

N° d'ordre : 70

50376  
1986  
277

50376  
1986  
277

# THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE FLANDRES ARTOIS

pour obtenir le titre de

**DOCTEUR DE TROISIEME CYCLE**

*Electronique*

par

**Bertrand LOURME**

**maître es sciences**



**TRAITEMENT DE DONNEES PHYSIQUES ET  
PHYSIOLOGIQUES EFFECTUE SUR DES KAYAKISTES  
DE COURSE EN LIGNE  
CARACTERISATION DU GESTE ET OPTIMISATION  
DU RENDEMENT ENERGETIQUE**

*Exemplaire corrigé après avis du jury*

B.U. LILLE 1



D 030 103394 6

Soutenu le 8 Décembre 1986 devant la Commission d'Examen

Membres du Jury :

MM. R. GABILLARD,

B. MACKE,  
F. LOUAGE  
G. CAIGNAERT  
J. BAUDET  
D. CURTIL

Président du Jury,  
Rapporteur  
Examineur  
Directeur de Thèse  
Rapporteur

## Remerciements

Le travail présenté, se situe dans le cadre d'un contrat passé entre le laboratoire d'Electronique et de Radiopropagation de l'Université de Lille et la Fédération Française de Canoë-Kayak.

Je tiens à remercier, Monsieur le Professeur GABILLARD, directeur du laboratoire, d'avoir bien voulu m'intégrer dans une de ses équipes de recherche, ainsi que Monsieur le Professeur LOUAGE, qui a dirigé et supervisé mes travaux pendant toute la durée de l'étude.

Je remercie également, Monsieur CURTIL, directeur technique de la F.F.C.K, les entraîneurs nationaux et l'équipe de France de Canoë-Kayak pour leur chaleureuse collaboration, en temps et en efforts, ainsi que leur participation aux nombreux essais.

Je n'oublierai pas Messieurs GRARE et DELVAL, qui ont également travaillé sur ce projet et qui ont su m'éclairer de leurs conseils judicieux. Qu'ils en soient ici gratifiés.

Enfin, je tiens à remercier, Monsieur BAUDET, ingénieur au laboratoire, pour son soutien technique, Monsieur SEMET, également ingénieur au laboratoire, pour ses précieux conseils et son aide de dernière minute pour la composition de ce mémoire, ainsi que les équipes d'électronique, de mécanique et d'imprimerie, qui ont, chacun dans leur domaine, participé à l'aboutissement de ce projet.

## SOMMAIRE

### INTRODUCTION

### Chapitre I : EXPERIMENTATION A PARTIR DU SYSTEME D'ACQUISITION

#### 1 - Présentation du problème

#### 2 - Description sommaire du système d'acquisition

- 2 - 1 Paramètres et capteurs
- 2 - 2 La centrale d'acquisition
- 2 - 3 Le synchronisateur vidéo
- 2 - 4 L'ordinateur

#### 3 - Expérimentation

- 3 - 1 Déroulement d'une prise de mesure
- 3 - 2 Protocoles de mesures
- 3 - 3 Analyse des résultats avec les logiciels classiques
  - 3 - 31 Etude du déroulement de la course
    - \* Etude de départ
    - \* Phénomène de régime pendant la course
    - \* Récupération cardiaque
  - 3 - 32 Etude gestuelle
    - \* Forces moyennes à droite et à gauche
    - \* Durées moyennes à droite et à gauche
- 3 - 4 Conclusions sur un an d'expérimentation
  - 3 - 41 Problèmes liés aux conditions d'expérimentation
  - 3 - 42 Constat sur cette première analyse

#### 4 - Evolution de l'appareillage de mesure

- 4 - 1 Utilisation pour des distances courtes
- 4 - 2 Utilisation pour des distances longues

## Chapitre II : CARACTERISATION DE LA TRANSMISSION DE L'ENERGIE PAR LES ATHLETES AU KAYAK

### 1 - Corrélation entre force de pagayage et vitesse

- 1 - 1 Détermination de la constante de temps de réponse du kayak
- 1 - 2 Corrélation instantannée
- 1 - 3 Coefficient de corrélation entre chaque pagayeur et la vitesse
- 1 - 4 Conclusions

### 2 - Relations énergétiques entre force de pagayage et force de propulsion

- 2 - 1 Représentation spectrale des forces de pagayage
  - 2 - 11 Constatations sur la répartition énergétique des signaux forces
  - 2 - 12 Classification des différentes techniques utilisées
  - 2 - 13 Modélisation de gestes
  - 2 - 14 Analyse du fondamental
- 2 - 2 Représentation de la force de propulsion
  - 2 - 21 Spectre de la force de propulsion brute
- 2 - 3 Transmission de l'énergie
  - 2 - 31 Fonctions de cohérence
- 2 - 4 Conclusions

### 3 - Etude statistique des paramètres mesurés

- 3 - 1 Variations dynamiques de la vitesse
  - 3 - 11 Détection minimas et maximas
  - 3 - 12 Variations de la vitesse en fonction de la vitesse moyenne
- 3 - 2 Etude statistique de la vitesse
  - 3 - 21 Densité de probabilité du signal vitesse
  - 3 - 22 Fonction de répartition du signal vitesse

- 3 - 23 Cas particulier du kayak monoplace
- 3 - 24 Conclusion
- 3 - 3 Etude statistique des forces déployées par les athlètes
  - 3 - 31 Comparaison force avant-force arrière
  - 3 - 32 Analyse gestuelle

#### 4 - Conclusions

### Chapitre III : ETUDE MECANIQUE DU SYSTEME HOMME-KAYAK

#### 1 - Bilan énergétique

- 1 - 1 Puissance utile pour l'avancement du kayak
- 1 - 2 Puissance dépensée par les athlètes
  - 1 - 21 Notions de mécanique des fluides
  - 1 - 22 Détermination du Cx de la pagaie
  - 1 - 23 Puissance dépensée pour le déplacement de la pagaie dans l'eau
  - 1 - 24 Puissance motrice

#### 2 - Rendement énergétique

- 2 - 1 Problèmes de définition de rendement
- 2 - 2 Rendement biomécanique
- 2 - 3 Rendement mécanique
- 2 - 4 Conclusions

#### 3 - Classification des pertes

- 3 - 1 Différentes incidences de la pagaie
- 3 - 2 Répercussion sur le Cx de la pagaie
- 3 - 3 Répercussion sur la portance

#### 4 - Conclusions

CONCLUSION

ANNEXE 1 : Conventions utilisées dans cette étude

ANNEXE 2 : Logiciels d'acquisition et d'analyse

ANNEXE 3 : Equipement du kayak monoplace

ANNEXE 4 : Essais de pagaies de différentes structures

ANNEXE 5 : Bioénergétique de l'exercice musculaire

I N T R O D U C T I O N  
- - - - -

## INTRODUCTION

L'amélioration des méthodes d'entraînement sportif exige maintenant des moyens d'analyse et de test de plus en plus précis et performants. Le sport du Canoë-Kayak n'échappe pas à cette règle et c'est pour cette raison que la Fédération Française de Canoë-Kayak nous a demandé de mettre au point des méthodes objectives d'évaluation des performances des équipages. Depuis 1982, le laboratoire a développé ce thème de recherche sous la direction du professeur Louage et les travaux ont permis de mettre au point un système d'acquisition de données physiques et physiologiques associé à un synchronisateur d'images vidéo. Les premiers travaux de traitement et de dépouillement ont été entrepris par A. Grare (Réf 8).

Nous y avons apporté une large contribution et poursuivi ces premières études en les complétant et les approfondissant dans trois directions :

Tout d'abord nous avons mis au point la version définitive du matériel d'acquisition et de traitement, de telle sorte qu'il soit suffisamment fiable pour être utilisé systématiquement par les entraîneurs, qu'il soit très facilement mis en oeuvre et que la communication homme-machine soit la plus simple possible.

Ensuite des logiciels tout à fait spécifiques de traitement des données acquises au cours des nombreuses campagnes de mesures ont été réalisés afin de bien caractériser la transmission de l'énergie par les athlètes au kayak.

Enfin nous nous sommes rendu compte que pour tenter une optimisation du geste du pagayeur, il fallait définir un modèle mécanique suffisamment précis pour estimer le rendement d'un équipage. Cette étude est particulièrement délicate

compte tenu de la chaîne de transmission de l'énergie qui fait intervenir des éléments mécaniques, un système hydrodynamique, et enfin le corps humain, sans qu'il soit possible de considérer des liaisons strictes entre les différents éléments de cette chaîne. Nous avons introduit un certain nombre d'hypothèses simplificatrices qui nous ont permis d'obtenir des premiers résultats intéressants.

CHAPITRE I  
-----

EXPÉRIMENTATION À PARTIR DU SYSTÈME D'ACQUISITION

## 1 - Présentation du problème

Le problème soumis par la FFCK est de mesurer certains paramètres physiques et physiologiques pendant une course de kayak en ligne. Il a donc fallu réaliser un appareillage permettant de faire ces mesures en synchronisation avec un enregistrement vidéo. Trois paramètres sont mesurés, à savoir la vitesse du kayak, les forces exercées sur les pagaies par chaque pagayeur et le rythme cardiaque de ceux-ci. La durée de l'acquisition se fait sur environ 5 mn et la cadence a été fixée à 20 ms, permettant ainsi une analyse fine des paramètres. L'appareillage ainsi conçu, permet d'effectuer sans problème, les mesures sur des distances de 500 m et 1000 m qui sont actuellement utilisées en compétition.

## 2 - Description sommaire du système d'acquisition (Réf 1)

### 2-1 Paramètres et capteurs (Réf 2)

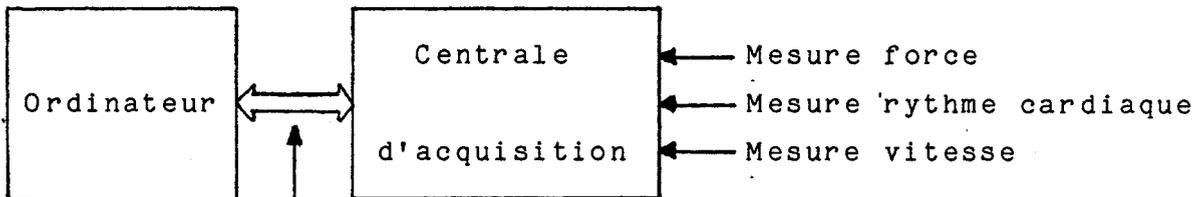
3 paramètres sont mesurés par rapport au temps qui sert de référence.

Paramètres	Méthode de mesure
VITESSE du kayak	Le capteur est un speedomètre de voilier placé sous la coque qui se comporte en génératrice tachymétrique.
FORCES exercées sur chaque pagaie	La déformation du manche de pagaie est mesurée sur des jauges de contrainte collées sur ceux-ci. Cette déformation est proportionnelle à la force exercée sur les pagaies.
RYTHME CARDIAQUE de chaque pagayeur	Des électrodes placées selon un axe cardiaque sur la poitrine des pagayeurs sont reliées à un dispositif mis au point au laboratoire pour en extraire le rythme cardiaque. (Réf 3)

### 2-2 La centrale d'acquisition

Elle dispose de 4 entrées analogiques (mesure des forces) de 4 entrées logiques (mesure des rythmes cardiaques) et d'une entrée période (mesure de vitesse) lui permettant d'équiper les 3 types de bateaux utilisés en compétition K1, K2 et K4. Le stockage des données est assuré par une mémoire de 64 K octets et la liaison avec l'ordinateur se fait par le biais d'une liaison série asynchrone (fig 1). Enfin la conception micro-informatique assure la souplesse de cet outil, dont les principales fonctions sont entièrement programmables, comme le gain des amplis, l'ordre de scrutation des capteurs, la cadence d'acquisition, etc ... (Réf 2,4)

Situation de la centrale dans la chaîne de mesure



- Fig 1 -

{ Liaison série asynchrone permettant l'envoi des programmes assurant le fonctionnement de la centrale et le transfert des mesures vers l'ordinateur.

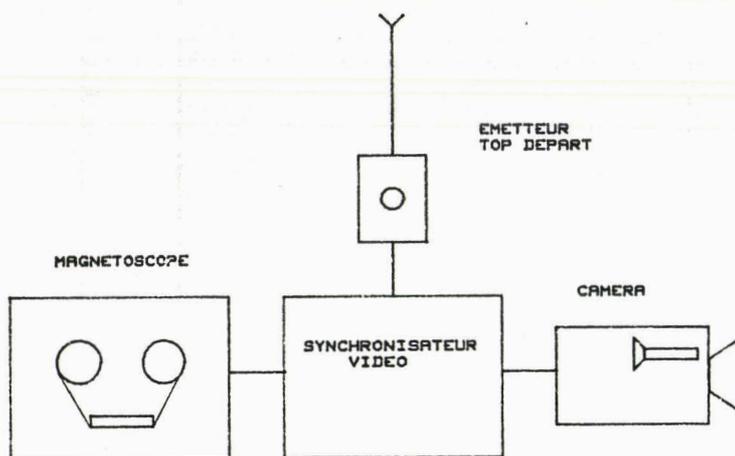
2-3 Le synchronisateur vidéo

Il assure la synchronisation entre les images vidéo et les mesures. Il est donc chargé de 2 fonctions importantes :

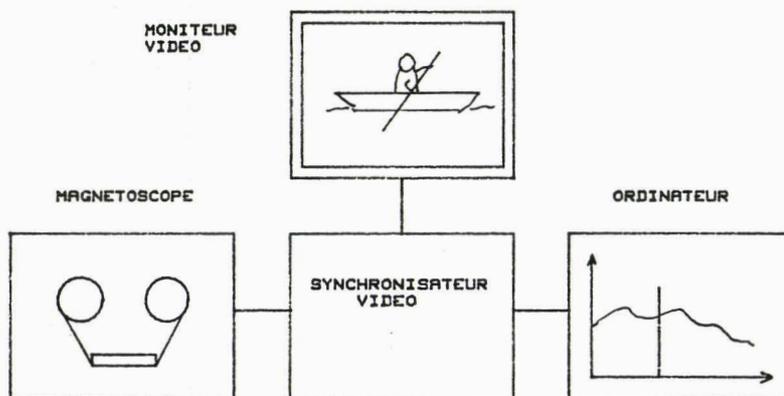
- lors de l'acquisition (fig 2), il traite le signal vidéo venant de la caméra en lui ajoutant une information : l'heure codée.

- lors du dépouillement des mesures (fig 3), il décode l'heure inscrite sur chaque image et l'envoie vers l'ordinateur par une liaison série asynchrone. Celui-ci génère un curseur piloté sur cette information. (Réf 5,6)

Situation du synchronisateur vidéo dans la chaîne de mesure



- Fig 2 - Phase d'acquisition



- Fig 3 - Phase de dépouillement

2-4 L'ordinateur



C'est un HEWLETT PACKARD 9816 qui a été choisi en raison de ces caractéristiques électriques et mécaniques. En effet, sa taille de mémoire centrale lui permet de traiter des fichiers de grande taille (1 fichier mesure requerre 150 K octets de taille mémoire pour notre application), et sa structure 16 bits lui confère rapidité et précision de calcul. Enfin la portabilité de cet ordinateur, en fait un outil de terrain idéal. (Réf 7)

### 3 - Expérimentation

#### 3-1 Déroulement d'une prise de mesure

Nous allons décrire ici, succinctement, les différentes opérations intervenant dans une prise de mesure.

Le matériel se divise en 3 parties :

- l'ordinateur → situé au bord du plan d'eau
- l'équipement vidéo → situé dans un bateau suiveur
- le système d'acquisition → situé dans le kayak

Après chargement du programme d'acquisition dans la centrale, les kayakistes se placent sur la ligne de départ. L'entraîneur situé dans le bateau suiveur commence à filmer. Il peut à tout moment envoyer le top départ par télémétrie. La centrale commence alors l'acquisition ; parallèlement le synchronisateur vidéo code l'heure. Une fois la course terminée, les kayakistes reviennent près du ponton où on " vidange " la centrale vers l'ordinateur. Enfin les mesures sont stockées sur disquette. (Réf 8,9)

#### 3-2 Protocoles de mesure

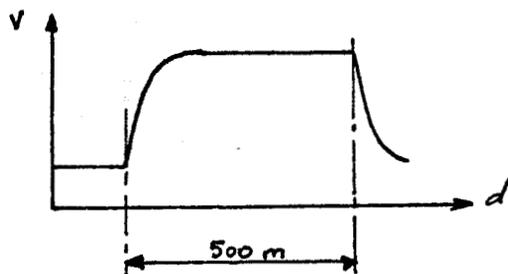
Un certain nombre de mesures ont été faites de 1984 à 1985 (Réf 10,11). Si au départ, celles-ci étaient mal définies et plutôt destinées à contrôler le bon fonctionnement de l'appareillage, elles se sont vite organisées autour de véritables protocoles de mesures définis par les entraîneurs et nous-mêmes.

#### Définition de ces protocoles :

##### **1er protocole :**

But : étude générale des différents paramètres importants pendant la course.

Description : distance de 500 m dans les conditions de course (fig 4)



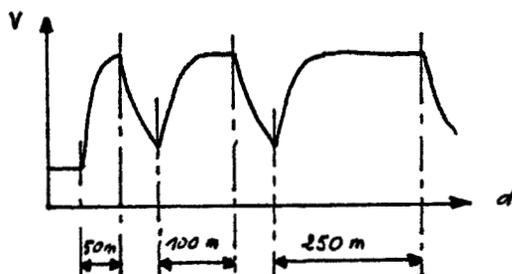
- Fig 4 -

Campagne : Choisy-le-Roi Mars 84  
Equipe olympique et équipe A

**2ème protocole :**

But : étude des capacités des équipages à parcourir différentes distances.

Description : distance de 50 m, suivie d'un repos, distance de 100 m, suivie d'un repos, distance de 250 m. (fig 5)



- Fig 5 -

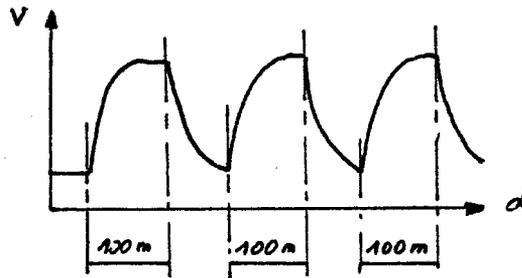
Campagne : Choisy-le-Roi Mars 84  
Equipe olympique et équipe A

**3ème protocole :**

But : - étude des techniques pour " décoller " le kayak (lors d'un départ, il faut libérer une certaine énergie afin de mettre en mouvement le kayak et utiliser celle-ci à bon essient).

- étudier la constitution de nouveaux équipages et le choix de la place. En effet chaque athlète a été " testé " 2 fois : 1 fois à l'avant et 1 fois à l'arrière du kayak.

Description : 3 distances de 100 m, départ arrêté, intercalées de repos d'égale distance. (fig 6)



- Fig 6 -

Campagne : Choisy-le-Roi

Athlètes du Bataillon de Joinville

Enfin d'autres prises de mesure ont eu lieu de façon beaucoup plus ponctuelle et généralement groupées sur 1 jour, soit à la base de Choisy-le-Roi, soit sur la base de Nogent sur Marne, soit sur la base de Lille.

### 3-3 Analyse des résultats avec les logiciels classiques (Réf 12)

A partir de traitements simples comme la moyenne des forces ou la durée de chaque coup de pagaie, il est possible d'apporter un certain nombre de conclusions jusqu'alors ignorées des entraîneurs et des athlètes eux-même. Celles-ci se décomposent en 2 parties : l'étude du déroulement de la course où l'analyse se situe au niveau des paramètres importants régissant le système et une étude plus spécifique concernant les gestes et les techniques employées.

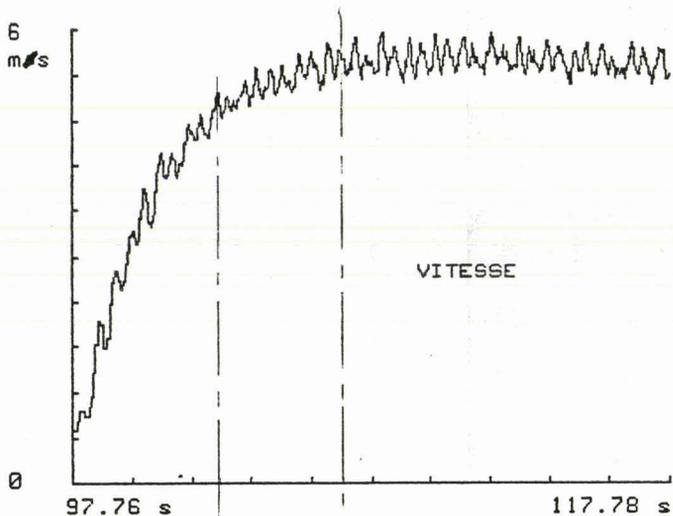
#### 3-3-1 Etude du déroulement de la course

Cette étude peut se faire soit sur la durée totale de la course ou alors sur une phase particulière comme les départs, montée en vitesse...etc...

#### \* Etude de départ

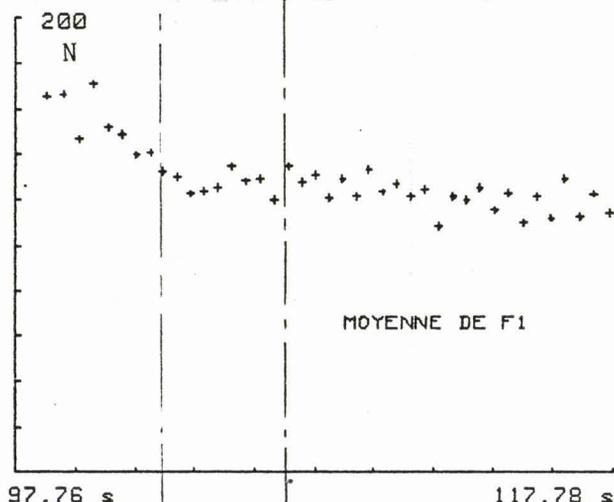
Nous voulons savoir comment varient certains paramètres pendant le " décollement " du kayak.

Exemple 1 : | Protocole n°3 (fig 7)  
| Essai sur un équipage  
| Vitesse variant de 0 à 5.5 m/s



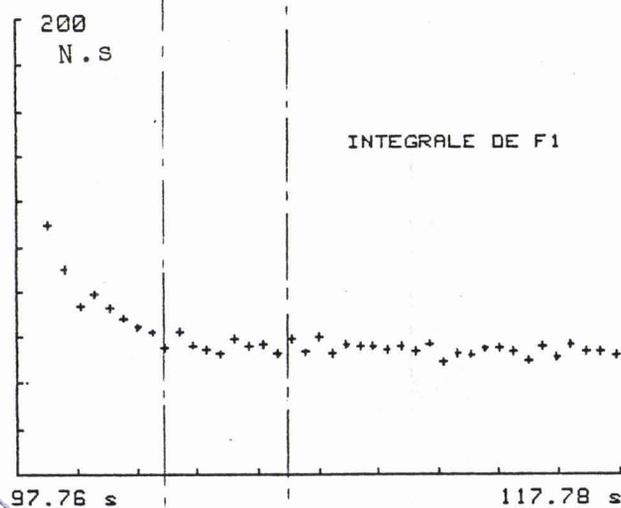
Représentation de la montée en vitesse suivie d'un plateau de vitesse.

- Fig 7a -



La moyenne de la force du pagayeur 1 décroît tout au long de la distance. Elle est très importante au départ.

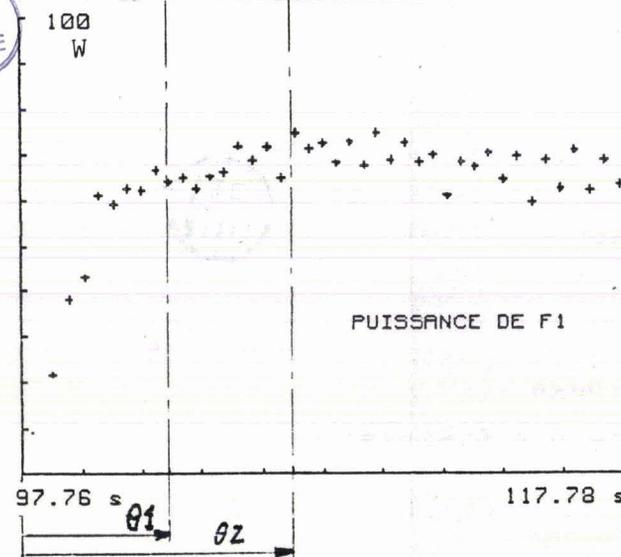
- Fig 7b -



L'intégrale de la force du pagayeur 1 décroît rapidement pendant le temps  $\theta_1$  puis se stabilise avant le temps  $\theta_2$  qui correspond à la fin de montée en vitesse  $\rightarrow$  faible constante de temps.

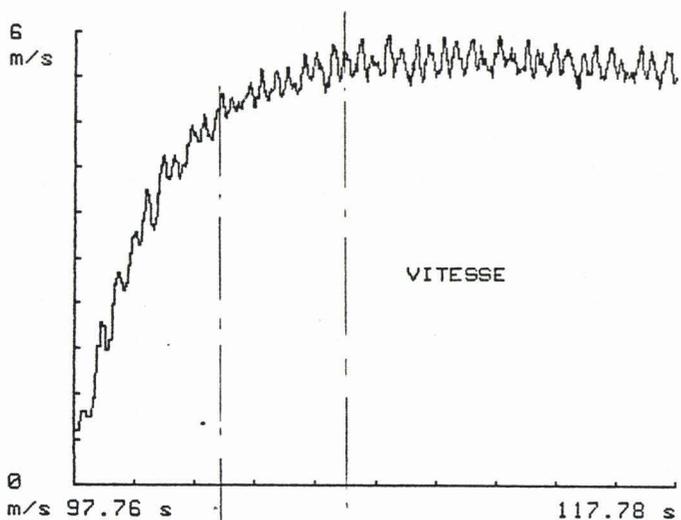
- Fig 7c -

Le tracé de puissance est similaire au tracé de vitesse  $\rightarrow$  forte constante de temps.

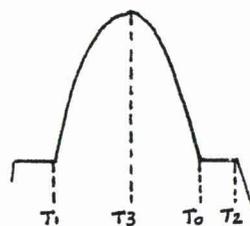


- Fig 7d -



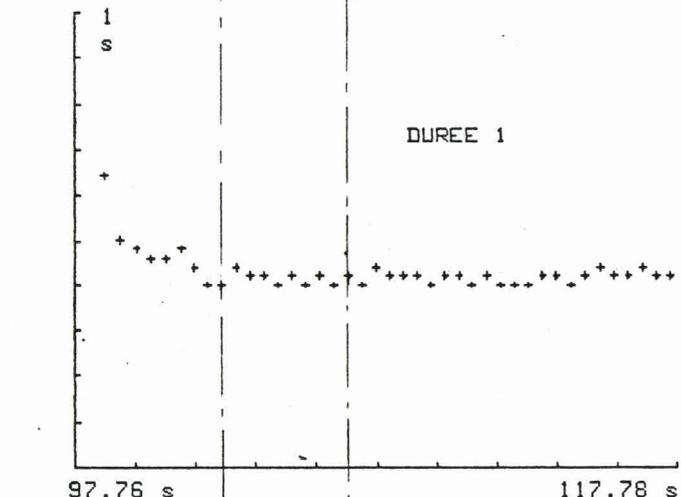


Rappel:



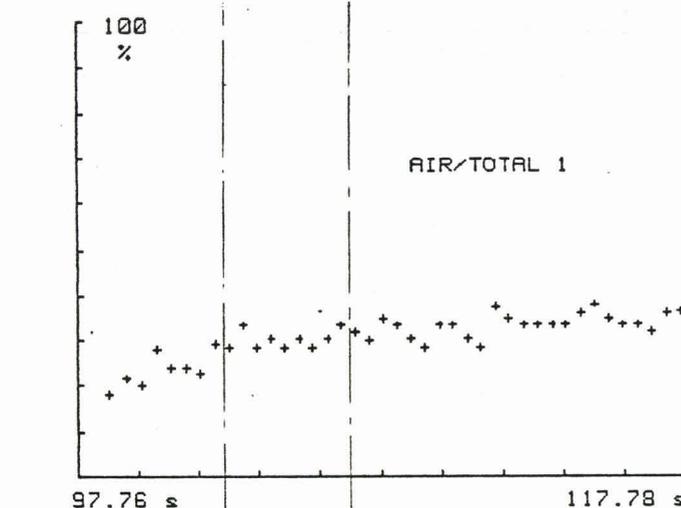
$$\text{Air/Total} = (T_2 - T_0) / (T_2 - T_1)$$

$$\text{Montée/Total} = (T_3 - T_1) / (T_0 - T_1)$$



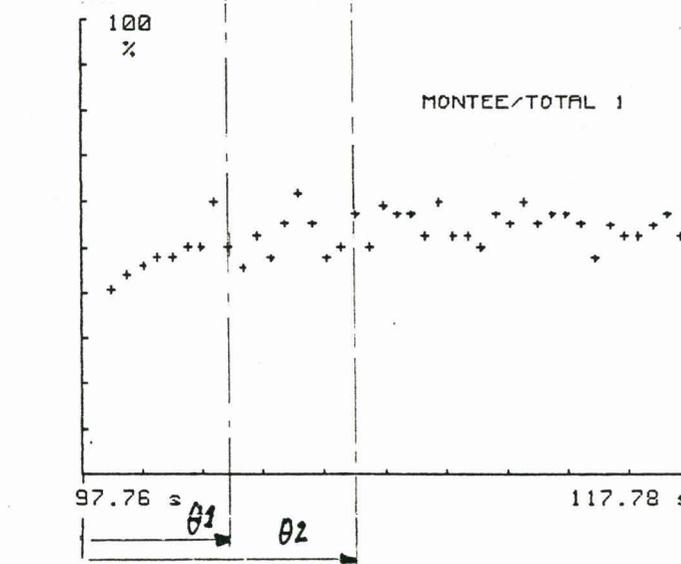
Durée de chaque coup de pagaie du pagayeur 1.  
 Ce paramètre décroît rapidement et se stabilise après le temps  $\theta_1$  donc bien avant la fin de la zone de "décollement" du bateau → Faible constante de temps.

- Fig 7e -



Les 2 derniers graphiques représentent pour chaque coup de pagaie, le temps passé dans l'air sur le temps total, et le temps de montée sur le temps total. Ces 2 paramètres se stabilisent après le temps  $\theta_2$  → Forte constante de temps.

- Fig 7f -



- Fig 7g -

Cet exemple montre que les paramètres régissant le système ont environ 2 constantes de temps différentes.

L'intégrale de la force et la durée de celle-ci se stabilisent rapidement, après le temps  $\theta_1$ , alors que les autres paramètres sont plus lents à se stabiliser ; il leur faut un temps  $\theta_2$ .

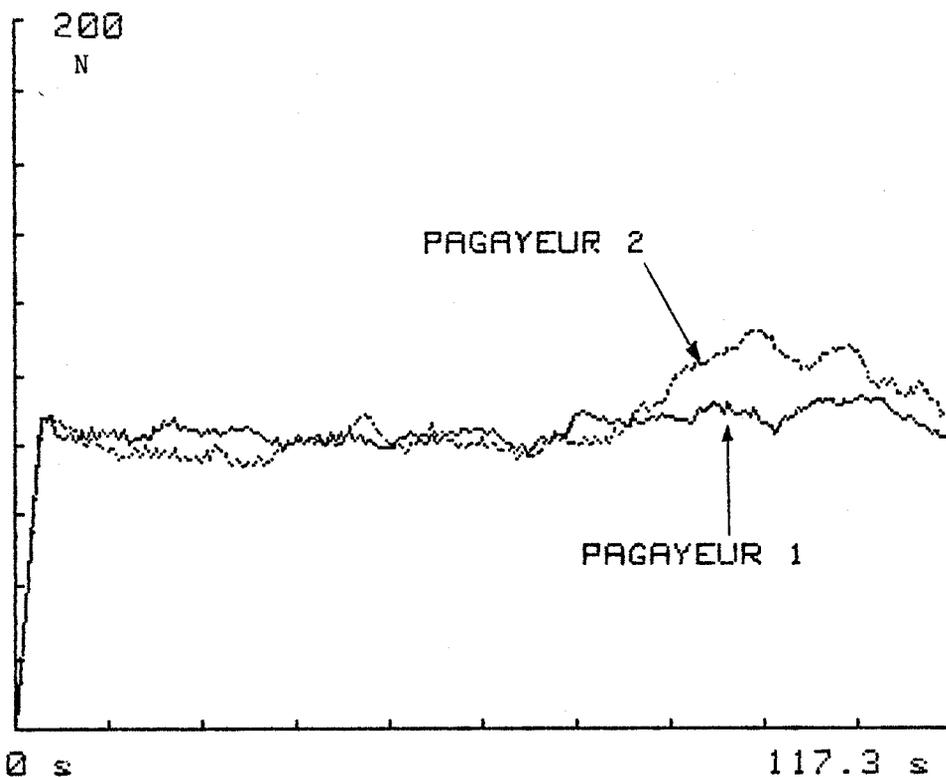
Remarque : on ne peut comparer directement un équipage à un autre, le décolllement du kayak étant directement lié au poids des athlètes et aux conditions extérieures (vent et courant). Par contre le rapport entre  $\theta_1$  et  $\theta_2$  est directement fonction de la technique employée.

\* Phénomène de régime pendant la course

Sur une longue distance, les athlètes ont souvent des régimes différents en fonction de leur consommation d'énergie et de leur faculté de récupération. Bien qu'ils soient conscients de ce phénomène, il leur est difficile de connaître avec précision les instants des différentes phases. Nous allons voir sur un exemple simple, qu'il est possible de visualiser ces régimes.

Exemple 2 : | Protocole n°1 (Fig 8)  
| Essai sur un équipage  
(voir figure page suivante)

Représentation des moyennes des forces de chaque pagayeur. On remarque très nettement le changement de régime du pagayeur 2 en fin de course. Ceci constitue une donnée fondamentale pour l'entraîneur, qui dispose d'une valeur quantitative du régime de l'athlète.



- Fig 8 -

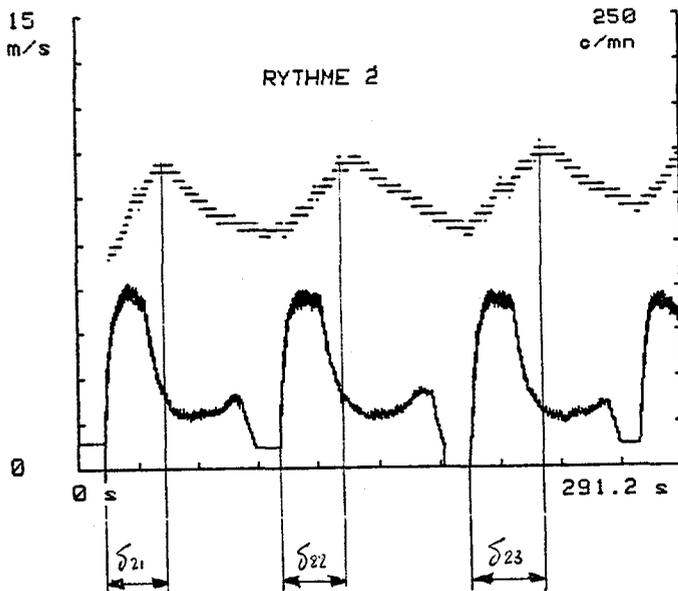
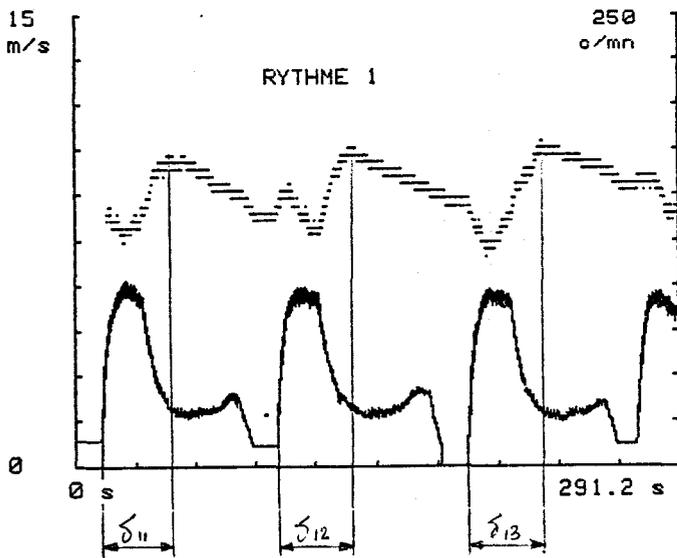
Variation des efforts exercés sur les pagaies au cours d'un 500 m.

Il faut remarquer que cette méthode est assez lourde, puisqu'elle nécessite un moyennage qui n'est pas prévu dans le logiciel " courbe 2 ". Nous verrons plus loin qu'il est plus souple d'utiliser une méthode de corrélation pour approcher ces phénomènes de changement de régime de l'athlète.

\* Récupération cardiaque

Pour bien mettre en évidence les caractéristiques physiologiques des athlètes, nous avons utilisé le 3ème protocole de mesure défini par une succession d'efforts de même durée entrecoupés de périodes de repos. L'exemple qui suit nous montre les différences au niveau de la charge cardiaque et de la récupération cardiaque chez les 2 athlètes d'un même équipage.

Exemple 3 : | Protocole n°3 (Fig 9)  
| Essai sur un équipage



Les 3 plateaux de vitesse s'accompagnent d'une variation de rythme cardiaque passant par des maximums intervenant après des temps  $\delta$  du début de chaque effort.

- Fig 9a -

Les 3  $\delta$  sont moyennés et nous donnent un temps moyen correspondant approximativement à la réserve énergétique de l'athlète.

$$\bar{\delta}_1 = 37.44 \text{ s}$$

$$\bar{\delta}_2 = 33.28 \text{ s}$$

Il va sans dire que plus ce paramètre est élevé, meilleure est la forme de l'athlète.

- Fig 9b -

La pente de la courbe après chaque maximum est caractéristique de la récupération cardiaque de l'athlète ; elle est donc directement liée aux conditions physiologiques de celui-ci. Ce test simple pourrait être fait plusieurs fois dans l'année pour " mesurer ", en quelques sortes, la forme physiologique de chaque athlète.

Remarque : le seul paramètre directement lié à la dépense énergétique est la consommation d'oxygène. Pour une raison de contrainte, il n'est pas envisageable de la mesurer dans notre application. On peut par contre approcher cette consommation par le biais du rythme cardiaque, mais cela reste une approche entachée d'un coefficient d'erreur. De plus l'activité cardiaque des athlètes peut être très différente selon les conditions de test, la forme physique, l'humeur...etc... Il faudra donc prendre toutes les précautions utiles pour faire ce genre d'essais.

### 3-3-2 Etude gestuelle

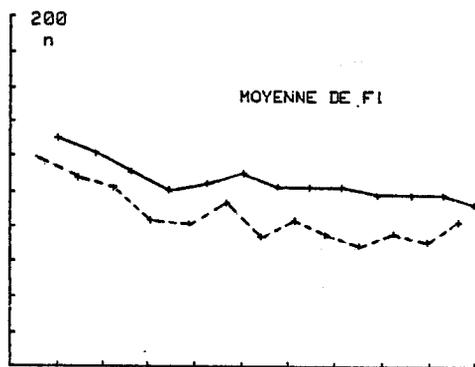
En dépouillant les résultats de la première campagne de mesure, il s'est avéré qu'un certain nombre d'athlètes, n'effectuaient pas le même geste à droite qu'à gauche. Cette dissymétrie se répercute sur tous les paramètres régissant le système ; les principaux étant, la force exercée sur la pagaie et la durée du coup de pagaie.

Si sur le plan physiologique, il est tout à fait normal d'avoir un bras plus fort que l'autre, sur le plan mécanique, les moments étant différents à droite et à gauche, il se crée un couple de rotation qui fait dévier le kayak de sa ligne de course.

L'exemple qui suit, nous montre la répercussion de cette dissymétrie sur quelques paramètres.

Exemple 4 : | Protocole n°1 (Fig 10)  
| Essai sur un équipage  
(voir figure page suivante)

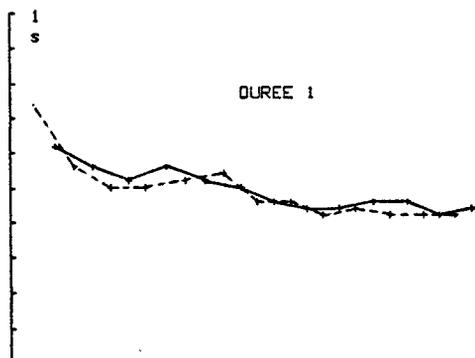
Il faut souligner que cet exemple a été relevé sur un athlète de l'équipe olympique, ce qui signifie que même sur les kayakistes d'un haut niveau (pour ne pas dire les meilleurs) on constate des anomalies importantes au niveau du geste.



— Coup droit  
- - - Coup gauche

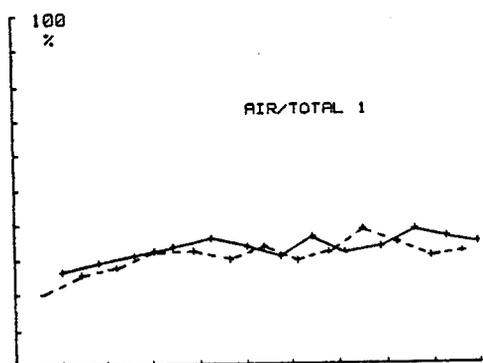
On distingue très nettement sur cette courte distance, la différence entre coup gauche et coup droit, en moyenne égale à 20 newtons/coup de pagaie.

- Fig 10a -



Le défaut de dissymétrie ne se répercute pas ici sur la durée du coup de pagaie, ni sur le rapport air/total, ce qui signifie que le geste est le même à droite et à gauche sauf en amplitude.

- Fig 10b -



Cette dissymétrie au niveau de l'amplitude des forces exercées est le défaut le plus fréquent chez les kayakistes.

- Fig 10c -



Chez certains athlètes, la dissymétrie se situe non plus au niveau de l'amplitude des efforts mais au niveau des durées des différentes phases constituant le coup de pagaie. C'est donc sur les paramètres " durée ", " rapport air/total " et " rapport montée/total " que l'on retrouve le défaut. Enfin sur certains, la dissymétrie se reporte à la fois sur les amplitudes et sur les durées donc pratiquement sur tous les paramètres régissant le système.

Nous allons, pour conclure cette étude gestuelle, recenser sur une population d'athlètes, l'importance de la dissymétrie au niveau de l'amplitude et de la durée des coups de pagaie.

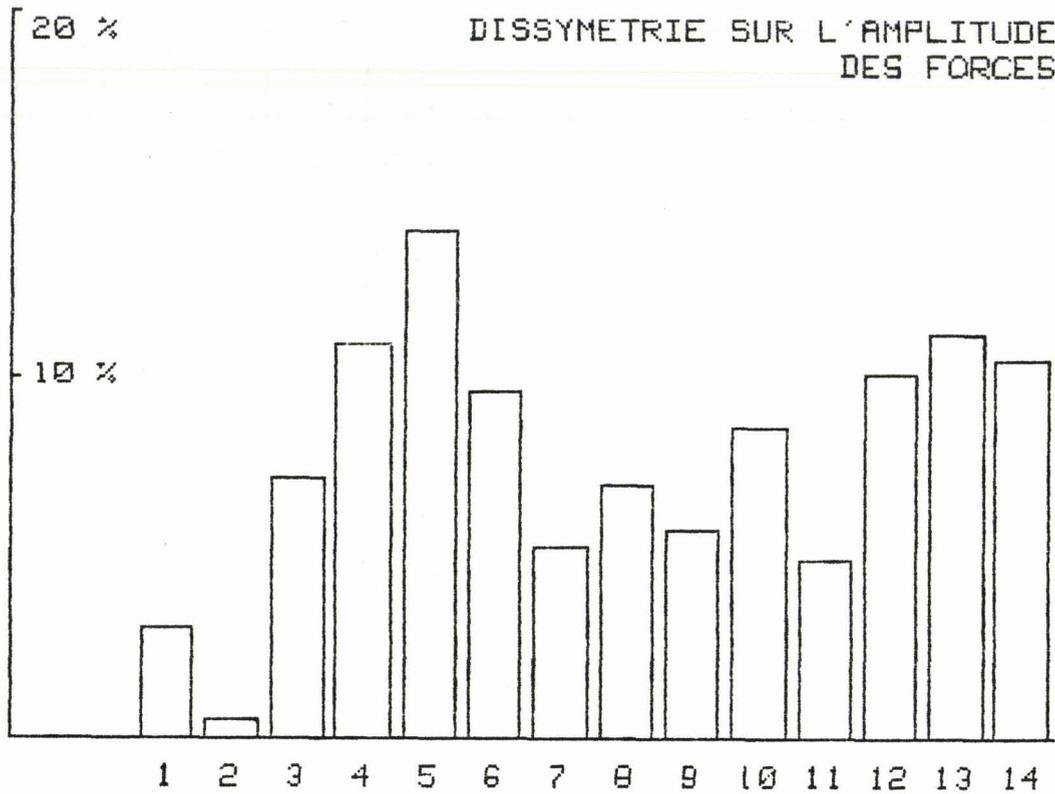
\* Forces moyennes à droites et à gauches (fig 11)

Les valeurs sont relevées sur des enregistrements de 500 m.

	FORCE MOYENNE GAUCHE EN n	FORCE MOYENNE DROITE EN n	DIFFERENCE EN n	DIFFERENCE EN %
PAGAYEUR 1	97.9	101.0	3.1	3.1
PAGAYEUR 2	94.7	95.2	.5	.5
PAGAYEUR 3	61.1	65.8	4.7	7.1
PAGAYEUR 4	48.3	54.2	5.9	10.9
PAGAYEUR 5	65.3	75.9	10.6	14.0
PAGAYEUR 6	51.5	56.9	5.4	9.5
PAGAYEUR 7	82.4	87.0	4.6	5.3
PAGAYEUR 8	84.5	90.8	6.3	6.9
PAGAYEUR 9	54.6	57.9	3.3	5.7
PAGAYEUR 10	57.5	52.6	4.9	8.5
PAGAYEUR 11	54.4	57.2	2.8	4.9
PAGAYEUR 12	52.7	58.6	5.9	10.1
PAGAYEUR 13	103.8	92.2	11.6	11.2
PAGAYEUR 14	92.4	103.1	10.7	10.4

La dernière colonne représente la différence droite/gauche en pourcentage par rapport au côté maximum. Cette différence peut être énorme puisque sur cet échantillon on observe qu'elle peut atteindre 14 % .



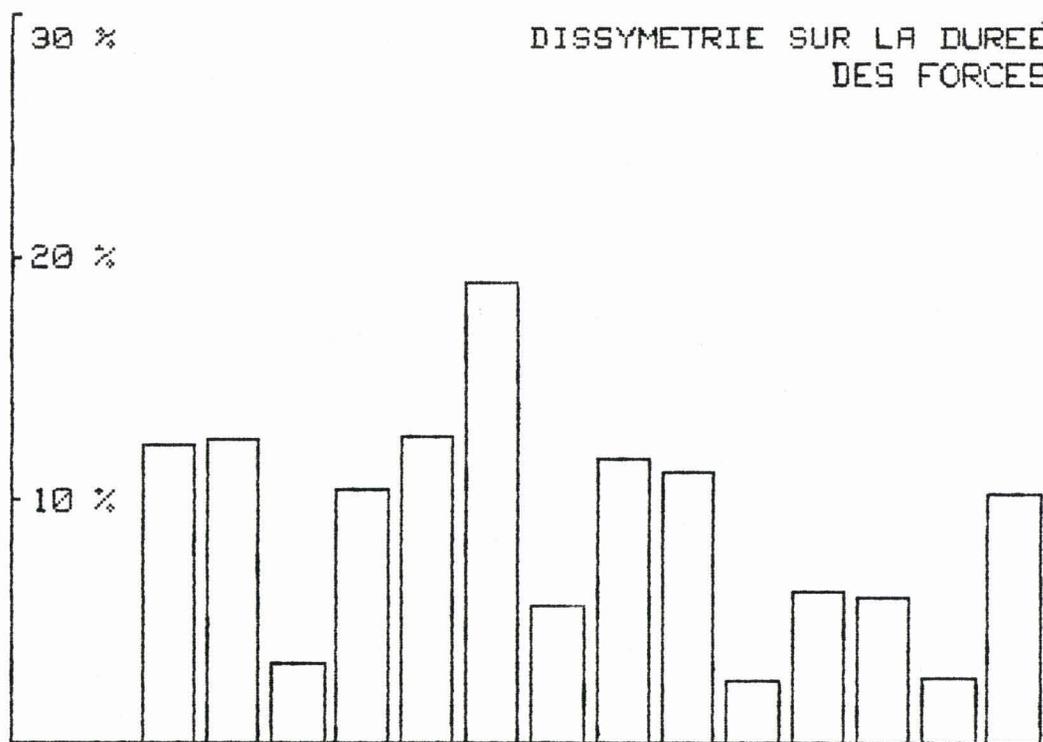


\* Durées moyennes à droite et à gauche (fig 12)

	DUREE COUP GAUCHE EN s	DUREE COUP DROITE EN s	DIFFERENCE EN s	DIFFERENCE EN %
PAGAYEUR 1	.456	.520	.064	12.308
PAGAYEUR 2	.441	.504	.063	12.500
PAGAYEUR 3	.509	.526	.017	3.232
PAGAYEUR 4	.477	.533	.056	10.507
PAGAYEUR 5	.538	.470	.068	12.639
PAGAYEUR 6	.453	.559	.106	18.962
PAGAYEUR 7	.537	.507	.030	5.587
PAGAYEUR 8	.480	.544	.064	11.765
PAGAYEUR 9	.660	.586	.074	11.212
PAGAYEUR 10	.575	.560	.015	2.609
PAGAYEUR 11	.558	.523	.035	6.272
PAGAYEUR 12	.495	.526	.031	5.894
PAGAYEUR 13	.450	.438	.012	2.667
PAGAYEUR 14	.477	.428	.049	10.273



Ce qui nous donne la représentation graphique suivante :



- Fig 12 - 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14

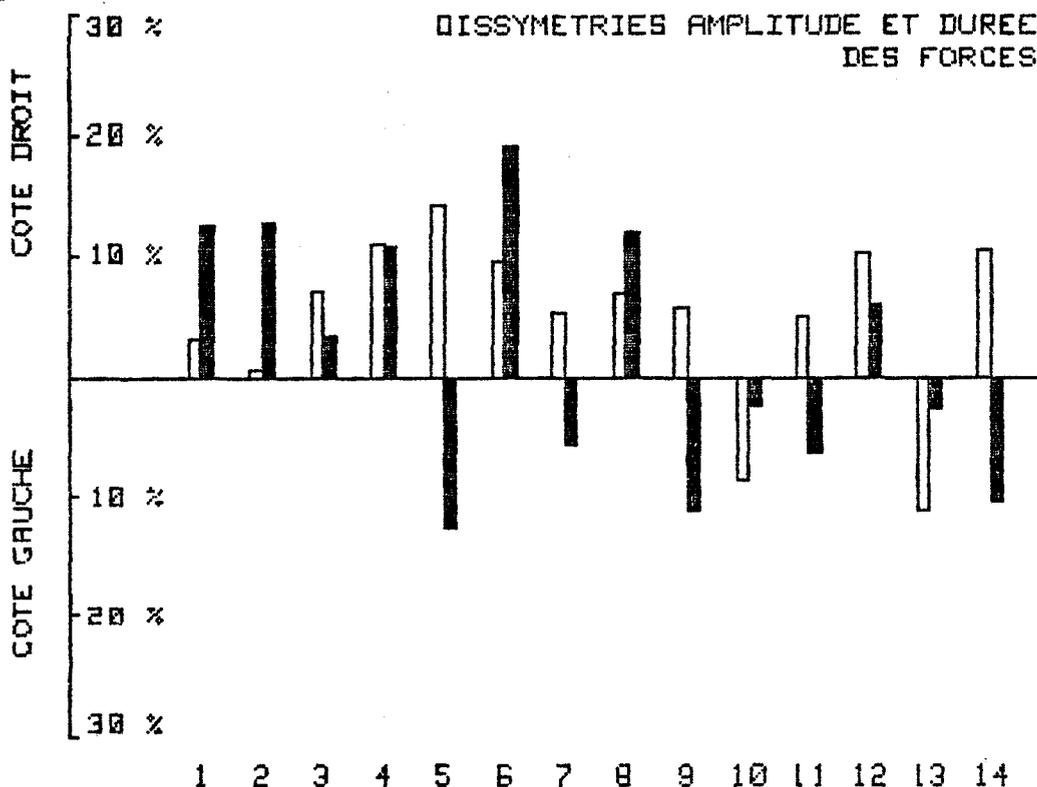
Là encore, les différences entre côtés gauches et droits peuvent atteindre des valeurs très élevées : le maximum est à 19 % dans notre échantillon (donc 1/5 de différence entre les durées moyennes droites et gauches). Si on fait une corrélation entre les 2 tableaux, on s'aperçoit qu'un certain nombre d'athlètes compensent (consciemment ou non), le défaut occasionné par la dissymétrie des forces, par la durée des coups de pagaies opposés.

Le tableau suivant illustre cette compensation.

	FORCE   LA + ELEVEE	DIFFERENCE   EN %	DUREE   LA + ELEVEE	DIFFERENCE   EN %
PAGAYEUR 1	D	3.1	D	12.3
PAGAYEUR 2	D	.5	D	12.5
PAGAYEUR 3	D	7.1	D	3.2
PAGAYEUR 4	D	10.9	D	10.5
PAGAYEUR 5	D	14.0	G	12.6
PAGAYEUR 6	D	9.5	D	19.0
PAGAYEUR 7	D	5.3	G	5.6
PAGAYEUR 8	D	6.9	D	11.8
PAGAYEUR 9	D	5.7	G	11.2
PAGAYEUR 10	G	8.5	G	2.6
PAGAYEUR 11	D	4.9	G	6.3
PAGAYEUR 12	D	10.1	D	5.9
PAGAYEUR 13	G	11.2	G	2.7
PAGAYEUR 14	D	10.4	G	10.3



Ce qui nous donne la représentation graphique suivante :



- Fig 13 -

Les autres athlètes adoptent, logiquement, un autre système de compensation ; ils peuvent mettre en oeuvre des masses différentes à droite et à gauche du centre de gravité du bateau et donc jouer sur la gîte de celui-ci, ou alors, chose plus grave, effectuer une correction grâce au gouvernail. (c'est la raison pour laquelle, nous avons tenu à faire une mesure de la position de celui-ci sur le kayak monoplace).

#### 3-4 Conclusions d'expérimentation

Nous venons d'énoncer, de manière condensée, l'analyse qui a été faite pendant un an d'expérimentation. Celle-ci ne s'est pas déroulée sans problèmes et nous allons en citer ici les principaux.

---

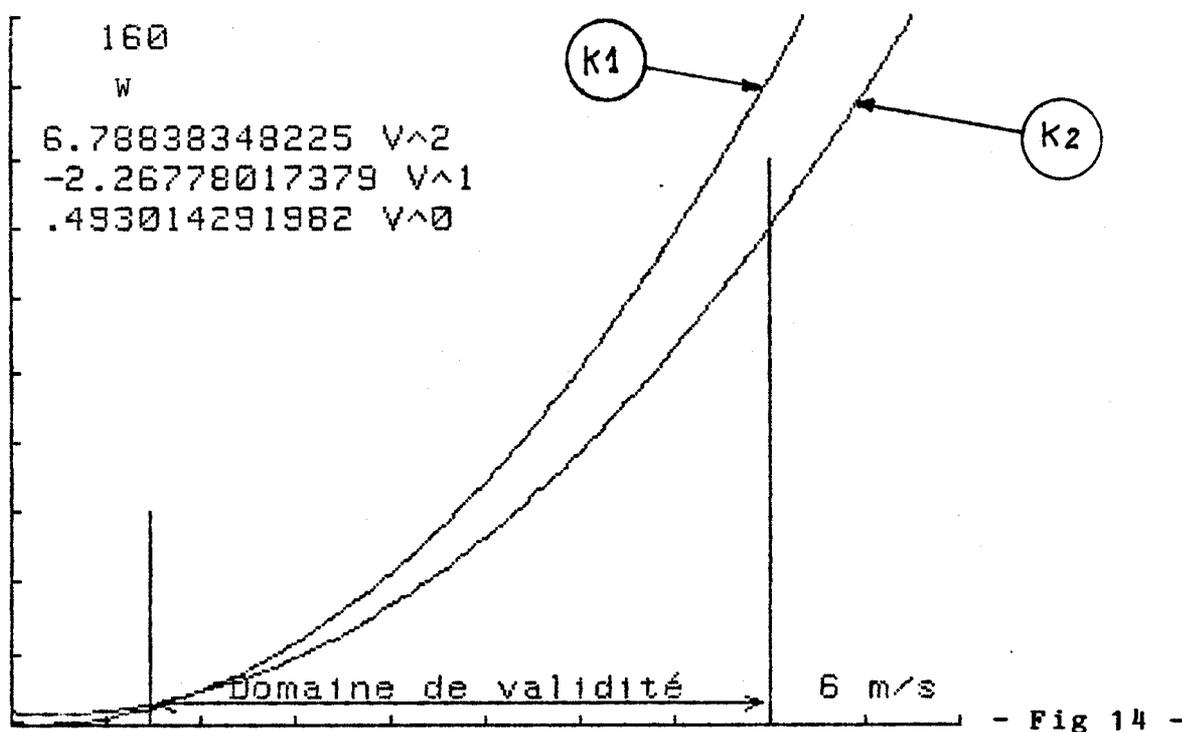
\* La traînée est caractérisée par la résultante des forces qui viennent freiner le kayak et qui s'opposent à l'avancement de celui-ci. Elle se décompose en une composante aérodynamique (dépendante du vent et de la partie immergée de l'ensemble) et en une composante hydrodynamique (dépendante du courant et de la partie immergée de l'ensemble).

3-4-1 Problèmes liés aux conditions d'expérimentation

\* Conditions extérieures

Le kayak et son équipage est un système léger. A cause de sa faible inertie, il est donc énormément soumis aux conditions extérieures, comme le vent et le courant. Ainsi un kayak monoplace (K1) effectuant un 1000 m, vent de dos, peut aller plus vite qu'un kayak 4 places (K4) effectuant la même distance, vent de face.

Le graphique ci-dessous illustre l'importance des conditions atmosphériques sur le résultat des mesures.



Ce tracé représente d'une part, la traînée d'un K2 dans de bonnes conditions atmosphériques et d'autre part, la traînée d'un K1 mesurée vent de face. On se rend compte que les conditions extérieures jouent énormément sur la traînée du K1 qui devrait en toute logique, être bien inférieure à celle du K2.

Ceci signifie que pour toute comparaison d'athlètes, évaluation d'efficacité, calcul de puissance dépensée...etc, il faudra impérativement, adjoindre au test, une mesure de traînée. Celle-ci joue le rôle de coefficient de correction. (fig 14)

\* Voir page précédente.

\* Répercussion de l'époque du test dans l'année

Les athlètes suivent un entraînement sportif tout au long de l'année, qui leur confère une forme physique maximale lors des compétitions officielles. Ils réalisent donc, selon l'époque, des performances plus ou moins grandes. On ne peut comparer un 500 m réalisé en période hivernale avec la même distance effectuée en période de compétition. Il faudra donc, tenir compte de ce phénomène dans toute comparaison d'athlète.

\* Problèmes liés au matériel

Le changement de matériel peut être la cause lui aussi, de contre-performances. En effet, chaque athlète a l'habitude de s'entraîner avec un matériel bien spécifique. Sa pagaie par exemple, a un matériau, une longueur, une angulation, qu'il juge optimaux. Le fait de changer de matériel lui procure une autre sensation qui lui est néfaste. Nous ne savons pas dans quelle mesure ce phénomène joue sur les résultats des mesures, et on ne peut que noter, les problèmes ressentis par l'athlète dans le fichier d'identification de l'enregistrement.

\* Facteur psychique

Le fait de subir un test, provoque chez certains athlètes une réaction psychique. Celle-ci va jouer un rôle motivateur ou au contraire créer un sentiment de trac qui se répercutera sur le test. Là encore, on ne connaît pas du tout l'importance de ce phénomène.

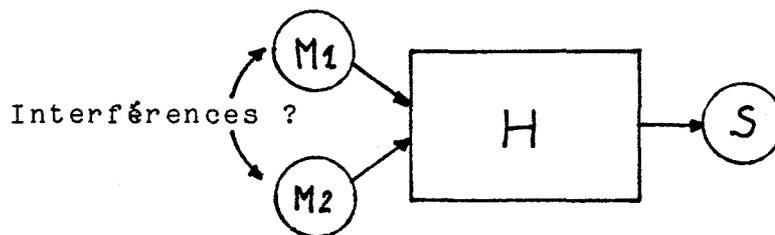
3-4-2 Constat sur cette première analyse

Cette première approche nous a permis, d'une part d'acquérir une certaine expérience concernant la prise de mesure, et d'autre part, de connaître l'évolution des paramètres régissant le système pendant la course ou une partie précise de celle-ci. De plus, elle nous a permis, de déceler un certain nombre de défauts sur des cas isolés.

Mais les traitements existants ne nous permettent toujours pas de déterminer l'efficacité d'un athlète. Celle-ci dépend de la transmission de l'énergie au kayak, donc du processus lui-même. La continuité de l'étude, appuyée sur l'expérience acquise, va donc se diriger selon 2 axes : caractérisation de la transmission de l'énergie et modélisation du système.

#### 4- Evolution de l'appareillage de mesure

L'étude théorique d'un kayak biplace est difficile à mener avec précision car l'apport énergétique au système se fait par le biais de 2 moteurs (les athlètes) et nous ne savons absolument pas comment ils se comportent entre-eux. (fig 15)



- Fig 15 -

S'ils sont indépendants, le bilan énergétique sera relativement simple. Par contre, s'il y a interférences entre les 2 moteurs, la modélisation sera beaucoup plus complexe et incomplète. (car on ne connaîtra jamais le degré de dépendance des entrées)

Afin de faciliter cette partie d'étude nous avons décidé d'équiper un kayak monoplace.

Il est agencé de la même manière que le kayak biplace. Cependant, le gain de mémoire au niveau de la centrale d'acquisition, nous a permis de relever un paramètre supplémentaire : la position du gouvernail.

#### 4-1 Utilisation pour des distances courtes

Organisation des données dans la centrale

Celles-ci sont stockées sous forme de mots de 9 octets / 40 ms



Cette organisation implique, d'une part, un nouveau programme d'acquisition appelé KAYAK 3 et d'autre part, des logiciels d'utilisation " FFCK 3 " et " COURBE 3 " capables d'effectuer des calculs et des tracés sur 17 mn. Enfin, la fréquence d'échantillonnage peut être divisée par 2, sans grande répercussion sur les signaux mesurés, ce qui porterait la durée d'acquisition à 35 mn.

CHAPITRE II

-----

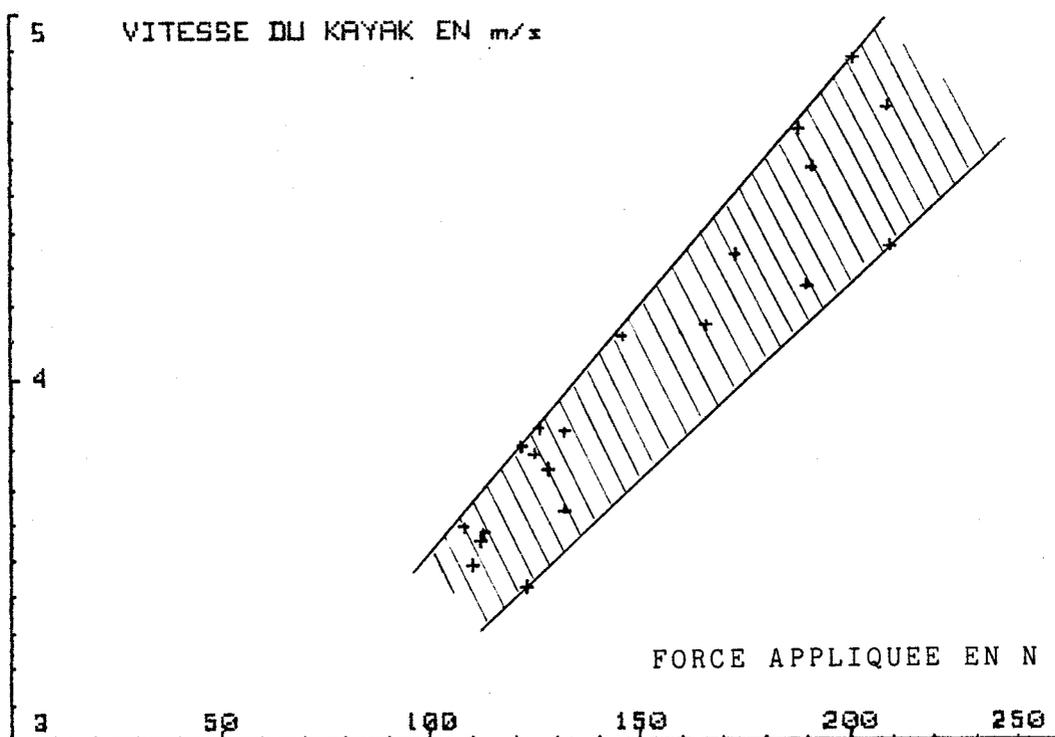
CARACTÉRISATION DE LA TRANSMISSION DE L'ÉNERGIE

PAR LES ATHLÈTES AU KAYAK

## INTRODUCTION

Nous cherchons ici à exprimer l'efficacité de l'athlète. Comme nous l'avons introduit au Chapitre 1, celle-ci dépend de plusieurs variables.

Le graphique ci-dessous représente, à partir d'un échantillon d'équipages, la vitesse moyenne obtenue, en fonction de la force appliquée, pour différentes distances.



- Fig 16 -

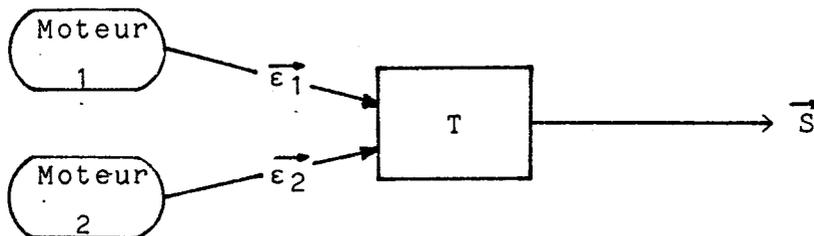
Ce tracé nous montre que la vitesse obtenue est comprise à l'intérieur d'une fourchette ; elle n'est donc pas directement proportionnelle à la force appliquée, mais fonction de plusieurs variables.

Parmi ces variables, il y a évidemment la Traînée qui joue un rôle prépondérant, mais également l'efficacité propre de chaque athlète que nous cherchons à exprimer.

Remarque : la trainée étant difficilement mesurable avec précision nous allons rechercher l'efficacité au sein d'un équipage. En effet, les 2 athlètes composant celui-ci sont soumis à exactement la même trainée et sont donc directement comparable.

### 1 - Corrélation entre force de "pagayage" et vitesse

La course en K2 se décompose ainsi :



- Fig 17 -

On a 2 sources d'énergie  $\vec{\epsilon}_1$  et  $\vec{\epsilon}_2$  qui proviennent de 2 moteurs indépendants quasi-synchrones. Ces 2 sources d'énergie se combinent pour produire une force  $\vec{S}$ .

$$\vec{S} = f(\vec{\epsilon}_1, \vec{\epsilon}_2)$$

Nous cherchons à connaître dans quelles mesures ces sources d'énergie concrétisent à la sortie S : il faut faire appel à la notion de corrélation pour répondre à ces questions. (Réf13)

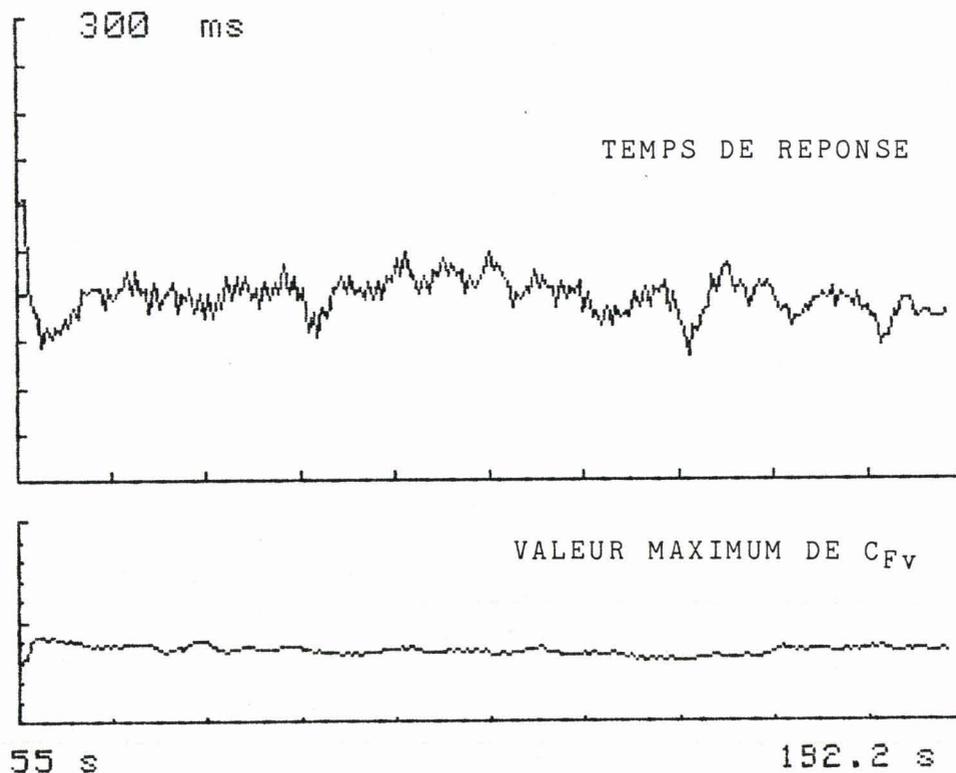
#### 1 - 1 Détermination de la constante de temps de réponse du kayak

Supposons dans un premier temps que la force d'entrée soit unique et égale à  $(F1 + F2)$   
la fonction d'intercorrélation est :

$$C_{Fv}(\tau) = 1/T \int_0^T (F1(t') + F2(t')) \cdot v(t' - \tau) \cdot dt'$$

T représentant la fenêtre sur laquelle on effectue la corrélation. (T = 500 ms ou 25 acquisitions).

On obtient sur le même graphique la valeur maximum de  $C_{FV}$  et le temps de réponse pour chaque coup de pagaie.  
Les 2 courbes sont moyennées sur 5 coups afin de voir la valeur moyenne.



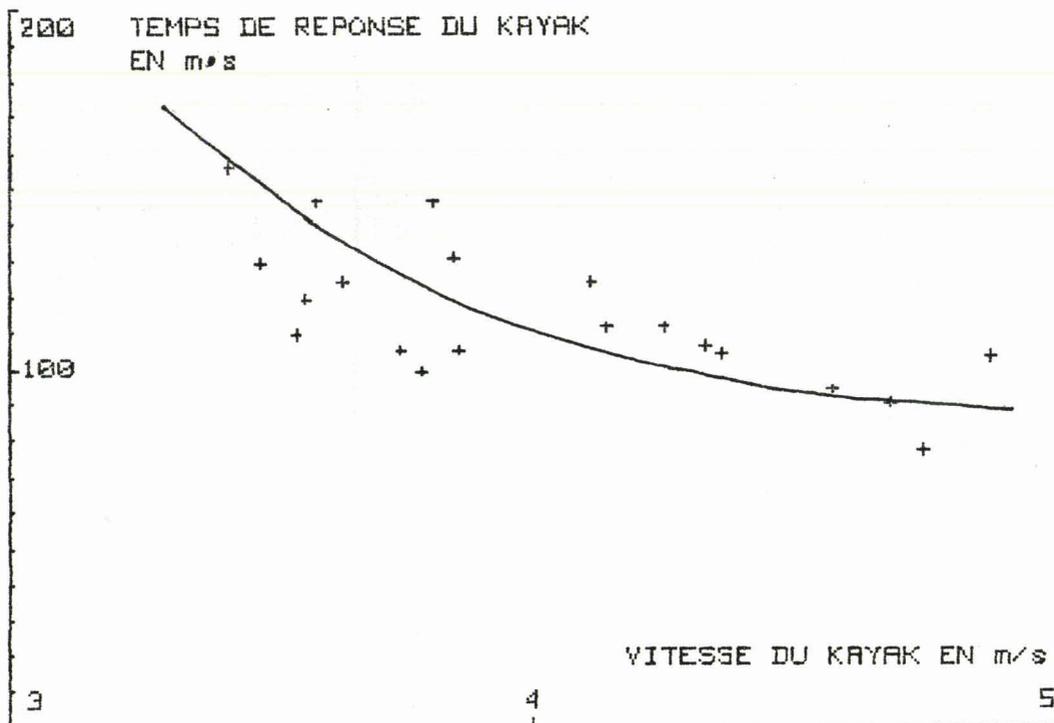
- Fig 18 -

De ce traitement on tire un 1er résultat intéressant, c'est la réaction du système (kayak + athlètes) à l'impulsion ( $F1 + F2$ ). C'est une constante de temps qui intervient dans le transfert T.

Les résultats pratiques nous donnent des constantes comprises entre 90 ms et 150 ms.

Répartition de cette constante de temps en fonction de la vitesse.

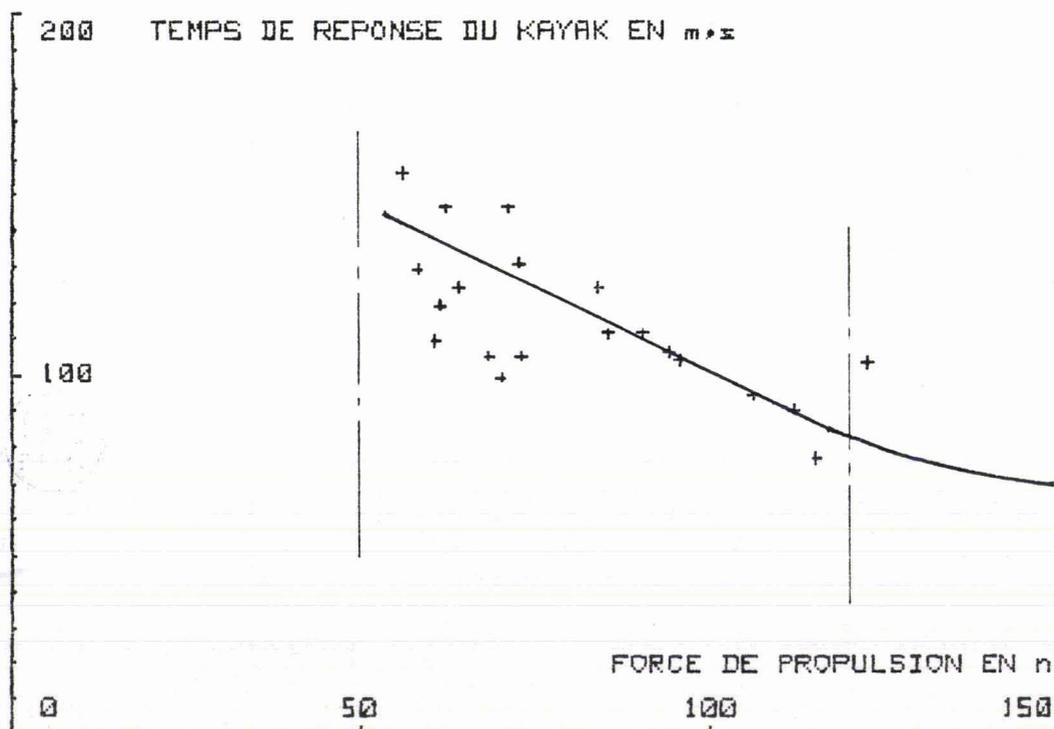




- Fig 19 -

La non linéarité de la courbe peut s'expliquer par le terme de traînée, qui est issu d'une fonction du 3ème ordre de la vitesse.

On peut éliminer ce phénomène, en représentant directement le temps de réponse du kayak en fonction de la force de propulsion.



- Fig 20 -

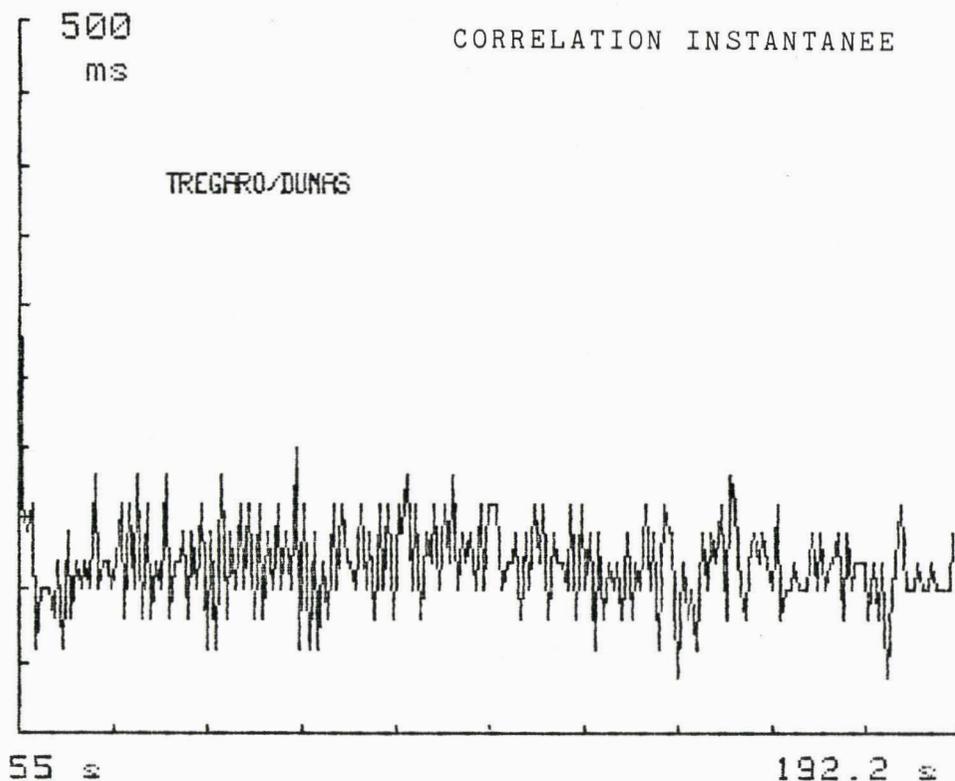
La dispersion des points est due, d'une part, à l'imprécision de mesure de trainée, et d'autre part, aux différentes techniques de pagayage.

On peut approximer, dans la fourchette 50 n + 120 n, un tronçon de courbe linéaire sachant qu'au delà de cette limite, la pente de la courbe s'adoucie. Ce phénomène n'est pas apparent expérimentalement, mais on peut s'en douter physiquement. En effet, le temps de réponse du kayak ne peut décroître indéfiniment avec la même pente, ce qui voudrait dire, qu'à partir d'une certaine force de propulsion, on aurait des constantes négatives. (ce qui n'a pas de sens physique)

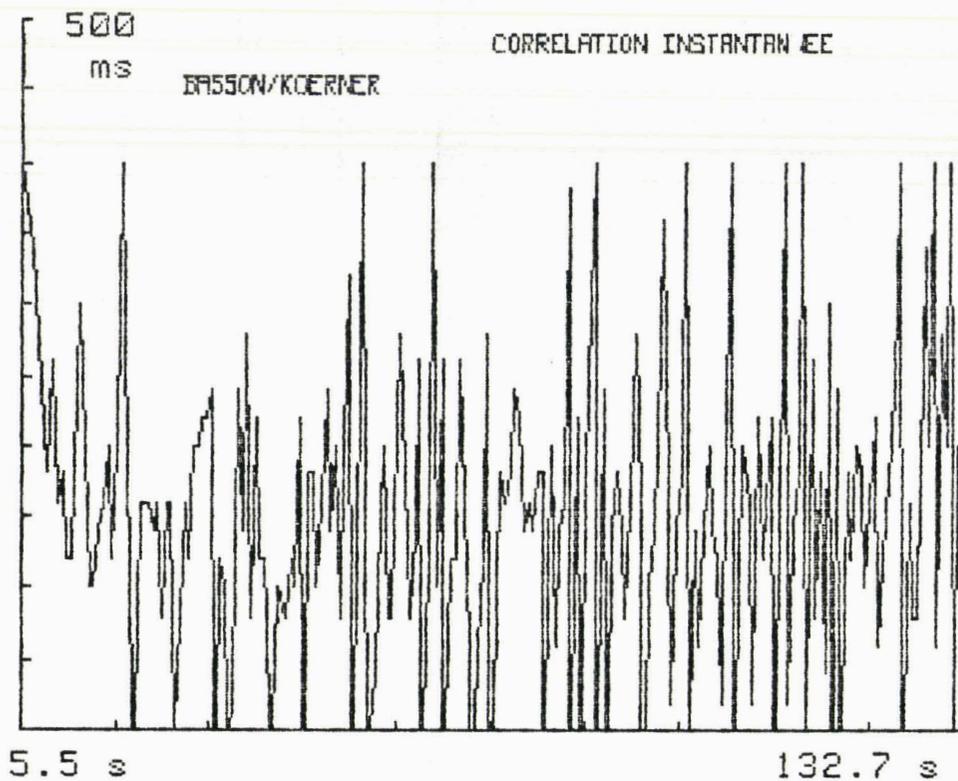
### 1 - 2 Corrélation instantanée

Reprenons le même traitement que précédemment, mais supprimons le moyennage. (nous l'avons appelé " corrélation instantanée " afin de le différencier du 1er traitement)  
On obtient le même type de courbes mais beaucoup plus bruitées.

Exemple :



- Fig 21a -

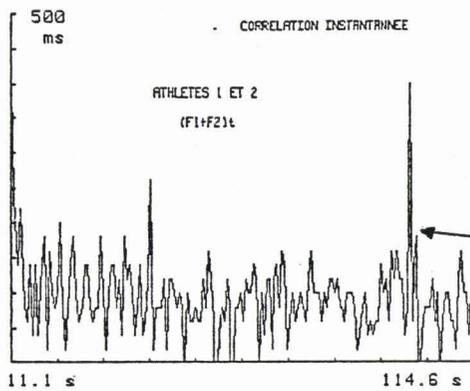


- Fig 21b -

Interprétation : on détecte un certain nombre d'anomalies sur le 2ème graphique, témoin de l'irrégularité de l'équipage. L'écart type du paramètre tracé,  $\sigma$ , nous donne une quantification de la régularité d'un équipage. Ce traitement nous permet de visualiser " l'entente " de l'équipage et pourra servir, à long terme, à la constitution de nouveaux équipages. On peut se demander dans un 2ème temps, quelle est l'explication de ces anomalies et surtout la provenance de celles-ci. Est-elle issue du payeur 1, du payeur 2 ou des 2 ? Pour répondre à cette question, il faut recommencer le traitement par rapport à chaque entrée.



Exemple :

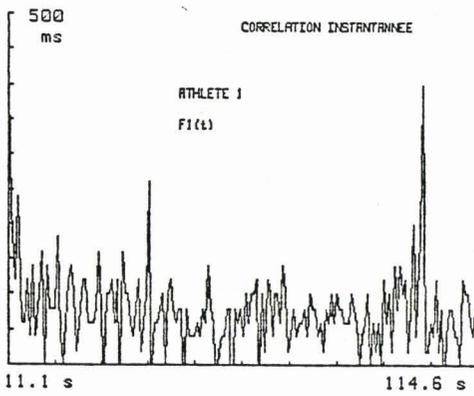


Corrélation entre (F1+F2) et v

$$C_{FV}(\tau) = 1/T \int_0^T (F1+F2)t' \cdot v(t'-\tau) dt'$$

Détection d'une anomalie

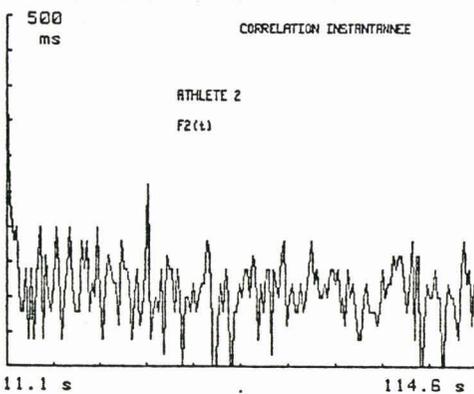
- Fig 22a -



Corrélation entre F1 et v

$$C_{F1v}(\tau) = 1/T \int_0^T F1(t') \cdot v(t'-\tau) dt'$$

- Fig 22b -



Corrélation entre F2 et v

$$C_{F2v}(\tau) = 1/T \int_0^T F2(t') \cdot v(t'-\tau) dt'$$

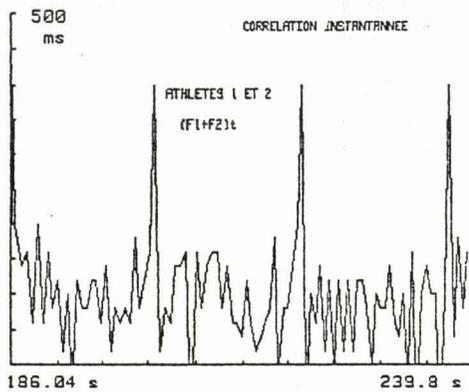
- Fig 22c -



Cet exemple nous montre la détection d'une anomalie au cours d'un 500 m. Le traitement effectué par rapport à chaque entrée montre que cette anomalie provient du payeur 1. Cela signifie que la montée en vitesse et le coup de pagaie correspondant ne sont pas corrélés, ou le sont pour un retard  $\tau$  très important. Nous voyons donc ici, se dégager une notion d'efficacité propre à un coup de pagaie. Enfin, l'analyse du film vidéo par l'entraîneur, pourra renforcer l'explication de ce phénomène.

Nous allons voir sur un autre exemple, que toutes les anomalies détectées, n'aboutissent pas forcément au même effet.

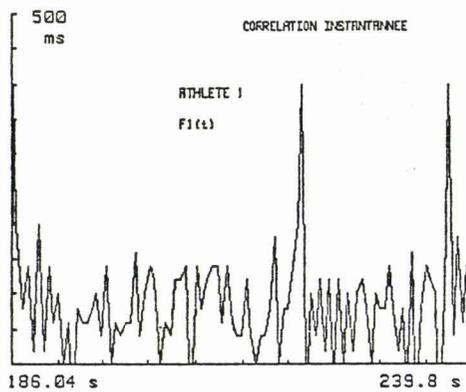
Exemple :



Corrélation entre (F1+F2) et v(t)

$$C_{FV}(\tau) = 1/T \int_0^T (F1+F2)t'.v(t'-\tau)dt'$$

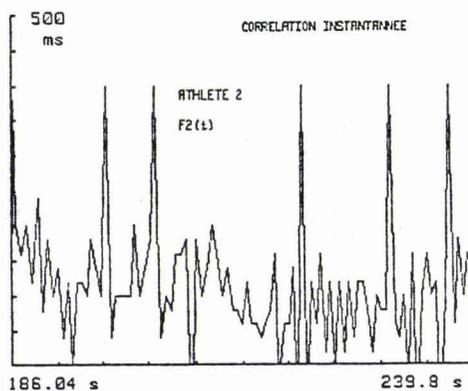
- Fig 23a -



Corrélation entre F1 et v

$$C_{F1V}(\tau) = 1/T \int_0^T F1(t').v(t'-\tau)dt'$$

- Fig 23b -



Corrélation entre F2 et v

$$C_{F2V}(\tau) = 1/T \int_0^T F2(t').v(t'-\tau)dt'$$

- Fig 23c -



Sur cet équipage on recense 3 catégories d'anomalies qui se répercutent sur le comportement de la vitesse.

- en t1 et t4 : 2 anomalies détectées sur le pagayeur 2 que l'on ne retrouve pas au niveau du 1er graphique. L'effet n'est pas très important.

- en t2 : 1 anomalie détectée sur le pagayeur 2 que l'on retrouve sur le 1er graphique : effet important. (mauvaise montée en vitesse -> coup de pagaie 2 inefficace)

- en t3 et t5 : 2 anomalies détectées sur chaque pagayeur qui se retrouvent évidemment sur le 1er graphique. Le défaut est donc commun à l'équipage et il s'agit probablement d'une perte d'équilibre dans le kayak provoquant une gîte momentanée. (pas de montée en vitesse -> coups de pagaie 1 et 2 inefficaces)

### Conclusion :

Ce traitement permet, d'une part, de juger de l'entente d'un équipage et d'autre part de détecter des anomalies au sein de celui-ci. Elles peuvent être attribuées à l'un ou à l'autre des pagayeurs, ou aux deux, et proviennent toutes d'un mauvais comportement de la vitesse. On peut donc conclure qu'elles correspondent à des défauts dont l'effet est mauvais.

### 1 - 3 Coefficient de corrélation entre chaque pagayeur et la vitesse

Nous reprenons les mêmes traitements que précédemment, mais analysons, cette fois, le coefficient de corrélation.

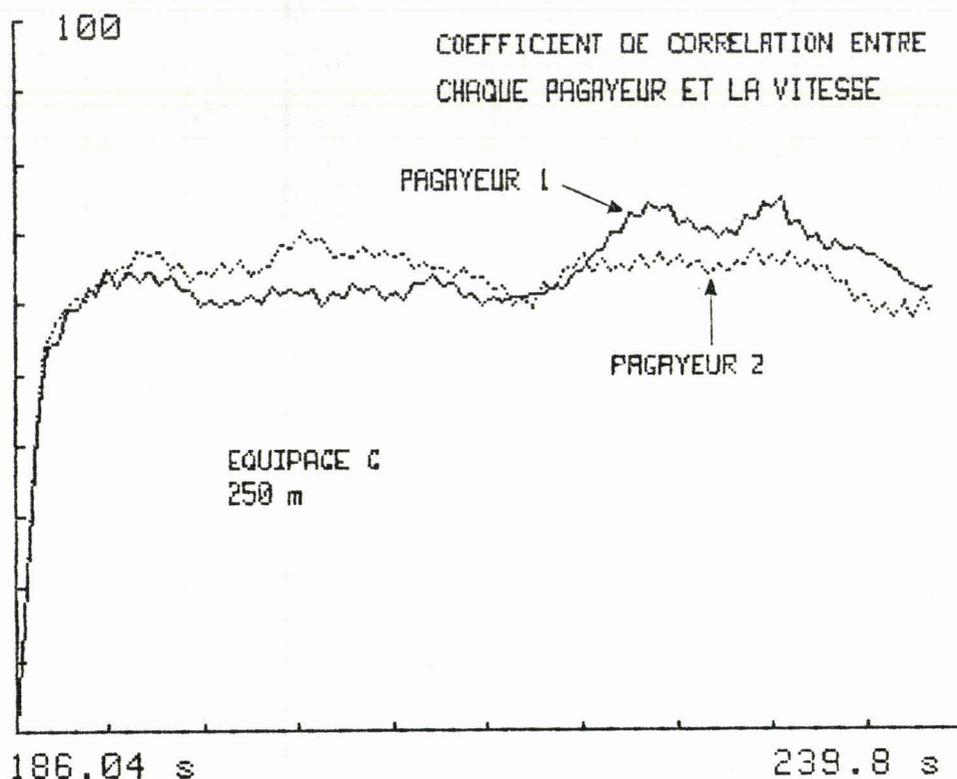
$$C_{F1v}(\tau) = 1/T \int_0^T F1(t') \cdot v(t'-\tau) dt'$$
$$C_{F2v}(\tau) = 1/T \int_0^T F2(t') \cdot v(t'-\tau) dt'$$

On obtient ici la concrétisation à la sortie, de la part de chaque pagayeur.

### Exemple :

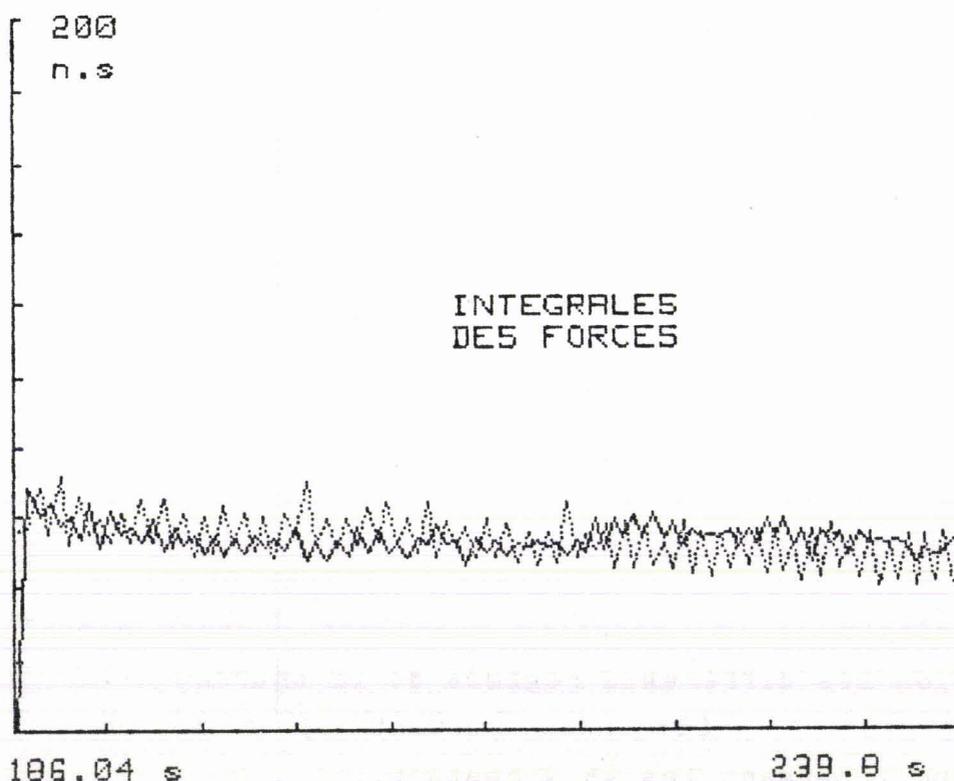
On se rend tout de suite compte de l'intérêt de ce traitement. L'entraîneur et les sportifs eux-mêmes peuvent connaître avec précision les différents régimes de la course.

Le pagayeur 2 prédominant pendant 55 % du temps puis le pagayeur 1 pendant les 45 % restant.



- Fig 24 -

Nous allons comparer maintenant ce traitement avec les intégrales des forces de chaque pagayeur. (directement proportionnelles à l'énergie fournie par ceux-ci)



- fig 25 -

Les 2 graphiques ne sont pas vraiment corrélés ensemble. Cependant, on ne peut affirmer pour autant, que le coefficient de corrélation entre chaque force et vitesse est synonyme d'efficacité. En effet, la corrélation est un artifice mathématique faisant appel à la multiplication de 2 signaux. Elle est donc sensible à la valeur moyenne de ceux-ci. On pourrait éventuellement, centrer les variables, en leur retranchant systématiquement leur moyenne :

$$F(t) \text{ ---> } (F(t) - F_{\text{moy}})$$

$$v(t) \text{ ---> } (v(t) - V_{\text{moy}})$$

Mais pour notre application, ceci n'est pas intéressant, car au niveau de la vitesse, c'est directement la valeur moyenne que l'on exploite et non pas les variations de celle-ci.

#### Conclusion :

Les différents traitements effectués, utilisant la corrélation ont permis d'atteindre plusieurs objectifs.

Dans un premier temps, ils ont servi à caractériser le système puisqu'un nouveau paramètre régissant celui-ci a été mis en évidence. Il s'agit de la constante de temps de réponse du kayak à l'impulsion force.

La corrélation instantannée, ensuite, a permis de détecter un certain nombre d'anomalies propres à chaque athlète, correspondant parfois à des coups de pagaie inefficaces. Enfin, l'exploitation du coefficient de corrélation permet de détecter les régimes de course et l'efficacité des athlètes au sein d'un même équipage.

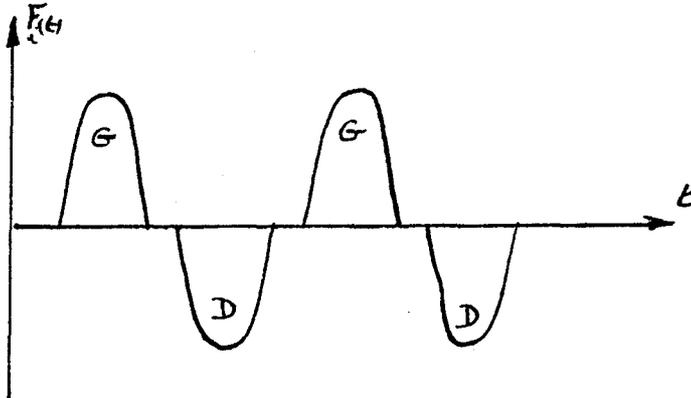
## 2 - Relations énergétiques entre force de "pagayage" et force de propulsion

Il est intéressant de faire une analyse du contenu spectral des signaux force et vitesse de façon à voir sur quelles fréquences se transmet l'énergie et si cette caractéristique, dépend ou non, de la technique utilisée.

2 -1 Représentation spectrale des forces des pagayeurs  
(Réf 14)

Soit  $F_1(t)$  la force du pagayeur 1

Soit  $F_2(t)$  la force du pagayeur 2



- Fig 26 -

Cette fonction est quasi périodique mais non périodique ;  
il faut donc la traiter comme un signal quelconque.  
(Cf. annexe 1).

La transformée de Fourier nous donne :

$$F(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(t) \cdot e^{-2\pi j\nu t} dt$$

qui se décompose en partie réelle et partie imaginaire.

$$R [F(\nu)] = \int_{-\infty}^{+\infty} F(t) \cdot \cos(2\pi\nu t) dt$$

$$I [F(\nu)] = \int_{-\infty}^{+\infty} F(t) \cdot \sin(2\pi\nu t) dt$$

On ne s'intéresse uniquement qu'au module

$$| F(\nu) | = \sqrt{R [F(\nu)]^2 + I [F(\nu)]^2}$$

Méthode : Utilisation d'un calculateur de Transformée de Fourier d'une résolution de 2048 pts. (Réf 15,16)

Etant donné que la fréquence d'échantillonnage des signaux injectés est de 50 Hz, la définition du spectre sera de :

$$\Delta\nu = 1/T_0 = F_e/n = 50/2048 = 24.4 \cdot 10^{-3} \text{ Hz}$$

$T_0$  = largeur de fenêtre

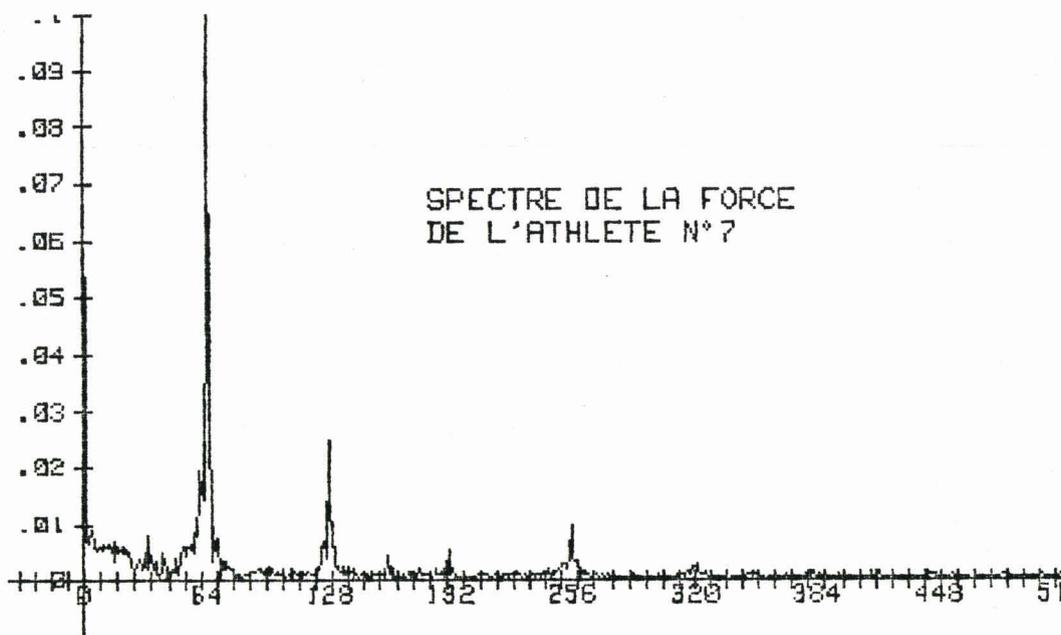
$F_e$  = fréquence d'échantillonnage

$n$  = nombre de points

La période d'un coup de pagaie étant d'environ 0,6 s la largeur de fenêtre nous permet d'effectuer la TF sur environ 70 coups de pagaie. (35 à gauche et 35 à droite)

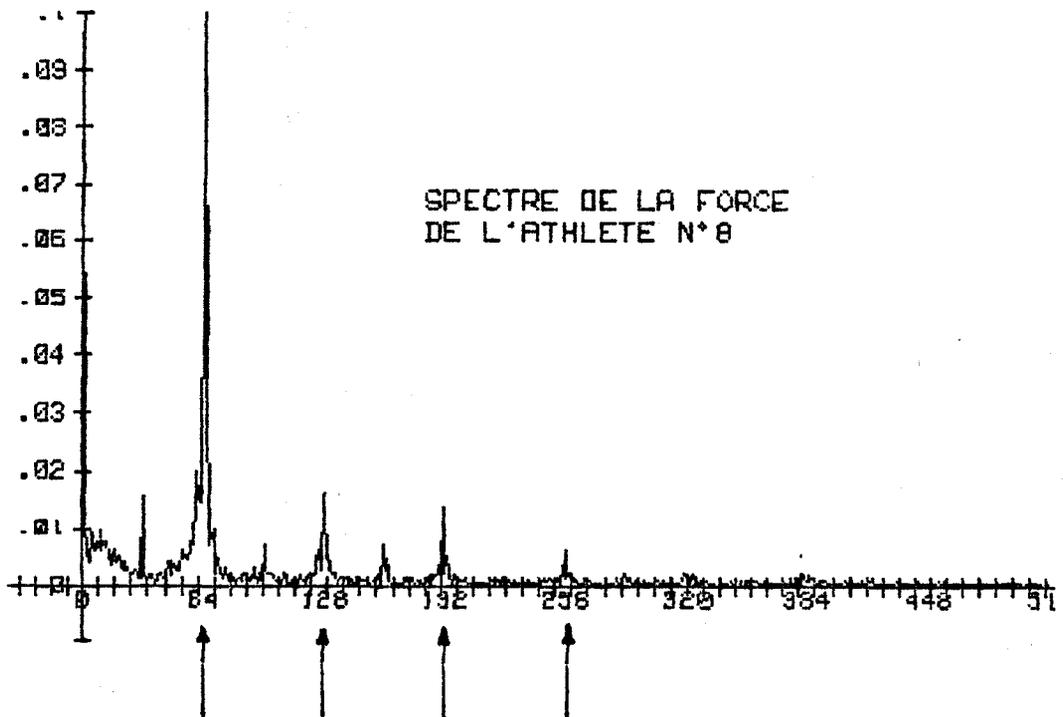
Exemple : Equipage D

Cet exemple représente les transformées de fourier des forces de chaque pagayer constituant l'équipage. On distingue nettement sur celui-ci, que l'énergie des signaux se répartie sur plusieurs raies.



- Fig 27a -





Raies : Raie0 Raie1 Raie2 Raie3

- Fig 27b -

Fréquences : Fo 2Fo 3Fo 4Fo

Interprétation :

Sur ces graphiques, on retrouve le fondamental du signal d'amplitude importante, et les harmoniques beaucoup plus faibles que celui-ci.

| Raie 0 = fondamental

| Raies (i) = harmoniques (i)

Au fondamental correspond, bien entendu, la fréquence de pagayage  $F_0$ .

Des petites raies supplémentaires peuvent apparaître à  $F_0/2$  et  $(k + 1) F_0/2$ . Celles-ci résultent des problèmes de dissymétrie des pagayeurs. Les 2 mains des athlètes peuvent être assimilées à 2 moteurs indépendants dont la fréquence des fondamentaux sera  $F_0/2$ . Si l'amplitude du coup, à droite et à gauche, est en moyenne différente, la combinaison des fondamentaux n'est plus nulle, d'où l'apparition de raies à  $F_0/2$  et  $(k + 1) F_0/2$ .

## 2 - 11 Constatations sur la répartition énergétique des signaux forces

Nous allons étudier, dans ce paragraphe, l'importance du phénomène sur une population d'athlètes, dans le but de connaître la répartition d'énergie entre fondamental et harmoniques.

### Remarques :

- L'énergie contenue dans une raie est proportionnelle à l'intégrale de celle-ci. Malheureusement, la précision du spectre, notamment sur les harmoniques, ne permet pas d'approcher cette valeur. Nous allons donc uniquement, exploiter l'amplitude des raies pour cette étude.

- On ne peut comparer directement les amplitudes des raies, car celles-ci sont évidemment fonction de l'énergie dépensée dans les coups de pagaies. Nous standardisons les raies par rapport à leur fondamental respectif, de manière à obtenir des résultats significatifs et comparables.

A cet effet, on définit 3 rapports :

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{R_0} = \frac{\text{harmonique 1}}{\text{fondamental}}$$
$$\alpha_2 = \frac{R_2}{R_0} = \frac{\text{harmonique 2}}{\text{fondamental}}$$
$$\alpha_3 = \frac{R_3}{R_0} = \frac{\text{harmonique 3}}{\text{fondamental}}$$

Il reste maintenant à définir le rapport entre énergie contenue dans les harmoniques et énergie contenue dans le fondamental :

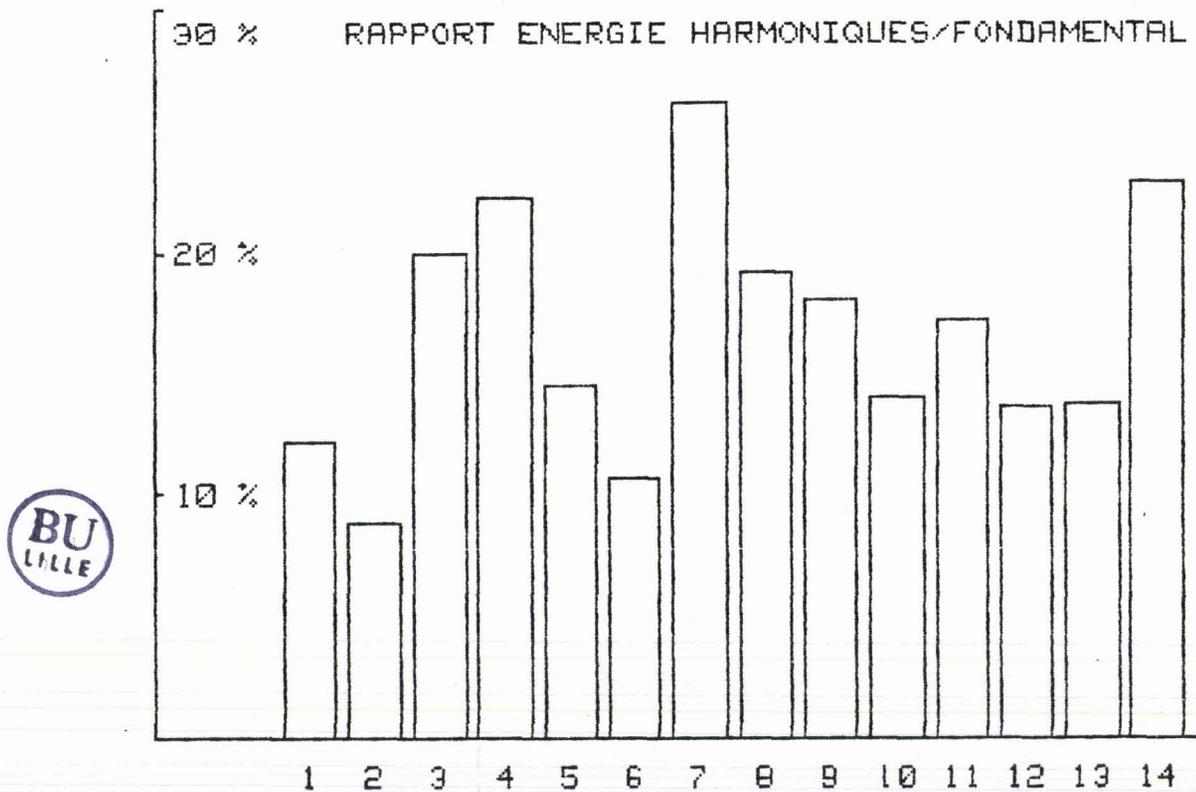
$$P = \sqrt{\frac{R_1^2 + R_2^2 + R_3^2}{R_0^2}}$$

(P est exprimé en pourcentage)

Résultats :

	ALPHA 1	ALPHA 2	ALPHA 3	P EN %
PAGAYEUR 1	.096	.024	.070	12.12
PAGAYEUR 2	.037	.073	.032	8.79
PAGAYEUR 3	.165	.086	.072	19.95
PAGAYEUR 4	.165	.127	.081	22.34
PAGAYEUR 5	.132	.031	.050	14.45
PAGAYEUR 6	.085	.048	.045	10.75
PAGAYEUR 7	.239	.050	.095	26.20
PAGAYEUR 8	.141	.118	.056	19.22
PAGAYEUR 9	.168	.048	.048	18.12
PAGAYEUR 10	.110	.085	.021	14.06
PAGAYEUR 11	.139	.066	.077	17.21
PAGAYEUR 12	.071	.094	.068	13.60
PAGAYEUR 13	.109	.060	.059	13.77
PAGAYEUR 14	.192	.078	.098	22.92

Ce qui correspond à l'histogramme suivant :



- Fig 28 -

Interprétations de ces résultats :

Sur un échantillon de 14 pagayeurs, on se rend compte que



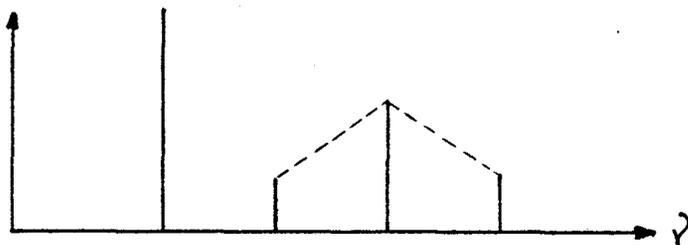
l'énergie centrée sur les harmoniques n'est pas négligeable du tout par rapport à celle présente sur le fondamental. Les résultats donnent une fourchette comprise entre 8.79 % et 26.2 % . De plus, ce résultat est approché par défaut, car la précision du calculateur de transformée de Fourier ne nous permet pas d'obtenir les harmoniques d'ordre supérieur à 3 qui sont plus ou moins noyés dans le bruit.

On peut tout de même, donner le résultat suivant : les techniques de pagayage actuelles, aboutissent à une répartition de l'énergie entre le fondamental et les harmoniques, dans les proportions 5/6 et 1/6. Nous ne savons pas si l'énergie présente sur les harmoniques est utilisée ou perdue, mais on se rend compte, intuitivement, qu'il vaut mieux que cette énergie soit concentrée sur le fondamental seul. Cette théorie tend à prouver que certains gestes sont à éliminer, et en particulier ceux riches en harmoniques comme l'onde carrée.

2 - 12 Classification des différentes techniques utilisées

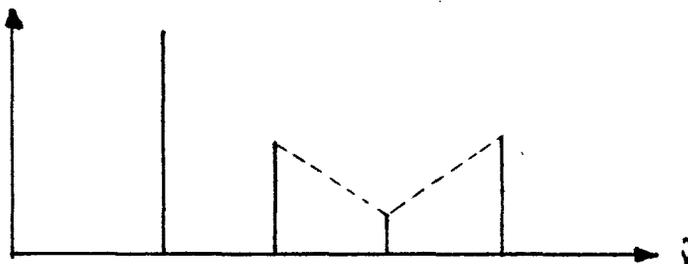
Selon la technique employée, les différentes raies s'harmonisent selon un ordre différent.

3 groupes se distinguent :



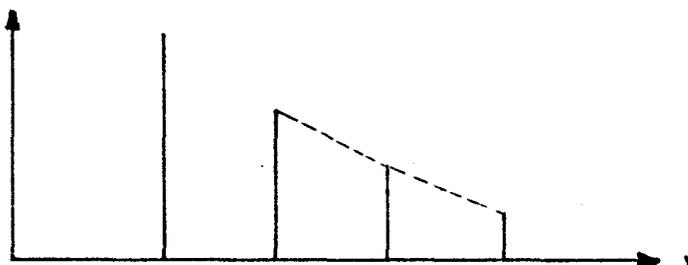
cas de 2 équipages

- Fig 29a -



cas de 5 équipages

- Fig 29b -



cas de 7 équipages

- Fig 29c -

Cette caractéristique est directement liée à la forme d'onde du geste. On doit cependant remarquer que les "bons" et "moins bons" se classent indifféremment dans les 3 groupes. On doit pouvoir expliquer le phénomène d'harmonisation des raies soit par le biais de traitements statistiques comme la fonction de répartition des forces, soit par la transformée de Fourier de différentes modélisations.

En outre, on dispose ici, d'un outil de classement scientifique des différents gestes. (il faut rappeler qu'actuellement, les entraîneurs recensent 2 types de gestes : le coup explosif et le coup fluide)

## 2 - 13 Modélisations de gestes

Plusieurs gestes ont été modélisés dans le but d'analyser leur répartition énergétique. Le rapport entre énergie concentrée sur les harmoniques et énergie concentrée sur le fondamental, sera utilisé comme critère d'efficacité.

Avec ce postulat de départ, on se rend vite compte que le geste idéal sera une onde sinusoïdale pure. Ainsi l'énergie serait concentrée uniquement sur le fondamental et l'efficacité maximale. Ce geste n'est pas, mécaniquement parlant, réalisable. Il faut réserver un temps aérien suffisant, à l'athlète, pour lui permettre de changer de côté.

Ainsi, plusieurs formes de geste seront étudiées en fonction de leur rapport air/total. (temps passé dans l'air/Temps total du coup de pagaie)

4 types de gestes ont été modélisés :

- Arches de sinusoïde
- (Arches de sinusoïde)<sup>2</sup>
- Onde triangulaire
- Onde carrée

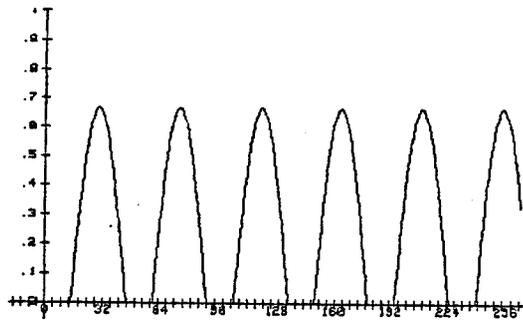
et 2 défauts majeurs :

- Dissymétrie durée
- Dissymétrie amplitude

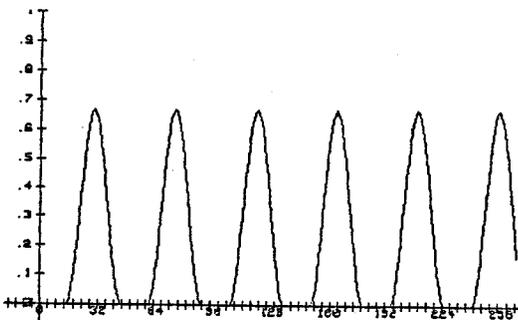
Remarque : nous avons étudié ici la valeur absolue du signal.

Résultats :

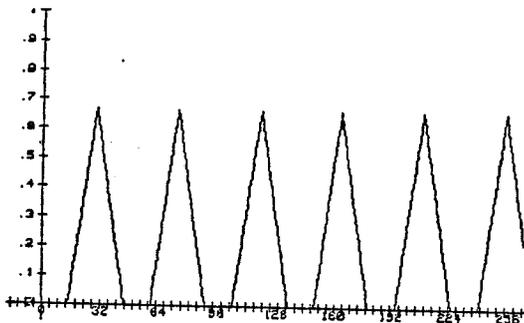
Modélisation du geste



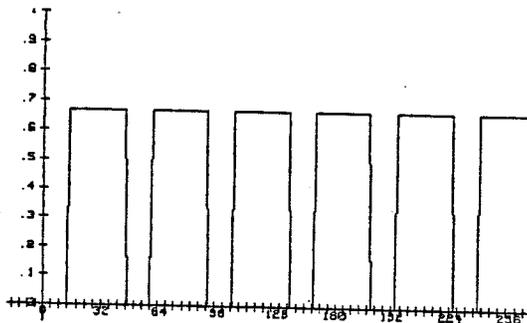
- Fig 30a -



- Fig 30b -

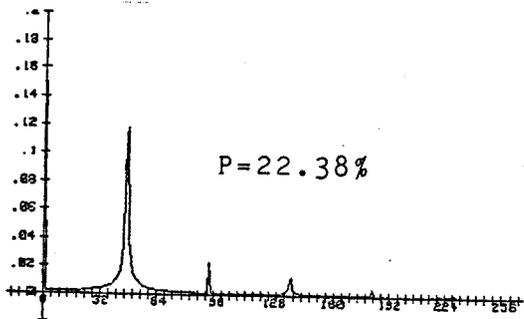


- Fig 30c -

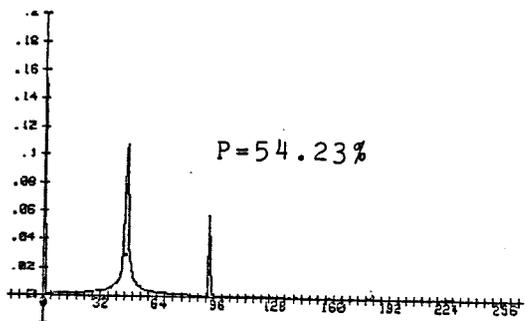


- Fig 30d -

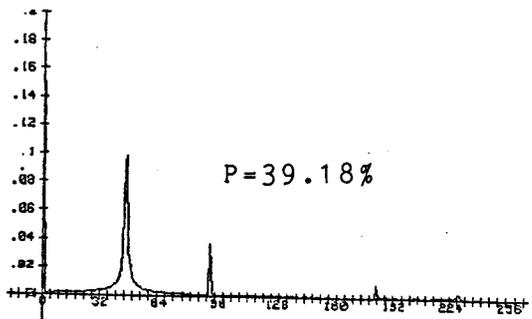
Spectre du geste et rapport P obtenu



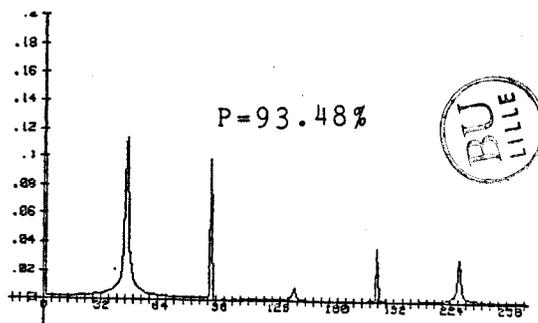
- Fig 31a -



- Fig 31b -

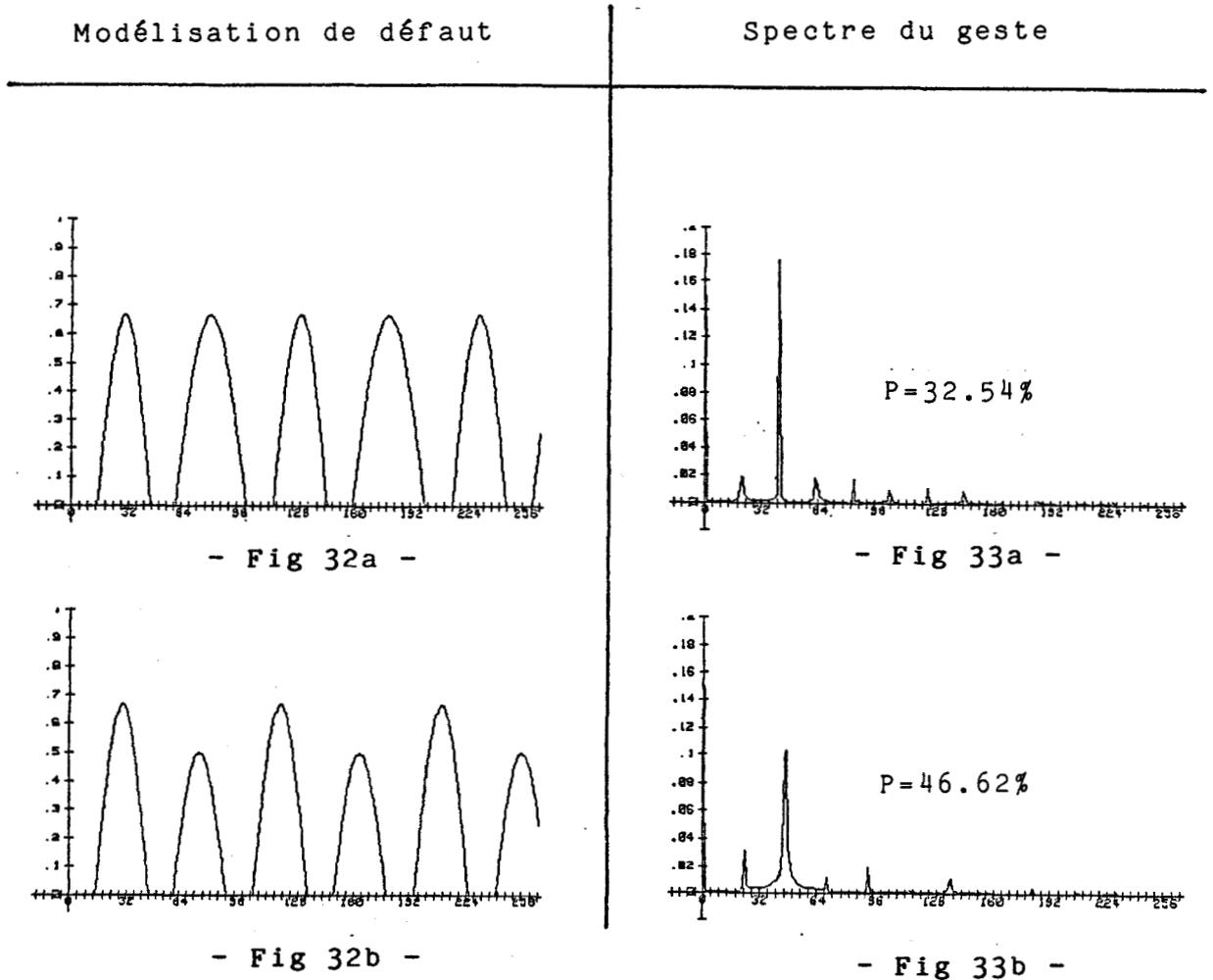


- Fig 31c -



- Fig 31d -

Tous les modèles étudiés ont le même rapport air/total ( $R=30\%$ ) que l'on rencontre en moyenne, en pratique. Pour cette valeur, c'est le signal constitué d'arches de sinusofide qui est le plus efficace avec un rapport énergétique  $P$  de  $22.4\%$ .



En ce qui concerne les défauts occasionnés par les dissymétries sur la durée et sur l'amplitude des coups de pagaie, 2 points importants se dégagent : d'abord, l'apparition de raies supplémentaires à  $F_0/2$  et  $(k + 1) F_0/2$ , dont l'explication en a été donnée au § 2-10 et la diminution, comme on s'en doutait, de l'efficacité du geste.

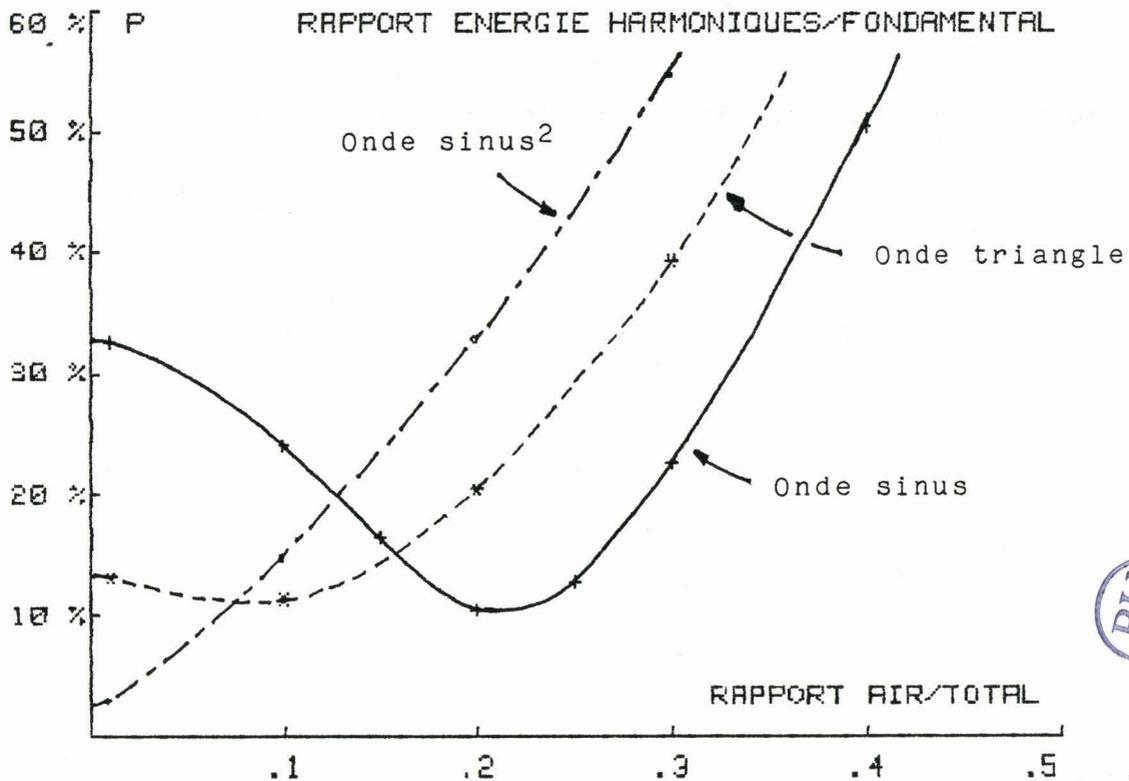
Il est également intéressant de connaître l'évolution du rapport énergétique  $P$ , en fonction du rapport air/total et ce sur plusieurs types de geste.

Résultats :

P en %	Arches de sinus	Arches de sinus <sup>2</sup>	Onde triangle	Onde carrée
0.01	32.5	2.5	13	
0.1	24	14.4	11.3	218
0.2	10.4	32.4	20.4	144
0.3	22.4	54.2	39.2	93.4
0.4	50.4	78.9	63.1	57.6

On voit déjà, sur ce tableau, que l'onde carrée est à proscrire, car pour un rapport air/total de 0.3, il y a pratiquement autant d'énergie dans les harmoniques que dans le fondamental.

Représentation graphique



- Fig 34 -

Interprétation

Le rapport énergétique P, des 3 gestes étudiés, onde sinus, onde (sinus)<sup>2</sup>, onde triangle, croît en fonction du rapport air/total. L'efficacité du geste est donc inversement propor-

tionnelle au rapport air/total. Il faut noter que certaines fonctions passent par un minimum. Il est donc possible d'optimiser le geste de manière à obtenir l'efficacité maximale. Le meilleur rapport énergétique est obtenu par le signal constitué d'arches de sinusofide dont le rapport air/total est de 0.2 (P environ 10 %).

Conclusion :

D'autres modélisations pourraient être faites, pour d'une part s'approcher plus de la réalité et d'autre part optimiser davantage le geste du kayakiste. Cela n'était pas le but de cette étude qui était simplement destinée à approcher l'efficacité de différentes techniques.

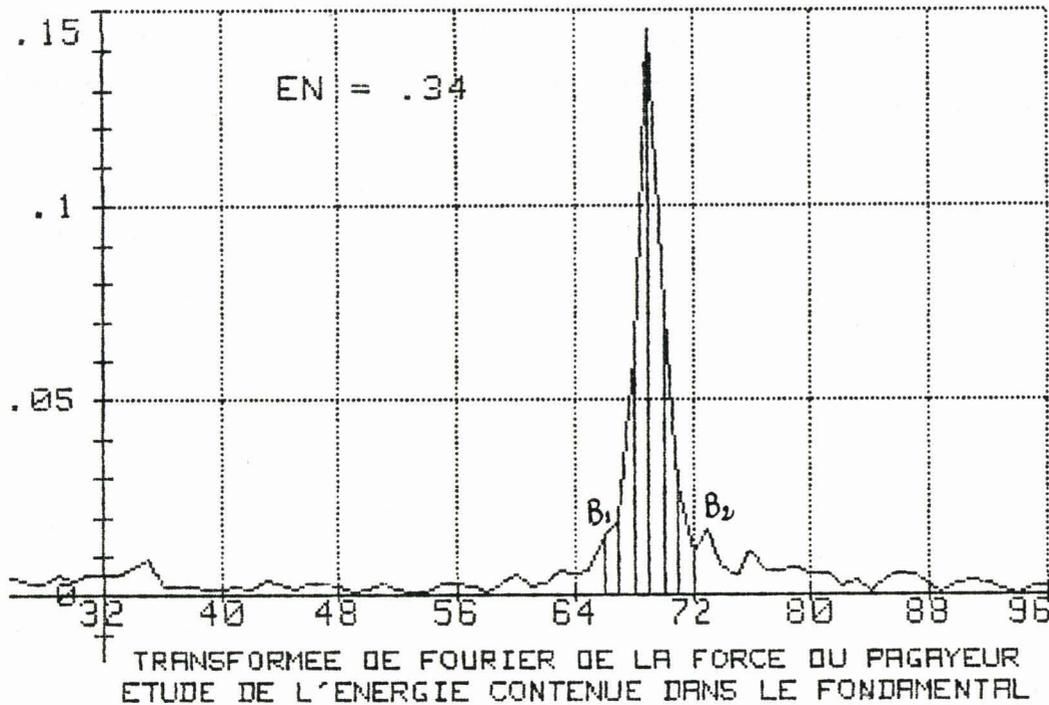
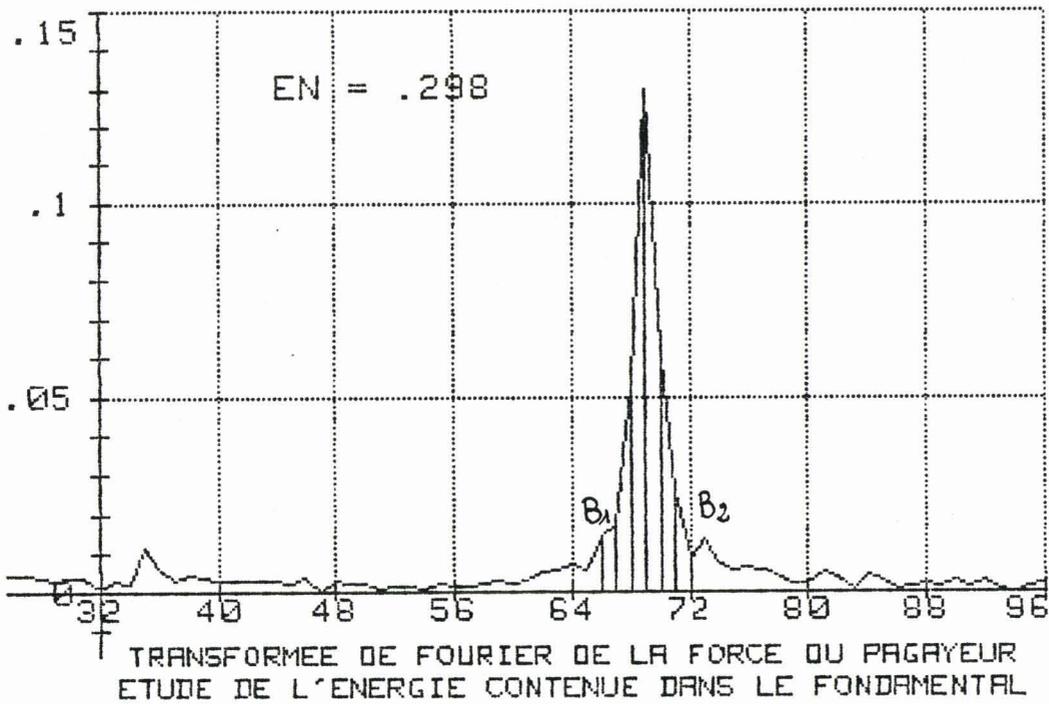
2 - 14 Analyse du fondamental

Nous allons étudier plus spécialement le fondamental du signal force qui renferme plusieurs informations intéressantes.

A ce titre, on effectue un zoom sur celui-ci.

L'exemple qui suit, nous montre deux équipages totalement différents :

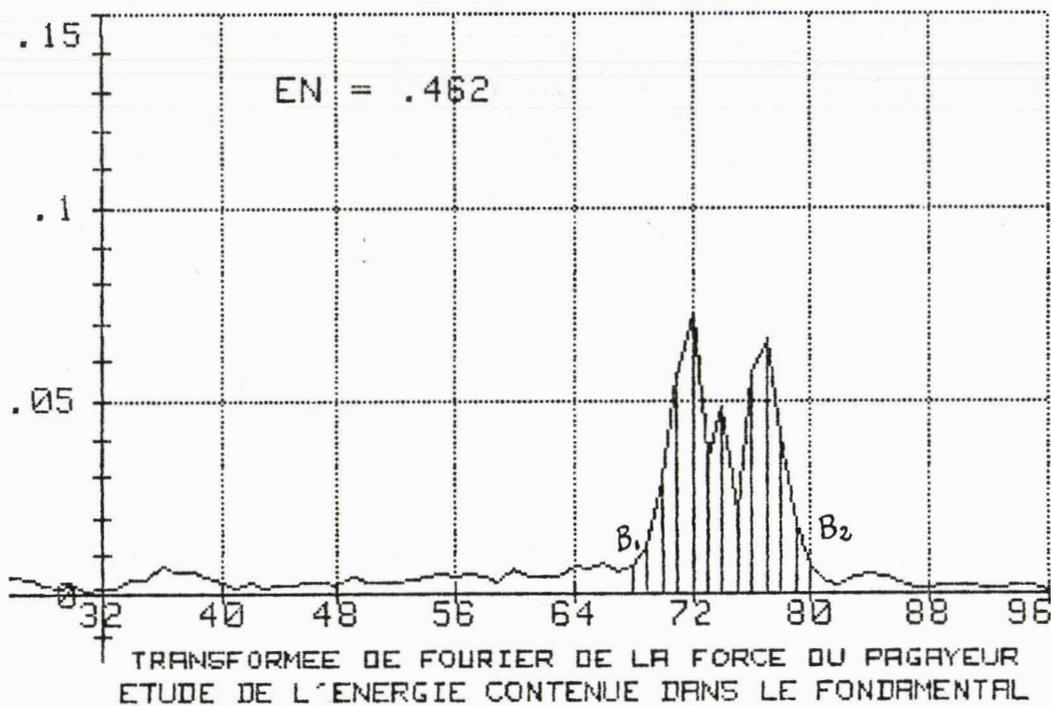
Equipage A



Interprétation :

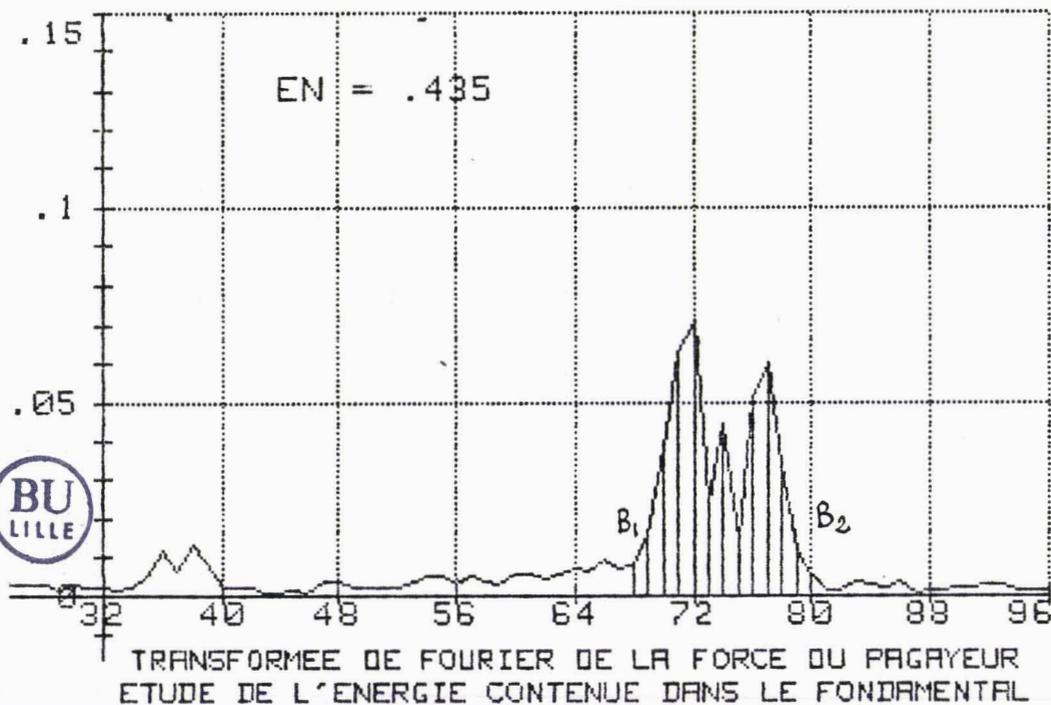
L'expérience faite sur un échantillon de 7 équipages montre qu'il y a une ressemblance flagrante entre les fondamentaux d'athlètes d'un même équipage, même lorsqu'ils utilisent une technique différente. Ceci tend à prouver, qu'il y a interférence entre les athlètes composant un même équipage.

Equipage G



Athlète 1

- Fig 36a -



Athlète 2

- Fig 36b -

La forme des fondamentaux, par contre, peut varier considérablement, d'un équipage à un autre. L'équipage A présente une raie très fine, témoin d'une excellente régularité. Par contre, l'équipage G, présente un dédoublement du fondamental, signifiant une variation de la fréquence de pagayage pendant la course.

On peut d'ailleurs quantifier la régularité de chaque équipage, par la mesure du  $\delta$  correspondant à la largeur du fondamental à sa base. Malheureusement, la définition du spectre ne permet pas une précision très grande sur cette mesure. Enfin, l'intégration du fondamental, entre les bornes B1 et B2, nous donne l'énergie contenue dans celui-ci.

Résultats : (expérience faite sur la somme F1 + F2)

		Energie contenue dans le fondamental (unité d'énergie)
-----		
Equipage	A	0.249
	B	0.139
	C	0.128
	D	0.184
	E	0.124
	F	0.134
	G	0.276

Remarque :

Les résultats donnés ci-dessus sont exprimés en unité d'énergie. La correspondance entre cette notion d'énergie et l'énergie mécanique (au sens propre du terme : Force \* distance) est délicate dans notre application. Ainsi les chiffres donnés dans ce paragraphe, sont à placer sur une échelle relative et ne peuvent servir qu'à une comparaison entre équipage. Il ne faut, en aucun cas, leur donner un caractère absolu.

## 2 - 2 Représentation spectrale de la force de propulsion

La même étude que précédemment, a été faite sur la force de propulsion du kayak. Nous avons choisi de traiter ce signal plutôt que la vitesse du kayak de manière à obtenir des résultats comparables avec ceux du § 2-1.

### 2 -21 Spectre de la force de propulsion brute

Rappel :  $\vec{F}_p = \vec{T} + m\vec{Y}$

T correspond à la traînée de l'ensemble : fonction en  $V^3$ .

$\gamma = dV/dt$  correspond à l'accélération que subit le système  
 $m =$  masse du système ( masse kayak + masse équipage )

d'où

$$F_p = (a + bV + cV^2 + dV^3) + m dV/dt$$

Représentations graphiques des force de pagayage et force de propulsion

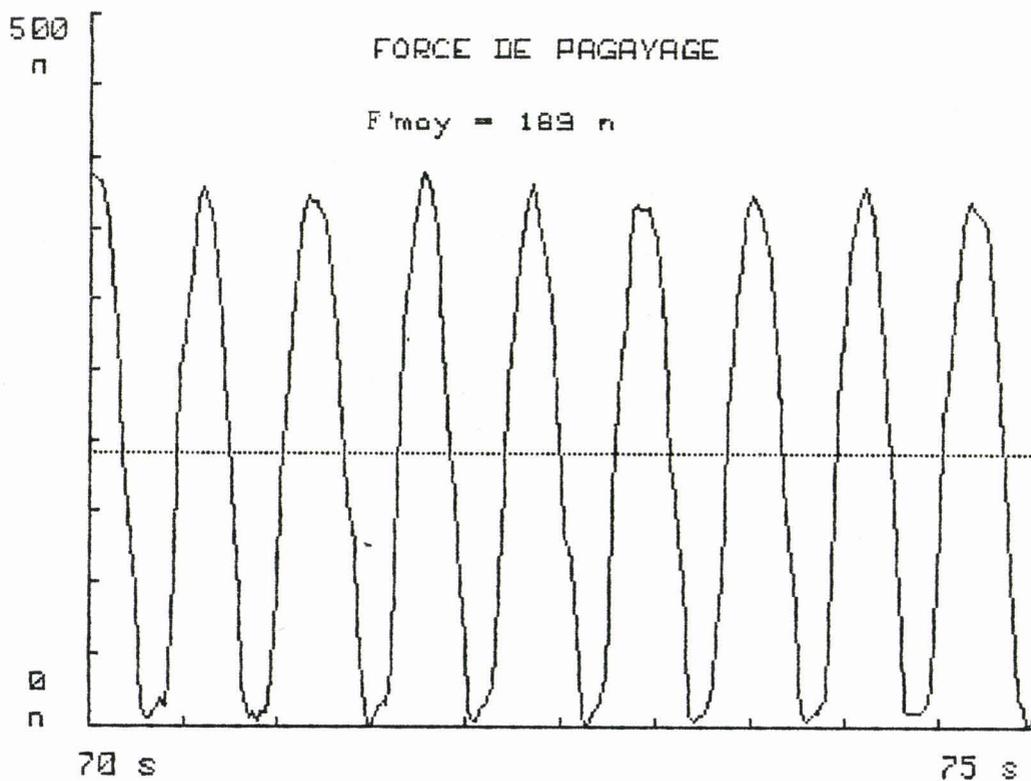


fig 37 -

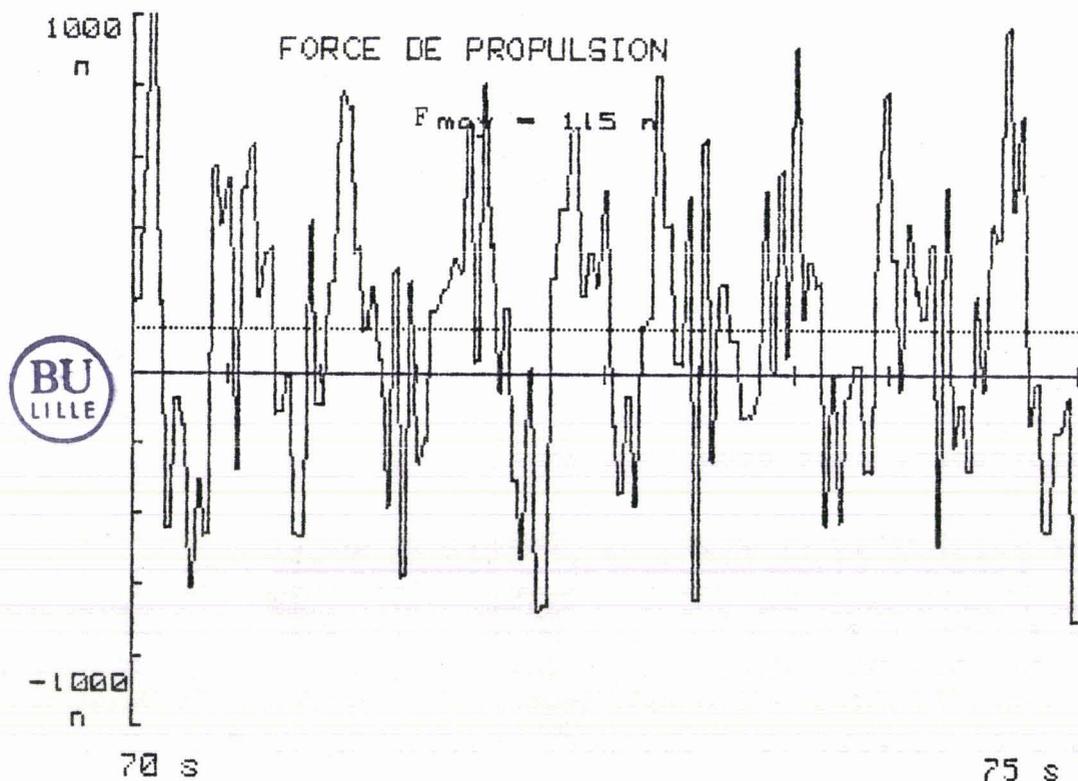


fig 38 -

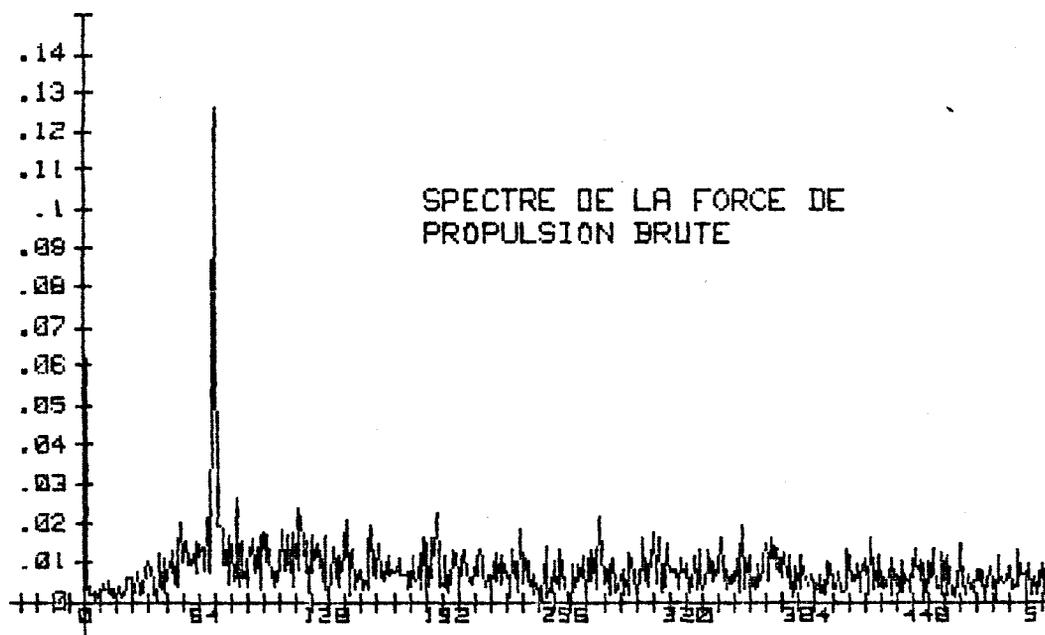


### Interprétations

Le paramètre V provient d'une mesure physique. Lorsque l'on calcule le  $dV/dt$ , on obtient des variations dynamiques extrêmement grandes de l'ordre de 4 fois la force fournie par l'équipage. L'explication de ce phénomène, vient des imperfections de mesure de la vitesse. Celles-ci sont dues aux déplacements latéraux et verticaux du point d'application de mesure où se trouve le capteur. Ces déplacements parasites, qui viennent s'ajouter au déplacement longitudinal, ont des variations dynamiques très rapides qui viennent accélérer ou freiner la roue du capteur, ce qui provoque une mesure erronée de la vitesse. Globalement, ces effets perturbateurs se manifestent périodiquement à chaque coup de pagaie, et n'ont donc pas de répercussion sur la moyenne de la vitesse. Par contre, la vitesse instantannée est inexacte. De plus, l'opérateur dérivation accentue le phénomène et nous donne des valeurs de l'accélération instantannée  $\dot{Y}$  fausse. ( $\dot{Y}$  moyen étant tout à fait correcte pour les mêmes raisons)

On peut néanmoins regarder la forme générale du spectre de la force de propulsion.

Equipage A



- Fig 39 -

## Interprétation

Le spectre obtenu se décompose en un fondamental correspondant à la fréquence de pagayage et un bruit haute fréquence, provenant de la dispersion du Y et dans lequel sont noyés les harmoniques.

On peut envisager 2 solutions pour atténuer ce bruit :

- La 1<sup>ère</sup> consisterait à adapter sur le kayak, un autre type de capteur, qui serait sensible dans une seule direction, et totalement transparent dans les autres (accéléromètre 3 dimensions). On obtiendrait ainsi la valeur de Y dans l'espace et un simple calcul vectoriel nous donnerait l'accélération longitudinale. Cette solution est onéreuse.

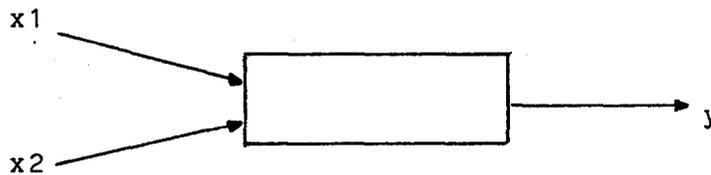
- La 2<sup>de</sup> consisterait à effectuer un filtrage sur le paramètre vitesse mesurée. Malheureusement le bruit perturbateur est contenu dans une bande de fréquence assez large, dans laquelle sont situés les harmoniques. Le filtrage devient alors une opération dangereuse.

Le paragraphe 2 - 11 a démontré qu'il existait une énergie non négligeable dans les harmoniques de la force de pagayage. En outre, nous savons également que les harmoniques de la force de propulsion sont largement atténués mais pas complètement. Pour connaître exactement le comportement du système, il faudrait étudier le transfert énergétique sur l'ensemble des fréquences.

Les fonctions de cohérence permettent ce genre d'étude, par rapport à chaque entrée.

Elles sont définies de la manière suivante :

Soit un système à 2 entrées (fig 47)



- Fig 47 -

La cohérence entre deux fonctions  $x(t)$  et  $y(t)$  est défini par:

$$\Gamma_{xy}(v) = \frac{|S_{xy}(v)|^2}{S_{xx}(v) \cdot S_{yy}(v)}$$

avec

$$S_{xy}(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} C_{xy}(\tau) \cdot \cos(2\pi v \tau) d\tau - j \int_{-\infty}^{+\infty} C_{xy}(\tau) \cdot \sin(2\pi v \tau) d\tau$$

$S_{xy}(v)$  = Interspectre des signaux x et y

$S_{xx}(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} C_{xx}(\tau) \cdot \cos(2\pi v \tau) d\tau$  = autospectre du signal x

$S_{yy}(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} C_{yy}(\tau) \cdot \cos(2\pi v \tau) d\tau$  = autospectre du signal y

$$0 \leq \Gamma_{xy}(v) \leq 1$$

Dans notre exemple de la figure 47, nous avons 2 relations :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma_1 = \Gamma_{x1y}(v) = \frac{|S_{x1y}(v)|^2}{S_{x1x1}(v) \cdot S_{yy}(v)} \\ \Gamma_2 = \Gamma_{x2y}(v) = \frac{|S_{x2y}(v)|^2}{S_{x2x2}(v) \cdot S_{yy}(v)} \end{array} \right.$$

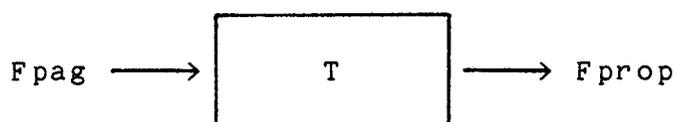
Il est ainsi possible de caractériser, sur l'ensemble des fréquences, la transmission de l'énergie, en partant du pagayeur jusqu'au kayak. Nous avons ici un moyen d'analyse de l'efficacité des athlètes.

L'expérience n'est malheureusement pas possible dans notre application. En effet, les signaux que nous traitons sont quasipériodiques et le fait d'effectuer une autocorrélation sur ceux-ci nous donne un résultat parfaitement périodique et surtout sinusoidal. Les harmoniques sont donc balayés des signaux originaux et l'opération n'est valable que sur le fondamental. (l'autocorrélation joue ici le rôle de filtre) On ne peut pas non plus travailler sur une seule période, celle-ci n'étant pas représentative du signal.

## 2 - 4 Conclusions

L'analyse spectrale des 2 paramètres physiques mesurés, la force engagée sur les pagaies et la vitesse du kayak, ont mis en évidence un certain nombre de points jusqu'alors ignorés. La répartition énergétique des forces de pagayage, est différente, selon le geste effectué. Cette caractéristique sera utilisée pour déterminer l'efficacité d'une technique. Celle-ci est définie par le rapport entre énergie centrée sur les harmoniques et énergie centrée sur le fondamental, qui doit être le plus faible possible. La modélisation du geste, montre qu'il est possible d'optimiser celui-ci, en jouant sur certains paramètres comme le rapport air/total. L'étude de la force de propulsion a démontré que le système semble se comporter comme un filtre passe-bas. Ceci confirme l'hypothèse concernant l'efficacité du geste.

### 3 - Etude statistique des paramètres mesurés



- Fig 48 -

Les études faites aux paragraphes 1 et 2 ont démontré l'intérêt de caractériser la fonction de transfert T (fig 48). Malheureusement, nous ne connaissons pas encore assez d'éléments pour définir celle-ci, qui, on s'en doute, est complexe. L'analyse statistique des paramètres, va nous renseigner sur la nature des signaux mesurés, et plus particulièrement, nous permettre de savoir s'ils réagissent à des lois connues.

#### 3 - 1 Variations dynamiques de la vitesse

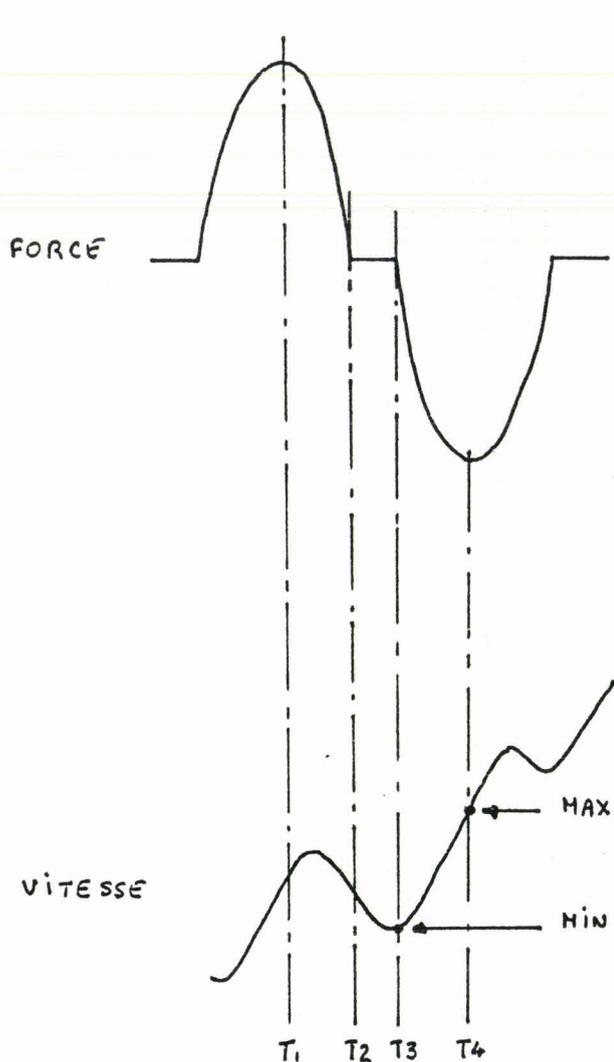
Nous allons étudier les variations dynamiques de la vitesse d'une façon générale en fonction des techniques des équipages.

##### 3 - 11 Détection minimas et maximas

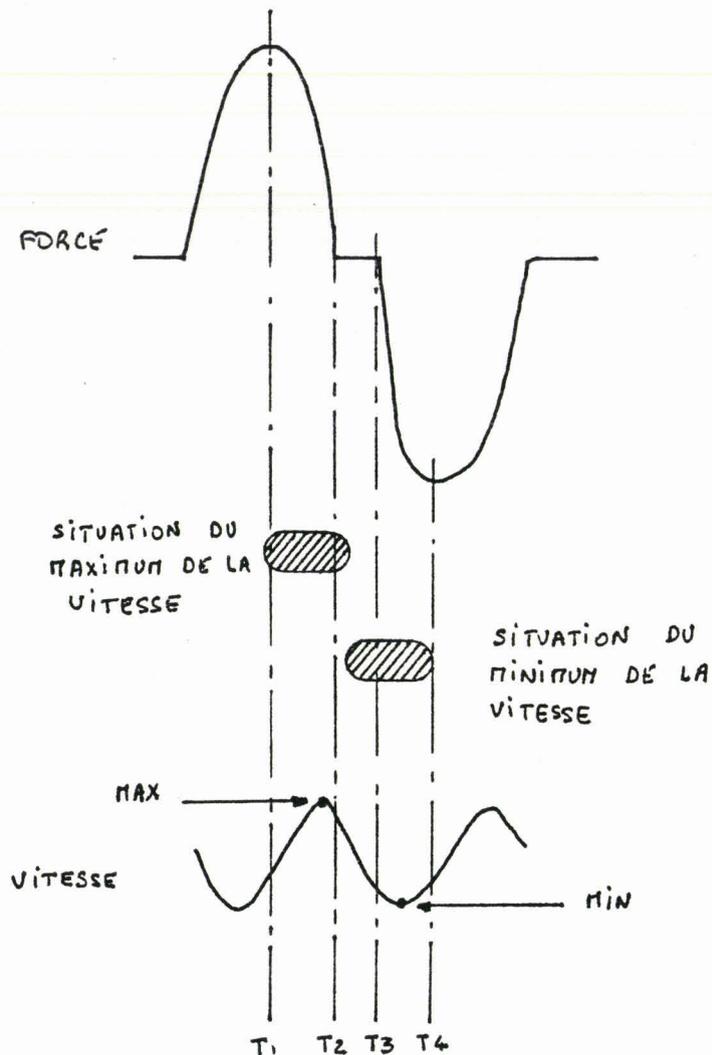
L'évaluation des variations de la vitesse implique la détection des minimas et des maximas de celle-ci, pour chaque coup de pagaie. C'est la partie délicate du logiciel, qui mérite quelques explications.

En effet, comme le montre la figure suivante (fig 49), les minimums et maximums de la vitesse interviennent à des instants très différents suivant la technique utilisée et la phase de la course.

De plus, au sein d'un coup de pagaie, la vitesse peut présenter plusieurs maximums ou plusieurs minimums.



- Fig 49a -



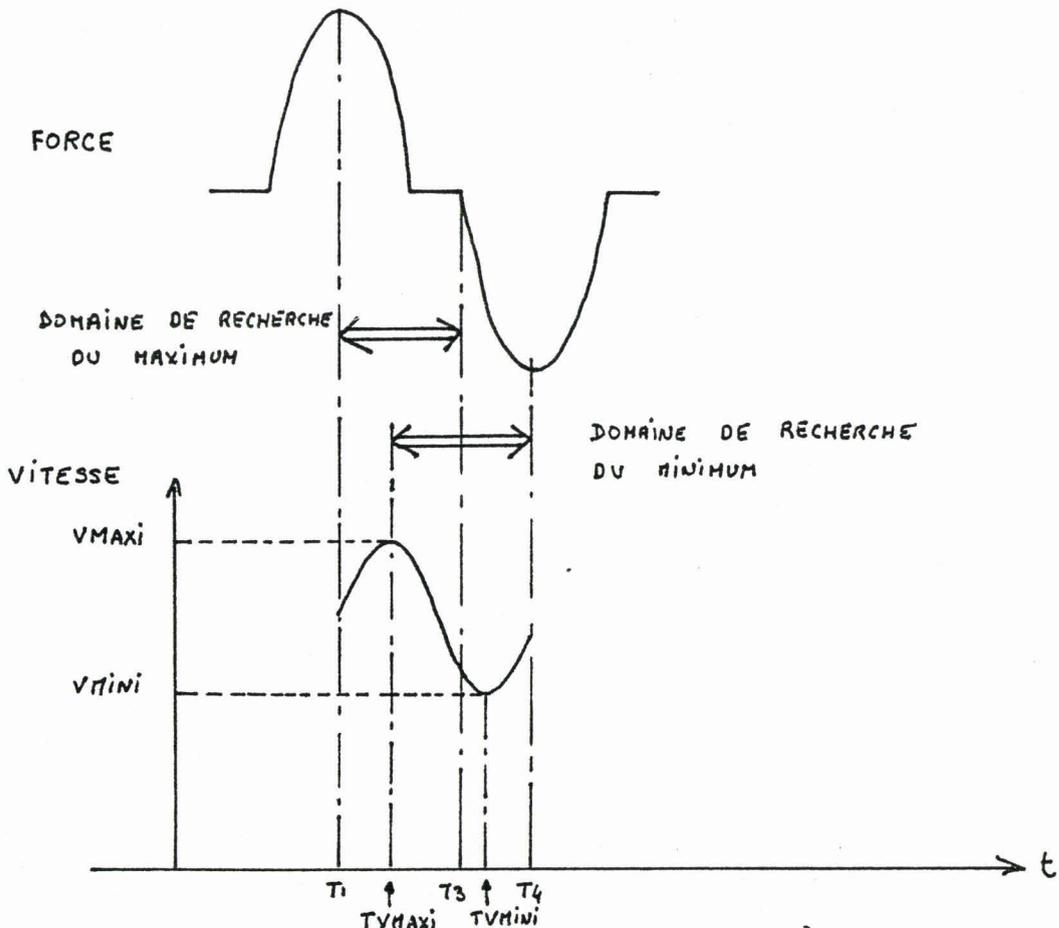
- Fig 49b -



- T<sub>1</sub> : Maximum du coup gauche
- T<sub>2</sub> : Fin du coup gauche
- T<sub>3</sub> : Début du coup droit
- T<sub>4</sub> : Maximum du coup droit

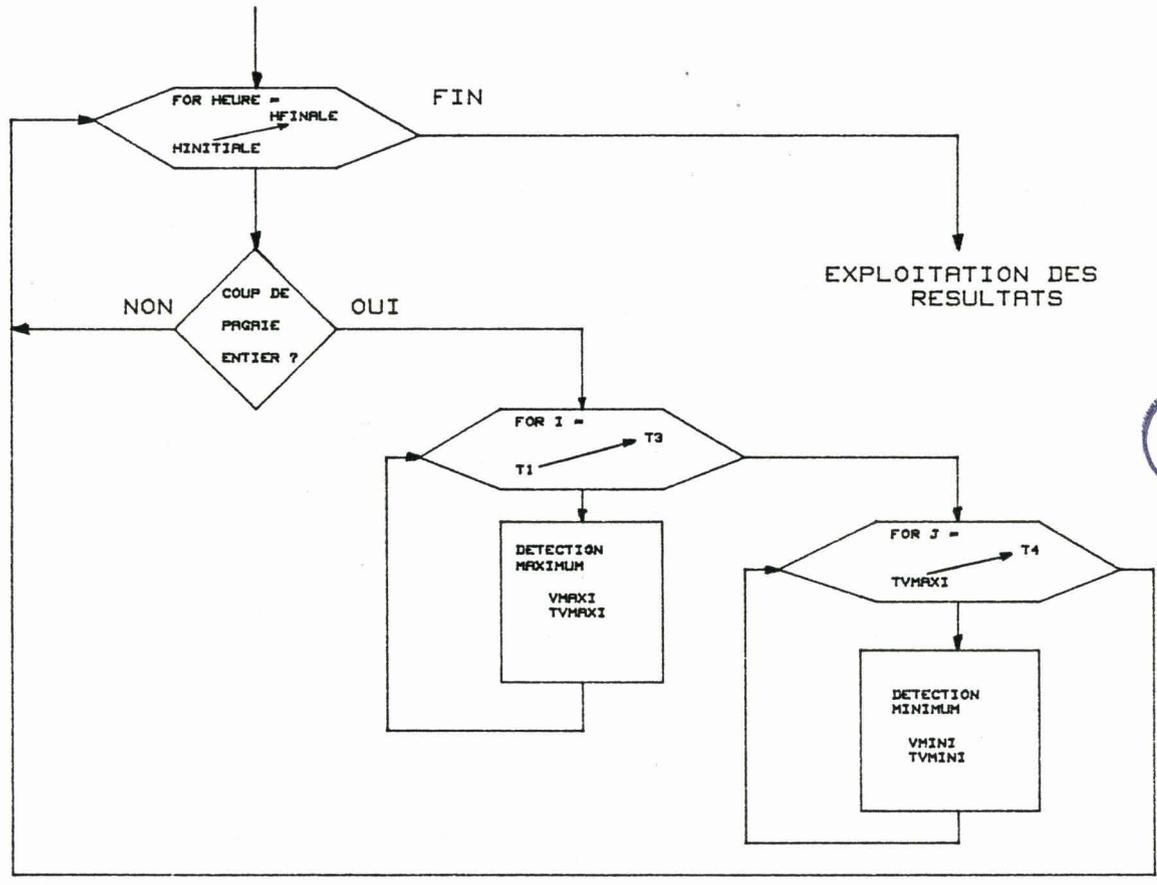
La figure 49-a, représentant une phase de montée en vitesse, montre que le maximum détecté entre les bornes T<sub>1</sub> et T<sub>4</sub> n'est pas celui recherché. Il faut donc définir 2 fourchettes de scrutation différentes, à l'intérieur de l'intervalle (T<sub>1</sub>-T<sub>4</sub>), afin de détecter les valeurs correctes : (fig 50)

- la détection du maximum se fera entre T<sub>1</sub> et T<sub>3</sub>
- la détection du minimum se fera entre T<sub>2</sub> et T<sub>4</sub>



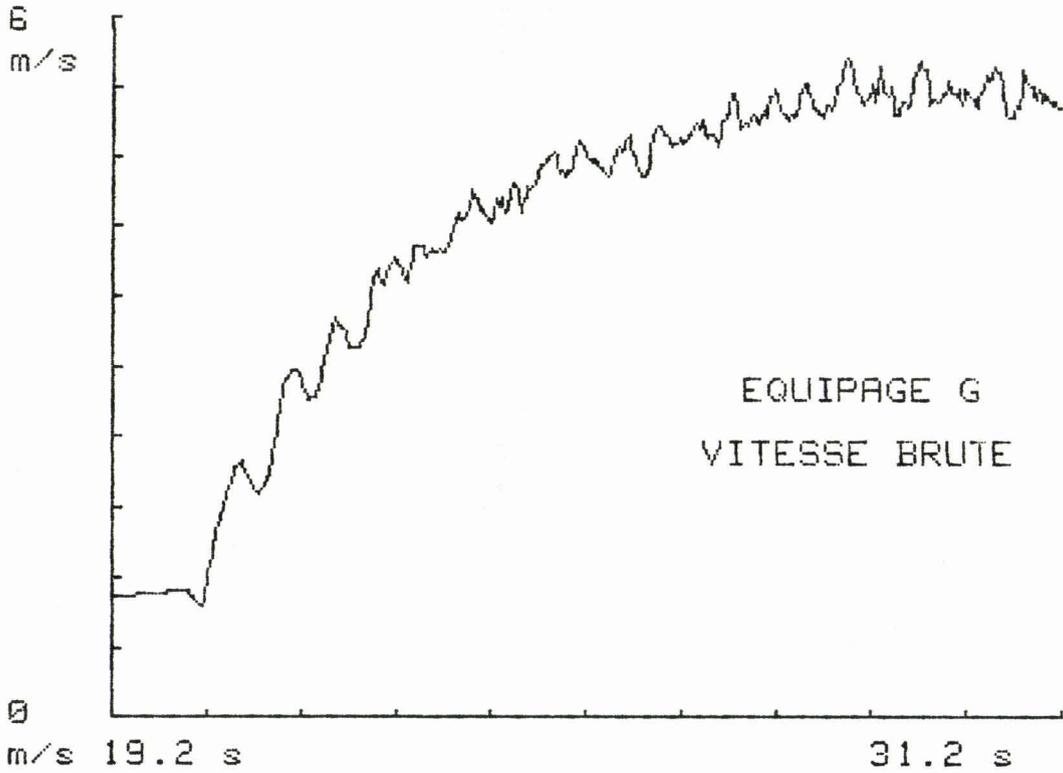
- Fig 50 -

les détéctions se font de la manière suivante :

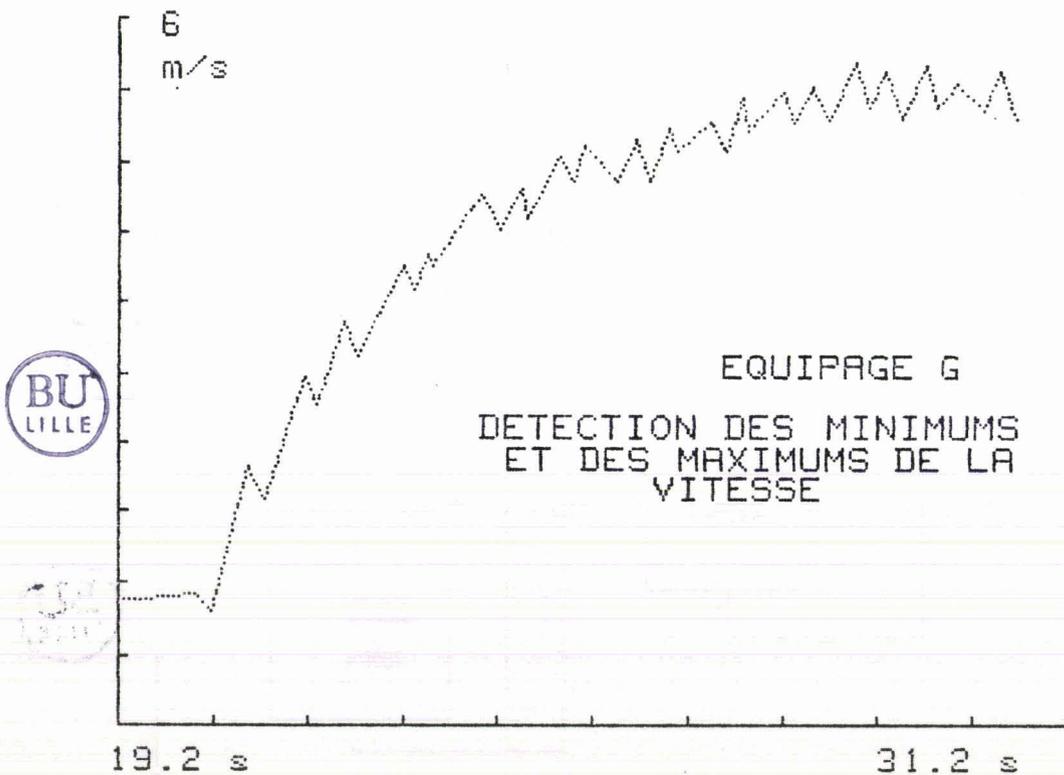


Cette manière de procéder nous permet de garantir les résultats avec un taux d'erreur très faible.

Ex : essai sur une montée en vitesse. (cas le plus délicat)  
(fig 50) Equipage G



- Fig 51a -



- Fig 51b -

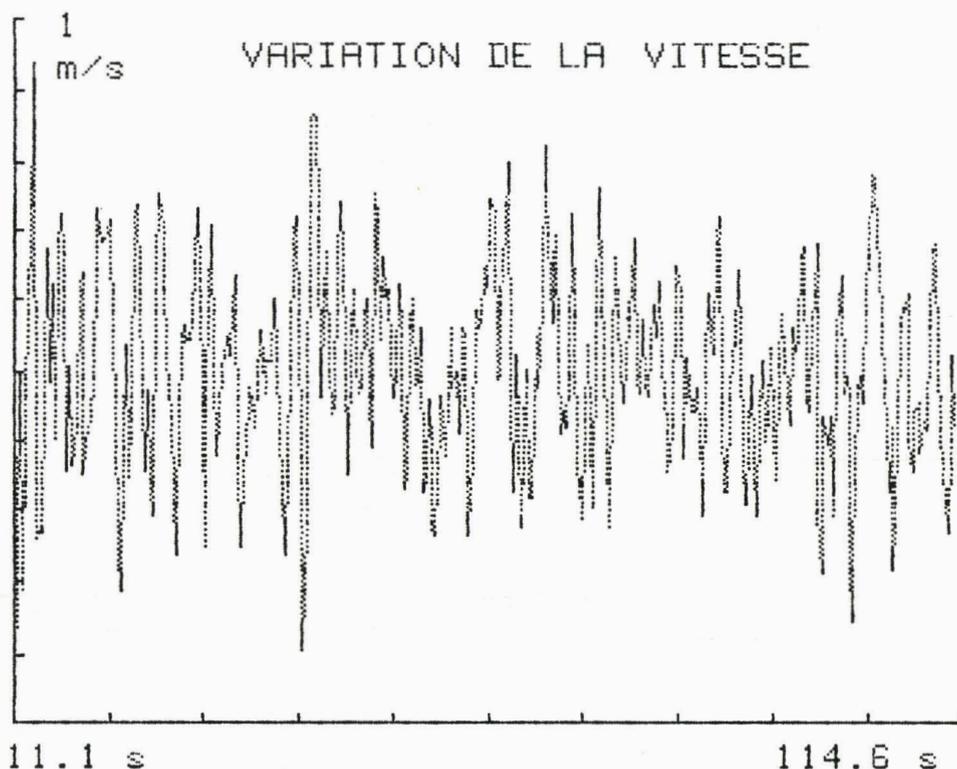
3 - 12 Variation de la vitesse en fonction de la vitesse moyenne

La détection mini/maxi de la vitesse, nous donne, pour chaque coup de pagaie, 2 couples de points :

$$\begin{pmatrix} V \text{ maxi} \\ TV \text{ maxi} \end{pmatrix} \text{ et } \begin{pmatrix} V \text{ mini} \\ TV \text{ mini} \end{pmatrix}$$

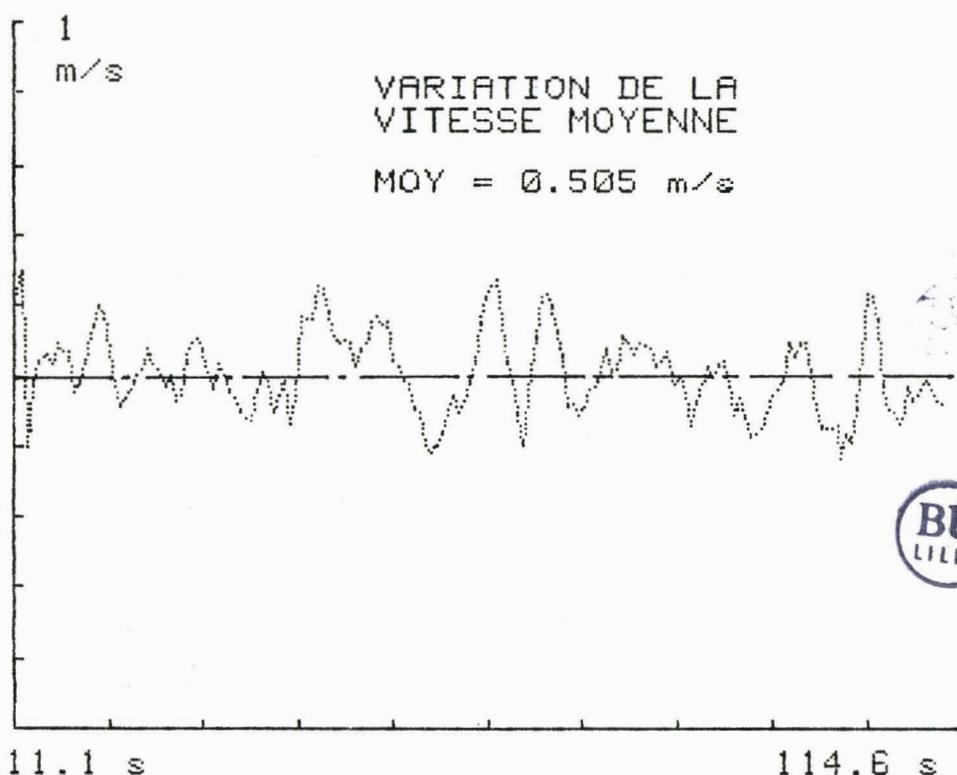
Ceux-ci vont nous permettre d'évaluer la variation de la vitesse, appelée  $\Delta V$ , au cours d'un entraînement de 500 m.

Ex : Equipage A



- Fig 52a -

Filtrage sur 5 acquisitions



- Fig 52b -

On obtient une courbe très bruitée, comme lors de la corrélation instantannée. Le paramètre, très variable, dépend de plusieurs critères comme la sensibilité du capteur, la régularité d'un équipage, les conditions extérieures (vent, courant, état du plan d'eau)...etc...(fig 52a)

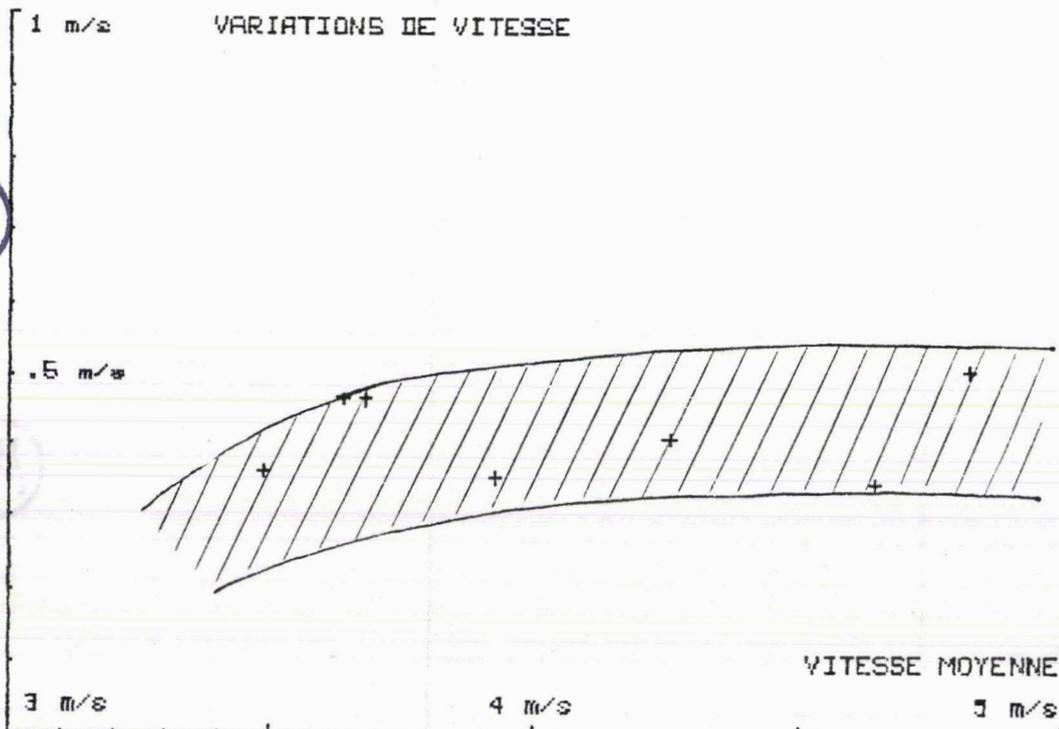
Néanmoins, on remarque qu'il varie autour d'une moyenne que l'on peut extraire aisément par un filtrage haute-fréquence (fig 52b).

Nous allons effectuer la même expérience sur une population d'équipage de manière à voir s'il existe un lien direct entre la vitesse obtenu et la variation dynamique de vitesse.

Résultats :

	Variation de vitesse $\Delta V$	Vitesse moyenne $V$
Equipage A	.505 m/s	4.83 m/s
B	.464	3.64
C	.354	3.93
D	.409	4.26
E	.462	3.68
F	.363	3.49
G	.348	4.65

Soit la représentation graphique suivante :



- Fig 53 -

### Interprétation

La dispersion des points, démontre que la variation de vitesse n'est pas une fonction directe de la vitesse moyenne, pour les raisons données ci-dessus. Cependant, ceux-ci sont compris à l'intérieur d'une fourchette qui a tendance à croître avec la vitesse moyenne. (ce phénomène est plus évident avec le même équipage)

### 3 - 2 Etude statistique de la vitesse

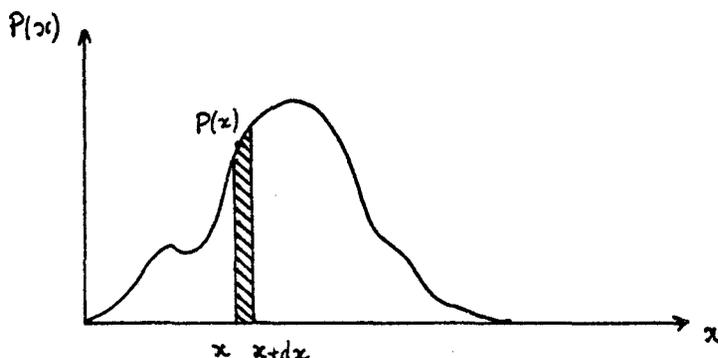
La vitesse mesurée se décompose en un phénomène déterministe lié à la fonction de transfert du système, elle-même soumise aux excitations des pagayeurs, et un phénomène aléatoire. En effet, les coups de pagaie des athlètes, les déplacements des différentes masses du système, la position du capteur de vitesse, et d'autres paramètres encore, subissent des variations, d'un coup de pagaie à l'autre. Tous ces facteurs agissent sur la vitesse du kayak, qui se trouve entachée d'un paramètre aléatoire. Nous allons donc, dans ce paragraphe, étudier la vitesse avec des méthodes statistiques de manière à connaître la nature du signal.

### 3 - 21 Densité de probabilité du signal vitesse

Rappel : Soit une variable aléatoire  $X$  prenant les valeurs  $x$ .  
Soit  $P(x)$  la probabilité pour que  $X$  prenne une valeur comprise entre  $x$  et  $x + dx$ .

Si on fait tendre le  $dx \rightarrow 0$ , on arrive à la notion de densité de probabilité.

$$P(x)dx = P ( x < X < x + dx ) \text{ pour un élément } dx \text{ (fig 54)}$$



- Fig 54 -

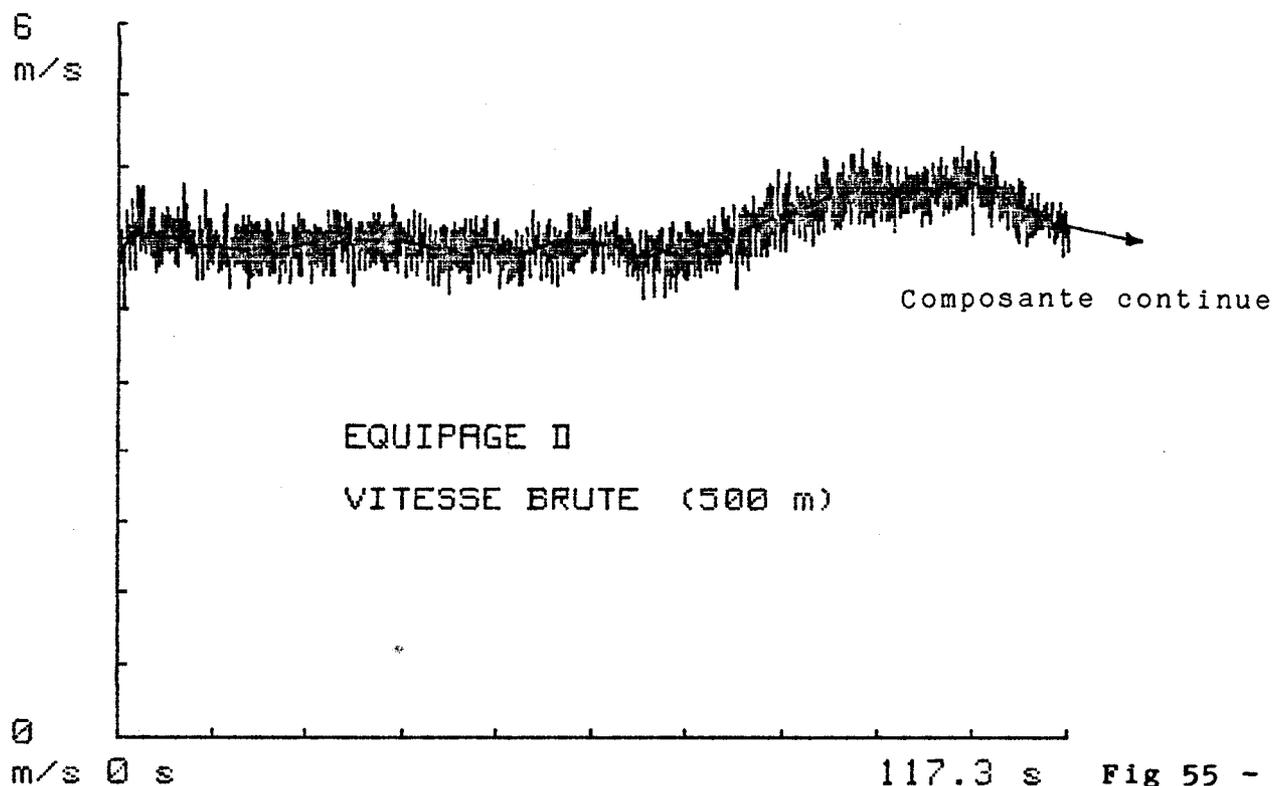
$P(x)$  est toujours normé de telle sorte que :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(x)dx = 1$$

Il existe plusieurs types de distributions connues (cf annexe 1.).

Nous allons comparer le signal vitesse à celles-ci.

Comme nous l'avons expliqué ci-dessus, la vitesse se décompose en un phénomène déterministe et un phénomène aléatoire.



On voit sur le graphique (fig 55), que la moyenne de la vitesse (provenant du phénomène déterministe) n'est pas constante. Il va donc falloir, avant toute analyse, filtrer cette composante continue.

Ce filtrage est obtenu par un moyennage glissant.

L'opération suivante consiste à calculer chaque probabilité :  
 $P(x)dx = ( P x < X < x + dx )$  pour chaque élément  $dx$   
(ceux-ci ont été fixés à  $10^{-3}$  m/s)

Résultats : essai en équipage

- Equipage D

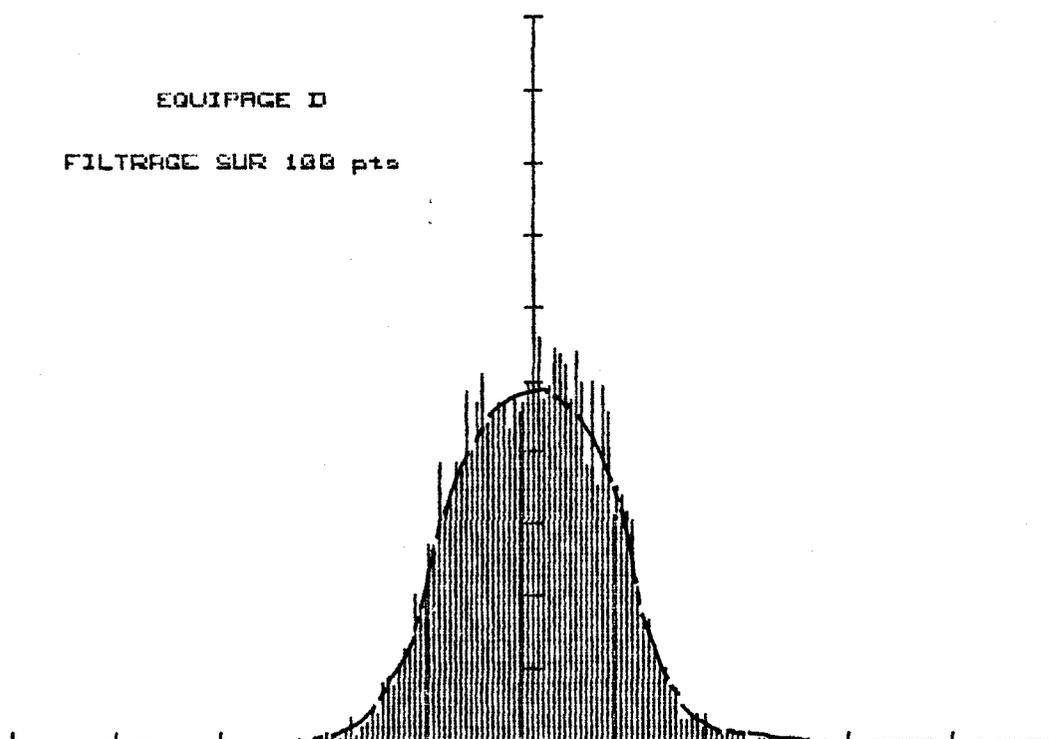


Fig 56 -

Interprétation :

Bien que la distribution ressemble fort à une loi de Gauss, on ne peut affirmer immédiatement que le processus est gaussien. Il faut, en effet, comparer les résultats pratiques à la loi théorique. La comparaison directe des distributions est délicate, car la densité de probabilité obtenue avec la vitesse est assez hachée. La définition de celle-ci dépend du choix du dx, lui-même fonction de la largeur d'observation du signal. Un moyen plus simple de comparer la pratique à la théorie, est de passer par la fonction de répartition.

3 -22 Fonction de répartition du signal vitesse(Réf18)

La fonction de répartition est définie de la manière suivante:

$$F(X_0) = P ( X < X_0 ) = \int_{-\infty}^{X_0} p(x)dx$$

C'est une fonction croissante positive avec :

$$F(-\infty) = 0 \qquad F(+\infty) = 1$$

La fonction de répartition est intéressante dans la mesure où elle n'est pas bruitée, inversement à la distribution d'un signal, et est facilement identifiable.

Application

\* signal pratique

la variable analysée doit être réduite :

$$u_i = \frac{x_i - m}{\sigma}$$

m : moyenne du signal  
σ : écart type du signal

\* signal théorique

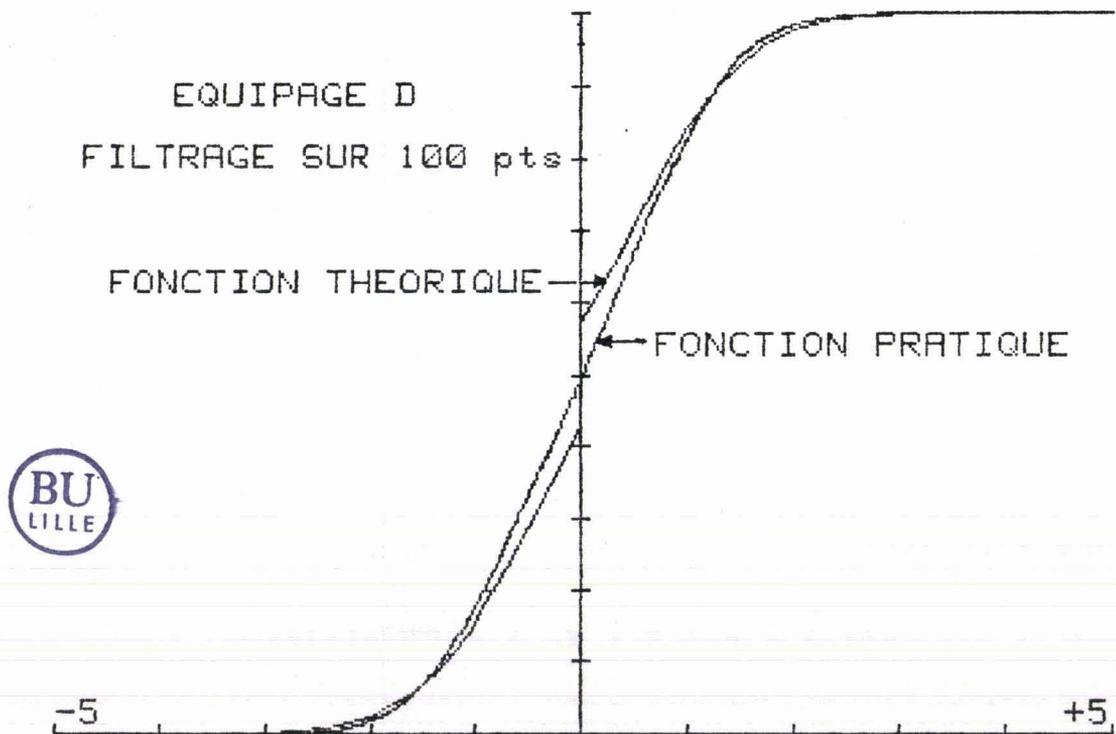
Fonction de répartition d'une loi de Gauss réduite :

$$F(x) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^x \exp \left[ -\frac{t^2}{2} \right] dt$$

Approximation mathématique

$$F(x) = 1 - 0.5 \exp \left[ -0.461 (x + 0.582)^2 \right]$$

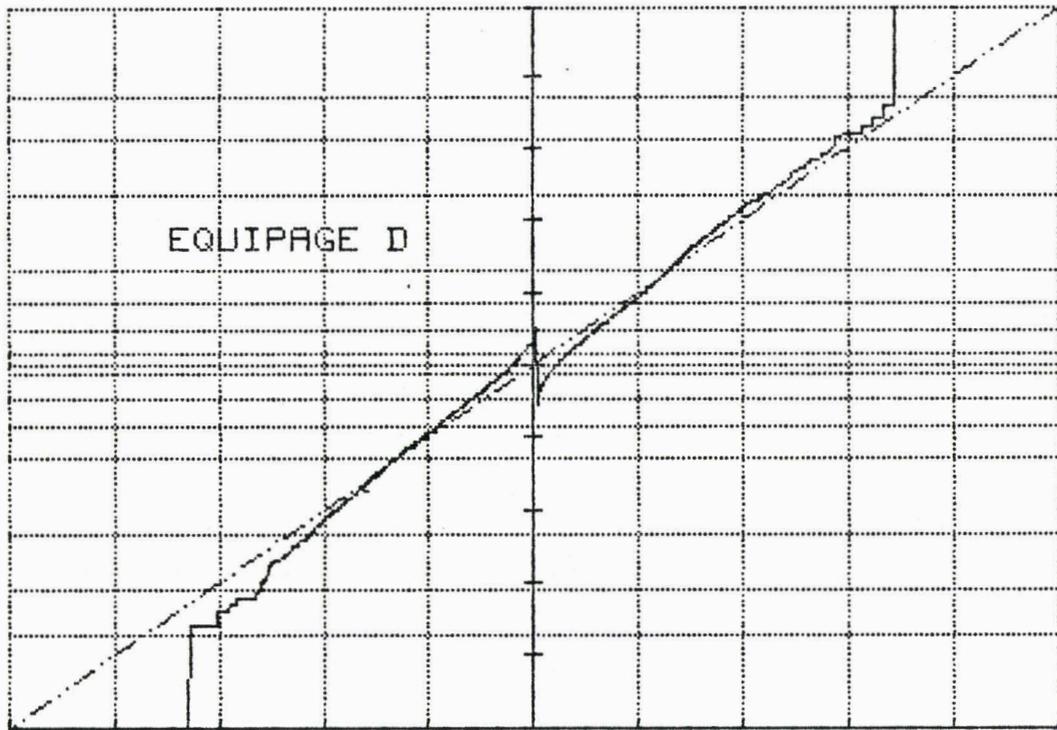
Résultats :



- Fig 57 -

La fonction de répartition pratique vient bien superposer la courbe théorique. (la discontinuité au niveau du zéro est due à l'approximation mathématique de la loi de Gauss) Néanmoins, de manière à juger correctement la ressemblance des 2 courbes, nous allons représenter celles-ci dans un repère particulier, tel que la loi de Gauss corresponde à une droite.

Résultats :



- Fig 58 -

Diagramme de Gauss (échelle Gausso - linéaire)

Interprétation :

La courbe pratique suit à peu près la droite de Gauss. On peut dire, dans ce cas précis, que le signal étudié est gaussien. Le processus est donc entièrement caractérisé par ses moments du 1er et du 2ème degré, c'est à dire, par sa valeur moyenne et sa covariance. La probabilité d'avoir une vitesse donnée sera donc :

$$p(x) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \cdot \sigma} \exp \left[ -\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2} \right]$$

m = moyenne  
σ = covariance

Nous allons répéter l'analyse, sur plusieurs équipages différents, dont certains ont des techniques totalement opposées, dans le but de savoir si on peut généraliser ce résultat. De plus, on introduit dans le traitement, un calcul d'estimation exhaustif, de manière à pouvoir juger la qualité de la distribution. Ce calcul est basé sur l'écart de la fonction de répartition de la vitesse par rapport à la fonction de répartition d'une courbe de Gauss, et ce, sur l'ensemble des points.

Résultats :

	moy (m/s)	$\sigma$ (m/s)	Gaussien à P %
Equipage A	4.897	.167	92.56
B	3.674	.157	89.13
C	4.016	.138	94.44
D	4.269	.137	93.98
E	3.823	.163	87.64
F	3.61	.125	93.39
G	4.74	.121	93.45

Interprétation :

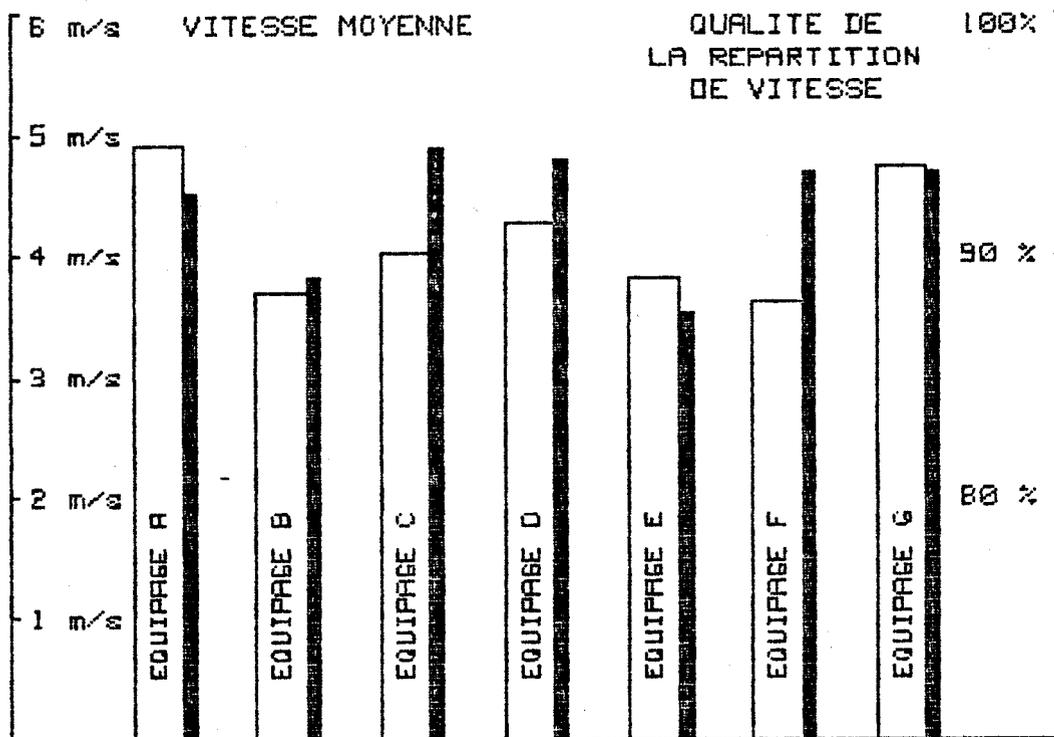
Les vitesses issues des différents équipages ne sont pas toutes parfaitement gaussiennes. On constate, en effet, des modifications au niveau de la distribution dues à 3 facteurs :

- les techniques utilisées par les athlètes
- le synchronisme de l'effort
- les conditions extérieures (vent - courant)

Les fonctions de transfert et leurs modélisations seront différentes, selon les équipages. (chaque cas devra être traité, comme un cas particulier)

Néanmoins, on constate une certaine corrélation entre la performance et la qualité de la répartition de vitesse. (fig59)

Ce graphique montre la corrélation entre la qualité de la distribution de vitesse et la performance. Cette dernière ne doit pas être basée uniquement sur la vitesse moyenne obtenue, mais également sur le résultat de l'équipage par rapport à ses performances habituelles. Ce test doit donc être relatif à chaque équipage.



- Fig 59 -

### 3 -23 Cas particulier du kayak monoplace

Basée sur le même raisonnement, l'étude du kayak monoplace est différente de celle du kayak biplace. En effet, l'excitation unique de la fonction de transfert, limite les modifications de la distribution de la vitesse, qui ne dépendent maintenant que de 2 facteurs :

- la technique de pagayage
- les conditions extérieures

Le phénomène aléatoire est ainsi moins important, par rapport au phénomène déterministe, que dans le cas du kayak biplace. L'expérience montre que la distribution de vitesse n'est plus gaussienne, puisqu'elle comporte un creux au niveau de la moyenne du signal. (fig 60)

Exemple :

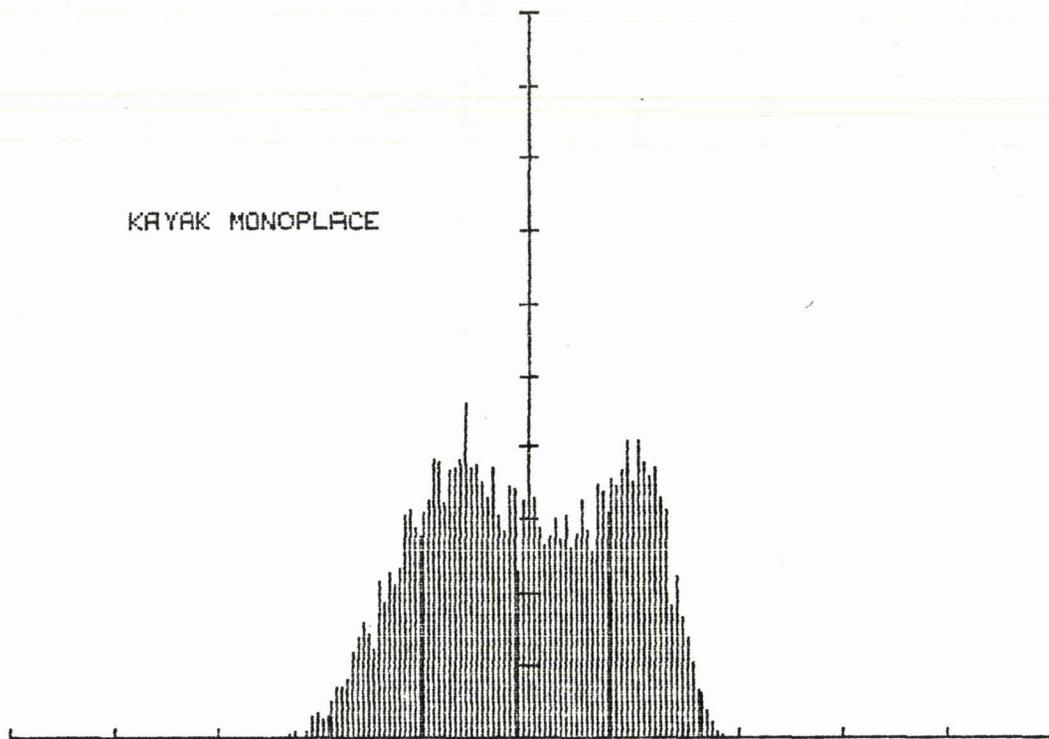


Fig 60a -

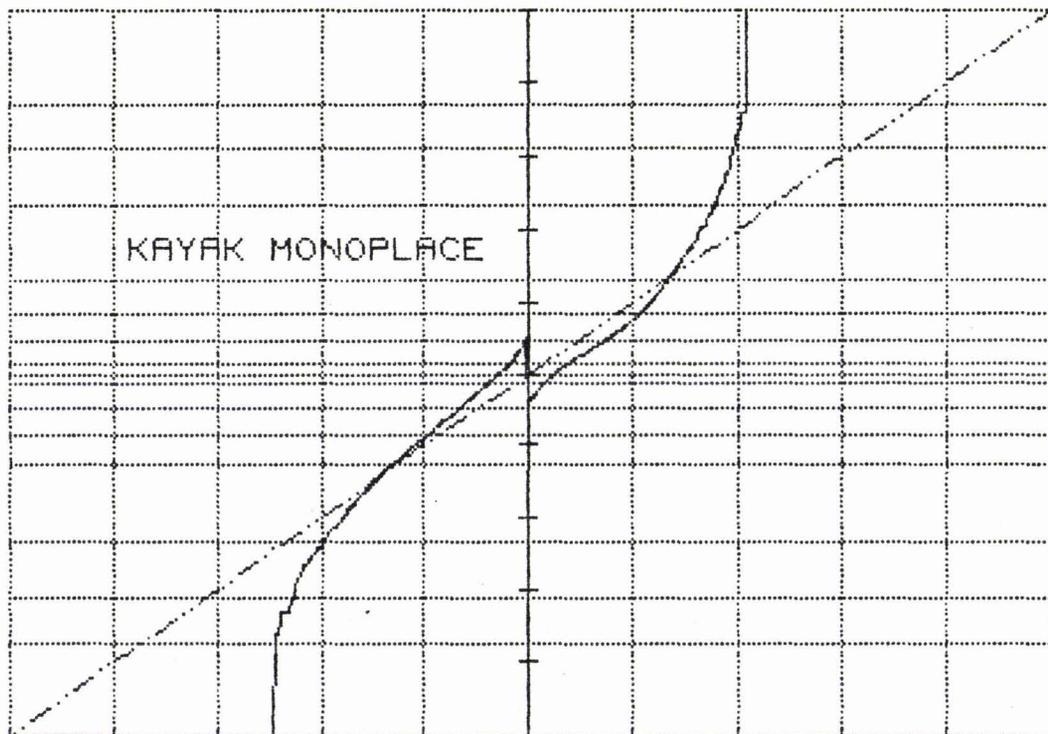


Fig 60b -



3 -24 Conclusion

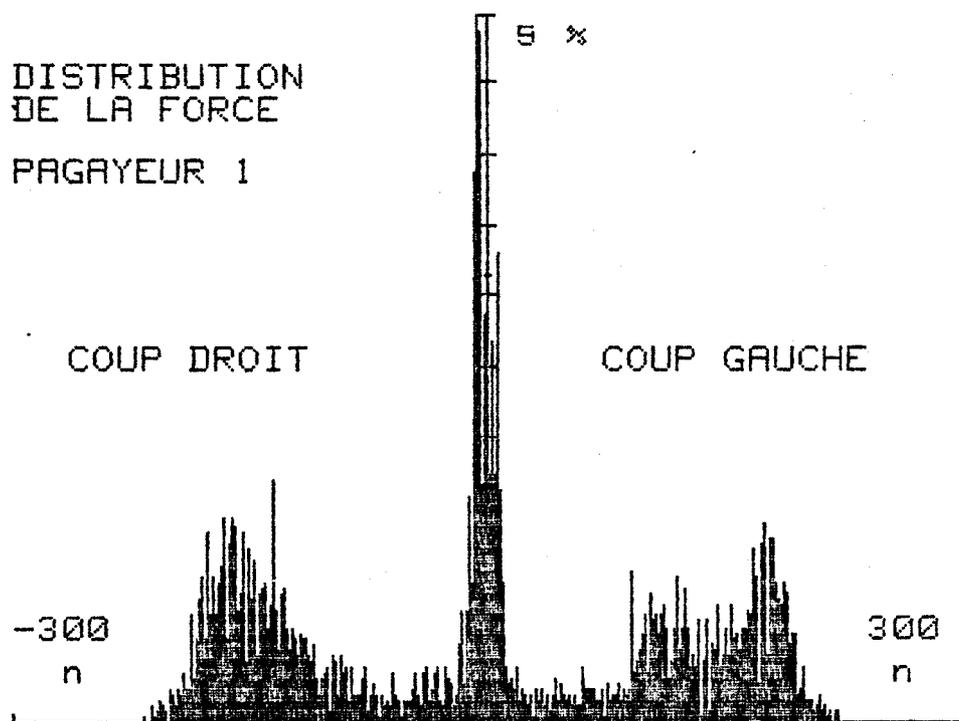
Nous venons de constater que le processus aléatoire est lié aux nombres de moteurs donc d'athlètes (pour le K1 et le K2). Si on extrapole cette caractéristique, on peut envisager que la répartition de vitesse d'un kayak 4

places sera parfaitement gaussienne. Nous pouvons en conclure que la fonction de transfert d'un K2 et d'un K4 sera du même type, au nombre d'entrées près, alors que celle d'un K1 sera différente.

3 - 3 Etude statistique des forces déployées par les athlètes

Nous envisageons, par le même principe, d'étudier les forces exercées par les athlètes sur les pagaies. Nous ne recherchons pas ici, une ressemblance avec la loi connue, mais un moyen efficace de comparer le pagayeur avant avec le pagayeur arrière. Ce raisonnement peut également s'appliquer de manière à caractériser les différences de geste à droite et à gauche.

3 - 31 Comparaison force avant - force arrière

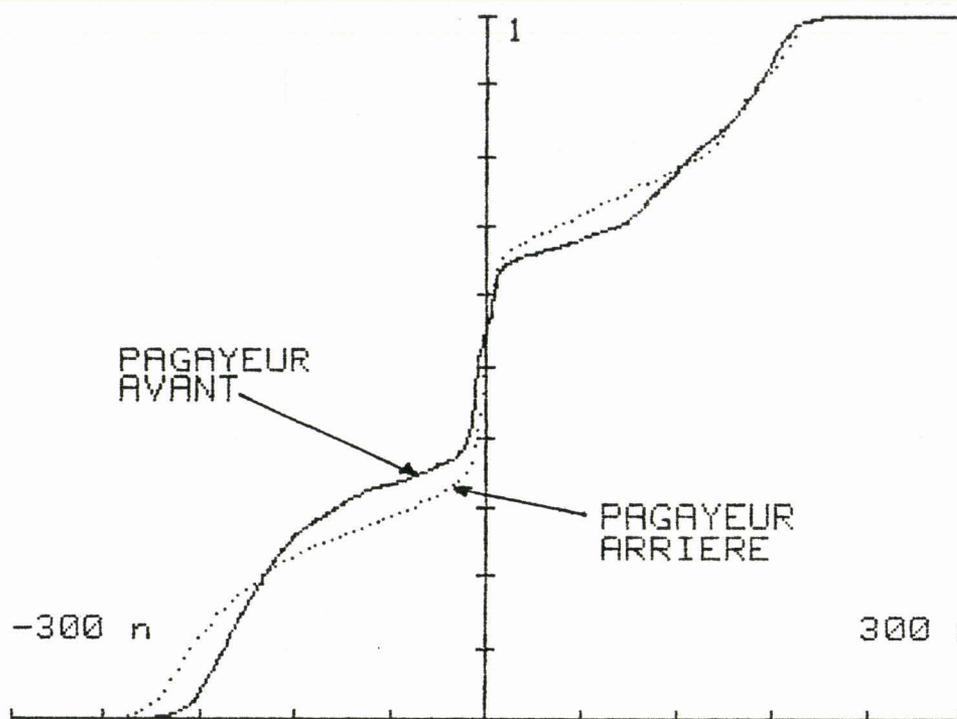


- Fig 61 -

Comme le montre la figure 61, la distribution de la force de pagayage est difficilement interprétable, à cause de son aspect bruitée. Néanmoins, on constate tout de même, que les distributions à droite et à gauche sont nettement différentes. Par contre, la fonction de répartition, permet une analyse fine de la distribution des forces.

Exemple 1 : Equipage A (fig 62)

Les fonctions de répartition des 2 athlètes sont superposées sur le même graphe.

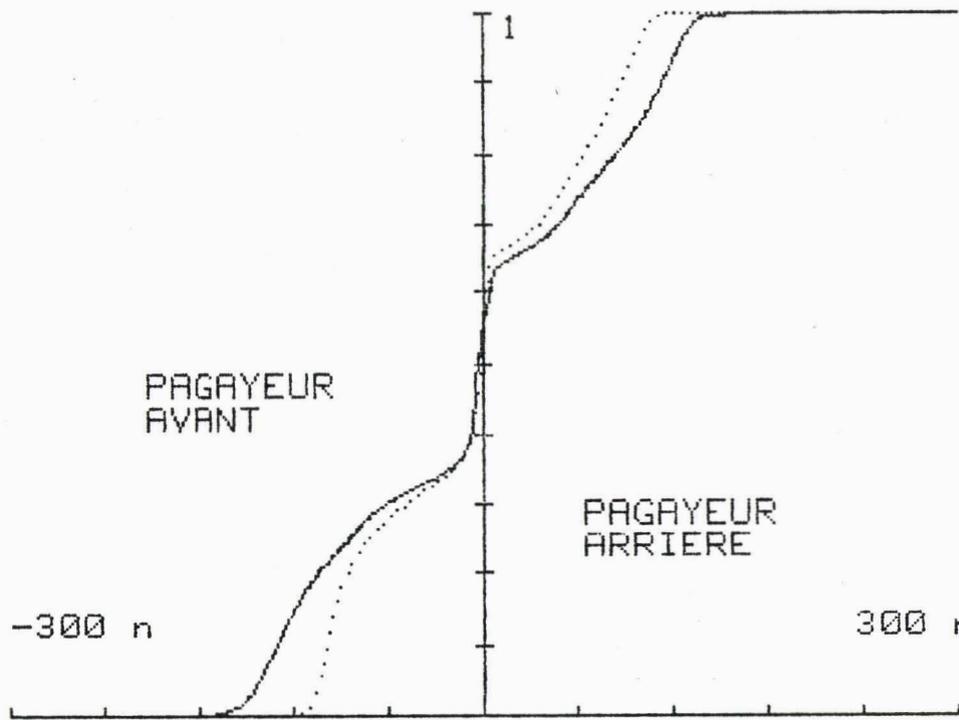


- Fig 62 -

Sur cet exemple, on voit très nettement la différence de la répartition des forces de chaque athlète, qui se situe sur le coup droit. L'expérience faite sur plusieurs équipages, montre d'ailleurs, que c'est au niveau des coups droits que l'on constate le plus de différences, alors que les coups gauches sont en général plus semblables. Ces écarts de répartition proviennent de plusieurs facteurs :

- composition du geste (phase d'attaque, phase de dégagé, trajectoire de la pelle, orientation de la pelle...)
- énergie musculaire mise en jeu (énergie que peut délivrer l'athlète en fonction du mouvement)
- caractéristiques de la pagaie utilisée (longueur, surface, structure, matériau)

Exemple 2 : Equipage C (fig 63)

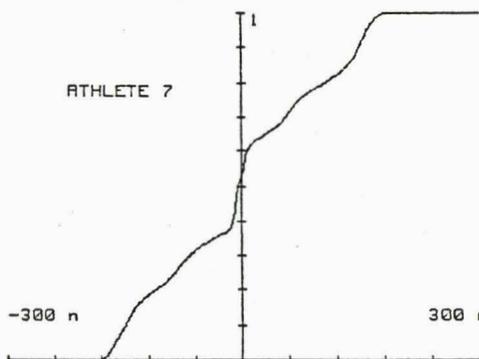


- Fig 63 -

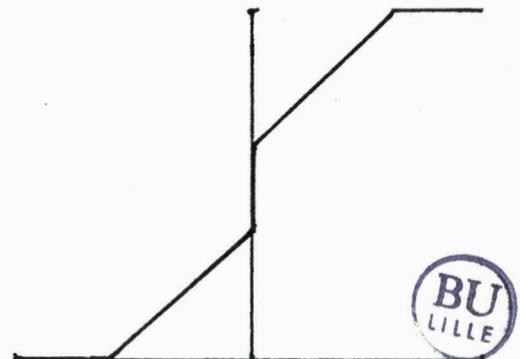
Cet autre équipage présente 2 coéquipiers effectuant le même geste. Cependant l'athlète arrière fournit moins d'énergie que l'athlète avant.

3 - 32 Analyse gestuelle

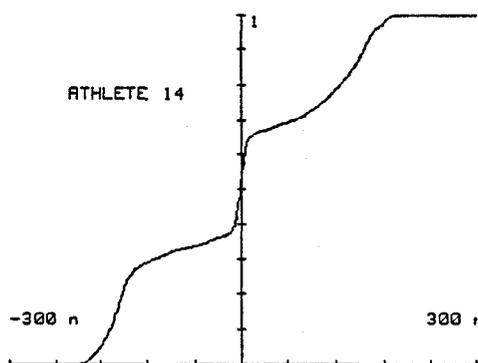
Nous voulons, ici, comparer les techniques de chaque athlète, non plus au sein d'un équipage, mais de façon générale. La figure 64, montre 2 exemples très révélateurs de 2 techniques différentes.



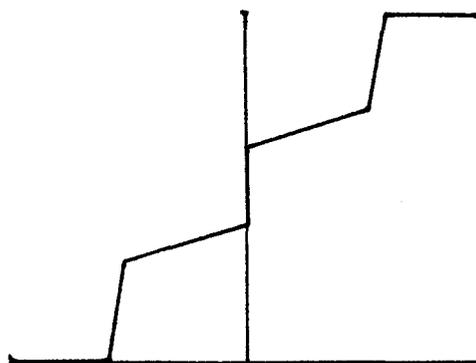
- Fig 64a -



- Fig 65a -



- Fig 64b -



- Fig 65b -

La figure 65 montre les modélisations respectives des répartitions des forces des 2 athlètes. Celles-ci sont totalement opposées : le premier athlète présente une distribution pratiquement linéaire alors que le deuxième athlète présente une distribution " carrée ". Bien que présentant des forces dont l'amplitude atteint 180 n, ces 2 athlètes révèlent 2 techniques différentes. Le 1er geste est fluide alors que le 2ème atteint très rapidement son maximum pour décroître ensuite très lentement. (le rapport montée/total vérifie cette théorie puisqu'il est respectivement de 40 % pour le 1er et de 30 % pour le 2ème)

Conclusion :

Ce traitement statistique permet donc de comparer efficacement la technique d'un athlète de moyen niveau à celle d'un athlète de très bon niveau et de détecter les défauts de l'un par rapport à l'autre.

Une mini banque de donnée pourrait être ainsi constituée, dans laquelle on stockerait uniquement les gestes de kayakistes de très haut niveau (niveau olympique français ou étranger).

Celle-ci pourrait ensuite être utilisée par les autres athlètes de niveau inférieur de manière à affiner leur propre technique selon, bien entendu, quelques critères de ressemblance comme la morphologie, la distance de course, le sexe ...etc...

## 5 - Conclusion

Les différentes méthodes utilisées dans ce chapitre avaient 1 objectif principal : l'évaluation de l'efficacité d'un athlète.

La fonction de corrélation entre la force de pagayage et la force de propulsion nous ont permis d'extraire le temps de réponse du kayak aux impulsions fournies par les athlètes. Cette constante de temps, variable selon l'équipage, est inversement proportionnelle à la vitesse. En outre, ce traitement effectué par rapport à chaque entrée, quantifie l'efficacité d'un athlète au sein de l'équipage.

Celle-ci est variable pendant une course et il est ainsi possible d'obtenir les régimes des athlètes sur différentes distances. Ce renseignement nouveau est important pour l'entraîneur qui pourra modifier l'entraînement physique de l'athlète en conséquence. Enfin, le coefficient de corrélation permet de détecter un certain nombre d'anomalies ainsi que leurs origines. Correspondant à un problème gestuel, elles sont à analyser en synchronisation avec l'enregistrement vidéo.

L'analyse spectrale des différentes forces apporte une réponse à une question préoccupant particulièrement les entraîneurs : existe-t-il un geste idéal ? Les représentations spectrales des forces de pagayage et de propulsions montrent que les harmoniques présents sur la force d'entrée ont tendance à être atténués, voir à disparaître complètement lors du transfert. Ce système se comporte comme un filtre passe-bas et cette caractéristique sera utilisée de façon à optimiser le geste. Plusieurs modélisations ont été faites et montrent la possibilité d'approcher le geste idéal.

Enfin, l'étude statistique du signal vitesse montre qu'il n'y a pas de similitude entre la fonction de transfert d'un kayak monoplace et d'un kayak biplace. Le processus est quelconque pour le premier alors qu'il est gaussien pour le deuxième. De plus, il semblerait qu'il y ait une certaine corrélation entre la qualité de la distribution (par rapport à un processus parfaitement gaussien) et la performance de l'équipage. Cette méthode a été également utilisée, pour comparer les gestes de différents athlètes de haut niveau. La courbe de répartition du signal force, très différente selon les pagayeurs, peut alors être utilisée par les entraîneurs, comme critère de choix pour la composition de nouveaux équipages.

# CHAPITRE III

-----

ETUDE MÉCANIQUE DU SYSTÈME HOMME-KAYAK

## INTRODUCTION

L'autre façon d'analyser le transfert d'énergie est d'étudier mécaniquement le système homme-kayak. Ce chapitre aura donc pour vocation, l'évaluation du bilan énergétique du système. Celui-ci passera par le calcul de la puissance utile pour faire avancer le kayak, la puissance dépensée par l'athlète et le rendement cette fois mécanique de celui-ci. Enfin, quelques remarques seront faites à propos de la forme du geste.

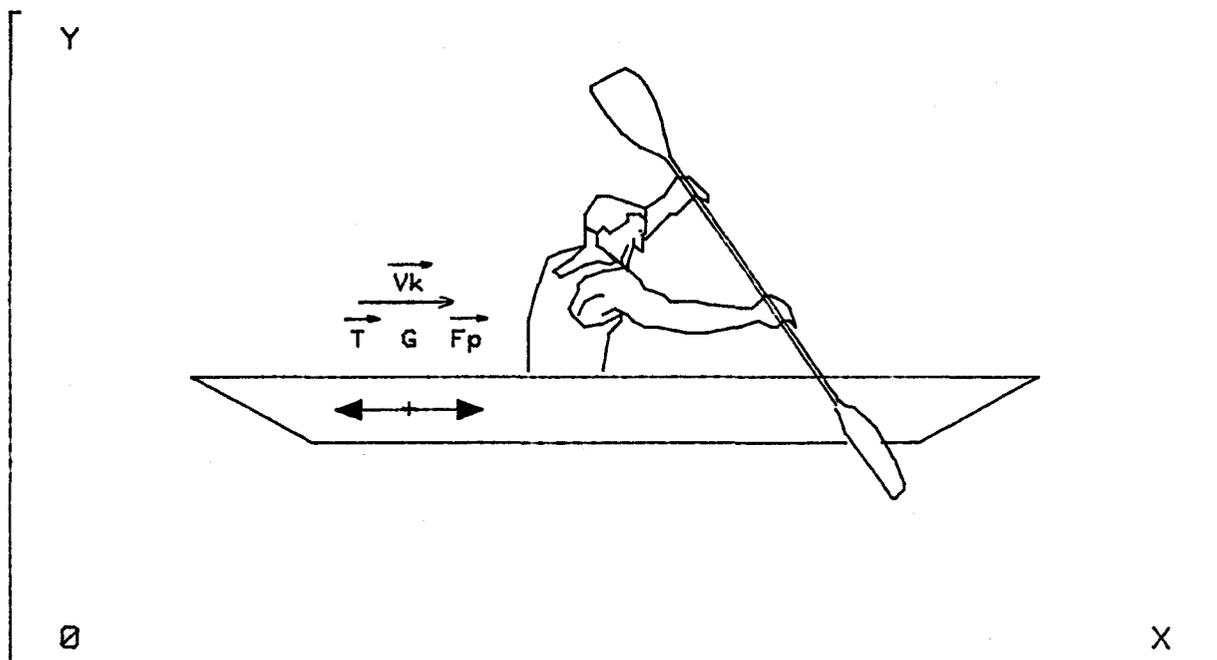
### 1 - Bilan énergétique du système

Le bilan énergétique se résume à l'évaluation de deux puissances différentes :

- la puissance utile au kayak pour avancer
- la puissance dépensée par le pagayeur

#### 1 - 1 Puissance utile pour l'avancement du kayak (Réf19)

Plaçons celui-ci dans un repère absolu :



- Fig 68 -

Soit G le centre de gravité du système complet :  
 ce point est soumis à 2 forces  $\vec{F}_k$  : force de propulsion  
 $\vec{T}$  : traînée du kayak  
 et l'ensemble est soumis à la vitesse de déplacement  $v_k$   
 Le premier principe de la dynamique nous donne :

$$m\vec{Y} = \vec{F}_k - \vec{T}$$

Force de            Traînée  
 propulsion            à vaincre

d'où  $\vec{F}_k = m\vec{Y} + \vec{T}$

Le point d'application de la force  $\vec{F}_k$  se déplaçant à la vitesse  $\vec{v}_k$  il est facile de calculer la puissance utile instantannée :

$$P_k = T \cdot v_k + m \cdot v_k \cdot \frac{dv_k}{dt}$$

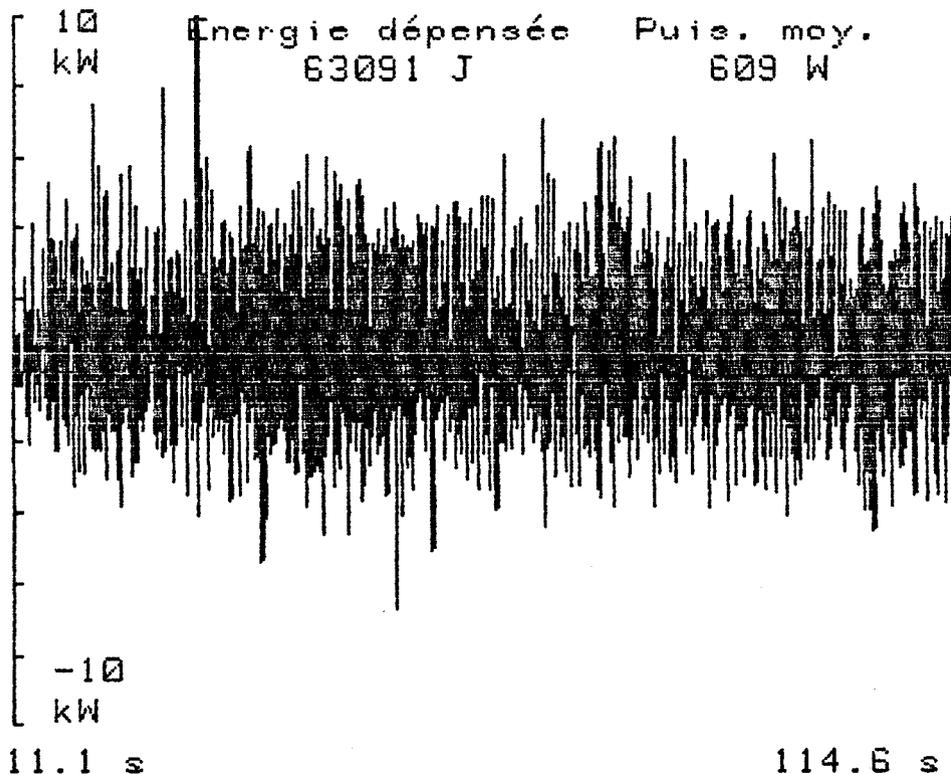
On pose  $\vec{v}_k = \dot{x}$

$$P_k = T \cdot \dot{x} + m \cdot \dot{x} \cdot \ddot{x}$$

$P_k$  représente l'énergie instantannée consommée à tout moment par le système.

Exemple : Equipage A (fig 69)

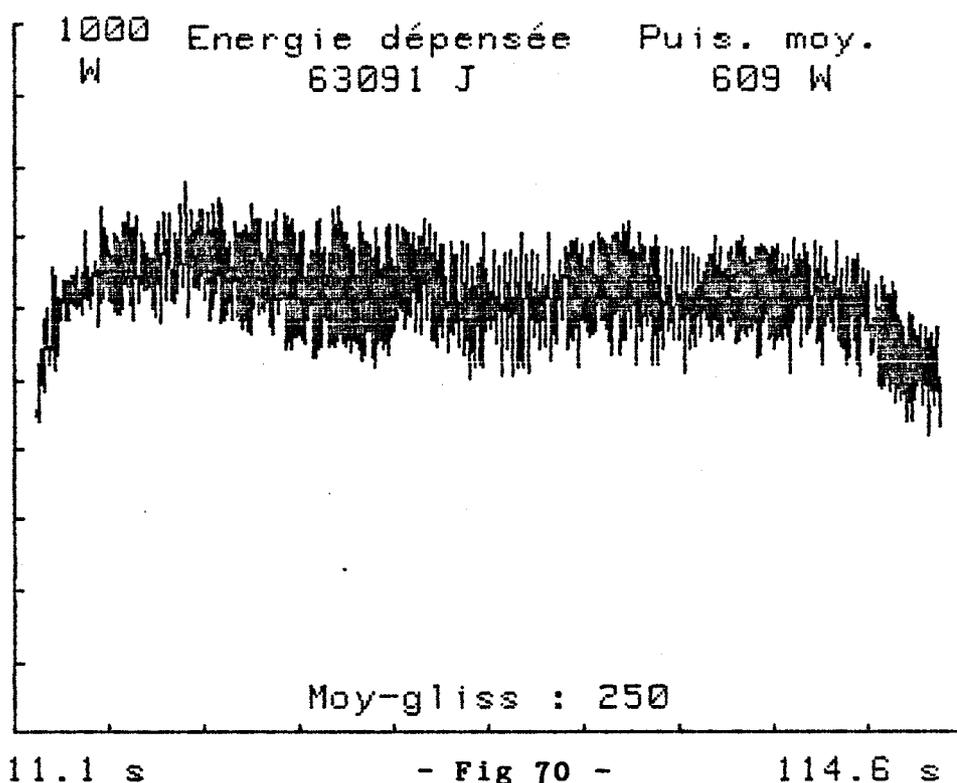
distance 500 m



- Fig 69 -

On constate que les variations dynamiques du paramètre sont très importantes. Celles-ci proviennent du calcul de l'accélération dont les causes sont expliquées au § 2 -21. La mesure de la vitesse comporte des erreurs dues à des déplacements parasites du point d'application du capteur. L'opérateur dérivation amplifie ces erreurs et provoque des variations importantes de la force de propulsion. De manière à remédier à ce problème, nous effectuons un filtrage glissant sur 250 acquisitions.

Le paramètre tracé devient alors la puissance moyenne consommée par le système. (fig 70)



L'expérience répétée sur plusieurs équipages montre que la puissance moyenne consommée varie dans une fourchette de 200 à 600 W. Il faut noter également que la puissance maximale relevée sur l'équipage A donné en exemple figure 70, correspond à une vitesse moyenne de l'ordre de 5m/s.

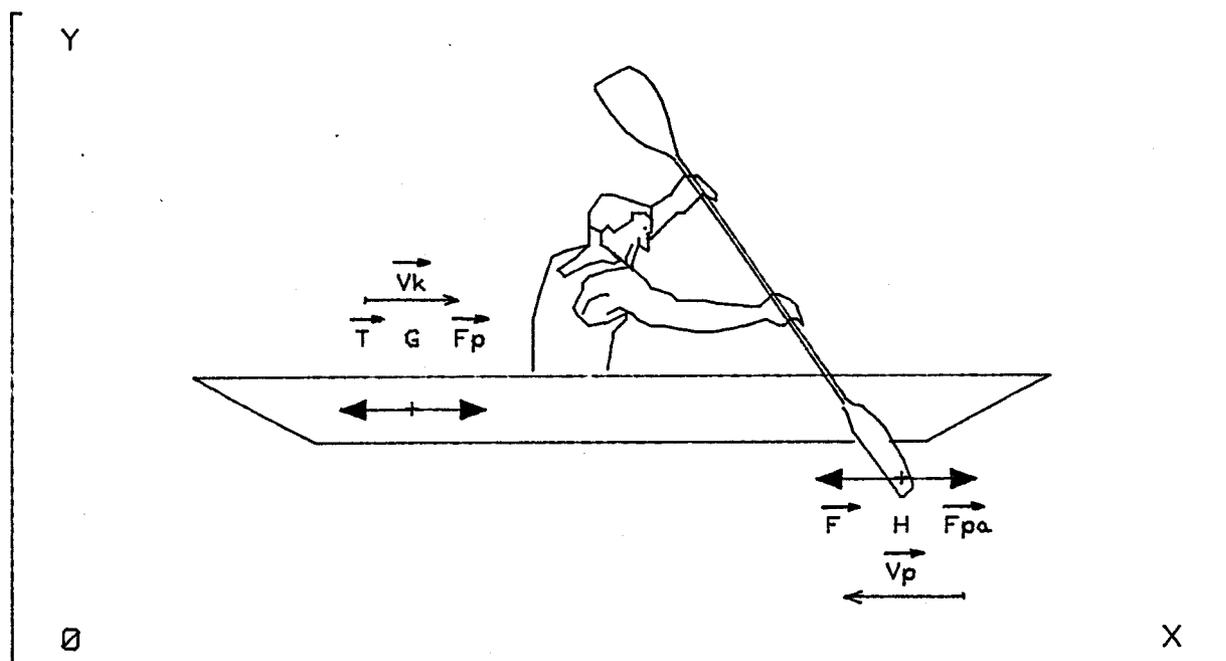
Les vitesses réelles de course, pour un K2, sont en fait supérieures à cette valeur et peuvent atteindre 6m/s.

La puissance moyenne consommée par le même équipage sera alors de 1200 W. Celui-ci est donc capable de fournir une puissance supérieure à cette valeur ( ou à la limite égale à celle-ci, si le rendement du système est de 100 % ); ce qui signifie que

la puissance dépensée par chaque athlète sur 500 m peut atteindre des valeurs très importantes de l'ordre de 500 à 600W.

### 1 - 2 Puissance dépensée par les athlètes

Nous isolons une nouvelle fois le système dans un repère absolu.



- Fig 71 -

On peut isoler 2 phénomènes différents :

- un phénomène lié au kayak appelé K
- un phénomène lié à la pagaie appelé P

C'est ce 2ème phénomène qui nous intéresse.

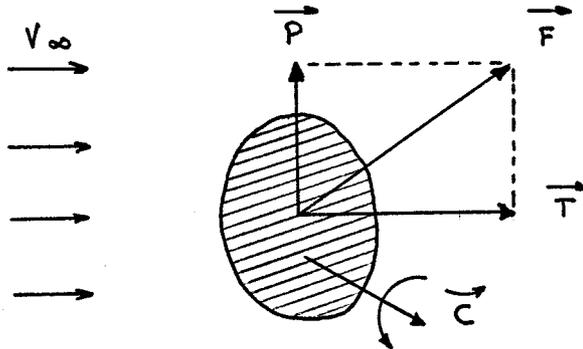
L'appui de la pagaie dans l'eau se fait au point H. Or cet appui, s'exerçant dans un fluide, ne sera pas fixe. On observe un déplacement dans l'eau du point d'application de la force  $\vec{F}$  qui sera inverse au déplacement du kayak. La pagaie est donc soumise à une vitesse de dérapage appelée  $\vec{v}_p$ .

De plus, celle-ci sera fonction de plusieurs paramètres comme la forme de la partie immergée de la pagaie, l'amplitude de la force exercée, la viscosité du fluide...etc...

Il faut donc introduire, ici, quelques notions de mécanique des fluides.

1 - 21 Notions de mécanique des fluides (Réf20)

Soit un corps fixe immergé complètement dans un liquide indéfini et de vitesse constante  $\vec{V}_\infty$ . (fig 72)



- Fig 72 -

Ce corps est soumis à un torseur  $\vec{T}$  dont les éléments de réduction sont la force  $\vec{F}$  et le couple  $\vec{C}$ .

On décompose  $F$  en 2 forces : la traînée  $\vec{T}$   
la portance  $\vec{P}$

La mécanique des fluides donne la relation suivante :

$$F = \rho \cdot V_\infty^2 \cdot l^2 \cdot f(R)$$

avec  $\rho$  = masse volumique du fluide

$V_\infty$  = vitesse du fluide à une distance suffisamment grande du corps.

$l$  = distance caractérisant la géométrie du corps

et  $R$  (nombre de Reynolds) =  $V_\infty \cdot l / \nu$

$\nu$  = viscosité du fluide

Ceci permet d'exprimer la traînée et la portance :

$$T = 1/2 \cdot C_x \cdot \rho \cdot S \cdot V_\infty^2$$

$$P = 1/2 \cdot C_z \cdot \rho \cdot S \cdot V_\infty^2$$

avec  $C_x$  coefficient de traînée

$C_z$  coefficient de portance (coefs ss dimension)

$S$  = maître-couple de l'obstacle

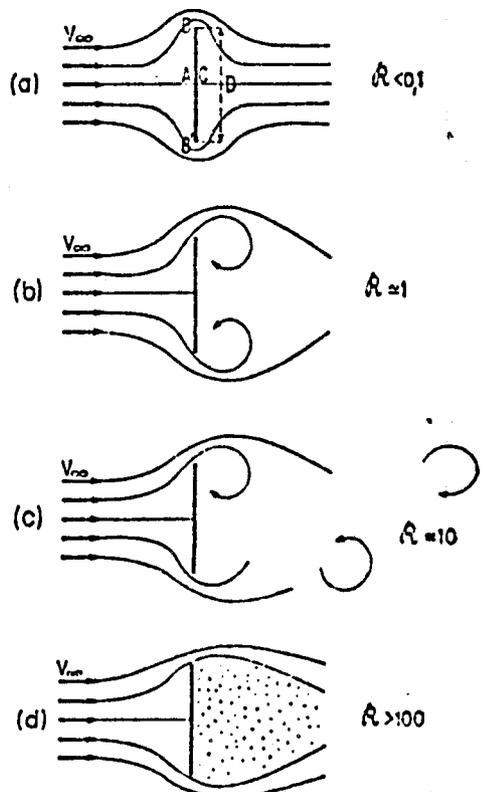
ou encore de façon générale :

$$F = 1/2 \cdot C_m \cdot \rho \cdot S \cdot V_\infty^2$$

avec  $C_m$  coefficient de moment

Si on assimile la pagaie à une plaque rectangulaire de surface finie, placée perpendiculairement par rapport à l'écoulement d'eau, plusieurs cas de figure peuvent se présenter en fonction de la vitesse d'écoulement. (fig 73)

Celle-ci est exprimée en fonction du nombre de Reynolds  $R = V_{\infty} l / \nu$



- Quand R est très petit (fig 73a), l'écoulement est du type purement visqueux. Les lignes de courant suivent la plaque sans se détacher. Le coefficient  $C_x$  est donné par la relation suivante:

$$C_x = \frac{8\pi}{R} \frac{1}{2.2 - \text{Log}(R)}$$

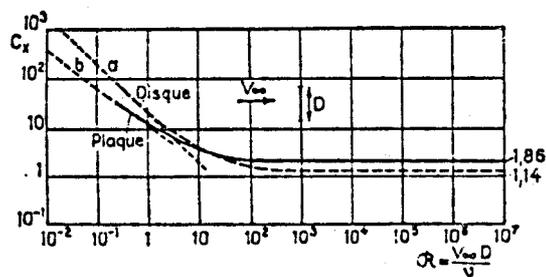
- R augmentant (fig 73b), les lignes de courant se détachent de la plaque aux points B et B' et forment 2 tourbillons symétriques à l'arrière de celle-ci

- Fig 73 -

- Pour des valeurs de R de l'ordre de 10 (fig 73-c) l'instabilité grandit et les tourbillons se détachent de la plaque, formant ce que l'on appelle l'allée tourbillonnaire de Bénard-karman. Leurs positions alternées entraîne un vecteur portance dirigé alternativement dans un sens puis dans l'autre.

- Enfin lorsque R atteint des valeurs supérieures à 100 (fig 73-d), l'allée de tourbillons perd son caractère de régularité et se transforme en un sillage qui occupe tout l'arrière de la plaque. L'expérience montre que le  $C_x$  se stabilise à une valeur de 1.86.

La figure 74 montre l'évolution du  $C_x$  d'une plaque rectangulaire infiniment longue et d'un disque circulaire, en fonction du nombre de Reynolds.



- Fig 74 -

Coefficient de trainée de plaques planes perpendiculaire à  $V_{\infty}$

Plaque rectangulaire  $\frac{L}{D} = \infty$  a)  $C_x = \frac{8\pi}{R(2,2 - \text{Log } R)}$

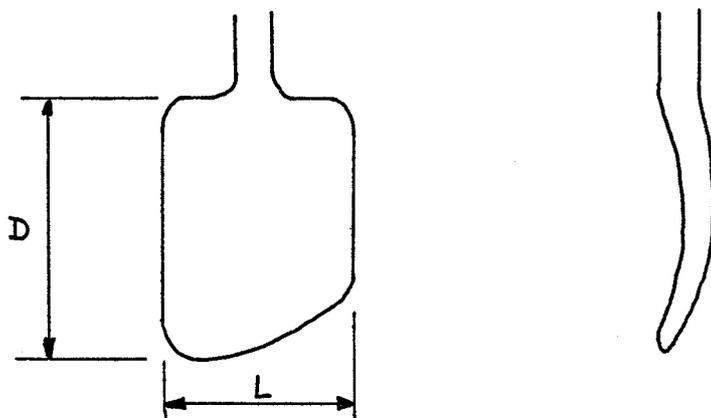
Disque circulaire b)  $C_x = \frac{64}{\pi R}$

Ces 2 courbes, très proches, sont décroissantes pour les valeurs de R faible et se stabilisent lorsque R devient supérieur à une valeur de 100.

La géométrie de la pagaie étant particulière, on peut considérer que sa forme générale est un compromis entre la plaque rectangulaire et le disque circulaire. L'évolution du  $C_x$  de la pagaie, suit donc, en toute logique, la forme des courbes exposées à la figure 74.

1 - 22 Détermination du  $C_x$  de la pagaie

La géométrie de la pagaie est de la forme suivante :



- Fig 75 -

On peut approcher son  $C_x$ , en assimilant sa forme soit à une plaque rectangulaire, soit à une plaque circulaire.

Pour des valeurs de R grandes, le  $C_x$  d'une plaque rectangulaire est donnée par l'approximation suivante :

$$C_x = 1.10 + 0.02 (L/D + D/L)$$

la formule étant valable dans le domaine  $\frac{1}{30} < \frac{L}{D} < 30$   
 D = 0.4m  
 L = 0.2

donc en théorie Cx = 1.15

Le Cx d'une plaque circulaire, donné dans les tables spécialisées est de 1.14.

Conclusion :

Les 2 valeurs étant pratiquement égales, on peut conclure que la géométrie spéciale de la pagaie, n'influe pas sur la valeur de son Cx.

Par contre, la forme légèrement galbée de la pôle, a une répercussion directe sur celui-ci et a pour action de majorer le Cx. On peut donner une fourchette théorique du Cx de la pagaie:

$1.15 < Cx < 1.20$
--------------------

Remarque :

Nous aurions aimé vérifier expérimentalement cette valeur. Malheureusement, les dimensions de la pôle impose de passer par un modèle réduit, pour la mesure, soit en écoulement laminaire soit en soufflerie.

Pour les calculs de puissances dépensée, nous avons fixé le Cx de la pagaie à 1.16.

Domaine d'application du Cx

La figure 74 montre qu'en fonction du nombre de Reynolds le Cx n'est pas toujours constant. Il faut donc connaître son domaine d'application.

La force appliquée en bout de pelle varie de 1n à 300n.

$$V_{\infty} = \sqrt{\frac{2.F}{\rho.Cx.S}}$$

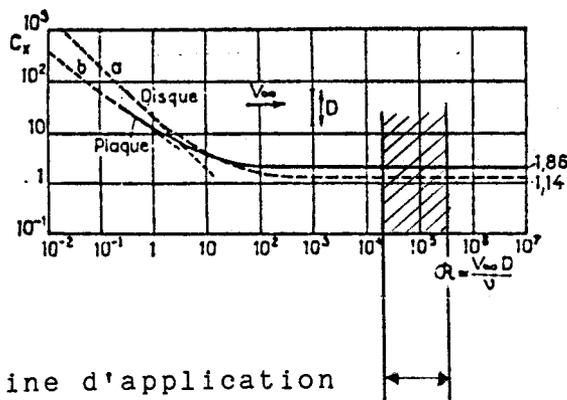
$$R = V_{\infty}.L/v$$

$$1n < F < 300n$$

$$0.15m/s < V_{\infty} < 2.54m/s$$

$$3.10^4 < R < 5.10^5$$

Le domaine d'application va donc être le suivant : (fig 76)



- Fig 76 -

Dans cet intervalle, le  $C_x$  est donc égal à 1.16.

1 - 23 Puissance dépensée pour le déplacement de la pagaie dans l'eau

La figure 71 montrait que l'on pouvait isoler 2 phénomènes différents : l'un lié au kayak et l'autre à la pagaie.-L'appui de la pagaie dans l'eau est mouvant. Il s'en suit, une certaine puissance perdue, qui ne sert en fait, qu'à déplacer un certain volume d'eau. Cette puissance est fonction de la réaction de l'eau sur la pàle et de la vitesse de déplacement du point d'application de cette force. Ces 2 paramètres sont inverses, ce qui prouve bien qu'il s'agit de puissance perdue.

Calcul :

$$P_p = F_p \cdot V_p$$

avec  $F_p$  = Force mesurée

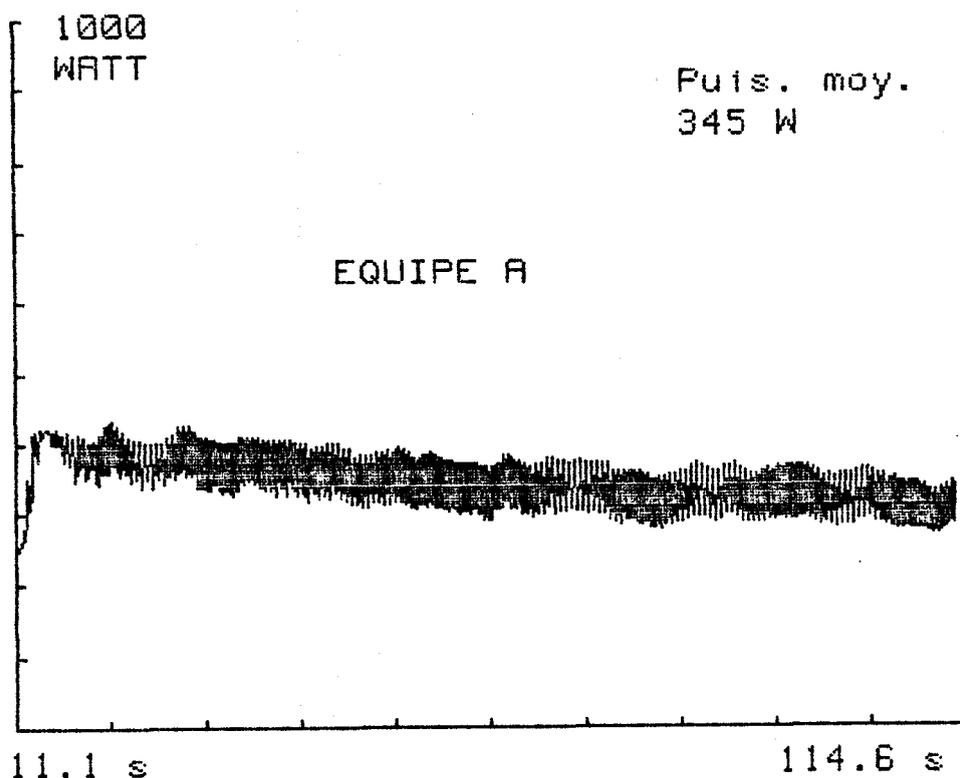
$$V_p = \sqrt{\frac{2 \cdot F_p}{\rho \cdot C_x \cdot S}}$$

$$P_p = F_p \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot F_p}{\rho \cdot C_x \cdot S}}$$

$$P_p = \sqrt{\frac{2}{\rho \cdot C_x \cdot S}} \cdot F_p^{3/2}$$

Résultats :

La puissance oscille de la même manière que la force. Nous l'avons donc moyennée sur 100 points.



- Fig 77 -

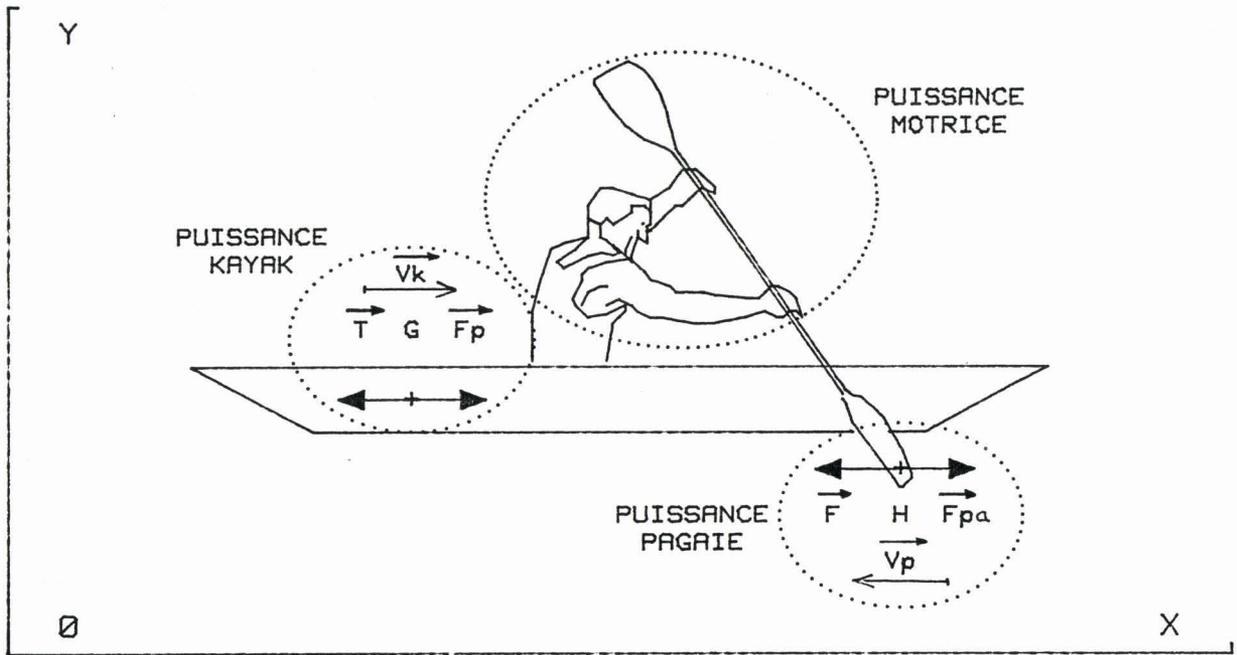
L'expérience répétée sur plusieurs équipages montre que la puissance consommée au niveau de l'appui de la pagaie dans l'eau varie entre 150 et 350 W.

Remarque :

Les puissances réelles sont inférieures à ces valeurs car nous avons considéré dans ce calcul, que la pagaie était toujours verticale par rapport à l'eau. En fait, l'incidence de la pelle, lors des phases d'attaque est de dégagé, tend à minimiser le terme de traînée au profit d'un terme de portance.

1 - 24 Puissance motrice

Nous venons de voir que les puissances dépensées pour faire avancer le kayak et prendre l'appui de poussée dans l'eau correspondent à des puissances négatives. La puissance motrice du système est donc fournie par l'athlète. (fig 78)

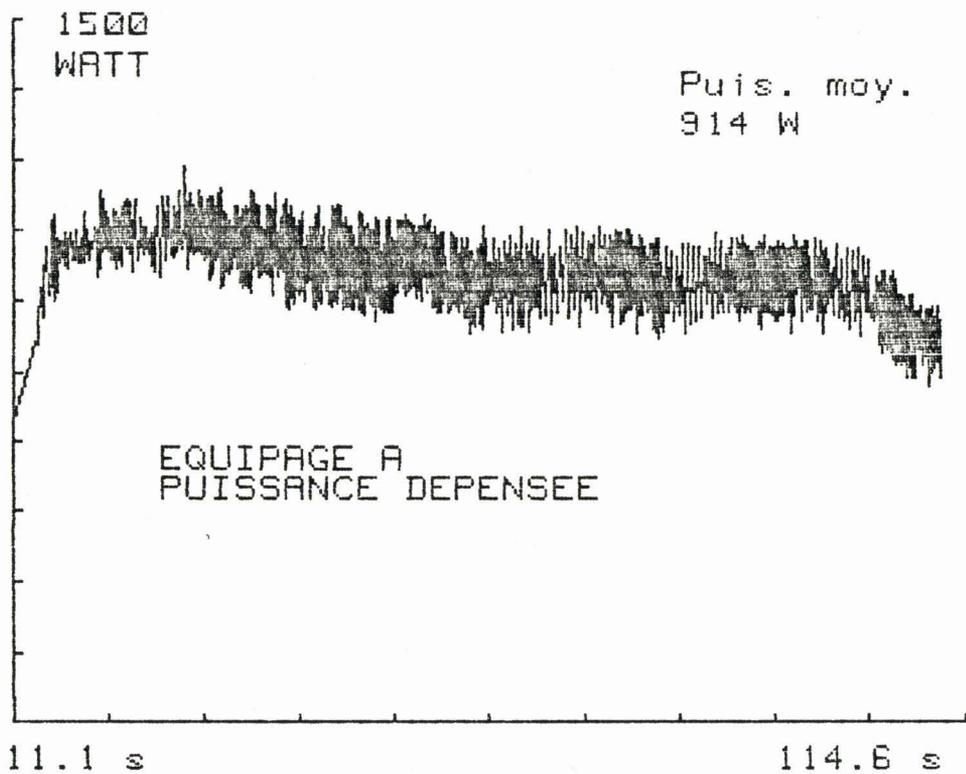


- Fig 78 -

en moyenne  $P_{motrice} = P_p + P_k$

$$P_{motrice} = T \cdot V_k + \sqrt{\frac{2}{\rho \cdot C_x \cdot S}} \cdot F^{3/2}$$

Résultats :



- Fig 79 -

La puissance moyenne fournie par chaque athlète peut paraître élevée, puisque dans ce cas-ci, elle avoisine les 500 W. Cependant, on peut justifier cette valeur par 2 constatations.

La puissance maximale qu'un homme est capable de développer est fonction du temps pendant lequel l'effort est fourni. On peut ainsi recenser 3 métabolismes bioénergétiques, faisant appel à des processus énergétiques différents, caractérisés chacun par 2 paramètres : la puissance maximale et la capacité. (Réf 22)

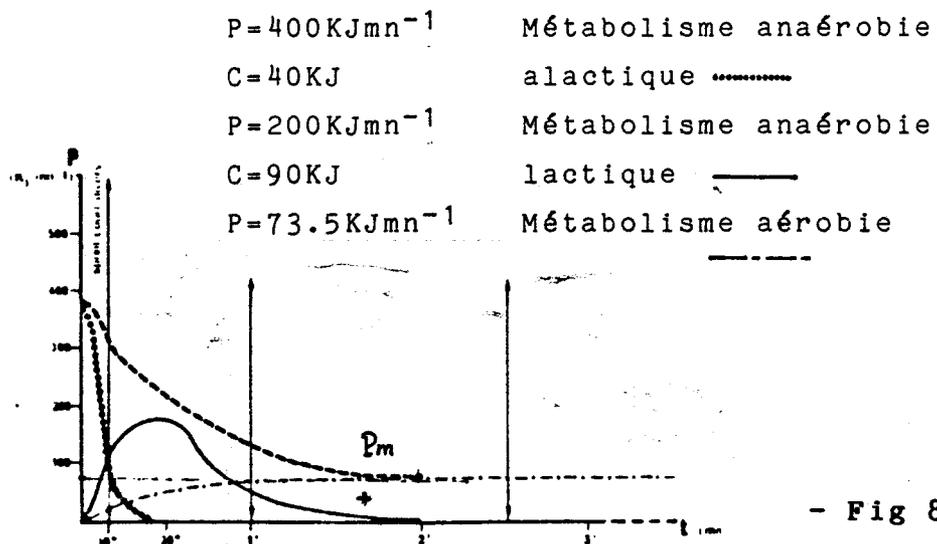
- le métabolisme anaérobie alactique mis en jeu lors des efforts de courte durée (quelques secondes) comme le sprint, le saut, l'haltérophilie...etc...

- le métabolisme anaérobie lactique mis en jeu lors des efforts de moyenne durée (quelques secondes à quelques minutes) comme la course à pied, la natation, le ski de descente...etc...

- le métabolisme aérobie mis en jeu lors des efforts de longue durée (quelques minutes à plusieurs heures) comme le marathon, le ski de fond, le cyclisme...etc...

La différence entre ces 3 processus est l'origine de l'énergie qui provient d'une transformation chimique pour les 2 premiers et de l'oxygène absorbé pour le troisième.

La figure 80 représente l'évolution en fonction du temps de ces 3 métabolismes.



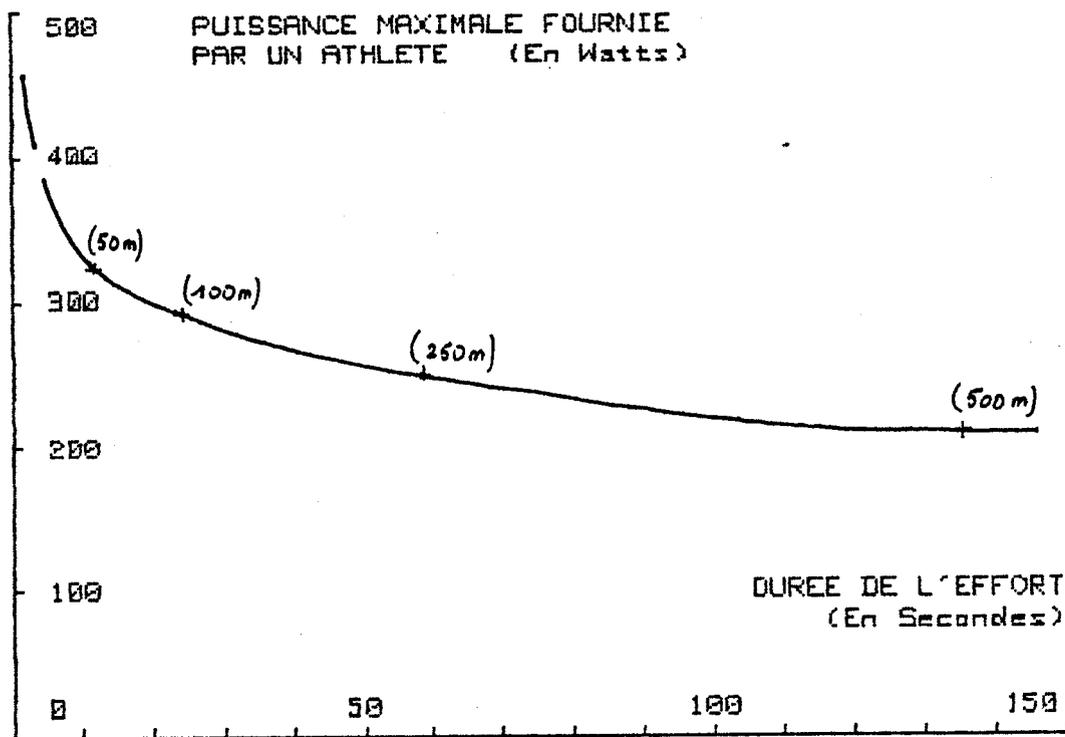
La ligne pointillée représente le débit maximal d'énergie susceptible d'être fourni à chaque instant par le recrutement des 3 métabolismes considérés.

$$P = 500W \text{ pendant } 100s \text{ ---> } P_m = 50Kj$$

On voit que la puissance moyenne fournie par chaque athlète, calculée ci-dessus et représentée dans le graphique de la figure 80, se situe nettement en dessous de la limite.

On peut donc considérer en toute logique, que les chiffres énoncés dans ce paragraphe sont plausibles.

D'autre part, le calcul de la puissance fournie sur différentes distances, utilisant les 3 types de métabolisme, suit une courbe dont l'allure rappelle celle représentée à la figure 80 (fig 81).



- Fig 81 -

On peut donc en conclure, que les résultats suivent bien le débit maximal d'énergie classique.

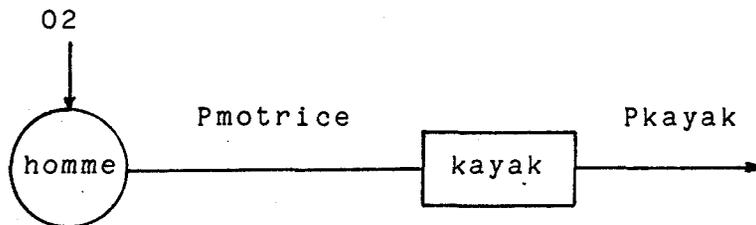
On peut également justifier la puissance moyenne calculée, par les masses musculaires mises en jeu. Le geste d'un kayakiste utilise non seulement les muscles du bras mais aussi un

certain nombre de muscles du tronc. Autrement dit, c'est toute la partie supérieure au bassin qui travaille. Dans ces conditions, on ne peut comparer les résultats obtenus et les tests faits sur bicyclette ergonomique.

2 - Rendement énergétique

2 - 1 Problème de définition de rendement

Le 1er paragraphe était chargé de déterminer les différentes puissances mises en jeu et de chiffrer celles-ci. Il a permis, entre autre, de mettre en évidence que la puissance motrice du système était l'athlète lui-même. En outre, celui-ci tire son énergie de l'oxygène qu'il absorbe. Le système suit donc le modèle suivant :



- Fig 82 -

Il y a ici 2 systèmes distincts : l'homme et le kayak  
On peut donc parler de 2 rendements différents :

- un rendement biomécanique  $\phi$        $\phi = \frac{P_{motrice}}{\text{Consommation d'O}_2}$

- un rendement mécanique  $\eta$        $\eta = \frac{P_{kayak}}{P_{motrice}}$

Le rendement total étant  $\theta$        $\theta = \phi \cdot \eta$

2 - 2 Rendement biomécanique(Réf22)

Le paragraphe 1 -24 a enoncé 3 types de métabolismes utilisés à différents stades de l'effort musculaire. C'est le métabolisme aérobie qui sera le plus sollicité lors d'une compétition de course en ligne.

La puissance aérobie correspond à la consommation d'oxygène appelée "  $\dot{V}O_2$  ". Le moyen d'évaluer le rendement est donc de mesurer le taux d'oxygène consommé. Malheureusement, cette mesure est difficilement réalisable sur le site. En effet, l'instrumentation permettant d'accéder à ce paramètre est trop importante pour pouvoir être embarquée. (on pourrait, à la limite, faire ce genre de mesure en bassin de carène)

Cependant, une méthode indirecte permet l'évaluation de la  $\dot{V}O_2$  par le rythme cardiaque.

En effet, la quantité d'oxygène consommé suit la relation suivante :

$$\dot{V}O_2 = Q * (CaO_2 - CvO_2)$$

avec  $\dot{V}O_2$  (l/mn) = consommation d'oxygène

$Q$  (l/mn) = débit cardiaque

$CaO_2$  (ml %) = contenu en oxygène du sang artériel

$CvO_2$  (ml %) = contenu en oxygène du sang veineux

Le débit cardiaque dépend de la fréquence cardiaque et de la quantité de sang expulsé hors d'un ventricule cardiaque durant une phase de contraction, de la manière suivante :

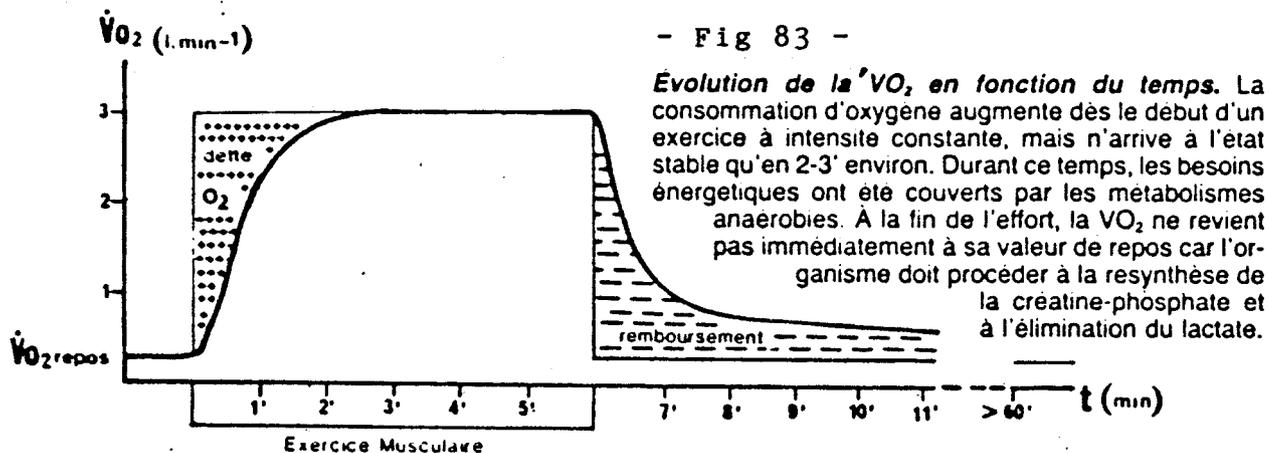
$$Q = V_s * FC$$

avec  $V_s$  (ml) = volume d'éjection systolique ventriculaire

$FC$  (bat/mn) = fréquence cardiaque en nombre de battements par minute

Les travaux menés par Astrand ont permis de démontrer qu'il existe une relation linéaire entre la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène. Cependant, la courbe traduisant cette relation a tendance à légèrement s'incurver lorsqu'on se rapproche de la  $\dot{V}O_2$  max.

Néanmoins, l'évolution de la  $\dot{V}O_2$  étant similaire à celle du rythme cardiaque, on peut, connaissant la charge cardiaque, déterminer qu'elle a été la consommation d'oxygène pendant l'exercice.



La consommation d'oxygène, qu'a occasionné l'exercice musculaire, dont l'évolution est représenté en figure 83 est proportionnelle à la charge cardiaque.

(  $VO_2$  = aire hachurée )

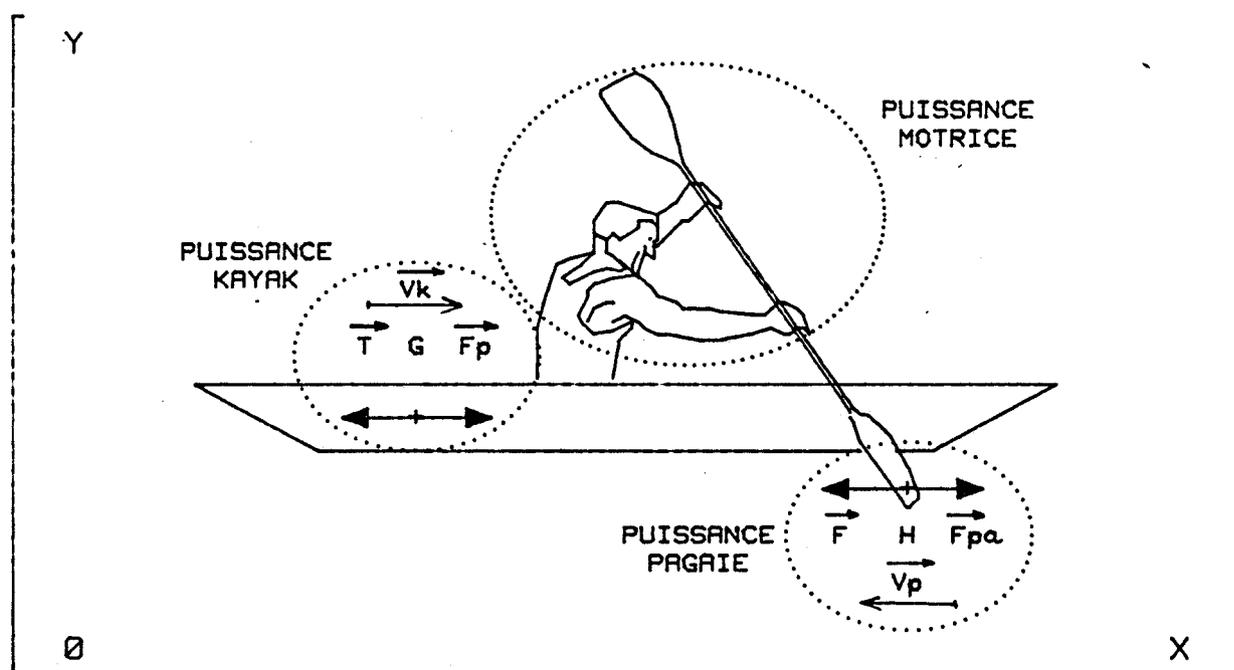
Conclusion :

Nous venons de démontrer, qu'il était possible de déterminer la consommation d'oxygène à partir du rythme cardiaque. Le principal problème de cette méthode est le facteur de conversion. Celui-ci a été étudié en laboratoire sur des efforts bien précis mettant en oeuvre certains muscles. L'exercice musculaire d'un kayakiste est très spécifique ; il fait appel à de nombreux muscles situés dans le bras et dans le tronc. Le facteur de conversion sera donc différent. De plus, celui-ci risque d'être fonction de chaque athlète. Il est donc difficile, dans ces conditions, d'évaluer le rendement physiologique.

Cependant, l'énergie libérée au cours des métabolismes énergétiques n'est pas totalement utilisable sous forme d'énergie musculaire, 75 à 80 % étant transformés en chaleur. On peut donc s'attendre à un rendement physiologique relativement bas.

2 - 3 Rendement mécanique

Rappel :



- Fig 84 -

Mettons en équation le système complet :

$$m\ddot{x} = -T\dot{x} - F_p.V_p + P_{motrice}$$

$$m\dot{x}\ddot{x} = f \left\{ \begin{array}{l} P_{motrice} : \text{c'est l'homme} \\ > 0 \quad \text{c'est la seule puissance positive du système} \\ \\ T\dot{x} : \quad \text{puissance à fournir pour vaincre la traînée ---> freinage} \\ < 0 \\ \\ F_{pa}.V_d : \quad \text{puissance à fournir pour prendre l'appui dans l'eau : puissance perdue} \end{array} \right.$$

Définition du rendement mécanique du système :



$$\eta = \frac{P_k}{P_{motrice}} = \frac{P_k}{P_k + P_p}$$

$$\eta = \frac{m\ddot{x}\dot{x} + T\dot{x}}{m\ddot{x}\dot{x} + T\dot{x} + F_{pa}.V_d} = \frac{m\ddot{x}\dot{x} + T\dot{x}}{m\ddot{x}\dot{x} + T\dot{x} + 1/2.\rho.S.C_x.V_d^3}$$

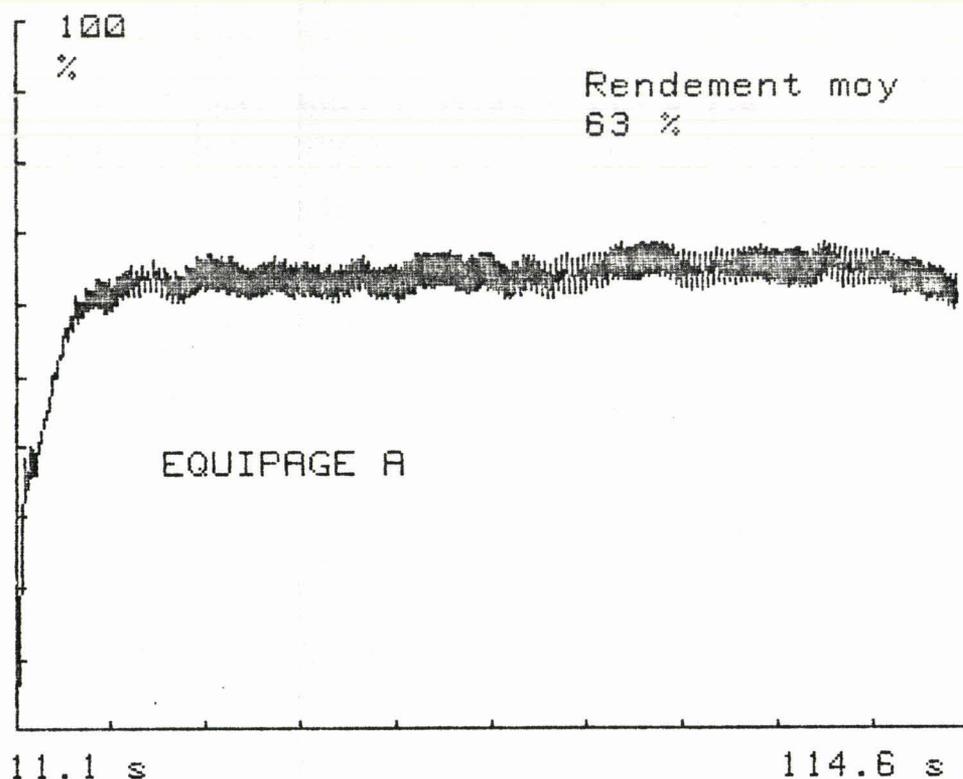
$$\text{or } V_d = \sqrt{\frac{2.F_{pa}}{\rho.C_x.S}} \quad \text{-->} \quad \eta = \frac{m\ddot{x}\dot{x} + T\dot{x}}{m\ddot{x}\dot{x} + T\dot{x} + F_{pa}\sqrt{\frac{2.F_{pa}}{\rho.C_x.S}}}$$

d'où :

$$\bar{\eta} = \frac{m\ddot{x}\dot{x} + T\dot{x}}{T.V_k + \sqrt{\frac{2}{\rho.C_x.S}} F^{3/2}}$$

Exemple : Equipage A

La puissance dépensée par les athlètes pour prendre l'appui dans l'eau subit des variations du même type que la force exercée sur la pagaie. Ainsi, nous sommes contraint de moyenner le rendement sur environ 100 acquisitions. (fig 85)



- Fig 85 -

Le rendement obtenu est de l'ordre de 60 %. Celui-ci dépend, en fait, beaucoup de caractéristiques du matériel utilisé : bateau et pagaie.

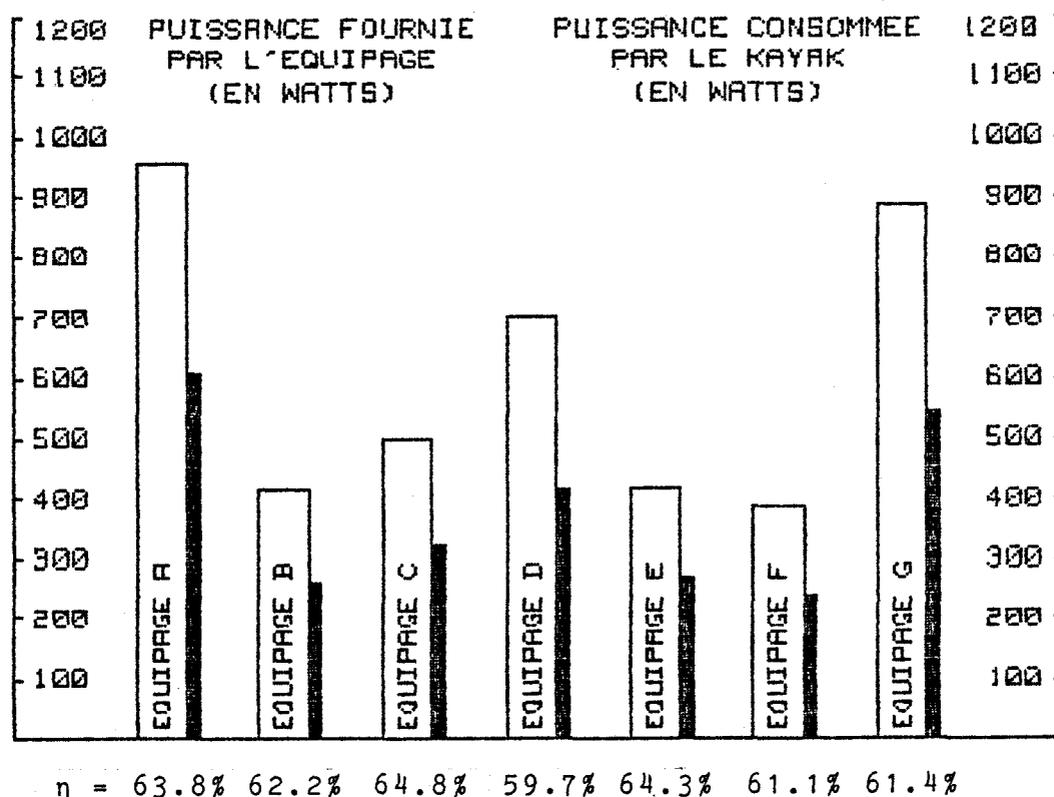
Ainsi, cette définition de rendement sera pratiquement constante quelque soit l'équipage.

Les essais sur plusieurs équipages, sont indiqués dans le tableau ci-contre et confirme cette théorie :



	Puissance dépensée par l'équipage (W)	Puissance fournie au kayak (watts)	Rendement mécanique
Equipage A	954	609	63.8 %
B	415	258	62.2 %
C	500	323	64.6 %
D	699	417	59.7 %
E	418	269	64.3 %
F	388	237	61.1 %
G	889	547	61.4 %

Représentation graphique du rendement

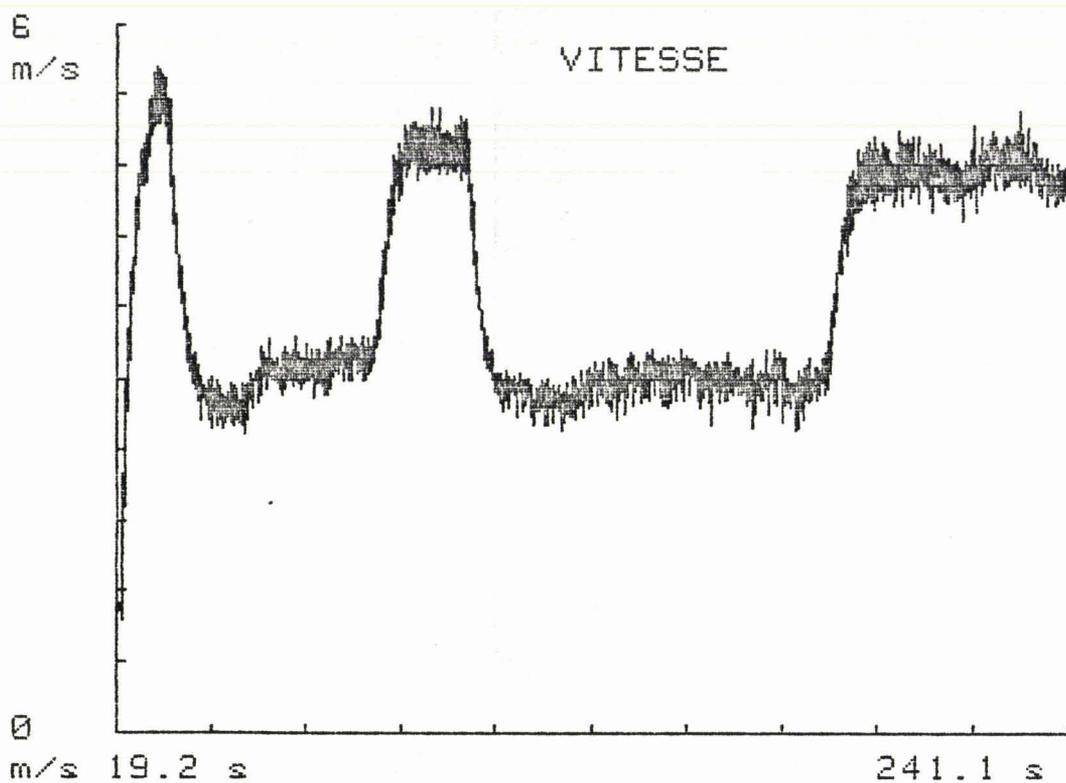


- Fig 86 -

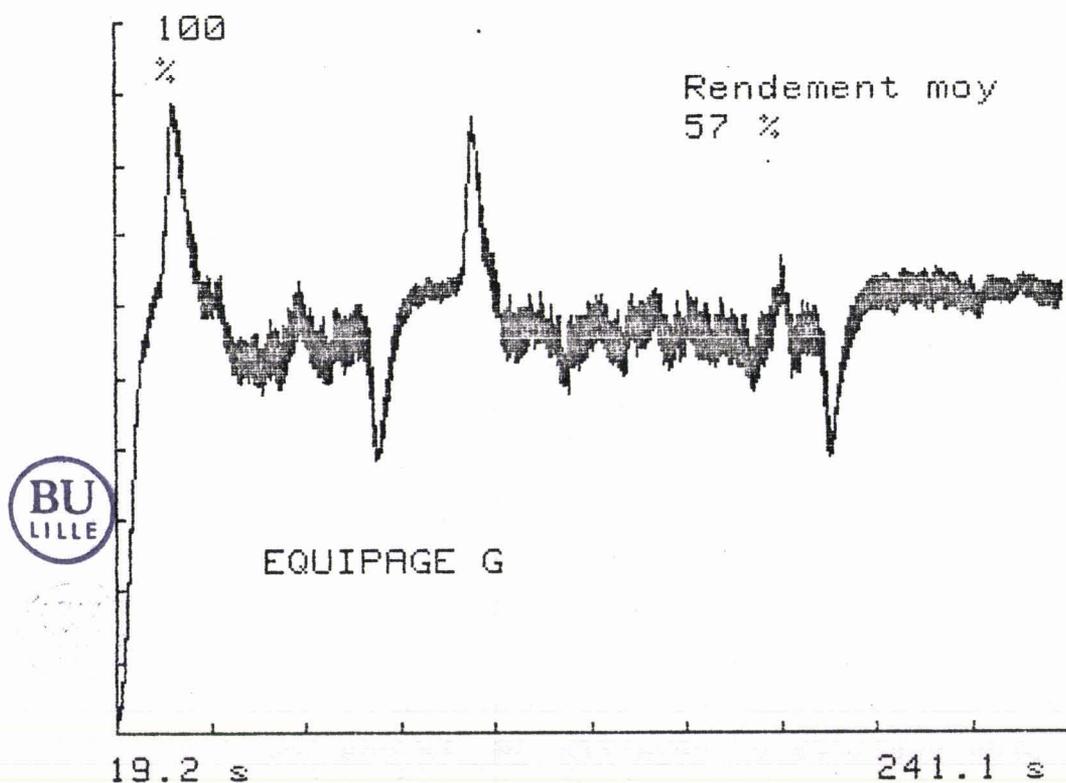
Remarque :

La définition du rendement que nous venons d'établir est fonction de la traînée du kayak, du coefficient de pénétration de la pagaie dans l'eau et de l'efficacité de la technique de l'athlète. Les 2 premiers paramètres sont largement prédominants sur le troisième ; ainsi le rendement sera indépendant du régime de course.

La figure 87, illustre cette caractéristique. Cependant, il faut remarquer que celui-ci n'est pas valable dans les phases d'accélération et de décélération. En effet, la formulation du rendement est calculée en statistique. C'est ce qui explique les pics positifs et négatifs de la courbe.



- Fig 87a -



- Fig 87b -

#### 2 - 4 Conclusion

L'évaluation du rendement du système, développée dans ce chapitre, a montré que les résultats des kayakistes sont fortement limités par les caractéristiques mécaniques du matériel utilisé. L'ascension des records va donc suivre

vraisemblablement l'évolution technologique de celui-ci.  
De manière à augmenter efficacement le rendement, il faut donc jouer sur 2 facteurs :

- Diminuer la traînée du kayak en modifiant sa forme et en améliorant sa glisse.
- Augmenter l'appui dans l'eau en modifiant la géométrie de la pagaie.

Voici quelques perspectives d'avenir, fonction de l'évolution de ces 2 paramètres.

Rappel :

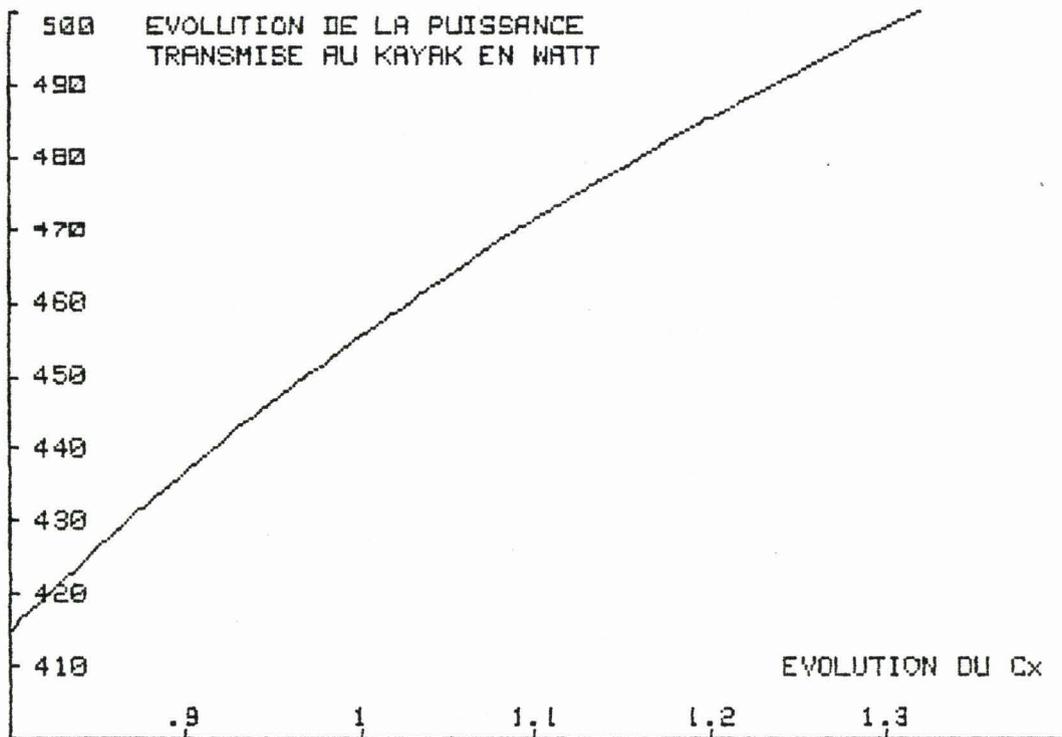
$$\eta = \frac{P_k}{P_k + P_p} = \frac{T.V_k}{T.V_k + (2/\rho.C_x.S)^{1/2}.F^{3/2}}$$

Hypothèse :

$$P_{motrice} = P_k + P_p = 800 \text{ W}$$

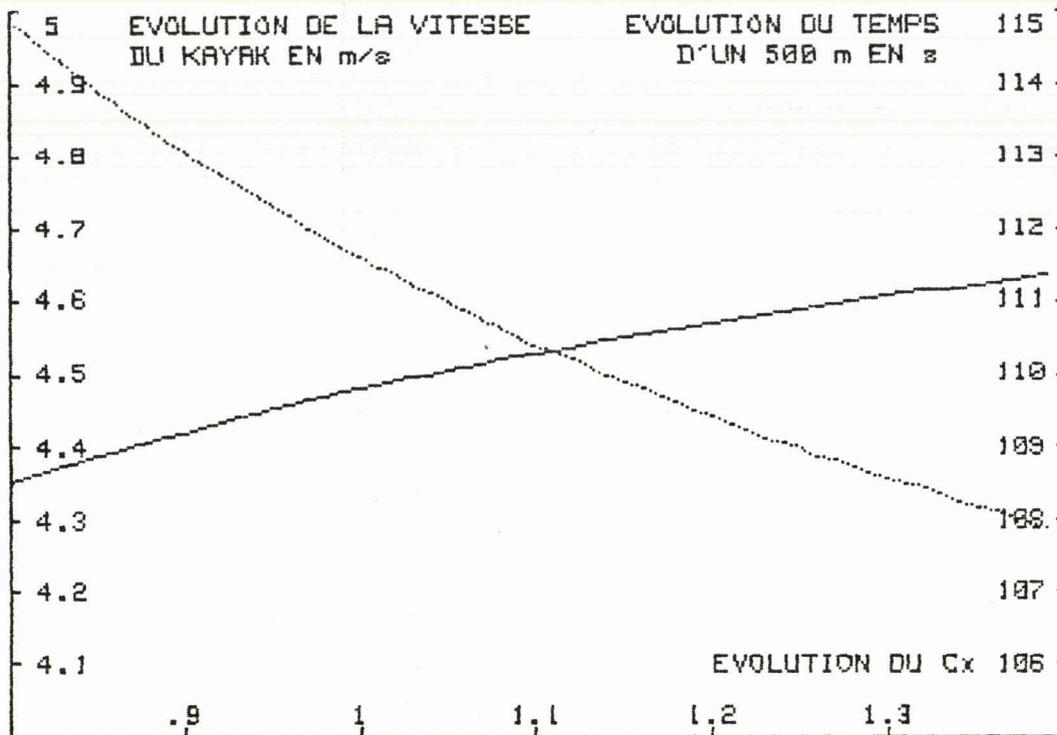
$$F = 168n$$

**\* Variation du Cx**



EVOLUTION DE LA PUISSANCE KAYAK EN FONCTION DU Cx





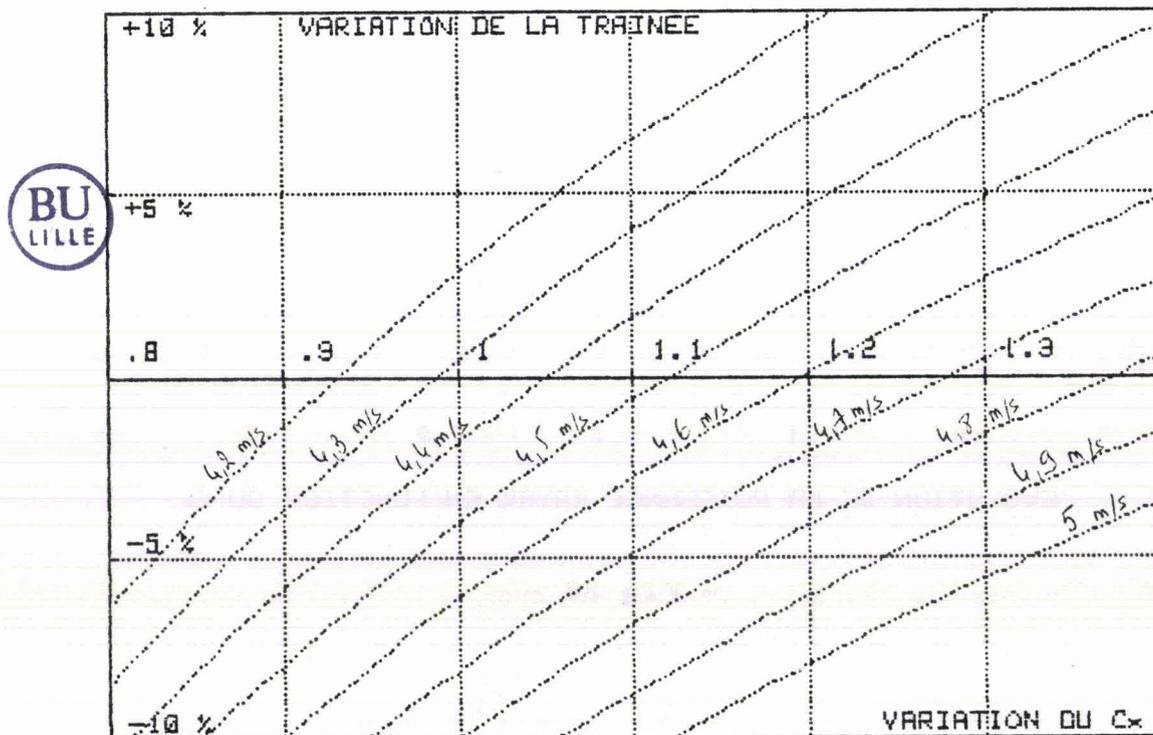
EVOLUTION DE LA VITESSE ET DU TEMPS D'UN 500 m

- Fig 89 -

Ces 2 graphiques montrent le gain de puissance transmise au kayak (fig 88) entraînant un accroissement de la vitesse kayak (fig 89) pour une puissance fournie constante, en fonction simplement de la variation du Cx de la pagaie.

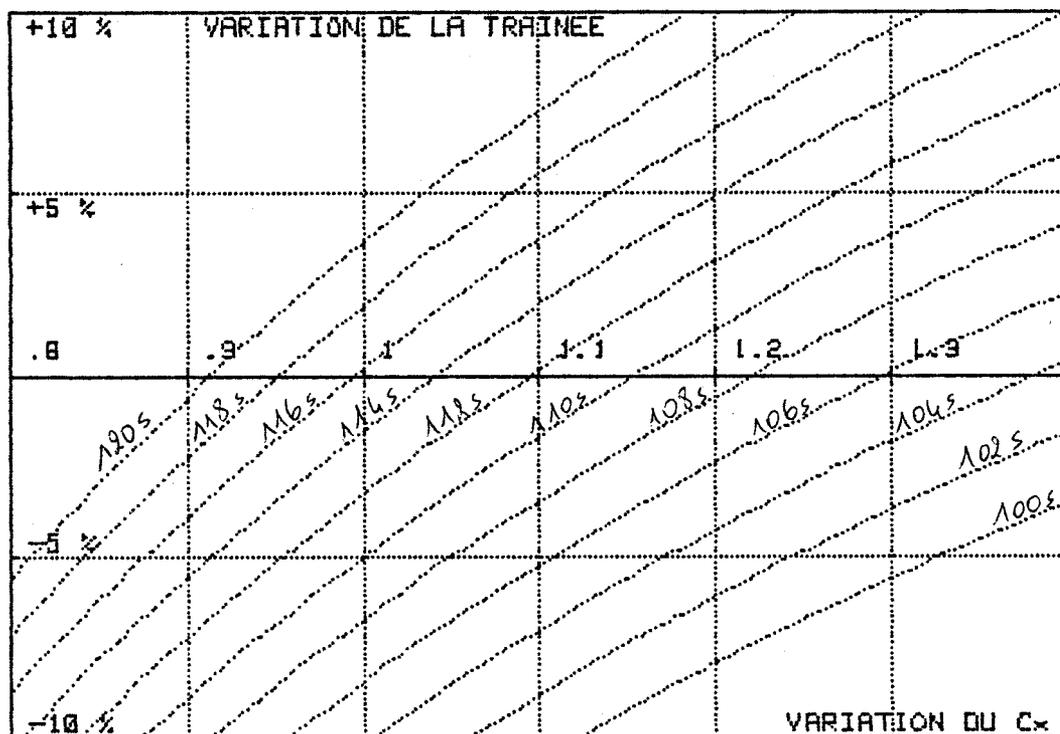
**\* Variation du Cx et de la traînée**

On peut également prévoir la vitesse théorique du kayak en fonction de la double variation Cx et traînée.



- Fig 90 -

Ce qui donne une prévision de temps pour un 500 m de :



TEMPS KAYAK - F(Cx,Trainée)

- Fig 91 -

### 3 - Classification des pertes

Le bilan énergétique du système a été calculé en fonction de certaines hypothèses de départ qui ont été adoptées de manière à simplifier le calcul :

- Pagaieur statique (lié au bateau)
- Position de la pagaie/eau (verticale)
- Déplacement de la pagaie/eau (rectiligne)

Les pertes interviennent donc à 2 niveaux et suivent le schéma suivant :

- Pertes occasionnées par la traînée du kayak

#### Matériel

- Pertes occasionnées par le Cx de la pagaie
- Pertes occasionnées par le mouvement pendulaire du kayakiste qui provoque un tanguage

#### Geste

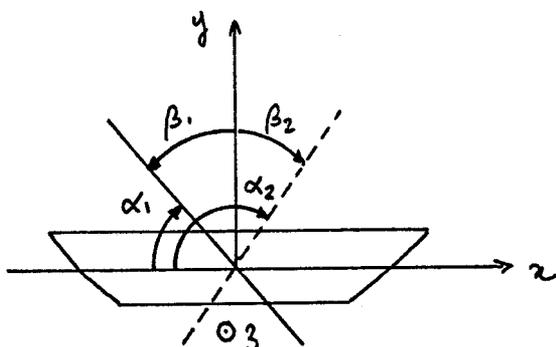
- Pertes occasionnées par les différentes incidences de pelle qui provoque tanguage, gite, louvoyage

Le calcul de la puissance motrice dépensée par l'équipage ne tient pas compte du 2ème type de pente et notamment de l'incidence de la pagaie dans l'eau, qui a obligatoirement une répercussion sur son  $C_x$ . Les puissances dépensées réelles seront donc inférieures aux chiffres énoncés au § 1 -24. Autrement dit les valeurs calculées sont données par excès.

### 3 - 1 Différentes incidences de la pagaie (Réf24)

Plusieurs types d'incidence peuvent être considérées entraînant des conséquences plus ou moins importantes au niveau de la force de propulsion du kayak.

1er type :



$\alpha_1/Ox$  angle d'attaque ( $\beta_1/Oy$ )

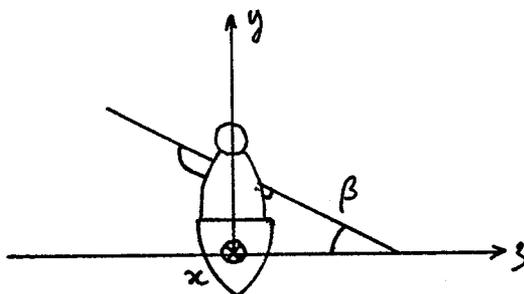
$\alpha_2/Ox$  angle de dégagé ( $\beta_2/Oy$ )

- Fig 92 -

Incidence de la pagaie dans le plan  $Oxy$  / plan horizontal  $Oxz$ .

Ce type d'incidence entraîne une modification du  $C_x$  que nous allons étudier par la suite, et également un terme de portance qui se traduit par un phénomène de tanguage.

2ème type :

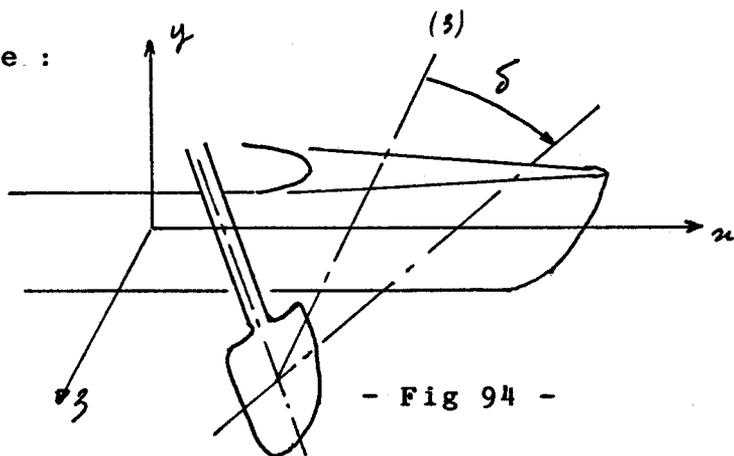


- Fig 93 -

Incidence de la pagaie dans le plan  $Oyz$  / plan horizontal  $Oxz$ .

Ce type d'incidence entraîne un phénomène de gîte plus ou moins important selon l'angle .

3ème type :



- Fig 94 -

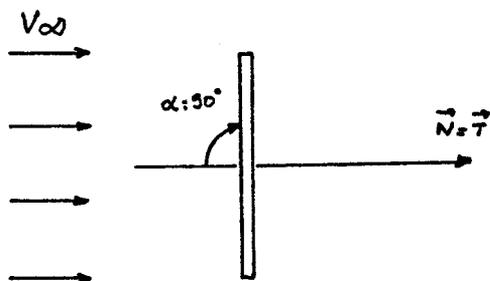
Incidence de la pagaie dans le plan Oxz / plan horizontal Oyz.

Ce type d'incidence entraîne une modification du Cx de la pagaie. La répercussion physique de ce phénomène est difficile à interpréter.

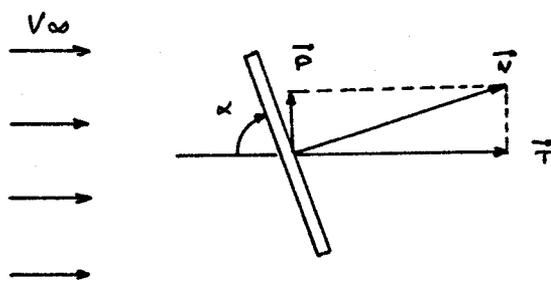
3 - 2 Répercussion sur le Cx de la pagaie

Nous allons étudier plus spécialement le 1er type d'incidence qui est facilement caractérisable, et dont les conséquences sur le système sont importantes.

Les calculs de rendement ont été fait en fonction d'une pagaie perpendiculaire au fluide ( $\alpha = 90^\circ$ ). (fig95a)



- Fig 95a -

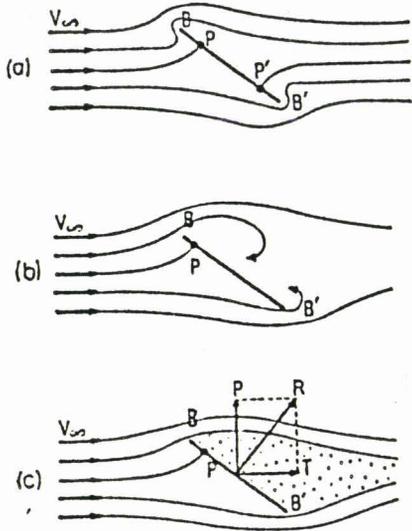


- Fig 95b -

Lorsque l'angle  $\alpha = 90^\circ$ , la normale N peut se décomposer en un terme de portance P et un terme de traînée T.

Le Cx de la pagaie subit une modification et la portance P entraîne un tanguage du kayak.

Explication du phénomène :



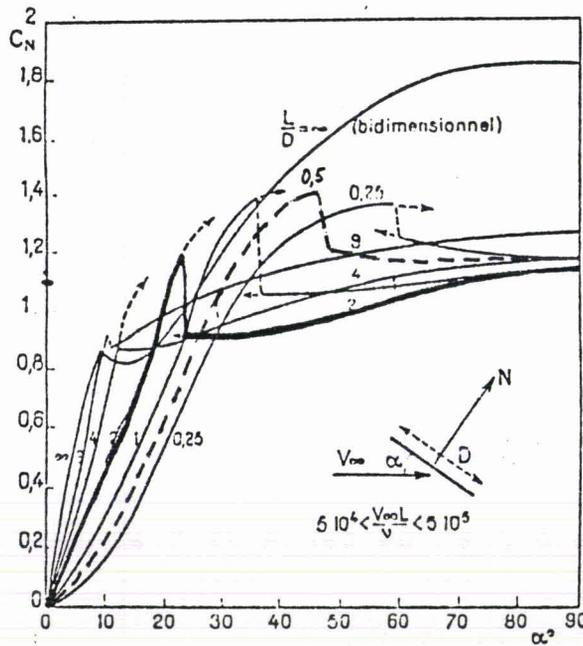
- Fig 96 -

Lorsque R est très petit, l'écoulement est du type purement visqueux et les lignes de courants ne se décolle pas. (fig 96a)

Quand R atteint quelques dixièmes, un décollement se produit à l'arrière de la plaque. Ceux-ci sont inégaux et expliquent le terme de portance P, dont la valeur moyenne est non nulle. (fig 96b)

Lorsque R est de l'ordre de 100, un sillage se forme derrière la plaque. La résistance de celle-ci est uniquement due aux forces de pression. Il s'en suit une résultante N qui se décompose en une traînée T et une portance P. (fig 96c)

Répercussion au niveau du Cx : (Réf20)



- Fig 97 -

L'évolution du Cx est très lente au voisinage de 90°. Elle croît ou décroît légèrement en fonction du rapport L/D, puis

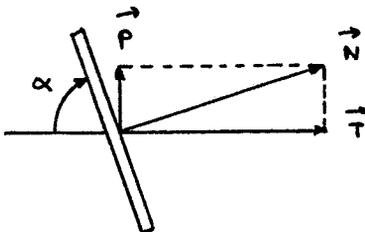
varie très rapidement jusque 0 lorsque l'angle dépasse une limite qui dépend également de L/D.

Dans notre application,  $L/D = 1/2$  ; on se situe donc approximativement sur la ligne pointillée.

Pour les variations de plus ou moins  $40^\circ$  autour de l'axe vertical, le  $C_x$  reste à peu près constant. On peut donc considérer les angles d'attaque et de dégagé pratiqués étant situés à l'intérieur de cette fourchette, que le  $C_x$  ne subit pas de variation.

### 3 - 3 Répercussion sur la portance

L'incidence de la pelle entraîne par contre des modifications de l'appui de la pagaie dans l'eau. En effet, la normale résultante se décompose en 1 vecteur portance et 1 vecteur traînée.



$$P = N \cdot \cos \alpha$$

$$T = N \cdot \sin \alpha$$

- Fig 98 -

Au cours d'un coup de pagaie, le vecteur portance sera d'abord positif puis négatif. Ce phénomène se répercute sur le bateau et a pour effet de diminuer légèrement la traînée de celui-ci lorsque  $\alpha < 90^\circ$ , puis de l'augmenter lorsque  $\alpha > 90^\circ$ . Si les angles d'attaque et de dégagé sont égaux, on peut considérer en toute logique que la répercussion sur la traînée du kayak sera nulle.

Une 1ère conclusion découle de ce raisonnement :

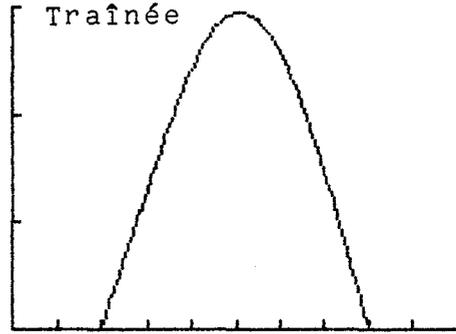
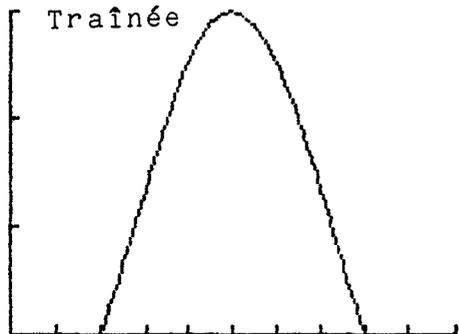
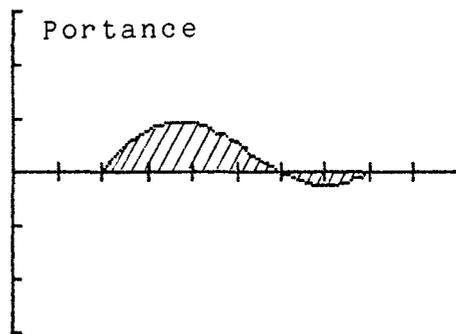
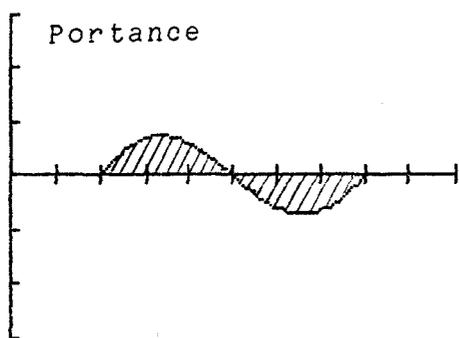
L'optimisation du rendement dépend des angles d'attaque pour le premier (attaque le plus loin possible en avant), et faible pour le 2ème (dégagé le plus près possible de l'athlète).

Ceci vérifie d'ailleurs les préseptions intuitives des entraîneurs.

Cependant le vecteur portance, servant uniquement à faire monter et descendre le kayak, correspond donc à l'énergie

perdue. Ce critère peut être utilisé pour optimiser le geste. Nous allons vérifier, sur 4 types de gestes, l'importance de l'énergie de portance par rapport à l'énergie totale, et ce, en fonction de l'évolution de l'angle  $\alpha$  au cours d'un coup de pagaie.

La figure 99 représente la forme des vecteurs portance et traînée, issus d'une onde sinusoïdale et d'une incidence de pelle linéaire, symétrique pour le cas a (attaque =  $50^\circ$ , dégagé =  $130^\circ$ ), assymétrique pour le cas b (attaque =  $50^\circ$ , dégagé =  $110^\circ$ ).



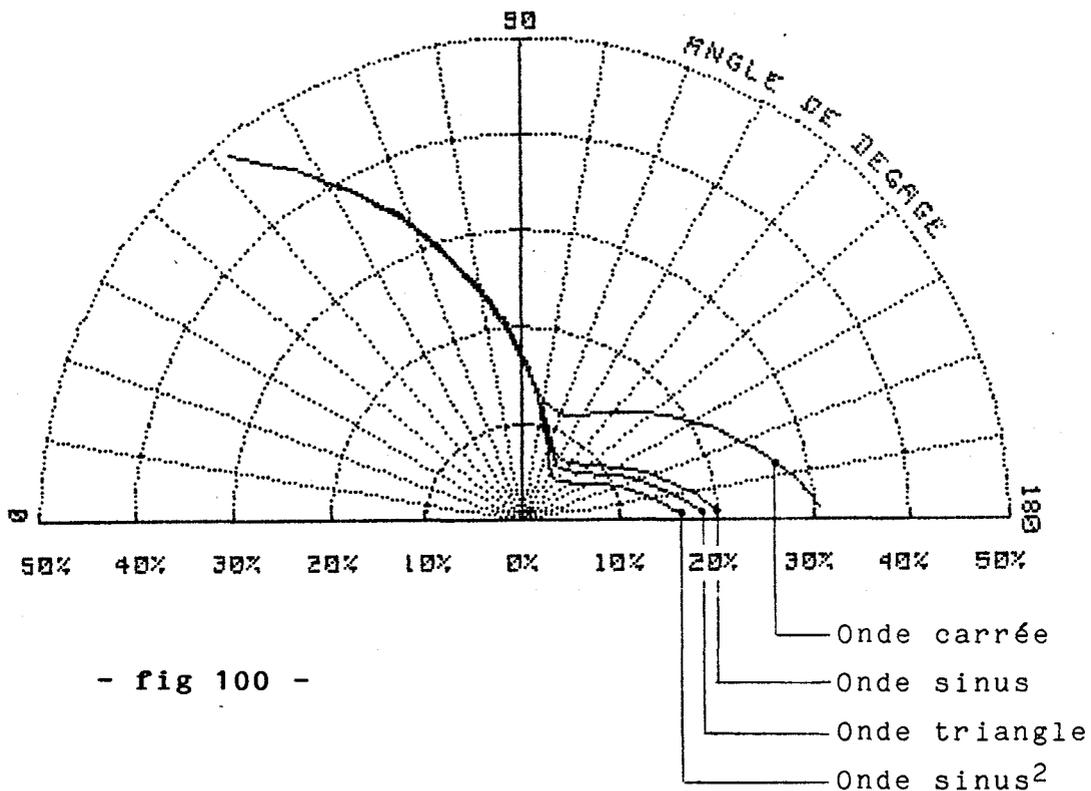
- Fig 99a -

- Fig 99b -

L'énergie de portance est proportionnelle à l'intégrale de celle-ci et varie en fonction du type de geste et de l'incidence de pelle.

Il y a donc possibilité de minimiser l'effet de portance, indépendamment de la forme d'onde simplement en jouant sur les angles d'attaque et de dégagé (angle d'attaque =  $40^\circ$ ) pour 4 gestes différents (fig 100).

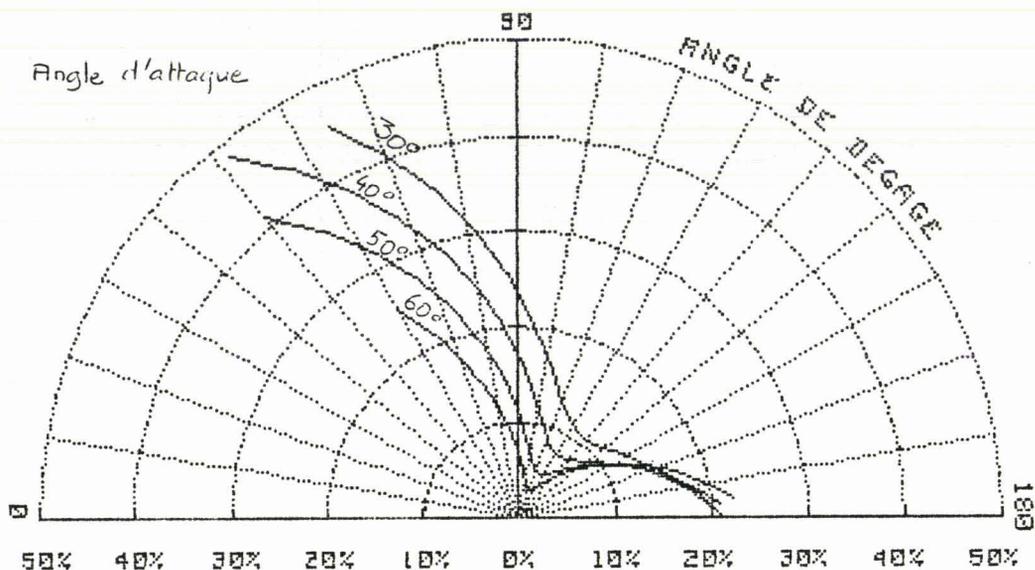
Les gestes ont été modélisés au § 2.13



### Interprétation

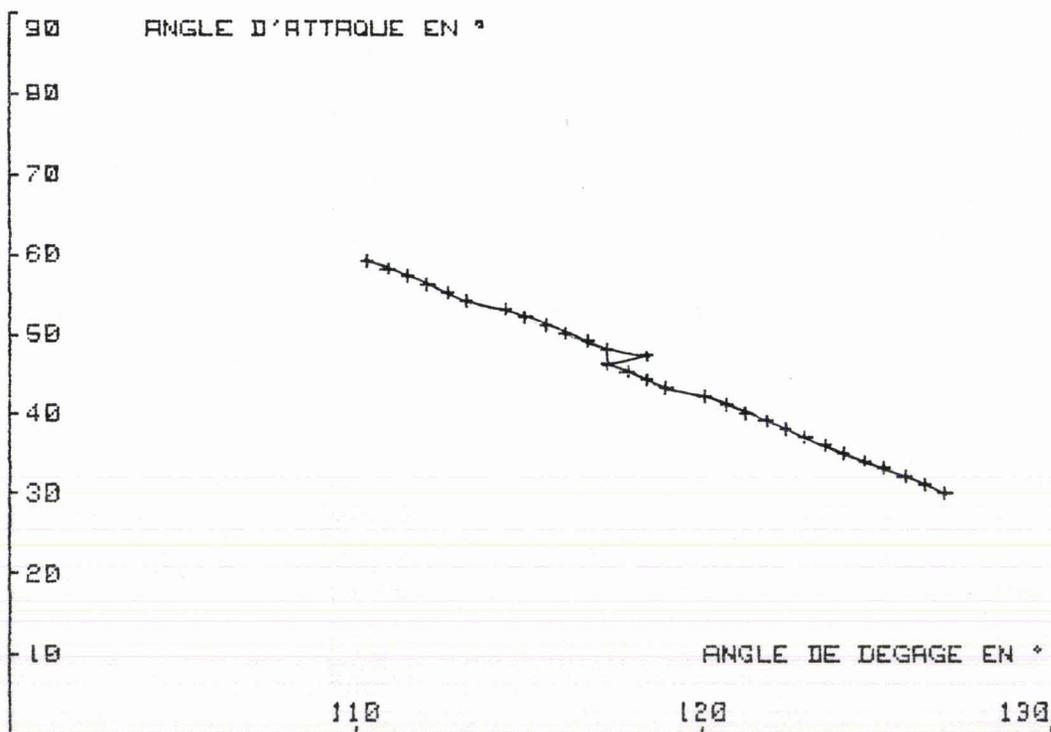
Mis à part l'onde carrée qui est un peu moins efficace que les autres, la forme du geste intervient très peu dans l'optimisation de l'appui de la pagaie dans l'eau (l'onde carrée s'écarte un peu de cette constatation, mais est aussi très différente des gestes pratiques). En outre le minimum de la portance intervient pratiquement au même instant quelque soit le geste utilisé, ce qui confirme notre hypothèse de départ. Le facteur déterminant est donc l'angle de dégage.

La figure 101 représente l'évolution du vecteur portance en fonction de l'angle de dégage pour une onde sinusoïdale et ce pour différentes valeurs d'angle d'attaque.



- Fig 101 -

On s'aperçoit que l'angle d'attaque permet également de minimiser la portance. Celle-ci est toutefois limitée par les contraintes mécaniques du geste dont les caractéristiques d'attaque et de dégagé sont dans une certaine fourchette (Réf24). Cette constatation nous permet de tracer la relation entre angle d'attaque et de dégagé de manière à obtenir une portance minimale (fig 102)



- Fig 102 -

#### 4 - Conclusion

L'étude énergétique menée dans ce chapitre a permis de chiffrer le rendement mécanique du système homme-kayak. Celui-ci passe par la décomposition des différentes puissances mises en jeu lors du mouvement. Nous avons ainsi montré qu'il existait une énergie perdue lors de l'appui de la pagaie dans l'eau. En effet, celle-ci subit un déplacement qui est fonction de son coefficient de pénétration dans le fluide et de la force résultante sur la pàle. Le rendement du système va donc dépendre des caractéristiques du matériel utilisé, notamment la traînée du kayak et le  $C_x$  de la pagaie, (ce qui nous donne un rendement moyen d'environ 60 %), et de l'efficacité de la technique utilisée par l'équipage qui se comporte, selon le cas comme des petites variations positives ou négatives autour de cette valeur moyenne. En outre, cette analyse nous permet de prévoir l'évolution du rendement en fonction de la diminution de la traînée (optimisation de la forme de la glisse) et de l'augmentation du  $C_x$  de la pagaie (modification de sa géométrie).

Enfin nous avons perfectionné notre modèle théorique en tenant compte de l'incidence de la pagaie au cours du geste. Celle-ci entraîne une faible modification du  $C_x$  qui peut être considérée comme négligeable. Par contre, elle fait apparaître un vecteur portance qui correspond à de l'énergie perdue. Ce phénomène est également optimisable par le choix des angles d'attaque et de dégagé.

CONCLUSION  
-----

## CONCLUSION

Nous avons mis au point un système d'acquisition de données permettant d'analyser les phénomènes physiques liés à un kayak de course en ligne. Les différentes campagnes de mesures, organisées autour de protocoles spécifiques que nous avons parfaitement définis, ont constitué une véritable banque de données grâce à laquelle nous avons pu vérifier un certain nombre d'hypothèses.

L'exploitation des mesures brutes, nous a permis de connaître l'évolution de nombreuses variables régissant le système et de découvrir des anomalies liées au geste comme la dissymétrie de la force appliquée.

Des traitements plus spécifiques ont ensuite été utilisés. Ainsi l'intercorrélacion entre la vitesse et le signal force a permis de déterminer le rendement d'un athlète au sein d'un équipage. Grâce à cette méthode, nous avons également détecté des anomalies ponctuelles d'ordre gestuel qui étaient jusqu'alors inconnues. La décomposition spectrale des signaux force de pagayage et force de propulsion a ensuite montré, que le système se comportait comme un filtre passe-bas. Ainsi, seul l'énergie contenue dans le fondamental est transmise. L'analyse statistique a été utilisée de façon à caractériser scientifiquement les techniques utilisées par les meilleurs kayakistes.

Enfin, l'étude mécanique du système homme-kayak a démontré que le rendement d'un équipage, de l'ordre de 60%, est grandement lié aux caractéristiques mécaniques du système.

L'appareillage de mesure peut donc s'orienter selon 3 axes:

- C'est d'abord et avant tout un outil d'entraînement utilisable par le sportif lui-même. Il constitue ainsi le support d'une nouvelle technique d'entraînement: l'ESAO (entraînement sportif assisté par ordinateur).
- Il permet ensuite de tester les nouveaux équipements. Ainsi des études particulières peuvent être entreprises comme l'élaboration de nouvelles formes de bateaux ou de pagaies, essais en bassin de carenne, préparation et traitement de surface d'une coque, choix d'un gouvernail...etc...
- Enfin, il permettra dans l'avenir, une sélection beaucoup plus efficace chez les jeunes. Les défauts majeurs pourront être corrigés à la base et la progression se fera plus rapidement.

Ce travail achève, comme nous l'avons dit, un contrat de recherche conclu entre le laboratoire et la Fédération Française de Canoë-Kayak. Les nombreux contacts que nous avons pu avoir avec les entraîneurs et les athlètes nous ont permis de réaliser le transfert technologique d'un équipement de mesure informatisé de très hautes performances. Nous avons essayé d'intégrer dans les logiciels toutes les spécifications utiles aux entraîneurs. Seule une étude mécanique plus approfondie pourrait constituer une poursuite de ce travail. Cependant la complexité du système demanderait une modélisation très difficile à mettre en oeuvre et des essais systématiques en bassin de carenne exigeant de très gros moyens.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]**     **F.LOUAGE**  
"Rapport final de contrat avec la Fédération Française  
de Canoé-Kayak"  
Novembre 1983
- [2]**     **J.BAUDET, D.DEGARDIN, Y.EMPIS**  
"Centrale d'acquisition Canoé-Kayak"  
Rapport interne U.S.T.L - Juillet 1983
- [3]**     **M.GUILLAIN**  
"Amplificateur d'instrumentation pour capteur d'ECG"  
Rapport stage IUT - Juin 1982
- [4]**     **F.LOUAGE, J.BAUDET**  
"Les RAM-CMOS pour une centrale d'acquisition portative  
et autonome"  
Electronique industrielle n°70/1-05-1984
- [5]**     **A.CLAVEL**  
"Etude de procédés d'adaptation des magnétoscopes dans  
des systèmes d'acquisition de données"  
Thèse de Docteur Ingénieur - Juin 1982
- [6]**     **J.P.DELVAL**  
"Conception et réalisation d'un système de synchronisa-  
tion d'images vidéo avec un enregistrement numérique"  
Mémoire CNAM - Avril 1984
- [7]**     **HEWLETT PACKARD**  
"Basic Interfacing-Techniques for series 200 computers  
HEWLETT PACKARD"  
1981
- [8]**     **A.GRARE**  
"Etude et réalisation d'un système de traitement de  
données relatives à un kayak de course en ligne"  
Thèse de Docteur Ingénieur - Février 1985

- | 9 | A. GRARE**  
"Programmes informatiques réalisés dans le cadre du projet kayak de mars 1983 à juin 1984 : listing, commentaires, mode d'emploi"  
Rapport interne U.S.T.L - juillet 1984
- | 10 | B. LOURME**  
"Résultats des mesures de Choisy-le-Roi sur l'équipe olympique et l'équipe A : étude générale des paramètres"  
Rapport interne U.S.T.L - Juillet 1984
- | 11 | B. LOURME**  
"Résultats des mesures de Choisy-le-Roi sur l'équipe olympique et l'équipe A : étude gestuelle"  
Rapport interne U.S.T.L - Juillet 1984
- | 12 | B. LOURME, F. LOUAGE**  
"Exploitation des mesures effectuées sur des kayakistes à l'aide d'une centrale d'acquisition embarquée lors de course en ligne"  
Publication - Stage de Formation Continue des Cadres Techniques Fédéraux - 26 au 29 Novembre 1984 -INSEP
- | 13 | J. MAX**  
"Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques"  
Ed. Masson - 1980
- | 14 | F. COULON**  
"Théorie et traitement des signaux"  
Ed. Dunod - 1981
- | 15 | J. DE SMET**  
"Adaptation d'un microcontrôleur au calcul de la transformées de Fourier rapide"  
Mémoire C.N.A.M - Mars 1985
- | 16 | F. KLUZIAK**  
"Microcalculateur spécialisé dans le traitement numérique du signal"  
Mémoire C.N.A.M - (à paraître septembre 1986)
- | 17 | M. KUNT**  
"Traitement numérique des signaux"  
Ed. Dunod - 1984

- [18] **A.LAMBOLEY**  
"Probabilités et Statistiques"  
Techniques de l'Ingénieur - 1969
- [19] **H.GIE**  
"Dynamique"  
Collection de Sciences Physiques - 1965
- [20] **R.COMOLET**  
"Mécanique expérimentale des fluides"  
Masson - 1979
- [21] **R.FLANDROIS**  
"Énergétique de l'exercice musculaire maximal chez  
l'homme"  
Ed. Masson - 1979
- [22] **NADEAU, PERONNET**  
"Physiologie appliquée de l'activité physique"  
Ed. Vigot - 1980
- [23] **P.O.ASTRAND, K.RODHAL**  
"Manuel de physiologie de l'exercice musculaire"  
Ed. Masson - 1978
- [24] **A.LEBAS**  
"Étude gestuelle comparative des meilleurs kayakistes  
et renforcement musculaire"  
Brevet d'Etat d'Educateur Sportif 3<sup>ème</sup> degré - 1982
- [25] **B.LOURME**  
"Programmes informatiques réalisés dans le cadre du  
projet kayak : listing, commentaires, mode d'emploi"  
apport interne U.S.T.L - juin 1986

ANNEXES

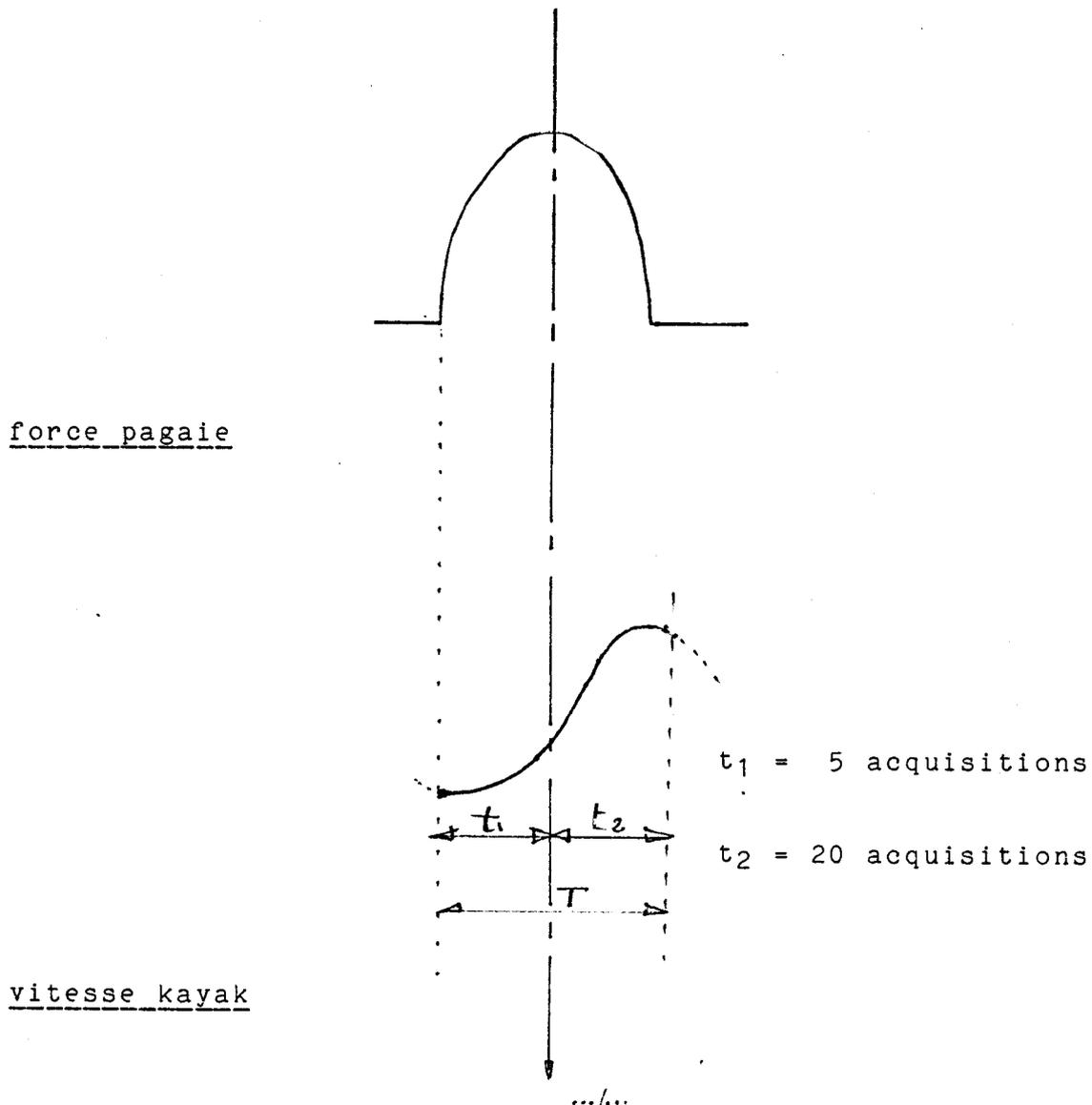
-----

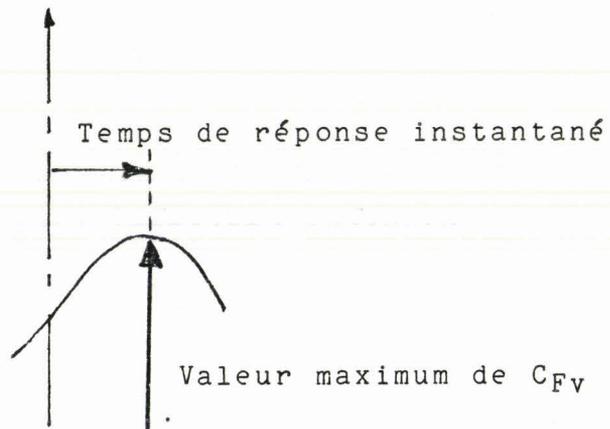
ANNEXE 1

CONVENTIONS UTILISEES DANS CETTE ETUDE

1 - Conventions concernant les fonctions de corrélation entre force de pagayage et vitesse

Les signaux analysés sont quasi-périodiques. Ainsi les fonctions d'intercorrélation doivent être utilisées de manière non conventionnelle. Pour chaque période de signal, la corrélation a été calculée sur une fenêtre de 500 ms représentant 25 acquisitions. Cette fenêtre est synchronisée sur la valeur maximum de chaque coup de pagaie, de la manière suivante :





fonction de corrélation

Ainsi, on relève 2 informations, pour chaque coup de pagaie :

- la valeur maximum de  $C_{FV}$
- le temps de réponse instantané (écart/Force pagaie maxi).

Ces 2 paramètres sont ensuite représentés en fonction du temps, avec ou sans moyennage.

2 - Conventions concernant l'étude spectrale des paramètres force de "pagayage" et force de propulsion

Les forces déployées par les athlètes ont été traitées de façon brute : alternance positive pour le coup gauche et alternance négative pour le coup droit. On aurait pu tout autant analyser la valeur absolue du signal qui correspond plus au phénomène physique. La 1<sup>ère</sup> représentation a pour seul avantage, une dissociation des coups gauches et droits. Or nous avons vu que les phénomènes d'asymétrie étaient très importants chez certains athlètes. De plus, les fréquences obtenues correspondent avec celles mesurées par les entraîneurs (1 cycle naturel = 1 coup gauche + 1 coup droit).

## ANNEXE 2

### LOGICIELS D'ACQUISITION ET D'ANALYSE

#### 1 - Programmes d'acquisition

Ils se chargent des différentes étapes utiles constituant l'acquisition. Leur principale fonction est de gérer la centrale d'acquisition. Ils comportent 4 phases importantes:

- Envoi du programme d'acquisition\* adéquat vers la centrale d'acquisition et vérification de la liaison.
- Possibilité de test des différents capteurs composant la chaîne d'acquisition.
- Envoi du programme de vidange\*, transfert des fichiers mesures et contrôle de non erreur par calcul de check sum.
- Identification du fichier mesures

(\* Ces programmes assembleurs sont présentés au § 3)

3 versions sont disponibles:

- |                            |  |
|----------------------------|--|
| <b>FFCK2</b><br>(31.25 Ko) | Utilisation en kayak biplace<br>programme d'acquisition RPAK2<br>Mesure de la vitesse du kayak<br>des forces exercées par les pagayeurs<br>des rythmes cardiaques des pagayeurs                            |
| <b>FFCK1</b><br>(31.5 Ko)  | Utilisation en kayak monoplace<br>programme d'acquisition RPAK2<br>Mesure de la vitesse du kayak<br>de la force exercée par le pagayeur<br>du rythme cardiaque du pagayeur<br>de la position du gouvernail |
| <b>FFCK3</b><br>(30.25 Ko) | Utilisation en kayak monoplace sur course de fond<br>programme d'acquisition RPAK3<br>Mesure de la vitesse du kayak<br>du rythme cardiaque du pagayeur   |

## 2 - Programmes d'analyse

Ils permettent non seulement d'analyser les variables mesurées mais aussi d'accéder à d'autres paramètres primordiaux, obtenus grâce à des traitements plus ou moins complexes. Ils sont conçus selon des optiques différentes: mécanique, physique, physiologique, bio-mécanique ..etc... Nous exposons ci-dessous les domaines d'application de tous les logiciels d'analyse disponibles.

- COURBE2**            Exploitation des mesures d'un K2  
(69.25 Ko)          Tracé des paramètres bruts et traitements simples de ceux-ci
- possibilités :
- Distance parcourue par coup de pagaie
  - Moyenne de la force 1 ou 2
  - Intégrale de la force 1 ou 2
  - puissance de la force 1 ou 2
  - Rapport air/total de la force 1 ou 2
  - Moyenne des deux forces
  - Rapport montée/total de la force 1 ou 2
  - Rythme cardiaque 1 ou 2
  - Vitesse en fonction de la distance
  - Durée du coup de pagaie 1 ou 2
  - Lissage de la vitesse
  - Mise à zéro des forces
- COURBE1**            Exploitation des mesures d'un K1  
(66.5 Ko)          programmes similaires à COURBE2 disposant en plus du tracé de la position du gouvernail
- COURBE3**            Exploitation des mesures d'un K1 sur course de fond  
(53 Ko)            Tracé des paramètres vitesse et ECG sur une plage horaire de 17 mn
- Possibilités :
- Fréquence cardiaque
  - Vitesse en fonction de la distance
  - Vitesse lissée

**CALCULS**  
(72.5 Ko)

Programme de traitement général pour K1 ou K2

Possibilités :

- Energie transmise au kayak
- Temps de corrélation entre forces et vitesse
- Temps de corrélation entre les deux forces
- Histogramme du rythme cardiaque 1 ou 2
- Histogramme de la force 1 ou 2
- Coup de pagaie modèle 1 ou 2
- Espace 1 ou 2

**COR**  
(76 Ko)

Programme de traitement spécifique orienté sur 3 axes :

- Problèmes de corrélation entre paramètres
- Analyse de la variation de la vitesse
- Statistique des paramètres forces et vitesse

Possibilités :

- Corrélation entre les deux forces
- Autocorrélation des forces
- Corrélation entre forces et vitesse
- Temps de corrélation instantané 1 ou 2
- Temps de corrélation entre chaque pagayeur et la vitesse
- Coefficient de corrélation entre chaque pagayeur et la vitesse
- Détection minimas et maximas de la vitesse
- Variation de la vitesse
- Variation de la vitesse moyennée
- Distribution de la force 1 ou 2
- Fonction de répartition de la force 1 ou 2
- Distribution de la vitesse
- Fonction de répartition de la vitesse
- Courbe de Gauss de la vitesse

**PUI**  
(57 Ko)

Programme de traitement spécifique orienté vers l'étude énergétique du système.

Possibilités :

- Puissance transmise au kayak
- Puissance transmise à la pagaie 1 ou 2
- Puissance transmise aux pagaies
- Puissance moyenne dissipée par l'équipage

- Rendement de l'équipage
- Bilan énergétique

2 programmes de tracé automatique sont également disponibles :  
Ils permettent de tracer sur imprimante des paramètres bruts  
ou des traitements préprogrammés sur 1, 2 ou 3 disques  
mesures. Les tracés se font automatiquement, ainsi que les  
sauts de lignes et les sauts de pages.

**COPIE3** Possibilités :  
(42 Ko) identiques à celles de COURBE2.

**COPIE4** Possibilités :  
(72.25 Ko) identiques à celles de COR

### 3 - Programmes machine

Ces programmes servent au fonctionnement de la centrale  
d'acquisition. Ils sont de 2 types :

- Les programmes d'acquisition

**RAPAK2** Utilisé par les logiciels FFCK1 et FFCK2

**RAPAK3** Utilisé par le logiciel FFCK3

- Le programme de vidange

**LIDO** Utilisé par les logiciels FFCK1, FFCK2 et FFCK3

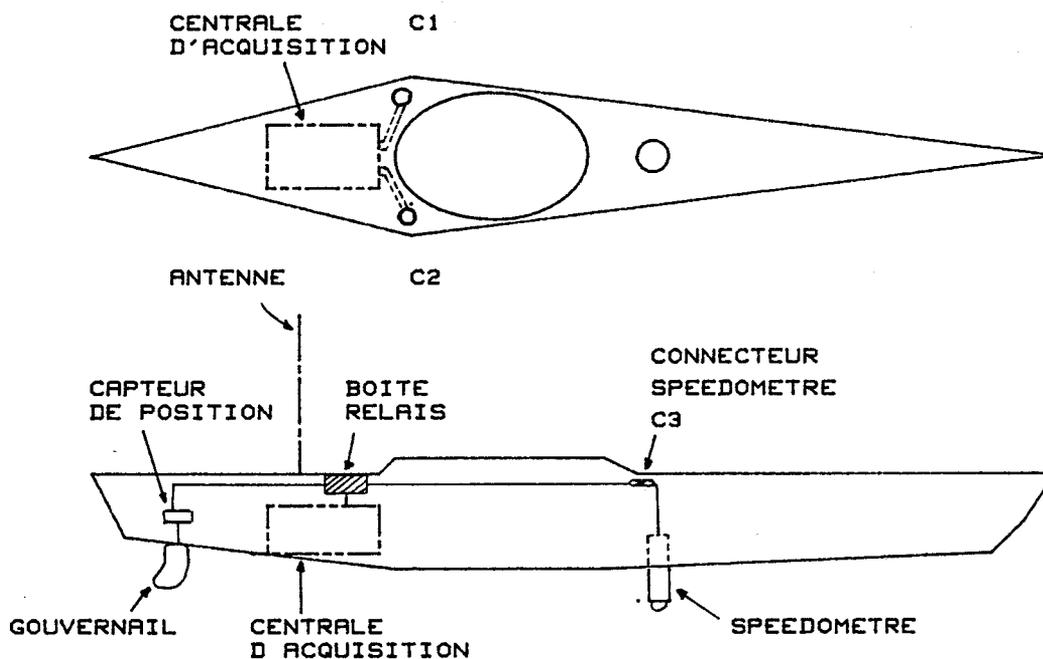
### ANNEXE 3

#### EQUIPEMENT DU KAYAK MONOPLACE

Le K1 a été conçu dans la même optique que le K2 bien qu'un paramètre supplémentaire soit mesuré lors de l'acquisition : la position du gouvernail.

Les différents éléments (centrale d'acquisition, capteurs, connectique) ont été placés dans la mesure du possible de la même manière que dans le K2. Cependant, pour des raisons mécaniques, le capteur de vitesse a du être placé à l'avant du kayak et la connectique a été répartie de chaque côté de manière à ne pas créer de gîte parasite.(fig 103)

#### ORGANISATION DU KAYAK MONOPLACE



- Fig 103 -

Connection des capteurs

	Correspondance électrique	Couleur du fil
Capteur de gouvernail:	+15V	bleu
	masse	blanc
	mesure	rouge
		blanc(fil sup)
Capteur Force/ECG:	+15V	noir
	force+	marron
	force-	rouge
	ECG	orange
	masse ECG	jaune
	masse force	vert
Capteur speedomètre:	mesure speedo	
	masse speedo	

Connection capteurs/centrale d'acquisition

Désignation	Bouchon centrale	Bouchon pagayeur	Code fil
+15V	S	A	noir
masse force	a	J	vert
force+	N	B	marron
force-	P	C	rouge
ECG	H	F	orange
masse ECG	X	G	jaune
speedo	b		blanc/noir
masse speedo	M		blanc/marron
+15V gou.	T		bleu
gouvernail	R		violet
masse gou.	A		blanc
	Tresse		blanc/gris
		Tresse	blanc/vert

#### ANNEXE 4

### ESSAIS DE PAGAIES DE DIFFERENTES STRUCTURES

De manière à étendre les possibilités de l'appareillage de mesure, 3 pagaies de natures différentes ont été équipées de l'instrumentation :

- pagaie carbone Brunet

Structure : manche en fibres de carbone longitudinales  
pâles en fibres de carbone tramées

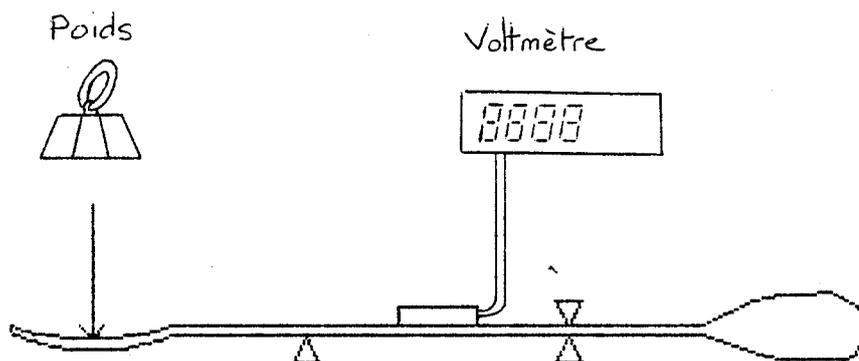
- pagaie carbone série

Structure : manche en fibres de carbone enroulées  
pâles en plastique

- pagaie aluminium

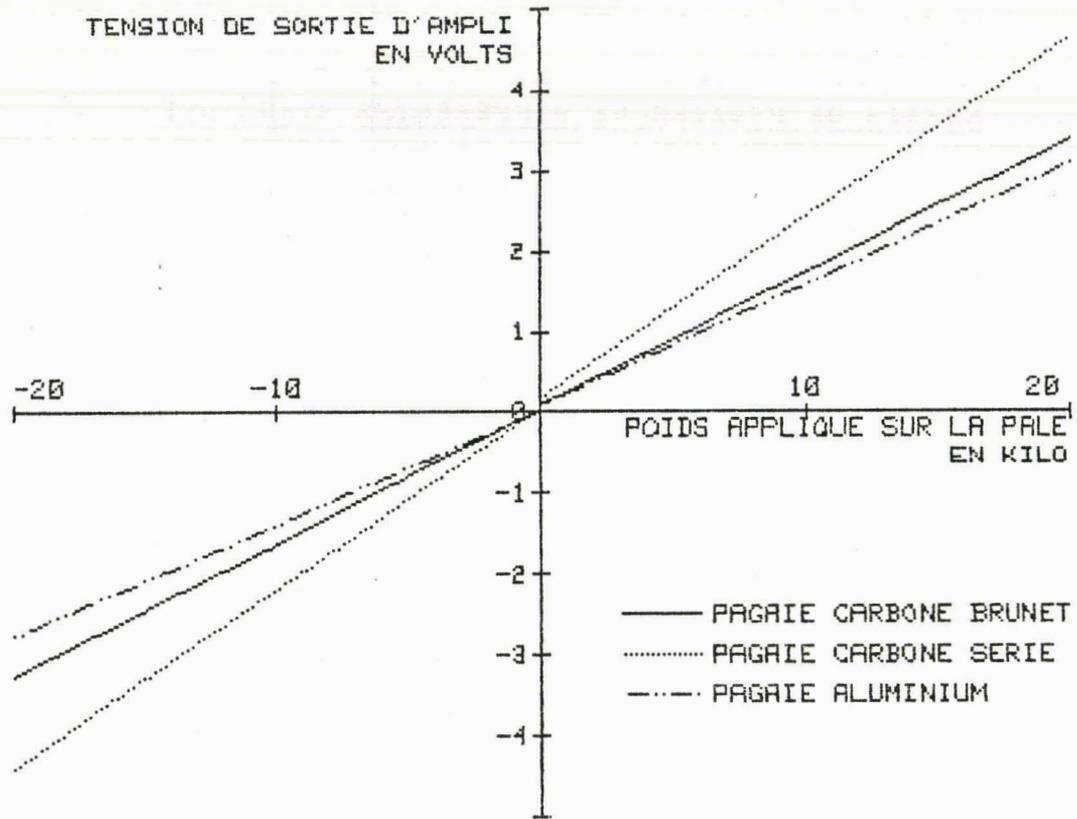
Structure : manche en aluminium  
pâles en plastique

La structure et le matériau étant différents, le module d'élasticité sera propre à chaque pagaie. La caractéristique, tension de sortie de l'ampli en fonction de la force appliquée au centre de la pôle a été relevée sur banc de mesure pour chaque cas. (fig 104)



- Fig 104 -

Résultats:



- Fig 105 -

Caractéristique tension de sortie d'ampli/Poids appliqué

Ce qui nous donne les chiffres suivants :

(V/Kg)	Pagaie carbone Brunet	pagaie carbone série	pagaie aluminium
côté	0.15	0.221	0.138
droit			
côté	0.15	0.226	0.148
gauche			



Conclusion :

Les 2 pagaies carbonées sont utilisables sous réserve de modification du coefficient de conversion (donné dans le tableau ci-dessus) dans les programmes " FFCK ".

La pagaie aluminium, a une caractéristique légèrement différente à droite qu'à gauche. Cette non linéarité, due à la structure du manche légèrement ovale au niveau de la main fixe, entraîne une erreur de l'ordre de 7 % sur l'un des côtés par rapport à l'autre. La solution consisterait à introduire 2 coefficients différents à droite et à gauche, mais ceci nécessite quelques modifications dans les programmes conçus.

Les athlètes ont également l'habitude d'utiliser des pagaies en bois. Ce matériau comporte des fibres naturelles dont la direction est assez " mouvante ". Ceci a pour conséquence de provoquer une non linéarité dans la caractéristique Tension/Force qui varie en fonction de chaque pagaie.

ANNEXE 5

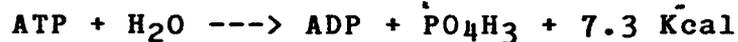
BIOENERGETIQUE DE L'EXERCICE MUSCULAIRE

1 - Les métabolismes bioénergétiques au cours de l'exercice musculaire

En fonction de la longueur de l'effort, 3 types de métabolismes vont être mis en jeu.

1 - 1 Métabolisme anaérobie alactique

L'énergie de la contraction musculaire provient d'une molécule particulière appelée Adénosine triphosphate (ATP). Sous l'influence d'une enzyme située dans la fibre musculaire, elle se rompt et donne naissance à de l'Adénosine diphosphate (ADP), un phosphate et de l'énergie selon la relation suivante :

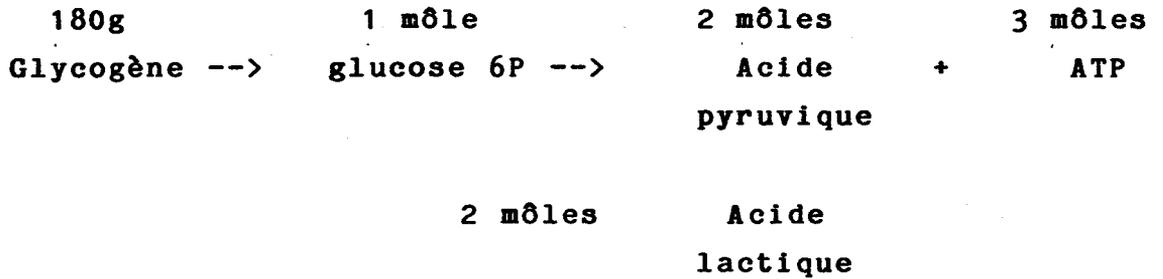


La concentration en ATP dans le muscle est très faible, et demande à être reconstituée. Cette opération est faisable grâce à un autre constituant chimique contenu dans le muscle la créatine-phosphate capable de transférer sa liaison riche en énergie sur l'ADP issue de la réaction précédente et régénérant ainsi de l'ATP :



1 - 2 Métabolisme anaérobie lactique

La concentration du tissu musculaire en créatine-phosphate est elle aussi faible et s'épuise rapidement. L'ATP est alors synthétisée à partir de l'ADP grâce à une chaîne de réactions utilisant le glycogène situé dans le foie et les muscles. Cet élément forme dans un 1er temps du glucose, puis dans un 2ème temps de l'acide pyruvique et de l'ATP. En absence d'oxygène, l'acide pyruvique forme de l'acide lactique.



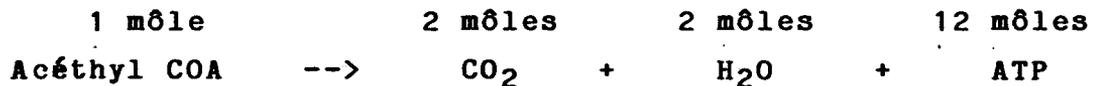
1 - 3 M\^etabolisme a\^erobie

Lorsque de l'oxyg\^ene est fourni aux fibres musculaires, les processus a\^erobies peuvent se d\^velopper de 2 manieres diff\^rentes :

- soit \^ partir de l'acide pyruvique et gr^ce \^ une cha\^ne de reactions appel\^e cycle de Krebs, tel que :



- soit \^ partir de l'ac\^ethyl COA, \^l\^ment issu d'une part de l'acide pyruvique et d'autre part, des acides gras provenant eux-m\^mes des triglyc\^rides, de la maniere suivante :

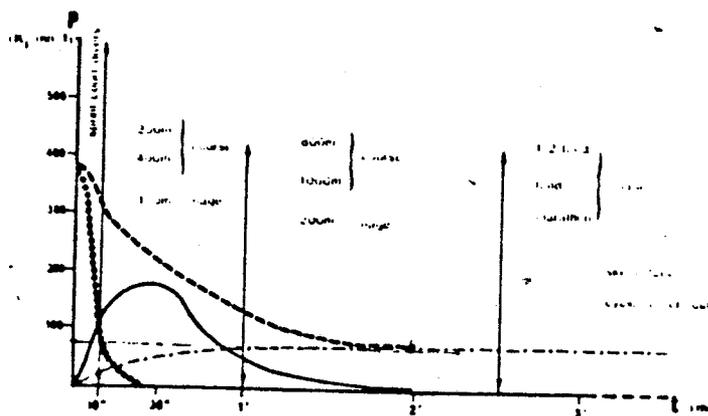


les 3 m\^etabolismes suivent donc le sch\^ma suivant : (fig 106)

## 2 - Mise en jeu des métabolismes

Les différents métabolismes bioénergétiques sont complémentaires et entrent en jeu à des stades différents. Ils sont caractérisés par leur puissance (production d'énergie par unité de temps) et par leur capacité (quantité d'énergie qu'ils peuvent mobiliser). Le métabolisme anaérobie alactique est sollicité pour des efforts très courts (< 10 secondes). Il repose sur la concentration du muscle en ATP et créatine-phosphate. Le métabolisme anaérobie lactique est plus lent et atteint son maximum aux alentours de 30 secondes. Sa capacité correspond à la concentration maximale d'acide lactique tolérable par l'organisme.

Enfin, le métabolisme aérobie, utilisé lors des efforts longs, (d'une durée > 2mn) repose sur la consommation d'oxygène. La figure 107 montre la complémentarité de ces 3 métabolismes dans le temps.



- Fig 107 -

## Résumé

Les travaux présentés dans ce mémoire constituent une contribution à l'étude du sport de kayak de course en ligne. Ils concernent l'analyse de paramètres physiques et physiologiques, mesurés pendant la course, dans le but de caractériser les techniques des kayakistes et d'optimiser le rendement actuel des athlètes.

Après la présentation du système d'acquisition, sont exposées les différentes campagnes de mesures à partir desquelles une première analyse a été faite. Ces expérimentations ont permis, en outre, de mettre en évidence un certain nombre de problèmes et de faire évoluer le système.

A partir de ces premiers résultats, de nouveaux logiciels d'analyse sont présentés qui permettent de solutionner des problèmes spécifiques, comme le transfert de l'énergie ou l'optimisation du geste.

Enfin, une étude mécanique du système homme-kayak est développée dont le but est d'évaluer le rendement d'un équipage et d'adapter la technique de façon à minimiser les mouvements inefficaces du kayak.

Mots clés : Système de mesure pour kayak

Acquisition et traitement de données physiques et physiologiques

