute de luminance vers le centre de la dépression est plus accusée .

Sur le canal 7 enfin, l'ampleur de l'augmentation est plus limitée et le palier plus marqué .

En septembre par contre, la courbe a une allure différente . Sur le canal 4, l'accroissement des luminances amorcé sur la berge se poursuit dans la partie inondée sur les 6 à 7 premiers pixels du plan d'eau, avant d'atteindre un palier . Le phénomène est beaucoup moins sensible sur le canal 5, et il disparaît sur les canaux 6 et 7 . Ce comportement laisse supposer l'existence de 2 situations bien différentes lors des phases de remplissage et d'assèchement, avec, en phase de remplissage persistance du sel sous une mince bande d'eau en état de sursaturation, sur le bord de la sebkhra au moins pendant une courte période . Il faut se souvenir toutefois que l'année 1976 a été caractérisée par des pluies supérieures à la moyenne, un début d'été tardif, une période sèche plus courte que la moyenne, et des pluies appréciables en début d'automne (Aout 0 mm, 1<sup>o</sup> décade de septembre 26 mm, 12.9.76 1 mm) . Elle n'est donc pas nécessairement représentative d'une situation "normale" . En phase d'assèchement, au contraire, il semble que la zone la plus salée soit située au contact ou à proximité, de la frontière inondé-exondé . Cette situation, sans doute très fugace, mériterait d'être contrôlée au sol .

c / Les rapports inter-canaux -

Pour compléter les données précédentes et pallier le caractère aléatoire de la correction approximative de l'angle solaire, il était intéressant d'étudier l'évolution de certains rapports inter-canaux .

☞ / Rapport Canal 7 / Canal 5 - Bien que l'utilisation de ce rapport soit traditionnellement attachée à l'étude de la végétation, paramètre très secondaire dans le cas présent, on a calculé sa valeur pour en préciser l'évolution dans le temps et dans l'espace .

Le rapport 7/5, établi à partir des moyennes de 10 mixels, évolue de façon caractéristique (figure 1<sup>o</sup>) : sa valeur est maximum sur les terres exondées (moyennes comprises entre 0,81 et 1,06 dans la plupart des cas), et elle diminue régulièrement lorsqu'on se rapproche de la

zone inondée (0,65 à 0,89) . La diminution devient brutale lorsqu'on arrive au plan d'eau (0,13 à 0,39) et demeure ensuite pratiquement constante . Mais lorsque le centre de la dépression est occupé par un dépôt de sel, la valeur du rapport se stabilise à une valeur constante comprise entre 0,65 et 0,79 . Ce rapport 7/5 est donc un bon discriminant des trois zones étudiées : exondé, sel, eau . On remarque en outre en tête du transect, 5 valeurs légèrement plus élevées que les autres (de 1,10 à 1,30) . Elles caractérisent toutes le milieu constamment exondé, et ce en hiver ou au printemps (janvier, mars , mai) . On peut avancer l'hypothèse que ces valeurs traduisent l'existence d'une végétation probablement très clairsemée à cette époque sur le pourtour de la sebkhra .

L'étude pixel par pixel confirme que le passage de la frontière entre exondé et plan d'eau se traduit par une chute brutale du rapport 7/5, sur une distance de l'ordre de 4 à 5 pixels .

On observe en outre une remarquable constance dans le temps de la valeur du rapport 7/5 à la limite de la zone d'inondation maximum (0,75 à 0,90 - Pixels 23 à 27) .

β / Le rapport Canal 7 / Canal 4 - (Figure 19) - Son évolution est très comparable à celle du rapport 7/5, mais on relève toutefois quelques différences :

- . les valeurs du rapport 7/4 sont nettement plus élevées que celles de 7/5 en milieu exondé (1,25 à 1,95 en tête de transect, 0,88 à 1,15 au voisinage du plan d'eau) et en milieu salé (0,76 à 1,16). Elles sont par contre peu différentes sur le plan d'eau . Le gradient du rapport le long du transect est donc nettement plus élevé. Cette remarque montre l'intérêt du rapport 7/4 pendant les périodes d'évolution rapide de la luminance (voir figure ~~19~~<sup>IV</sup> en annexe) .
- . La fourchette des variations dans le temps est toujours plus large que celle de 7/5 en milieu exondé et en milieu salé .

γ / Le rapport Canal 7 / Canal 6 - L'allure générale de la variation ne change pas . Le rapport 7/6 est maximum en zone exondée (0,75 à 1,06) Il diminue lentement jusqu'au contact du plan d'eau puis s'abaisse



rapidement pour se stabiliser dans la zone inondée (entre 0,25 et 0,6 selon les dates . Le plus souvent, entre 0,42 et 0,50) . Lorsque la sebkhra est occupée par un dépôt de sel, le rapport 7/6 est relativement stable (entre 0,65 et 0,90) .

De l'étude de ces 3 rapports dans lesquels le canal 7 intervient au numérateur, on retiendra une similitude d'évolution qui souligne l'importance de l'infra-rouge dans la caractérisation de ces milieux, mais aussi les différences dans le pouvoir de discrimination (maximum pour 7/5, minimum pour 7/6) et dans les gradients d'évolution (maximum pour 7/4) .

6 / Le rapport Canal 5 / Canal 4 - L'évolution de ce rapport le long du transect demeure du même type que celles des rapports précédents : valeurs généralement élevées en zone exondée (1,30 à 1,65), diminution progressive vers le plan d'eau (1,00 à 1,30). Mais quelques observations s'imposent .

- . les valeurs obtenues sur le plan d'eau et sur le dépôt de sel ne sont pas nettement distinctes
- . On remarque une série de valeurs particulièrement élevées pour le dépôt de sel en septembre 1981 (1,45 à 1,60) . Rappelons que l'année 1981 a été caractérisée par une sécheresse d'été exceptionnelle du 15 Mai au 15 Octobre . On pourrait émettre l'hypothèse que le dépôt de sel avait acquis dans ces conditions certains caractères particuliers exerçant une influence sur la luminance du canal 5 dans le sens d'une diminution (dépôt de limons éoliens ?) .
- . On remarque également des valeurs anormalement faibles du rapport 5 en tête de transect en janvier 77 et en mai 76 . Ces valeurs résultent de la faiblesse des luminances sur le canal 5, et pourraient être liées à l'existence d'une certaine végétation, ce qui viendrait à l'appui de l'hypothèse formulée à partir de l'observation des données de 7/5 .

d / Les histogrammes croisés -

Il est apparu que la meilleure illustration de l'évolution saisonnière du milieu étudié consistait en une représentation inspirant des histogrammes croisés . On a utilisé dans ce but les luminances corrigées des canaux 5 et 7 (moyennes de 10 pixels) . La figure <sup>13</sup> a été établie selon ce principe. (Les 2 derniers segments de 10 pixels du transect, redondants sur les précédents n'ont pas été figurés, de manière à alléger la représentation graphique . Chaque courbe est donc constituée de 8 points, la tête de transect étant figurée par un triangle , la fin de transect, au centre de la dépression par un cercle) .

Cette représentation schématise bien l'ensemble du phénomène :

- . évolution relativement limitée dans le temps de la tête du transect jamais inondée (2 premiers segments), toujours à proximité immédiate de la bissectrice du premier quadrant des canaux 5 et 7
- . évolution légèrement plus accusée du 3<sup>e</sup> segment du transect, susceptible d'être atteint par les plus hautes eaux, mais non inondé lors des dates d'observation disponibles
- . évolution nettement plus marquée du 4<sup>e</sup> segment, en particulier de fin mai à la fin juillet .
- . évolution très considérable et très rapide du centre de la dépression, dont le point représentatif décrit, en l'intervalle de 2 mois lors du passage de l'eau au sel, avec un arc de cercle de 140° environ.
- . différence de comportement évidente des situations de septembre 1976 et de septembre 1981, liée à des conditions météorologiques très éloignées l'une de l'autre .

Ces observations se résument en un schéma simple (figure <sup>14</sup>) représentant la migration des valeurs moyennes de chaque segment de transect pendant la période critique de l'été, c'est à dire de fin mai à fin juillet . On note:

- . l'amplitude croissante de la migration de la tête vers la fin de transect
- . le parallélisme relatif des itinéraires respectifs
- . le décalage progressif de ces itinéraires de la droite vers la gauche

e / La localisation des zones de concentration saline -

L'un des résultats obtenus jusqu'à présent est la mise en évidence en été d'un accroissement des valeurs de la luminance sur le pourtour de la sebkhra au fur et à mesure de l'abaissement du plan d'eau . Cet accroissement a été considéré comme lié au dépôt progressif des sels sur le pourtour du plan d'eau . On pourrait donc s'attendre à observer ce phénomène sur un anneau de largeur croissante ceinturant la sebkhra . Il semble que les choses soient moins simples, et qu'il existe pendant la période critique de l'assèchement en juin-juillet, des zones de concentration préférentielle : les images obtenues sur le canal 7 leq 27.6.79 et 4.7.81 , montrent en effet que, dans des conditions de situations comparables, et donc pour des superficies du plan d'eau peu différentes, la zone de salure maximum n'affecte qu'une partie du périmètre de la sebkhra, sous la forme d'un croissant dans la moitié Ouest en juin 1979, et sous la forme d'une bande limitée à la rive sud en juin 1979 (figure <sup>15</sup> 15) . L'interprétation de cette différence de comportement d'une année sur l'autre n'est pas évidente : on pourrait penser à un effet de l'orientation des vents dominants, et à un enrichissement par des embruns rappelant le phénomène de formation des sols de lunettes, mais cela reste à démontrer . Une autre hypothèse \* pourrait être un recouvrement partiel du sel par des limons soufflés par le vent, dans le cas du 27.6.79, à partir des parcelles cultivées de la bordure Ouest de la sebkhra .

On observe par ailleurs que, à des stades de dessèchement cependant comparables, le périmètre inondé n'occupe pas toujours exactement le même emplacement : du 27.6.79 au 4.7.81, on constate l'existence d'un décalage perceptible en direction du sud-est, ce qui laisserait supposer un remblaiement possible du secteur nord-ouest (par des apports éoliens?).

\* BONVALOT, comm. pers.

Conclusion -

Cette étude consacrée à l'évolution saisonnière de la signature spectrale d'un milieu très typé d'Afrique du Nord a fourni des résultats assez nombreux dont la synthèse se traduit sous la forme graphique des figures ~~10~~<sup>13</sup> et ~~11~~<sup>14</sup>. Les phases successives d'assèchement et de remplissage de la sebkhra et leurs incidences sur l'état de la surface des abords du plan d'eau sont perceptibles par la télédétection. Les modalités du phénomène ont pu être quelque peu précisées en dépit du fait que les données disponibles étaient réparties sur plusieurs années. On imagine facilement l'amélioration que devraient apporter à des observations de ce genre le gain de résolution spatiale et la répétitivité accrue du futur satellite SPOT. Il conviendrait de se pencher sur les phénomènes associés aux variations de salinité des sols dans des milieux moins contrastés que celui étudié ici.

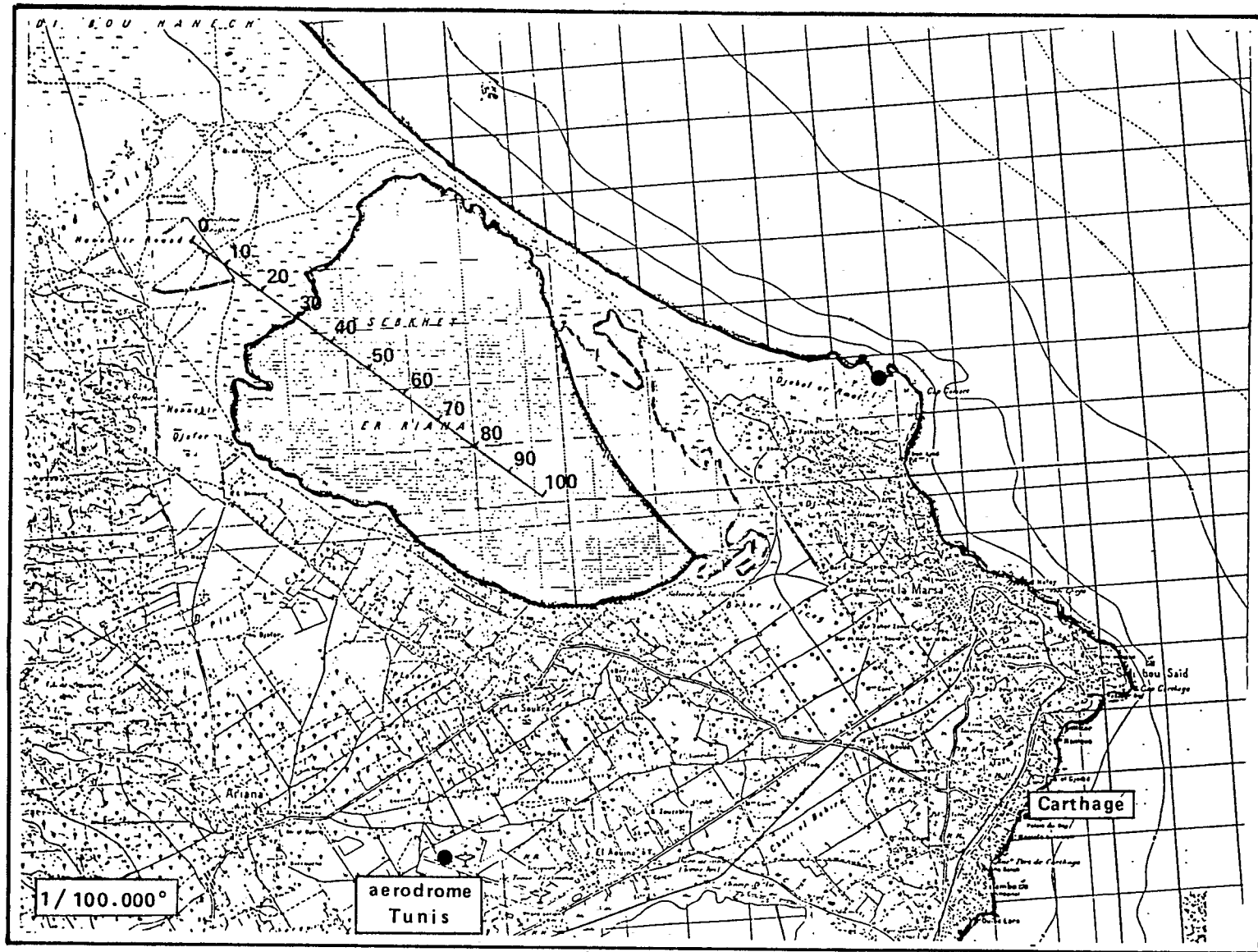


Figure 1 - Plan de situation

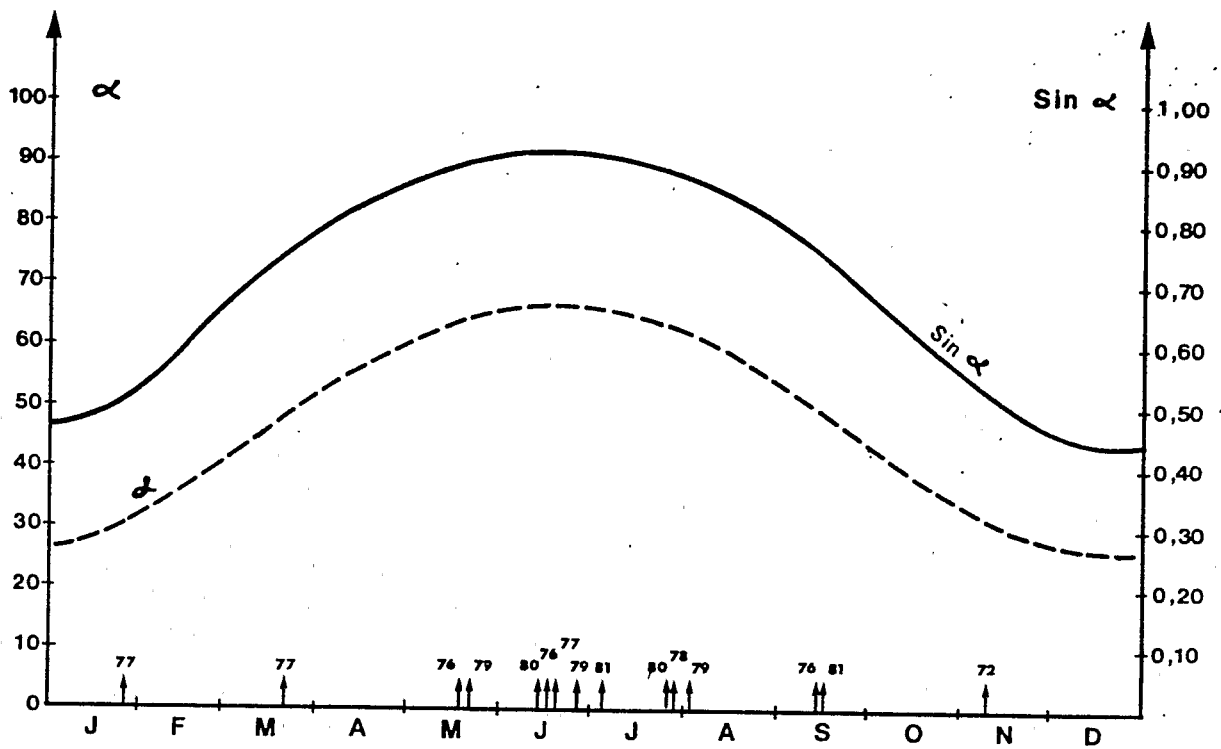


Figure 2 - Angle solaire et calendrier des données

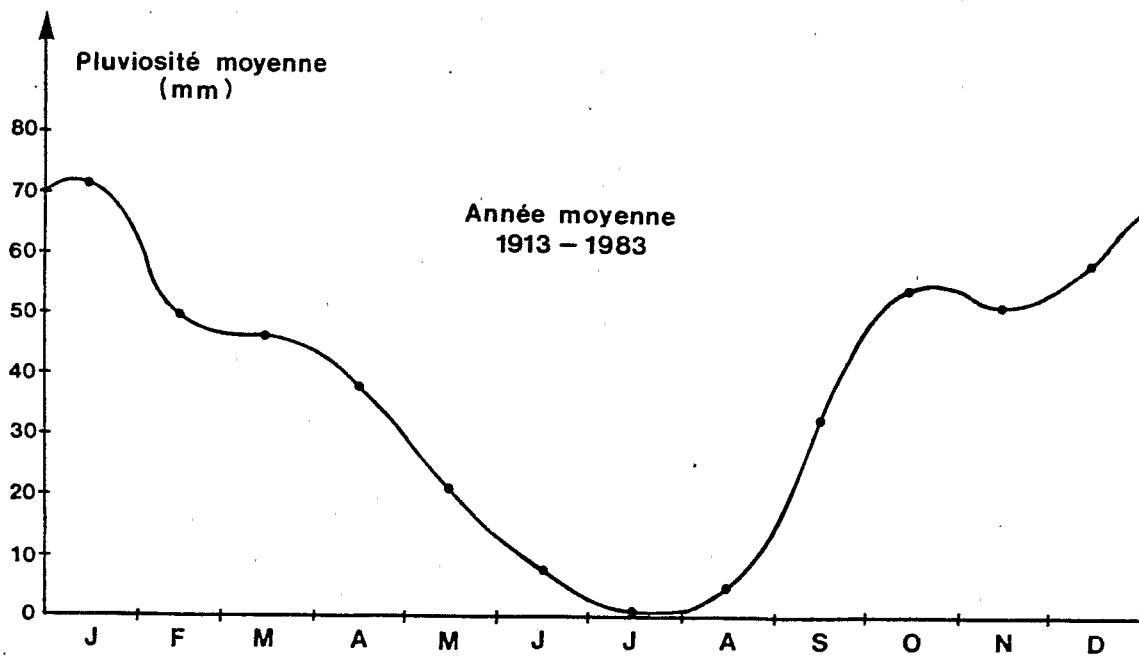


Figure 3 - Répartition des pluies (Station de CHERFECH) -

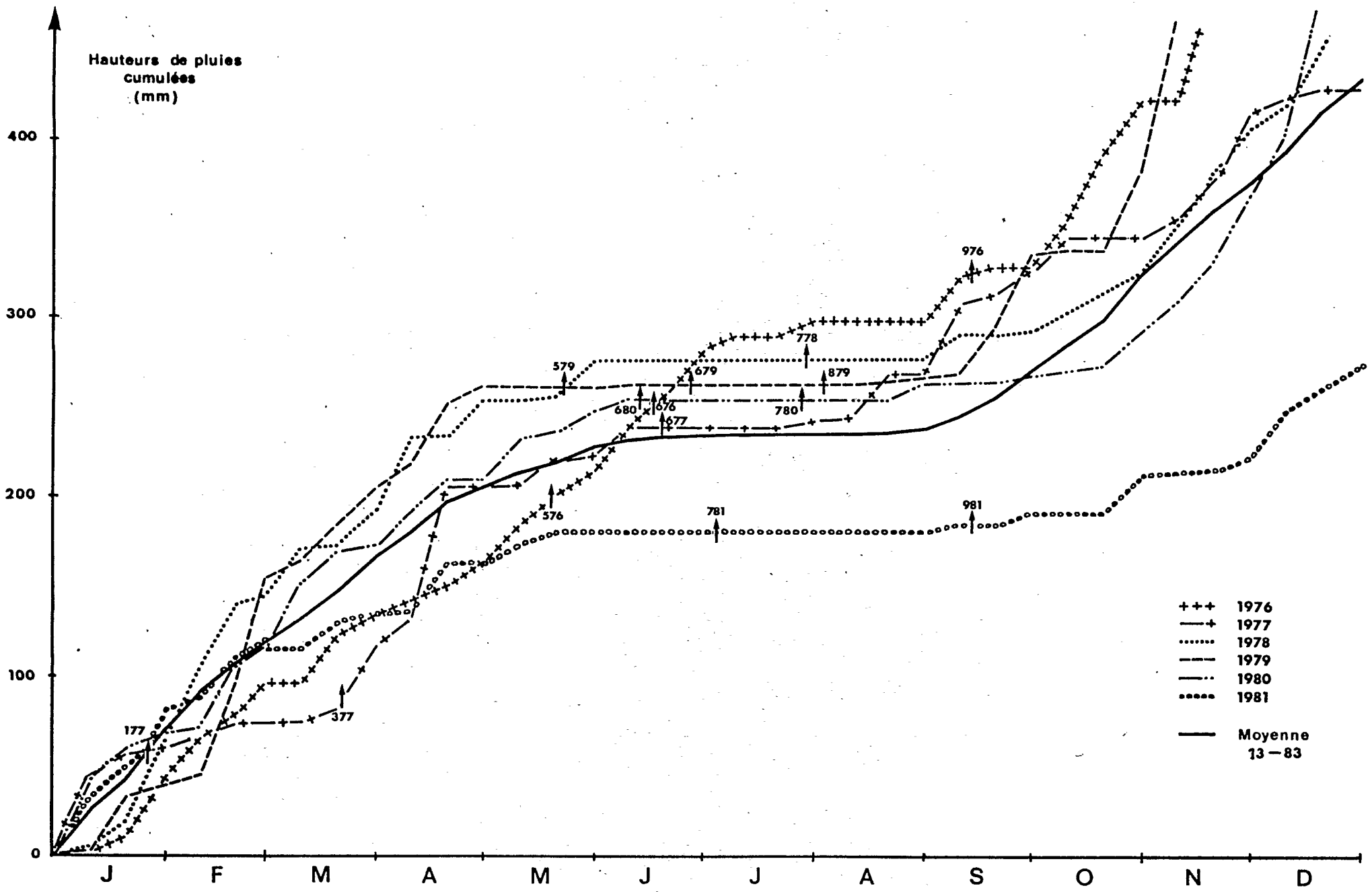


Figure 4- Courbes cumuléés des précipitations de 1976 à 1981 (station de CHERFECH)

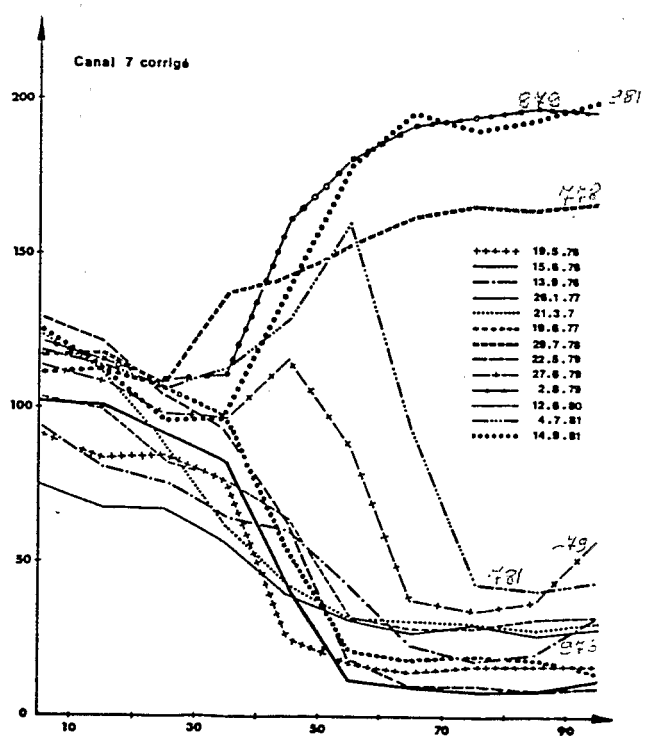
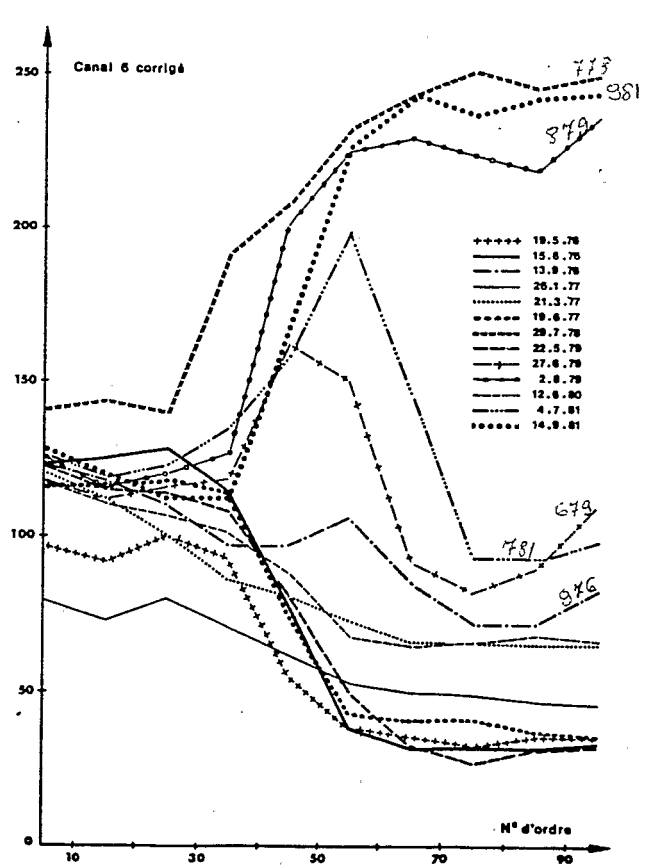
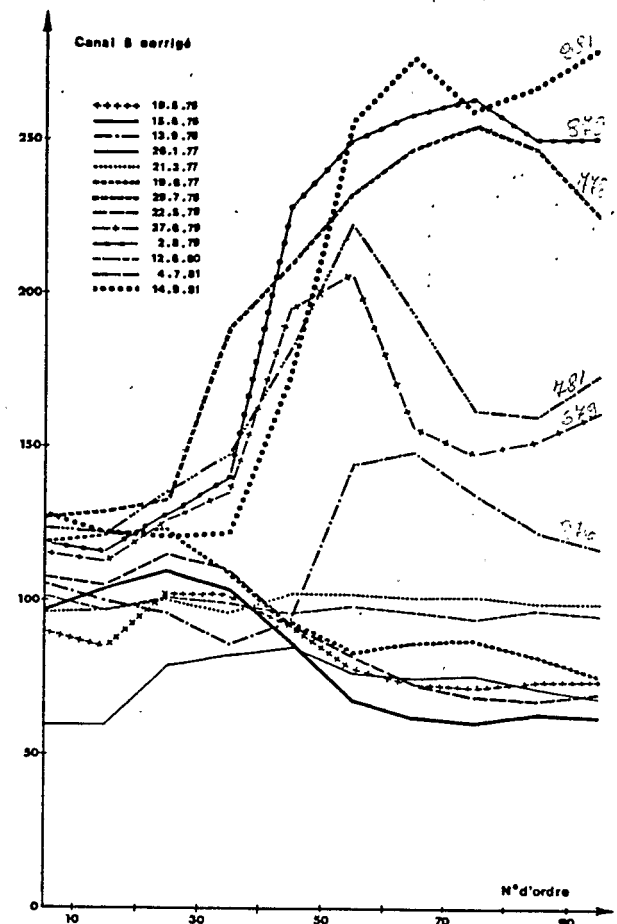
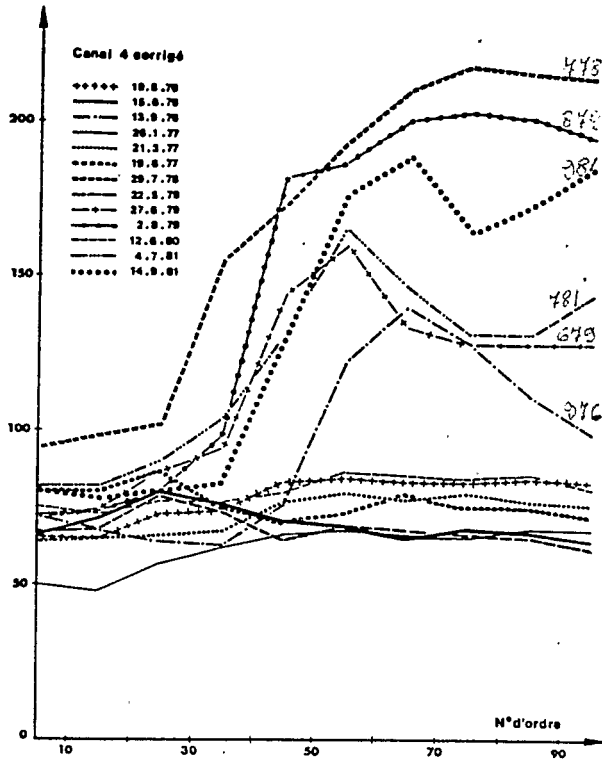
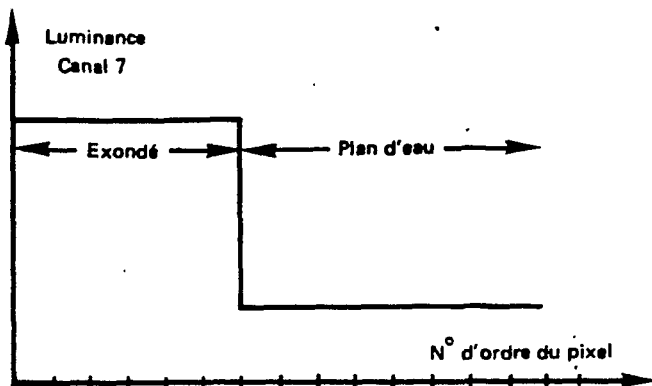
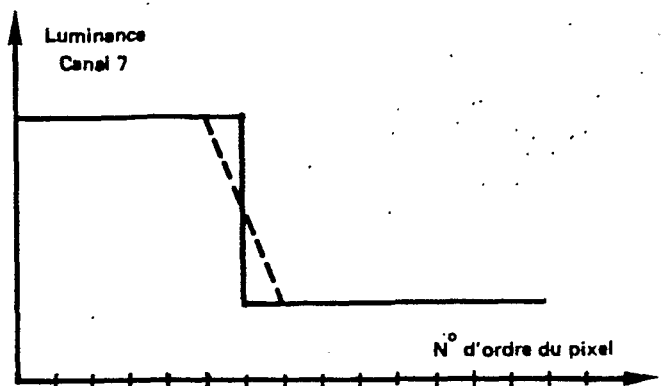


Figure 5 - Variations des luminances corrigées le long du transect -  
(Moyennes par segments de 10 pixels)

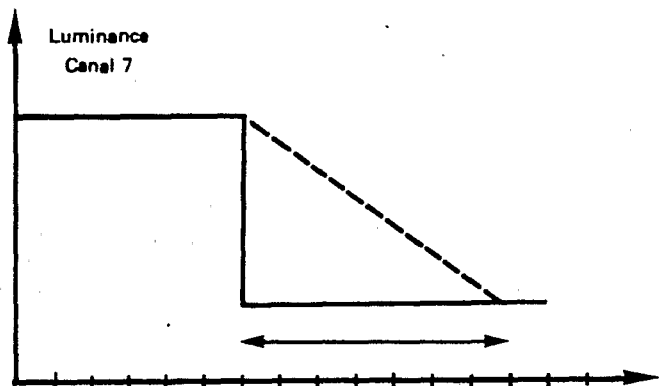




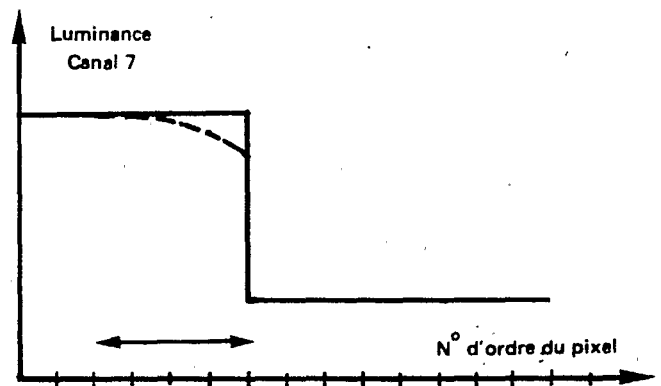
a/ Frontière théorique zone exondée - plan d'eau -



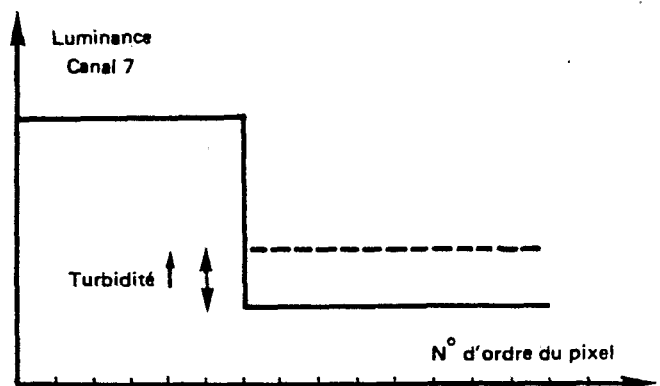
b/ Effet de bordure



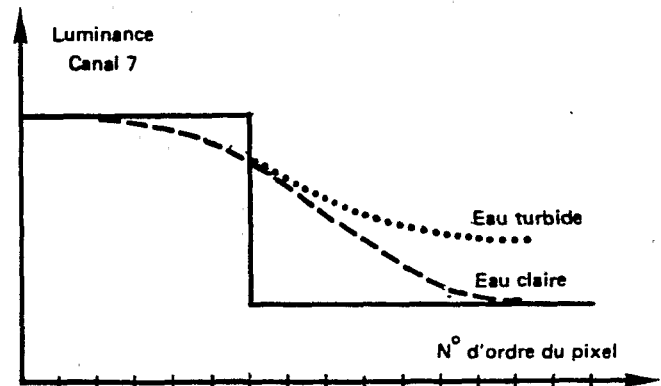
c/ Effet de fond



d/ Effet humidité du sol



e/ Effet turbidité de l'eau



f/ Résultante

— Courbe théorique      - - - Courbe réelle

Figure 6 - Paramètres de la diminution des luminances lors du passage de la zone exondée au plan d'eau (Cañal 7) -

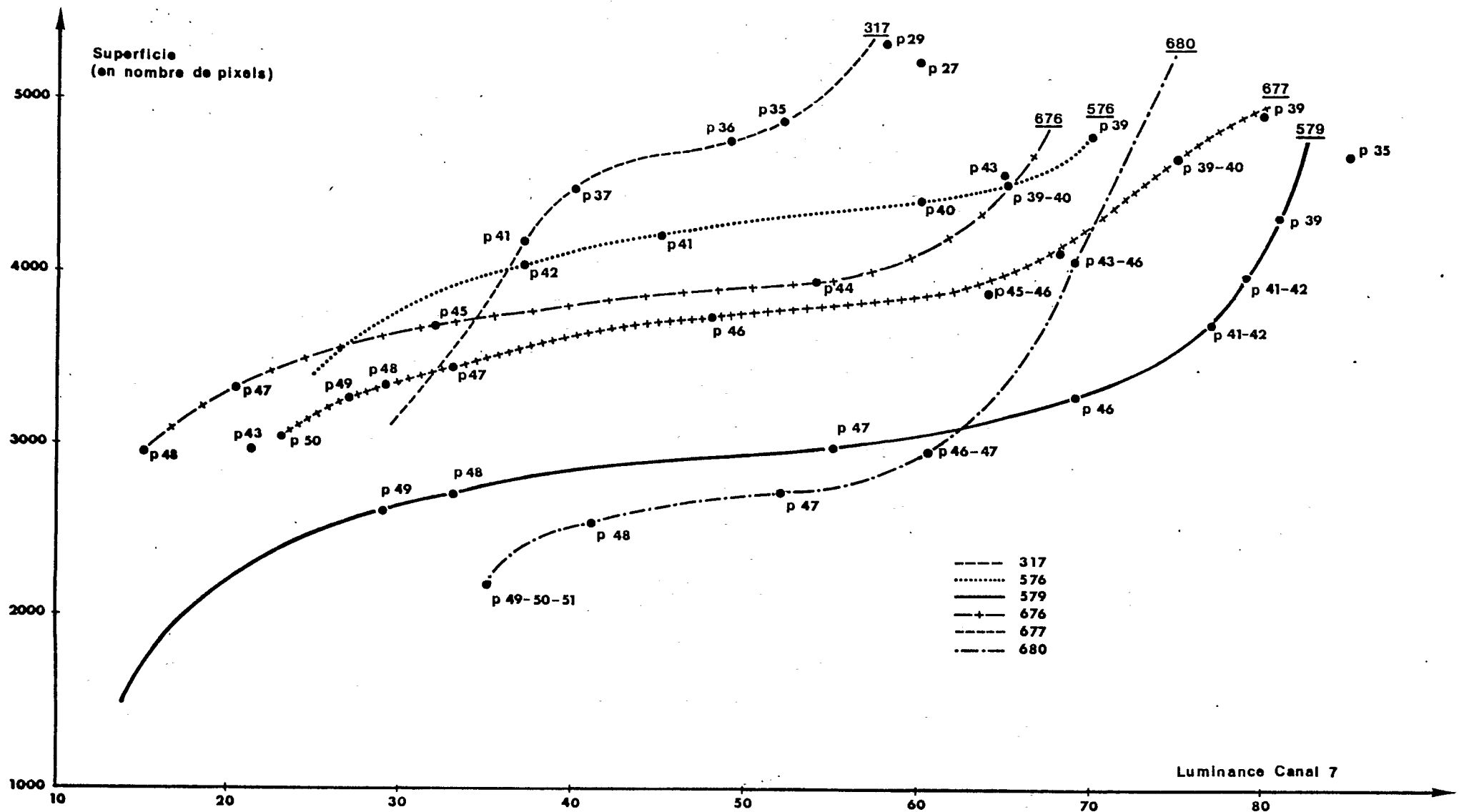


Figure 7 - Evolution de la superficie intérieure des isolignes de luminance au passage de la limite inondé - exondé -

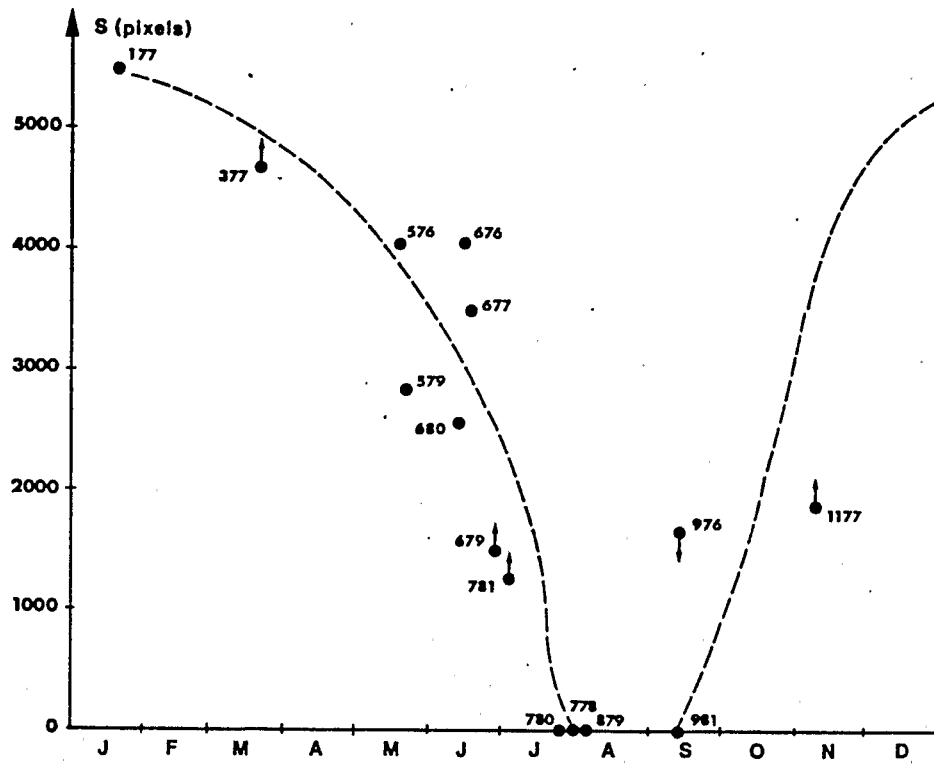


Figure 8 - Evolution saisonnière de la surface du plan d'eau

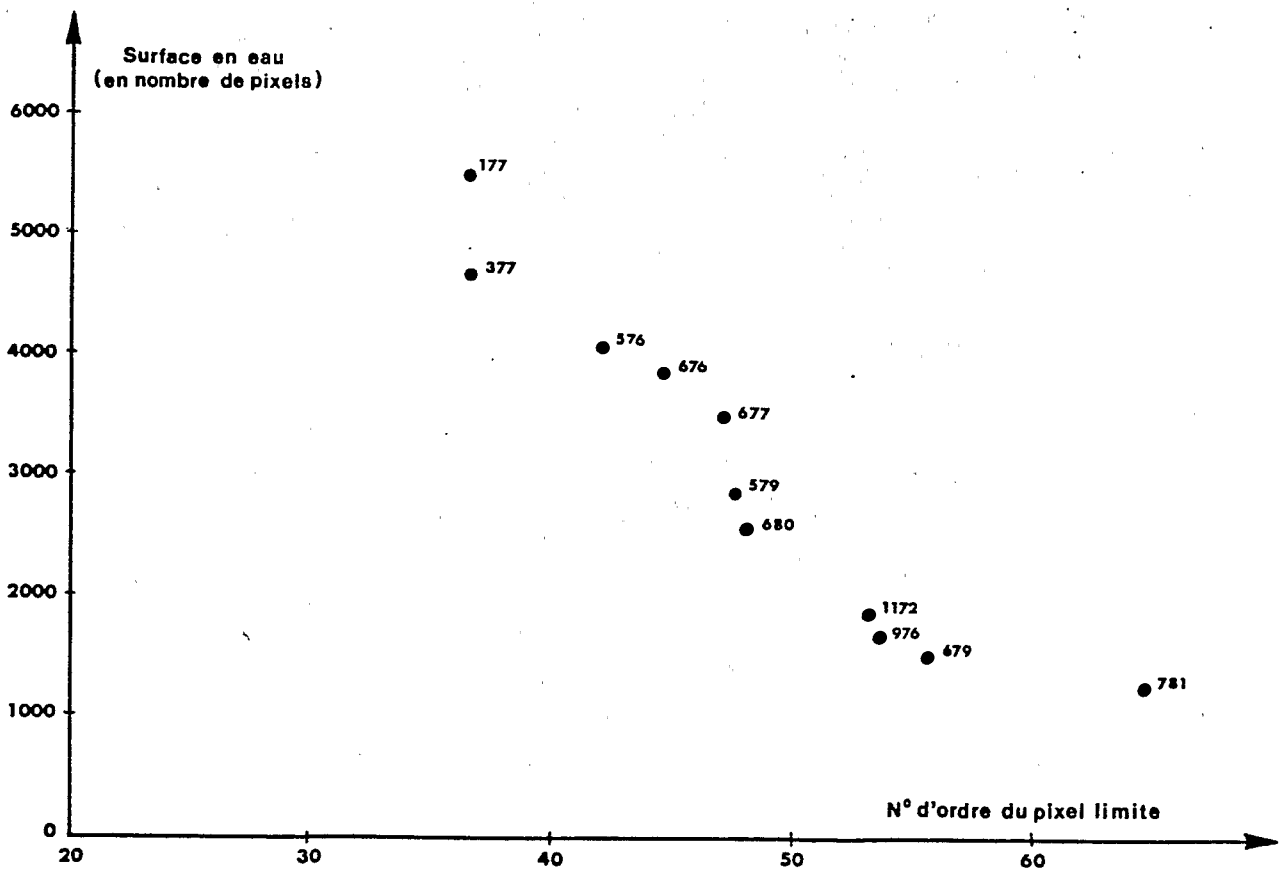


Figure 9 - Relation Surface en eau - Numéro d'ordre du pixel limite -

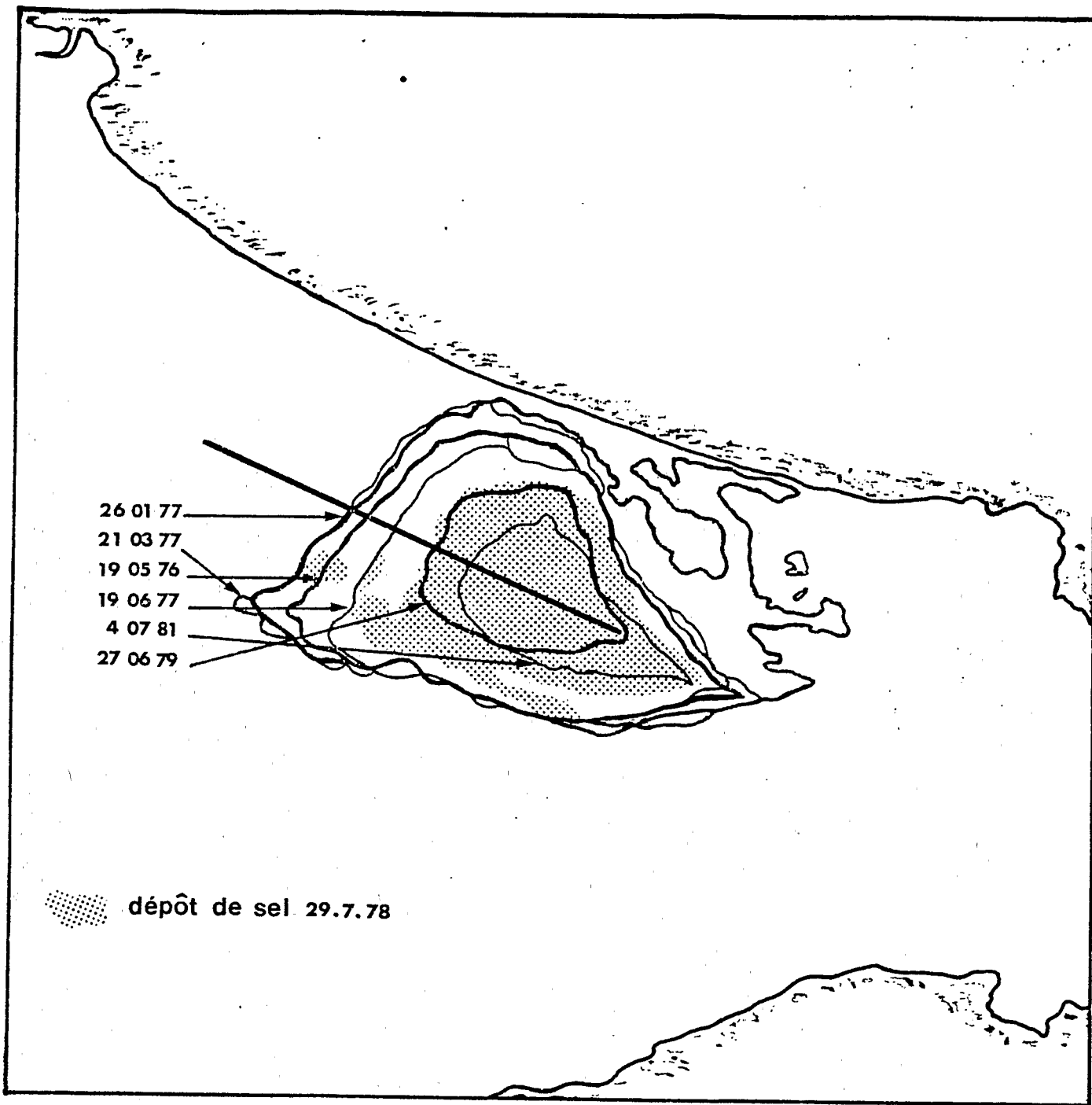


Figure 10 - Extensions successives du plan d'eau

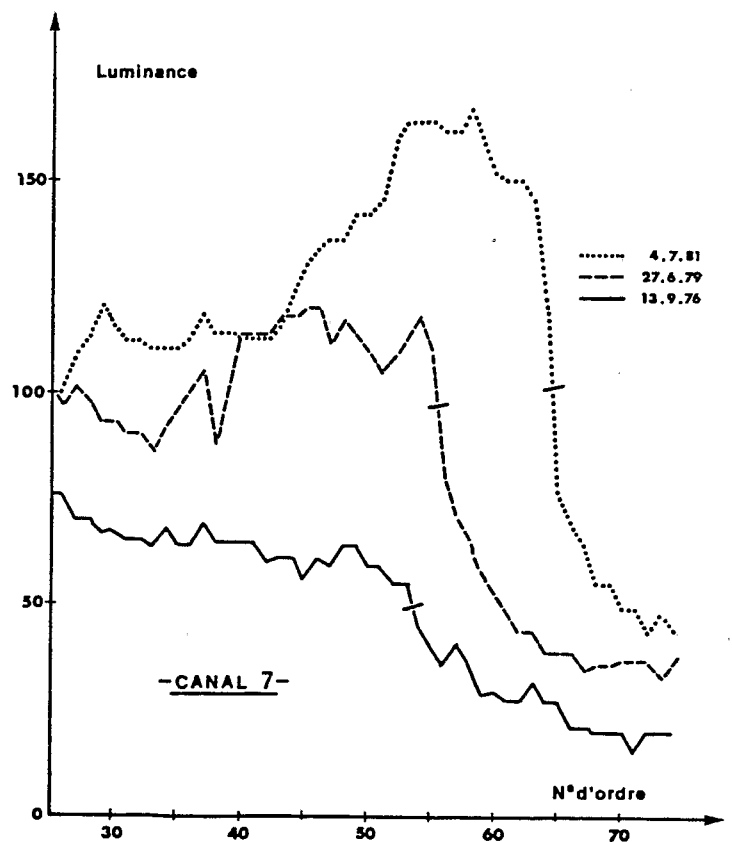
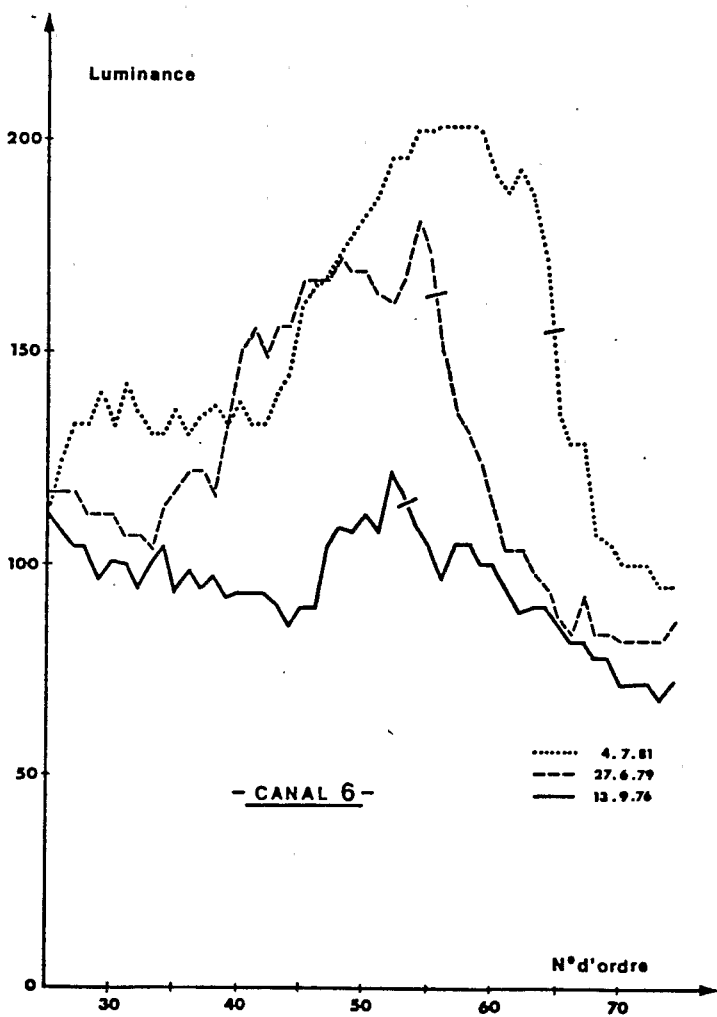
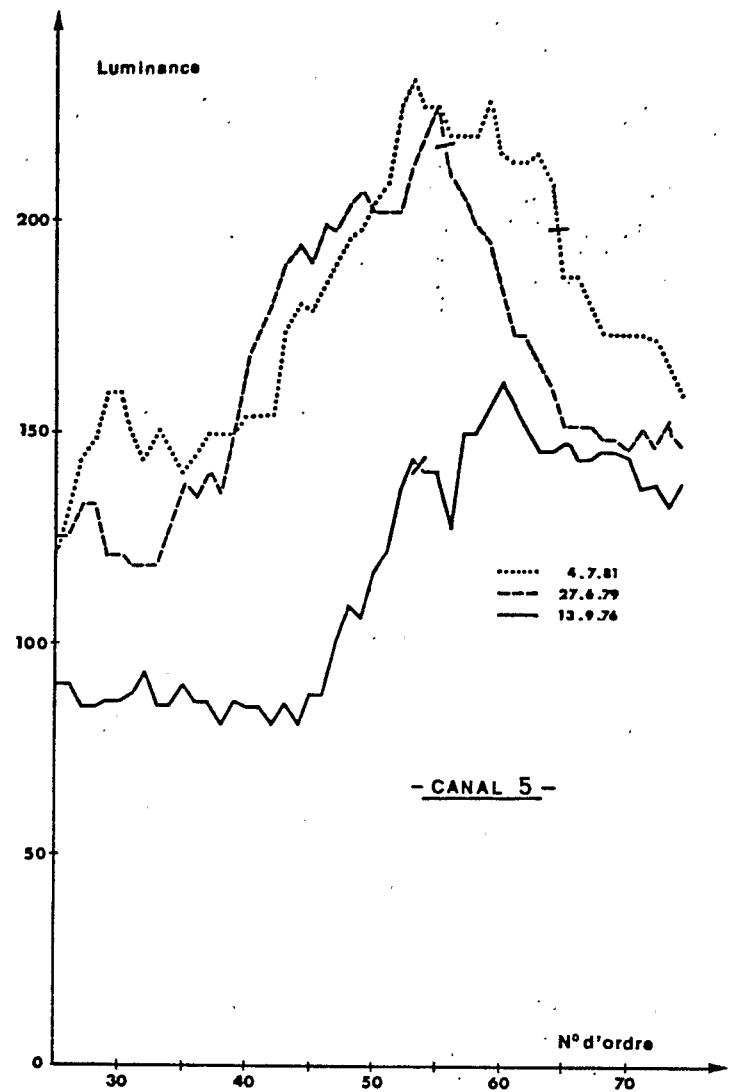
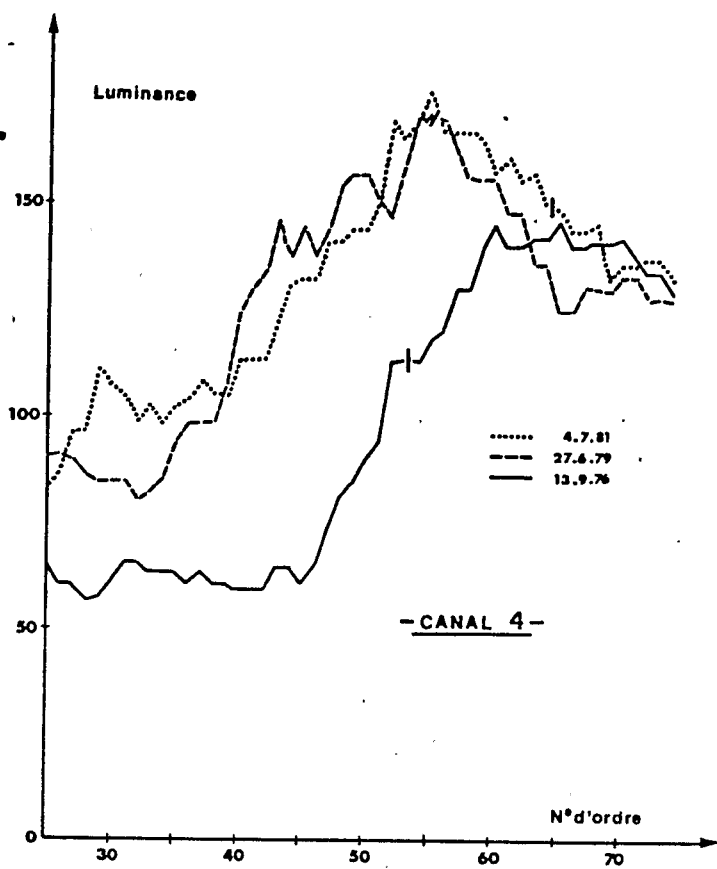


Figure // - Comparaison Assèchement - Remplissage

/ Frontière inondé-exondé

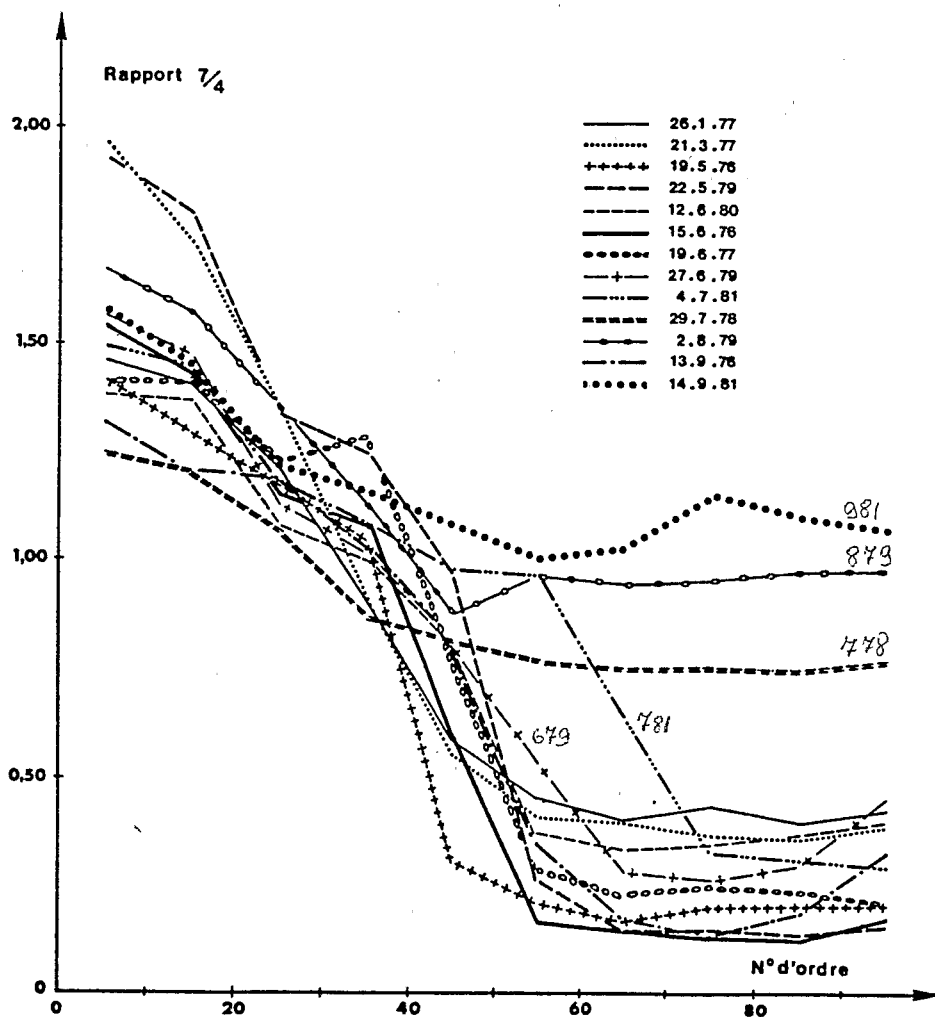
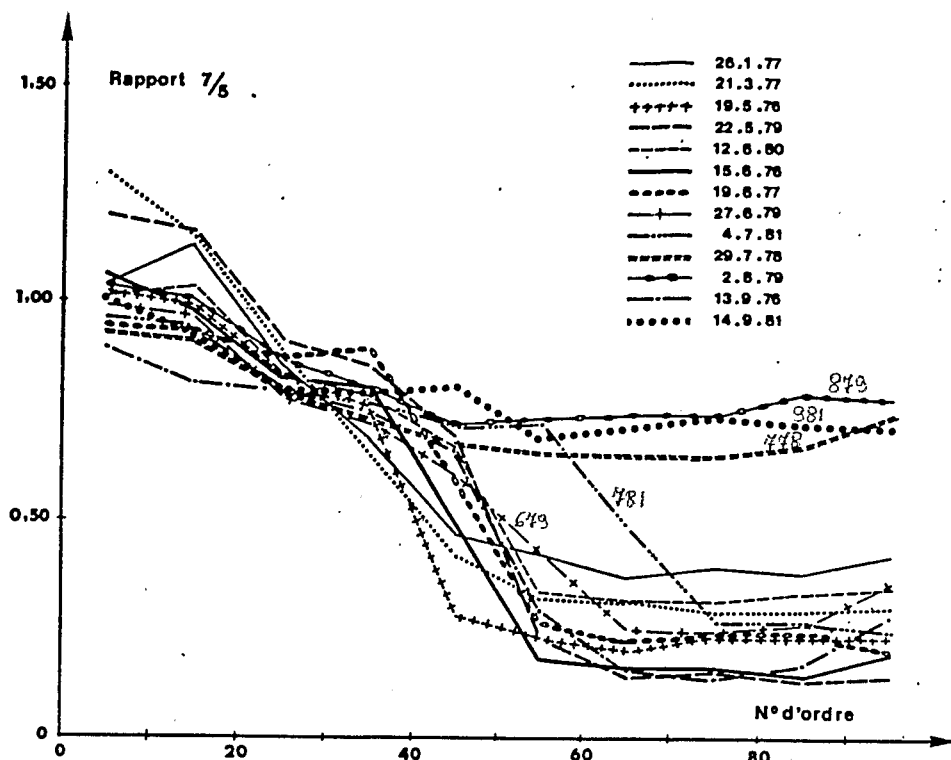


Figure 12 - Evolution des rapports inter-canaux -

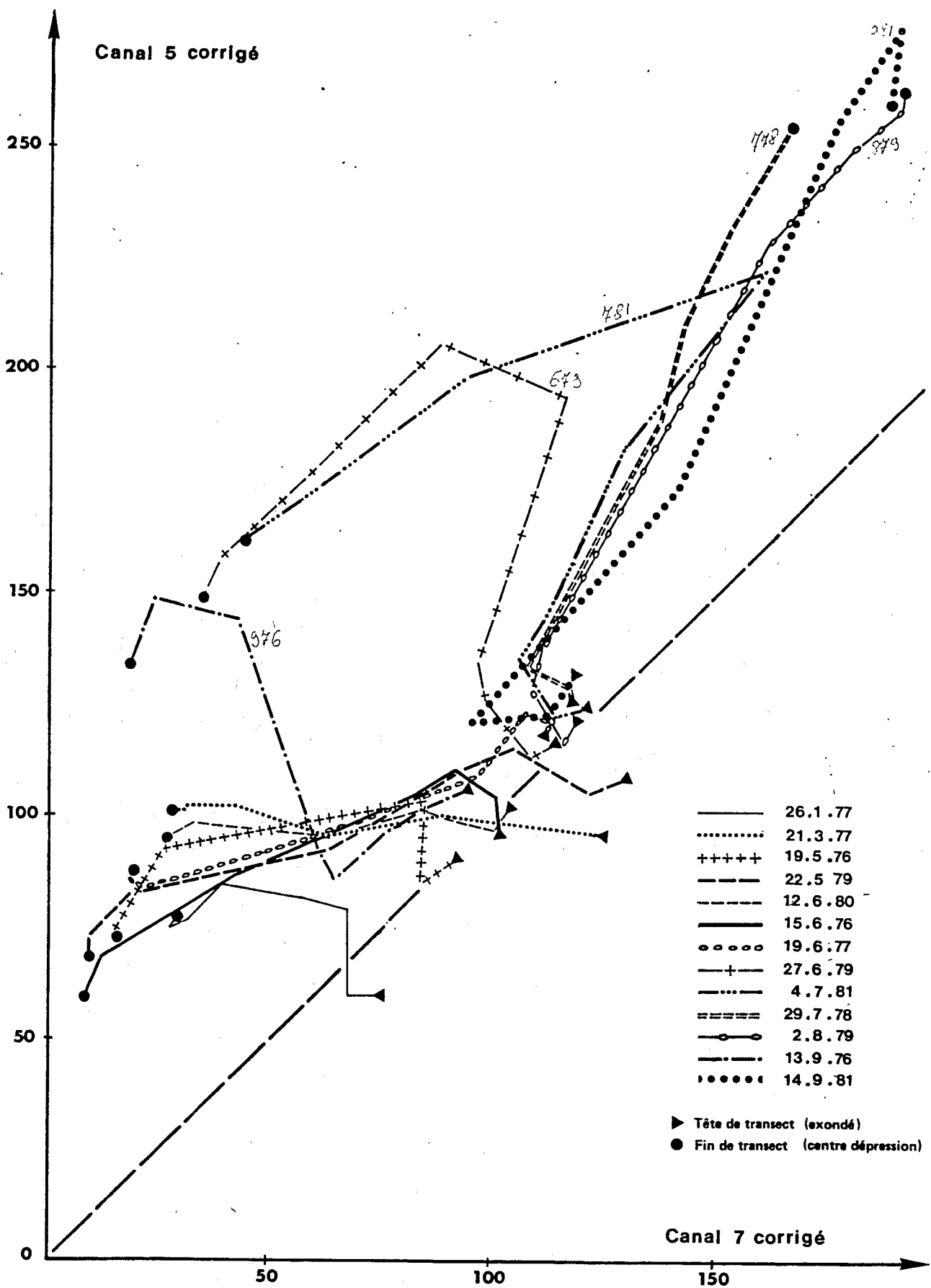
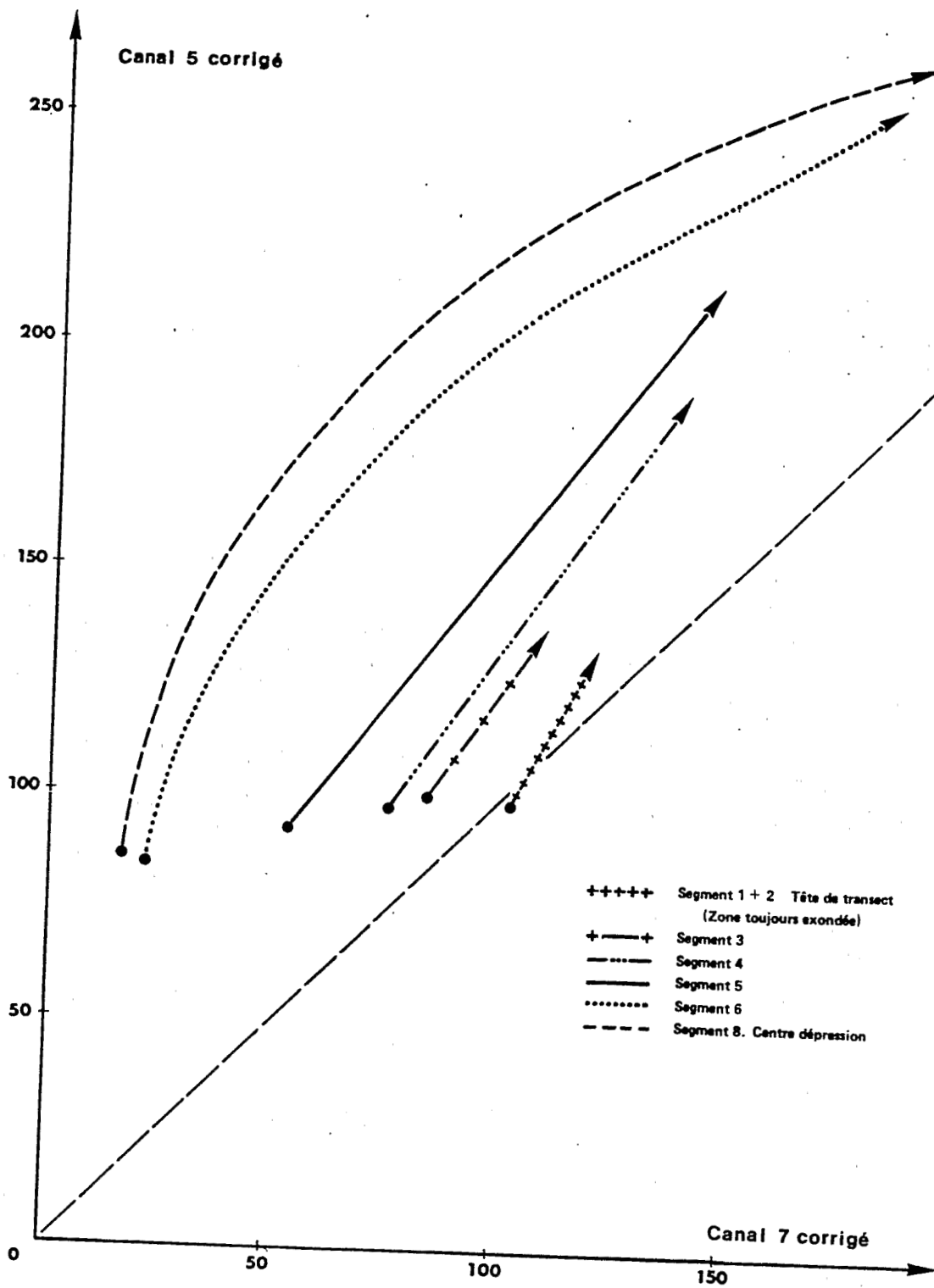


Figure 13 Evolution saisonnière des luminances du transect dans le plan des canaux 5 et 7  
( Les 8 points de chaque courbe représentent chacun la moyenne de 10 pixels )



14  
 Figure - Migration des points représentatifs des divers segments  
 du transect dans le plan des canaux 5 et 7  
 de fin Mai à fin Juillet -



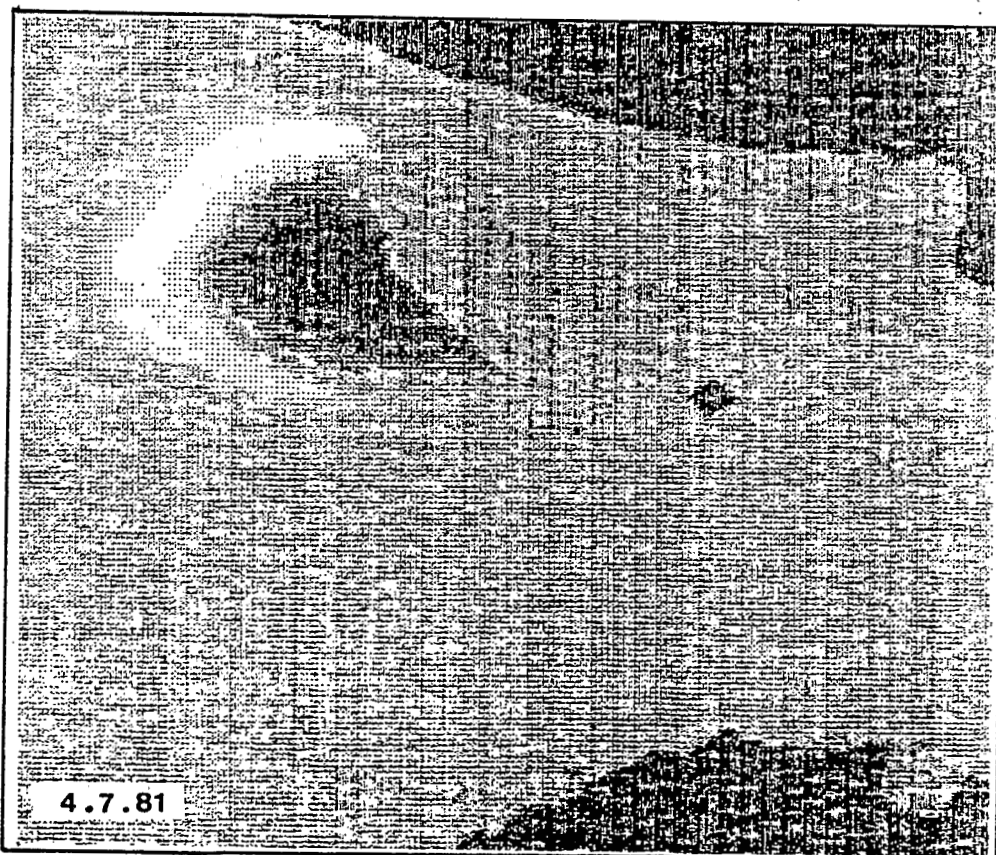
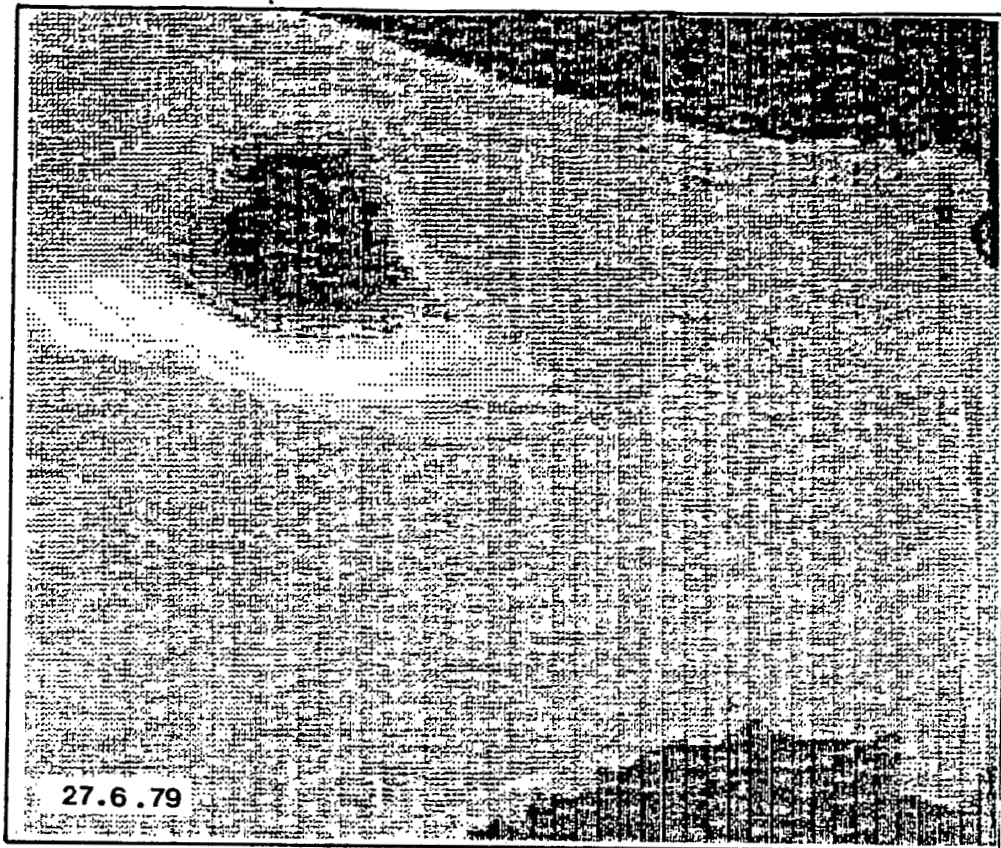
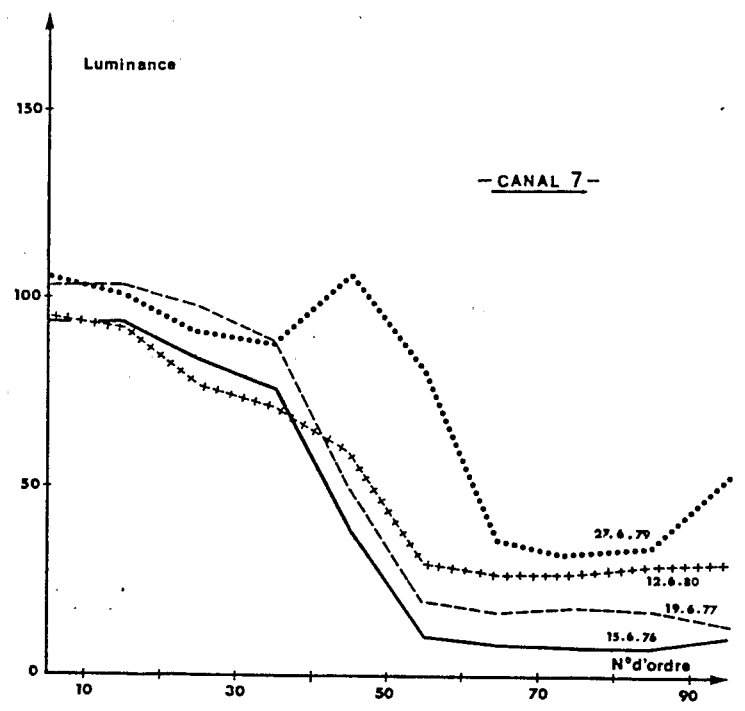
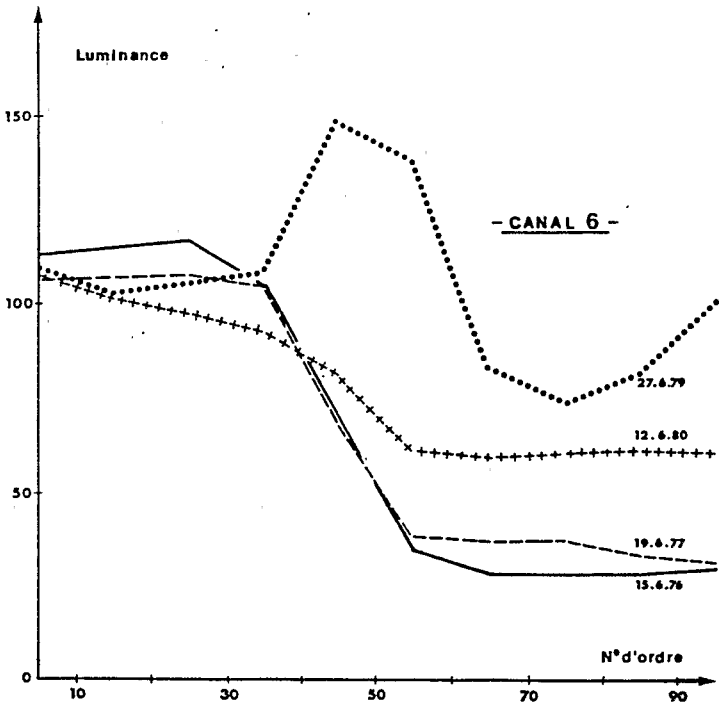
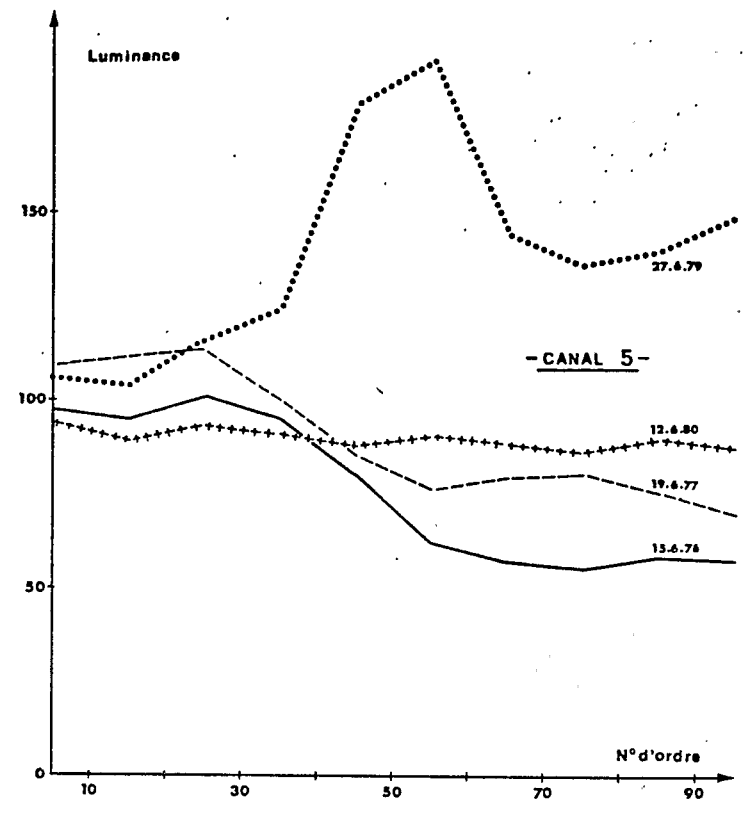
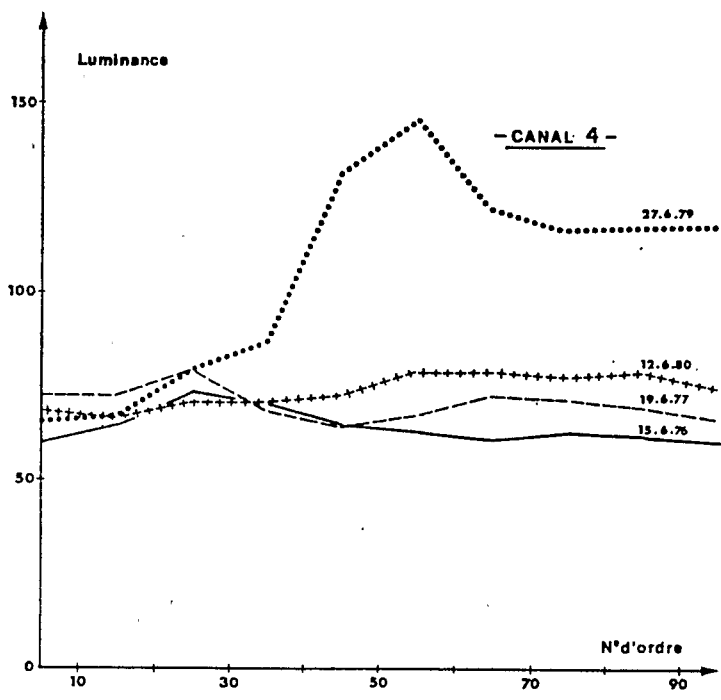
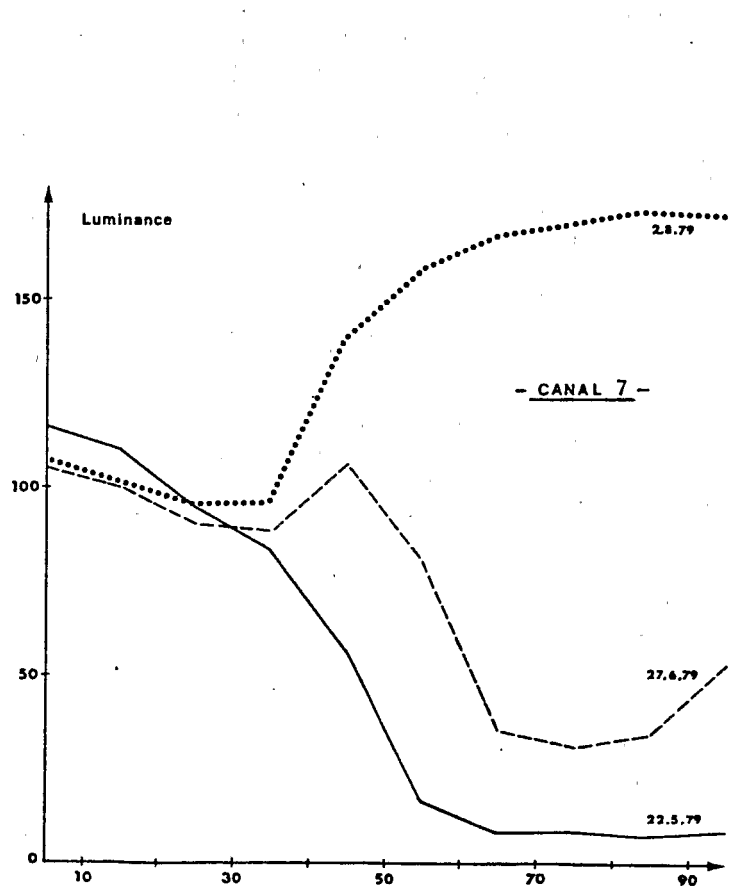
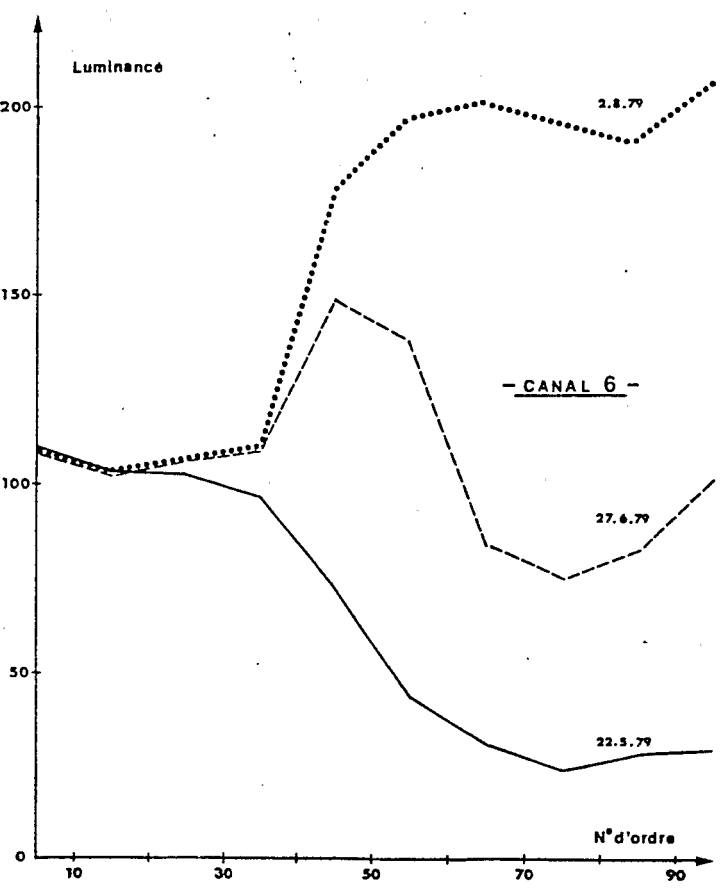
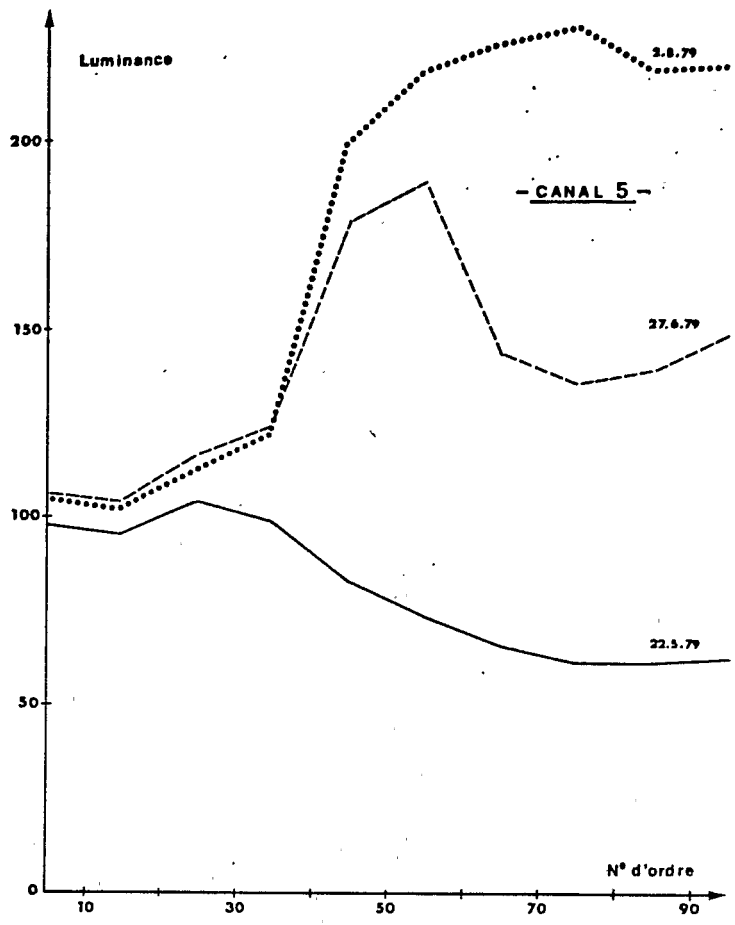
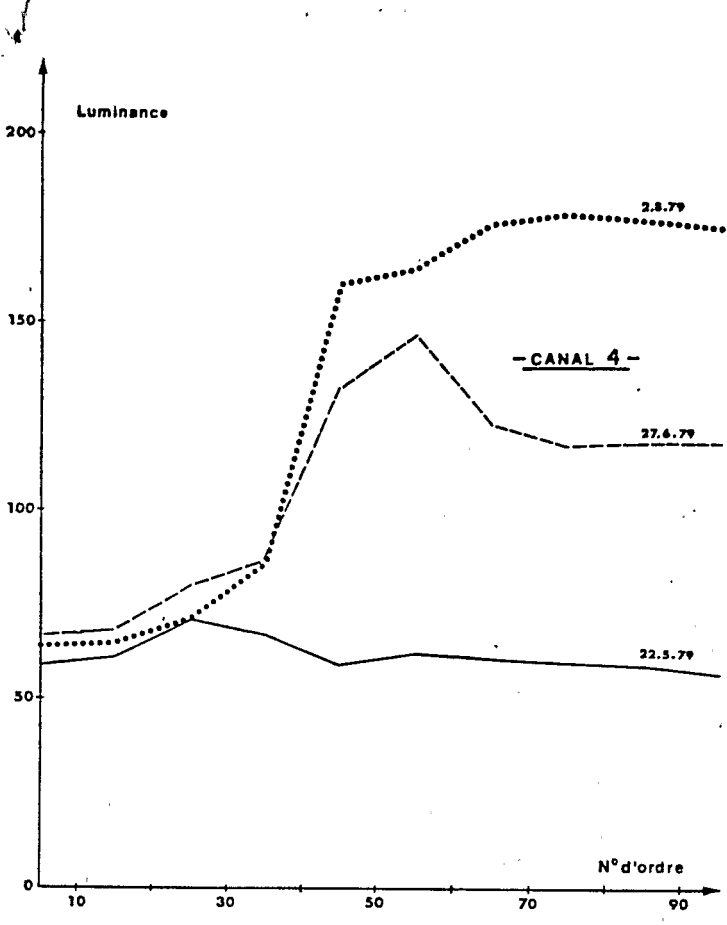


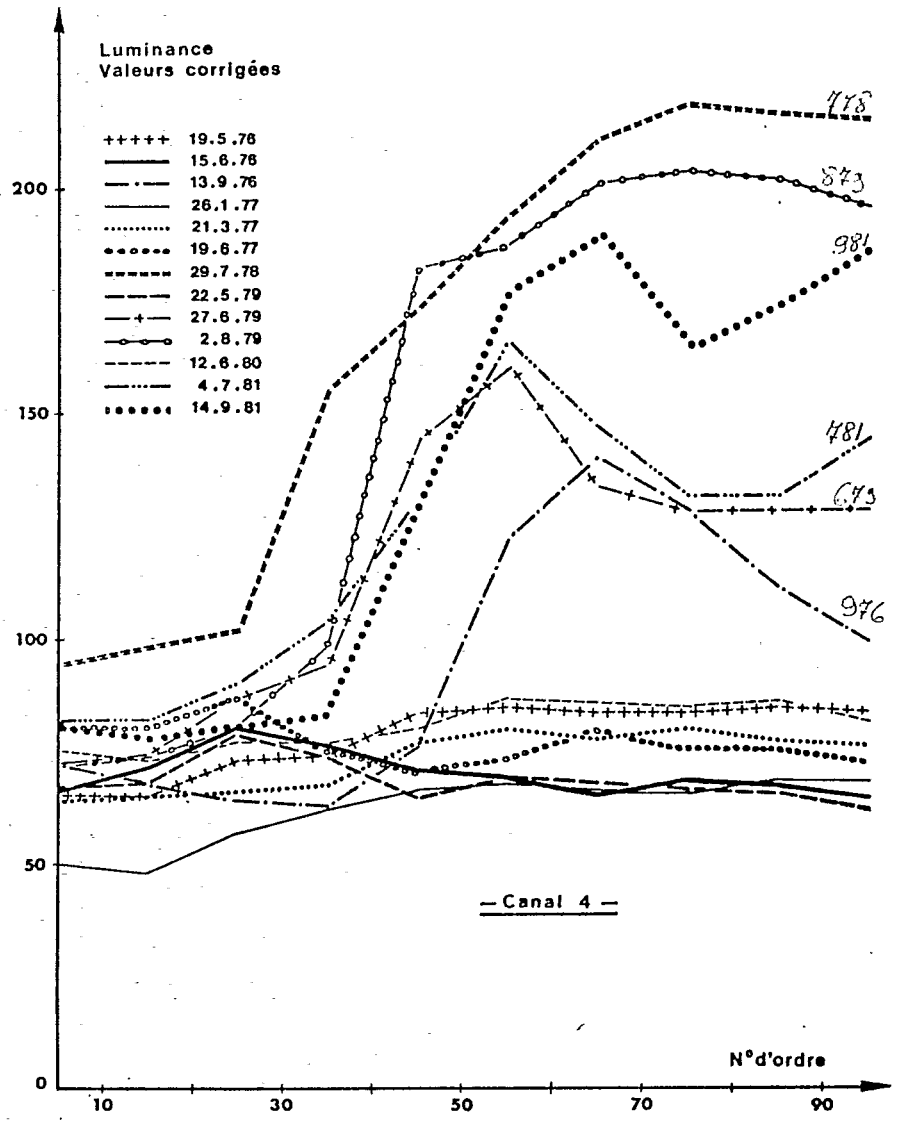
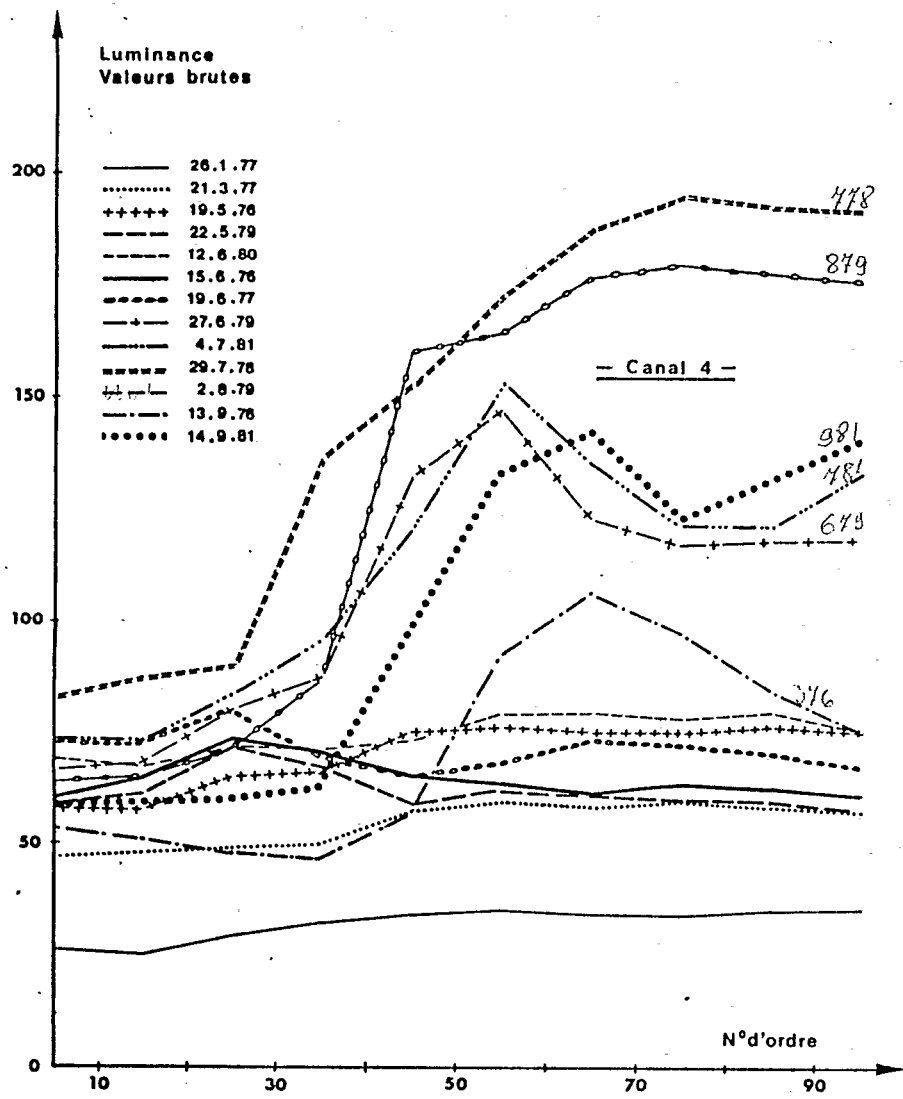
Figure 15 - Variation des zones de concentration saline (Canal)  
en phase d'arriement



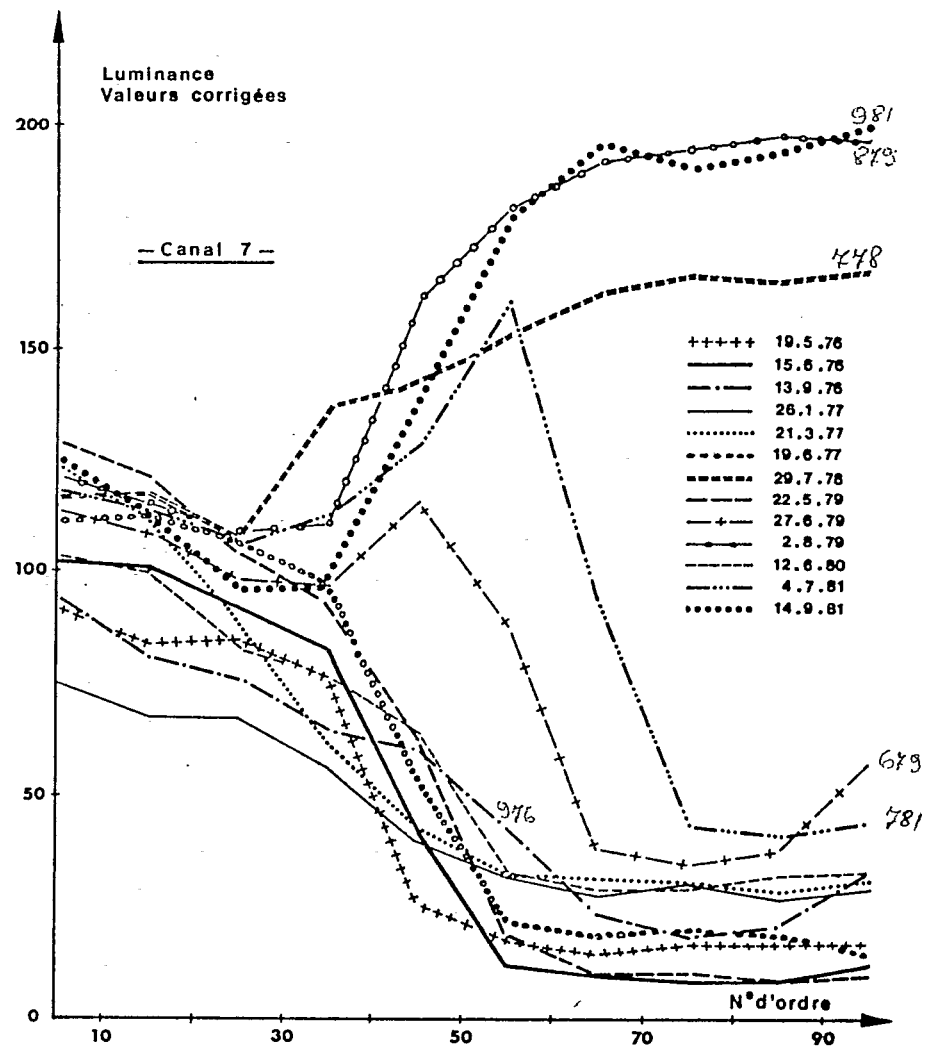
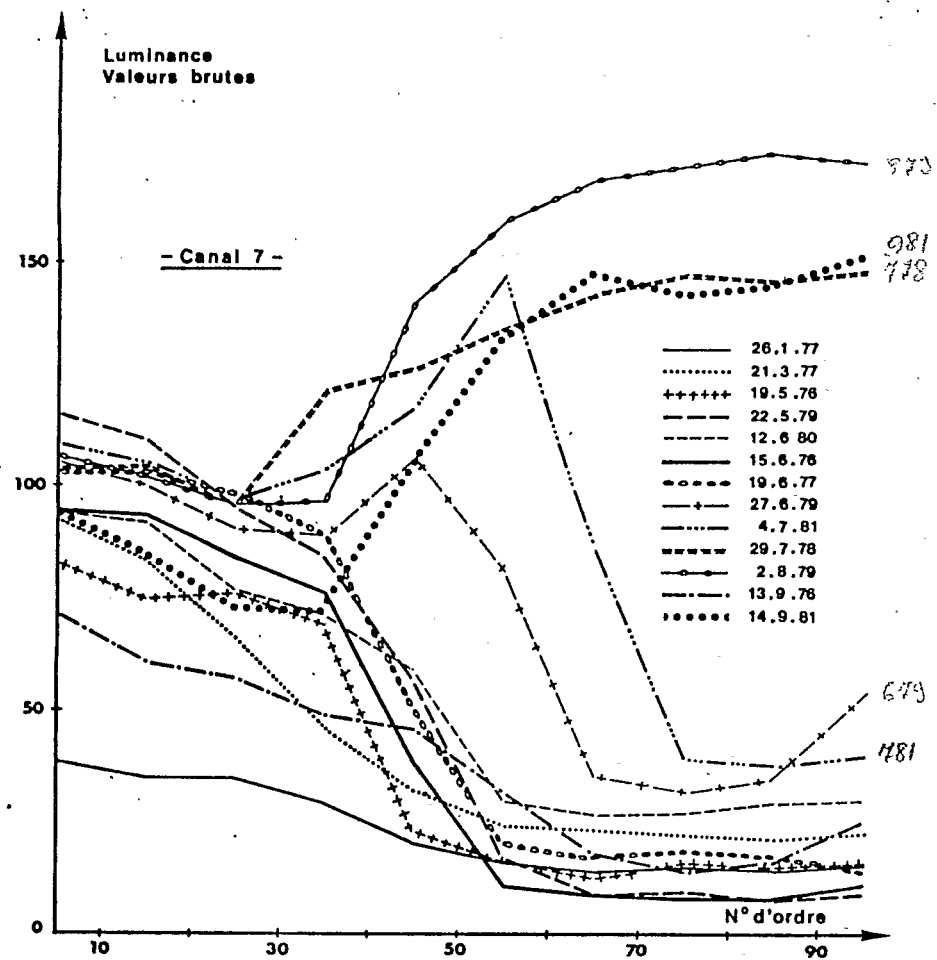
Annexe Figure I - Evolution des luminances en JUIN -  
 - début de la phase d'assèchement -



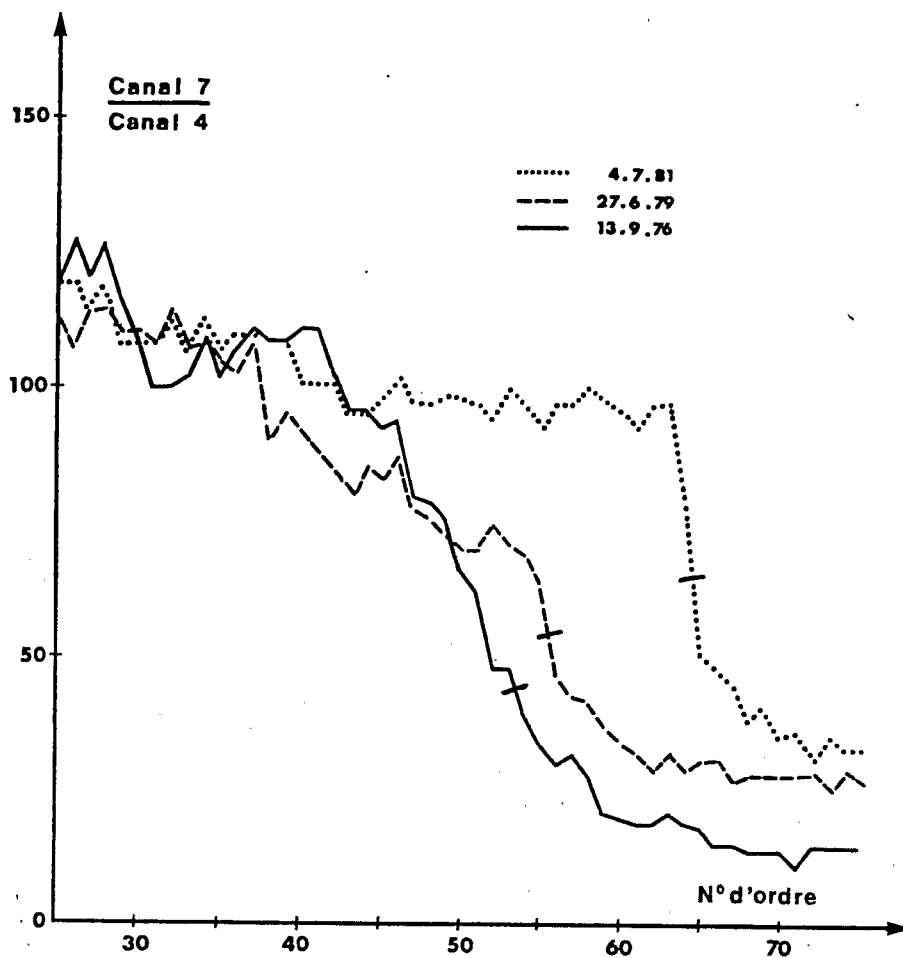
Amica Figure II - Evolution des luminances pendant une phase d'assèchement -



Annexe Figure III - Comparaison Valeurs brutes - Valeurs corrigées



Annexe Figure III Comparaison Valeurs brutes - Valeurs corrigées



Annexe Figure IV Evolution détaillée du rapport  $\frac{\text{Canal 7}}{\text{Canal 4}}$   
au passage exondé-inondé

/ Frontière inondé-exondé