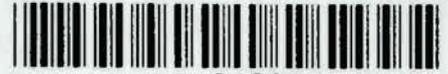


R713-CRE-E1/3

IFREMER Bibliotheque de BREST



0EL06008

1571
15804



CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCEANS
(C N E X O)

ÉTUDE DE PREMIER STADE D'AMÉNAGEMENTS A BUTS MULTIPLES EN BAIE DE CHAUSEY



RAPPORT ANNEXE

TOME II



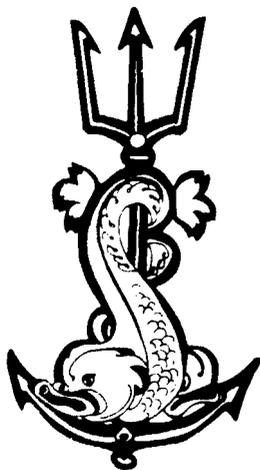
DOCUMENTATION
UNITÉ LITTORAL

Août 1975

R. 12 341



techniques des fluides



CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCEANS
(C N E X O)

ÉTUDE DE PREMIER STADE D'AMÉNAGEMENTS A BUTS MULTIPLES EN BAIE DE CHAUSEY



RAPPORT ANNEXE

TOME II



Août 1975

Contrat C N E X O

N° 74/1131

R. 12 341

G. DIEULOT (C N E X O)

J.P. DUPORT (Alsthom - TdF)

J.P. HUFFENUS (Alsthom - TdF)

J. RUEFF (Sogreah)



techniques des fluides

AVERTISSEMENT

Ce rapport annexe du rapport de synthèse R. 12 340 rassemble un certain nombre de fascicules qui rendent compte de quelques aspects particuliers de l'étude sur le thème suivant :

- Valorisation énergétique de l'aménagement marémoteur (Cf. Chapitre III du R. 12 340)

Les fascicules traitant des sujets :

- buts multiples ou valorisations complémentaires (Cf. Chapitre I du R. 12 340)
- incidences sur l'environnement et le développement régional (Cf. Chapitre IV du R. 12 340)
- facteurs de réduction du coût des ouvrages et des équipements (Cf. Chapitre II du R. 12 340)

sont réunis dans le tome I du présent rapport annexe.

oOo

Sommaire du Tome II

Pages

Valorisation énergétique

VE 1 - Bassins associés et bassins conjugués (A. PREISSMANN)	1
VE 2 - Bassins conjugués - Cycles sans pompage à puissance constante - Principes du calcul (A. PREISSMANN)	5
VE 3 - Bassins conjugués - Cycles sans pompage à puissance constante - Programme de calcul (P. VIGNAT)	10
VE 4 - Bassins conjugués - Cycles sans pompage à puissance constante - Résultats (P. VIGNAT)	15
VE 5 - Bassins conjugués - Cycles sans pompage à énergie maximum - Principes du calcul (A. PREISSMANN)	30
VE 6 - Bassins conjugués - Cycles sans pompage à énergie maximum - Résultats (P. VIGNAT)	35
VE 7 - Bassins conjugués - Cycles avec pompage à puissance constante - Principes du calcul (A. PREISSMANN)	53
VE 8 - Comparaison des aménagements à bassin unique et à bassins conjugués (J.P. HUFFENUS)	63
VE 9 - Remous extérieur et bassin hyperbas (G. CHABERT D'HICRES)	82

oOo

Annexe VE 1

Centrales marémotrices

COMPARAISON ENTRE DEUX FONCTIONNEMENTS POSSIBLES
D'EQUIPEMENTS A DEUX BASSINS :
BASSINS CONJUGUES, BASSINS ASSOCIES

A. PREISSMANN

Lorsqu'une usine marémotrice est pourvue de deux bassins de façon à permettre une production continue (ce qui n'est pas possible avec un seul bassin), il existe deux modes principaux de fonctionnement :

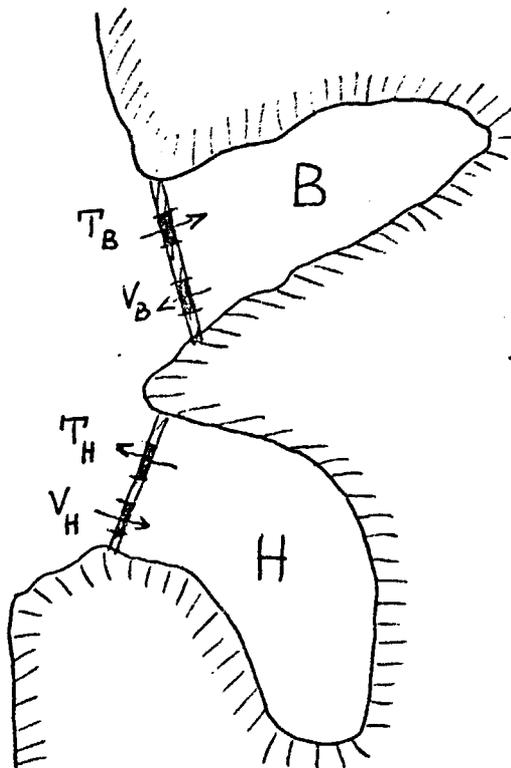
- bassins associés
- bassins conjugués

1/ Bassins associés : Description du fonctionnement

Il s'agit simplement de deux usines à un seul bassin fonctionnant à simple effet :

L'usine H (bassin haut) fournit de l'énergie lorsque le niveau de la mer est suffisamment plus bas que le bassin. Lorsque le niveau de la mer est plus haut que le bassin haut les vannes V_H sont ouvertes.

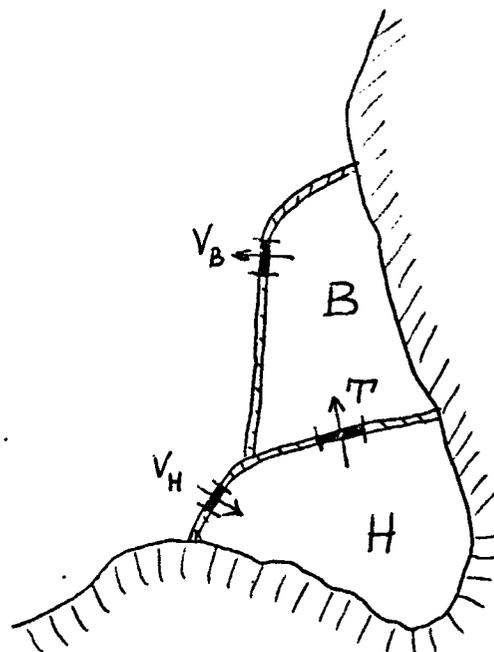
De même l'usine B (bassin bas) fournit de l'énergie lorsque le niveau de la mer est suffisamment haut (turbines T_B avec un débit mer \rightarrow bassin). Lorsque le niveau de la mer est plus bas que le bassin bas les vannes V_B sont ouvertes.



2/ Bassins conjugués

Dans l'exploitation d'une usine marémotrice en bassins conjugués les deux bassins (haut et bas) doivent être contigus et séparés par une digue dans laquelle sont logées les turbines (le turbinage se fait toujours dans le sens bassin haut \rightarrow bassin bas).

Le bassin haut se remplit lorsque son niveau est plus bas que celui de la mer (V_H); le bassin bas se vide lorsque son niveau est plus haut que celui de la mer (V_B).



Avantages et inconvénients des deux systèmes

a/ Du point de vue de l'implantation des digues

Le système à bassins associés permet plus de souplesse dans le choix des emplacements. Selon la topographie des fonds, il peut y avoir une économie notable à choisir le système à bassins associés.

b/ Du point de vue de l'équipement en turbines

Il n'y a qu'une seule installation de turbines dans le cas des bassins conjugués alors qu'il y en a deux avec les bassins associés.

c/ Du point de vue de l'équipement en vannes

L'équipement en vannes pour le fonctionnement à bassins associés peut être sensiblement réduit par rapport à celui correspondant des bassins conjugués. En effet, dans le cas des bassins conjugués la perte de charge des vannes se déduit constamment de la chute des turbines pendant tout le temps que les vannes sont ouvertes, alors que dans le cas des bassins associés la perte de charge n'intervient que pour la détermination de la cote du bassin haut (bas) au moment du maximum (minimum) du niveau de la mer.

d/ Du point de vue de la puissance garantie

Il faut remarquer tout d'abord que pendant une partie importantes des cycles de marée, les fonctionnements en bassins conjugués et en bassins associés sont très analogues; c'est la période pendant laquelle dans les bassins conjugués les vannes de remplissage du bassin haut ou de vidange du bassin bas sont ouvertes, du moins si on fait abstraction de la perte de charge des vannes.

La comparaison portera donc essentiellement sur la période pendant laquelle le niveau de la mer se situe entre le niveau du bassin haut et celui du bassin bas.

Dans le cas des bassins associés ceci se produit pendant les périodes respectives t_A , t_B , t_D , t_E et t'_A , t'_B , t'_D , t'_E . Au temps t_A la marée atteint son maximum, les vannes reliant le bassin haut à la mer seront donc fermées, mais il n'y a aucun intérêt à turbiner, entre le bassin haut et la mer tant que la chute n'atteint pas un certain minimum H_{MTN} (chute minimale pour la puissance nulle) au temps t_B .

Dans l'intervalle t_A, t_B les turbines entre la mer et le bassin bas doivent fournir, sous une chute réduite, la puissance garantie. A partir de l'instant t_B les turbines T_H peuvent fournir une certaine puissance conjointement aux turbines T_B (il n'est pas adéquat de les faire démarrer à l'instant t_B , mais un peu plus tard). Pendant l'intervalle de temps $[t_B, t_D]$ les turbines T_H et T_B vont devoir assurer ensemble la puissance garantie sous des chutes réduites (un instant particulier est l'instant t_C auquel les deux chutes sont égales). Pendant cette période les turbines travaillent avec un mauvais rendement. Au temps t_D la chute entre la mer et le bassin bas a atteint son minimum H_{MTN} et (quel que soit le débit) ne peut fournir de puissance positive. La condition nécessaire pour un fonctionnement à puissance garantie c'est que pendant la période $[t_B, t_D]$ les chutes soient suffisantes pour assurer la puissance garantie. Dans le cas des bassins conjugués les vannes du bassin haut sont fermées à partir du temps t_B et le débit qui transite dans les turbines fait à la fois monter le bassin haut et descendre le bassin bas jusqu'au moment (t_D) où le niveau du bassin bas est égal à celui de la mer, alors que dans le cas des bassins associés, le débit qui transite entre le bassin bas et la mer n'affecte évidemment pas le bassin haut. La différence de niveau entre le bassin haut et le bassin bas sera donc initialement plus forte pour les bassins associés que pour les bassins conjugués, mais alors que la turbine unique en bassins conjugués travaille sur la chute totale (bassin haut-bassin bas) les deux turbines des bassins associés se partagent cette chute, le niveau de la mer se situant entre ceux des deux bassins. Or le rendement des turbines diminue fortement avec la chute (pour les chutes faibles). Si on a besoin d'une chute minimale H_T pour fournir la puissance garantie avec un groupe (bassins conjugués), il faudra une chute sensiblement supérieure à $H_T/2$ pour que chacun des groupes (bassins associés) fournisse la moitié de la puissance garantie. On remarquera ici que les détails de la colline et la forme de la marée peuvent influencer sur le choix.

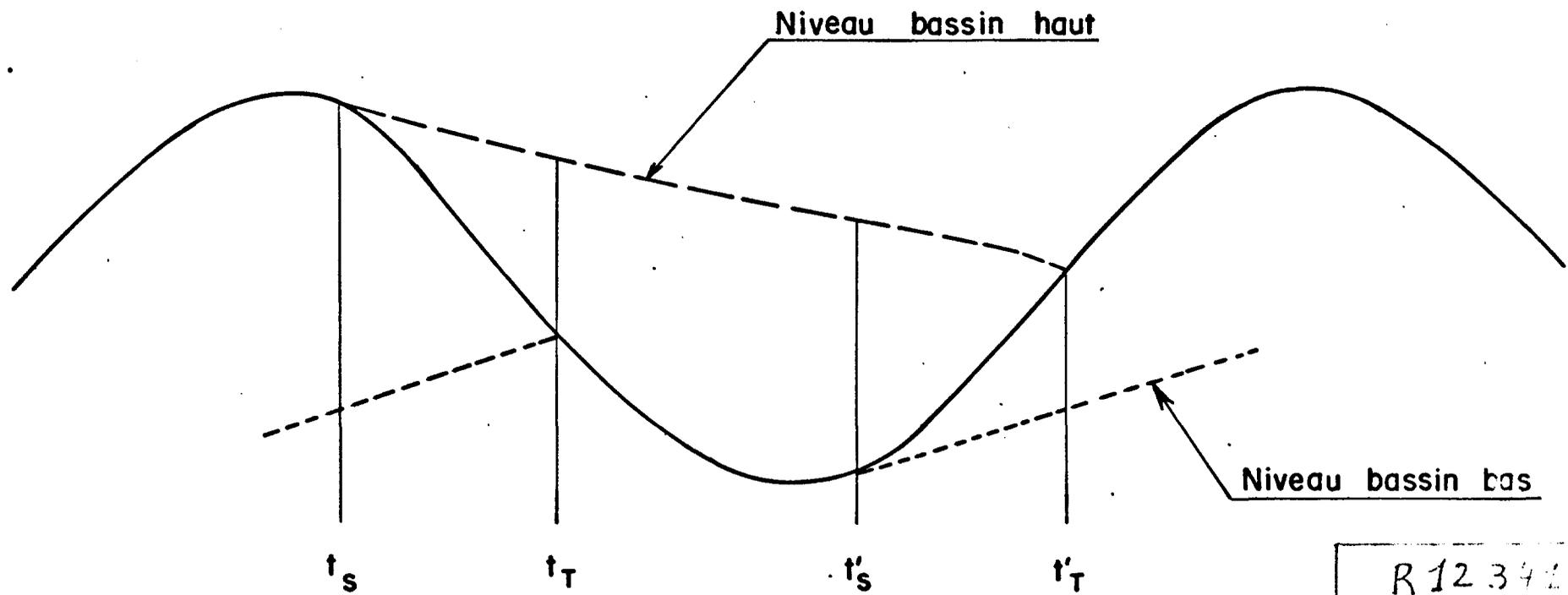
Il semble toutefois à peu près certain que -toutes choses égales d'ailleurs- les puissances garanties avec les deux systèmes soient très proches l'une de l'autre.

Dans ces conditions, comme les avantages et les inconvénients des deux systèmes ne semblent pas permettre un choix facile et qu'un choix définitif ne peut être fait que sur la base d'études plus poussées (topographie, forme des courbes de marée, collines des turbines), nous avons opté pour le système qui permet, le plus rapidement possible, de déterminer la puissance garantie, à savoir le système à bassins conjugués. En effet, dans le cas des bassins associés le choix de la répartition de la puissance entre les turbines T_H et T_B dans l'intervalle $[t_B, t_H]$ n'est pas simple et demande l'application de principes variationnels alors que le calcul en bassins conjugués est extrêmement simple tout au moins lorsqu'on ne considère pas la possibilité du pompage.

Remarquons par ailleurs que dans les deux systèmes il est possible de prévoir des pompes entre chacun des bassins et la mer.

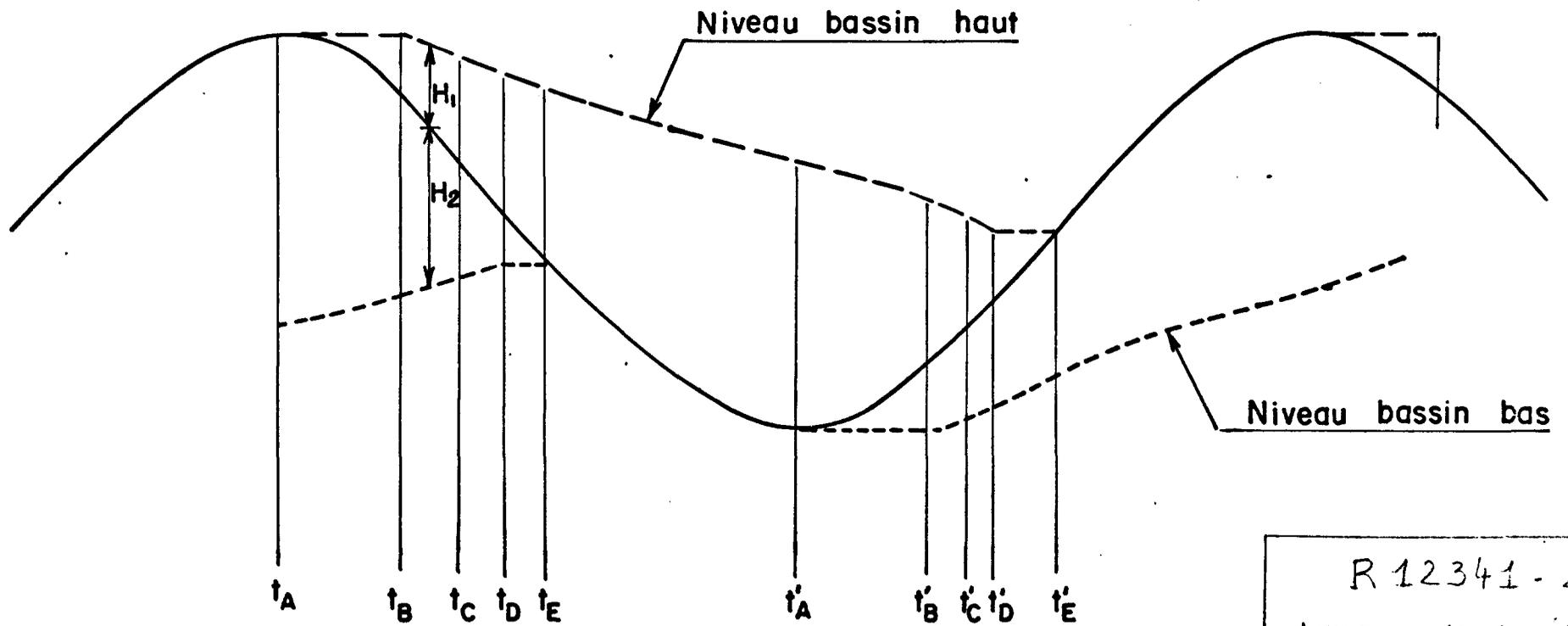
L'adjonction de pompes affecte de façon absolument analogue les niveaux des bassins qu'ils soient conjugués et associés.

oOo



R 12 342 - 2
 ANNEXE VL 1 - 1

CYCLE TYPE — BASSINS CONJUGUÉS



CYCLE TYPE - BASSINS ASSOCIÉS

Annexe VE 2

Centrales marémotrices

BASSINS CONJUGUES - CYCLES SANS POMPAGE
DETERMINATION DE LA PUISSANCE GARANTIE MAXIMALE*

Principes du calcul

A. PREISSMANN

1. GENERALITES - EQUATIONS

Dans le cadre du présent contrat, l'accent est mis sur un fonctionnement d'une usine marémotrice donnant la puissance garantie maximale. Cette puissance doit être garantie pour les marées les plus faibles (marées de morte eau d'équinoxe = cycle type). Pendant toute la durée du cycle type, il faudra donc fournir au réseau au moins la puissance garantie ; en outre, comme le cycle de marée se répète (du moins approximativement) il convient de retrouver à la fin du cycle périodique les mêmes niveaux qu'au début du cycle.

On se rend compte facilement qu'on n'a jamais intérêt à fournir plus que le débit correspondant à la puissance garantie. Ce faisant, en effet, on ne peut qu'abaisser le niveau du bassin haut ou monter le niveau du bassin bas en compromettant la possibilité de pouvoir fournir ultérieurement la puissance garantie. Les cycles envisagés sont donc des cycles à puissance constante.

Dans le fonctionnement de l'usine, nous distinguons trois cas selon l'ouverture des vannes :

- a/ vannes fermées
- b/ vannes du bassin haut ouvertes, vannes du bassin bas fermées
- c/ vannes du bassin bas ouvertes, vannes du bassin haut fermées.

Les équations différentielles décrivant l'évolution des débits des turbines et des vannes ainsi que celle des niveaux du bassin haut et du bassin bas sont extrêmement simples, compte tenu de certaines simplifications mentionnées plus loin.

* Entendre ici la puissance maximum qui peut être maintenue constante au cours d'un cycle.

Dans tous les cas on aura :

$$1/ N_T(Z_1 - Z_2, Q_T) = N_g$$

où :

N_T représente la puissance produite par l'usine en fonction de la chute $Z_1 - Z_2$ et du débit Q_T

Z_1 niveau du bassin haut

Z_2 niveau du bassin bas

N_g puissance garantie

pour une puissance garantie donnée l'équation 1/ donne une relation entre le débit et la chute .

Dans le cas a/

$$2a/ S_1(Z_1) \frac{dZ_1}{dt} = - Q_T$$

$S_1(Z_1)$: surface du plan d'eau du bassin haut en fonction du niveau

$$3a/ S_2(Z_2) \frac{dZ_2}{dt} = + Q_T$$

$S_2(Z_2)$: surface du plan d'eau du bassin bas en fonction du niveau

Dans le cas b/

$$2b/ S_1(Z_1) \frac{dZ_1}{dt} = - Q_T + Q_{VH}$$

Q_{VH} : débit des vannes entre la mer et le bassin haut

$$Q_{VH} = \alpha_H(Z_1) \cdot \sqrt{Z_M(t) - Z_1}$$

$Z_M(t)$: niveau de la mer

$\alpha_H(Z_1)$: coefficient de débit

$$3b/ S_2(Z_2) \frac{dZ_2}{dt} = + Q_T \text{ (identique à 3a)}$$

Dans le cas c/

$$2c/ \quad S_1 \frac{dz_1}{dt} = - Q_T \quad (\text{identique à 2a})$$

$$3c/ \quad S_2 \frac{dz_2}{dt} = + Q_T - Q_{VB}$$

Q_{VB} : débit des vannes entre le bassin bas et la mer

$$Q_{VB} = \alpha_B(z_M) \cdot \sqrt{z_2 - z_M}$$

$\alpha_B(z_M)$: coefficient de débit

L'ouverture et la fermeture des vannes s'effectuent au moment où les niveaux amont et aval sont égaux (débit vanné nul).

Il n'a pas été tenu compte :

- ni du remous, c'est-à-dire du fait que les niveaux peuvent ne pas être horizontaux dans les bassins
- ni des temps de manœuvre des vannes (on passe brusquement de la fermeture à l'ouverture maximale et vice versa)

Nous avons estimé que ces complications ne devraient pas créer d'erreurs importantes et que les simplifications étaient justifiées dans le cadre du présent contrat. Dans l'étude d'un projet, il faudra évidemment tenir compte du remous et du temps d'ouverture des vannes.

2. METHODE DE RESOLUTION

Le calcul s'effectue pour une puissance garantie donnée par la résolution des équations différentielles au moyen de la méthode de RUNGE-KUTTA.

On détermine la puissance garantie maximale pour une marée, un équipement et des surfaces de bassin données.

La colline des turbines est donnée sous une forme polynomiale ; la puissance produite est une fonction polynomiale du débit de l'usine et de la chute.

La surface des bassins est donnée pour diverses cotes ; entre ces cotes, la surface est interpolée.

3. DETERMINATION DE LA PUISSANCE GARANTIE MAXIMALE

Si l'on fixe la puissance garantie constante, les équations (1), (2a), (3a) resp. (1), (2b), (3b) et (1), (2c), (3c) permettent de calculer l'évolution du débit de l'usine et des niveaux du bassin haut et du bassin bas si on fixe des conditions initiales pour les niveaux des deux bassins.

Si on compare deux calculs de cycles (1) et (2) qui ne diffèrent que par les conditions initiales et que :

- le niveau initial du bassin haut du calcul (1) est plus haut que celui du calcul (2)
- le niveau initial du bassin bas du calcul (1) est plus bas que celui du calcul (2)

alors aux mêmes temps le niveau haut du calcul (1) se trouvera toujours plus haut que celui du calcul (2) et le niveau bas toujours plus bas.

Cette propriété découle simplement du fait que, à puissance donnée, le débit diminue quand la chute augmente.

Dans ces conditions la détermination de la puissance garantie maximale pour un équipement et des surfaces de bassin donnés s'effectue ainsi :

On part avec un niveau de bassin haut évidemment trop haut et un bassin bas évidemment trop bas et on procède au calcul en admettant que la même marée se répète indéfiniment ; deux cas peuvent se présenter :

- a/ à un certain moment la chute est insuffisante pour assurer la puissance
- b/ le calcul peut se poursuivre indéfiniment, mais alors on constate au bout de quelques marées répétitives que les cycles successifs n'apportent plus guère de modifications de niveau et que la solution est quasi-périodique.

Le cas a/ signifie que la puissance constante utilisée dans le calcul est plus grande que la puissance garantie maximale.

Le cas b/ signifie que la puissance constante utilisée dans le calcul est inférieure ou égale à la puissance garantie maximale.

Il suffit donc de déterminer d'abord deux puissances de l'usine, l'une P_1 plus forte que la puissance garantie maximale possible, l'autre P_2 plus faible, puis de procéder par dichotomie.

On prend la moyenne $\frac{P1 + P2}{2} = P'$ et on fait le calcul des cycles;

si on se trouve dans le cas a/, on saura que la puissance garantie maximale sera comprise entre P2 et P'; si on se trouve dans le cas b/ on saura que la puissance garantie maximale se trouve entre P' et P1. On a ainsi restreint l'intervalle dans lequel se trouve la puissance garantie maximale cherchée et ainsi de suite jusqu'à l'obtention de la valeur de la puissance garantie maximale avec la précision désirée.

ooo



Annexe VE 3

-
Centrales marémotrices
-

BASSINS CONJUGUES - CYCLES SANS POMPAGE

Détermination de la puissance garantie maximale*

Note sur le programme

P. VIGNAT

1. GENERALITES

Nous avons vu dans la note sur le principe du calcul que le fonctionnement de l'usine comporte trois cas qui sont (Fig. 1) :

a/ vannes fermées

b/ vannes du bassin haut ouvertes, vannes du bassin bas fermées

c/ vannes du bassin bas ouvertes, vannes du bassin haut fermées

Les équations différentielles décrivant l'évolution des niveaux et des débits sont respectivement :

$$a/ \quad S_1(Z_1) \frac{dZ_1}{dt} = - Q_T$$

$$S_2(Z_2) \frac{dZ_2}{dt} = Q_T$$

$$b/ \quad S_1(Z_1) \frac{dZ_1}{dt} = - Q_T + Q_{v1}$$

$$S_2(Z_2) \frac{dZ_2}{dt} = Q_T$$

$$c/ \quad S_1(Z_1) \frac{dZ_1}{dt} = - Q_T$$

$$S_2(Z_2) \frac{dZ_2}{dt} = Q_T - Q_{v2}$$

* Entendre ici la puissance maximum qui peut être maintenue constante au cours d'un cycle.

- Le débit turbiné Q_T est déterminé en fonction de la chute $Z_1 - Z_2$ de manière à fournir à chaque instant la puissance garantie N_G

La colline de la turbine étant donnée sous forme polynomiale : puissance fonction du débit et de la chute, nous devons, pour déterminer le débit turbine Q_T résoudre l'équation implicite :

$$N_G = N_T(Z_1 - Z_2, Q_T)$$

- Le débit vanné est calculé en fonction des caractéristiques de la vanne, de la chute entre la mer et le bassin et du niveau aval, soit les deux cas :

a/ vannes bassin haut ouvertes :

$$Q_{v1} = (C_{11} + C_{21} Z_1) \sqrt{Z_m(t) - Z_1}$$

b/ vannes bassin bas ouvertes :

$$Q_{v2} = (C_{12} + C_{22} Z_m(t)) \sqrt{Z_2 - Z_m(t)}$$

Les grandeurs nécessaires au calcul sont donc à chaque instant

- le niveau de la mer
- le niveau des deux bassins

qui permettent de calculer :

- le débit turbiné
- le débit vanné

d'où l'on déduit les dérivées par rapport au temps des deux niveaux :

- dZ_1/dt
- dZ_2/dt

L'intégration du système précédent donnant à chaque instant le niveau dans les deux bassins.

La chute $Z_1 - Z_2$ doit toujours être supérieure à la chute minimale turbinable (h_{lim}) correspondant à la puissance choisie.

Cette puissance sera optimisée, pour la marée considérée, de manière à vérifier, à chaque instant, la condition précédente.

2. ORGANISATION DU PROGRAMME

Le programme de calcul est constitué de plusieurs parties qui sont :

- le programme principal qui comprend :

- . l'entrée des données et la sortie des résultats
- . l'itération sur la puissance garantie
- . l'intégration du système d'équations différentielles a/
b/ c/ suivant le cas

Ce programme fait appel à deux sous-programmes qui sont HAULIM et DERIVE

- sous-programme HAULIM

Ce programme calcule la chute minimale turbinable correspondant à la puissance considérée. Cette hauteur est atteinte lorsque $\partial N / \partial Q_T = 0$

- sous-programme DERIVE

Ce programme calcule les dérivées dZ_1/dt et dZ_2/dt en fonction du temps et des débits turbinés et vannés

Il fait appel aux sous-programmes suivants :

- . sous-programme MAREE

Ce programme donne la cote de la mer à un instant donné t

- . sous-programme DEBIT

Ce programme calcule le débit turbiné pour une chute et une puissance données

- . sous-programme VANNE

Ce programme calcule le débit vanné en fonction du niveau des bassins et de la mer.

3. DONNEES ET PARAMETRES D'EXPLOITATION

Les données nécessaires à l'exploitation du programme sont :

- . la colline de la turbine : puissance en fonction de la chute et du débit
- . la marée : variation du niveau de la mer en fonction du temps

- la surface des deux bassins haut et bas et leur variation en fonction du niveau de l'eau
- la loi de débit des vannes en fonction des niveaux soit les coefficients C1 et C2 pour les vannes du bassin haut et du bassin bas

3.1 Colline de la turbine

La colline de la turbine est donnée sous forme polynomiale. La puissance s'exprime en fonction de la chute et du débit :

$$P = \sum \sum a_{ij} Q^{i-1} h^{j-1}$$

avec : $i = 1, n$

$j = 1, m$

La colline de base choisie correspond à une turbine de 8 mètres de diamètre et tournant à 62,5 tr/mn.

On entre, dans le programme, les coefficients a_{ij} correspondant à cette colline.

3.2 Marée

Le niveau de la mer en fonction du temps est donné à l'intervalle de temps régulier. Nous avons pris 48 points pour un cycle de marée durant 12 h 25 mn, ce qui correspond à un intervalle de temps de 931,25 s.

3.3 Surface des bassins

La surface des bassins est donnée à un intervalle de cote régulier.

Nous avons pris comme cote zéro la moyenne des plus basses mers à Granville et à Cancale.

3.4 Vannes

Le débit des vannes est donné par la formule :

$$Q_v = k S \sqrt{2gh}$$

avec : S section d'ouverture de la vanne = 1

h chute

k coefficient de contraction



La section d'ouverture S s'écrit :

$$S = l(Z - Z_0)$$

avec : Z niveau amont
 Z_0 cote du bas de la vanne
 l largeur de la vanne

Les coefficients C_1 et C_2 s'écrivent :

$$C_1 = - k \sqrt{2g} l Z_0$$

$$C_2 = + k \sqrt{2g} l$$

Ces deux coefficients sont fonction de la largeur et de la cote du point bas de la vanne.

On introduit ces deux coefficients, ainsi calculés, pour le bassin haut et pour le bassin bas dans le programme.

4. SORTIE DES RESULTATS

En fonction des paramètres précédents, le programme détermine la puissance garantie pour un cycle complet de marée. Le calcul est effectué pour une surface totale des deux bassins de 1 km^2 .

Les paramètres de sortie seront donc :

- les variations en fonction du temps des :
 - . niveau de la mer
 - . niveau du bassin haut
 - . niveau du bassin bas
- les variations en fonction du temps des :
 - . débit turbiné
 - . débit vanné bassin haut et bassin bas
- la puissance garantie pour 1 km^2 de bassin et pour une fraction de groupe donnée, d'où l'on déduira la puissance garantie pour la surface totale du bassin en fonction de l'équipement

oOo

COTES EN METRE

MAREE COEFFICIENT 75.0 - VANNES 2 M/KM2 - ND=500. - D2/S=12.8

14

12

10

8

6

4

2

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

TEMPS EN HEURE

(c)

(a)

(b)

(a)

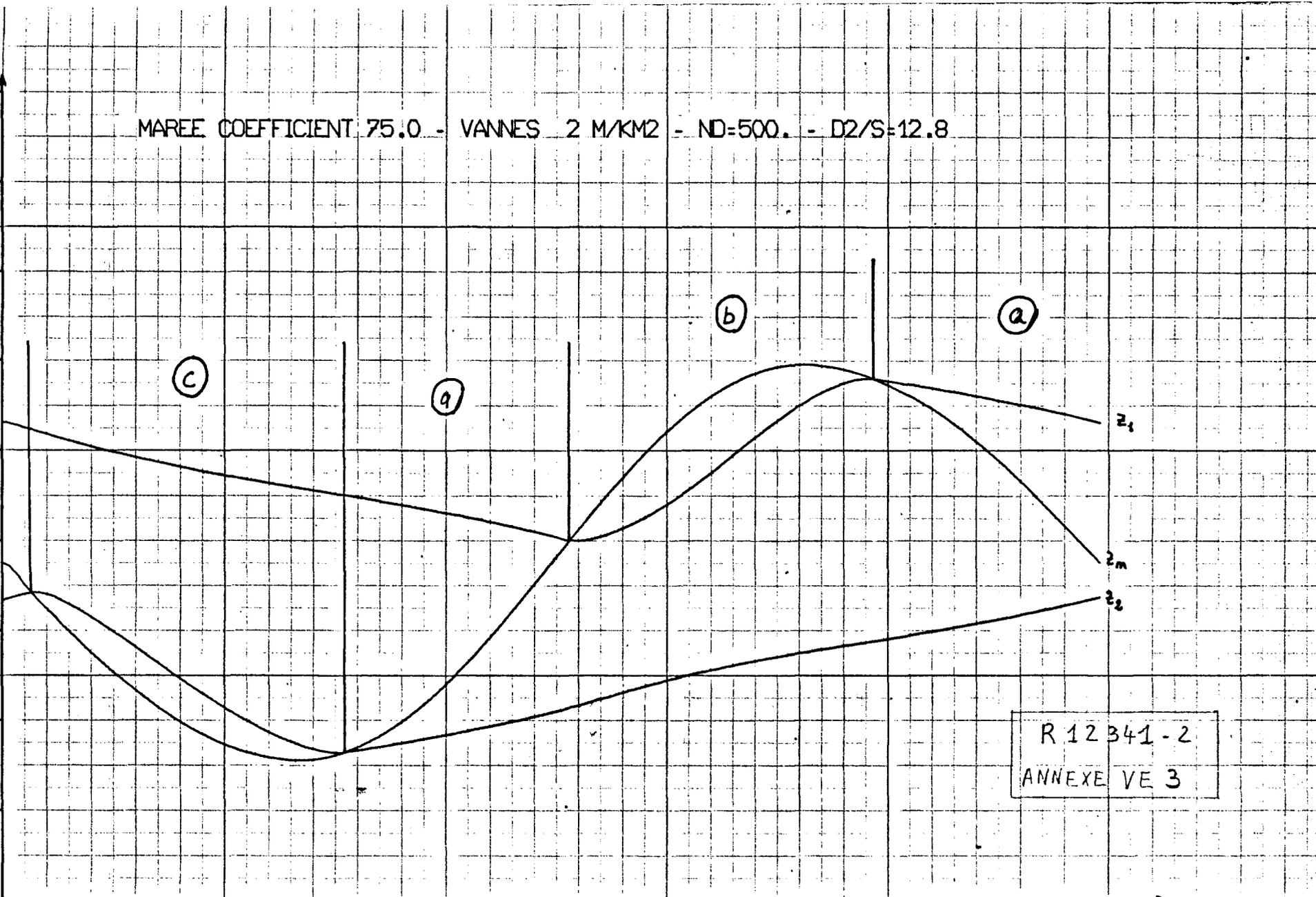
z_1

z_m

z_2

R 12341-2
ANNEXE VE 3

Fig 1



Contrat CNEXO 74/1131

Annexe VE 4

-

Aménagement marémoteur CHAUSEY

-

Bassins conjugués - Cycles sans pompage
à puissance constante par marée

-

Etude paramétrique

Rapport partiel CHAUSEY 74-11

Avril 1975

P. VIGNAT



NOTATIONS

-

Marée

C_m	coefficient de marée
$A(C_m)$	amplitude crête à creux de la marée (mètre)
z_m	niveau de la mer (m)

Turbine

D	diamètre de la turbine (mètre)
n	vitesse de rotation (tr/mn)
$N(h, Q)$	puissance de la roue (MW)
$\eta(h, Q)$	rendement
h	chute (mètre)
Q	débit (m^3/s)

Vannes

s	section (m^2)
l	largeur (mètre)

Bassin

S	surface totale du bassin (m^2)
S_1	surface du bassin haut (m^2)
S_2	surface du bassin bas (m^2)
z_1	niveau du bassin haut (mètre)
z_2	niveau du bassin bas (mètre)

oOo



INTRODUCTION

-

Cette note contient deux parties distinctes.

La première partie, commune à tous les calculs de productivité, est une présentation des principaux paramètres entrant dans le calcul :

- . marée
- . équipement en turbines
- . équipement en pompes (éventuellement)
- . équipement en vannes
- . bassins

La deuxième partie donne les résultats de l'exploitation du programme de calcul de la puissance continue productible sans pompage sur un cycle de marée en fonction des paramètres précédents.

oOo

I - PARAMETRES DU CALCUL

--

1. MAREES

Les marées, intéressant les calculs de productivité des projets de centrale marémotrice à Chausey, sont répertoriées pour trois ports qui sont : Cancale, Granville et Chausey.

Les amplitudes de la marée sont rapportées à une marée de référence, de coefficient 100, qui correspond à la marée moyenne de vive-eau d'équinoxe.

Les marées sont ainsi définies par un coefficient C_m , pour un site donné, et leur amplitude s'obtient à partir de la marée de coefficient 100, soit :

$$A(C_m) = \frac{C_m}{100} \times A(100)$$

A titre indicatif, on peut donner les équivalences suivantes :

. marées extraordinaires de vive-eau	120
. marée moyenne de vive-eau d'équinoxe	100
. marée moyenne de vive-eau	95
. marée moyenne	70
. marée moyenne de morte-eau	45
. marées les plus faibles de morte-eau	20

L'amplitude des marées varie au cours de l'année suivant le cycle lunaire et le cycle solaire, et de ce fait, la répartition des amplitudes n'est pas exactement reproductible d'une année sur l'autre mais respecte approximativement un cycle de 18 ans.

C'est sur ce cycle de 18 ans, que nous avons établi une statistique pour obtenir la loi de répartition moyenne de l'amplitude des marées sur une année.

Nous avons reporté sur la figure 1 cette loi de répartition ainsi que la loi cumulée qui donne le pourcentage de marées inférieures à un coefficient donné.

Les valeurs numériques correspondantes ainsi que l'amplitude crête à creux des marées à Cancale, Granville et Chausey sont données dans le tableau 1.

Nous avons utilisé pour les calculs de productibilité les marées relevées à Chausey. Ces marées sont légèrement plus faibles que celles observées à Cancale et Granville.

Les calculs de puissance garantie sont effectués pour les marées de coefficient 45, 60, 75, 90 et 105.

La marée à Chausey est dissymétrique, la marée montante durant environ 5 h 40 mn et la marée descendante environ 6 h 45 mn pour un temps total du cycle de 12 h 25 mn.

Nous avons négligé, dans les calculs de productivité le remous de l'usine et des vannes et l'influence de la digue sur l'amplitude des marées.

Tableau 1

Amplitudes et fréquence des marées

Coefficients	Fréquence	Fréquence cumulée	Chausey	Granville	Cancale
22,5 - 27,5	0,76	100,00	2,93	3,13	3,15
27,5 - 32,5	1,10	99,24	3,51	3,75	3,78
32,5 - 37,5	3,50	98,14	4,10	4,38	4,41
37,5 - 42,5	4,63	94,64	4,68	5,00	5,04
42,5 - 47,5	6,07	90,01	5,27	5,63	5,67
47,5 - 52,5	7,01	83,94	5,85	6,25	6,30
52,5 - 57,5	7,47	76,93	6,44	6,88	6,93
57,5 - 62,5	7,61	69,46	7,02	7,50	7,56
62,5 - 67,5	7,69	61,85	7,61	8,13	8,19
67,5 - 72,5	7,88	54,16	8,19	8,75	8,82
72,5 - 77,5	8,37	46,28	8,78	9,38	9,45
77,5 - 82,5	8,40	37,91	9,36	10,00	10,08
82,5 - 87,5	7,81	29,50	9,95	10,63	10,71
87,5 - 92,5	6,69	21,70	10,53	11,25	11,34
92,5 - 97,5	5,31	15,01	11,12	11,88	11,97
97,5 - 102,5	3,98	9,70	11,70	12,50	12,60
102,5 - 107,5	2,84	5,72	12,29	13,13	13,23
107,5 - 112,5	2,01	2,88	12,87	13,75	13,86
112,5 - 117,5	0,87	0,87	13,46	14,38	14,49

2. EQUIPEMENT EN TURBINES

2.1 Passage des paramètres réduits aux variables : hauteur débit

La note correspondant à la détermination de la colline industrielle donne, pour un groupe bulbe de 8 mètres de diamètre et tournant à 62,5 tr/mn, le rendement en fonction de deux paramètres réduits n_{11} et Q_{11} correspondant à une chute de 1 mètre et à un diamètre de 1 mètre.

Le passage des variables réduites n_{11} et Q_{11} aux variables hauteur - débit est donné par les relations :

$$h = \left(\frac{n D}{n_{11}} \right)^2 \quad n_{11} = \frac{n D}{\sqrt{h}}$$

$$Q = \frac{Q_{11}}{n_{11}} n D^3 \quad Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{h}}$$

Le rendement η de la turbine pour une chute et un débit donnés sera obtenu à partir des variables réduites n_{11} et Q_{11} correspondantes.

La puissance correspondante de la roue est alors :

$$N(Q, h) = \rho g \eta \left(\frac{n D}{\sqrt{h}}, \frac{Q}{D^2 \sqrt{h}} \right) Q h$$

L'équipement en turbines caractérisé par les trois paramètres suivants :

- D diamètre de la roue
- n vitesse de rotation
- K/S nombre de groupes par km²

En fait ces trois paramètres se réduisent à 2.

En effet, par unité de surface de bassin, la puissance instantanée pour un débit et une chute donnés s'écrit :



$$N(Q, h) = \rho g \eta \left(\frac{nD}{\sqrt{h}}, \frac{Q}{D^2 \sqrt{h}} \right) \frac{K}{S} Qh$$

où Q est le débit turbiné d'un groupe

$\frac{KQ}{S}$ est le débit turbiné par km^2

Si l'on change de groupe en gardant le produit nD constant, on obtient le même rendement, pour une même chute, si les valeurs des variables réduites n_1 et Q_1 sont égales. Ceci implique que le rapport Q/D^2 soit constant, c'est-à-dire que le débit turbiné d'un groupe soit proportionnel au carré des diamètres.

Les puissances correspondantes par km^2 de bassin seront alors égales si le débit KQ/S par km^2 est le même.

On a donc :

$$\left. \begin{aligned} Q_1/D_1^2 &= Q_2/D_2^2 \\ K_1 Q_1/S &= K_2 Q_2/S \end{aligned} \right\} \frac{K_1 D_1^2}{S} = \frac{K_2 D_2^2}{S}$$

On caractérisera donc l'équipement par les deux grandeurs :

nD

kD^2/S

2.2 Expression polynomiale de la colline

La colline de la turbine a été introduite dans le programme de calcul sous forme polynomiale en fonction du débit Q et de la chute h . Pour obtenir cette expression, nous sommes partis des valeurs du rendement données dans la note Chausey 74-4* sur la colline industrielle et nous avons déterminé les coefficients du polynôme en utilisant la méthode des moindres carrés, soit :

$$\eta = \sum C_{ij} Q^{i-1} h^{j-1} \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 1 \text{ à } 5 \\ j = 1 \text{ à } 5 \end{array} \right.$$

* Annexe OE 8 (Cf. R. 12 341 - Tome 1)

D'où l'on déduit l'expression de la puissance :

$$N(Q, h) = \sum a_{ij} Q^i h^j \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 1 \text{ à } 5 \\ j = 1 \text{ à } 5 \end{array} \right.$$

avec : $a_{ij} = \rho g C_{ij}$

Nous avons tracé sur la figure 2 les lignes équi-puissances ainsi obtenues en fonction de Q et de h pour une roue de 8 mètres de diamètre et tournant à 62,5 tr/mn.

3. EQUIPEMENT EN VANNES

La loi de débit d'une vanne est fonction de la surface de passage et de la chute entre les niveaux amont et aval, soit :

$$Q_v = k s \sqrt{2g(z_{am} - z_{av})}$$

k coefficient de contraction

Si l'entonnement de la vanne est convergent, le coefficient de contraction k est égal à 1 et la surface de passage est le produit de la largeur de la vanne par la différence entre le niveau aval et le bas de la vanne, si l'on considère des vannes à surface libre, soit :

$$Q_v = 4,4 l (z_{av} - z_0) \sqrt{z_{am} - z_{av}}$$

Pour une largeur de vanne donnée, le débit peut s'exprimer à partir de deux coefficients et des niveaux amont et aval, soit :

$$Q_v = (C_1 + C_2 z_{av}) \sqrt{z_{am} - z_{av}}$$

avec : $C_1 = - 4,4 l z_0$

$$C_2 = 4,4 l$$

Pour le bassin haut, le niveau aval est celui du bassin et pour le bassin bas, celui de la mer. Les deux débits vannés s'écrivent donc :

• bassin haut : $Q_{v1} = (C_{11} + C_{21} z_1) \sqrt{z_m - z_1}$



. bassin bas : $Q_{v2} = (C_{12} + C_{22} z_m) \sqrt{z_2 - z_m}$

4. SURFACE DES BASSINS

Afin d'avoir des calculs directement comparatifs, et du fait que l'on ne connaît pas l'implantation des digues ni la position et la forme des bassins, la surface des bassins est prise constante, indépendante des niveaux.

D'autre part, tous les calculs sont effectués avec des bassins tels que leur surface totale soit égale à 1 km².



II - DETERMINATION DE LA PUISSANCE CONSTANTE MAXIMALE PAR MAREE

ETUDES PARAMETRIQUES

--

1. GENERALITES

Les paramètres entrant dans le calcul de la productivité sont :

- . la marée
- . l'équipement en turbines
- . l'équipement en vannes
- . les bassins

Nous allons montrer, dans les paragraphes suivants, l'influence de ces paramètres sur la productivité.

Nous n'avons pas fait varier ces paramètres en même temps, ce qui aurait conduit à un très grand nombre de calculs mais nous avons regardé leur influence indépendamment en fixant les autres paramètres à une valeur moyenne.

2. INFLUENCE DU VANNAGE

Nous avons vu que la loi de débit des vannes pouvait s'écrire :

$$\text{. bassin haut : } Q_{V1} = (C_{11} + C_{21} z_1) \sqrt{z_m - z_1}$$

$$\text{. bassin bas : } Q_{V2} = (C_{12} + C_{22} z_m) \sqrt{z_2 - z_m}$$

Les coefficients C_{11} , C_{21} , C_{12} , C_{22} sont fonction de la largeur de la vanne et de la cote du point bas de la vanne.

Nous avons fixé cette cote à - 2 mètres pour le bassin haut et à - 10 mètres pour le bassin bas, ce qui donne :

$$\text{. bassin haut : } C_{11} = 8,8 \text{ l} \quad C_{21} = 4,4 \text{ l}$$

$$\text{. bassin bas : } C_{12} = 44 \text{ l} \quad C_{22} = 4,4 \text{ l}$$

Nous avons essayé 4 largeurs de vannes identiques pour le bassin haut et le bassin bas et correspondant à une surface totale des deux bassins de 1 km².

Les deux bassins ont des surfaces égales de $0,5 \text{ km}^2$.

L'équipement en turbine est de 0,160 groupe de 8 mètres de diamètre et tournant à 62,5 tr/mn pour 1 km^2 de surface totale.

Nous avons calculé la puissance garantie correspondante pour les marées de coefficients 45, 60, 75, 90 et 105.

Les valeurs obtenues sont portées sur la figure 3 et dans le tableau suivant :

Puissance garantie (MW) - Bassins conjugués
Surface des bassins $2 \times 0,5 \text{ km}^2$

$$\begin{array}{l} \text{Equipement : } nD = 500 \\ KD^2/S = 10,24 \cdot 10^{-6} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} nD = 500 \\ KD^2/S = 10,24 \cdot 10^{-6} \end{array}} \right\} \begin{array}{l} D = 8 \text{ m} \\ n = 62,5 \text{ tr/mn} \\ K = 0,16/\text{km}^2 \end{array}$$

Cefficient de marée Largeur de vanne par bassin	45	60	75	90	105
2 m		1,075	1,60	2,20	2,85
3,5 m	0,75	1,37	2,15	3,07	4,05
5 m	0,80	1,47	2,30	3,25	4,29
10 m	0,81	1,49	2,33	3,34	4,385

On voit, à partir de ce tableau, qu'il n'y a pas intérêt à augmenter la largeur des vannes au-delà de 5 mètres.

Nous garderons cette valeur pour les calculs ultérieurs.

3. INFLUENCE DE L'EQUIPEMENT EN TURBINES

3.1 Présentation

Nous avons vu que l'équipement en turbines étaient caractérisé par 2 paramètres :

$$\begin{array}{c} nD \\ KD^2/S \end{array}$$

D'autre part, la colline de la roue "n = 62,5 - D = 8 m" est limitée à une puissance maximale de 30 à 35 MW. Il n'y a pas à proprement parler de puissance minimale, mais il est recommandé de ne pas descendre au-dessous de 5 MW.

Aussi, l'équipement sera choisi de manière à fonctionner avec tous les groupes aussi bien pour les marées de coefficient 45 que 105.

La puissance installée par km² d'un équipement de nD et de KD²/S donnés s'écrit à partir de la roue de référence :

$$\frac{P_{\text{ins}}}{S} = \frac{30 (nD)^3}{8^2 (500)^3} \frac{KD^2}{S}$$

On peut choisir cette puissance installée de manière à ne pas buter sur la puissance limite pour la marée 105. Or des calculs préliminaires montrent qu'une telle marée permet une puissance constante d'environ 4,5 MW/km².

On peut donc se fixer la puissance installée à 4,8 MW/km² et l'on obtient la relation :

$$(nD)^3 \frac{KD^2}{S} = 1,28 \cdot 10^9$$

ce qui conduit aux couples de valeurs suivantes :

nD	KD ² /S
450	14
500	10,24
550	7,7

Nous ferons varier ces deux paramètres entre les valeurs définies précédemment autour des valeurs moyennes

$$nD = 500$$

$$KD^2/S = 10,24$$

3.2 Résultats

3.21 Influence de nD à KD²/S constant = 10,24 (figure 4)

Puissance (MW) - Bassins conjugués

Surface des bassins : 2 x 0,5 km²

Vannes : largeur : 5 m par bassin

Coefficient de marée nD	45	60	75	90	105
450	0,83	1,52	2,34	3,25	
500	0,80	1,47	2,30	3,25	4,29
550		1,405	2,235	3,20	4,30

3.22 Influence de KD^2/S à nD constant = 500 (figures 5 à 8)

Nous avons effectué ces calculs avec 2 largeurs de vannes : 3,5 et 5 mètres

Puissance (MW) - Bassins conjugués

Surface des bassins : 2 x 0,5 km²

Vannes : largeur 5 m par bassin

Coefficient de marée KD^2/S	45	60	75	90	105
6,4	0,745	1,34	2,02	2,76	3,51
10,24	0,8	1,47	2,30	3,25	4,29
12,8		1,485	2,37	3,385	4,53

Puissance (MW) - Bassins conjugués

Surface des bassins : 2 x 0,5 km²

Vannes : largeur : 3,5 m par bassin

Coefficients de marée kD^2/S	Coefficients de marée				
	45	60	75	90	105
6,4	0,70	1,28	1,92	2,63	
10,24	0,75	1,37	2,15	3,07	4,05

3.23 Puissance constante par marée fournie pour une puissance installée constante 4,8 MW/km² (figures 9 et 10)

Puissance - Bassins conjugués

Surface des bassins : 2 x 0,5 km²

Vannes : largeur 5 m par bassin

KD^2/S	Coefficients de marée nD	Coefficients de marée				
		45	60	75	90	105
14,0	450	0,83	1,58	2,46	3,47	4,57
10,24	500	0,80	1,47	2,30	3,25	4,29
7,7	550		1,36	2,11	2,98	3,9

Nous avons joint aux courbes de puissance, les variations de niveaux, bassin et mer au cours d'un cycle, dans le cas où $nD = 500$ et $KD^2/S = 10,24$ pour les marées 45, 60, 75, 90 et 105 (figures 11 à 15).

4. CONCLUSIONS

Des calculs de productivité précédents, on peut tirer les conclusions suivantes :

- à nD constant, la productivité augmente avec la puissance installée

- à KD^2/S constant, la productivité varie peu avec nD
- à puissance installée constante, la productivité augmente quand nD diminue, mais l'investissement en groupes correspondant à KD^2/S augmente

Il sera donc nécessaire de tenir compte des données économiques pour optimiser l'équipement en turbines et en vannes en fonction de l'énergie fournie.

Nous n'avons pas effectué de calcul avec des surfaces de bassins différentes, de manière à voir l'influence de la répartition de la surface entre les deux bassins compte tenu de la dissymétrie de la marée.

En fait, dans ce cas, il faudrait aussi prendre des vannes différentes pour les deux bassins.

Nous avons jugé que l'influence de cette dissymétrie était trop faible ($\ll 1\%$) pour justifier de nombreux calculs supplémentaires, compte tenu du fait que cet effet n'est pas le même suivant l'amplitude de la marée.

oOo

Marées à CHAUSEY
Statistique sur 18 ans

R 12341 - 2
ANNEXE VE 4 - fig 1

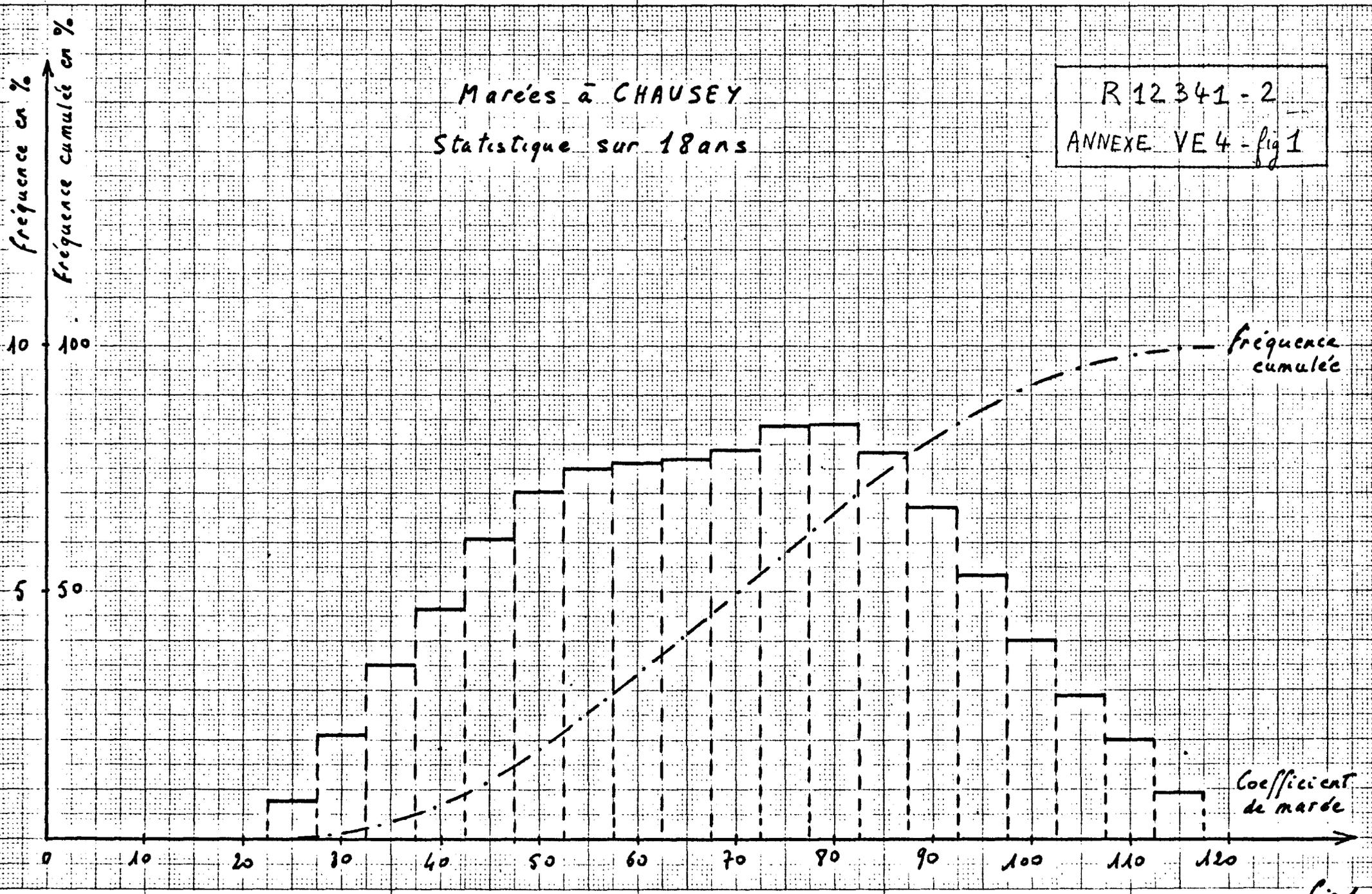


fig 1

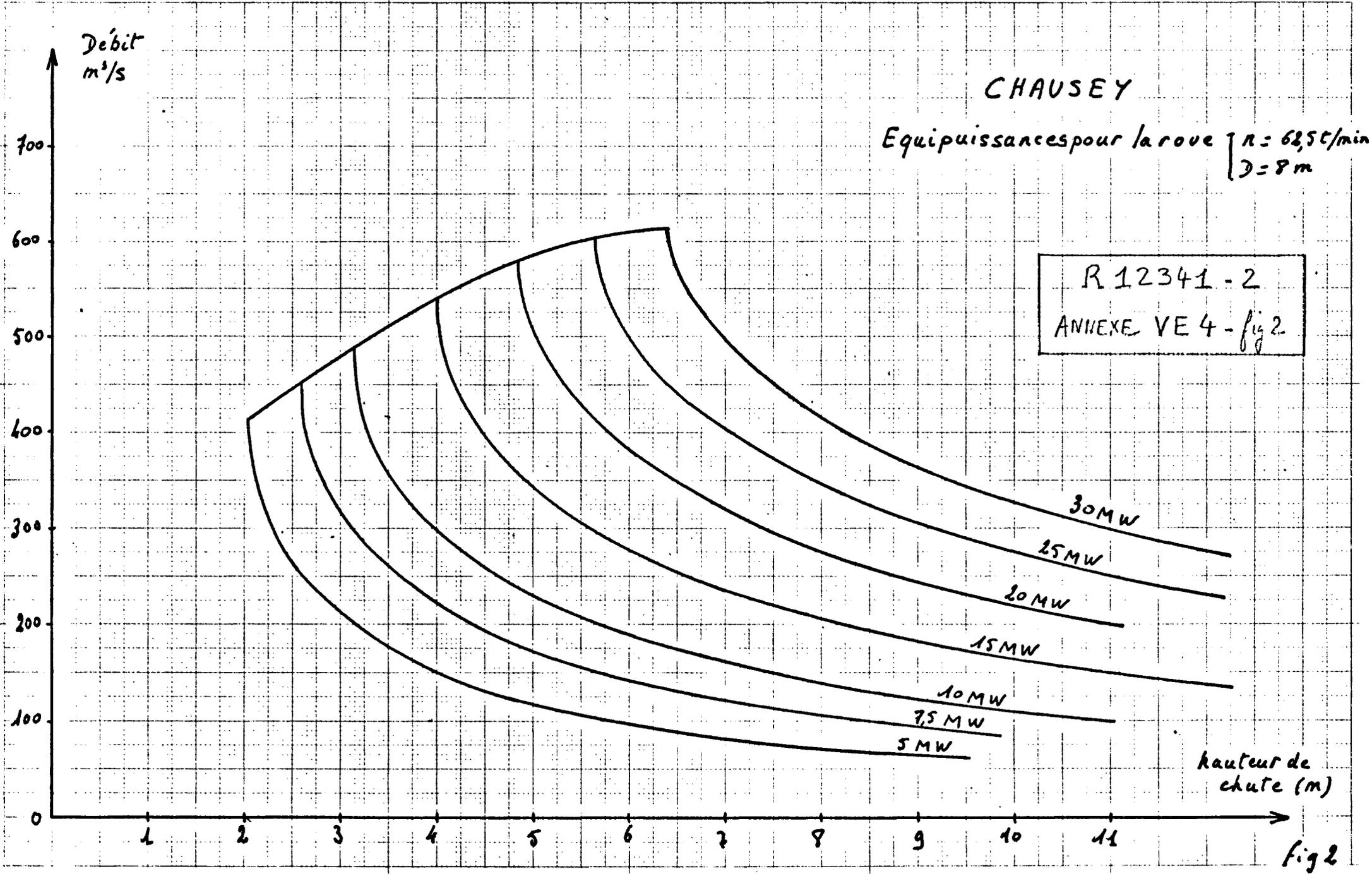


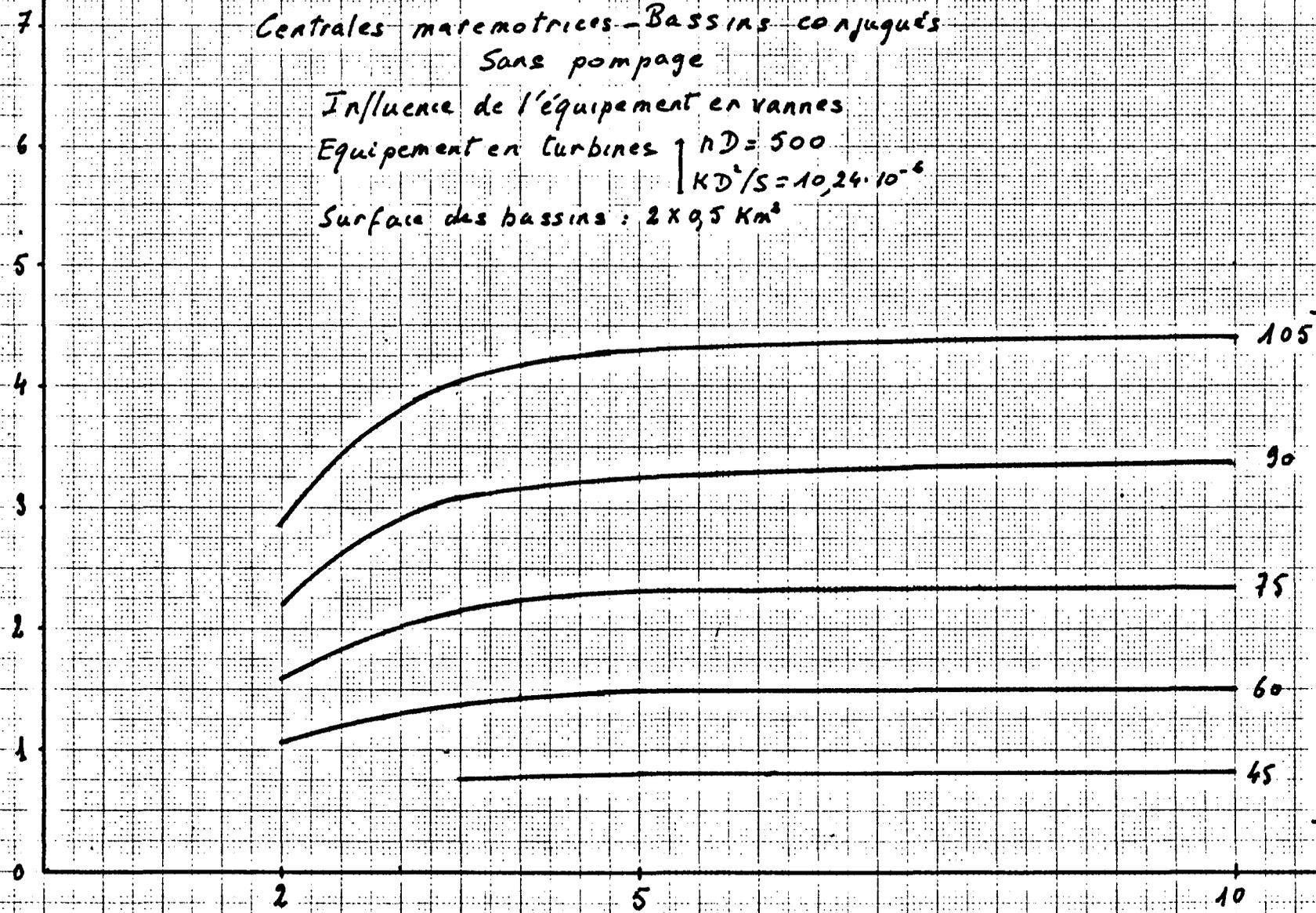
fig 2

R 12341-2
ANNEXE VE 4 fig 3

Puissance
MW

CHAUSEY
Centrales marémotrices - Bassins conjugués
Sans pompage

Influence de l'équipement en vannes
Equipement en turbines | $nD = 500$
| $KD^2/S = 10,24 \cdot 10^{-6}$
Surface des bassins : $2 \times 9,5 \text{ km}^2$



Coefficient de marée
largeur des vannes
mètre par bassin

fig 3

R 12341-2
ANNEXE VE 4 fig 4

CHAUSEY

Bassins conjugués - sans pompage

Influence de nD pour $KD^2/S = 10,24$

Equipement en vannes pour
chaque bassin de $0,5 \text{ km}^2$
| largeur 5 m.
| hauteur moyenne 14 m

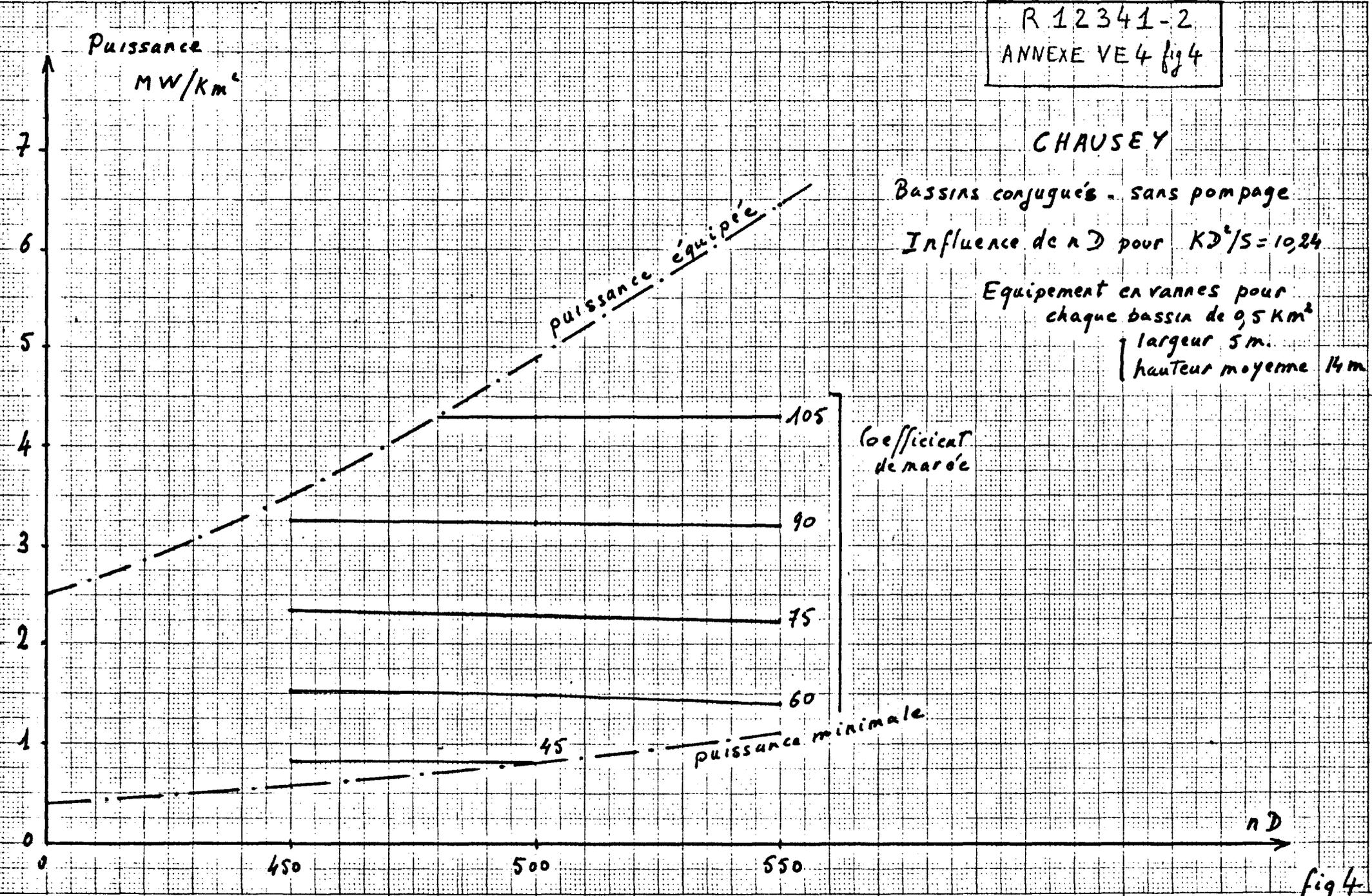
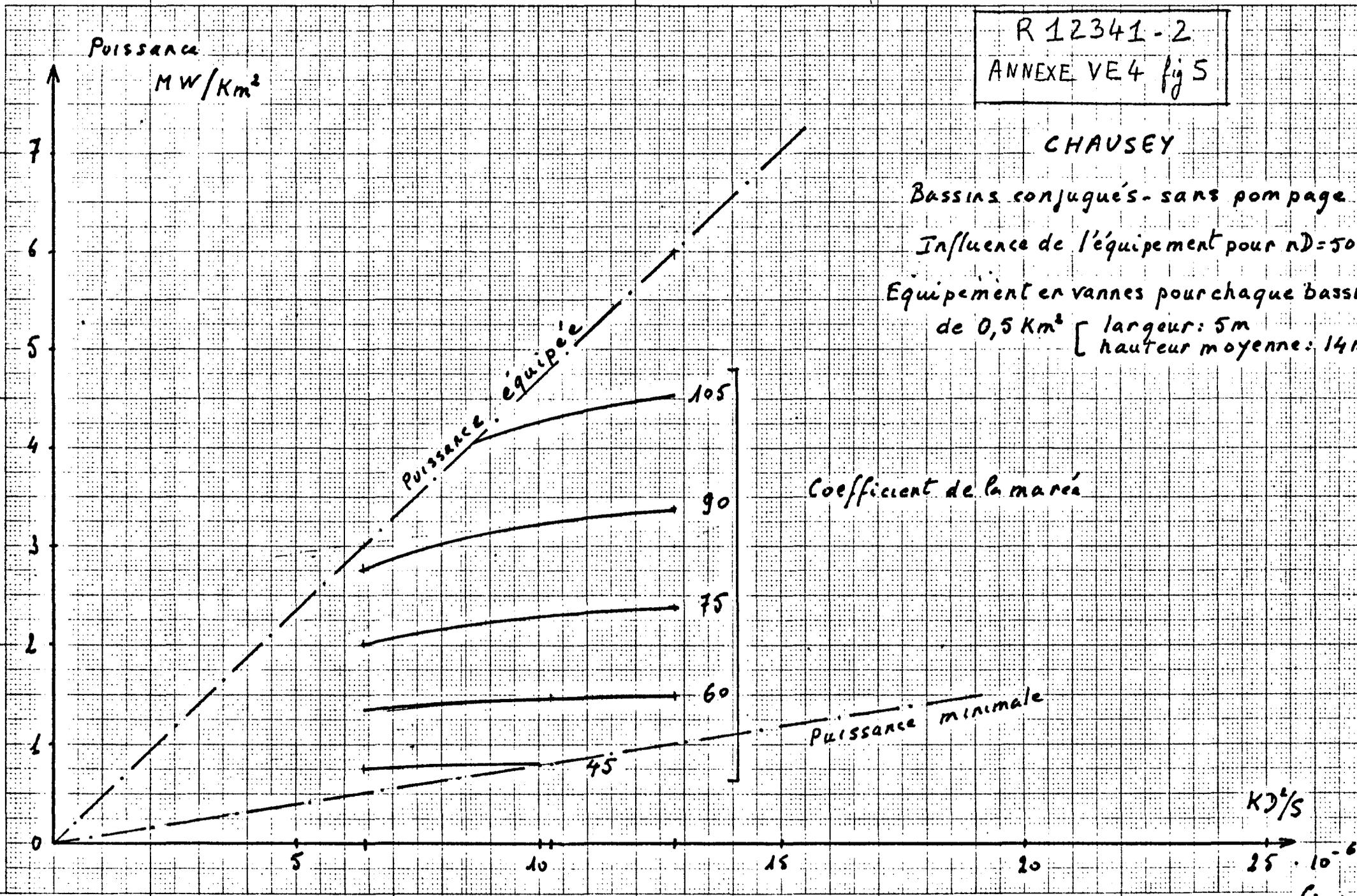


fig 4

R 12341-2
ANNEXE VE 4 fig 5

CHAUSEY

Bassins conjugués - sans pompage
Influence de l'équipement pour $nD=500$
Équipement en vannes pour chaque bassin
de $0,5 \text{ km}^2$ [largeur: 5m
hauteur moyenne: 14m



KD^2/S
 $25 \cdot 10^{-6}$
fig 5

R 12341-2
ANNEXE VE 4 fig 6

Puissance
MW/km²

CHAUSEY. Puissances classées

Bassins conjugués - sans pompage

Influence de KD^2/S à nD constant = 500 $\left\{ \begin{array}{l} D = 8m \\ n = 62,5t/min \end{array} \right.$

Equipement en vannes pour chaque bassin de 0,5 km²

largeur 5m
hauteur moyenne 14m.

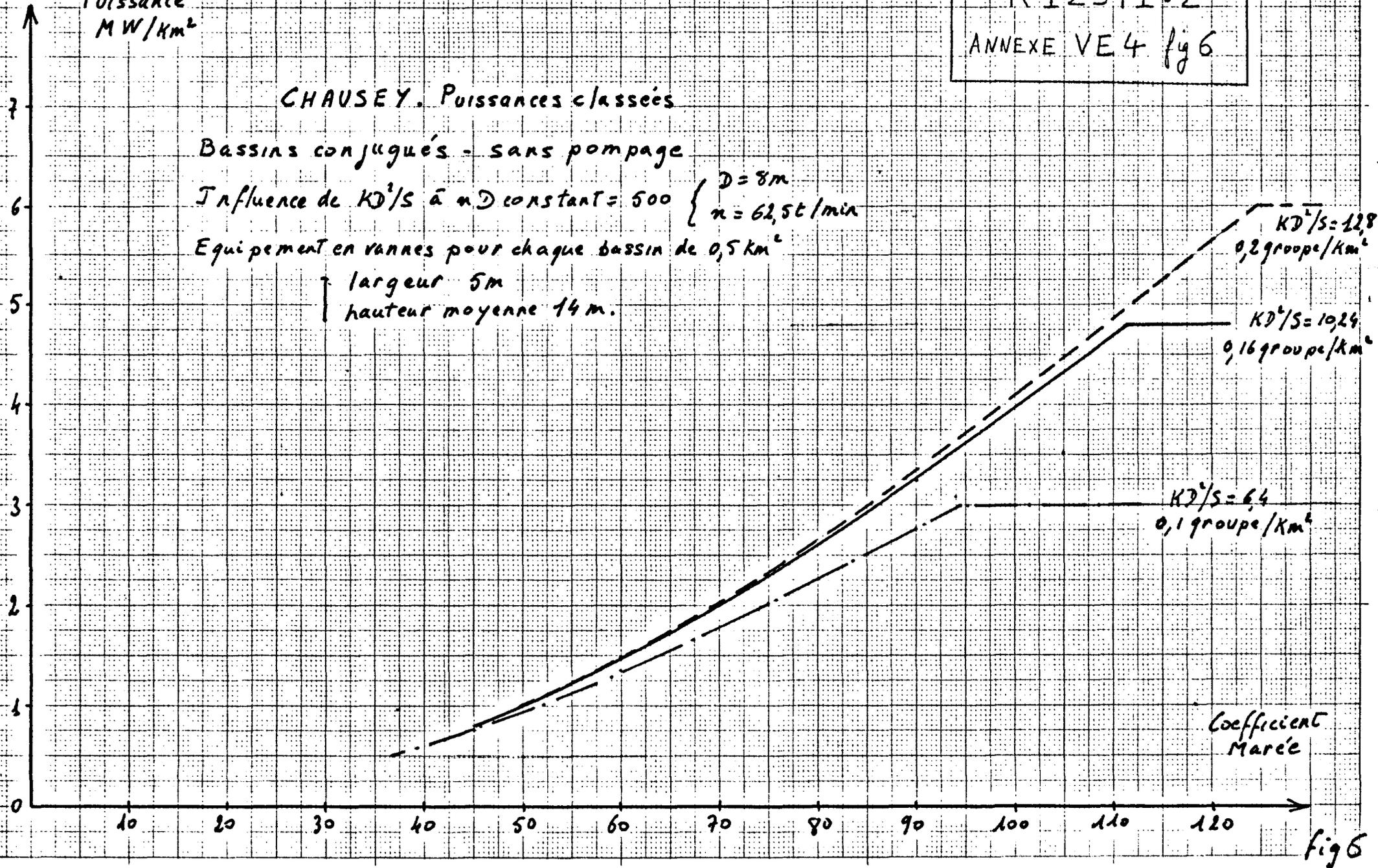


fig 6

R 12341-2
ANNEXE VE 4 fig 7

CHAUSEY

Bassins conjugués - sans pompage
Influence de l'équipement
pour $nD = 500$
Equipement en vannes pour chaque bassin
de $0,5 \text{ Km}^2$: [largeur 3,5m
hauteur moyenne: 14m

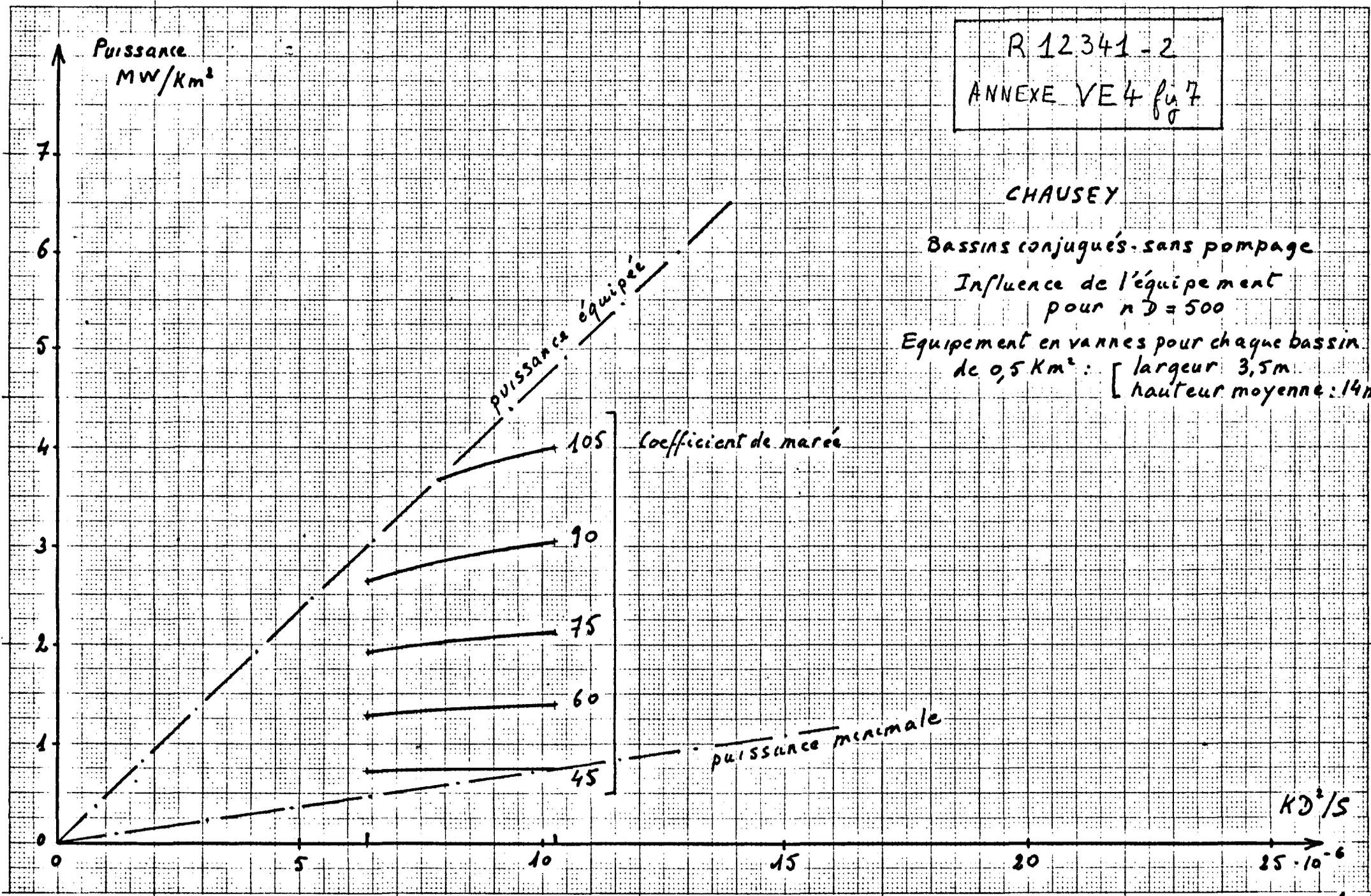
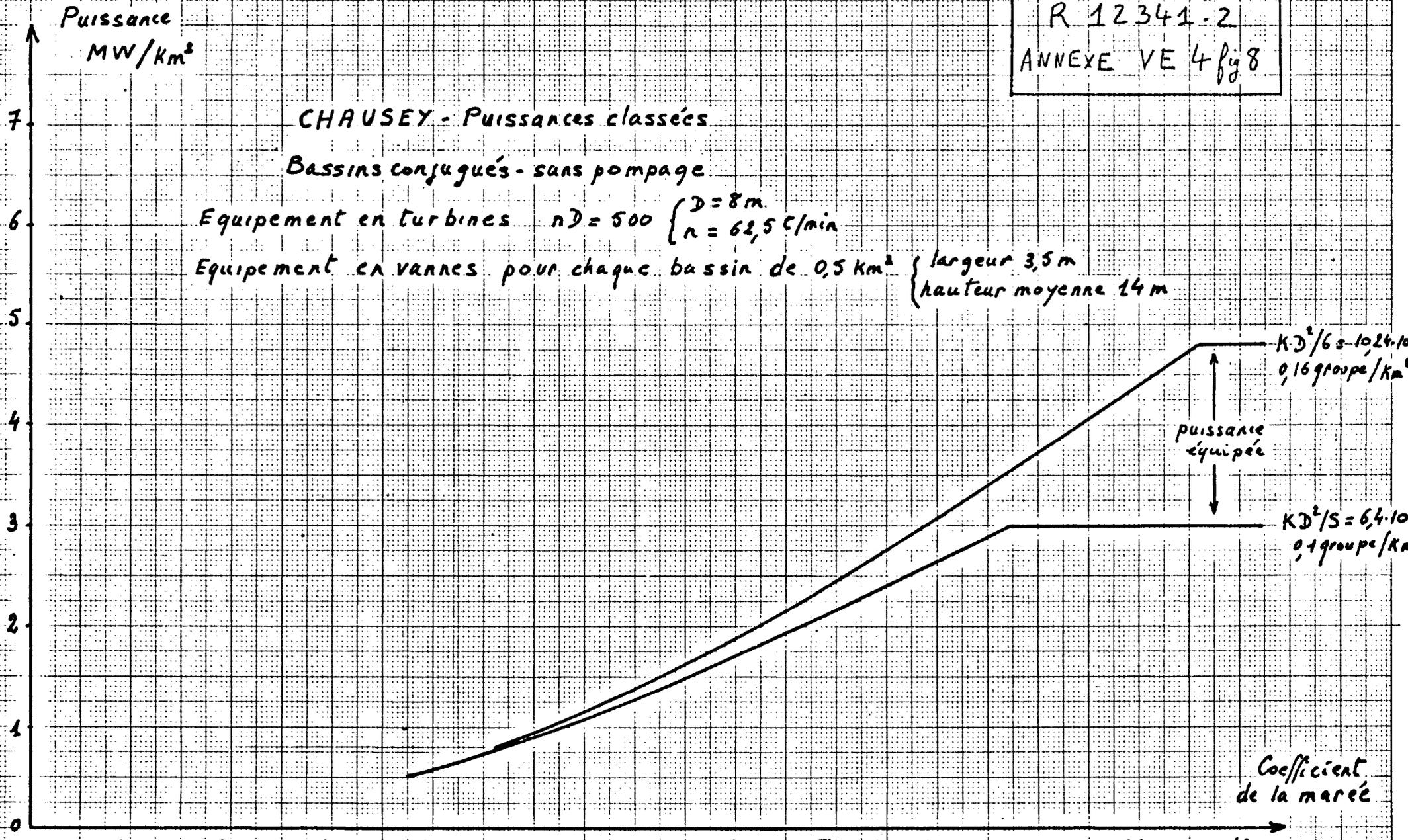


fig 7

R 12341-2
ANNEXE VE 4 fig 8

CHAUSEY - Puissances classées
Bassins conjugués - sans pompage

Equipement en turbines $nD = 500$ $\left\{ \begin{array}{l} D = 8m \\ n = 62,5 \text{ c/min} \end{array} \right.$
Equipement en vannes pour chaque bassin de $0,5 \text{ km}^2$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{largeur } 3,5m \\ \text{hauteur moyenne } 14m \end{array} \right.$



$KD^2/6 = 10,24 \cdot 10$
0,16 groupe/km²

$KD^2/5 = 6,4 \cdot 10$
0,1 groupe/km²

Coefficient de la marée

fig 8

R 12341-2
ANNEXE VE4 fig 9

Puissance
MW/km²

CHAUSEY

Bassins conjugués - sans pompage

Influence de nD à puissance installée constante = 4,8 MW/km²

Equipement en vannes pour chaque bassin de 0,5 km² { largeur 5 m
hauteur moyenne 14 m

7
6
5
4
3
2
1
0

5

550
7,7

500
10

450
14 15

20

25

nD
K³/s

105

90

75

60

45

Coefficient
de marée

fig 9

R 12341-2
ANNEXE VE4 fig 10

CHAUSEY - Puissances classées

Bassins conjugués - sans pompage

Influence de nD à puissance installée constante

Équipement en vannes pour chaque bassin de 0,5 km² { largeur 5m
hauteur moyenne 14m

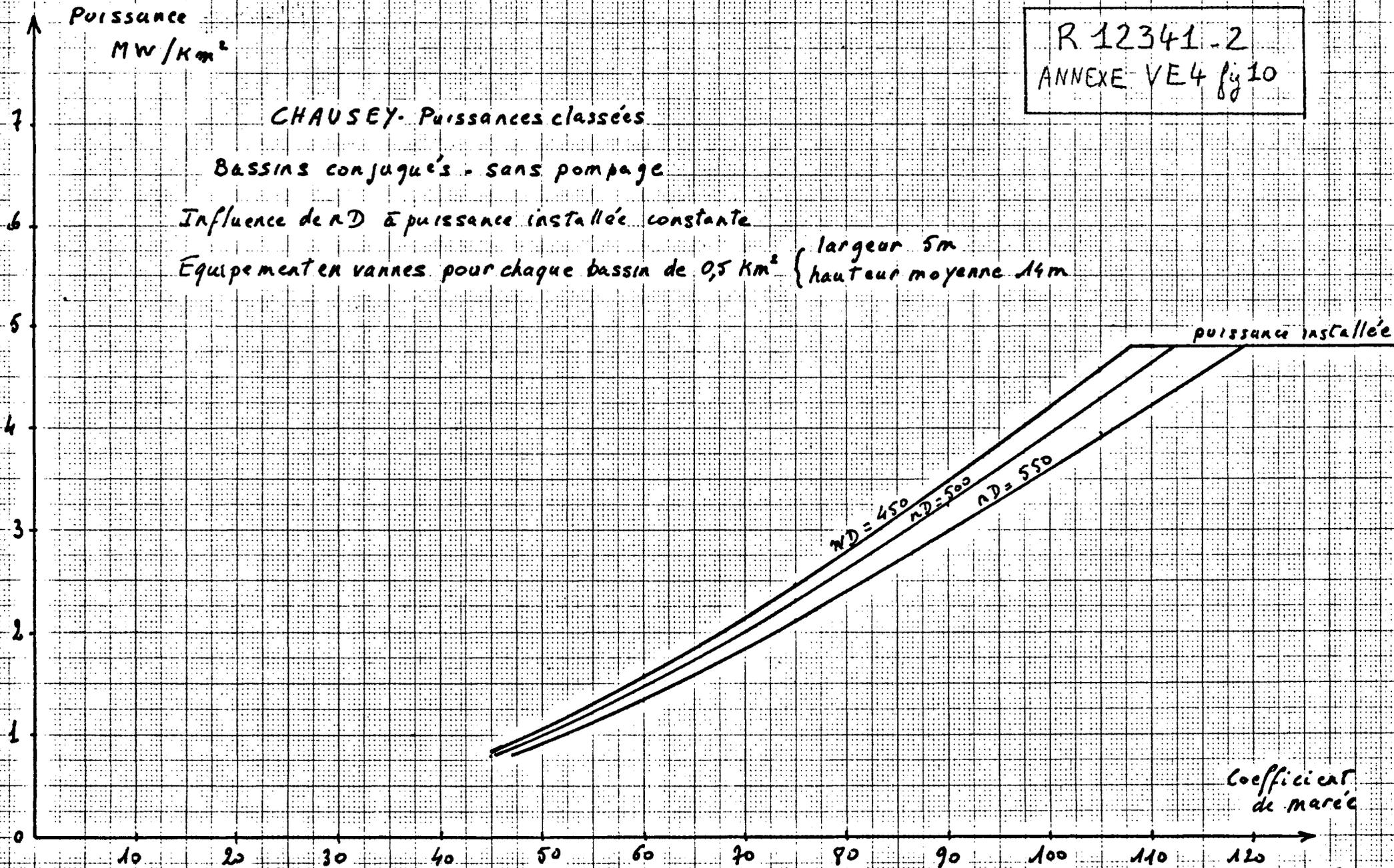


fig 10

R 12341-2
ANNEXE VE 4 fig 11

CHAUSEY - Puissance constante: 0,8 MW

Bassins conjugués - sans pompage

Fonctionnement sur un cycle

marée : coefficient 45

équipement turbines

équipement vannes pour $S_1 = S_2 = 0,5 \text{ km}^2$

$K^2/S = 10,24$
 $nD = 500$

largeur 5m
hauteur moyenne 14m

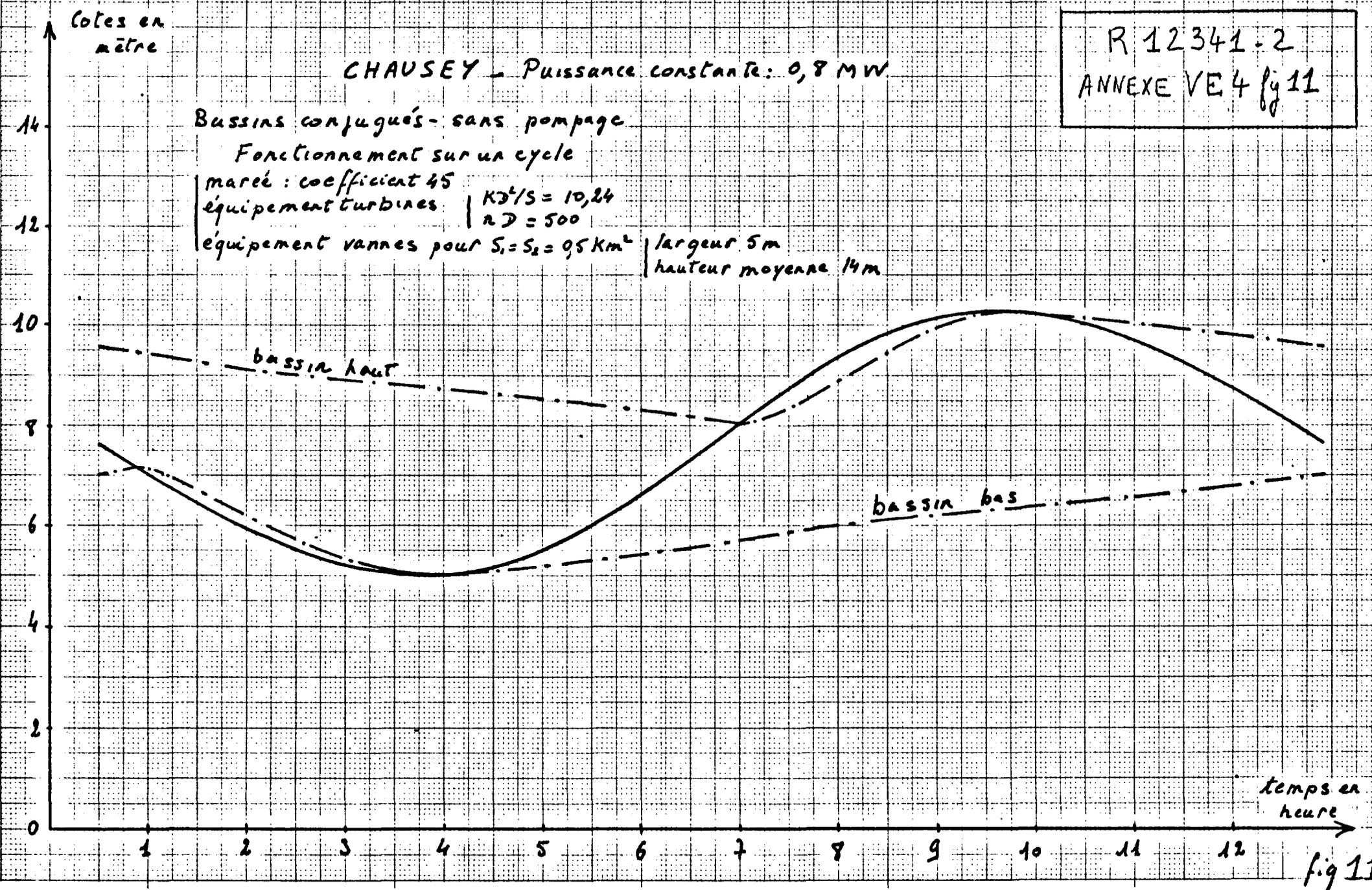


fig 11

CHAUSEY. Puissance constante : 2,30 MW

Bassins conjugués - sans pompage

fonctionnement sur un cycle

R 12341-2
ANNEXE VE 4 fig 13

Cotes en mètres

Maree : coefficient 75
 Equipement turbines $KD^5 = 10,24$
 $nD = 500$
 Equipement vannes pour $S_1 = S_2 = 0,5 \text{ km}^2$ | largeur 5m
 hauteur moyenne 14m

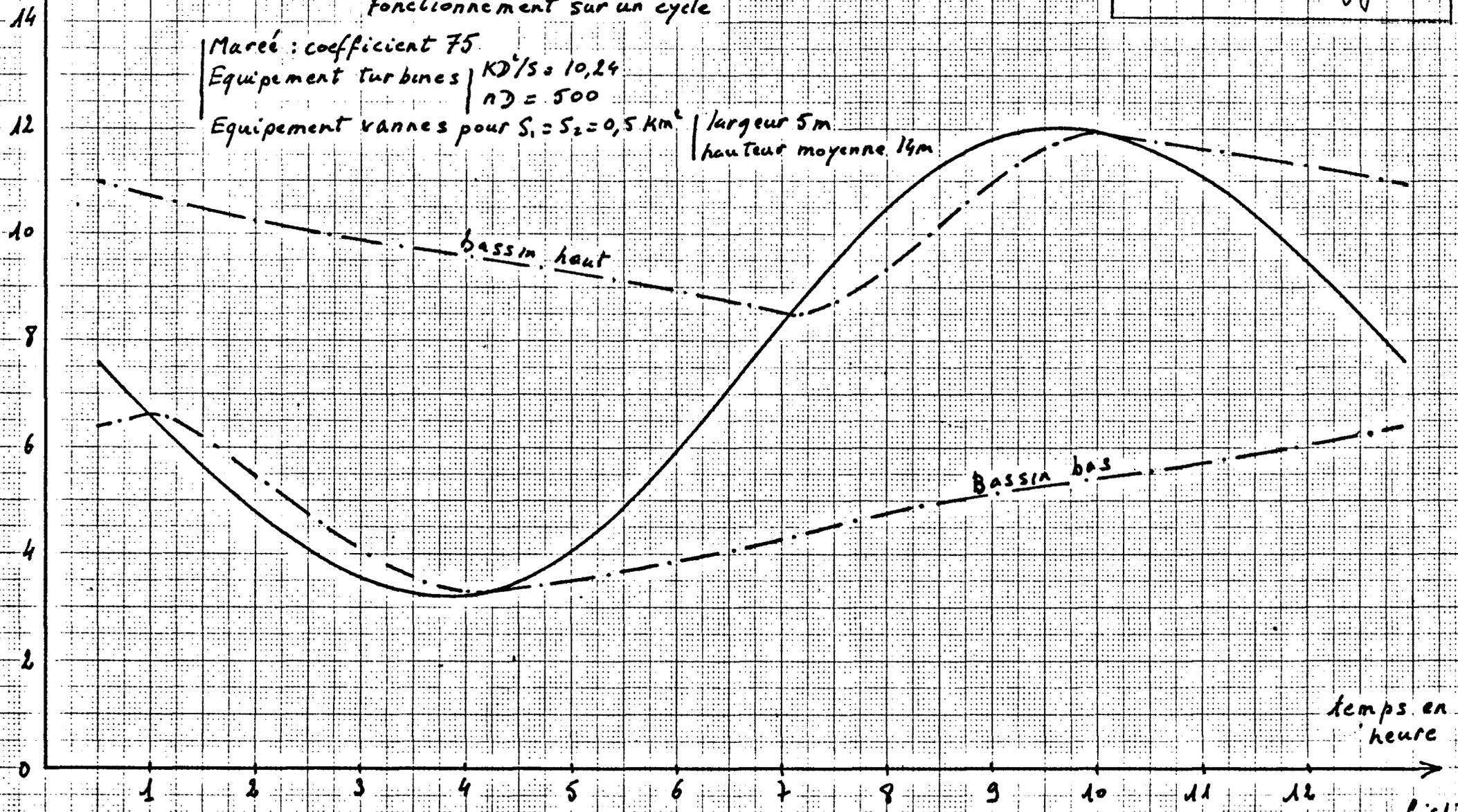


fig 13

R 12341-2
ANNEXE VE 4 fig 14

CHAUSEY - Puissance constante - 3,25 MW

Bassins conjugués - sans pompage
Fonctionnement sur un cycle

Maréé : coefficient 90
 Equipement turbines | $KD^2/S = 10,24$
 | $nD = 500$
 Equipement vannes pour $S_1 = S_2 = 0,5 \text{ km}^2$ | largeur : 5m
 | hauteur moyenne 14m

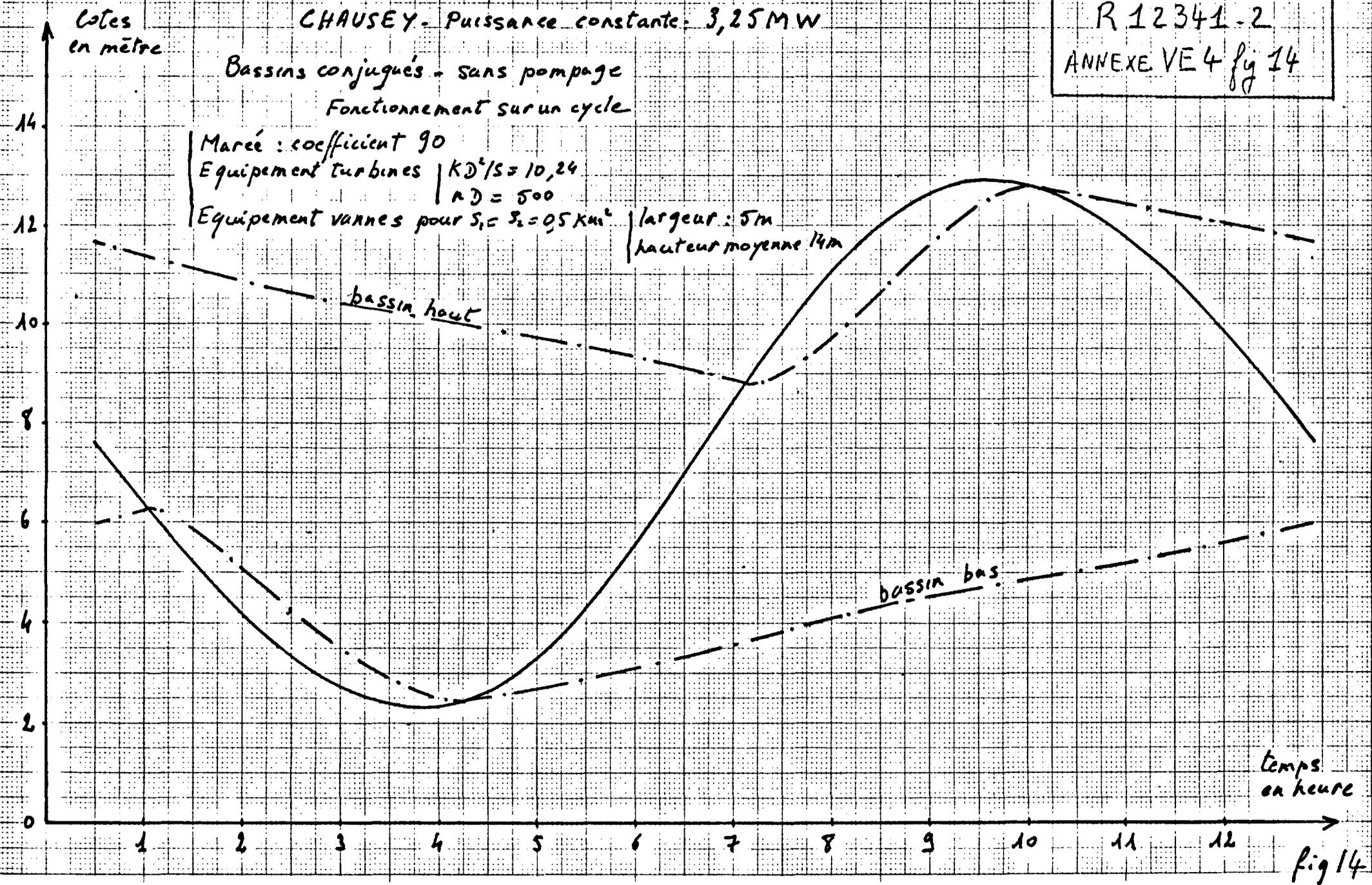


fig 14

R 12341-2
ANNEXE VE4 fig 15

CHAUSEY - Puissance constante : 4,29 MW

Bassins conjugués - sans pompage
Fonctionnement sur un cycle

Marée : coefficient 105
 Equipement turbines $kD^2/s = 10,24$
 Equipement rames pour $S_1 = S_2 = 0,5 \text{ km}^2$ | largeur 5m
 hauteur moyenne 14m

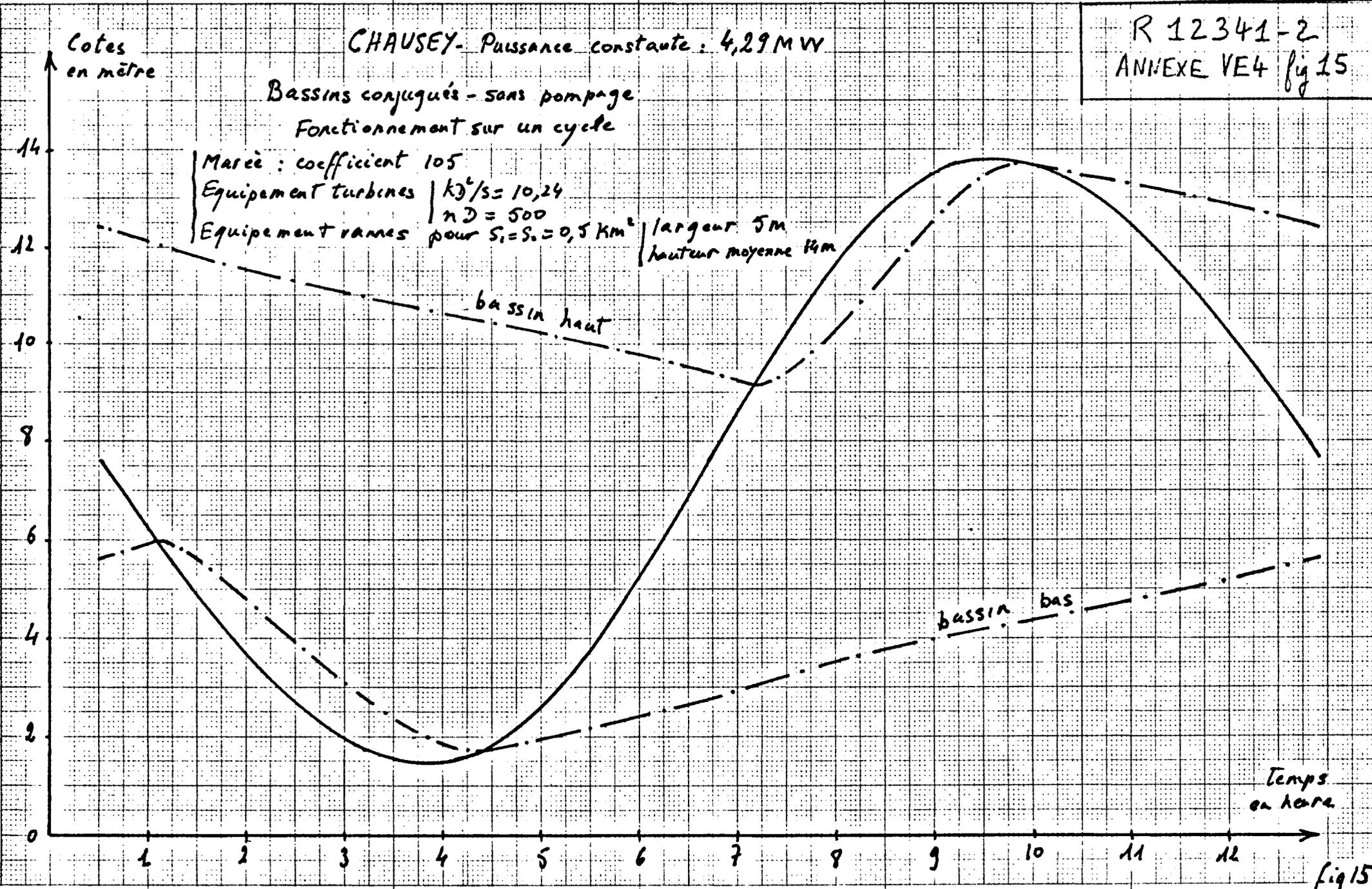


fig 15

Annexe VE 5

-

BASSINS CONJUGUES

 Maximisation de l'énergie pendant un cycle
(sans pompage)

A. PREISSMANN

1. POSITION DU PROBLEME

Il s'agit de rendre maximale l'énergie produite sur un cycle de marée supposé répétitif, c'est-à-dire l'intégrale

$$E = \int_{t_0}^{t_0+T} N(H, Q) dt$$

T désignant la durée du cycle

$N(H, Q)$ est la puissance des groupes sous la chute H avec le débit Q.

Il est entendu qu'à la fin du cycle on retrouve les chutes et débits initiaux :

$$H_{t_0+T} = H_{t_0}$$

$$Q_{t_0+T} = Q_{t_0}$$

Dans le cas des bassins conjugués il y a deux modes de fonctionnement :

- . les vannes reliant les deux bassins à la mer sont fermées
- . un des deux groupes de vannes est ouvert

Nous établissons dans les paragraphes qui suivent les équations différentielles qui régissent ces deux modes de fonctionnement.

Il faut noter que, si l'équipement en turbines et en vannes est élevé, le fonctionnement peut être discontinu. Il y aura arrêt des groupes pendant un certain temps. Il importerait donc d'exécuter des calculs non seulement pour différentes hypothèses sur les marées mais également diverses hypothèses sur les équipements.

2. EQUATIONS DIFFERENTIELLES POUR LES VANNES FERMEES

L'intégrale E est à rendre maximale pour les conditions :

$$\begin{aligned}
 H &= Z_1 - Z_2 & Z_1 &: \text{niveau du bassin haut} \\
 & & Z_2 &: \text{niveau du bassin bas} \\
 Q &= - S_1 \frac{dZ_1}{dt} & Q &: \text{débit turbiné} \\
 & & S_1 &= S_1(Z_1) : \text{surface du bassin haut} \\
 Q &= + S_2 \frac{dZ_2}{dt} & S_2 &= S_2(Z_2) : \text{surface du bassin bas}
 \end{aligned}$$

Si l'on fixe les niveaux au départ ($t = t_0$) on remarquera que l'évolution des niveaux est uniquement fonction de l'évolution du débit Q . Pour la chute $H = Z_1 - Z_2$, on a l'équation d'évolution :

$$\frac{dH}{dt} = - \frac{Q}{S_e}$$

où
$$S_e = \frac{S_1 S_2}{S_1 + S_2} \quad S_e = S_e(H)$$

L'expression de l'énergie devient donc :

$$E = \int_{t_0}^{t_0+T} N(H, -S_e \frac{dH}{dt}) dt$$

L'équation différentielle (équation d'Euler) correspondant à la condition d'extremum pour l'énergie E est alors :

$$\frac{\partial N}{\partial H} - \frac{\partial N}{\partial Q} \frac{dS_e}{dH} \frac{dH}{dt} + \frac{d}{dt} (S_e \frac{\partial N}{\partial Q}) = 0$$

Dans notre cas particulier on constate que le temps n'intervient pas explicitement dans l'expression $N(H, -S_e \frac{dH}{dt})$, par conséquent on peut procéder à une première intégration et on trouve :

$$N + \frac{\partial N}{\partial Q} \cdot \frac{dH}{dt} \cdot S_e = \text{Constante}$$

C'est-à-dire :

$$N - Q \frac{\partial N}{\partial Q} = \text{Constante}$$

Comme N est une fonction de Q et de H , l'expression ci-dessus est une fonction déterminée de Q et de H . Par conséquent la condition d'extrémalité représente une relation implicite entre la chute et le débit.

Notons que pour la valeur nulle de la constante la condition

$$N - Q \frac{\partial N}{\partial Q} = 0$$

représente la condition de rendement maximum pour une chute donnée. Si le rendement est maximal à un certain moment, il le reste tant qu'une vanne ne s'ouvre pas.

3. EQUATIONS DIFFERENTIELLES AVEC UN GROUPE DE VANNES OUVERTES

Lorsque les vannes reliant le bassin bas et la mer sont ouvertes (les équations sont naturellement tout à fait analogues lorsque les vannes reliant le bassin haut à la mer sont ouvertes) l'intégrale à maximiser est toujours la même.

$$E = \int_{t_0}^{t_1} N(Z_1 - Z_2, -S_1 \frac{dZ_1}{dt}) dt$$

Les vannes hautes étant fermées le débit turbiné est égal à

$$Q = -S_1 \frac{dZ_1}{dt}$$

mais par contre le niveau du bassin bas est soumis à une équation différentielle plus complexe :

$$S_2 \frac{dZ_2}{dt} = Q - Q_v$$

où Q_v est le débit des vannes :

$$Q_v = \alpha(Z_M) \sqrt{Z_2 - Z_M}$$

Z_M est le niveau de la mer.

Le problème à traiter est sensiblement plus complexe que le problème avec vannes fermées, en ce sens que le temps intervient explicitement par l'intermédiaire de Z_M et que l'équation différentielle du niveau bas ne possède pas de solution simple. Le problème à résoudre est la maximalisation de E avec, pour Z_2 l'équation différentielle :

$$S_2 \frac{dZ_2}{dt} + S_1 \frac{dZ_1}{dt} + \alpha (Z_M) \sqrt{Z_2 - Z_m} = 0$$

On obtient la solution du problème en utilisant la méthode des multiplicateurs de Lagrange ; on remplace le problème initial par un problème équivalent :

Rendre extrémale l'intégrale :

$$E^*(Z_1, Z_2, \lambda) = \int_{t_0}^{t_1} \left[N(Z_1 - Z_2, -S_1 \frac{dZ_1}{dt}) + \lambda (S_2 \frac{dZ_2}{dt} + S_1 \frac{dZ_1}{dt} + Q_V(Z_2, Z_M)) \right] dt$$

pour des variations des fonctions Z_1 et Z_2 . λ est une fonction inconnue du temps. Les équations d'Euler donnent (ici pour plus de simplicité S_1 et S_2 sont supposés indépendants des niveaux) :

$$\frac{\partial N}{\partial H} + S_1 \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial N}{\partial Q} \right) - \frac{d\lambda}{dt} S_1 = 0$$

$$- \frac{\partial N}{\partial H} + \lambda \frac{\partial Q_V}{\partial Z_2} - \frac{d\lambda}{dt} S_2 = 0$$

Ces deux équations conjointement aux équations de continuité des deux bassins permettent d'aboutir, après quelques calculs, aux quatre équations différentielles :

$$\frac{\partial^2 N}{\partial Q^2} \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{S_e} \left(\frac{\partial N}{\partial H} - Q \frac{\partial^2 N}{\partial H \partial Q} \right) + \frac{1}{S_2} \left(Q_V \frac{\partial^2 N}{\partial H \partial Q} - \lambda \frac{\partial Q_V}{\partial Z_2} \right) = 0$$

$$S_2 \frac{d\lambda}{dt} - \lambda \frac{\partial Q_V}{\partial Z_2} + \frac{\partial N}{\partial H} = 0$$

$$S_1 \frac{dZ_1}{dt} + Q = 0$$

$$S_2 \frac{dZ_2}{dt} - Q + Q_V = 0$$

pour les quatre variables Q, λ, Z_1, Z_2 .

Ce système est sensiblement plus long à résoudre que celui relatif à la partie du cycle pendant laquelle les vannes sont fermées. Il faudra en particulier porter une certaine attention à l'intégration numérique lorsque la différence entre Z_2 et Z_M est petite ($\partial \lambda_v / \partial Z_2$ devient alors très grand).

4. CONDITIONS DE PASSAGE. ARRÊT DES TURBINES

Lorsque les turbines fonctionnent pendant le cycle entier, il n'y a guère de difficulté à passer des vannes ouvertes aux vannes fermées et réciproquement. En effet, au moment du passage le débit de vannage est nul, ainsi les dérivées dZ_1/dt et dZ_2/dt sont continues si le débit turbiné est continu. Dans ces conditions le débit turbiné doit être continu. λ doit avoir la valeur 0 au début du vannage du fait que la dérivée $\partial \lambda_v / \partial Z_2$ devient infini pour $Z_2 = Z_M$.

Toutefois si l'équipement des turbines est suffisant, la production maximale est obtenue par un fonctionnement avec des arrêts des groupes. Comme pour les bassins uniques à simple effet la mise en marche se fait avec le débit qui correspond au rendement maximum. L'arrêt se fait en principe au point correspondant à la double condition

$$\frac{\partial N}{\partial \lambda} = 0$$

et

$$N = 0$$

On aura pour des puissances installées importantes un fonctionnement qui ressemblera (aux pertes de charge des vannes près) à celui de deux bassins fonctionnant à simple effet.

oOo

Annexe VE 6

Aménagement marémoteur CHAUSEY

-

Bassins conjugués - Cycles sans pompage
à énergie maximale par marée

-

Etude paramétrique
Rapport partiel 74-24

Contrat CNEOX 74/1131

-

Octobre 1975

S O M M A I R E

	Pages
NOTATIONS	37
RESUME	38
INTRODUCTION	39
1. GENERALITES	40
1.1 Position du problème	40
1.2 Groupes en fonctionnement normal. Vannes fermées	40
1.3 Groupes en fonctionnement normal. Vannes ouvertes	42
1.4 Groupes fonctionnant en puissance limite d'alternateur	44
1.5 Groupes fonctionnant à la chute limite	45
1.6 Arrêt des groupes	46
1.7 Conditions d'optimalité	47
2. DETERMINATION DE L'ENERGIE MAXIMALE PAR MAREE	48
2.1 Généralités	48
2.2 Influence de l'équipement en vannes	48
2.3 Influence de l'équipement en turbines	49
2.4 Conclusions	51

oOo

NOTATIONS

-

Marée

C_m	coefficient de marée
$A(C_m)$	amplitude crête à creux de la marée
z_m	niveau de la mer

Turbine

D	diamètre de la turbine (mètre)
n	vitesse de rotation (tr/mn)
$N(h, Q)$	puissance de la turbine (MW)
$\eta(h, Q)$	rendement
h	chute (mètre)
Q	débit (m^3/s)
K	nombre de groupes

Vannes

s	section (m^2)
l	largeur (mètre)

Bassin

S	surface totale des deux bassins (m^2)
S_1	surface du bassin haut (m^2)
S_2	surface du bassin bas (m^2)
z_1	niveau du bassin haut (mètre)
z_2	niveau du bassin bas (mètre)

$$S_e = \frac{S_1 S_2}{S_1 + S_2}$$

oOo

R E S U M E

-

Dans le cadre de l'étude CNEXO sur les possibilités d'équipements marémoteurs aux Iles Chausey, nous avons calculé la productivité d'une usine à deux bassins conjugués fonctionnant en cycle Bélidor (turbinage entre le bassin haut et le bassin bas).

Nous avons effectué ces calculs avec deux types de cycles :

- . cycles sans pompage à puissance constante par marée
- . cycles sans pompage à énergie maximale par marée

Les calculs relatifs au premier type de cycles ont fait l'objet de la note Chausey 74-11.

Nous présentons dans cette note les calculs relatifs au deuxième type de cycles.

Pour des équipements identiques en turbines et en vannes (0,16 groupe de 30 MW/km² et 140 m² de vannes/km²), nous avons respectivement obtenu :

	Puissance moyenne sur l'année	Production moyenne d'un cycle	Production annuelle
Cycle à puissance constante	2,12 MW	26,3 MWH	18 571 MWH
Cycle à énergie maximale	2,34 MW	29,1 MWH	20 498 MWH

soit une augmentation de 10 %.

Cet équipement semble être proche de l'optimal et pourra servir de base à une étude ultérieure.

-

INTRODUCTION

Cette note fait suite à la note Techniques des Fluides "Bassins conjugués - Maximisation de l'énergie pendant un cycle (sans pompage)".

Dans cette note, sont présentés les résultats du programme de calcul donnant la production d'énergie maximale sur un cycle d'une usine marémotrice à bassins conjugués sans pompage.

Les éléments, utilisés dans cette note, concernant les marées et les turbines, ont été présentés dans le rapport partiel Techniques des Fluides 74-11 d'Avril 1975 "Aménagement maré-moteur CHAUSEY - Bassins conjugués - Cycles sans pompage à puissance constante par marée"*.

* Cf. Annexe VE 4, page 15

1. GENERALITES

1.1 Position du problème

Le problème posé est de rendre maximale l'énergie produite sur un cycle de marée supposé répétitif. Cette énergie s'écrit :

$$E = \int_{t_0}^{t_0+T} N(h, Q) dt$$

où T est la période du cycle de marée (12,42 heures).

A la fin du cycle, on doit retrouver les niveaux initiaux des deux bassins.

Le fonctionnement de l'aménagement est du type Bélidor, sans pompage.

On a deux types de fonctionnement relativement aux vannes :

- . vannes bassins bas et haut fermées
- . vannes bassins bas ou haut ouvertes

et quatre types de fonctionnement relatifs aux groupes déterminés par les limitations de puissance et de chute :

- . fonctionnement normal
- . fonctionnement en puissance limite d'alternateur
- . fonctionnement en chute limite
- . arrêt des groupes

En effet, lorsque l'équipement est important par rapport à l'amplitude de la marée, il y aura arrêt des groupes pendant un certain temps, généralement pendant la période vannes fermées.

Nous allons établir, dans les paragraphes suivants, les équations différentielles qui régissent ces différents modes de fonctionnement.

1.2 Groupes en fonctionnement normal. Vannes fermées

Les équations différentielles, auxquelles obéissent les niveaux et les débits, sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} h = z_1 - z_2 \\ \frac{dz_1}{dt} = - \frac{Q_T}{S_1} \\ \frac{dz_2}{dt} = + \frac{Q_T}{S_2} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} z_1 : \text{niveau bassin haut} \\ z_2 : \text{niveau bassin bas} \\ h : \text{chute} \\ Q_T : \text{débit turbiné} \end{array}$$

Dans ces équations, le débit turbiné Q_T n'est pas défini. Nous allons établir l'équation différentielle permettant de le déterminer.

Si les niveaux de départ ($t = t_0$) sont fixés, l'évolution de ces niveaux et de la chute est uniquement fonction du débit Q_T , et l'on a :

$$\frac{dh}{dt} = - \frac{Q_T}{S_e} \quad \text{avec} \quad S_e = \frac{S_1 S_2}{S_1 + S_2}$$

L'expression de l'énergie à maximiser entre l'instant t_0 et l'instant t_1 est :

$$E = \int_{t_0}^{t_1} N(h, - S_e \frac{dh}{dt}) dt$$

L'équation différentielle (équation d'Euler) correspondant à la condition d'extremum pour l'énergie E est alors :

$$0 = \frac{\partial N}{\partial h} - \frac{\partial N}{\partial Q} \frac{dS_e}{dh} \frac{dh}{dt} + \frac{d}{dt} (S_e \frac{\partial N}{\partial Q}) = 0$$

On peut procéder à une première intégration et l'on trouve :

$$N + \frac{\partial N}{\partial Q} \cdot S_e \frac{dh}{dt} = Cte = K$$

c'est-à-dire :

$$\boxed{N - Q \frac{\partial N}{\partial Q} = K}$$

Comme N est une fonction de Q et de h , l'expression ci-dessus est une fonction déterminée de Q et de h . Par conséquent, la condition d'extrémalité est donnée par une relation implicite entre la chute et le débit.

Pour une chute h donnée, la relation précédente permet de calculer le débit correspondant.

Notons que pour la valeur nulle de la constante, la condition :

$$N - Q \frac{\partial N}{\partial Q} = 0$$

représente la condition de rendement maximal pour une chute donnée.

1.3 Groupes en fonctionnement normal. Vannes ouvertes

Nous allons établir les équations différentielles auxquelles obéissent les niveaux et les débits lorsque les vannes reliant le bassin bas et la mer sont ouvertes.

Les équations relatives aux vannes du bassin haut ouvertes sont du même type.

L'intégrale à maximiser est de même :

$$E = \int_{t_2}^{t_1} N(z_1 - z_2, -S_1 \frac{dz_1}{dt}) dt$$

Les vannes du bassin haut étant fermées, le débit turbiné est égal à :

$$-S_1 \frac{dz_1}{dt} = Q$$

Par contre le niveau du bassin bas est fonction du débit vanné, soit :

$$S_2 \frac{dz_2}{dt} = Q - Q_{v2}$$

Q_{v2} étant le débit vanné :

$$Q_{v2} = (C_{12} + C_{22} z_m) \sqrt{z_2 - z_m}$$

et z_m le niveau de la mer.

L'énergie E est fonction de deux variables z_1 et z_2 qui sont reliées entre elles par la relation :

$$S_2 \frac{dz_2}{dt} + S_1 \frac{dz_1}{dt} + (C_{12} + C_{22} z_m) \sqrt{z_2 - z_m} = 0$$

où le temps intervient explicitement par l'intermédiaire de z_m .

On obtient la solution du problème en utilisant la méthode des multiplicateurs de Lagrange qui consiste à introduire une fonction inconnue λ permettant de considérer z_1 et z_2 comme des variables indépendantes, soit :

$$E(z_1, z_2, \lambda) = \int_{t_0}^{t_1} \left[N(z_1, z_2, -S_1 \frac{dz_1}{dt}) + \lambda \left(S_2 \frac{dz_2}{dt} + S_1 \frac{dz_1}{dt} + Q_{v2}(z_2, z_m) \right) \right] dt$$

Les conditions d'Euler donnant les équations différentielles de l'extrémale s'écrivent, en supposant que les surfaces des bassins sont constantes :

$$\frac{\partial N}{\partial h} + S_1 \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial N}{\partial Q} \right) - S_1 \frac{d\lambda}{dt} = 0$$

$$- \frac{\partial N}{\partial h} + \frac{\partial Q_{v2}}{\partial z_2} - S_2 \frac{d\lambda}{dt} = 0$$

Ces deux équations, jointes aux équations donnant la variation des cotes des deux bassins permettent d'aboutir à un système différentiel à quatre équations et quatre inconnues :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dz_1}{dt} = - Q/S_1 \\ \frac{dz_2}{dt} = (Q - Q_{v2})/S_2 \\ \frac{d\lambda}{dt} = \left(\lambda \frac{\partial Q_{v2}}{\partial z_2} - \frac{\partial N}{\partial h} \right) / S_2 \\ \frac{dQ}{dt} = \left[\frac{1}{S_e} \left(Q \frac{\partial^2 N}{\partial h \partial Q} - \frac{\partial N}{\partial h} \right) + \frac{1}{S_2} \left(\lambda \frac{\partial Q_{v2}}{\partial z_2} - Q_{v2} \frac{\partial^2 N}{\partial h \partial Q} \right) \right] / \frac{\partial^2 N}{\partial Q^2} \end{array} \right.$$

De la même manière, les équations correspondant au cas du bassin haut en communication avec la mer s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dz_2}{dt} = Q/S_2 \\ \frac{dz_1}{dt} = (Q_{v1} - Q) / S_1 \\ \frac{d\lambda}{dt} = \left(\frac{\partial N}{\partial h} - \lambda \frac{\partial Q_{v1}}{\partial z_1} \right) / S_1 \\ \frac{dQ}{dt} = \left[\frac{1}{S_e} \left(Q_T \frac{\partial^2 N}{\partial h \partial Q} - \frac{\partial N}{\partial h} \right) + \frac{1}{S_1} \left(\lambda \frac{\partial Q_{v1}}{\partial z_1} - Q_{v1} \frac{\partial^2 N}{\partial h \partial Q} \right) \right] / \frac{\partial^2 N}{\partial Q^2} \end{array} \right.$$

1.4 Groupes fonctionnant en puissance limite d'alternateur

Le fonctionnement à puissance limite d'alternateur se produit lorsque l'intégration du système d'équations précédent conduit à une chute et à un débit correspondant à une puissance supérieure à la puissance des alternateurs.

Les équations du système deviennent alors :

- vannes bassin bas ouvertes

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dz_1}{dt} = - Q/S_1 \\ \frac{dz_2}{dt} = (Q - Q_{v2}) / S_2 \\ \frac{\partial \lambda}{dt} = \left(\lambda \frac{\partial Q_{v2}}{\partial z_2} - \frac{\partial N}{\partial h} \right) / S_2 \end{array} \right.$$

avec la relation donnant le débit turbiné :

$$N(Q, h) = N_L$$

- vannes bassin haut ouvertes

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dz_1}{dt} = (Q_{v1} - Q) / S_1 \\ \frac{dz_2}{dt} = Q/S_2 \\ \frac{d\lambda}{dt} = \left(\frac{\partial N}{\partial h} - \lambda \frac{\partial Q_{v1}}{\partial z_1} \right) / S_1 \end{array} \right.$$

avec la relation :

$$N(Q, h) = N_L$$

- vannes fermées

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dz_1}{dt} = - Q/S_1 \\ \frac{dz_2}{dt} = Q/S_2 \end{array} \right.$$

avec la relation :

$$N(Q, h) = N_L$$

Cas vannes ouvertes. Condition de sortie

Soit t_1 l'instant où l'on atteint la puissance limite.

L'instant t_2 correspondant à la fin du fonctionnement en puissance limite est donné par la condition :

$$\frac{\partial N}{\partial Q} (t_2) = \frac{\partial N}{\partial Q} (t_1) / \exp \left[\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{\partial N}{\partial h} / S \frac{\partial N}{\partial Q} \right) dt \right]$$

La surface S entrant dans cette équation est la surface du bassin qui n'est pas en communication avec la mer.

Cas vannes fermées. Condition de sortie

La condition de fin de turbinage à puissance limite est donnée par la relation :

$$N - Q \frac{\partial N}{\partial Q} = K$$

1.5 Groupes fonctionnant à la chute limite

Ce type de fonctionnement correspond sur la colline de la turbine à la condition $\partial N / \partial Q = 0$. Cette solution signifie que, pour une chute donnée, la puissance est maximale pour le débit donné par la condition $\partial N / \partial Q(Q, h) = 0$ et que tout accroissement de débit au-delà de cette valeur donne une puissance plus faible.

Ce type de fonctionnement ne devrait pas se produire si le cycle décrit correspond effectivement à la production optimale. Mais il est néanmoins nécessaire de le prévoir car il peut être utilisé tant que l'on n'a pas atteint l'optimum.

1.6 Arrêt des groupes

Lorsque la marée est faible, il peut y avoir intérêt à arrêter les groupes aussi bien vannes ouvertes que vannes fermées.

Les équations du système deviennent alors :

- vannes fermées

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dz_1}{dt} = 0 \\ \frac{dz_2}{dt} = 0 \end{array} \right.$$

- vannes bassin bas ouvertes

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dz_1}{dt} = 0 \\ \frac{dz_2}{dt} = - Q_{v2}/S_2 \end{array} \right.$$

- vannes bassin haut ouvertes

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dz_1}{dt} = Q_{v1}/S_1 \\ \frac{dz_2}{dt} = 0 \end{array} \right.$$

Nous allons indiquer dans le paragraphe suivant les conditions de transversalité et en particulier les conditions de redémarrage des groupes.

1.7 Conditions d'optimalité

Nous noterons :

- point 1 : fin du turbinage avec vannage
 - point 2 : début du turbinage sans vannage
 - point 3 : fin du turbinage sans vannage
- } Figure 1

Le demi-cycle turbinage avec vannage-turbinage sans vannage sera optimal si la condition suivante est vérifiée :

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1 \frac{\partial N}{\partial Q} (1) + S_e \left[\frac{\partial N}{\partial Q} (3) - \frac{\partial N}{\partial Q} (2) \right] = 0 \\ S_2 \frac{\partial N}{\partial Q} (1) + S_e \left[\frac{\partial N}{\partial Q} (3) - \frac{\partial N}{\partial Q} (2) \right] = 0 \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{Vannes ouvertes} \\ \text{bassin bas} \\ \text{Vannes ouvertes} \\ \text{bassin haut} \end{array}$$

Cette condition implique que :

$$\frac{\partial N}{\partial Q} (2) > \frac{\partial N}{\partial Q} (1)$$

c'est-à-dire que l'on ait une discontinuité de débit lors du passage turbinage vannes ouvertes au turbinage vannes fermées.

Les paramètres à ajuster de manière à vérifier la condition précédente sont :

- K : constante de l'équation $N - Q \frac{\partial N}{\partial Q} = K$
- λ : valeur initiale de λ au début du turbinage avec vannage.

Cas d'arrêt des groupes

Dans le cas des marées faibles, on peut être amené à diminuer K jusqu'à obtenir une valeur négative. Dans ce cas, on garde pour K une valeur nulle et l'on arrête les groupes :

- soit durant la période sans vannage
- soit durant toute la période sans vannage et une partie de la période avec vannage

Dans le premier cas, on arrête de turbiner lorsque la chute devient inférieure à une valeur donnée correspondant à la valeur adéquate de $\partial N / \partial Q$ (3).

Dans le second cas, on ne commencera à turbiner que lorsque la chute devient supérieure à une valeur donnée.

2. DETERMINATION DE L'ENERGIE MAXIMALE PAR MAREE

2.1 Généralités

Les paramètres entrant dans le calcul de l'énergie maximale par marée sont :

- . l'amplitude de la marée
- . l'équipement en turbines
- . l'équipement en vannes
- . la surface des bassins

Nous allons montrer, dans les paragraphes suivants, l'influence de ces paramètres sur l'énergie produite.

Les calculs à puissance constante ont montré que le groupe $D = 8 \text{ m} - n = 62,5 \text{ tr/mn}$ était bien adapté aux chutes rencontrées, la puissance de l'alternateur étant limitée à 30 MW.

Nous avons donc conservé ce type de groupe pour les calculs effectués.

Les résultats de productivité seront comparés à ceux obtenus à puissance constante par marée.

2.2 Influence de l'équipement en vannes

La loi de débit des vannes s'écrit :

- . bassin haut : $Q_{v1} = (C_{11} + C_{21} z_1) \sqrt{z_m - z_1}$
- . bassin bas : $Q_{v2} = (C_{12} + C_{22} z_m) \sqrt{z_2 - z_m}$

Les coefficients C_{11} , C_{21} , C_{12} , C_{22} sont fonction de la largeur de la vanne et de la cote du point bas de la vanne.

Nous avons fixé cette cote à - 2 mètres pour le bassin haut et à - 10 mètres pour le bassin bas, ce qui donne :

- bassin haut : $C_{11} = 8,8$ $C_{21} = 4,4$
- bassin bas : $C_{12} = 4,4$ $C_{22} = 4,4$

Nous avons testé l'influence de l'équipement en vannes avec un équipement en turbines de $0,32$ groupe/km² ($KD^2/S = 20,48$).

Nous avons essayé deux largeurs de vanne, identiques pour les deux bassins de surface égale ($0,5$ km²).

Les résultats correspondants sont rassemblés dans le tableau suivant et reportés sur la figure 2.

Energie maximale - Bassins conjugués - Influence du vannage

Surface du bassin : $2 \times 0,5$ km²

$KD^2/S = 20,48$ - Nombre de groupe $0,32$ /km²

Puissance en MW - Energie en MWH

Equipement en vannes		Coefficient de marée						
Largeur m/km ²	Surface m ² /km ²		45	60	75	90	105	Moyenne sur l'année
10	140	\bar{P} (MW)	1,2	2,15	3,2	4,15	5	2,84
		E(MWH)	14,9	26,7	39,7	51,5	62,1	35,2
20	280	\bar{P} (MW)	1,5	2,6	3,85	4,9	5,7	3,37
		E(MWH)	18,6	32,3	47,8	60,8	70,8	41,8

2.3 Influence de l'équipement en turbines

Nous avons retenu un seul type de groupe de diamètre $D = 8$ m et tournant à $n = 62,5$ tr/mn ce qui correspond à $nD = 500$.

La puissance de l'alternateur est limitée à 30 MW.

L'énergie maximale a été calculée avec trois types d'équipement de surface de vannage proportionnelle au nombre de groupes.

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau suivant et reportés sur les figures 3 et 4.

Dans ce tableau nous donnons, par marée, l'énergie produite E , la puissance moyenne \bar{P} correspondante et leurs valeurs moyennes sur l'année en tenant compte de la répartition des marées.

Energie maximale - Bassins conjugués
Influence de l'équipement en groupes
Surface du bassin : $2 \times 0,5 \text{ km}^2$
Puissance en MW - Energie en MWH

Equipement en turbines		Equipement en vannes total		Coefficient de marée						
KD ² /S	K/S	Largeur m/km ²	Surface m ² /km ²		45	60	75	90	105	Moyenne sur l'année
6,4	0,1	7	98	\bar{P} MW	0,85	1,45	2,10	2,80	3	1,90
				E MWH	10,6	18	26,1	34,8	37,2	23,6
10,24	0,16	10	140	\bar{P} MW	1	1,7	2,6	3,5	4,4	2,34
				E MWH	12,4	21,1	32,3	43,5	54,6	29,10
20,48	0,32	20	280	\bar{P} MW	1,5	2,6	3,85	4,9	5,7	3,37
				E MWH	18,6	32,3	47,8	60,8	70,8	41,8

Nous avons joint aux courbes de puissance les variations de niveaux, bassin et mer au cours d'un cycle ainsi que les variations de puissance en fonction de la chute et du débit dans la colline de la turbine dans le cas de l'équipement de 0,1 groupe/km² pour les marées 45, 60, 75, 90 et 105 (figures 5 à 10).

2.4 Conclusions

Des calculs de productivité précédents, on peut tirer les conclusions suivantes :

- à nD constant, la productivité augmente avec la puissance installée. Cette variation, dans la limite des puissances étudiées, est fonction de la puissance installée suivant la loi :

$$E_{\text{moyen sur un cycle (MWH)}} = 13,5 \sqrt{\text{Puissance installée (MW)}}$$

$$\bar{P}_{\text{moyen sur un cycle (MW)}} = 1,09 \sqrt{\text{Puissance installée (MW)}}$$

Les deux valeurs précédentes augmentent moins vite que la puissance installée et il devra en être tenu compte dans le cadre d'une étude économique.

- l'équipement en vannes total optimal pour une puissance installée par km² de bassin est :

$$\begin{aligned} \text{Surface de vannes (m}^2/\text{km}^2) &= 30 \times \text{puissance installée (MW/km}^2) \\ &= 900 \times \text{nombre de groupes/km}^2 \end{aligned}$$

- le gain de productivité entre le fonctionnement à puissance constante et à énergie maximale par cycle de marée varie de 25 % à 0 % suivant l'équipement et le coefficient de marée. Nous en rappelons les valeurs dans le tableau ci-dessous :

Comparaison puissance moyenne (MW)
Puissance constante - Energie maximale
Surface du bassin : 2 x 0,5 km²

Equipement en turbines	KD ² /S	6,4			10,24		
	K/S	0,1 g/km ²			0,16 g/km ²		
	Pn/S	3 MW/km ²			4,8 MW/km ²		
Equipement en vannes	Largeur m/km ²	7			10		
	Surface v m ² /km ²	98			140		
		P Cste	E max.	gain %	P Cste	E max.	gain %
Coefficient de marée	45	0,70	0,85	21	0,8	1	25
	60	1,28	1,45	13	1,47	1,7	15,6
	75	1,92	2,10	9,4	2,30	2,6	13
	90	2,63	2,80	6,5	3,25	3,5	7,7
	105	3	3	0	4,29	4,4	21,65
	Moyenne annuelle	1,74	1,90	9,2	2,12	2,34	10,4

- l'optimisation définitive des équipements devra être faite en tenant compte des données économiques concernant le coût des investissements et du prix de l'énergie.

CHAUSEY - Bassins conjugués
Cycles à énergie maximale - sans pompage

Diagramme de fonctionnement dans la colline

- ① fin de turbinage avec vannage
- ② début de turbinage sans vannage
- ③ début de turbinage avec vannage

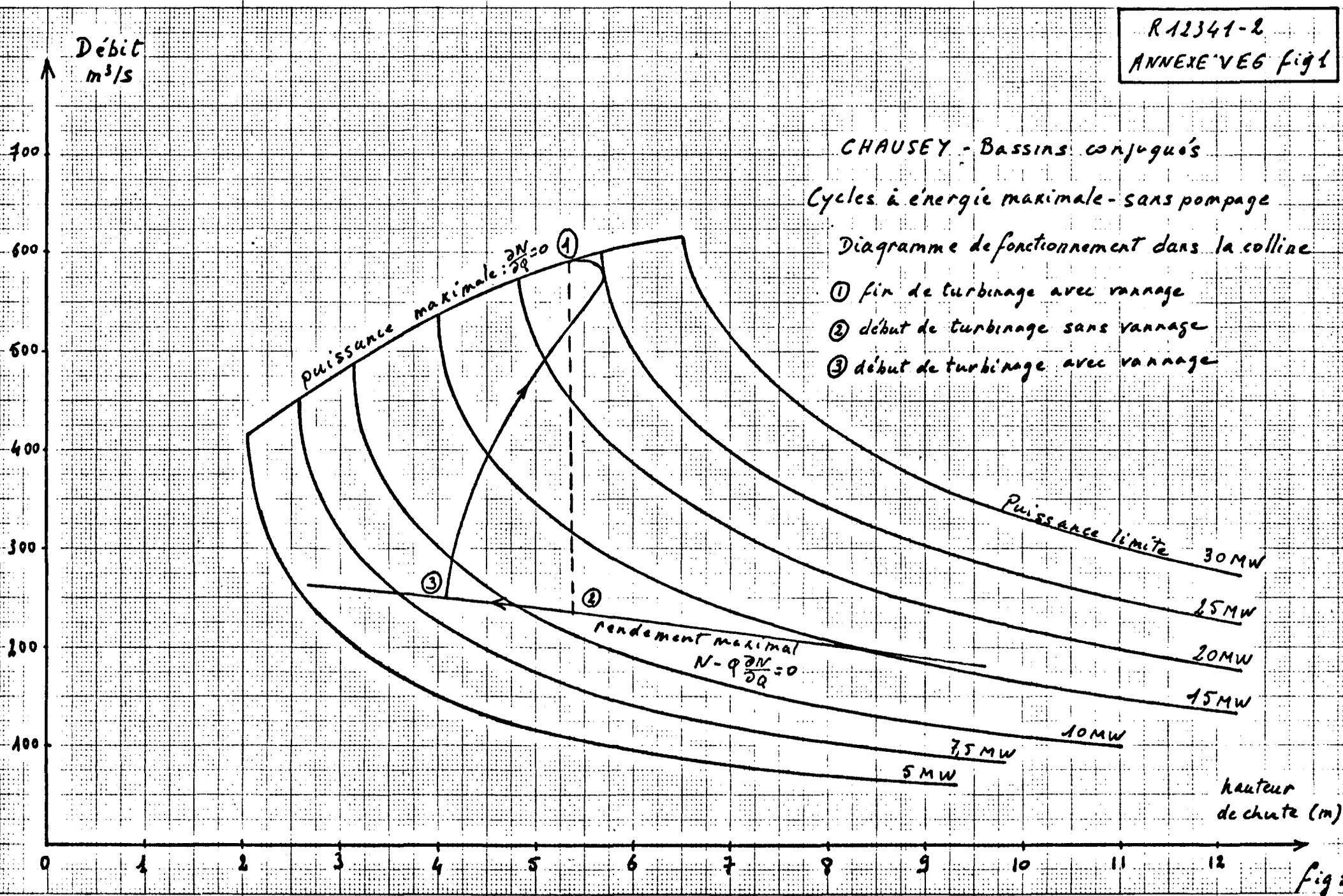


fig 1

R 12344-2
Annexe VEB fig 2

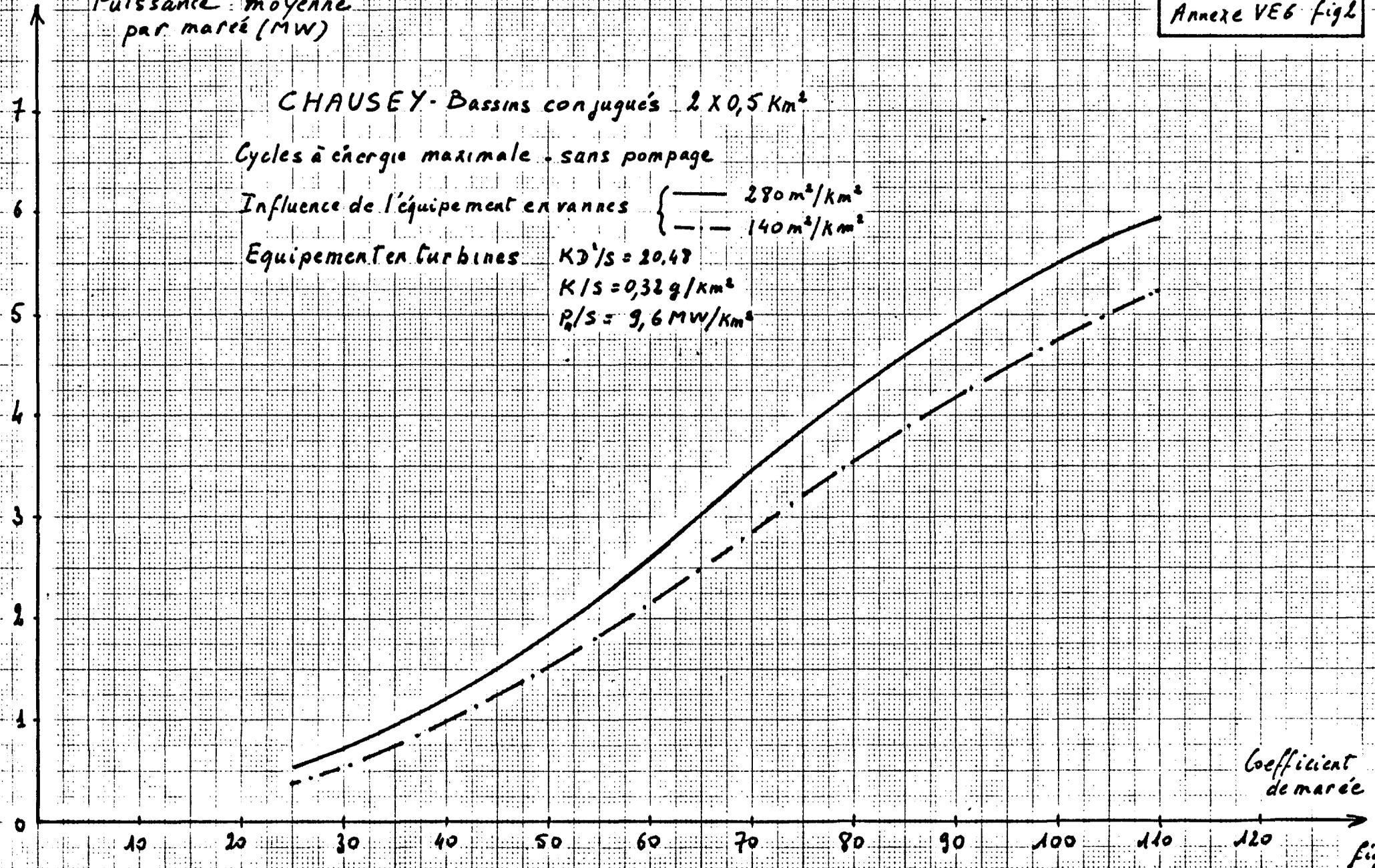
Puissance moyenne
par marée (MW)

CHAUSEY - Bassins conjugués $2 \times 0,5 \text{ km}^2$

Cycles à énergie maximale - sans pompage

Influence de l'équipement en vannes { — $280 \text{ m}^2/\text{km}^2$
- - $140 \text{ m}^2/\text{km}^2$

Equipement en turbines $KD'/S = 20,48$
 $K/S = 0,32 \text{ g}/\text{km}^2$
 $P_0/S = 9,6 \text{ MW}/\text{km}^2$



Coefficient
de marée

fig 2

Puissance moyenne
par marée (MW)

R 12341-2
Annexe VE 6 - fig 3

CHAUSEY - Bassins conjugués 270,5 km²

Cycles à énergie maximale - sans pompage

Influence de l'équipement en groupes

	KD ³ /s	K/s	P _n /s (MW)
—	20,48	0,32	9,6
- · - ·	10,24	0,16	4,8
- - -	6,4	0,10	3

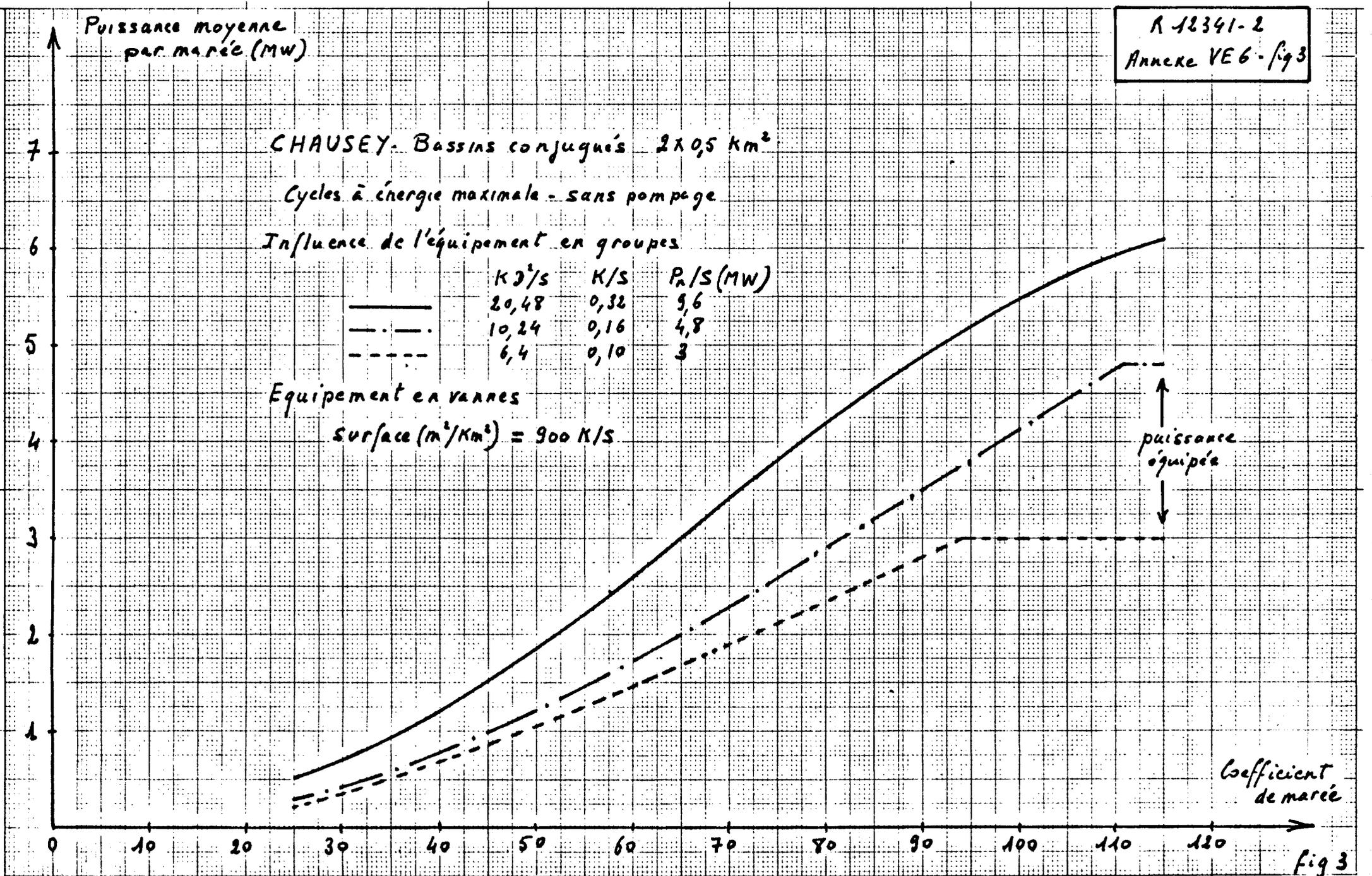
Equipement en vannes

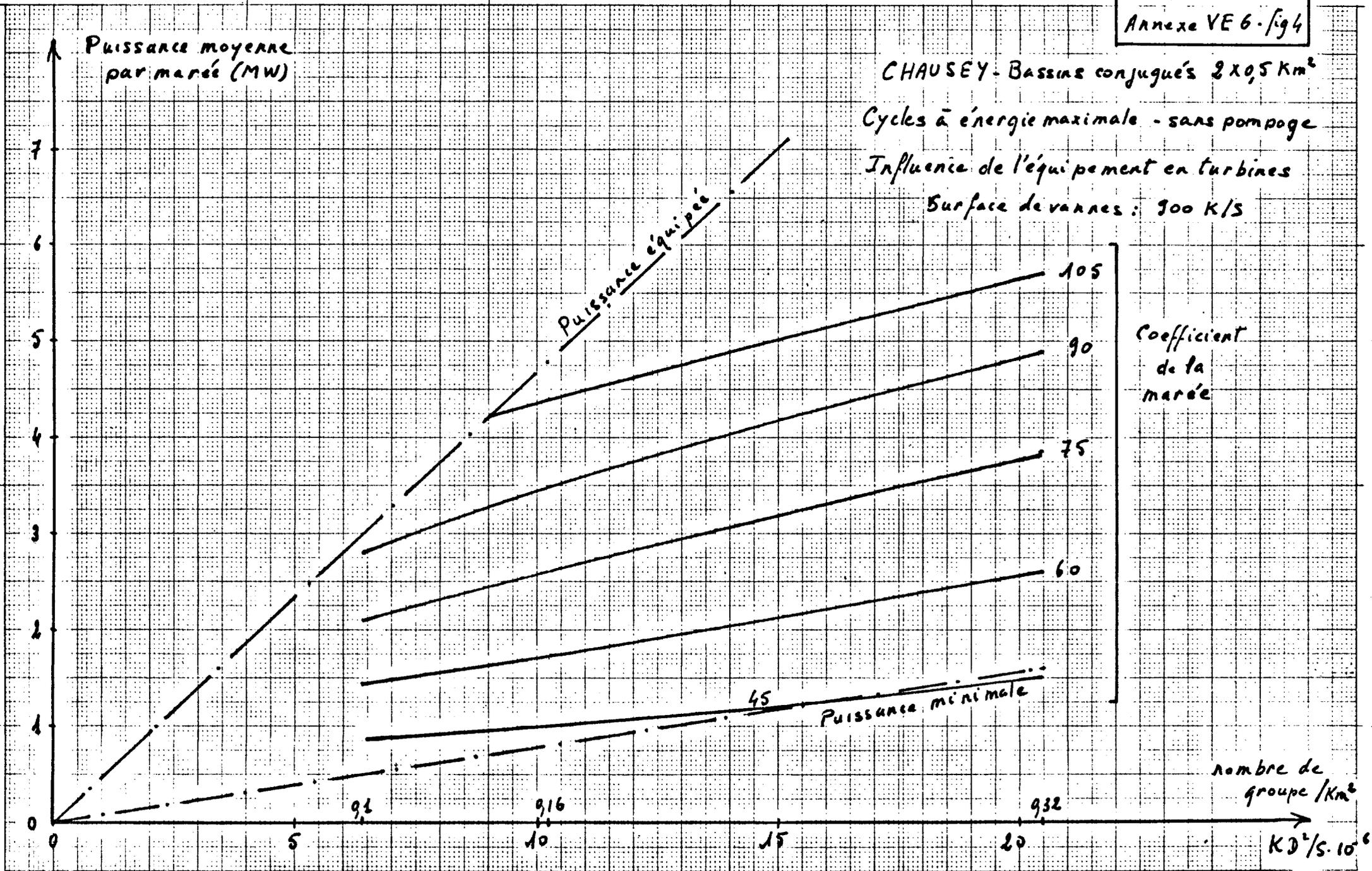
Surface (m²/km²) = 900 K/s

↑
puissance
équipée
↓

Coefficient
de marée

fig 3





R 12344-2
Annexe VEG - fig 5

CHAUSEY - Bassins conjugués. 2 X 0,5 Km²

Cycles à énergie maximale - sans pompage

Diagramme de fonctionnement dans la colline

Equipement turbines: $KD^2/S = 10,2$

$K/S = 0,16$

$P_u/S = 4,8 MW/Km^2$

Equipement vannes: largeur 10 m/Km²

Surface 140 m²/Km²

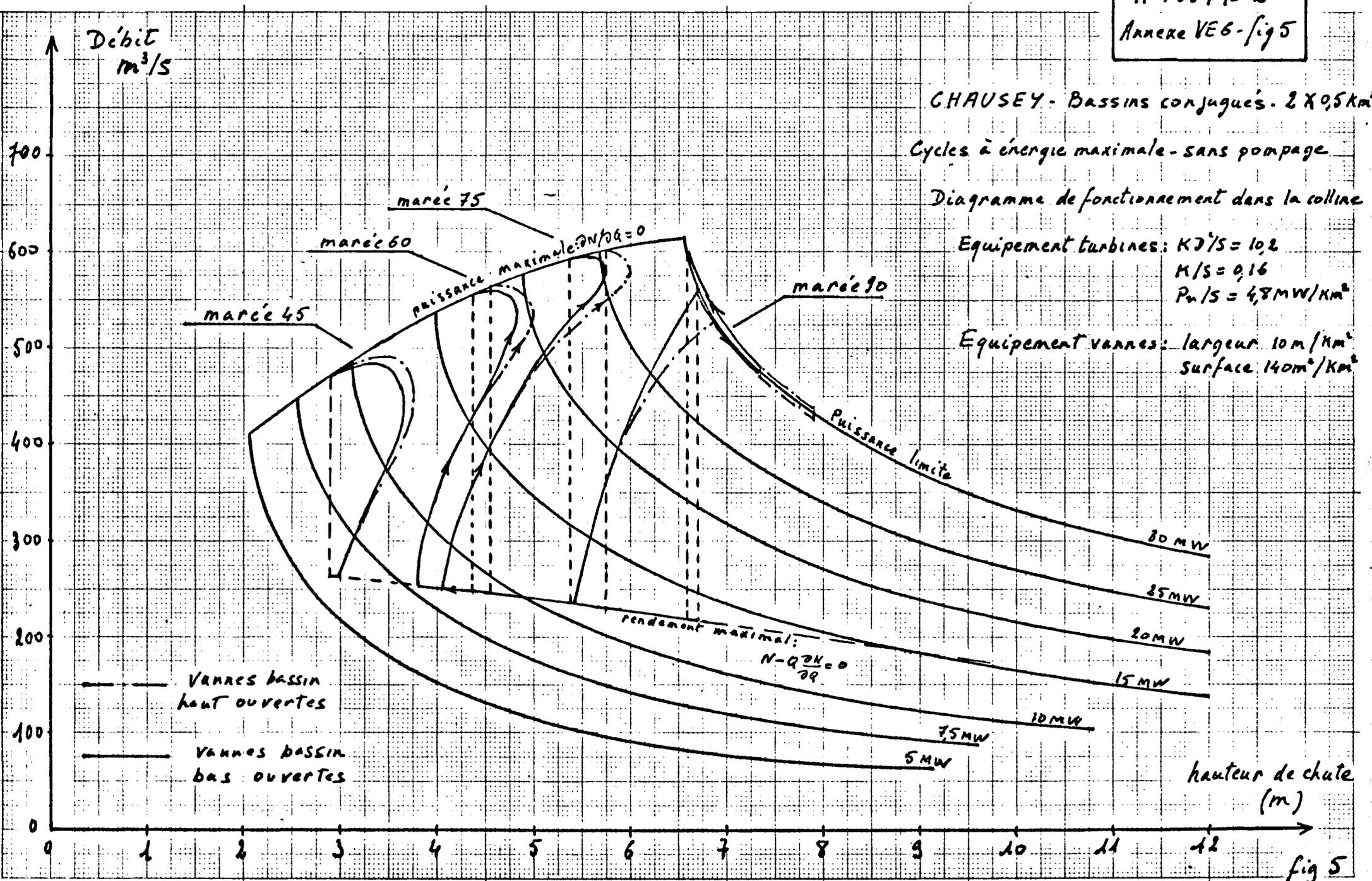


fig 5

R 12341-2
Annexe VE6 - fig 6

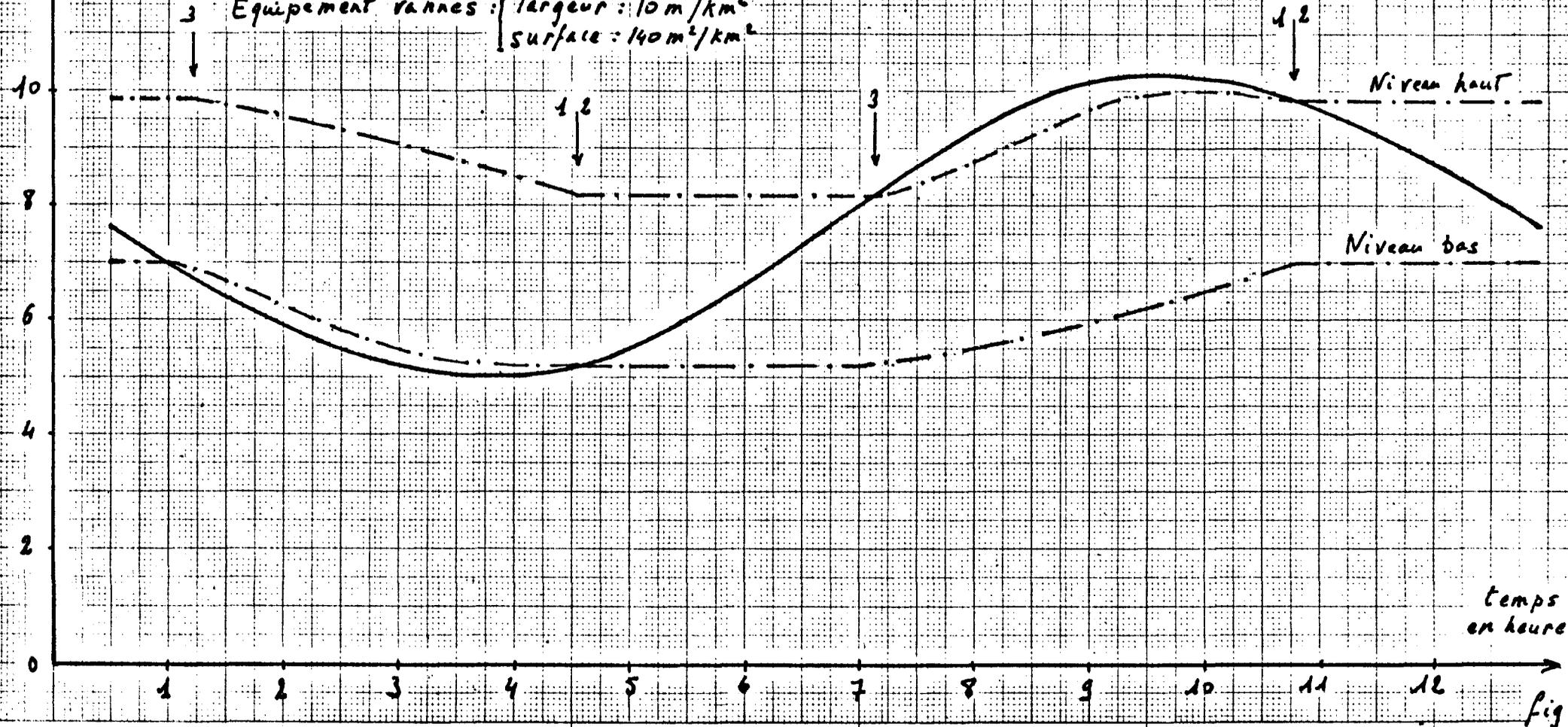
Cotes en mètres

CHAUSEY - Bassins conjugués - 2x0,5 km²

Cycles à énergie maximale - sans pompage - marée 45

Équipement turbines : $KD^3/s = 10,24$ - $K/s = 0,16$ - $P_n/s = 4,8$ MW/km²

Équipement vannes : largeur : 10 m/km²
surface : 140 m²/km²



R 12341-2
Annexe VE6 - Fig 7

Cotes en mètres

14

12

10

8

6

4

2

0

CHAUSEY - Bassins conjugués : $2 \times 0,5 \text{ km}^2$

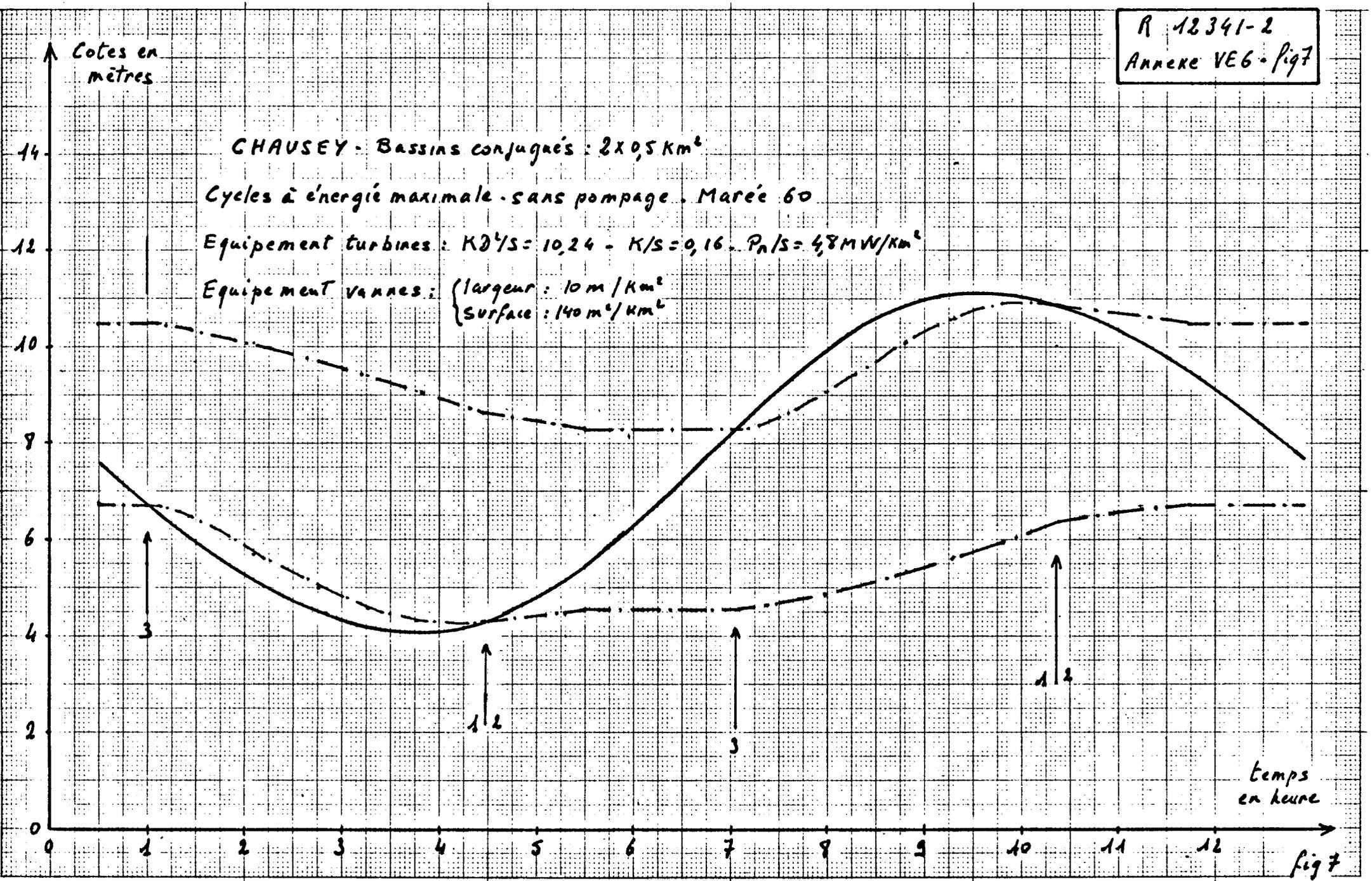
Cycles à énergie maximale - sans pompage - Marée 60

Equipement turbines : $KD^4/S = 10,24$ - $K/S = 0,16$ - $P_n/S = 4,8 \text{ MW/km}^2$

Equipement vannes : $\left\{ \begin{array}{l} \text{largeur : } 10 \text{ m/km}^2 \\ \text{surface : } 140 \text{ m}^2/\text{km}^2 \end{array} \right.$

Temps en heure

fig 7



R 12341-2
Annexe VE6 - fig 8

Cotes en mètres

CHAUSEY. - Bassins conjugués : 2 X 0,5 Km²

Cycles à énergie maximale - sans pompage - Marée 75

Equipement turbines : $KD^2/s = 10,24$ - $KID = 0,16$ - $P_n/s = 4,8 MW/Km^2$

Equipement vannes : $\left\{ \begin{array}{l} \text{largeur} : 10 m/Km^2 \\ \text{surface} : 140 m^2/Km^2 \end{array} \right.$

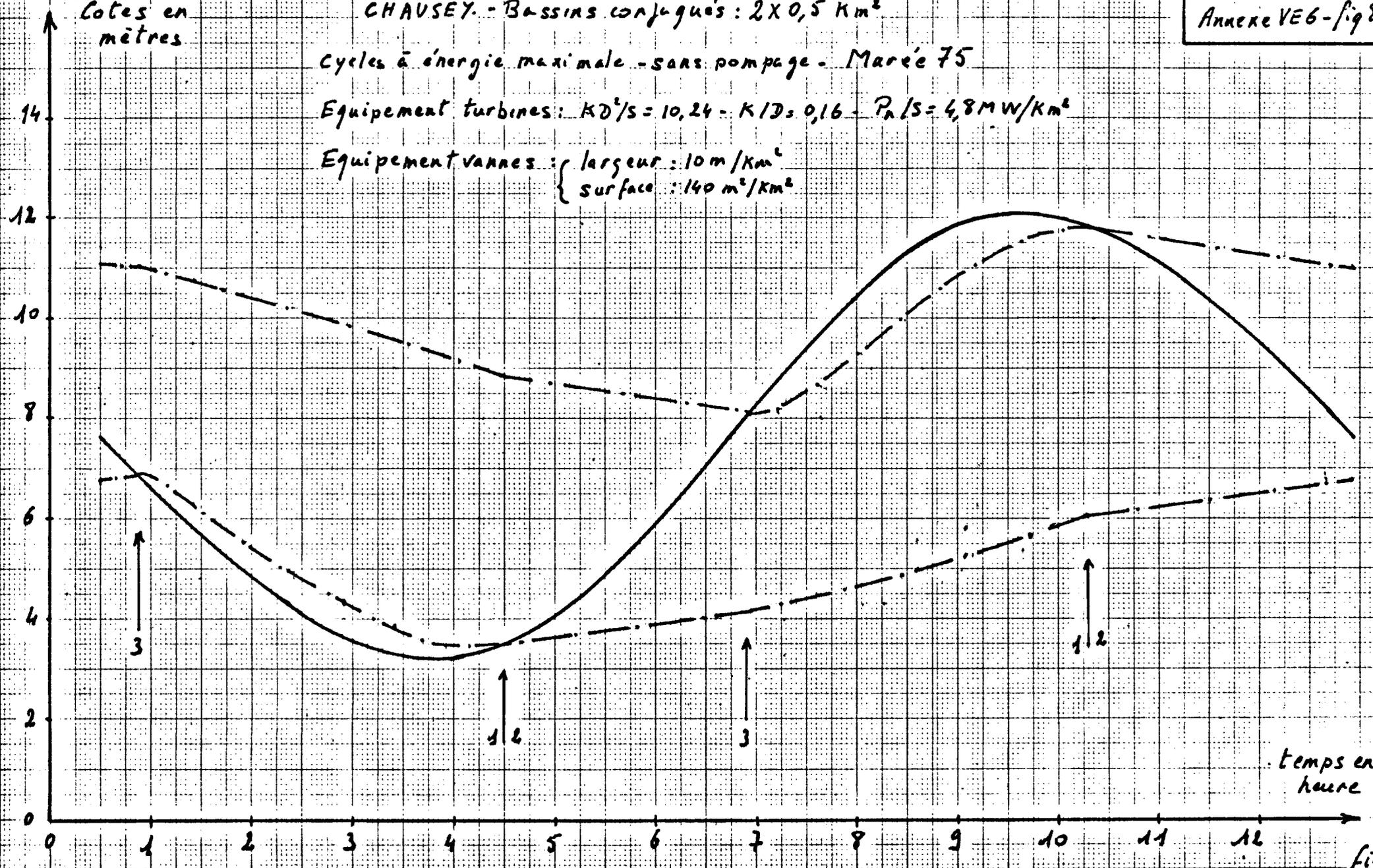


fig 8

R 12341-2
Annexe VE6 - fig 9

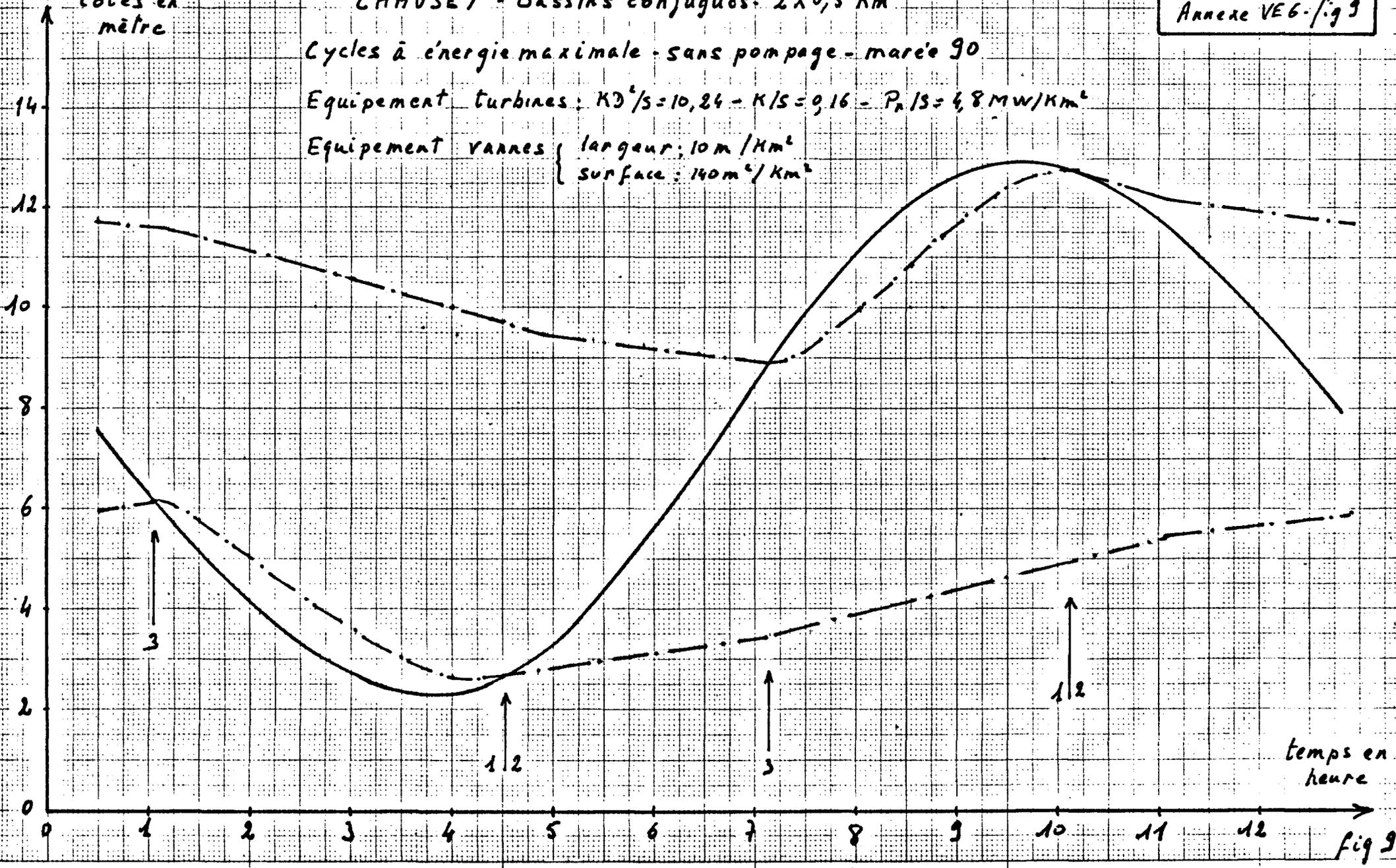
Cotes en
mètre

CHAUSEY - Bassins conjugués. $2 \times 0,5 \text{ Km}^2$

Cycles à énergie maximale - sans pompage - marée 90

Equipement turbines: $KD^2/s = 10,24 - K/s = 9,16 - P_n/s = 4,8 \text{ MW/Km}^2$

Equipement vannes { largeur: 10 m/Km^2
surface: $140 \text{ m}^2/\text{Km}^2$



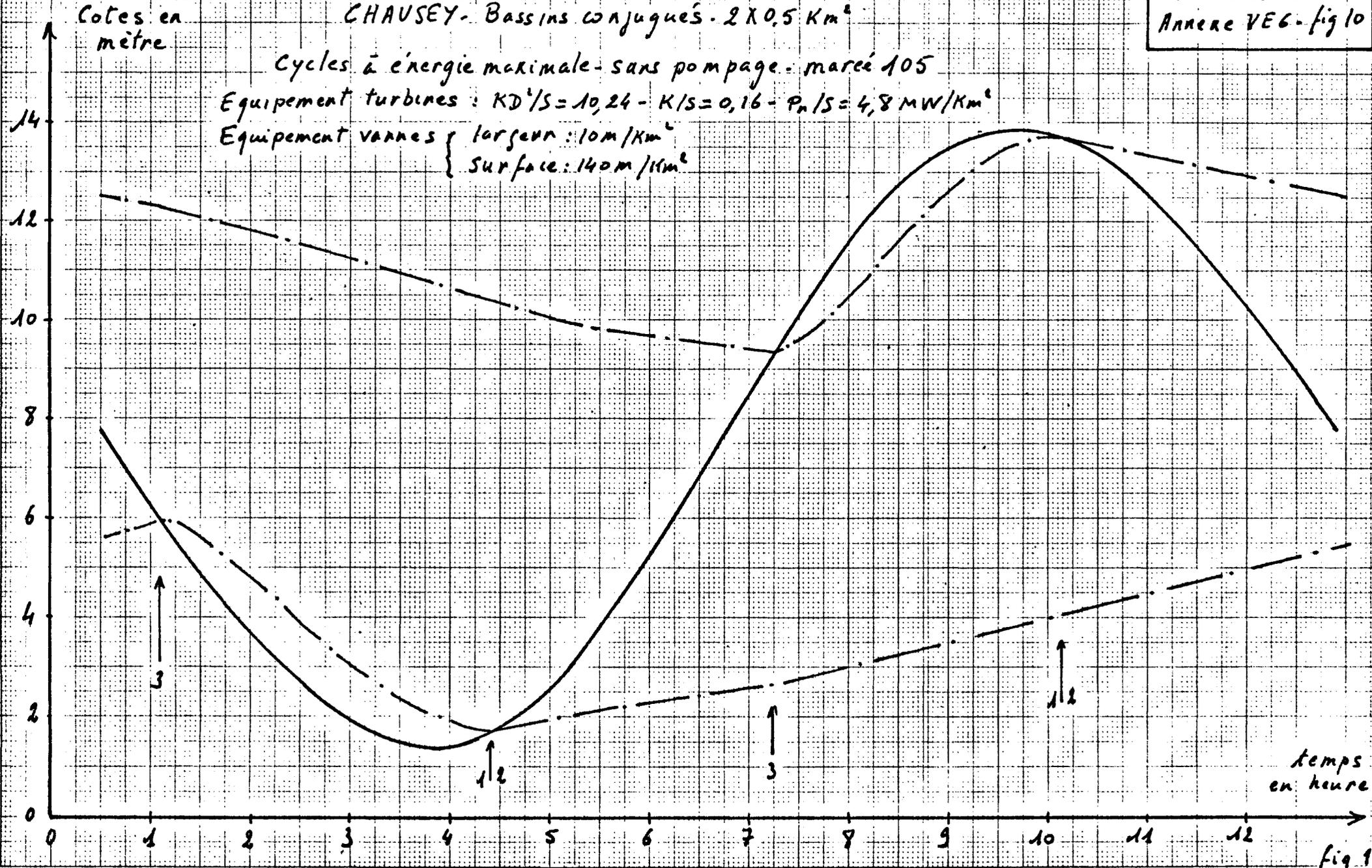
temps en
heure

fig 9

R 12341-2
Annexe VEG - fig 10

CHAUSEY - Bassins conjugués - 2 x 0,5 Km²

Cycles à énergie maximale - sans pompage - marée 105
Equipement turbines : $KD^2/S = 10,24$ - $K/S = 0,16$ - $P_n/S = 4,8$ MW/Km²
Equipement vannes { largeur : 10m/Km²
 { surface : 140m²/Km²



temps en heure

fig 10

Annexe VE 7

Centrales marémotrices

BASSINS CONJUGUES - CYCLES AVEC POMPAGE

Détermination de la puissance garantie maximale

A. PREISSMANN

1. GENERALITES

Dans les cycles sans pompage à puissance constante (garantie), l'évolution des niveaux résulte simplement de la résolution d'un système d'équations différentielles ; la loi $N = N_G = C_{ste}$ fait correspondre à chaque chute un débit déterminé.

Lorsqu'on prévoit des stations de pompage entre la mer et le bassin haut ou entre le bassin bas et la mer, ces stations ne fonctionneront qu'une partie du temps, lorsque la hauteur de refoulement est relativement faible ; le reste du temps le fonctionnement de l'usine sera exactement le même que dans les cycles sans pompage ; les équations différentielles à résoudre sont inchangées. Lorsqu'il y a pompage effectif le débit des turbines et des pompes n'est pas déterminé par la chute. La puissance nette fournie par l'installation résulte de la différence entre la puissance produite par les turbines (N_T) et la puissance absorbée par les pompes (N_p) ; c'est cette puissance qui doit être maintenue constante. Pour des niveaux du bassin haut (Z_1), du bassin bas (Z_2) et de la mer (Z_M) donnés, la relation

$$N_T(Z_1 - Z_2, Q_T) - N_p(Z_1 - Z_M, Q_p) = N_G$$

ou

$$N_T(z_1 - z_2, Q_T) - N_p(z_M - z_2, Q_p) = N_G$$

ne fournira qu'une relation entre le débit des turbines (Q_T) et le débit des pompes (Q_p).

La détermination au cours du pompage de Q_T et Q_p résulte d'un principe variationnel qui conduit à une équation différentielle supplémentaire. Le même principe variationnel permet de déduire les conditions de démarrage et d'arrêt du pompage.

2. EQUATION DIFFERENTIELLE DU POMPAGE

Rappelons d'abord les équations différentielles qui décrivent la partie du cycle pendant laquelle les pompes entre la mer et le bassin haut sont en fonction (lorsque les pompes entre le bassin bas et la mer sont en fonction les équations sont analogues).

On a :

$$S_1(Z_1) \dot{Z}_1 = - Q_T + Q_p$$

$$S_2(Z_2) \dot{Z}_2 = + Q_T$$

(La dérivée par rapport au temps est désignée par un point)

et la relation résultant de la puissance garantie :

$$N_T(Z_1 - Z_2, Q_T) - N_p(Z_1 - Z_M, Q_p) = N_G$$

(Nous avons supposé ici que, pendant le pompage, les vannes étaient fermées, nous examinerons plus loin les modifications à introduire dans le cas où les vannes resteraient ouvertes pendant une partie de la période de pompage).

Comme nous l'avons fait remarquer ces équations ne permettent pas de déterminer l'évolution des niveaux et des débits ; il manque une équation. Si l'on remplace dans la relation sur la puissance les débits Q_T et Q_p par leurs valeurs :

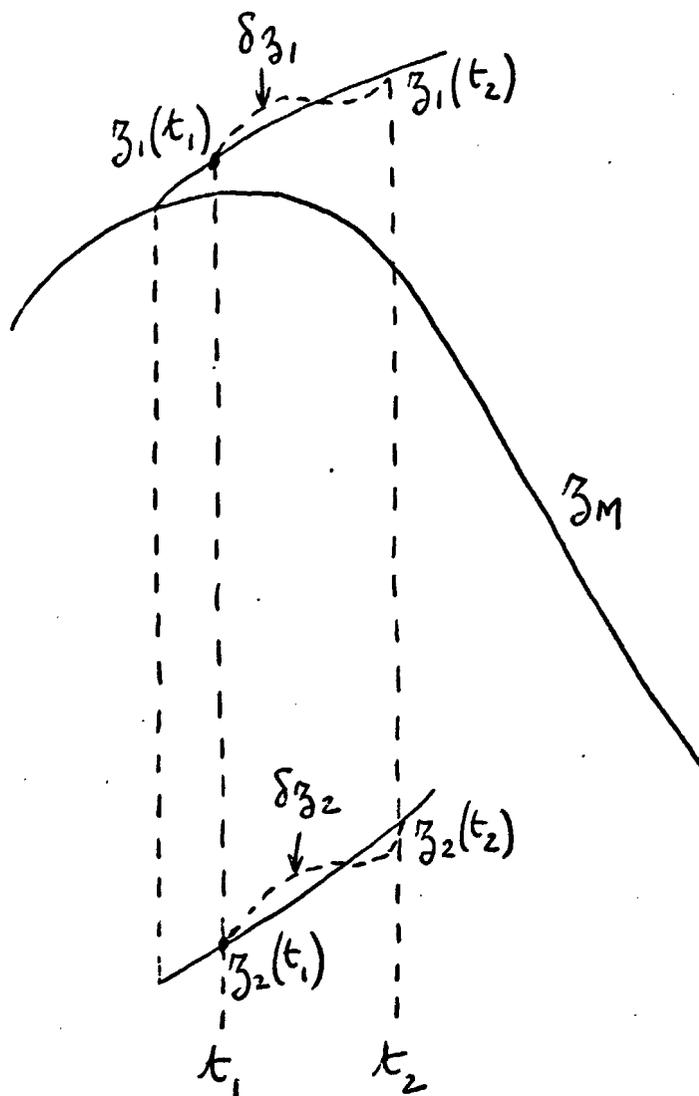
$$Q_T = S_2(Z_2) \dot{Z}_2$$

$$Q_p = S_2(Z_2) \dot{Z}_2 + S_1(Z_1) \dot{Z}_1$$

tirées des relations différentielles on trouve une relation de la forme :

$$f(Z_1, \dot{Z}_1, Z_2, \dot{Z}_2, t) = 0 \quad (1)$$

La relation (1) est une équation différentielle pour le niveau haut Z_1 quand on donne arbitrairement (dans certaines limites) l'évolution de Z_2 , au cours du temps (ce qui physiquement revient à donner l'évolution des débits turbinés).



Pour déterminer l'évolution de Z_2 au cours du temps nous utiliserons le principe variationnel suivant :

Soit $[t_1, t_2]$ un intervalle de temps et soit $Z_1(t_1)$, $Z_2(t_1)$ des niveaux de départ fixés, soit $Z_2(t_2)$ un niveau d'arrivée fixé ; à toutes les courbes d'évolution du niveau Z_2 partant de $Z_2(t_1)$ pour aboutir à $Z_2(t_2)$ correspondent des courbes d'évolution $Z_1(t)$ partant de $Z_1(t_1)$ et satisfaisant à l'équation différentielle (1). La courbe d'évolution de Z_2 retenue sera celle qui donnera pour $Z_1(t_2)$ la plus grande valeur possible.

Pour déterminer la courbe d'évolution $Z_2(t)$ satisfaisant à cette condition nous exprimerons que la variation $\delta Z_1(t_2)$ est nulle quelle que soit la variation $\delta Z_2(t)$ de l'évolution du niveau bas qui soit compatible avec les conditions limites $\delta Z_2(t_1) = \delta Z_2(t_2) = 0$.

On calculera d'abord la variation $\delta Z_1(t)$ résultant d'une variation donnée de $Z_2(t)$:

$$f'_{Z_1} \delta Z_1 + f''_{Z_1} \delta Z_1 + f'_{Z_2} \delta Z_2 + f''_{Z_2} \delta Z_2 = 0 \quad (2)$$

où f'_Z désigne la dérivée partielle $\frac{\partial f}{\partial z}$

L'équation aux variations (2) est linéaire ; si $\delta Z_2(t)$ est connu l'équation (2) s'intègre et donne $\delta Z_1(t)$ pour la condition initiale $\delta Z_1(t_1) = 0$

$$\delta Z_1(t) = e^{-\int_{t_1}^t A d\zeta} \int_{t_1}^t B(\zeta) e^{+\int_{t_1}^{\zeta} A d\zeta} dt \quad (3)$$

où $A = \frac{\dot{f}Z_1}{fZ_1}$

et $B = -\frac{\dot{f}Z_2}{fZ_1} \delta Z_2 - \frac{\dot{f}Z_2}{fZ_1} \delta \dot{Z}_2$

On retrouve un problème classique du calcul des variations : pour que le cheminement $Z_2(t)$ soit optimal il faut que $\delta Z_1(t_2)$ soit nul quelle que soit la fonction $\delta Z_2(t)$ entre t_1 et t_2 pourvu que $\delta Z_2(t_1) = \delta Z_2(t_2) = 0$

En procédant à une intégration par partie l'équation (3) donne pour $t = t_2$

$$\delta Z_1(t_2) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} A d\zeta} \left[\int_{t_1}^{t_2} \left\{ \frac{d}{dt} \left(e^{+\int_{t_1}^t A d\zeta} \frac{\dot{f}Z_2}{fZ_1} \right) - e^{+\int_{t_1}^t A d\zeta} \frac{\dot{f}Z_2}{fZ_1} \right\} \delta Z_2 dt - \left[e^{\int_{t_1}^t A d\zeta} \frac{\dot{f}Z_2}{fZ_1} \delta Z_2 \right]_{t_1}^{t_2} \right]$$

Le dernier terme est nul ($\delta Z_2(t_1) = \delta Z_2(t_2) = 0$)

Pour que $\delta Z_1(t_2)$ soit nul quelle que soit la fonction $Z_2(t)$ dans l'intervalle $[t_1, t_2]$ il faut donc que l'expression :

$$\frac{d}{dt} \left(e^{\int_{t_1}^t A d\zeta} \frac{\dot{f}Z_2}{fZ_1} \right) - e^{\int_{t_1}^t A d\zeta} \frac{\dot{f}Z_2}{fZ_1} \quad (4)$$

s'annule dans l'intervalle $[t_1, t_2]$.

Cette condition se simplifie ($A = \frac{\dot{fZ1}}{fZ1}$) et on trouve :

$$\frac{d}{dt} \left[\log \frac{\dot{fZ2}}{\dot{fZ1}} \right] = \frac{\dot{fZ2}}{fZ2} - \frac{\dot{fZ1}}{fZ1} \quad (5)$$

L'équation (5) est la relation supplémentaire qui nous manquait pour déterminer à chaque instant la puissance des turbines et des pompes. On remarquera que l'équation (5) fait intervenir non seulement les dérivées premières $Z1, Z2$ mais également les dérivées $\dot{Z1}, \dot{Z2}$ par rapport au temps, c'est-à-dire physiquement les dérivées des débits pompés et turbinés; par conséquent il ne sera possible d'intégrer le système d'équations différentielles décrivant le cycle de pompage que si l'on donne, au départ, la valeur des débits. Nous verrons dans le chapitre suivant dans quelle mesure il est possible de fixer le débit au moment du départ en pompage.

Si l'on remplace la fonction f par sa valeur :

$$f = N_T(Z1-Z2, S2(Z2)\dot{Z2}) - N_p(Z1-Z_M, S1(Z1)\dot{Z1} + S2(Z2)\dot{Z2}) - N_G = 0 \quad (6)$$

on obtient pour les diverses dérivées intervenant dans l'équation (5) :

$$\dot{fZ1} = \frac{\partial N_T}{\partial H_T} - \frac{\partial N_p}{\partial H_p} - \frac{\partial N_p}{\partial Q_p} \left(\frac{Q_p - Q_T}{S1} \right) \frac{dS1}{dZ1}$$

$$\dot{fZ2} = - \frac{\partial N_T}{\partial H_T} + \left(\frac{\partial N_T}{\partial Q_T} - \frac{\partial N_p}{\partial Q_p} \right) \frac{Q_T}{S2} \cdot \frac{dS2}{dZ2}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{fZ1} &= - S1 \frac{\partial N_p}{\partial Q_p} \\ \dot{fZ2} &= + S2 \left(\frac{\partial N_T}{\partial Q_T} - \frac{\partial N_p}{\partial Q_p} \right) \end{aligned} \right\} \frac{\dot{fZ2}}{fZ1} = - \frac{S2}{S1} \left[\frac{\frac{\partial N_T}{\partial Q_T} - \frac{\partial N_p}{\partial Q_p}}{\frac{\partial N_p}{\partial Q_p}} \right]$$

3. CONDITIONS AU DEMARRAGE ET A L'ARRET DES POMPES

Comme il a été remarqué plus haut il faut donner à l'instant initial du pompage la valeur du débit pompé. D'autre part il semble évident qu'il faut cesser de pomper à un certain moment. Pour obtenir des renseignements sur le débit de démarrage et sur l'instant d'arrêt du pompage, il convient d'utiliser le

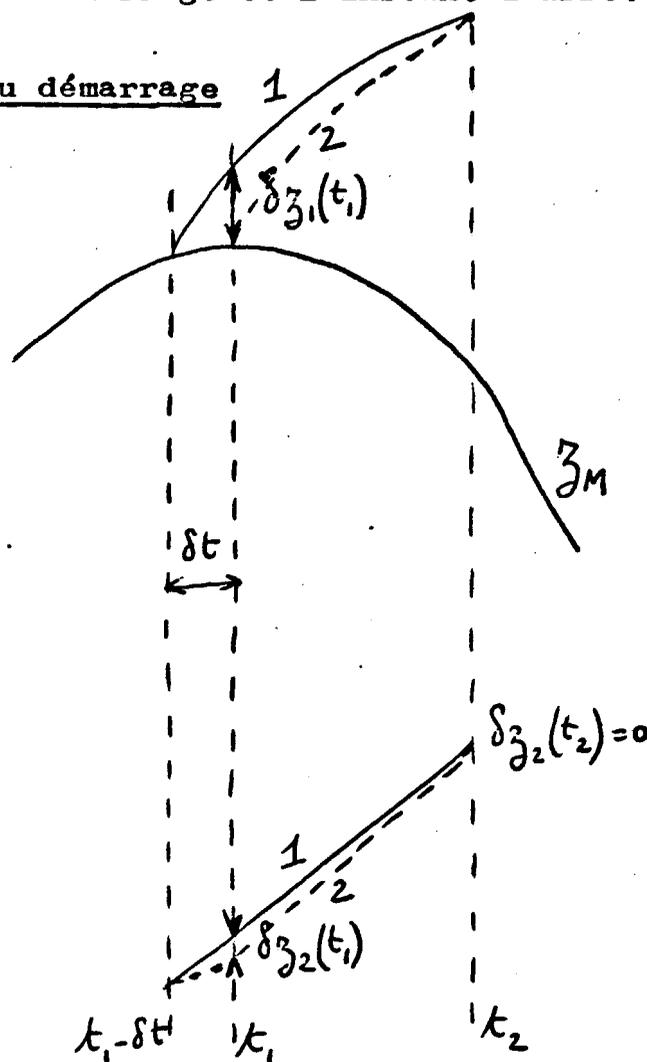
principe variationnel énoncé dans le paragraphe précédent.

Lorsque l'on n'impose plus des valeurs nulles pour les variations δZ_2 de Z_2 aux temps t_1 et t_2 et que de même $\delta Z_1(t_1)$ est donnée, on trouve pour la variation $\delta Z_1(t_2)$ autour d'une extrémale :

$$(6) \quad \delta Z_1(t_2) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \text{Adt}} \left[\delta Z_1(t_1) + \frac{f'_{Z_2}}{f'_{Z_1}} \delta Z_2(t_1) \right] - \frac{f'_{Z_2}}{f'_{Z_1}} \delta Z_2(t_2)$$

C'est de cette relation que nous nous servirons pour calculer le débit au démarrage et l'instant d'arrêt des pompes.

a/ Débit au démarrage



Pour déterminer le débit au démarrage il faut comparer deux cheminements qui diffèrent par l'instant de démarrage (la différence des temps de démarrage est δt), mais qui, au temps t_2 aboutissent au même niveau aval Z_2 ($\delta Z_2(t_2) = 0$)

Pendant le temps t le niveau amont s'est accru de

$$\frac{Q_p - Q_T}{S_1} \delta t \text{ sur le chemin 1}$$

et de

$$\dot{Z}_M \delta t \text{ sur le chemin 2}$$

Le niveau aval s'est accru de

$$\frac{Q_T \delta t}{S_2} \text{ sur le chemin 1}$$

$$\frac{Q_{T_0} \delta t}{S_2} \text{ sur le chemin 2}$$

où Q_{T_0} représente le débit turbine correspondant à la puissance garantie.

On aura donc :

$$\delta Z_1(t_1) = \left(\frac{Q_p - Q_T}{S_1} - \dot{Z}_M \right) \delta t$$

$$\delta Z_2(t_1) = \frac{Q_T - Q_{T_0}}{S_2} \delta t$$

Avec l'hypothèse $\delta Z_2(t_2) = 0$, la formule (6) donne :

$$\delta Z_1(t_2) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} A dt} \left[\left(\frac{Q_p - Q_T}{S_1} - \dot{Z}_M \right) + \frac{\dot{f}Z_2}{\dot{f}Z_1} \left(\frac{Q_T - Q_{T_0}}{S_2} \right) \right] \delta t$$

Si la quantité

$$\frac{Q_p - Q_T}{S_1} - \dot{Z}_M + \frac{\dot{f}Z_2}{\dot{f}Z_1} \left(\frac{Q_T - Q_{T_0}}{S_2} \right) \quad (7)$$

n'est pas nulle, cela signifie qu'on pourra, pour le même $Z_2(t_2)$ obtenir, en partant en pompage un peu plus tôt ou un peu plus tard ($\delta t < 0$ ou $\delta t > 0$) une valeur de $Z_1(t_2)$ plus élevée ($\delta Z_1(t_2) > 0$). Par conséquent, pour que l'on ne puisse pas améliorer le fonctionnement par un autre choix de l'instant de départ, il faut que la quantité (7) soit nulle.

En remplaçant $\frac{fZ2}{fZ1}$ par sa valeur cette condition s'écrit :

$$\frac{Q_p - Q_T - S_1 \dot{Z}_M}{Q_T - Q_{T_0}} = \frac{\frac{\partial N_T}{\partial Q_T} - \frac{\partial N_p}{\partial Q_p}}{\frac{\partial N_p}{\partial Q_p}} \quad (8)$$

La détermination de Q_p et de Q_T s'effectue comme suit : au moment où l'on démarre en pompage on connaît $Z_1, Z_2, Z_M, \dot{Z}_M, S_1(Z_1), S_2(Z_2)$; Q_{T_0} se calcule en résolvant l'équation

$$N_T(Z_1 - Z_2, Q_{T_0}) = N_G$$

Il ne reste plus, comme inconnues que Q_p et Q_T qui doivent satisfaire à l'équation (8) et à la condition sur la puissance nette

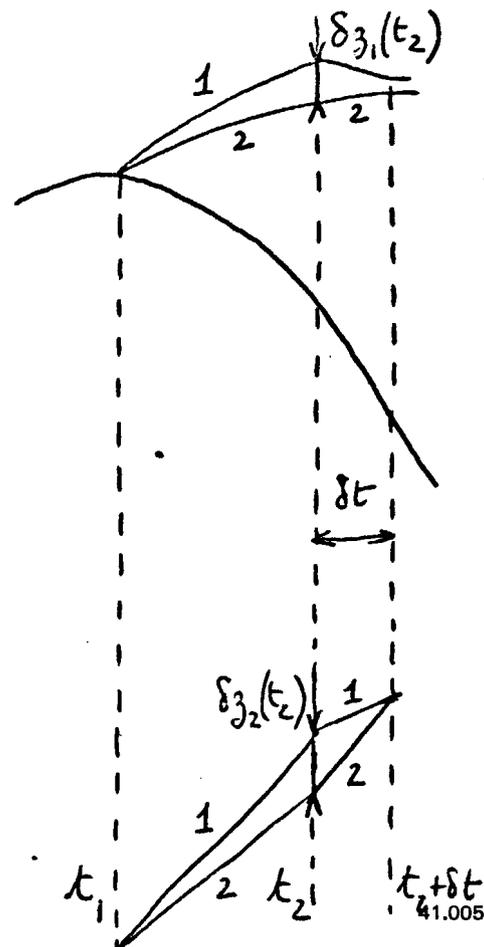
$$N_T(Z_1 - Z_2, Q_T) - N_p(Z_1 - Z_M, Q_p) = N_G$$

Ces deux conditions permettent de déterminer Q_p et Q_T .

On remarquera que l'instant de démarrage des pompes n'est pas déterminé, mais qu'à chaque instant de départ correspondent des débits des pompes et des turbines bien déterminés.

b/ Instant d'arrêt des pompes

Pour déterminer l'instant d'arrêt des pompes on considère deux évolutions voisines des niveaux Z_1 et Z_2 satisfaisant à l'équation (5) et partant des mêmes niveaux au temps t_1 (voir la figure). A l'instant t_2 les niveaux haut et bas pour le chemin 1 sont plus hauts de $\delta z_1(t_2)$ et $\delta z_2(t_2)$ que sur le chemin 2. A l'instant t_2 le pompage cesse sur le chemin 1 alors qu'il continue sur le chemin 2 ; après un intervalle de temps δt les niveaux bas des chemins 1 et 2 se rejoignent.



On examine alors les niveaux hauts (au temps $t_2 + \delta t$). Si ce niveau pour le chemin 1 est plus haut que pour le chemin 2 on aurait eu intérêt à cesser le pompage plus tôt, dans le cas contraire on a intérêt à continuer le pompage au-delà de t_2 .

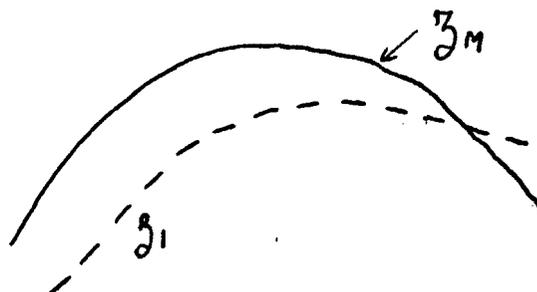
C'est lorsque les niveaux hauts sont les mêmes sur les deux chemins au temps $t_2 + \delta t$ qu'il faut arrêter le pompage.

En exprimant cette condition à l'aide de la relation (6) (où $Z_1(t)$ est nul) et en procédant de façon analogue à l'examen des conditions de départ, on arrive à la condition de l'arrêt des pompes :

$$\frac{Q_p - Q_T + Q_{T_0}}{Q_T - Q_{T_0}} = \frac{\frac{\partial N_T}{\partial Q_T} - \frac{\partial N_p}{\partial Q_p}}{\frac{\partial N_p}{\partial Q_p}} \quad (9)$$

4. REMARQUES SUR LA PRISE EN COMPTE DES VANNES

Dans ce qui précède, la perte de charge des vannes a été négligée. Examinons quelles sont les modifications à apporter si l'on tient compte d'une différence entre le niveau Z_M de la mer et le niveau Z_1 du bassin haut.



a/ Equations différentielles du pompage

Dès que le niveau du bassin haut dépasse le niveau de la mer, les vannes sont fermées et l'équation (5) est valable sans modification ; mais on se rend compte qu'on a intérêt à commencer à pomper lorsque le niveau Z_1 est inférieur au niveau de la mer Z_M . Pendant une partie du pompage la hauteur de refoulement $Z_1 - Z_M$ sera négative et il faudra définir la colline des pompes pour des hauteurs de refoulement négatives ; mais, en outre il apparaît qu'il n'est pas judicieux de fermer les vannes avant que Z_1 ne dépasse Z_M . Pendant la première phase du pompage ($Z_M > Z_1$) la façon la plus simple de traiter le problème semble être d'inclure le débit vanné (dépendant essentiellement de $Z_M - Z_1$) dans la colline des pompes ; avec cette colline modifiée, l'équation (5) reste valable. Dans le traitement numérique il faudra tenir compte du fait que la colline modifiée présente des discontinuités de la dérivée.

b/ Condition de démarrage

L'équation (8) doit être modifiée de la façon suivante :

- \dot{Z}_M doit être remplacé par la dérivée par rapport au temps de Z_1 quand on travaille sans pompage
- la colline des pompes est la colline modifiée par inclusion du débit vanné

c/ Condition d'arrêt

Les vannes étant fermées au moment de l'arrêt des pompes aucune modification de la condition n'est à prévoir.

oOo

Contrat CNEOX 74/1131

Annexe VE 8

-

Aménagement marémoteur CHAUSEY

-

Caractéristiques comparées d'aménagements
à bassin unique et à bassins conjugués

Rapport partiel CHAUSEY 74-12

Avril 1975

J.P. HUFFENUS

Le but de cette courte note est d'essayer de situer quelques types d'aménagements marémoteurs possibles en baie de Chausey en les comparant entre eux et avec une usine nucléaire de référence. Un tel objectif peut paraître a priori démesuré car notre connaissance est actuellement très insuffisante sur nombre d'éléments très importants qui peuvent intervenir dans ce genre de comparaison, tels que :

- . critères de valorisation de l'énergie à l'horizon 1990, existence ou non de "pointes" de consommation, politique suivie en matière de consommation d'énergie, parc de centrales existant en 90 ...
- . poids des nuisances objectives ou subjectives du point de vue environnement
- . contribution des aménagements non énergétiques associés (buts multiples)
- . détail des coûts des aménagements pour divers projets optimisés utilisant chaque type de techniques marémotrices que nous voulons comparer entre elles
- . etc ...

Il nous a cependant semblé utile de ne pas attendre une définition complète du problème pour essayer déjà de dégager quelques faits saillants qui permettent d'y voir plus clair, même si l'on est obligé prudemment d'émettre toute conclusion avec quelque réserve.

Nous nous attacherons donc ici à la comparaison des aménagements à bassin unique et à bassins conjugués en prenant en compte les seuls facteurs suivants :

1. Productibilité annuelle
2. "Qualité" des kWh produits
3. Investissement correspondant (poids respectif des digues, vannes et groupes)

Ceci pour des aménagements non identifiés sur lesquels on a simplement supposé qu'ils étaient de grande taille et que l'on pouvait malgré tout considérer un instant comme négligeable le remous extérieur.

1. DEFINITION DES CARACTERISTIQUES

1.1 Caractéristiques physiques

L'aménagement considéré comporte :

- . une longueur L de digues mortes
- . une surface \mathcal{V} de vannes

- k groupes caractérisés par un diamètre de roue D et une puissance nominale de l'alternateur P_n

La puissance nominale totale de l'aménagement sera donc

$$P_n = k p_n$$

Comme nos réflexions portent sur des projets non identifiés, nous rapporterons toutes ces grandeurs à la surface totale de bassin S (dans le cas des bassins conjugués S est la somme des surfaces des deux plans d'eau S_1 et S_2).

1.2 Caractéristiques énergétiques

La production \int d'une telle usine est une "grandeur" que peuvent expliciter plusieurs concepts scalaires ou vectoriels. Nous utiliserons parmi ceux-ci :

- la courbe des puissances classées (donnant le pourcentage de temps dans l'année durant lequel on peut disposer d'une puissance égale ou supérieure à une puissance P donnée)
- la puissance moyenne annuelle :

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T P dt \quad \text{avec } T = 1 \text{ an (8760 heures)}$$

- la puissance garantie P_G avec la disponibilité δ

On doit en effet toujours associer le terme puissance garantie avec l'indication d'une certaine disponibilité, car $\delta = 100\%$ donnerait automatiquement $P_G = 0$ si la production venait à être interrompue une seconde dans le courant de l'année.

Deux définitions seront utilisées :

1ère définition

On appelle disponibilité δ_1 d'une puissance P_{G1} donnée le temps pendant lequel l'usine peut fournir une puissance égale ou supérieure à P_{G1} , temps rapporté au temps total (1 an). D'après cette définition δ_1 se lit directement sur la courbe des puissances classées en regard du niveau de puissance P_{G1} .

2ème définition

La définition précédente présente l'inconvénient de ne pas prendre en compte du tout les fonctionnements à puissance réduite. On peut donc imaginer une définition plus large qui paraît être la définition la plus couramment utilisée

et la plus logique :

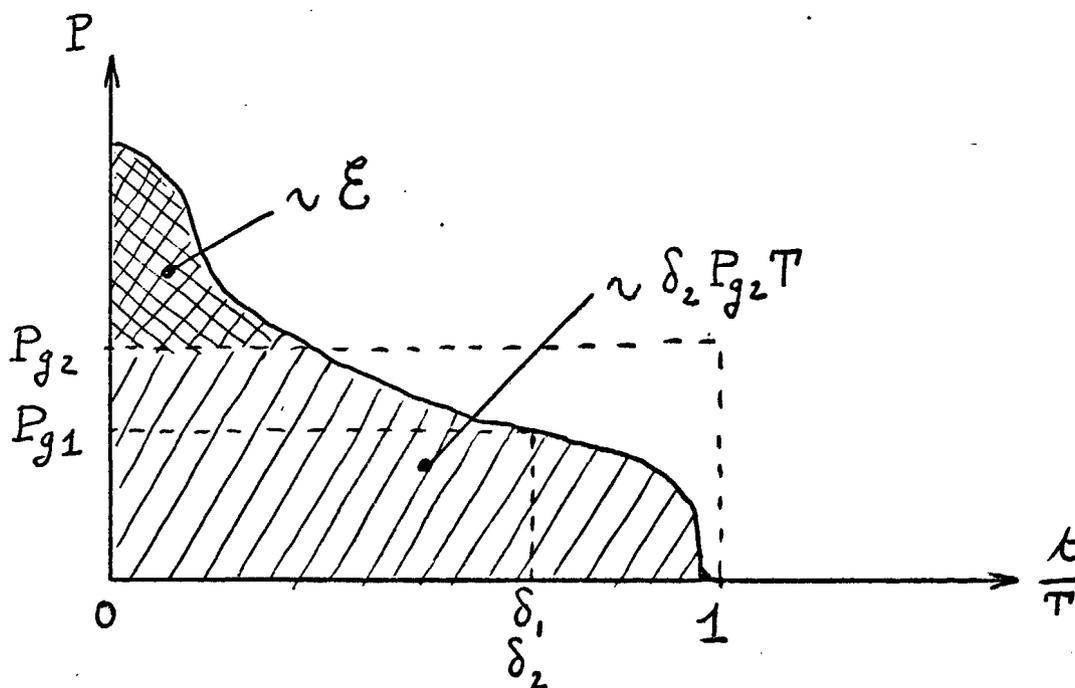
On appelle disponibilité δ_2 d'une puissance garantie P_{g2} donnée l'énergie totale annuelle que peut fournir l'équipement si l'on plafonne la puissance à P_{g2} , énergie rapportée à celle que fournirait la puissance P_{g2} continue durant un an :

$$\delta_2 = \frac{\int_0^T P(\text{pour } P \leq P_{g2}) dt}{P_{g2} T}$$

Cette définition plus complexe prend ainsi en considération tous les apports d'énergie qui peuvent passer dans le cadre de la puissance plafond P_{g2} . On définira alors une énergie excédentaire ou sauvage

$$\mathcal{E} = \int_0^T (P - P_{g2}) dt \text{ lorsque } P > P_{g2}$$

La figure ci-dessous montre sur un exemple de courbe de puissance classée à quoi correspondent les définitions ci-dessus.



En réalité, dans l'usine nucléaire de référence, la puissance garantie est égale à la puissance nominale et la disponibilité selon les statistiques les plus récentes ressort environ à 70 % (légèrement optimiste).

- Une autre "composante" importante de la production \mathcal{P} est la fréquence et la durée moyenne de l'indisponibilité. Par ailleurs on peut distinguer dans les indisponibilités un pourcentage plus ou moins grand d'indisponibilités prévisibles ou au contraire totalement aléatoires.

Pour une centrale nucléaire, la durée moyenne de l'indisponibilité est relativement importante, l'unité étant la semaine ou le mois. Les indisponibilités prévisibles (rechargement en combustible = 1 mois d'arrêt) ne forment qu'une partie mineure de l'indisponibilité totale (entre le tiers et la moitié).

On trouvera par contre en usine marémotrice la prédominance du caractère relativement inéluctable de l'indisponibilité partielle en mortes eaux.

- Enfin un dernier élément de \mathcal{P} nous paraît encore important à souligner. Il s'agit de la souplesse d'utilisation qui peut être définie comme la faculté que l'on peut avoir de déplacer dans le temps l'indisponibilité totale ou partielle d'un aménagement donné.

1.3 Caractéristiques de l'investissement

L'investissement \mathcal{F} à réaliser se compose très schématiquement de la somme : digues mortes, vannes, groupes, en incluant dans vannes tout le génie civil et la mécanique qui est relative à l'existence des vannes, et en incluant dans groupes tout le génie civil, la mécanique et l'électricité qui s'y rapportent.

Nous admettrons de façon très sommaire que les composantes de ces différents termes sont :

- pour les digues mortes la longueur L
- pour les vannes la surface \mathcal{V}
- pour les groupes génie civil et mécanique le paramètre kD^2
- pour la partie électrique la puissance nominale P_n

On pourra ainsi écrire :

$$\mathcal{F} = \mathcal{F}_1(L) + \mathcal{F}_2(\mathcal{V}) + \mathcal{F}_3(kD^2) + \mathcal{F}_4(P_n)$$

Nous admettrons de plus pour simplifier que L est en gros proportionnel à \sqrt{S} .

Ces définitions ou hypothèses étant précisées, nous allons maintenant examiner l'un après l'autre les deux types d'aménagement marémoteur bassin unique et bassins conjugués.

2. AMENAGEMENT A BASSIN UNIQUE

Pour estimer les possibilités offertes par un aménagement à bassin unique, nous nous sommes basés sur deux séries de calculs relatifs à des cycles à énergie maximum avec pompage en simple ou double effet.

- a. Une première série de calculs effectués sur un ancien projet Chausey (1959) comportant une digue Pointe du Grouin-Granville disposé en arc de cercle centré sur le Mont St-Michel. L'essentiel des résultats est donné en annexe I.
- b. Une seconde série de calculs effectués très récemment (1973-74) sur le projet "A San" en Corée du Sud. L'essentiel des résultats est donné dans les annexes II et III.

Les calculs a et b présentent l'un et l'autre l'avantage de porter sur des sites où la surface du bassin ne varie pas trop avec la cote. On peut ainsi en tirer des chiffres à peu près significatifs par km^2 de bassin exploitable pour un aménagement Chausey assez grand (500 à 2000 km^2) dont les frontières ne sont pas encore définies.

Sur la figure 1, on a porté en fonction de la taille de l'équipement (caractérisée soit par le paramètre génie civil et mécanique kD^2/S , soit par la puissance nominale électrique totale installée par km^2 de bassin P_n/S) la puissance annuelle moyenne par km^2 \bar{P}/S .

Les chiffres "A San" des annexes II et III ont été convertis en valeur Chausey en multipliant toutes les puissances (aussi bien moyenne que nominale) par le carré du rapport des amplitudes des marées quadratiques moyennes.

$$\left(\frac{P}{S}\right)_{\text{Chausey}} = \left(\frac{8,45 \text{ m}}{6,55 \text{ m}}\right)^2 \left(\frac{P}{S}\right)_{\text{A San}} = 1,67 \left(\frac{P}{S}\right)_{\text{A San}}$$

L'amplitude 8,45 m (comme d'ailleurs l'amplitude 6,55 m en Corée) est calculée sans tenir compte du remous causé par la présence des digues et de l'usine ; les courbes de fréquence de marée à Chausey montrent que la marée quadratique moyenne est de coefficient 73, d'où le chiffre de 8,45 m basé sur les relevés Chausey ou St Malo et non Granville ou Cancale qui donneraient plutôt 9 m.

Sur la figure 1, nous avons de plus reporté le point moyen "Rance" pour une surface fictive moyenne de bassin $S = 12 \text{ km}^2$ (à la cote + 7 m).

$$P_n = 240 \text{ MW} \quad kD^2 = 685 \text{ m}^2 \quad \mathcal{V} = 900 \text{ m}^2 \quad \bar{P} \approx 60 \text{ MW}$$

$$\frac{P_n}{S} = 20 \text{ MW/km}^2 \quad \frac{kD^2}{S} = 57 \cdot 10^{-6} \quad \mathcal{V} = 75 \cdot 10^{-6} \quad \frac{\bar{P}}{S} = 5 \text{ MW/km}^2$$

Les points reportés sur les graphiques figure 1 forment une zone relativement large pour plusieurs raisons :

- a/ l'extrapolation des résultats A San à Chausey en multipliant toutes les puissances par le carré des amplitudes ne donne qu'une toute première approximation
- b/ sur les courbes $\bar{P}/S = f(kD^2/S)$, on a en toute rigueur une graduation en P_n/S et inversement sur $\bar{P}/S = f'(P_n/S)$ on a une graduation en kD^2/S . Il n'y a donc pas une courbe mais une plage admettant des valeurs associées raisonnables de l'autre paramètre
- c/ De même la valeur nD caractéristique de la roue est un facteur qui joue un rôle a priori non négligeable et il faut supposer que l'on s'est placé là dans des circonstances réalistes et plus ou moins optimisées
- d/ Enfin la colline de base utilisée pour ces calculs est la colline modèle Rance qui fait état de performances moins bonnes que la colline utilisée plus loin dans les calculs avec bassins conjugués (note Chausey 74-4).

En ce qui concerne le point a/ une extrapolation rigoureuse a été conduite et se trouve rapportée dans l'annexe 4, les points correspondants étant portés figure 1 avec un signe distinctif.

La première conclusion qui peut être tirée des courbes figure 1 est que si l'on vise essentiellement comme but la production du maximum d'énergie, il faut consentir un équipement particulièrement important. La littérature semble retenir comme une sorte d'optimum les conditions suivantes :

$$\frac{kD^2}{S} \simeq 40 \cdot 10^{-6} \quad \frac{P_n}{S} = 16 \text{ MW/km}^2 \quad \frac{v}{S} = 50 \cdot 10^{-6}$$

qui aboutit à une productivité

$$\frac{\bar{P}}{S} = 4,7 \text{ MW/km}^2 \text{ (ou } 41 \text{ GWh/an km}^2\text{)}$$

On peut rapprocher ce dernier chiffre de "l'énergie naturelle" que l'on pourrait tirer de la marée avec un équipement infini de rendement unité :

$$\frac{\bar{P}}{S} = 80 A_{100}^2 = 10,8 \text{ MW/km}^2$$

Bien entendu, plus l'équipement est important, plus on se rapproche de cette puissance "naturelle" (pour des cycles à énergie maximum) avec des fonctionnements de plus en plus intermittents à raison par exemple de 6 ou 7 heures par jour à pleine puissance avec très peu de fourniture d'énergie en

dehors de ces périodes intensives.

Dans la situation "optimum" ci-dessus, le temps de fonctionnement ne dépasse guère 2500 heures par an. La courbe des puissances classées se rapproche d'un rectangle puisque l'on fournit pratiquement la seule puissance nominale sur 29 % du temps et zéro durant les 71 % restants.

Avec les définitions 1 et 2 la puissance garantie est donc de 16 MW/km² avec une disponibilité 0,29 et si l'on recherche une disponibilité plus grande, cette puissance tombe à zéro, ce qui veut dire qu'il ne faut plus alors chercher à maximiser l'énergie produite, mais à étaler la production ce qui conduirait à des cycles de nature différente avec des performances énergétiques plus faibles.

En ce qui concerne les caractéristiques de l'indisponibilité, on peut dire tout d'abord que celle-ci est de fréquence élevée, les périodes d'arrêt et de fonctionnement se succédant au rythme de quelques heures. Lors des marées de mortes eaux, les périodes de fonctionnement sont encore raccourcies au bénéfice des périodes d'arrêt.

De plus, les moments d'indisponibilité sont pratiquement planifiables et chose plus grave difficilement décalables dans le temps sans une perte d'énergie notable car l'heure de la marée commande et l'on ne peut attendre pour en profiter.

Ainsi la majorité de l'énergie produite (marées de vives eaux) sera par exemple disponible vers 13 h et vers 1 h du matin pour les cycles simple effet, les cycles à double effet améliorant un peu les choses puisque l'on a alors 4 zones de fonctionnement par jour centrées en vives eaux autour de 6 h, 12 h, 18 h et minuit.

Si donc on admet un instant les deux postulats suivants (qui n'ont rien d'évident mais qu'il ne nous appartient pas de discuter ici) :

- la politique de consommation d'énergie (tarifs) permet à l'horizon 90 "d'effacer" complètement les pointes
- le combustible des usines nucléaires présentes en majorité à cette époque ne coûte rien (surégénérateurs)

on conçoit que ce genre d'usine à bassin unique soit peu attrayant et qu'on s'interroge sur d'autres modes d'utilisation de l'énergie marémotrice. Nous regardons donc maintenant un type de fonctionnement diamétralement opposé puisqu'au lieu de produire de façon discontinue une énergie maximum, on va se proposer de fournir une puissance la plus continue possible.

3. AMENAGEMENT A BASSINS CONJUGUES

La continuité de la puissance fournie est impossible à réaliser avec un bassin unique et nécessite le recours à un aménagement à deux bassins associés ou conjugués. Nous regarderons ici le cas des bassins conjugués sans pompage fonctionnant selon un cycle qui permet de libérer une puissance constante durant toute la durée d'une marée. Cette puissance est bien entendu différente entre deux marées de coefficients différents et varie grossièrement comme le carré de l'amplitude. Par ailleurs nous supposons pour l'instant qu'il n'y a pratiquement pas de limitation due à la puissance de l'alternateur.

Sur ces bases, en exploitant les résultats présentés dans la note Chausey 74-11, on peut dégager les caractéristiques "optimales" suivantes :

Equipement

$$k = 0,16 \text{ groupe/km}^2$$

Groupes ϕ 8 m - 62,5 t/mn - Colline note Chausey 74-4

$$P_n = 30 \text{ MW}$$

2 x 3,75 m/km² de largeur de vannes à surface libre implantées

- . à - 2 m pour le bassin haut
- . à - 10 m pour le bassin bas

soit une surface moyenne $\mathcal{V} = 100 \text{ m}^2/\text{km}^2$

D'où l'on déduit :

$$\frac{kD^2}{S} = 10,2 \cdot 10^{-6} \quad \frac{P_n}{S} = 4,8 \text{ MW/km}^2 \quad \frac{\mathcal{V}}{S} = 100 \cdot 10^{-6}$$

Production

$P \# 3,8 \left(\frac{C_m}{100}\right)^2$ en MW/km² pour une marée de coefficient C_m

Puissance moyenne annuelle :

$$\frac{\bar{P}}{S} = 2,1 \text{ MW/km}^2$$

Puissances garanties à 70 % :

$$\frac{P_{G1}}{S} = 1,3 \text{ MW/km}^2 \text{ (figure 2a)}$$

$$\frac{P_{G2}}{S} = 2,5 \text{ MW/km}^2$$

Ces deux puissances garanties s'entendent selon les définitions données en 1.2. Elles correspondent aux coefficients de marée suivants :

- pour P_{G1} , coefficient marée = 57,5
- pour P_{G2} , coefficient marée = 80,5

En réalité, si on donnait aux alternateurs une puissance plus faible, les deux puissances garanties ci-dessus ne seraient pas affectées. Par contre la puissance moyenne chuterait sensiblement. Ainsi en allant à l'extrême, si on diminue P_n pour l'amener à P_{G2} , on a alors $\bar{P} = 0,7 P_n$:

$$\frac{P_n}{S} = 2,5 \text{ MW/km}^2$$

$$\frac{\bar{P}}{S} = 1,75 \text{ MW/km}^2$$

On a donc une perte d'énergie de l'ordre de 15 % pour une diminution de moitié de l'équipement électrique ($P_n = 15 \text{ MW}$).

On peut penser à réaliser une puissance garantie P_{G2} du même ordre en diminuant à la fois la puissance unitaire alternateur et le nombre de groupes. Avec toujours le même vannage (dont on notera l'importance au passage par rapport à celui qui a été admis en bassin unique), on obtient les caractéristiques suivantes :

$$k = 0,1 \text{ groupe/km}^2 (\phi 8 \text{ m} - 62,5 \text{ t/mn})$$

$$P_n = 30 \text{ MW}$$

$$\frac{kD^2}{S} = 6,4 \cdot 10^{-6} \quad \frac{P_n}{S} = 3 \text{ MW/km}^2 \quad \frac{V}{S} = 100 \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{\bar{P}}{S} = 1,74 \text{ MW/km}^2$$

$$\frac{P_{G1}}{S} = 1,2 \text{ MW/km}^2$$

$$\frac{P_{G2}}{S} = 2,3 \text{ MW/km}^2 \text{ (figure 2 b)}$$

A la limite, on voit qu'on conserve une puissance garantie de $2,3 \text{ MW/km}^2$ même si l'on réduit la puissance électrique des groupes à 23 MW :

$$\frac{P_n}{S} = 2,3 \text{ MW/km}^2$$

$$\frac{\bar{P}}{S} = 1,61 \text{ MW/km}^2$$

On notera que la performance d'un équipement à bassins conjugués du point de vue puissance garantie n'est pas a priori optimum pour les cycles étudiés ici (à puissance constante par marée) ; on peut se demander s'il l'on n'obtiendrait pas un gain sur P_{G2} en admettant une durée d'arrêt donné des machines sur chaque cycle lorsque le turbinage n'a pas lieu dans de bonnes conditions, (par exemple en moyenne sur 10 % du temps) quitte à considérer ensuite sur les temps de fonctionnement une disponibilité supérieure (par exemple 80 %). La réponse à cette question peut ouvrir la voie à une recherche de véritables cycles à puissance garantie maximale.

En ce qui concerne les caractéristiques de l'indisponibilité, on notera tout d'abord un caractère non aléatoire puisque pratiquement l'indisponibilité partielle est uniquement le fait des marées de mortes eaux. Cette indisponibilité dure 3 à 4 jours, elle est donc de plus longue durée que dans le cas du bassin unique avec une fréquence relativement basse (tous les 15 jours).

L'exemple d'exploitation de la Rance (disponibilité 95 %) nous incite à ne pas tenir compte des indisponibilités accidentelles ou liées aux révisions. De plus le très grand nombre de groupes rend moins sensible toute panne ou avarie de longue durée et l'on peut compenser toute indisponibilité d'entretien par un suréquipement d'environ 5 % ou éventuellement par un fonctionnement temporaire des groupes un peu au-dessus de la puissance prévue.

Ainsi l'indisponibilité d'un aménagement à bassins conjugués fonctionnant à puissance constante par marée présente certaines caractéristiques intermédiaires entre l'aménagement à bassin unique dont le fonctionnement est intermittent avec une fréquence élevée et l'usine nucléaire présentant de longues périodes d'arrêt ou de fonctionnement partiels.

Par contre, la souplesse de l'aménagement à bassins conjugués est l'un des éléments potentiels originaux les plus marqués. En effet si l'on envisage cette fois-ci des cycles quelconques (et non plus seulement à puissance constante), la relative indépendance des niveaux haut et bas par rapport au niveau de la mer, permet de "placer" une production maximum à une heure quelconque. L'exploitation d'une telle indépendance vis à vis des heures de pleines et basses mers aura certaines répercussions sur le productible du cycle. Les circonstances extérieures côté mer constituent ainsi un élément plus ou moins favorable sans imposer toutefois de contraintes absolues.

Dans une seconde partie de l'étude sur les cycles en bassins conjugués, il est prévu d'examiner le fonctionnement à énergie maximum qui nous ramènera à des fonctionnements intermittents du style bassin unique. On aura ainsi une rapide exploration du champ des possibilités des bassins conjugués, de la puissance constante à l'énergie maximum avec un rapide coup d'œil sur les multiples intermédiaires qui constituent l'avantage du point de vue souplesse, de ce type d'aménagement.

4. COMPARAISON DES PERFORMANCES ET DES INVESTISSEMENTS

Nous avons vu que la "performance" était une notion complexe basée à la fois sur la quantité et la qualité des kWh et qu'il était difficile à notre échelle d'en formuler un critère de valorisation. Nous nous limiterons donc, pour terminer ce rapide tour d'horizon, à une rapide comparaison sur chaque type d'investissements à réaliser pour un même productible annuel. Le tableau ci-dessous donne des ordres de grandeur des différents paramètres du coût d'investissement L, \mathcal{V}, kD^2 et P_n rapportés à P .

Investissement productible égal (valeur constante du kWh)	Chiffres moyens en bassin unique (E_{max})	Diverses variantes (P constant) en bassins conjugués			
Digues mortes $\frac{L}{P}$	0,46 (m^2/MW) ^{1/2}	0,69	0,76	0,76	0,79
Vannes $\frac{\mathcal{V}}{P}$	10,6 (m^2/MW)	48	57	57	62
Turbines, génie civil des groupes $\frac{kD^2}{P}$	8,5 (m^2/MW)	4,9	5,8	3,7	4,0
Alternateurs transformateurs lignes $\frac{P_n}{P}$	3,4	2,3	1,4	1,7	1,4

Les chiffres ci-dessus ne sont bien entendu comparables entre eux que s'ils sont situés sur une même ligne (afférents à une même catégorie d'investissement). Il sera intéressant de corriger ce tableau lorsqu'on aura une idée suffisamment approchée des paramètres multiplicateurs de chaque ligne.

Pour l'instant, on a porté les chiffres moyens en bassin unique exploité à énergie maximum, et diverses variantes d'usines à bassins conjugués exploitées à puissance constante par marée. On voit ainsi apparaître au bénéfice des bassins conjugués une meilleure rentabilisation des équipements mécaniques et électriques ainsi que du génie civil qui s'y rapporte. Il faut y ajouter les éléments plus subjectifs discutés ci-dessus sur la qualité du kWh. Par contre les aménagements digues mortes et surtout vannes sont moins bien valorisés et il y a bien effectivement lieu de songer tout au moins pour la part "digues" à rechercher des buts multiples autres que marémoteur pour soulager un peu de ce point de vue le prix de l'aménagement marémoteur.

Il faut cependant souligner que le prix des digues par exemple n'est qu'une petite partie du devis d'ensemble. A titre indicatif, le prix d'une digue morte de 21 km correspondant au tracé du projet EDF est estimé à 2 600 MF (Cf. Note Chausey 74-14) alors que le prix total du projet tourne autour de 20 000 MF (pour $P_n = 12\ 000$ MW). Ceci permet de confirmer que le problème du choix du type d'aménagement marémoteur pour un site tel que Chausey est bien un problème ouvert et que si les éléments en notre possession aujourd'hui ne nous permettent pas de conclure, il n'est pas du tout démontré d'avance que les solutions bassin unique étudiées il y a plus de 15 ans soient les meilleures aujourd'hui.

Remarque

Il est tentant de rapprocher pour une même surface de bassin le productible bassin unique - énergie maximum ($\bar{P} = 4,7$ MW/km²) et le productible bassins conjugués - puissance constante par marée ($\bar{P} = 2,1$ MW/km²) et d'en conclure que de toute façon le bassin unique est meilleur si l'on obtient un taux de valorisation de l'énergie intermittente supérieur à 0,45. Un tel taux peut à la limite être obtenu avec des installations de stockage (soit hydraulique, soit par transformation des kWh en hydrogène). Une telle démarche est profondément erronée pour plusieurs raisons. Notons en particulier :

- il y aurait lieu de comparer d'abord les coûts d'investissement des deux usines marémotrices
- il faudrait estimer pour le stockage non seulement les pertes dues aux transformations successives, mais aussi les investissements à consentir pour réaliser ces transformations. Or ces derniers seront particulièrement élevés car l'énergie à accumuler est fournie à un niveau de puissance très élevé ; ceci est en effet (comme le montre la figure 1) une nécessité des équipements marémoteurs à énergie maximum dans lesquels une puissance nominale de plus en plus forte permet de tendre vers la récupération presque totale de l'énergie marémotrice "naturelle"
- la démarche qui consiste à comparer deux aménagements à surface identique de bassin est une démarche qui est :
 - soit issue de l'examen de sites type Rance, Corée, Fundy .. où la surface disponible a priori est évidente et quasi immuable car elle correspond à une digue très courte
 - soit la conséquence d'une situation éventuelle de pénurie énergétique extrême où chaque pouce carré équipable devrait être utilisé au maximum.

La situation de Chausey, non plus que le contexte actuel, ne permet pas ce genre de raisonnement et à moins de dépasser 2000 km², on peut considérer le choix du tracé et donc de la surface des bassins comme un problème ouvert, ce qui rend disponible un paramètre supplémentaire.

Ainsi des notions telles que celle du pompage en bassins conjugués doivent être étudiées avec une préoccupation plus générale. Il ne s'agit pas uniquement de savoir s'il est intéressant de réaliser une ou deux usines de pompage pour accroître le productible annuel de 10 ou 15 %, mais il faut aussi se demander s'il n'est pas plus économique d'augmenter de 10 à 15 % les surfaces des bassins et l'équipement correspondant.

Sans avoir la prétention de fixer une doctrine intangible, ces quelques remarques invitent à réfléchir sur certains points de fond du problème dont l'intérêt nous paraît primordial.

oOo

Annexe I

-

Ancien projet Chausey (Herpin, Parisienne, Videcoq, Roc) 1959

Bassin unique exploité à énergie maximum en double effet avec pompage

Amplitude de marée St Malo. Sans remous extérieur.

Surface de bassin :

- moyenne (à la cote + 10 au-dessus des plus basses mers) 450 km²
- maximum 520 km² (à la cote + 14)
- minimum 360 km² (à la cote + 5)

k	P _n	E _{annuelle}	\bar{P}	$\frac{P_n}{S}$	$\frac{\bar{P}}{S}$	$\frac{V}{S}$	$\frac{kD^2}{S}$
400	8000 MW	18,65 TWh	2140 MW	17,8	4,75	52 10 ⁻⁶	54 10 ⁻⁶
500	10000 MW	21,57 TWh	2450 MW	22,2	5,45	52 10 ⁻⁶	67,3 10 ⁻⁶
600	12000 MW	24,46 TWh	2800 MW	26,7	6,25	52 10 ⁻⁶	81 10 ⁻⁶
				MK/km ²			

Equipement

k groupes : type Rance ϕ 7,80 m, n = 71,5 t/mn, P = 20 MW

Vannes : 155 vannes type Rance (15 m x 10 m).

oOo

Annexe II

-

Projet A San (Corée) 1974 (Version "sans port")

Bassin unique en double effet avec pompage

Amplitude de la marée quadratique moyenne : 6,55 m

Surface de bassin :

- moyenne 80 km² (à + 6,3 m)
- maximum 94 km² (à + 9 m)
- minimum 50 km² (à + 1 m)

k	Pn	E annuelle	\bar{P}	$\frac{Pn}{S}$	$\frac{\bar{P}}{S}$	$\frac{\psi}{S}$	$\frac{kD^2}{S}$
30	462 MW	1,50 TWh	172 MW	5,8	2,15	34 10 ⁻⁶	24 10 ⁻⁶
48	740 MW	2,04 TWh	233 MW	9,25	2,90	34 10 ⁻⁶	38,5 10 ⁻⁶
60	924 MW	2,39 TWh	273 MW	11,6	3,40	34 10 ⁻⁶	48 10 ⁻⁶
∞	∞	4,40 TWh	500 MW	∞	6,25	∞	∞
MK/km ²							

Equipement

 k groupes type Rance ϕ 8 m, n = 55,4 t/mn, P = 15,4 MW

 Vannes : 18 vannes type Rance (15 m x 10 m²)

oOo

Annexe III

-

Projet A San (Corée) 1974 (Version avec port)

Bassin unique en double effet avec pompage

Amplitude de la marée quadratique moyenne : 6,55 m

Surface de bassin :

- moyenne : 70 km² (à + 7 m)
- maximum : 80 km² (à + 9 m)
- minimum : 41 km² (à + 1 m)

k	P _n	E _{annuelle}	\bar{P}	$\frac{P_n}{S}$	$\frac{\bar{P}}{S}$	$\frac{v}{S}$	$\frac{kD^2}{S}$
18	277 MW	0,97 TWh	110 MW	3,95	1,60	39 10 ⁻⁶	16,5 10 ⁻⁶
30	462 MW	1,40 TWh	160 MW	6,60	2,30	39 10 ⁻⁶	27,5 10 ⁻⁶
48	740 MW	1,68 TWh	192 MW	10,6	2,75	39 10 ⁻⁶	44 10 ⁻⁶
∞	∞	3,8 TWh	435 MW	∞	6,20	∞	∞
MK/km ²							

Equipement

 k groupes type Rance ϕ 8 m, n = 55,4 t/mn, P = 15,4 MW

 Vannes : 18 vannes type Rance (15 x 10 m²)

°°

Annexe IV

 -
 Projet A San (Corée) 1974 (Version avec port)

 Extrapolation rigoureuse des calculs
aux conditions Chausey

Le principe consiste à associer à chaque marée A San, pour laquelle les caractéristiques de cycle ont été déterminées, une marée Chausey dite "Homologue" choisie de telle façon qu'elle donne un fonctionnement turbine au même point de rendement de la colline donnée par ses coordonnées réduites :

$$n_{11} = \frac{nD}{\sqrt{h}} \quad Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{h}}$$

L'amplitude A de la marée Chausey homologue est fixée comme suit si l'on note \tilde{x} le rapport des valeurs de x pour A San et Chausey.

Compte tenu du fait que $\tilde{D} = 1$, on a :

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= \tilde{h} = \tilde{n}^2 \\ \tilde{Q} &= \tilde{n} \end{aligned}$$

Si l'on garde inchangé le nombre k de groupes, l'égalité

$$S \frac{dz}{dt} = kQ$$

implique pour $\tilde{t} = 1$ que $\tilde{S} = \frac{1}{\tilde{n}}$

Enfin on a un rapport de puissance et d'énergie produite :

$$\tilde{P} = \tilde{n}^3$$

On peut ainsi calculer une productivité e pour diverses amplitudes A aux conditions Chausey. En utilisant la courbe de fréquence des marées à Chausey, on détermine ainsi la productivité annuelle E et \bar{P} .

Les résultats sont les suivants :

30 groupes type Rance ϕ 8 m - 62,5 t/mn - $P_N = 22$ MW

18 vannes (15 x 10)m²

$$S = 62 \text{ km}^2$$

$$P_n = 660 \text{ MW}$$

$$E_{\text{annuelle}} = 1,74 \text{ TWh}$$

$$\bar{P} = 195 \text{ MW}$$

$$\frac{P_n}{S} = 10,65 \text{ MW/km}^2$$

$$\frac{kD^2}{S} = 31 \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{\nu}{S} = 43,6 \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{\bar{P}}{S} = 3,15 \text{ MW/km}^2$$

La situation du point correspondant noté Δ sur la figure 1 montre une pénalisation notable due à la limite de puissance alternateur.

Un autre calcul prenant en compte une augmentation de cette puissance $P_n = 26,6 \text{ MW}$ porte la productivité à un niveau supérieur (point V)

$$\frac{P_n}{S} = 12,9 \text{ MW/km}^2$$

$$\frac{kD^2}{S} = 31 \cdot 10^{-6}$$

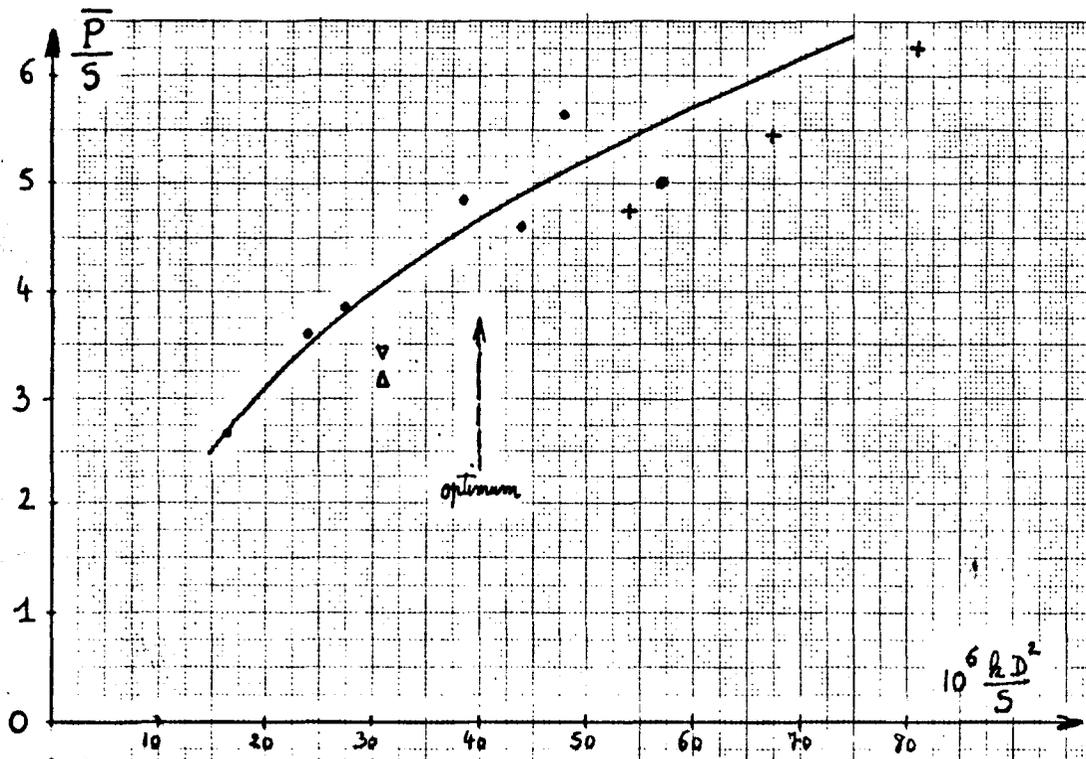
$$\frac{\nu}{S} = 43,6 \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{\bar{P}}{S} = 3,4 \text{ MW/km}^2$$

Ces valeurs montrent que les estimations annexe II et III sont peut-être un peu optimistes. Par contre ces valeurs sont plus cohérentes avec les valeurs données directement sur Chausey (annexe I).

En réalité un certain gain est à prévoir du fait des performances de la colline industrielle meilleures que celles de la colline modèle Rance utilisé ici.

R 12341-2
ANNEXE VE 8 Fig 1



S surface du bassin
 k nombre de groupes de diamètre axe D
 P_m puissance électrique nominale totale
 \bar{P} puissance moyenne annuelle

Asymptote énergie naturelle
 pour le site de Chaussey $\bar{P} \approx 10,8 \text{ MW/km}^2$

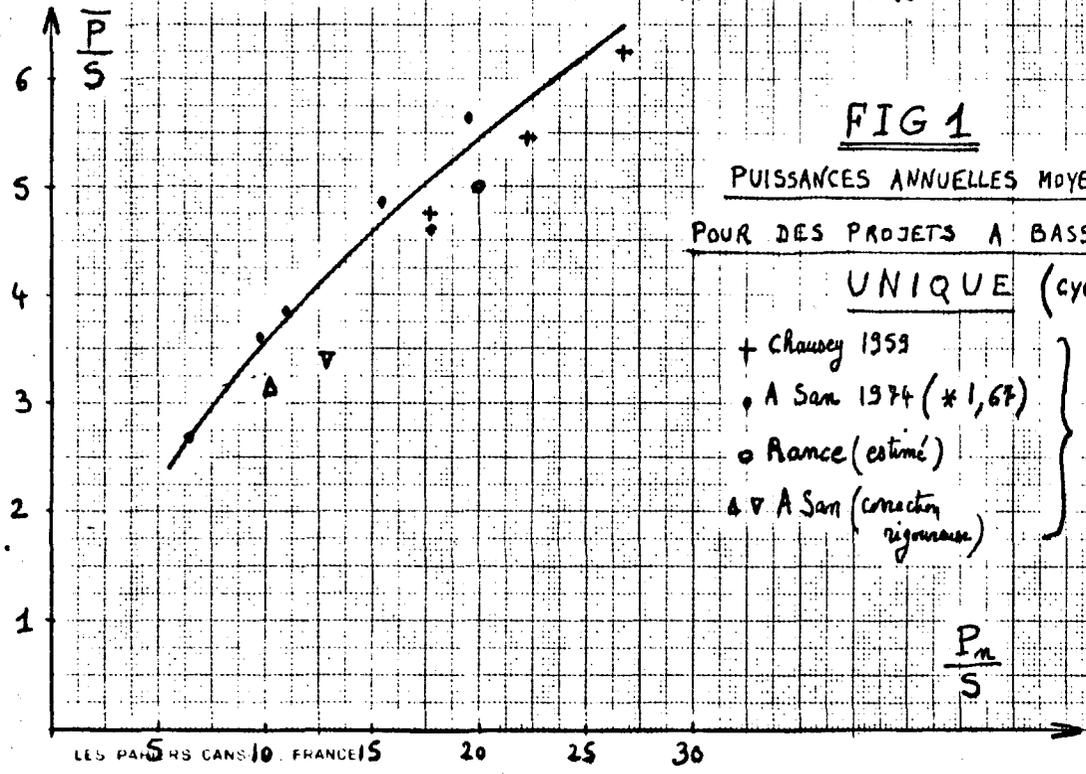


FIG 1
 PUISSANCES ANNUELLES MOYENNES
 POUR DES PROJETS A BASSIN
 UNIQUE (cycles à énergie maximum)

- + Chaussey 1959
 - A San 1974 (* 1,67)
 - Amce (estimé)
 - △ A San (correction rigoureuse)
- } éventuellement ramenés au site de Chaussey

$\frac{P_m}{S}$

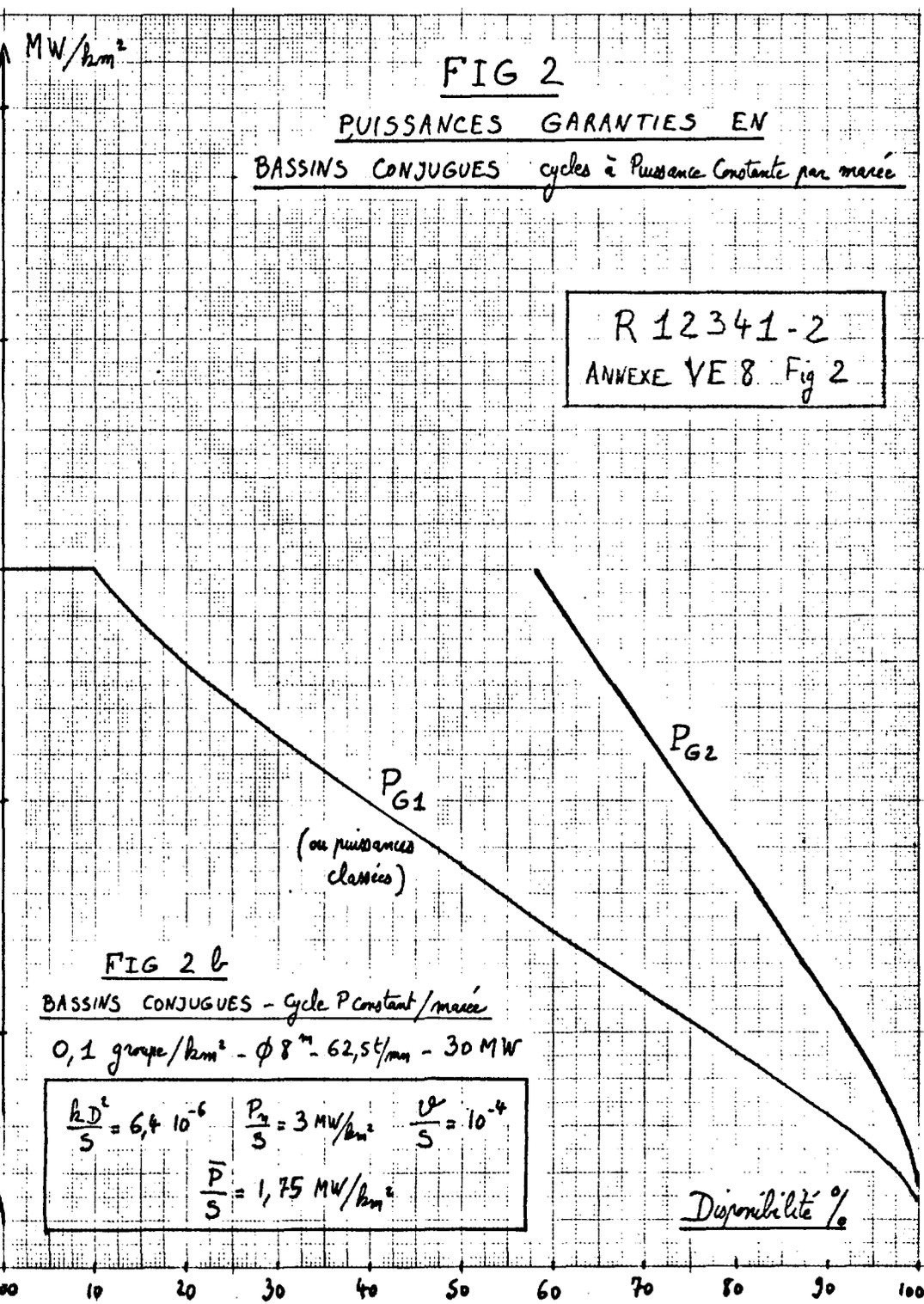
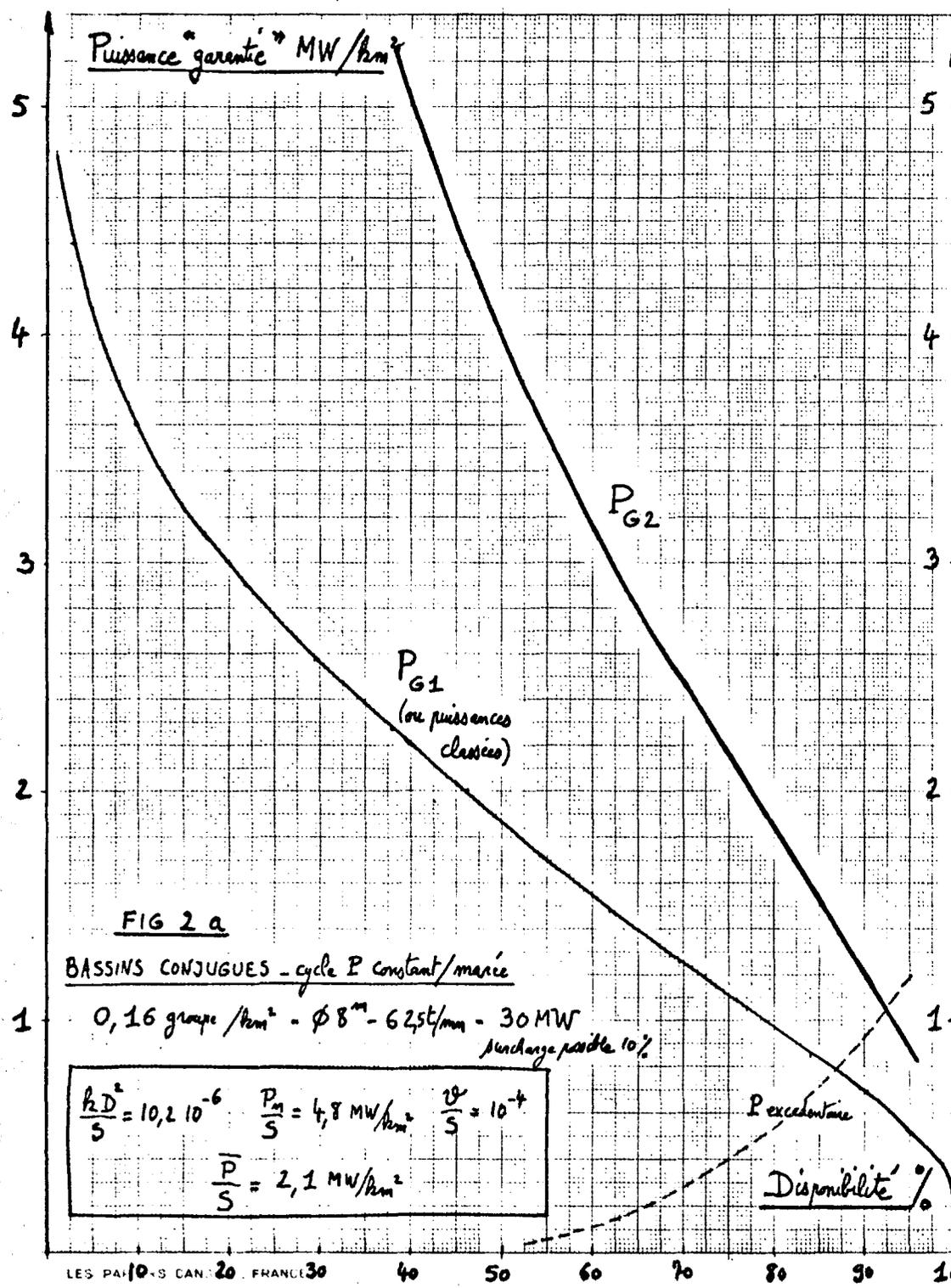


FIG 2
PUISSANCES GARANTIES EN
BASSINS CONJUGUES cycles à Puissance Constante par marée

R 12341-2
ANNEXE VE 8. Fig 2

Institut
de
Mécanique
(I.M.G.)

Direction Etude des Marées

Annexe VE 9

Grenoble, le 21-7-75

USINE MARE-MOTRICE DE CHAUSEY
NOTE SUR LES ETUDES FAITES
A L'INSTITUT DE MECANIQUE DE GRENOBLE

par G. CHABERT d'HIERES *

Durant les années 1960 à 1962, l'I.M.G. (désigné à l'époque sous le nom de Laboratoire de Mécanique des Fluides) a exécuté l'étude sur modèle réduit du remous apporté à la marée par la construction et l'exploitation d'une usine maré-motrice s'appuyant sur les Iles Chausey.

Le regain d'intérêt pour la découverte de nouvelles sources d'énergie et leur diversification imposent que l'on se penche à nouveau sur ces problèmes posés par les centrales maré-motrices. Ayant participé de façon très active aux études du remous créé sur la marée par l'ouvrage prévu vers les années 1956 pour CHAUSEY, nous donnons dans ces quelques lignes l'essentiel des résultats obtenus et les recherches à poursuivre pour améliorer le profil des digues ou l'exploitation de telle ou telle réalisation.

Nos recherches se sont bornées à mesurer la perturbation apportée à la marée par les digues, d'une part et le fonctionnement de l'usine, d'autre part. On a supposé la marée sinusoïdale à l'entrée de la Manche. Plusieurs projets ont été étudiés, mais seul le projet dont les digues sont figurées sur le schéma n° 10a vu l'explicitation des résultats. Ceux-ci font l'objet d'un rapport, cf. (1): On en trouvera un résumé en (2).

* Ingénieur au C.N.R.S. détaché à l'I.M.G.

On a étudié des fonctionnements d'usine à diverses puissances, mais ceux-ci ont toujours été représentés par des débits sinusoïdaux.

Nous retraçons ici quelques résultats marquants en empruntant les figures déjà données en (2).

Etude du remous des digues.

L'emprise de l'usine est définie par le parallèle des Iles Chausey et une ligne droite de Chausey à la Pointe du Grouin (fig. 8 et 10).

La fidélité des mesures permet le tracé des lignes d'égalé perturbation de 5 en 5 cm (0,1 mm sur le modèle).

La perturbation se réduit à une onde qui se propage dans le divergent du Golfe de Saint-Malo et se réfléchit sur les côtes anglaises (fig. 8). La ligne nodale se situe à la limite du Golfe de Saint-Malo. Il faut noter qu'une modification locale du domaine entraîne une perturbation sensible de l'onde en des points très éloignés. Le maximum du déficit de marée est de 50 cm pour les vives eaux moyennes ; il est proportionnel au coefficient et vaut environ 4,5 % de l'amplitude de l'onde à Chausey. Aucun déphasage de l'onde de marée n'a pu être décelé.

Fonctionnement de l'usine.

Nous ne décrivons pas en détail la représentation technologique de l'usine. Le transit d'énergie à travers la digue était simulé en imposant, à chaque instant, entre la Pointe du Grouin et Chausey, un débit sinusoïdal. Cette représentation très schématique implique, avec la forme géométrique du bassin et les caractéristiques des groupes fonctionnant à double effet, un fonctionnement rigoureusement périodique illustré par la figure 9.

Le fonctionnement présenté sur la figure 9 est défini par :

- un débit maximal de $200\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$, variant sinusoïdalement ;
- l'amplitude de la marée égale à celle des vives eaux moyennes ;

il est rendu optimal en prenant :

- le maximum du débit sortant du bassin en retard de 6 h.12 sur l'heure de la pleine-mer ;

- le niveau maximal dans le bassin égal à 10 m au-dessus du zéro des cartes marines.

On a supposé :

- la marée non perturbée ;
- la ligne d'eau horizontale le long de la digue côtés mer et bassin ;
- le débit partagé de façon égale entre 800 groupes type Rance de caractéristiques données.

La perturbation pour le fonctionnement correspondant à l'exemple précédent, est tracé sur la figure 10. On a représenté un essai avec une marée de vive eau mais, en première approximation, l'amplitude de la marée joue peu sur la perturbation.

Le tracé des réseaux pour toute la Manche, pour 12 déphasages différents d'heure en heure, entre le débit sortant et la marée, pour quatre équipements d'usines correspondant à 100 000, 200 000, 300 000 et 400 000 m³/s et pour deux amplitudes de marées, vive eau et morte eau, ne permet pas de déceler des écarts de phase de la marée ; la perturbation, si on retranche celle des digues seules, est une fonction sensiblement linéaire du débit. Elle est sensible dans toute la Manche (quelques dm).

L'influence du déphasage est clairement montrée sur la figure 11, pour un débit maximal de 200.000 m³/s. La perturbation maximale a lieu pour le déphasage 7 h. différent de 1 h. de celui du régime de production maximal. Elle correspond à une diminution de marée de 1 m : 50 cm provenant de la modification du tracé des côtes et 50 cm de la ponction d'énergie. Pour un débit maximal de 400 000 m³/s, l'écart dû à la ponction d'énergie est de 1 m, d'où, compte tenu de l'influence de la digue, un affaiblissement total de la marée de 1,50 m.

La perte d'énergie disponible due au remous est considérable (fig. 12) pour l'exemple présenté ci-dessus (fig. 10), le remous diminue la production d'énergie par période de marée de 39 à 35 GWh.

Note complémentaire.

Lors des essais sur la perturbation des digues, nous avons essayé d'annuler cette dernière par la construction de digues annexes. On a pu montrer aisément que la construction d'un barrage entre Jersey et la côte, en

empruntant les hauts fonds des ECREHOUS rétablissait le marnage normal devant les digues de l'usine. Bien que conduisant à des travaux importants pour la réalisation en nature, les recherches systématiques relatives à l'implantation de diverses digues annexes seraient fort utiles pour déterminer les tracés successifs des ouvrages au cours des différentes étapes de construction et surtout leur tracé définitif.

Les lacunes des études antérieures.

- la marée n'est pas périodique.
- ni la marée, ni le fonctionnement de l'usine ne sont représentables par des lois sinusoïdales
- un seul projet a vraiment été étudié et aucun ouvrage complémentaire n'a été envisagé, or le remous de l'usine en dépend beaucoup
- les problèmes de modification de la circulation moyenne des eaux (dérives) n'ont pas été abordés et sont très importants pour la pollution, l'érosion et la sédimentation.

La marée dans la Manche est représentable par une superposition d'ondes dont les principales sont semi-diurnes (périodes voisines de 12 h.25) formant des battements tels que l'amplitude varie du simple au double deux fois par mois. Le régime de fonctionnement de l'usine doit donc être adapté de jour en jour à l'amplitude de la marée, et le remous correspondant en dépend. Il faut donc simuler les fonctionnements possibles pour en déduire la perte d'énergie produite d'une part et la durée pendant laquelle ce remous s'exercera pour estimer les répercussions écologiques d'autre part.

La marée n'est pas sinusoïdale. La somme des amplitudes des termes quart diurnes (c'est-à-dire du premier harmonique de la marée semi-diurne de vive eau) atteint 100 cm, soit 7 à 8 % de la marée elle-même, c'est-à-dire une amplitude équivalente à celle du remous lui-même. Comment ne pas en tenir compte également pour le calcul de la production d'énergie ? L'usine d'autre part voit son débit évoluer suivant les lois imposées par les cycles d'intérêt optimum. Or ceux-ci sont bien évidemment très loin d'une loi sinusoïdale. La détermination précise du remous pour chacun des types de fonctionnement est à reprendre.

De nouveaux bassins sont à prendre en considération, notamment les usines à bassins conjugués pour lesquelles une nouvelle étude de courbe de remous est à faire. Toutes les études antérieures sont à reprendre avec plus de précision et pour des variations plus fines des divers paramètres de l'usine (puissance amplitude de la marée, mode de fonctionnement, etc ...).

Nous avons déjà montré que des ouvrages annexes sont susceptibles de diminuer l'effet du remous ou tout au moins d'augmenter l'amplitude de la marée dans la zone d'entonnement des groupes générateurs. Nous verrons que dans le cadre de projets plus grandioses, on peut augmenter considérablement la puissance garantie par la création de bassins annexes.

d'ouvrages
Il s'agit là de forme et d'importance assez mal déterminées qui demanderont un grand volume d'études, qui ajoutées aux recherches complémentaires aux travaux antérieurs, justifient pleinement l'emploi de modèle réduit, dont l'usage s'avèrera finalement relativement économique (à précisions égales, le coût des études est moins grand sur modèle physique que sur modèle numérique lorsque le nombre des études est important). Cet outil d'étude a déjà l'énorme avantage d'exister, d'être réglé et de pouvoir s'adapter de près à toutes les formes de réalisation d'ouvrage. De plus les essais que nous avons été conduit à exécuter depuis 1965 pour déterminer les composantes significatives de la marée en Manche ont montré qu'avec les méthodes soignées de mesure et d'exploitation, on pouvait atteindre une précision remarquable : 1 ‰ sur l'amplitude des ondes rapportée à l'amplitude de la marée. On peut donc espérer déterminer le remous exact de chacun des ouvrages aussi bien dans le champ rapproché que dans le champ lointain. On peut donc envisager de supprimer l'étape intermédiaire que l'on avait employée en 1962 et qui consistait dans la construction de très grands modèles fixes d'emprise restreinte.

Ces mêmes problèmes seront certainement traités à l'aide de modèles numériques puisque cette technique d'étude déjà employée lors des études de 1960-62, s'est considérablement développée. Les résultats obtenus seront probablement moins précis, sauf pour des modèles tout à fait locaux. Mais pour ces derniers, les conditions aux limites seront délicates à obtenir. Et pour abréger les opérations, on devra faire appel au modèle réduit. Toutefois, dans bien des cas, les deux techniques s'épauleront l'une et l'autre.

Remarques sur la proposition d'un ouvrage d'un type nouveau : le Bassin hyperbas.

Depuis quelques décades, divers projets maré-moteurs ont été établis dans le Golfe de Saint-Malo. Certains, fort ambitieux, ont vu le jour depuis nos études de 1960-62. Tous ont gardé l'inconvénient de voir leur puissance minimum garantie, considérablement restreinte par l'existence des mortes eaux. Il nous est donc venu à l'idée de construire un bassin supplémentaire capable de stocker sur plusieurs jours une quantité d'énergie destinée, en la restituant lors de ces périodes de mortes eaux, à rétablir une production instantanée égale à celle que développe la marée d'amplitude moyenne dans l'usine principale.

L'impossibilité de noyer des terres interdit le stockage hydraulique dans des cuvettes élevées. On peut par contre abaisser le niveau d'eau dans un bassin limité par des digues entourant une cuvette sous-marine (une telle cuvette existe par exemple entre l'Ile de Jersey, les Ecrehous, la Côte du Cotentin et la Chaussée des Boeufs). Par pompage initial, on peut caler son niveau moyen à quelques décimètres au-dessous du niveau moyen de la mer environnante. (Le bassin proposé a des fonds de 18 m et une superficie très appréciable en dessous de 15 m au-dessous des plus basses mers). Ce niveau est à déterminer en fonction de la forme des fonds du bassin pour assurer la quantité d'énergie cherchée et le rendement optimum des machines. On peut ensuite, par des cycles de turbinages et pompages à étudier et à déterminer au fur et à mesure en fonction des besoins, restituer l'énergie voulue en période de mortes eaux, cette énergie ayant été empruntée à la marée lors des vives eaux.

Cette idée conduit à un projet grandiose, mais il pourrait s'inscrire dans une réalisation étalée par étapes successives, comme il est souhaitable, au cours des quelques décennies futures. D'ores et déjà, il présente les avantages suivants, en plus de la régulation de la production au cours du mois lunaire :

- il permettrait d'améliorer les cycles semi-journaliers par la suppression des temps morts

- le rendement des groupes est amélioré en pompe et en turbine par l'utilisation d'une chute relativement élevée (comprise entre 17 et 22 m lors des mortes eaux pour un survidage de 13 m), fig. A. Le volume, le poids et le prix

des groupes sont plus faibles que ceux des groupes du bassin principal et s'apparentent à ceux que l'on trouve pour les chutes d'eau classiques

- le survidage se ferait dans les périodes de vives eaux, mais on devrait l'exécuter dans la mesure du possible au moment des basses mers et surtout à celui des basses mers nocturnes pour profiter de la baisse du prix de l'énergie. En fait, on profiterait de tous les instants de surproduction de la centrale principale.

- Dans la mesure où on peut survider vers l'instant des basses mers et turbiner vers celui des hautes mers, l'ouvrage d'accumulation du bassin hyperbas apporte sa propre production d'énergie marée-motrice.

- si le bassin choisi est entre Jersey et la Côte Française, ses propres digues engendrent une augmentation de marée dans la région de l'usine principale. Nous avons vu ci-dessus qu'une telle digue apporte à l'ouvrage principal un gain d'énergie capable de la justifier.

- les digues à construire peuvent être relativement modestes puisque dans bien des cas, on peut suivre des zones de haut fond. Dans l'exemple proposé, les fonds à barrer ne sont que de 6 m en moyenne

- la bassin proposé s'ouvre sur la mer au nord de Jersey par des fonds de 25 m dans lesquels on peut descendre les groupes pour leur assurer un fonctionnement excellent (suppression des problèmes de cavitation et de vortex).

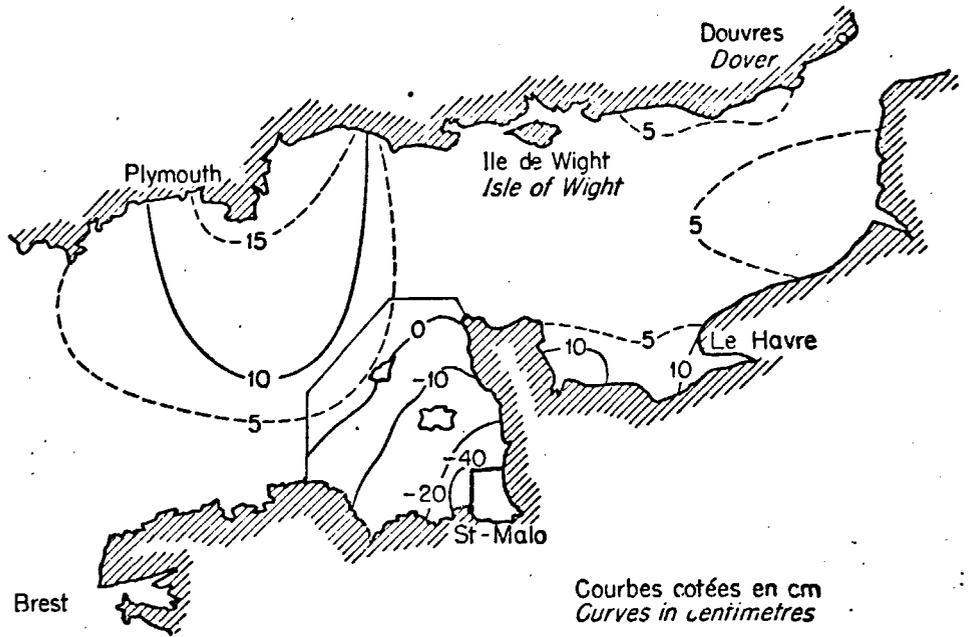
- la portion de rivage perdue serait retrouvée à la limite du bassin, mais de plus les nuisances correspondantes seraient largement compensées par une poldérisation de plusieurs centaines de kilomètres carrés.

BIBLIOGRAPHIE

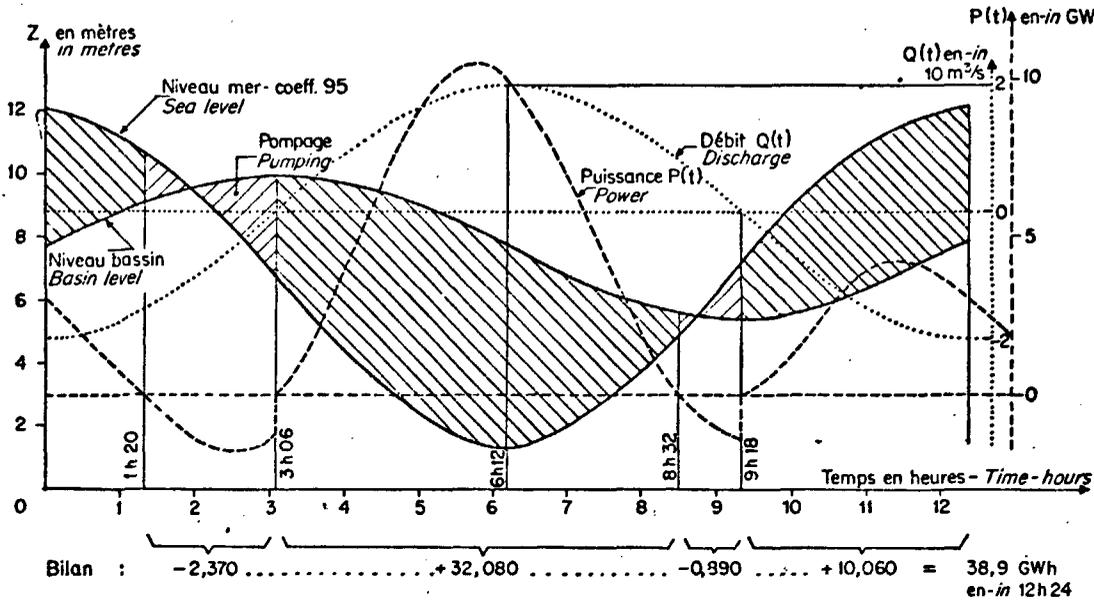
- (1) R. BONNEFILLE, G. CHABERT d'HIERES, S. LICHERON, M. HARIGUILLIE.
Etude de l'usine marémotrice des Iles Chausey sur modèle tournant de la Manche.
Rapport de la Direction des Etudes et Recherches d'E.D.F. Juin 1968.
- (2) R. BONNEFILLE et G. CHABERT d'HIERES. *Etude d'un modèle tournant de mer littorale. Application au problème de l'usine marémotrice des Iles Chausey.*
La Houille Blanche, n° 6, 1967.

le 1/8/75

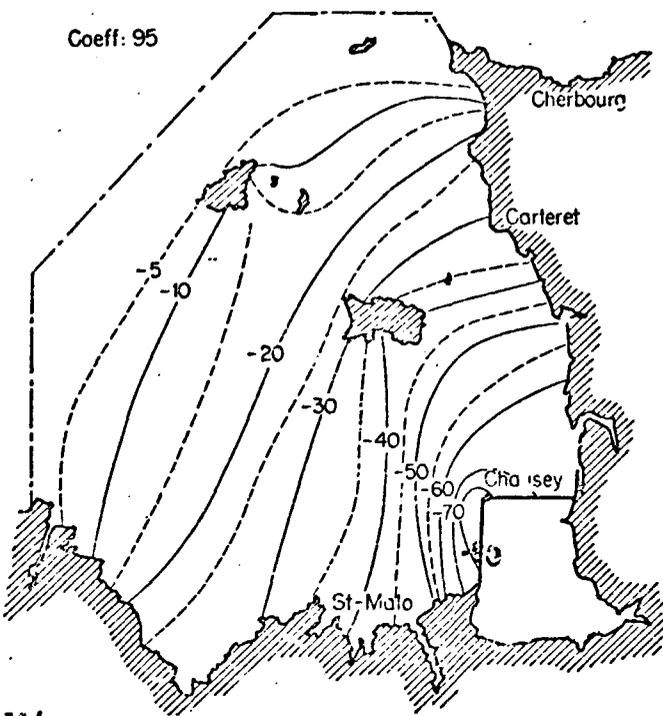
G. Chabert d'Hieres



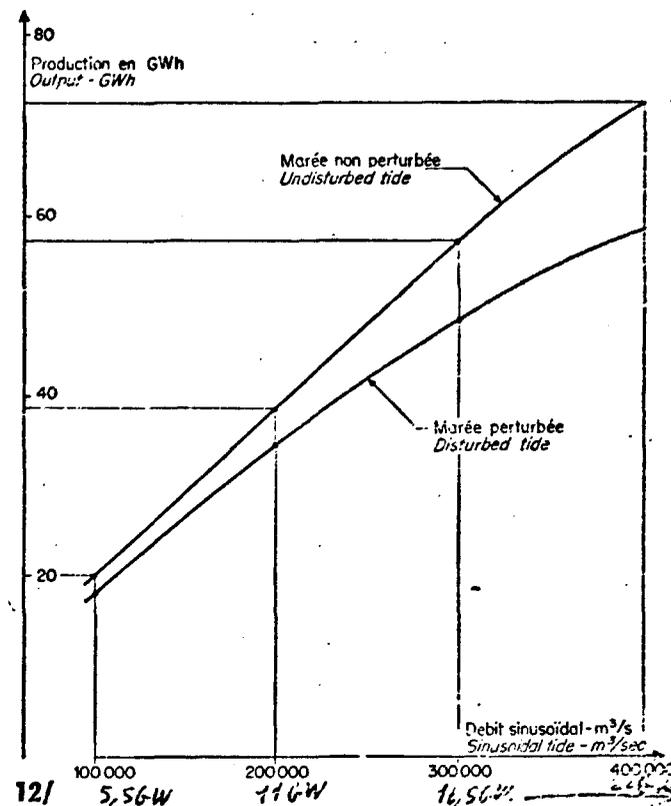
8/ Perturbation due aux digues dans la Manche entière.
Disturbance due to dikes throughout the Channel.



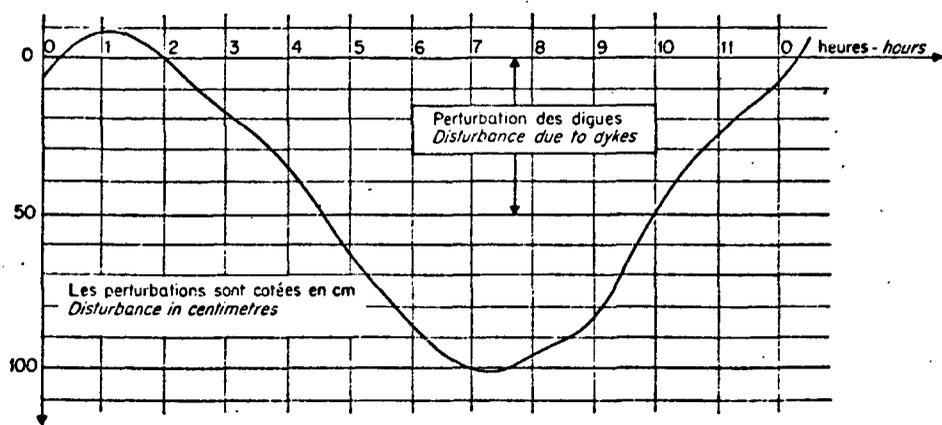
9/ Schéma de fonctionnement de l'usine.
Power plant operating chart.



10/



12/



11/ Perturbation en fonction du déphasage des débits

10/ Perturbation due au fonctionnement de l'usine à 200 000 m³/s.

Disturbance due to power plant operation at 200 000 m³/s.

11/ Perturbation totale au voisinage de l'usine en fonction du déphasage entre le débit et la marée (Q=200 000 m³/s).
Total disturbance near the power plant vs. phase difference between discharge and tide (Q = 200,000 m³/s).

12/ Effet de la perturbation sur la production de l'usine.
Effect of tide disturbance on power plant output.

