

UNIVERSITÉ D'ALGER

14/77

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE
PROJET DE FIN D'ETUDES

Sex

MISE SOUS VIDE D'UNE ENCEINTE DE RESERVOIR
&
LIQUEFACTION DE L'AIR ET DU GAZ NATUREL

مكتبة جامعة الجزائر
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
T1 BIBLIOTHEQUE

Proposée par :

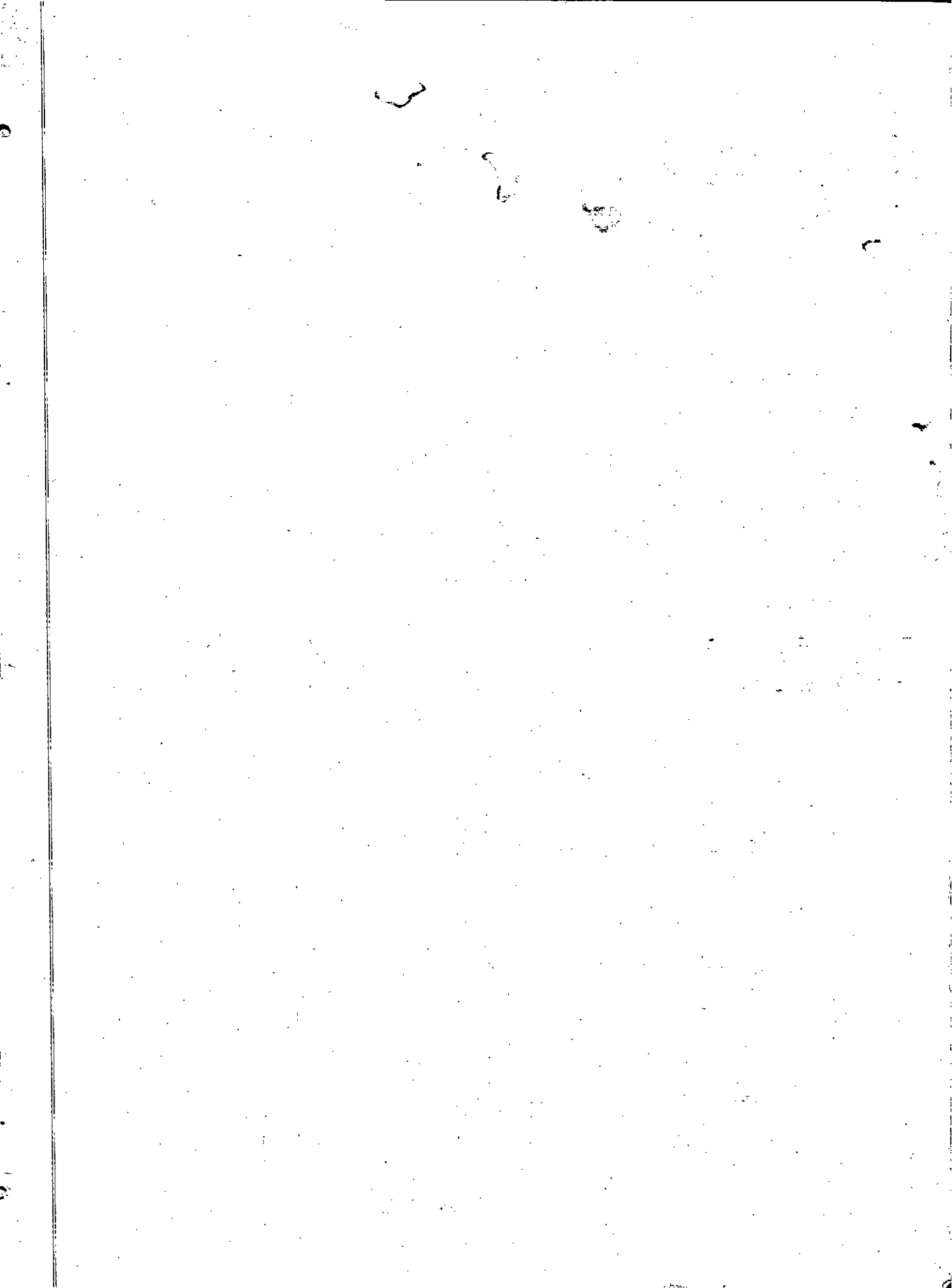
Mr. J.P. MULLER

Etudié par :

MEDJBER S.

avec la collaboration de
GHEDJATTI A.

Promotion : Juin 1977



UNIVERSITÉ D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

**MISE SOUS VIDE D'UNE ENCEINTE DE RESERVOIR
&
LIQUEFACTION DE L'AIR ET DU GAZ NATUREL**

Proposée par :

Mr. J.P. MULLER

Etudié par :

MEDJBER S.

avec la collaboration de
GHEDJATTI A.

Promotion : Juin 1977

NOS REMERCIEMENTS VONT A MONSIEUR J.P. MULLER
NOTRE PROMOTEUR ET AINSI QU'A MESSIEURS BOUSSARD ET
COEVOET POUR AVOIR SUIVI NOTRE TRAVAIL TOUT LE LONG
DU SEMESTRE .

A MES PARENTS

PREMIERE PARTIE

MISE SOUS VIDE

D'UNE ENCEINTE

DE RESERVOIR

INTRODUCTION

Le travail qui nous a été confié et qui constitue le premier tome de l'ensemble de notre projet est l'isolation thermique par un vide poussé d'une enceinte d'un réservoir cryogénique destiné au stockage des gaz liquides. Pour ceci nous avons réalisés certains travaux sur la connection réservoir-installation de pompage et principalement la mise en place du système d'étranglement. Ce système est décrit en détail dans cette étude. L'installation de pompage se compose de 2 pompes Sogev : la première volumétrique est destinée pour le vide moyen ; la seconde , à diffusion de vapeur d'huile, pour le vide poussé.

Notre étude a essentiellement porté sur l'utilisation et la mise en service du système de pompage avec l'appareillage de contrôle d'une part et sur l'opération d'étranglement d'autre part. Cette opération d'étranglement nous a conduit à la conception d'un dispositif adéquat qu'on a nommé étrangleur.

ch.1 . ETUDE DE LA MISE SOUS VIDE

D'UNE ENCEINTE .

1.1.Pompes à vide.

1.1.1.Classification des pompes à vide.

Les pompes à vide sont des dispositifs évacuant les gaz et les vapeurs d'un récipient où on desire obtenir le vide.. Le mode selon lequel ce processus se réalise détermine la classification des pompes modernes , qui comprend les grands groupes suivants :

-Pompes volumétriques : leur fonctionnement est basé sur la loi de Boyle-Mariotte . L'évacuation se réalise par la variation périodique du volume util de la chambre de la pompe . Les représentants principaux de ce groupe sont les pompes mécaniques rotatives à huile et les pompes à deux rotors .

-Pompes moléculaires : dans ces pompes , l'évacuation se réalise par l'ontraiement des molécules du gaz par des surfaces de corps solides mobiles .

-Pompes à flux de vapeur : leur fonctionnement est basé sur l'expulsion des molécules gazeuses , entraînées, par le flux de vapeur d'un fluide moteur (mercure , huiles , ...) .

-Pompes ioniques : dans ces pompes , les molécules du gaz sont ionisées, les ions produits sont extraits au moyen d'un

champs électrique convenablement orienté .

Les pompes volumétriques ne permettent pas d'avoir un vide poussé , les autres ne peuvent fonctionner à la pression atmosphérique ; donc si l'on veut couvrir une large gamme de pression , il est nécessaire d'employer des combinaisons convenables de type de pompes .

La pompe à vide moyen est appelée pompe primaire , et la pompe à vide élevé secondaire .

1.1.2. Caractéristiques des pompes .

-Pression limite : c'est la pression obtenue lorsque la pompe fonctionne sans charge, c'est à dire lorsqu'à son orifice d'admission , des gaz et des vapeurs du récipient ne sont plus admis .

-Débit S: $S = \left(\frac{dv}{dt} \right)_p$ *p: pression du gaz à l'admission
*dv: volume de gaz entrant par

l'orifice d'admission pendant le temps dt .

Le débit varie avec la pression : $S = f (p)$.

-Pression d'amorçage : pression à l'orifice de refoulement nécessaire au fonctionnement normal de la pompe .

-Puissance : quantité de gaz évacuée par unité de temps; elle s'exprime en torr.litre/seconde .

-Efficacité : c'est le rapport S/S_{\max}

S: débit à une pression p.

S_{\max} : débit maximal .

1.2.Pompes du labo. de mécanique .

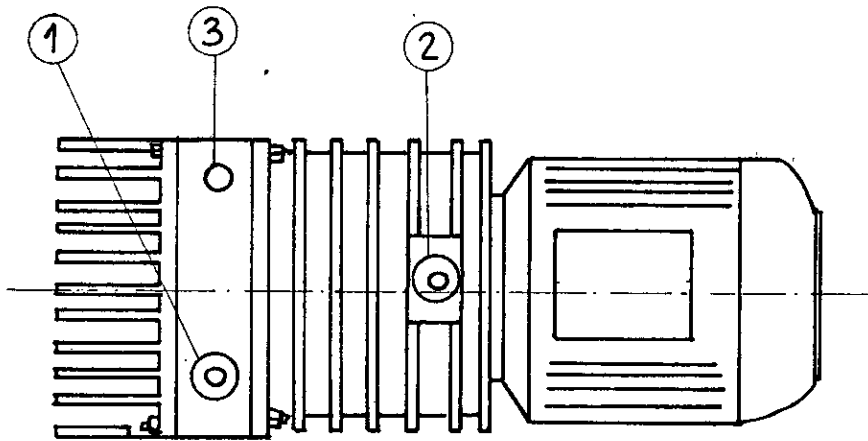
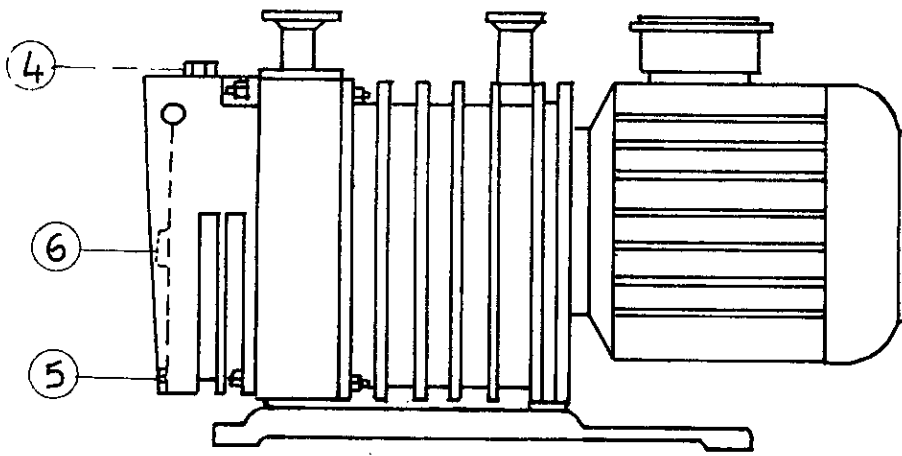
Le vide est fait à l'aide de deux pompes SOGEV ,une est utilisée pour le vide moyen ou primaire , la BL12-102; c'est une pompe mécanique rotative à palettes dans le rotor, elle est composée de deux étages ; la seconde pour le vide poussé ou secondaire , la D150-H320 qui est une pompe à diffusion de vapeur d'huile à trois étages .

1.2.1.Pompe primaire .

1.2.1.1.Principe de fonctionnement (PL.N°5)

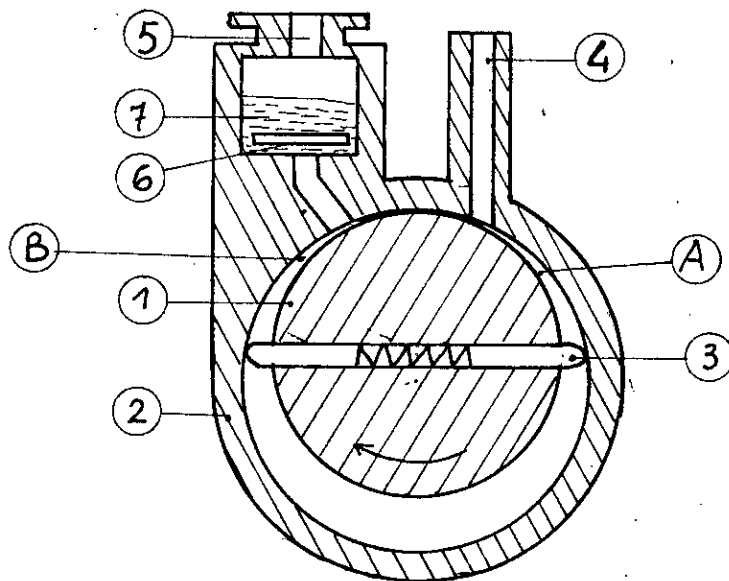
Dans le cylindre (2) ou stator de la pompe tourne un rotor (1) monté excentriquement . Le rotor est tangent au cylindre le long de sa génératrice supérieure et reçoit dans une fente un système de deux palettes (3) avec ressorts et tiges-guides qui est aussi en contact avec les parois planes du cylindre .

Quant le rotor tourne dans le sens indiqué, le volume A limité par le rotor , la palette et les parois du cylindre augmente et le ^{gaz} est aspiré par l'orifice (4) . En même temps le volume B diminue , le gaz qui s'y trouvent est comprimé et refoulé par le canal (5) lorsque sa pression devient suffisante pour l'ouverture de la soupape de refoulement (6) . Cette soupape se trouve dans une couche d'huile (7) qui empêche la pénétration d'air atmosphérique dans la pompe .



VUES DE FACE ET DESSUS

PL. N°4



FONCTIONNEMENT DE LA POMPE A PALETTES PL. N°5

1.2.1.2. Caractéristiques .

| | | |
|--|-----------------------|--------------------|
| Débit à la pression atmosphérique (m ³ /h) | | 12 |
| Pression limite (torr) | -sans injection d'air | 1.10 ⁻⁴ |
| | -avec injection d'air | 5.10 ⁻² |
| Taux de vapeur admissible=10% à 40 torrs (g/h) | | 280 |
| Vitesse de rotation de la pompe (tr/mn) | | 710 |
| Puissance du moteur d'entraînement (alimentation triphasé 380 V) (Kw) | | 0,75 |
| Puissance maximale consommée (Kw) | | 0,5 |
| Quantité d'huile de lubrification (l) | -max. | 2 |
| | -min. | 1,7 |

1.2.1.3. Utilisation (PL.N°4)

Dans le cas de pompage d'enceintes propres le risque d'entraînement de particules à l'intérieur de la pompe est très faible . Néanmoins on doit effectuer la vidange environ tous les 100heures de fonctionnement . Si on pompe de la vapeur , pour accélérer un cycle de chauffage par exemple , le taux de vapeur d'eau peut dépasser le taux admissible ; il faut alors employer le dispositif de lest d'air .

La pompe contient un robinet d'injection d'air (3) prévu pour éviter la pollution de l'huile par des vapeurs condensables .

Pour faire la vidange , mettre la pompe en marche , faire

de l'admission d'air à l'aspiration (1), enlever le vis de vidange (5).

L'aspiration se fait par l'orifice (1), le refoulement par (2).

1.2.1.4. Mise en service (PL.N°4)

-Effectuer le remplissage d'huile, pour cela :

-Dévisser et enlever le bouchon du carter (4) .

-Verser l'huile par l'orifice (4)

↳ Verser également quelques gouttes dans les tubulures d'aspiration (1) .

-Dévisser le bouchon .

Le pompe fonctionne normalement tant que le niveau d'huile sera compris entre les deux voyants d'huile (6) .

Les huiles employés sont des huiles spéciales, variables selon la nature du fluide à extraire :

Huiles de qualité -D : pour pompage de vapeur d'eau ,

" " " " -E : " " " de gaz halogénés ,

" " " " -B : " " " d'air .

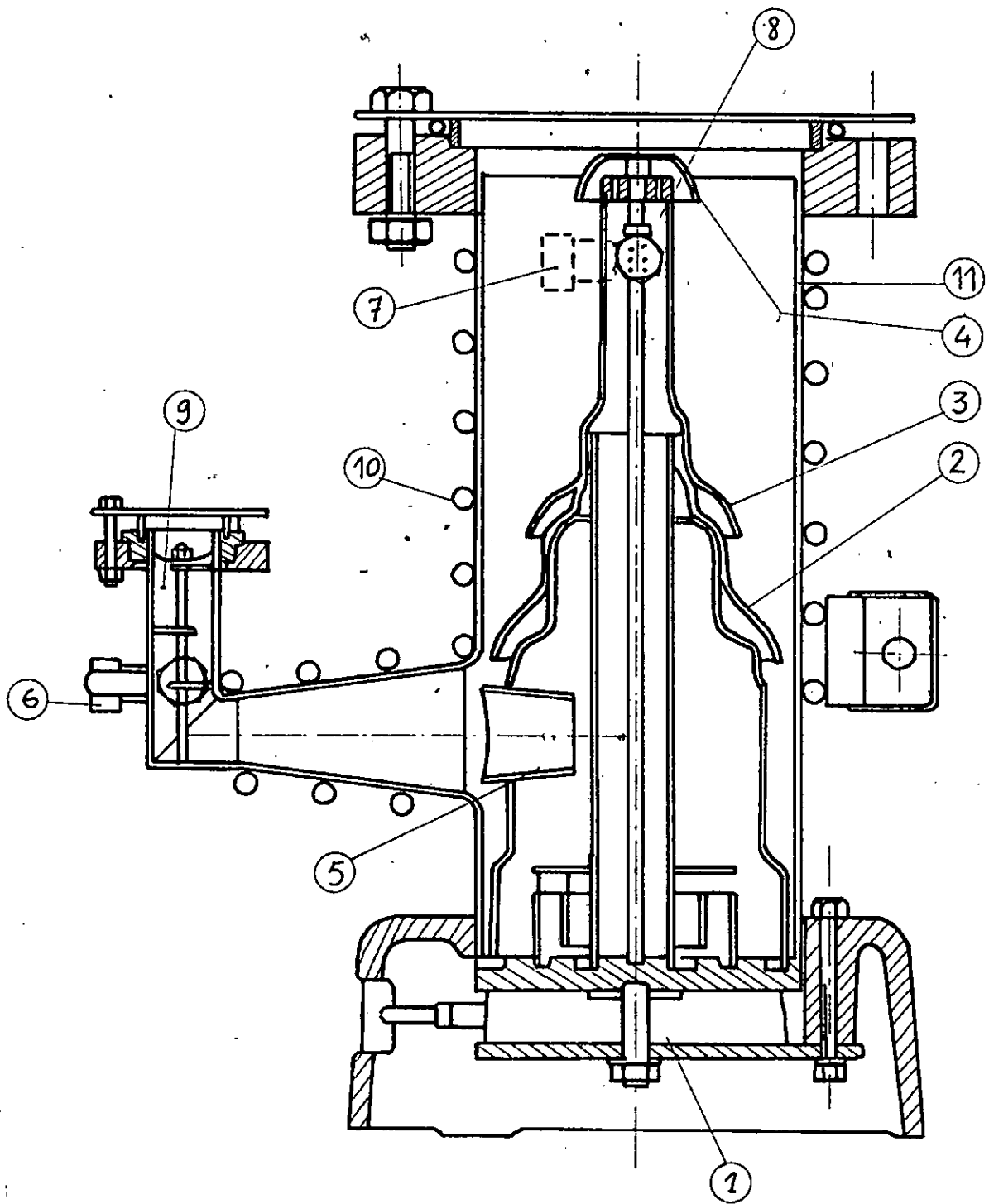
Effectuer le branchement électrique

La pompe est alimentée en triphasé, la ^{tension} tension phases est de 380 V. lorsque les fils sont branchés, on donnera une brève impulsion au moteur pour vérifier s'il tourne dans le bon sens.

1.2.2. Pompe secondaire

1.2.2.1. Principe de fonctionnement (PL.N°6).

L'huile de la pompe est chauffée sous basse pression à l'aide du réchaud (1), elle se vaporise et s'élève dans l'ensemble diffuseur. Les vapeurs les plus légères alimentent le diffu-



POMPE A DIFFUSION PL. N°6

seur HP (2) et l'éjecteur (5), puis l'étage moyenne pression (3), enfin l'étage basse pression (4).

Les diffuseurs possèdent des angles bien déterminés et dirigent les molécules vers la paroi (11) refroidie par une circulation d'eau extérieure (12). Cette paroi condense les molécules d'huile qui retourne à la chaudière par gravité.

Le diffuseur basse pression crée une nappe conique de molécules d'huile animées d'une grande vitesse de rotation suivant la génératrice de ce cône. Les molécules d'air situées au voisinage de l'orifice d'aspiration sont entraînées par les molécules d'huile de l'étage BP à l'étage HP, puis dirigées dans l'ajutage de refoulement. Elles sont reprises par la pompe primaire.

Si la pression de la pompe est inférieure à $5 \cdot 10^{-1}$ torrs, les nappes de vapeur diffusant à travers les étages se constituent mal, et l'effet de la pompe est presque nul.

1.2.2.2. Caractéristiques .

| | |
|--|-------------------|
| Pression primaire d'amerçage (torr) | $5 \cdot 10^{-6}$ |
| pression limite (torr) | 10^{-6} |
| Quantité d'huile DC704 nécessaire (cm^3) | 300 |
| Débit min. d'eau de refroidissement (l/min) | 1 |
| Tension monophasé d'alimentation (V) | 220 |
| Puissance de chauffage (W) | 800 |
| Débit mini. de la pompe primaire (m^3/h) | 15 |

1.2.2.3. Utilisation

Les ^{pompes} à diffusion permettent d'avoir un vide poussé ; vu qu'elles ont une pression primaire d'apourçage , il est nécessaire que la pompe primaire ait un débit de refoulement assez élevé pour assurer une pression inférieure à $5 \cdot 10^{-1}$ torr au niveau de refoulement de la pompe secondaire .

Pour éviter que les jets de vapeur ne pénètrent dans l'enceinte à vider , un baffle est intercallé entre celle-ci et la pompe à diffusion .

Le nettoyage doit être effectuer tous les 2000 heures de fonctionnement environ .

1.2.2.4. Mise en service . (PL.N°3)

-Verser 300 cm^3 d'huile DC 704 dans le corps de la pompe par l'orifice d'aspiration (8) ou de refoulement (9) .

-Raccorder la pompe à l'enceinte à vider .

-Raccorder la circulation d'eau de refroidissement , l'entrée s'effectue en (6) , la sortie en (7) , puis régler le débit à 1l/mn .

-Effectuer le branchement électrique du réchaud (1) ; prévoir un fusible de 5 A pour 220 V .

-Procéder à un essai d'étanchéité de l'ensemble .

Le temps de montée en température est de l'ordre de 35mn. Lorsqu'on coupe le chauffage , la circulation d'eau doit être maintenue environ 1 heure pour mettre l'intérieur de la pompe à la pression atmosphérique .

1.2.3. Mise en marche de l'installation de pompage

-Mettre la manette d'ouverture (8) en position 1 .

-Raccorder l'enceinte à vider en (10) .

-Appuyer sur le bouton mise en marche (6) de la pompe primaire (1) .

-Appuyer régulièrement sur le bouton (11) jusqu'à la disparition complète de lueur dans le tube témoin (4).

-A ce moment mettre la vanne (8) en position 2 . Le pompage se fait alors dans la pompe secondaire (2) .

-Raccorder les canalisations d'eau de refoulement :

l'entrée dans la pompe secondaire se fait en (12) , la sortie en (13) ,

l'entrée dans le baffle se fait en (14) , la sortie en (15) .

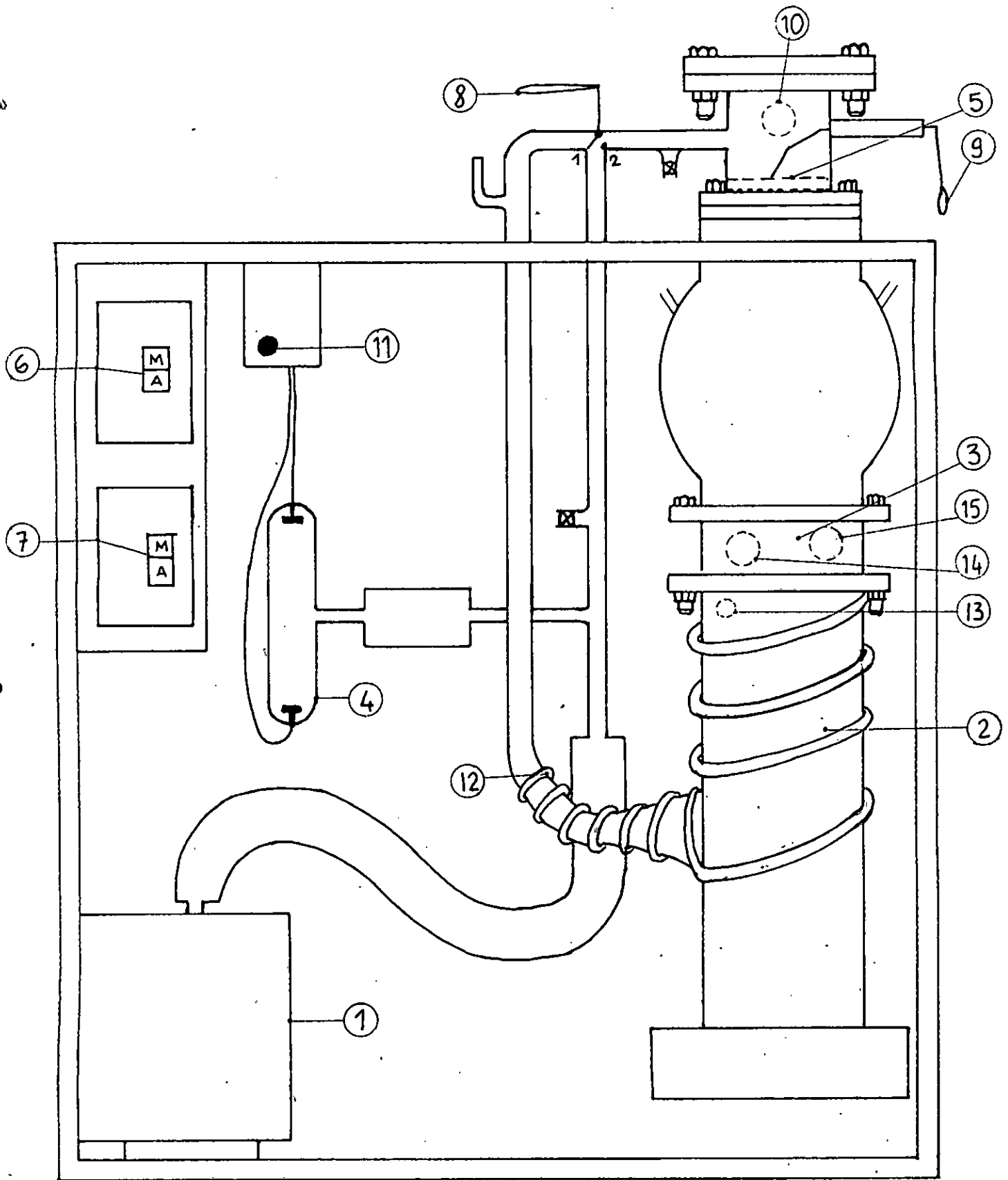
Régler le débit à 1 l/mn .

-Quant le tube témoin s'éteint , ouvrir le couvercle (5) à l'aide du levier articulé (9) .

-Appuyer sur le bouton mise en marche (7) de la pompe secondaire .

-Attention au feu .

-A la fin de l'opération de pompage , maintenir la circulation d'eau de refroidissement durant 1 heure environ .



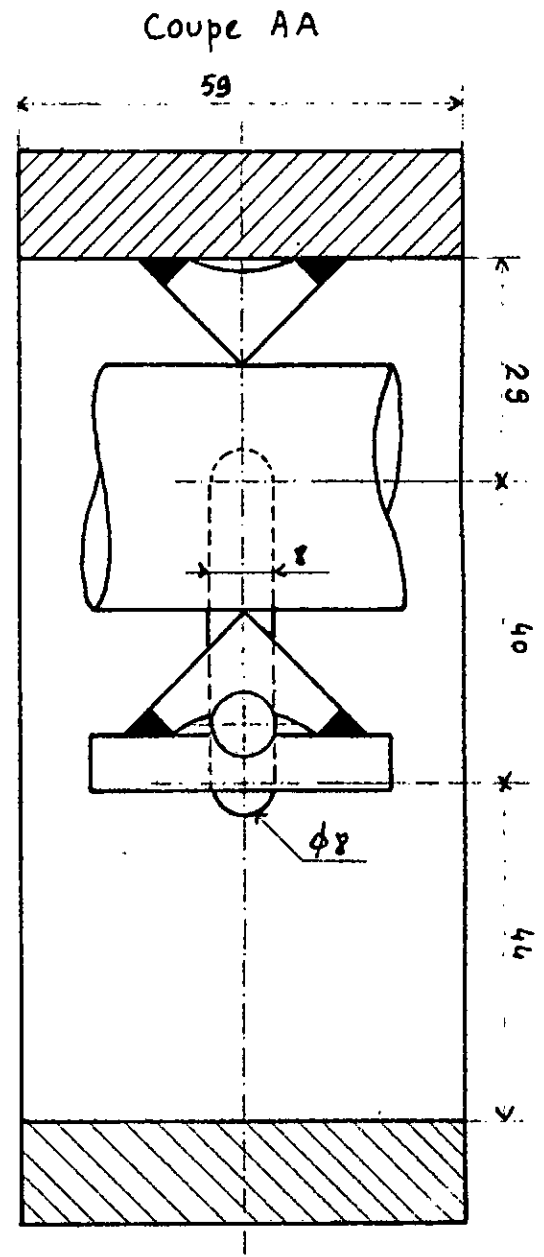
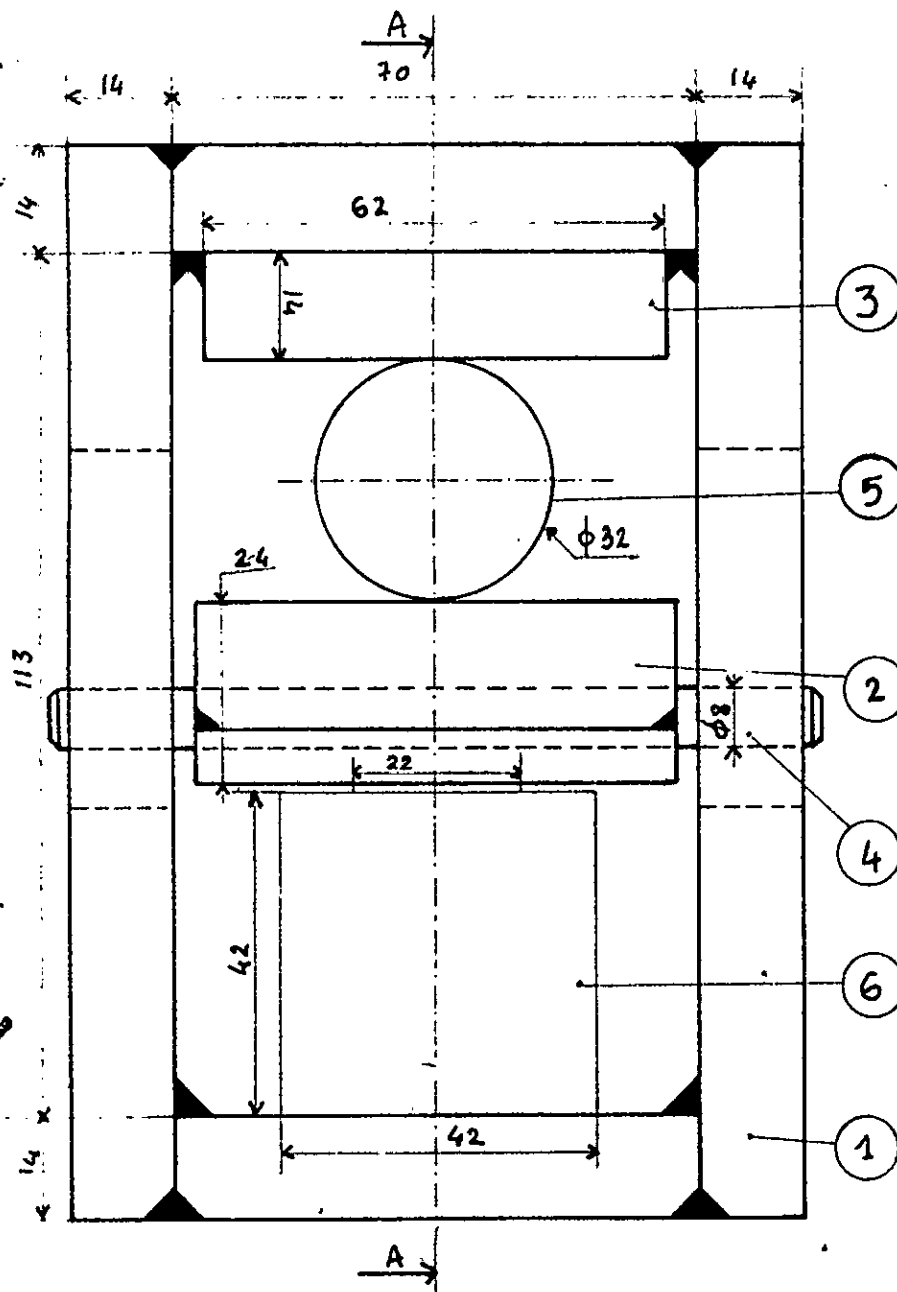
SCHEMA DE L'INSTALLATION DE POMPAGE PL.N°7

1.3. Conception de l'étrangleur .

Vu l'espace disponible autour du tube en cuivre par lequel le vide est obtenu dans l'enceinte , nous avons opté pour un cadre rectangulaire (1) formé de quatre plaques de fer plat assez épaisses (7mm) , soudées entre elles solidement pour résister aux efforts de traction auxquels elles sont soumises, (voir PL. N°1 et 2).

Le tube est étranglé par un étau formé par les arêtes de deux morceaux de cornières de 7 mm d'épaisseur ; l'une (3) est soudée sur la partie supérieure du cadre , l'autre (2) est soudée sur une plaque de fer , entre elles est effectué un alésage qui reçoit la tige (4) . Cette tige glisse dans les rainures faites sur les plaques latérales du cadre .

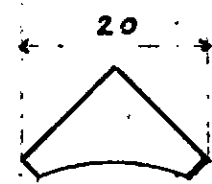
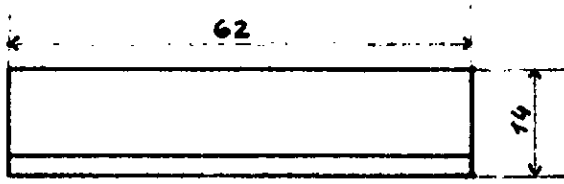
Pour étrangler le tube qui est recouvert d'étain sur sa surface intérieure il est chauffé , puis une fois le cadre posé sur la bouteille suivant la disposition de la PL. N°3 , on place une petite presse hydraulique à huile (6) qui fait translater la pièce (2) , donc son arête grâce à un piston de section plate. Le tube se trouvant entre les arêtes des pièces (2) et (3) qui sont l'une en face de l'autre , est comprimé jusqu'à l'étranglement . On répète la même opération plus haut , l'étain devenu mou couvre la partie supérieure du tube . On décroche ensuite l'enceinte de la pompe . Une soudure est faite à l'étain dans le tube afin de bien obturer le tube .



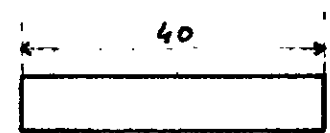
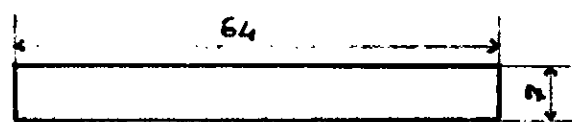
| N° | Nbre | Désignation | Matiere |
|----|------|-------------|---------|
| 1 | 1 | Cadre | Fer |
| 2 | 1 | Arête inf. | " |
| 3 | 1 | Arête sup. | " |
| 4 | 1 | Tige | " |
| 5 | 1 | Tube | Cuivre |
| 6 | 1 | Presse | / |

| | |
|------------|---------|
| Echelle: 1 | PL N° 1 |
| ETRANGLEUR | |

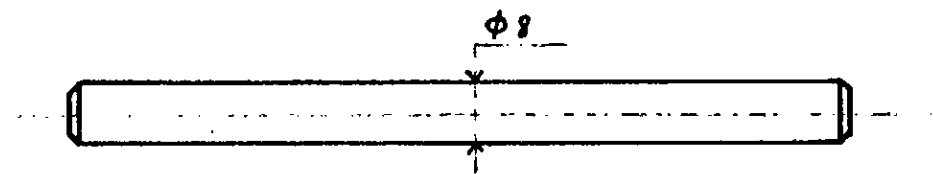
③



②



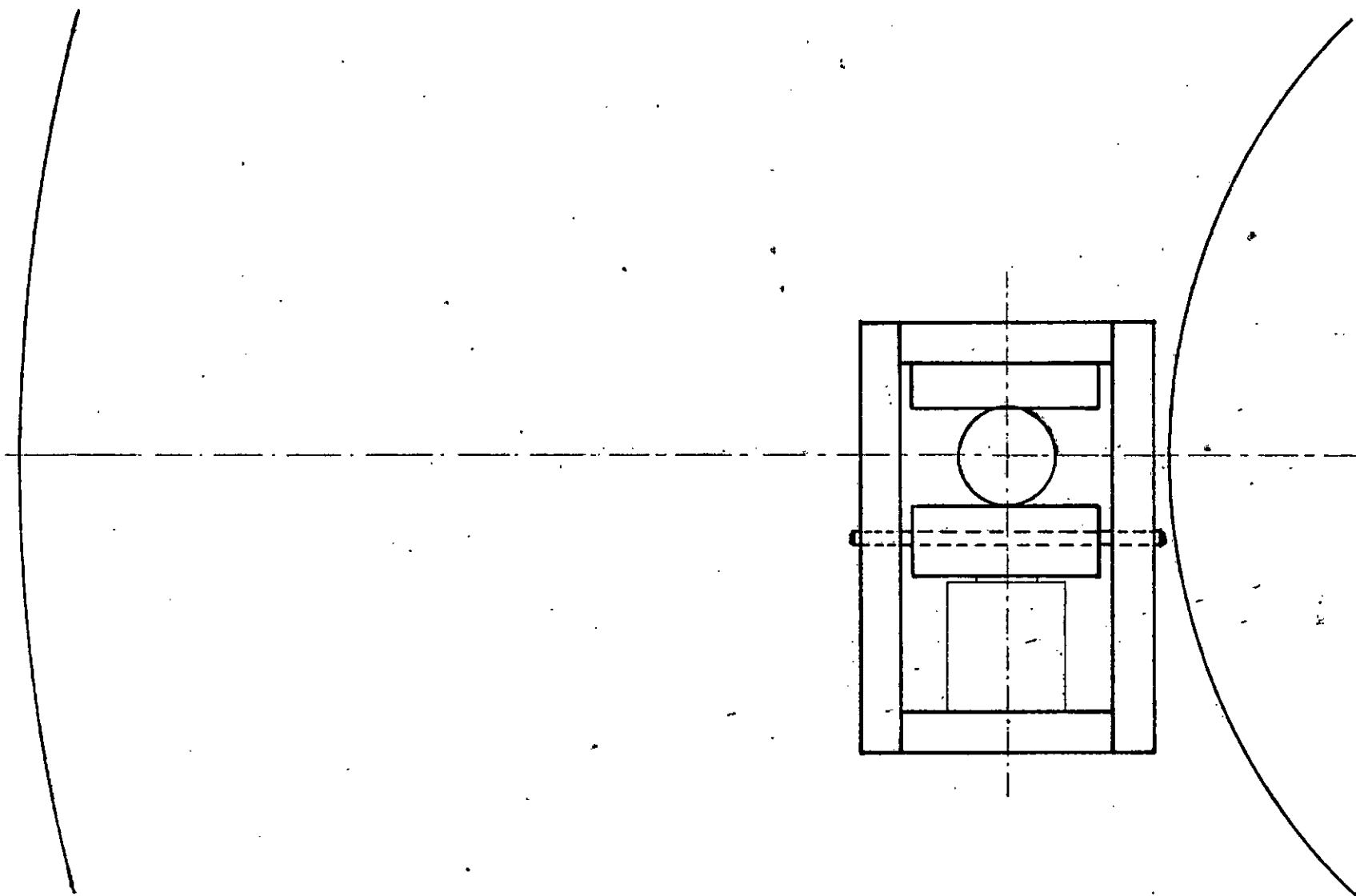
④



Echelle : 1

PL N° 2

ELEMENTS DE L'ETRANGLEUR

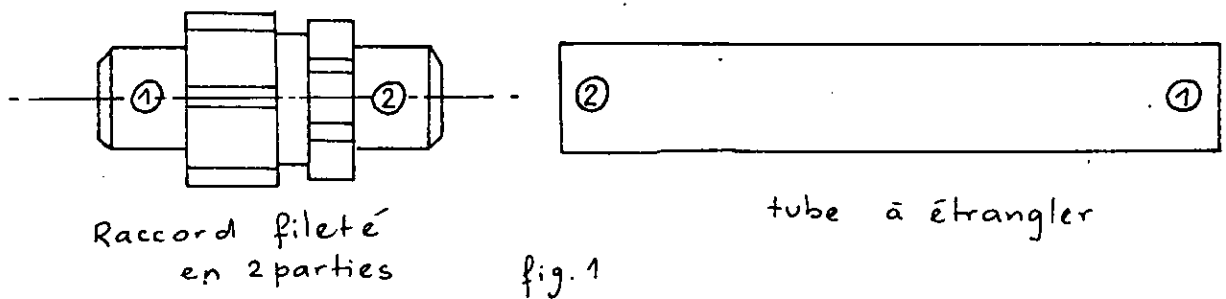


POSITION DU CADRE SUR LA BOUTEILLE.

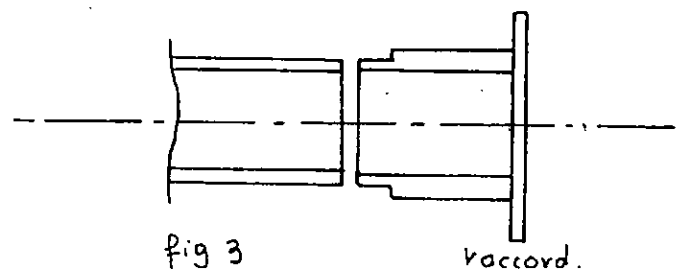
PL. N°3

PREPARATION DES RACCORDEMENTS POUR LA MISE SOUS VIDE.

1. Induire l'intérieur du tube à étrangler avec de l'étain, pour faciliter la prise de soudure d'étain après étranglement et réalisant ainsi une bonne étanchéité.
2. Cette opération consiste à souder le bout ② du raccord fileté avec le bout ② du tube à étrangler; soudure en brasure d'argent.



3. Soudure du bout ① du raccord fileté avec le bout d'un tuyau en boa inox. (brasure d'argent).
4. Soudure du raccord avec l'autre bout du tube en boa inox.
(brasure d'argent.)
voir fig 3 ci-dessous.
5. Soudure d'un tube en cuivre sur l'ancien tube étranglé comme l'indique la figure 2.



6. Faire une orifice à l'aide d'une perceuse manuelle pour permettre la pénétration de CO_2 . (fig. 2)

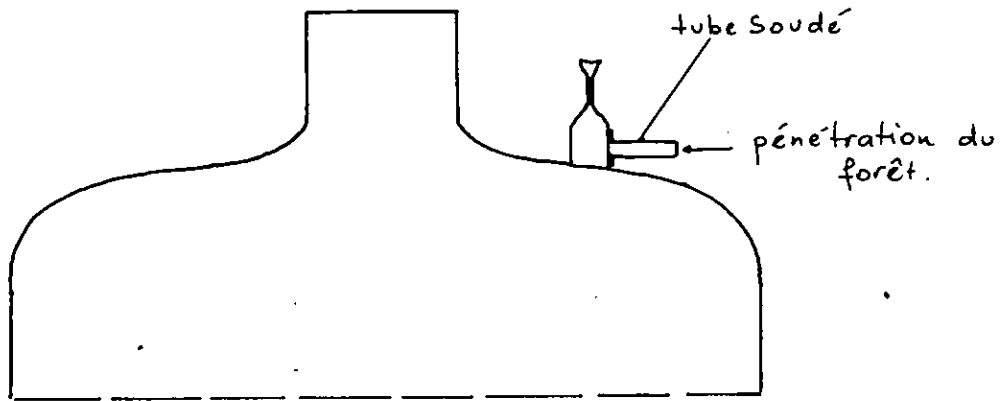


fig. 2. Réservoir Cryogénique.

7. Aussitôt que le forêt est retiré, remplir l'enceinte d'isolation avec du CO_2 . Raison : pour éviter que l'air ne pénètre car il comprend un certain pourcentage de vapeur d'eau qui peut être nuisible à la pompe destinée à créer le vide dans cette enceinte.
8. Dégager l'ancien tube et souder le nouvel ensemble (Soudure en brasure d'argent.)
9. Réaliser le montage général : installation de pompe - enceinte
10. Mise en marche de la pompe. (Voir chapitre I.)
-

Résultats:

Au niveau de l'opération 4 qui consiste à remplir l'enceinte de CO_2 provenant d'une bouteille sous pression, nous avons remarqué que le dispositif de sécurité sur l'enveloppe extérieure était défaillant, ce qui veut dire que l'enceinte contenait de l'air à la pression atmosphérique. Nous avons remédié à cela en recouvrant l'orifice par lequel le vide a été cassé d'une couche de colle puissante (ARALDITE.).

Après la mise en marche, cette fois ce sont les manomètres mesurant le vide, de marque ALCATEL, inutilisés jusqu'alors, qui ne fonctionnent pas.

Une demande de renseignement a été adressée au fournisseur.

Comme les manomètres ne fonctionnent pas, nous avons décidé de procéder comme suit:

- On réalise un certain vide dans l'enceinte,
- On remplit le réservoir d'un gaz liquide.

Si au bout de 2 à 3 jours, le gaz s'est évaporé, c'est que le vide n'est pas assez poussé et qu'il faut encore pomper et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'on constate que l'évaporation du gaz liquide devient faible.

TEXTE DE LA LETTRE ADRESSEE AU FOURNISSEUR

Monsieur

Nous disposons au laboratoire de deux manomètres à vide jaugé :

- Appareil ATH 111 type 5631 N° 220 pour jauge THC 4
- APPAREIL ACF 104 type 5316 N° 436 pour jauge 3051

Ces appareils n'ont jamais servi et nous venons de les mettre en service . Après ce long stockage (4 ans) , aucun de ces appareils n'indique le vide .

L'appareil ATH 111 a été livré avec un cable ayant des prises non adaptées ; les bonnes prises étant livrées à part . la notice est celle du type 5412 qui ne correspond pas du tout ou pas tout à fait à notre appareil . Lors de la mise en marche , quelque soit le seuil , la sécurité est toujours déclenchée (lumière allumée)
L'appareil ACF 104 a été branchée avec sa jauge sur un vide secondaire pendant 30 heures sans résultat . Il ne donne aucune indication quelque soit la gamme utilisée .

Vous seriez bien aimable de nous donner des indications sur la mise en marche de ces appareils et si possible de nous envoyer la notice du type 5631 avec le cablage précis pour le branchement de la jauge THC 4 .

Dans l'espoir que vous puissiez nous aider , croyez monsieur à nos sentiments de respect .

J.P. Muller

Etudiants projet

CONCLUSION

Notre travail sur l'enceinte du réservoir se termine là. C'est une étude inachevée à cause d'une part de la défection des appareils de mesure du vide (la réponse à la lettre adressée au fournisseur nous est parvenue tardivement) et d'autre part à cause des fuites soit au niveau du réservoir soit au niveau de la connection réservoir-pompe. Ce sont ces fuites qui nous ont empêché de procéder à la mise sous vide de l'enceinte, puisque pour le contrôle on a adopté une autre méthode (décrite en détail précédemment).

Nous proposons pour la continuation de cette étude le programme suivant :

- 1- Etudier l'appareillage de mesure
 - 2- Procéder au contrôle des soudures et localiser les éventuelles fuites.
 - 3- Faire des calculs de l'évaluation des pertes du réservoir.
-

Bibliographie

1- Le vide poussé au laboratoire et dans l'industrie

E. Grigorov et v. Kanev

2- Notice technique de la BL 12 102 (50 GEV)

3- Notice technique de la D 150 H 320 (50 GEV)

DEUXIEME PARTIE

LIQUEFACTION DE L'AIR ET

DU GAZ NATUREL

INTRODUCTION

D'une manière générale , le but de cette étude est de dégager la plus avantageuse utilisation du liquéfacteur qu'on dispose à l'école nationale polytechnique .

Pour cela , nous avons fait une série d'essais de liquéfaction d'air et de gaz naturel . Nous nous sommes intéressés beaucoup plus à la liquéfaction du gaz naturel que celle de l'air, car c'est la liquéfaction du gaz naturel qui pose beaucoup plus de problèmes quant à la production .

Pour ces différents essais , nous avons relevé essentiellement

- débit d'eau de refroidissement
- puissance fournie par le moteur
- température d'entrée et de sortie de l'eau de refroidissement
- pression d'hydrogène
- débit de gaz liquide (G.N.L. ou air L.)
- humidité de l'air ambiant
- chronométrage du temps de marche du liquéfacteur .

Pour l'étude proprement dite , nous avons calculé les rendements de liquéfaction , les efficacités de liquéfaction .

Un calcul des pertes de gaz naturel au cours de sa liquéfaction . a été fait .

Nous avons représenté sur des graphes l'évolution de la production du gaz naturel et air liquides et du rendement de liquéfaction au cours du temps de marche du liquéfacteur . D'autres courbes ont été nécessaires pour pouvoir arriver à une conclusion .

Gaz a' Liquifier AIR

 $\rho_{air} = 0,764 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{air liq} = 855 \text{ kg/m}^3$

Essai N° 1

9/4/77

| Temps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d' eau m ³ | debit d'eau l/s | t°c eau entree | t°c eau sortie | P Hz kg/cm ² | m ³ air kg/s | m ³ air liquide g/mn | m ³ air liquide l/h | P moteur cap froid kw | t°c thermom. humide | % humid. |
|-----------------------|---|---|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|-------------|
| 0 | 1096,0 | 250,2 | | 13 | | | | 0 | 0 | | 14 | 70 |
| 2 | | | | " | | | | " | " | 0,540 | | |
| 3 | | | | " | | | | " | " | 0,645 | | |
| 3.30 | | | | " | | | | " | " | 0,690 | | |
| 4 | | | | " | | | | " | " | 0,705 | | |
| 5 | | | | " | | | | " | " | 0,750 | | |
| 5.30 | | | | " | | | | " | " | 0,780 | | |
| 6 | | | | " | | | | " | " | 0,810 | | |
| 6.30 | | | | " | | | | " | " | 0,840 | | |
| 7 | | | | " | | | | " | " | 0,870 | | |
| 7.30 | | | | " | | | | " | " | 0,870 | | |
| 8 | | | | " | | | | " | " | 0,900 | | |
| 8.30 | | | | " | | | | " | " | 0,930 | | |
| 10 | | | | " | | | | " | " | 0,945 | | |
| 17.30 | | | | " | | | | " | " | 0,960 | | |

Gaz a' liquifier AIR

 $\rho_{air} = 0,764 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{air \text{ liq}} = 855 \text{ kg/m}^3$

ESSAI N°1

9/4/77

| temps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d'eau m ³ | débit d'eau l/s | t° eau entrée °C | t° eau sortie °C | P H ₂ · kg/cm ² | m ³ air kg/s | m ³ air liquide g/mn | m ³ air liquide l/h | P moteur cap. froid kw | t° C ther mo. humide | % humid. |
|--------------------|----------------------------------|---|-----------------|------------------|------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------|----------------------|----------|
| 19 | 1096,6 | 251,40 | | 13 | 28 | 22,2 | | 0 | 0 | 0,960 | 14 | 70% |
| 21 | 1096,7 | 251,42 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,960 | | |
| 23 | 1096,7 | 251,44 | 0,166 | " | " | 22,5 | | | | 0,963 | | |
| 26 | 1096,7 | 251,46 | 0,111 | " | " | 22,7 | | | | 0,990 | | |
| 31 | 1096,8 | 251,56 | 0,333 | " | 29 | 23 | | | | 1,050 | | |
| 34 | 1096,9 | | | " | " | " | | | | 0,990 | | |
| 36 | 1096,9 | 251,58 | | 14,5 | " | " | | | | 0,990 | | |
| 39 | 1097,0 | 251,60 | 0,111 | " | " | " | | | | 0,966 | | |
| 41 | 1097,0 | 251,62 | 0,166 | " | " | " | | | | 0,996 | | |
| 43 | 1097,1 | 251,64 | 0,166 | " | " | " | | 85 | 5,95 | 1,005 | | |
| 48 | 1097,2 | 251,70 | 0,200 | " | " | " | | 99 | 6,93 | 0,975 | | |
| 56 | 1097,3 | 251,78 | 0,166 | 14 | 28,5 | " | | 99 | 6,93 | 0,975 | | |
| 63 | 1097,4 | 251,85 | 0,166 | " | " | 22,8 | | 99 | 6,93 | 0,975 | | |
| 66 | 1097,5 | 251,89 | 0,222 | 14,5 | " | 22,8 | | 98 | 6,86 | 0,975 | | |

Gaz à Liquifier AIR

 $\rho_{\text{air}} = 0,764 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{\text{air liq}} = 855 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

ESSAI N° 2

10/4/77

| Temps de mesure en mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d'eau m ³ | debit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P Hu kg/cm ² | m° air kg/s | m° air liquide g/mn | m° air liquide l/h | P moteur cap. froid Kw | t°c thermo. humide | % humidif. |
|-----------------------|----------------------------------|---|-----------------|----------------|----------------|-------------------------|-------------|---------------------|--------------------|------------------------|--------------------|------------|
| 0 | | 252,386 | | 13 | 19 | 19 | | 0 | 0 | 0 | 14 | 70 |
| 1 | 1098,2 | 252,398 | 0,200 | " | 20 | 21 | | " | " | 0,435 | | |
| 2 | " | 252,408 | 0,166 | " | 22 | 21,2 | | " | " | 0,480 | | |
| 3 | " | 252,420 | 0,200 | " | 22,5 | " | | " | " | 0,540 | | |
| 4 | " | 252,431 | 0,183 | " | 23 | 21,3 | | " | " | 0,592 | | |
| 5 | " | 252,442 | 0,183 | " | " | 21,5 | | " | " | 0,645 | | |
| 6 | 1098,3 | 252,455 | 0,216 | " | 24 | " | | " | " | 0,705 | | |
| 7 | " | 252,466 | 0,183 | " | 24,5 | 21,7 | | " | " | 0,757 | | |
| 8 | " | 252,476 | 0,166 | " | 25 | 21,9 | | " | " | 0,810 | | |
| 9 | " | 252,490 | 0,433 | " | " | 22 | | " | " | 0,862 | | |
| 10 | " | 252,500 | 0,166 | " | 25,5 | " | | " | " | 0,900 | | |
| 11 | " | 252,512 | 0,200 | " | 26 | " | | " | " | 0,940 | | |
| 12 | " | 252,523 | 0,183 | " | " | 22,2 | | " | " | 0,952 | | |
| 13 | " | 252,535 | 0,200 | " | " | " | | " | " | 0,960 | | |
| 14 | 1098,4 | 252,545 | 0,166 | " | 26,5 | " | | " | " | 0,960 | | |

Gaz air liquifier AIR $\rho_{\text{air}} = 0,764 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{\text{air liq}} = 811 \text{ kg/m}^3$

ESSAI N° 3

10/4/77

| temps de mesure en mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d'eau m ³ | débit d'eau l/s | t ^{oc} eau entrée | t ^{oc} eau sortie | P H ₂ Kg/cm ² | m ^o air kg/s | m ^o air liquide g/mn | m ^o air liquide l/h | P moteur cap Kw | t ^{oc} therma. humide | % humid |
|-----------------------|----------------------------------|---|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|---------|
| 0 | 1099,3 | 253,255 | | 12,5 | 16,5 | 18 | | 0 | 0 | 0 | 14 | 70 |
| 30 | " | 253,257 | 0,07 | 13 | 21 | 21,5 | | " | " | 0,495 | | |
| 1 | " | 253,265 | 0,27 | " | 22 | " | | " | " | 0,525 | | |
| 1.30 | " | 253,270 | 0,17 | " | " | " | | " | " | 0,570 | | |
| 2 | " | 253,275 | 0,17 | " | 23 | " | | " | " | 0,600 | | |
| 2.30 | 1099,4 | 253,282 | 0,23 | " | " | " | | " | " | 0,630 | | |
| 3 | " | 253,283 | 0,03 | " | 23,5 | 21,6 | | " | " | 0,660 | | |
| 3.30 | " | 253,291 | 0,27 | " | 24 | " | | " | " | 0,697 | | |
| 4 | " | 253,298 | 0,23 | " | " | 21,7 | | " | " | 0,720 | | |
| 4.30 | " | 254,303 | 0,17 | " | 24,5 | 22 | | " | " | 0,757 | | |
| 5 | " | 254,310 | 0,23 | " | 25 | " | | " | " | 0,780 | | |
| 5.30 | " | 254,316 | 0,20 | " | " | " | | " | " | 0,810 | | |
| 6 | " | 254,320 | 0,13 | " | " | " | | " | " | 0,840 | | |
| 6.30 | " | 254,325 | 0,17 | " | 25,5 | " | | " | " | 0,870 | | |
| 7 | " | 254,332 | 0,23 | " | 26 | 22,2 | | " | " | 0,885 | | |

Gaz à liquéfier AIR

$\rho_{air} = 0,767 \frac{kg}{m^3}$

$\rho_{air liq} = 855 \frac{kg}{m^3}$

ESSAI N° 3

10/4/77

| temps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d'eau m ³ | débit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P H ₂ kg/cm ² | m ³ air kg/s | m ³ air liquide g/mn | m ³ air liquide l/h | P moteur cap. P Kw | t°c thermo. humide | % humi di |
|--------------------|----------------------------------|---|-----------------|----------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| 7.30 | " | 254, 338 | 0,20 | 13 | 26 | 22,2 | | " | " | 0,907 | 14 | 70 |
| 8 | " | 254, 344 | 0,20 | " | " | " | | " | " | 0,915 | | |
| 8.30 | 1099,5 | 254, 350 | 0,20 | " | " | " | | " | " | 0,930 | | |
| 9 | " | 254, 356 | 0,20 | " | 26,5 | " | | " | " | 0,945 | | |
| 9.30 | " | 254, 360 | 0,13 | " | 26,5 | " | | " | " | " | | |
| 10 | " | 254, 367 | 0,23 | " | " | " | | " | " | " | | |
| 10.30 | " | 254, 372 | 0,17 | " | " | " | | " | " | " | | |
| 11 | " | 254, 377 | 0,17 | " | 27 | " | | " | " | " | | |
| 13.30 | " | 254, 406 | 0,14 | " | " | 22,4 | | " | " | " | | |
| 15 | " | 254, 424 | 0,20 | " | " | 22,6 | | " | " | 0,960 | | |
| 16 | 1099,6 | 254, 435 | 0,18 | " | " | 22,8 | | " | " | 0,967 | | |
| 17 | " | 254, 478 | 0,72 | " | " | " | | 52,5 | 3,675 | 0,975 | | |
| 19 | " | 254, 502 | 0,40 | " | " | " | | | | 1,012 | | |
| 22 | 1099,7 | 254, 535 | 0,18 | " | " | " | | | | 1,027 | | |
| 25 | " | 254, 565 | 0,17 | " | " | " | | | | 0,960 | | |

Gaz a' liquifier AIR

 $\rho_{\text{Air}} = 0,764 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{\text{air liq}} = 855 \text{ kg/m}^3$

ESSAI N° 4

11/4/77

| Temps de mesure mn | indication compteur horaire h | indication compteur d'eau m ³ | debit d'eau l/s | t°c eau entree | t°c eau sortie | P Hz kg/cm ² | m air kg/s | m air liquide g/mn | m air liquide l/h | P cop. moteur p. froid kw | t°c thermo. humide | % humidite |
|--------------------|-------------------------------|--|-----------------|----------------|----------------|----------------------------|---------------|--------------------|-------------------|---------------------------------|-----------------------|------------|
| 0 | | | | 12,5 | | 21,5 | | 0 | 0 | 0 | 14 | 70 |
| 11 | | | | " | 25 | 22 | | " | " | 0,825 | | |
| 12 | | | | " | 26 | " | | " | " | 0,855 | | |
| 13 | | | | " | " | " | | " | " | 0,900 | | |
| 14 | | | | " | " | " | | " | " | 0,930 | | |
| 15 | | | | " | " | " | | " | " | 0,945 | | |
| 16 | | | | " | " | " | | " | " | 0,952 | | |
| 17 | | | | " | " | " | | " | " | " | | |
| 18 | | | | " | " | " | | 33 | 2,310 | " | | |
| 20 | | | | 12 | 27,5 | 22,5 | | | | 0,960 | | |
| 28 | | | | 12 | 28 | 22,7 | | | | 0,975 | | |
| 32 | | | | " | " | " | | | | 0,997 | | |
| 35 | | | | " | " | 22,8 | | | | 1,035 | | |
| 38 | 1104,6 | 255,195 | | " | " | 22,6 | | | | 0,975 | | |
| 40 | " | 255,218 | 0,190 | " | " | " | | | | " | | |

Gaz à liquéfier AIR

 $P_{\text{AIR}} = 0,764$ $P_{\text{air liq.}} = 855 \text{ kg/m}^3$

ESSAI N° 5

12/4/77

| Temps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d'eau m ³ | débit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P H ₂ kg/cm ² | m° air kg/s | m° air liq. g/mn | m° air liq. l/h | P moteur cog. froid (kw) | t°c thermo. humide | % humidité |
|--------------------|----------------------------------|---|-----------------|----------------|----------------|-------------------------------------|-------------|------------------|-----------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 0 | 1102,6 | 255,870 | | 18 | 17 | 18 | | 0 | 0 | 0 | 14 | 70 |
| 30 | " | 255,876 | 0,200 | " | " | 21 | | " | " | 0,420 | | |
| 1 | " | 255,884 | 0,266 | " | 20 | " | | " | " | 0,450 | | |
| 2 | " | 255,891 | 0,116 | " | " | 21,2 | | " | " | 0,495 | | |
| 2.30 | " | 255,897 | 0,200 | " | 21 | " | | " | " | 0,525 | | |
| 3 | " | 255,902 | 0,166 | " | 21,5 | 21,3 | | " | " | 0,555 | | |
| 3.30 | " | 255,908 | 0,200 | " | 22 | " | | " | " | 0,577 | | |
| 4 | " | 255,916 | 0,266 | " | " | " | | " | " | 0,613 | | |
| 4.30 | " | 255,922 | 0,200 | " | 23 | 21,5 | | " | " | 0,645 | | |
| 5 | " | 255,927 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,673 | | |
| 5.30 | " | 255,931 | 0,133 | " | " | " | | " | " | 0,690 | | |
| 6 | " | 255,937 | 0,200 | " | " | 21,6 | | " | " | 0,720 | | |
| 6.30 | " | 255,944 | 0,233 | " | 23,5 | 21,7 | | " | " | 0,750 | | |
| 7 | 1102,7 | 255,949 | 0,166 | " | 24 | " | | " | " | 0,780 | | |
| 7.30 | " | 255,956 | 0,233 | " | " | 21,8 | | " | " | 0,810 | | |

Gaz à liquifier AIR

 $\rho_{\text{air}} = 0,764 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{\text{air liq}} = 855 \text{ kg/m}^3$

ESSAI N° 5

12/4/77

| temps de mesure mn | indication compteur horaire h | indication du compteur d'eau m ³ | débit d' eau l/s | t° eau, entrée | t° eau, sortie | P H ₂ kg/cm ² | m ^o air kg/s | m ^o air liq. g/mn | m ^o air liq. l/h | P moteur cop. froid Rw | t° thermo. humide | % humidité |
|-----------------------|--|---|------------------------|----------------------|----------------------|--|----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------|
| 8 | 1102,7 | 255,960 | 0,133 | 12 | 24 | 22 | | 0 | 0 | 0,825 | 14 | 70 |
| 8.30 | | 255,966 | 0,200 | | 24,5 | | | | | 0,853 | | |
| 9 | | 255,972 | 0,200 | | 25 | | | | | 0,892 | | |
| 9.30 | | 255,977 | 0,166 | | | | | | | 0,915 | | |
| 10 | | 255,982 | 0,166 | | | 22,2 | | | | 0,930 | | |
| 10.30 | | 255,988 | 0,200 | | | | | | | 0,945 | | |
| 11 | | 255,993 | 0,166 | | | | | | | 0,957 | | |
| 11.30 | | 256,000 | 0,233 | | 25,2 | | | | | 0,960 | | |
| 12 | | 256,006 | 0,200 | | 25,5 | | | | | 0,967 | | |
| 12.30 | | 256,011 | 0,166 | | | | | | | 0,963 | | |
| 13 | | 256,018 | 0,233 | | | | | | | 0,960 | | |
| 13.30 | | 256,024 | 0,200 | | 26 | | | | | 0,967 | | |
| 14 | 1102,8 | 256,029 | 0,166 | | | | | | | 0,967 | | |
| 14.30 | | 256,034 | 0,166 | | | 22,3 | | | | 0,972 | | |
| 15 | | 256,040 | 0,200 | | | | | | | 0,967 | | |

Gaz a' liquifier Air

$\rho_{air} = 0,764$

$\rho_{air liq.} = 855 \text{ kg/m}^3$

ESSAI N° 6

12/4/77

| Temps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d'eau m ³ | débit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P Hz kg/cm ² | m ³ air kg/s | m ³ air liq. g/mn | m ³ air liq. l/h | P _{cap} mètre eau froid | t°c thermomètre humide | % humidité |
|--------------------|----------------------------------|---|-----------------|----------------|----------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------------|------------|
| 0.30 | | | | 12 | 20 | 21,4 | | | | 0,435 | | |
| 1 | | | | " | " | " | | | | 0,472 | | |
| 2 | | | | " | 21 | " | | | | 0,538 | | |
| 2.30 | | | | " | 22 | " | | | | 0,562 | | |
| 3 | | | | " | " | " | | | | 0,592 | | |
| 3.30 | | | | " | 23 | " | | | | 0,630 | | |
| 4.30 | | | | " | " | 21,5 | | | | 0,675 | | |
| 5 | | | | " | 24 | 21,6 | | | | 0,705 | | |
| 5.30 | | | | " | " | 21,7 | | | | 0,735 | | |
| 6 | 1103,3 | | | " | 25 | 21,8 | | | | 0,765 | | |
| 6.30 | " | | | " | " | " | | | | 0,795 | | |
| 7 | " | | | " | " | 21,9 | | | | 0,825 | | |
| 7.30 | " | | | " | " | 22 | | | | 0,855 | | |
| 8 | " | | | " | " | " | | | | 0,870 | | |
| 8.30 | " | | | " | 26 | " | | | | 0,900 | | |

Gaz à liquéfier AIR

$$\rho_{\text{air}} = 0,764 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{Air liq.}} = 855 \text{ kg/m}^3$$

ESSAI N°6

12/4/77

| temps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur eau m ³ | débit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P Hz kg/cm ² | débit air kg/s | m ³ air liq g/mn | m ³ air liq. l/h | P moteur froid cop. P _{kw} | t°c therm. humide | % humidité |
|--------------------|----------------------------------|---|-----------------|----------------|----------------|-------------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------|------------|
| 9 | | | | 12 | 26 | | | | | 0,915 | | |
| 9.30 | | | | | | | | | | 0,937 | | |
| 10 | | | | | | | | | | 0,945 | | |
| 10.30 | 1103,4 | | | | | 22 | | | | 0,960 | | |
| 11 | | | | | | 22,1 | | | | 0,967 | | |
| 11.30 | | | | | | 22,2 | | | | 0,967 | | |
| 12 | | | | | | 22,3 | | | | 0,967 | | |
| 12.30 | | | | | | | | | | 0,967 | | |
| 13 | | | | | | 22,4 | | | | 0,960 | | |
| 13.30 | | | | | | | | | | 0,960 | | |
| 14 | | | | | | 22,5 | | | | 0,960 | | |
| 14.30 | | | | | | | | | | 0,960 | | |
| 15 | | | | | | 22,6 | | | | 0,967 | | |
| 20 | 1103,5 | | | | 27 | 22,7 | | 52,5 | 3,675 | 0,967 | | |
| 25.30 | 1103,6 | | | | | | | | | 0,984 | | |

ESSAI Gaz à liquifier AIR

 $P_{\text{Air}} = 0,764 \text{ kg/m}^3$ $P_{\text{Air liq.}} = 855 \text{ kg/m}^3$

ESSAI N° 6

12/4/77

| temps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d'eau | débit d'eau l/s | t°C eau entrée | t°C eau sortie | P Hz Kg/cm ² | débit air kg/s | débit air liq. g/mn | débit air liq. l/h | P moteur froid cop. kW | t°C thermo-humide | % humidité |
|--------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------------|----------------|---------------------|--------------------|------------------------|-------------------|------------|
| 30 | 1103,7 | 256,842 | | 12 | 27 | 22,8 | | 80,83 | 5,658 | 1,035 | | |
| 35 | 1103,8 | 256,900 | 0,193 | " | 26 | 22,5 | | | | 0,967 | | |
| 40 | " | 256,953 | 0,176 | " | " | 22,6 | | 87,85 | 6,149 | 0,973 | | |
| 45 | 1103,9 | 257,022 | 0,00023 | " | " | 22,5 | | 93,33 | 6,533 | 0,967 | | |
| 55 | 1104,1 | 257,124 | 0,170 | " | " | " | | | | 0,973 | | |
| 60 | 1104,2 | 257,181 | 0,190 | " | " | " | | | | 0,963 | | |
| 65 | 1104,3 | 257,304 | 0,410 | " | " | 22,2 | | 92,50 | 6,475 | 0,967 | | |
| 70 | 1104,4 | 257,360 | 0,186 | " | " | 22,1 | | 90,83 | 6,358 | 0,952 | | 68% |
| 80 | 1104,5 | 257,419 | 0,196 | " | " | 22 | | 92,85 | 6,499 | 0,945 | | |
| 85 | 1104,6 | 257,475 | 0,186 | " | " | " | | | | 0,945 | | 72% |
| 90 | 1104,7 | 257,532 | 0,190 | " | " | " | | 91,66 | 6,416 | 0,960 | | |
| 101 | 1104,8 | 257,656 | 0,188 | " | " | " | | | | 0,952 | | |
| 110 | 1104,9 | 257,757 | 0,240 | " | " | " | | | | 0,952 | | 70% |
| 115 | 1105,1 | 257,815 | 0,193 | " | " | " | | 91,66 | 6,416 | 0,952 | | |
| 125 | 1105,3 | 257,928 | 0,188 | " | " | " | | 81,90 | 5,733 | 0,960 | | 74% |

Gaz à liquifier AIR

$$\rho_{\text{air}} = 0,764 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{air liq.}} = 855 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

ESSAI N° 7

13/4/77

| temps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d'eau m ³ | débit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P Hz kg/cm ² | m° air kg/s | m° air liq. g/mn | m° air liq. l/h | P cop. moteur froid kW | t°c thermo. humide | % humidité |
|--------------------|----------------------------------|---|-----------------|----------------|----------------|-------------------------|-------------|------------------|-----------------|------------------------|--------------------|------------|
| 0 | 1105,6 | 257,310 | | 12 | 17,5 | 19 | | 0 | 0 | 0 | | |
| 0.30 | " | 257,314 | 0,133 | " | 18 | 21 | | " | " | 0,397 | | |
| 1 | " | 257,320 | 0,200 | " | 19,5 | 21,5 | | " | " | 0,420 | | |
| 1.30 | " | 257,325 | 0,166 | " | 20 | " | | " | " | 0,450 | | |
| 2 | " | 257,330 | 0,166 | " | 21 | " | | " | " | 0,480 | | |
| 2.30 | " | 257,335 | 0,166 | " | 22 | " | | " | " | 0,510 | | |
| 3 | " | 257,340 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,530 | | |
| 3.30 | 1105,7 | 257,345 | 0,166 | " | 22,5 | " | | " | " | 0,570 | | |
| 4 | " | 257,350 | 0,166 | " | 23 | 21,6 | | " | " | 0,600 | | |
| 4.30 | " | 257,358 | 0,266 | " | " | " | | " | " | 0,620 | | |
| 5 | " | 257,362 | 0,133 | " | " | 21,7 | | " | " | 0,640 | | |
| 5.30 | " | 257,367 | 0,166 | " | 23,5 | " | | " | " | 0,690 | | |
| 6 | " | 257,375 | 0,266 | " | 24 | 21,8 | | " | " | 0,720 | | |
| 6.30 | " | 257,380 | 0,166 | " | " | 21,9 | | " | " | 0,750 | | |
| 7 | " | 257,385 | 0,166 | " | 24,5 | 22 | | " | " | 0,780 | | |

Gas à liquifier AIR

$\rho_{air} = 0,764 \frac{kg}{m^3}$

$\rho_{air liq} = 855 \frac{kg}{m^3}$

ESSAI N° 7

13/4/77

| emps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d'eau m ³ | débit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P H ₂ kg/cm ² | m ³ air kg/s | m ³ air liq g/mn | m ³ air liq l/h | P moteur cop. froid kW | t°c thermo: humide | % humidité |
|-------------------|----------------------------------|---|-----------------|----------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|------------|
| 7.30 | 1105,7 | 257,390 | 0,166 | 12 | 24,5 | 22 | | 0 | 0 | 0,802 | | |
| 8 | " | 257,395 | 0,166 | " | 25 | " | | " | " | 0,825 | | |
| 8.30 | " | 258,400 | 0,166 | " | " | 22,1 | | " | " | 0,855 | | |
| 9 | 1105,8 | 258,407 | 0,233 | " | 25,5 | 22,2 | | " | " | 0,877 | | |
| 9.30 | " | 258,412 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,900 | | |
| 10 | " | 258,417 | 0,166 | " | 26 | " | | " | " | 0,915 | | |
| 10.30 | " | 258,422 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,930 | | |
| 11 | " | 258,428 | 0,200 | " | " | 21,1 | | " | " | 0,945 | | |
| 11.30 | " | 258,433 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,960 | | |
| 12 | " | 258,440 | 0,233 | " | " | 22,2 | | " | " | 0,960 | | |
| 12.30 | " | 258,445 | 0,166 | " | 26,5 | " | | " | " | 0,960 | | |
| 13 | " | 258,450 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,960 | | |
| 14 | " | 258,460 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,960 | | |
| 14.30 | " | 258,465 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,960 | | |
| 20 | 1105,9 | 258,527 | 0,188 | " | 27 | 22,7 | | 41,6 | 2,912 | 0,990 | | |

Gaz a' liquifier AIR

$\rho_{air} = 0,764 \text{ kg/m}^3$ - $\rho_{air \text{ liq}} = 855 \text{ kg/m}^3$

ESSAI N° 7

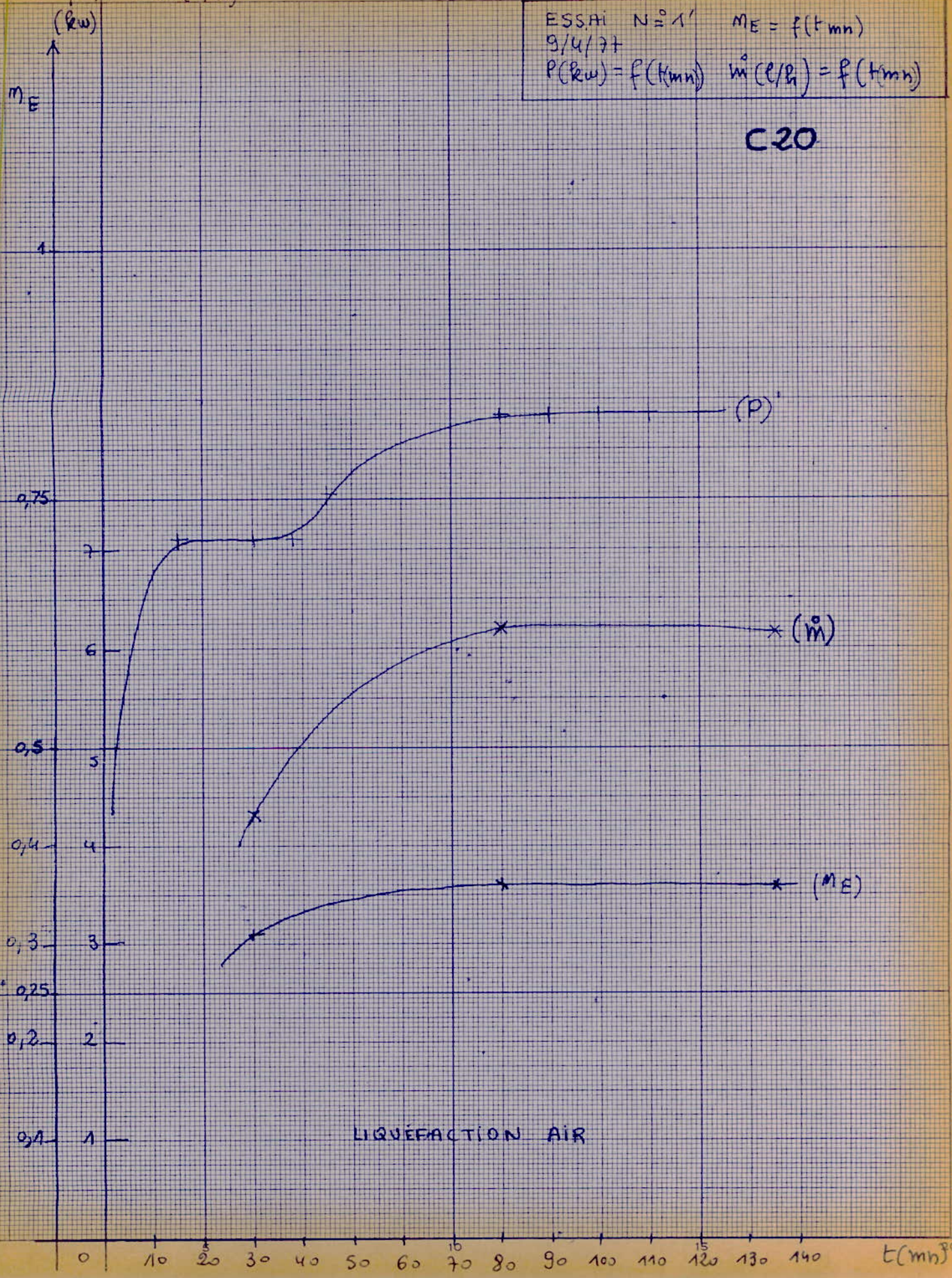
13/4/77

| Temps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d'eau m ³ | debit d'eau l/s | t°c eau. entree | t°c eau. sortie | P Hz Kg/cm ² | m ³ air Kg/s | m ³ air liq. g/mn | m ³ air liq. l/h | P moteur cap. froid Kw | t°c thermo. humide | % humidite |
|--------------------|----------------------------------|---|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------|------------|
| 25 | 1106,0 | 258,580 | 0,183 | 12 | 27,5 | 22,8 | | 60 | 4,20 | 1,027 | | |
| 30 | 1106,1 | 258,635 | 0,178 | // | 27 | 22,5 | | 60 | 4,20 | 0,967 | | |
| 35.30 | 1106,2 | 258,694 | 0,178 | // | // | 22,6 | | 73 | 5,11 | 0,967 | 13 | 52% |
| 40 | 1106,3 | 258,743 | 0,181 | // | // | // | | 79 | 5,53 | 0,975 | 14 | 52% |
| 45 | 1106,4 | 258,797 | 0,180 | // | // | // | | 83 | 5,81 | 0,973 | 14,5 | 53% |
| 50 | " | 258,852 | 0,183 | // | // | 22,5 | | 83 | 5,81 | 0,963 | 13 | 43% |
| 56 | 1106,5 | 258,915 | 0,175 | // | // | // | | | | 0,972 | 13,5 | 46% |
| 60 | 1106,6 | 258,959 | 0,183 | // | // | // | | 85 | 5,95 | 0,975 | 13,5 | 49% |
| 65 | 1106,7 | 259,014 | | // | // | // | | 85 | 5,95 | 0,972 | | |
| 70 | 1106,8 | 259,069 | 0,183 | // | // | // | | | | 0,970 | | |
| 75 | 1106,9 | 259,122 | 0,176 | // | // | 22,6 | | 85 | 5,95 | 0,975 | | |
| 80 | " | 259,175 | 0,176 | // | // | // | | | | 0,975 | | |
| 85 | 1107,0 | 259,230 | 0,183 | // | // | // | | 85 | 5,95 | 0,975 | 13 | 49% |
| 90 | 1107,1 | 259,327 | 0,523 | // | // | 22,5 | | 85 | 5,95 | 0,975 | | |

$\rho \wedge \dot{m}_{air} (l/h)$

ESSAI N° 1'
 9/4/77
 $P(\rho_w) = f(t_{mn})$ $\dot{m} (l/h) = f(t_{mn})$
 $m_E = f(t_{mn})$

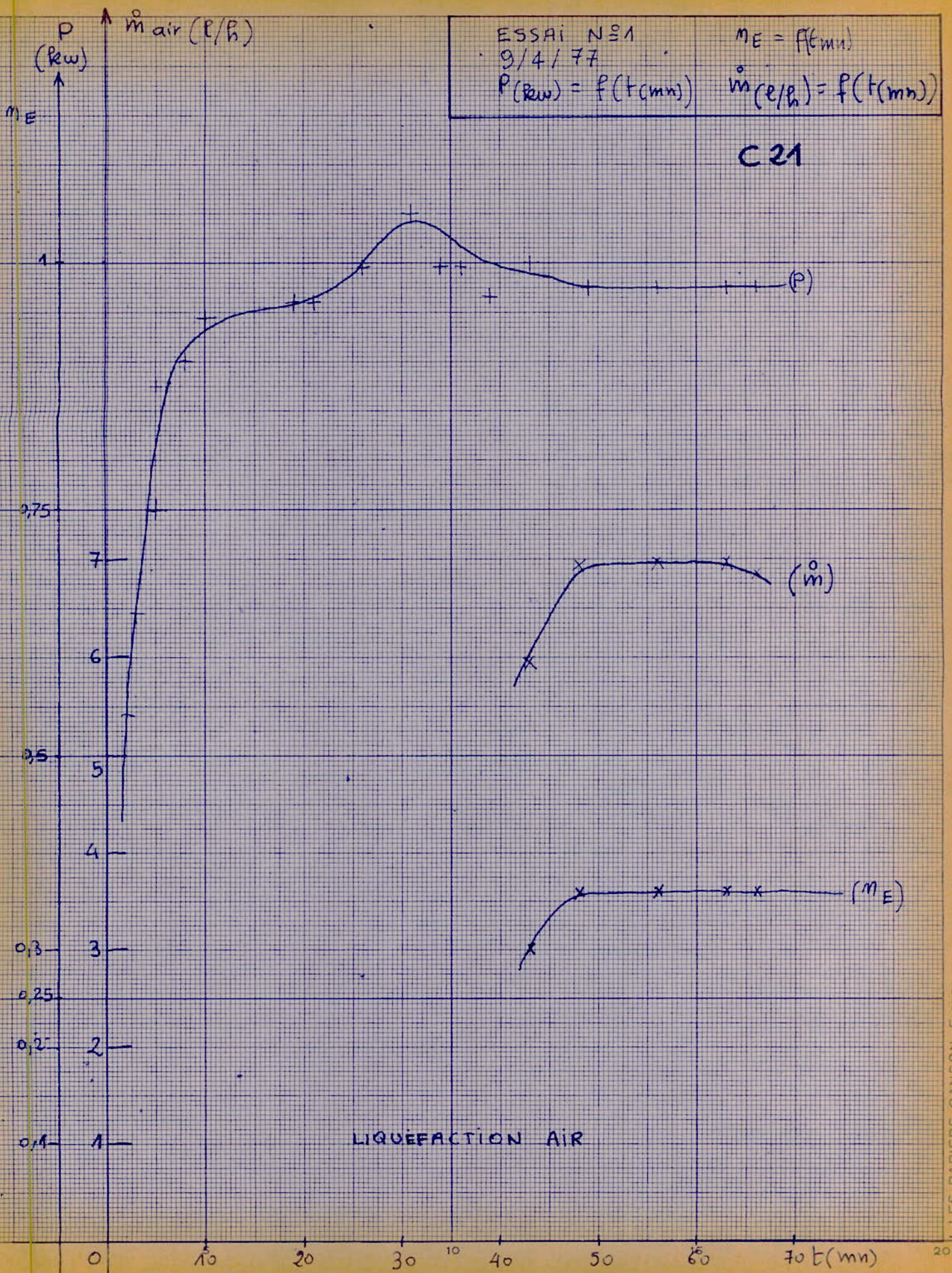
C20



ESSAI N°1
 9/4/77
 $P(\text{Bar}) = f(t(\text{min}))$

$m_E = f(t(\text{min}))$
 $\dot{m}(\text{g/h}) = f(t(\text{min}))$

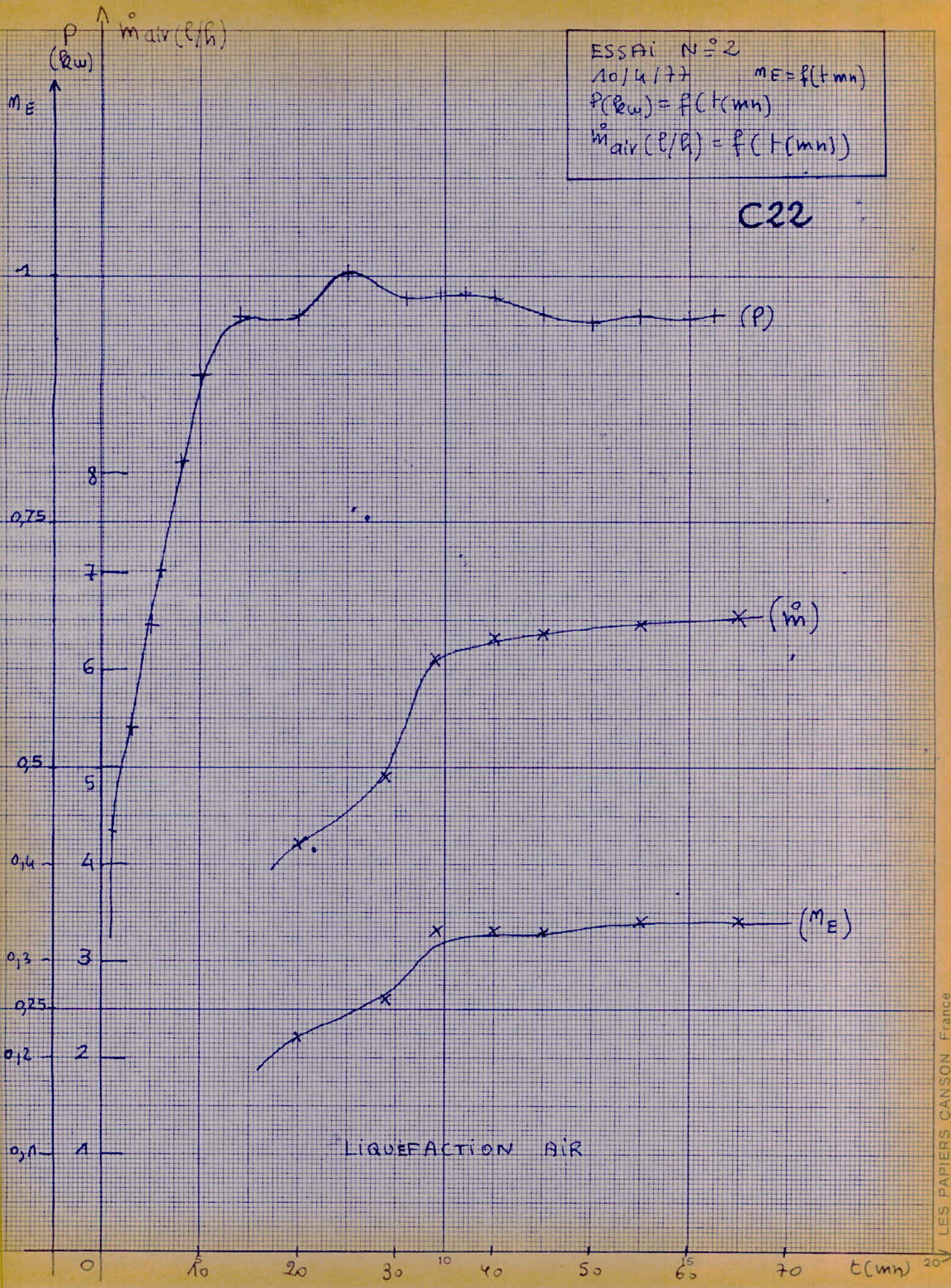
C21



LIQUEFACTION AIR

ESSAI N° 2
 10/4/77 $m_E = f(t \text{ mn})$
 $P(\text{kg}) = f(t \text{ mn})$
 $\dot{m}_{\text{air}} (\text{g/h}) = f(t \text{ mn})$

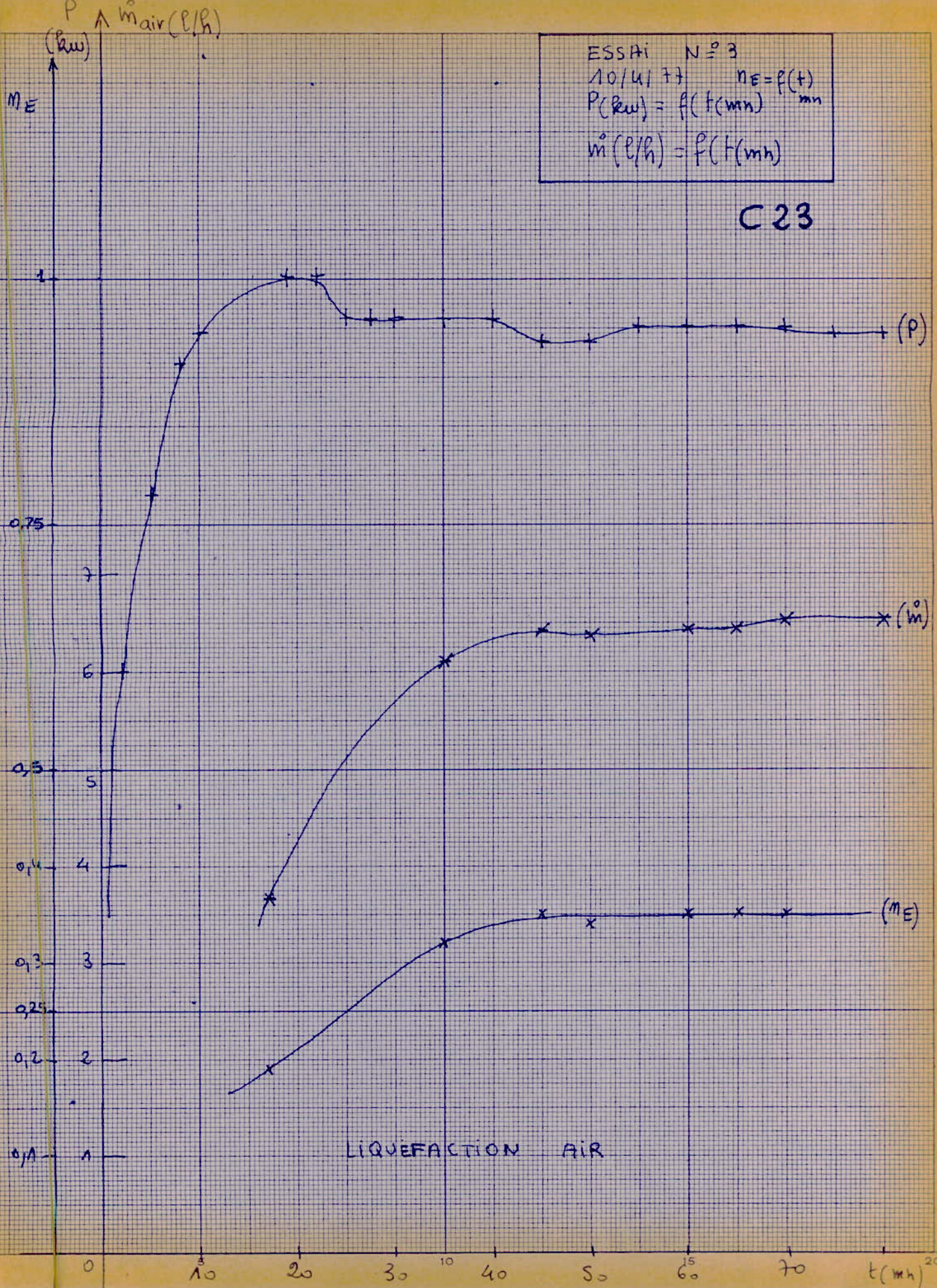
C22



LIQUEFACTION AIR

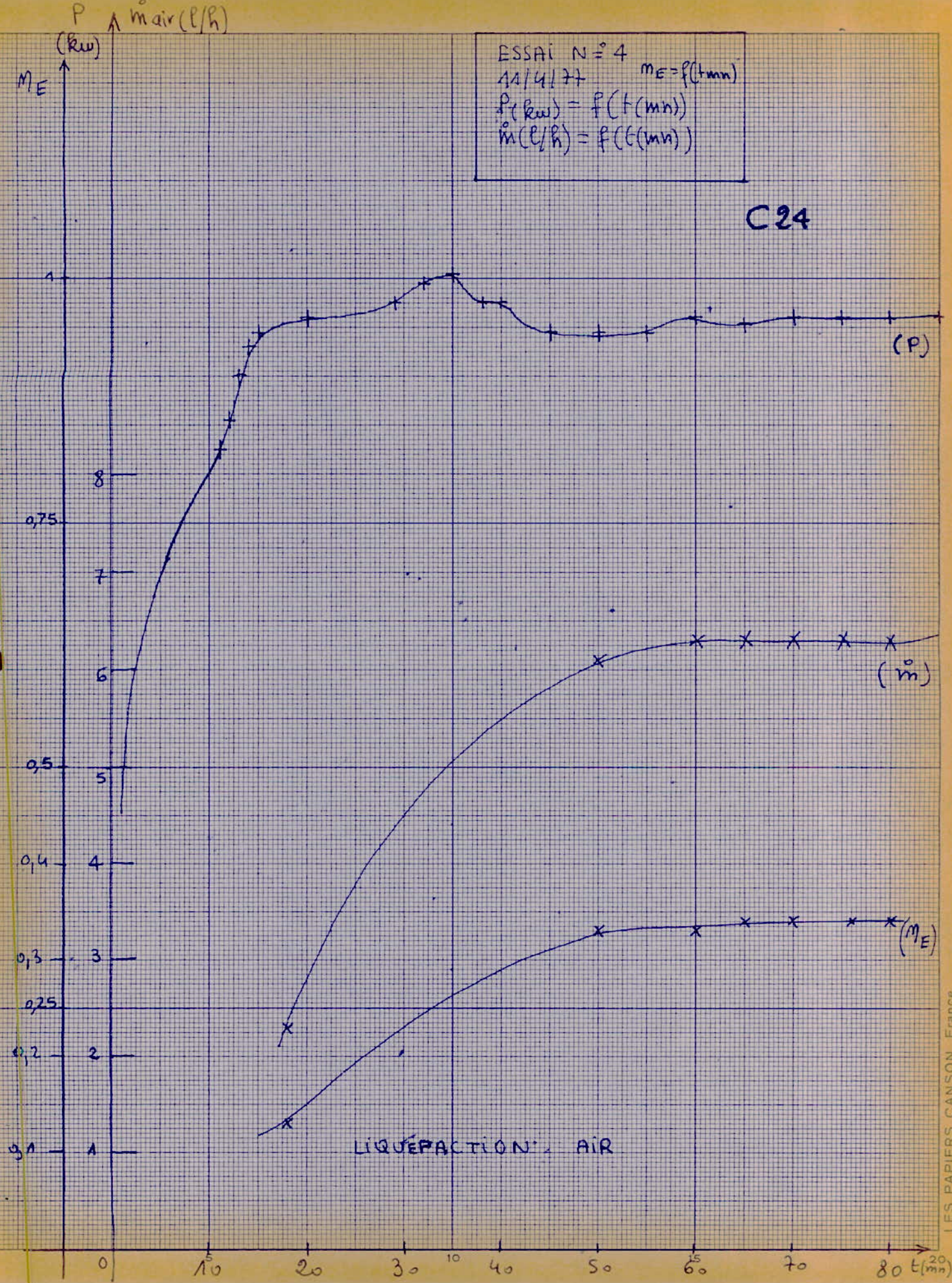
ESSAI N° 3
 10/4/77 $\eta_E = f(t)$
 $P(\text{kw}) = f(t(\text{mn}))$
 $\dot{m}(\text{l/h}) = f(t(\text{mh}))$

C23



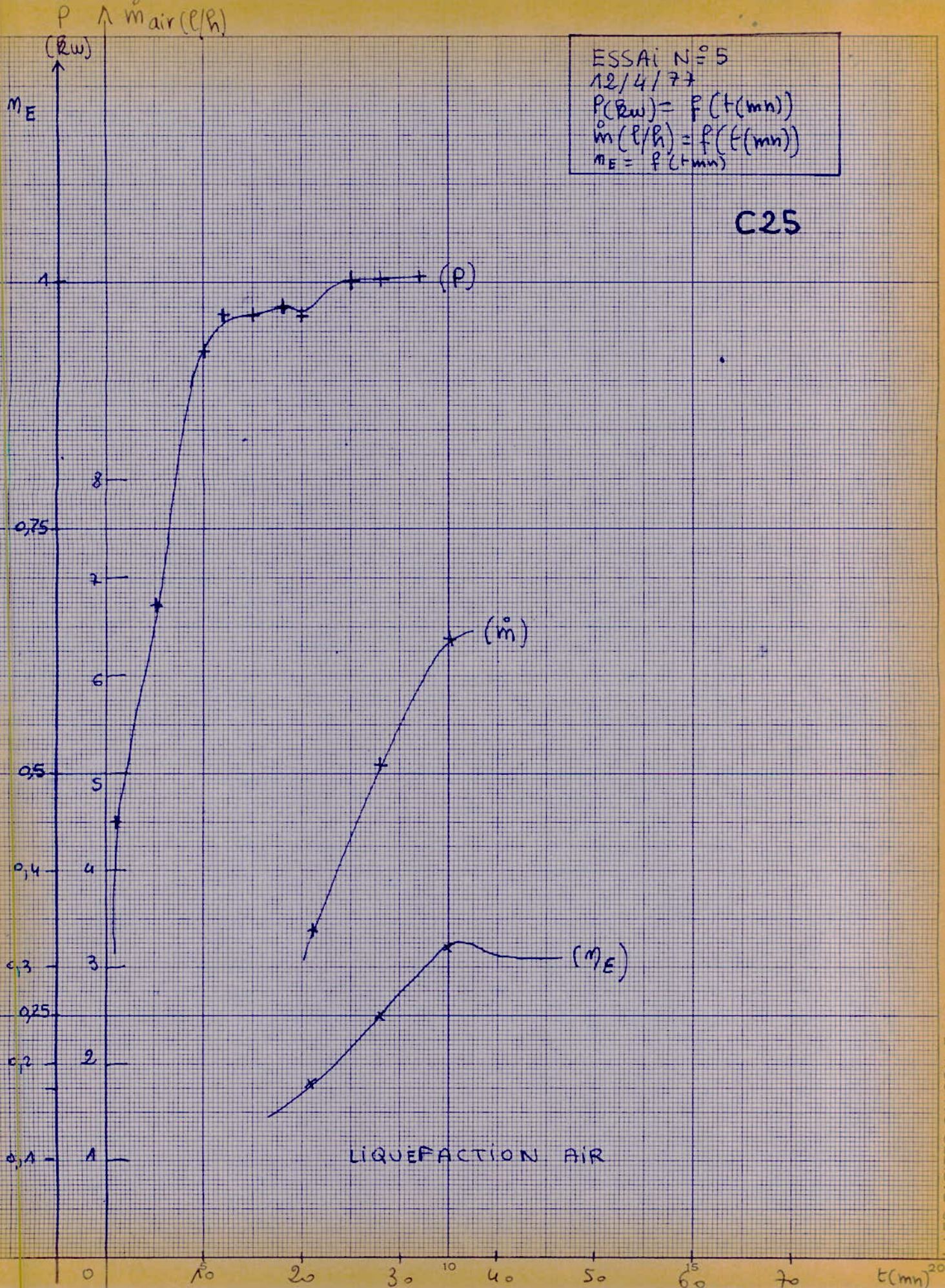
ESSAI N° 4
 11/4/77 $m_E = f(t_{mn})$
 $P(kw) = f(t(mn))$
 $\dot{m}(l/h) = f(t(mn))$

C24



ESSAI N°5
 12/4/77
 $P(Rw) = f(t(mn))$
 $\dot{m}(P/R) = f(t(mn))$
 $m_E = f(t(mn))$

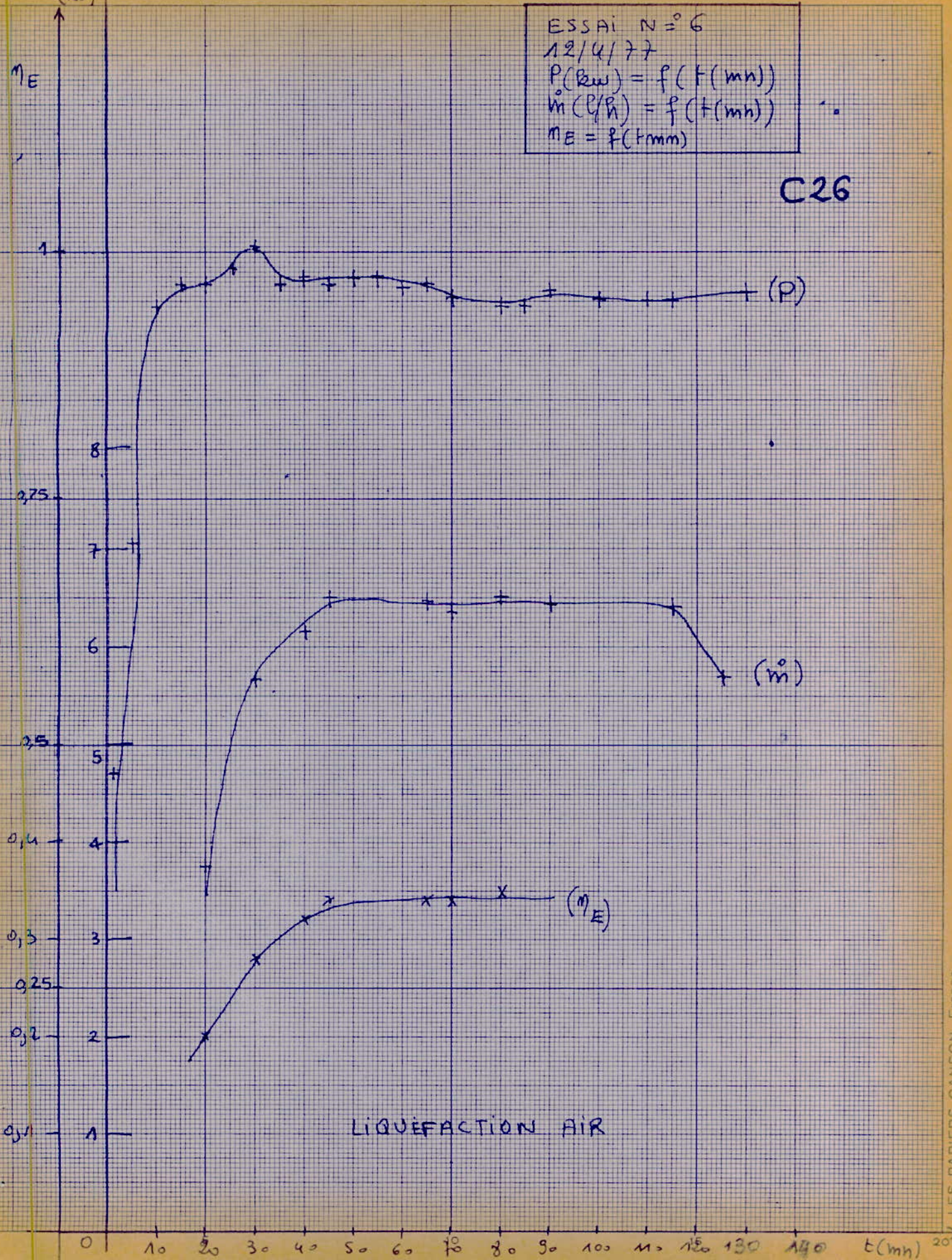
C25



$P(R_w) \wedge \dot{m}_{air} (l/h)$

ESSAI N° 6
 12/4/77
 $P(R_w) = f(t(mh))$
 $\dot{m}(P/R) = f(t(mh))$
 $\eta_E = f(t(mh))$

C26

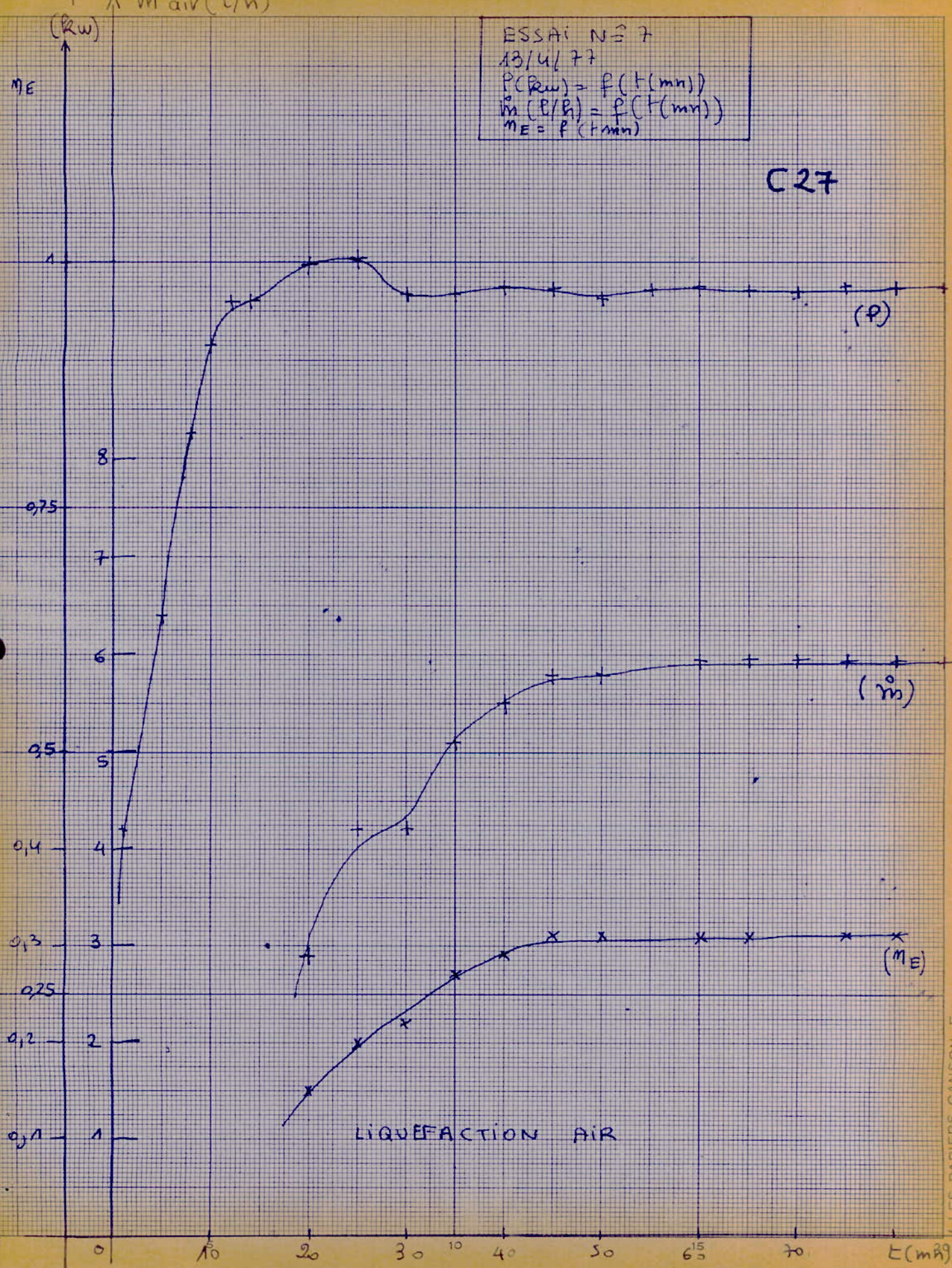


LIQUEFACTION AIR

$P \wedge \dot{m}_{air} (l/h)$

ESSAI N° 7
 13/4/77
 $P(Rw) = f(t(mn))$
 $\dot{m} (l/h) = f(t(mn))$
 $M_E = f(t(mn))$

C27



CALCUL DES RENDEMENTS ENERGETIQUES

1- calcul de l'énergie de liquéfaction

$$E_1 = \dot{m} c_p \Delta T$$

E_1 = énergie de liquéfaction du gaz

\dot{m} = débit du gaz liquide

c_p = chaleur massique (c_p air = 1 Kj / Kg °)

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

T_2 = t° entrée gaz (T_2 air = 20° c, T_2 G.N. = 20° °c)

T_1 = t° de liquéfaction (T_1 air = - 194 °c , T_1 G.N. = - 162 °c)

Pour l'air , on a effectué tous les calculs nécessaires , par contre

pour le gaz naturel on a utilisé le diagramme de Mollier pour le

Méthane (CH_4) qui nous donne directement cette variation d'enthalpie

On aurait pu aussi utiliser un diagramme de Mollier pour les calculs

relatifs à l'air .

2- calcul du rendement de liquéfaction

$$\eta_E = \frac{\text{Energie de liquéfaction}}{\text{Energie fournie}}$$

La valeur de l'énergie fournie nous est donnée par un wattmètre

Ex de calcul:

Extrait de l'essai (7) de la liquéfaction de l'air

$$t = 45 \text{ mn}$$

$$E_l = 0,300 \text{ kw}$$

$$E_f \equiv 0,973 \text{ kw}$$

$$\eta_E = \frac{0,300}{0,973} \approx 0,31$$

Extrait de l'essai (2) de la liquéfaction du G.N.

$$t = 105 \text{ mn}$$

$$E_l = 0,570 \text{ kw}$$

$$E_f = 0,870 \text{ kw}$$

$$\eta_E = \frac{0,570}{0,870} = 0,65$$

Remarque : on a représenté $\eta = f(t)$, voir par la suite .

Nous avons représenté la variation du rendement en fonction du temps de marche . On constate que pour la liquéfaction de l'air le rendement augmente au début et se stabilise à 0,35 au bout de 60 mn de marche (voir courbes C20 à C27) . Pour la liquéfaction du gaz

naturel , le rendement au ~~début~~ augmente jusqu'à 0,9 et puis descend brusquement à , 0,4 en l'espace de 40 mn et se stabilise à 0,3 au bout de 200 mn de marche (voir courbes C3 à C4) .

La liquéfaction du gaz naturel fera l'objet d'une étude approfondie dans la suite .

CALCUL DES EFFICACITES DE LIQUEFACTION

$$\varepsilon = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

T_f = t° de liquéfaction du gaz considéré

T_c = t° d'entrée dans le liquéfacteur du gaz considéré

AIR : $T_f = -194 \text{ °C} = 78,7 \text{ °K}$

$$T_c = 20 \text{ °C} = 293 \text{ °K}$$

$$\varepsilon_{\text{air}} = 0,37$$

GAZ NATUREL: $T_f = 162 \text{ °C} = 111 \text{ °K}$

$$T_c = 20 \text{ °C} = 293 \text{ °K}$$

$$\varepsilon_{\text{gaz nat.}} = 0,61$$

LIQUEFACTION DES GAZ .

Résultats et conclusion sur la liquéfaction de l'air .

Les résultats obtenus sont valables, puisqu'on a atteint approximativement le débit affiché (voir notice), qui est de 7 l/h dans les conditions de travail normales .

Le débit d'air liquide se stabilise après une heure de marche environ , à 6,5 l/h ; la période de démarrage du liquéfacteur étant de l'ordre de 15 mn environ .

Le tableau des facteurs de correction nous permet de déduire le débit d'air liquide dans les conditions de travail propres à l'expérience :

| Conditions de travail | Facteurs de correction |
|--|------------------------|
| Pression $H_2 = 22\text{Kg/cm}^2$ | 0,92 |
| Tpre eau de refroid. = 12°C | 1,02 |
| Débit eau de refroid. = $0,7\text{m}^3/\text{h}$ | 0,98 |
| Tpre humide = 14°C | 1 |
| Altitude = 0 m | 1 |

Le débit dans ces conditions devrait être égal à :

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{air liq.}} &= 7,5(0,92 \times 1,02 \times 0,98 \times 1 \times 1) \\ &= 7,5 \times 0,9196 \text{ l/h} \\ &= 6,9 \text{ l/h}\end{aligned}$$

Le débit d'air calculé est de 6,9 l/h et celui mesuré à la stabilisa-

tion est de 6,5 l/h : nous avons ici deux résultats assez voisins l'un de l'autre , avec une précision de 6 % .

Pour la liquéfaction de l'air nous avons fait une série de rendements η_E pour les sept essais (voir courbes $\eta_E = f(t)$) . A la stabilisation , le rendement est de 0,3 ; acceptable .

Remarque :

POUR toute la serie d'essais l'evolution de la puissance du moteur est normale .

Liquide GNL

 $\rho_{GN} = 0,847 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ $\rho_{GNL} = 0,440 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

ESSAI N° 1

16/4/77

| temps de mesure mn | Compteur horaire h | Compteur gaz (2 liquefacteurs) m ³ | débit d'eau l/A | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P _{H2} kg/cm ² | ΔP mm H ₂ O | m gaz liq g/mn | m gaz liq l/h | P _{moteur cap. froid} kW | η _e | Elig kW |
|--------------------|--------------------|---|-----------------|----------------|----------------|------------------------------------|------------------------|----------------|---------------|-----------------------------------|----------------|---------|
| 0 | 1107,1 | 4224,426 | 0,166 | 12 | 16 | 18 | 9 | | | 0 | | |
| 0.30 | " | " , " | 0,200 | " | 18 | " | 5 | | | 0,427 | | |
| 1 | " | " | 0,200 | " | 20 | " | " | | | 0,450 | | |
| 1.30 | 1107,2 | " | 0,166 | " | 21 | 21,5 | 7 | | | 0,480 | | |
| 2 | " | " | " | " | " | " | 7 | | | 0,495 | | |
| 2.30 | " | " | 0,166 | " | 22 | " | 8 | | | 0,540 | | |
| 3 | " | " | " | " | " | 21,6 | 6 | | | 0,562 | | |
| 3.30 | " | " | 0,430 | " | 23 | " | " | | | 0,600 | | |
| 4 | " | " | 0,330 | " | " | 21,7 | 8 | | | 0,622 | | |
| 4.30 | " | " | 0,400 | " | 24 | 21,8 | " | | | 0,667 | | |
| 5 | " | " | 0,260 | " | 24,5 | 21,9 | " | | | 0,682 | | |
| 6 | " | 4224,428 | 0,116 | " | 25 | 22 | " | | | 0,742 | | |
| 7 | " | " | " | " | " | 22,1 | 6 | | | 0,802 | | |
| 7.30 | " | " | 0,200 | " | " | 22,2 | " | | | 0,825 | | |
| 8 | 1107,3 | " | 0,166 | " | " | " | 5 | | | 0,855 | | |

Gas a' liquifier G.N.

$\rho_{GN} = 0,847 \text{ kg/m}^3$

$\rho_{GNL} = 0,440 \text{ g/cm}^3$

ESSAI N°1

ESSAI 16/4/77

| temps de mesure mn | Compteur horaire h | Compteur gaz (2 liqf) m ³ | débit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P _{H2} kg/cm ² | DP mm H ₂ O | m gaz liq. g/mn | m gaz liq. l/h | P _{cap} moteur froid kw | η_E | Eliq kw |
|--------------------|--------------------|--------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|------------------------------------|------------------------|-----------------|----------------|----------------------------------|----------|---------|
| 8.30 | 1107,3 | 4224,428 | 0,166 | 12 | 25,5 | 22,2 | 10 | | | 0,877 | | |
| 9 | " | " | 0,200 | " | 26 | 22,3 | " | | | 0,900 | | |
| 9.30 | " | " | 0,130 | " | " | " | " | | | 0,930 | | |
| 10 | " | 4224,432 | 0,230 | " | " | 22,4 | 8 | | | 0,945 | | |
| 10.30 | " | " , 435 | 0,166 | " | " | " | " | | | 0,967 | | |
| 11 | " | " , 439 | 0,260 | " | " | 22,5 | " | | | 0,975 | | |
| 11.30 | " | " , 445 | 0,200 | " | " | " | " | | | 0,967 | | |
| 12 | " | " , 456 | " | " | " | " | " | | | 0,952 | | |
| 12.30 | " | " , 456 | 0,166 | " | " | " | " | | | 0,930 | | |
| 13 | " | " , 462 | " | " | " | 22,6 | " | | | " | | |
| 13.30 | 1107,4 | " , 488 | " | " | " | 22,5 | " | | | 0,915 | | |
| 14 | " | " , 490 | " | " | " | " | " | | | " | | |
| 14.30 | " | " , 496 | 0,166 | " | " | 22,6 | 9 | | | " | | |
| 15 | " | " , 506 | " | " | " | 22,8 | " | | | 0,922 | | |
| 17 | " | " , 604 | 0,175 | " | 26,5 | 22,9 | 4 | | | 0,937 | | |

Gaz à liquéfier = G.N.

$$P_{GN} = 0,847 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$P_{GNL} = 0,4409/\text{cm}^3$$

Essai N° 1

16/4/77

| Temps de Mesure mn | Compteur Horaire h | Compteur Gaz m ³ | débit eau l/s | t°C entrée eau | t°C sortie eau | ΔP mm eau | $\dot{m}_{\text{gaz liq.}}$ l/h | $\dot{m}_{\text{gaz liq.}}$ g/mn | P_{H_2} kg/cm ² | $P_{\text{moteur cap. froid}}$ kW | η_E | E_{liq} kW |
|--------------------|--------------------|-----------------------------|---------------|----------------|----------------|-------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|----------|---------------------|
| 19 | 1107,4 | 4224,734 | 0,166 | 12 | 26,5 | 12 | | | 22,9 | 0,930 | | |
| 22.30 | 1107,5 | " 5,024 | 0,190 | " | 26 | 9 | | | 22,8 | 0,975 | | |
| 25 | " | " , 192 | 0,180 | " | " | 11 | | | " | 0,945 | | |
| 30 | 1107,6 | " , 611 | 0,196 | " | " | 20 | 5,44 | 40 | " | 0,915 | 0,656 | 0,59 |
| 35 | 1107,7 | " , 965 | 0,170 | " | " | 20 | 5,71 | 42 | " | " | 0,688 | 0,629 |
| 40 | 1107,8 | " 6, 348 | 0,186 | " | " | 20 | 5,17 | 38 | " | " | 0,623 | 0,56 |
| 45 | 1107,9 | " , 815 | 0,206 | " | " | 20 | | | " | 0,892 | 0,639 | 0,630 |
| 50 | 1108,0 | " 7, 147 | 0,170 | " | " | 20 | 5,17 | 38 | " | " | | |
| 57 | 1108,1 | " , 663 | 0,174 | " | " | 27 | 5,17 | 38 | " | 0,900 | 0,633 | 0,579 |
| 60 | 1108,1 | " , 883 | 0,177 | " | " | 20 | | | " | " | | |
| 65.30 | 1108,2 | " 8, 312 | 0,188 | " | " | 30 | 5,44 | 40 | " | 0,885 | 0,678 | 0,600 |
| 77 | 1108,4 | " 9, 197 | 0,182 | " | " | 20 | 5,20 | 38,3 | " | 0,870 | 0,660 | 0,67 |
| 81 | 1108,5 | " , 518 | 0,187 | " | " | 25 | 5,20 | 38,3 | " | " | 0,660 | 0,674 |
| 85 | " | " , 810 | 0,175 | " | " | 23 | 5,20 | 38,3 | " | 0,877 | | |
| 90 | 1108,6 | +230, 190 | 0,180 | " | 26,5 | 20 | 5,20 | 38,3 | " | 0,870 | | |

Gas à liquifier G.N

$P_{GN} = 9,847 \text{ kg/m}^3$

$P_{GNL} = 0,449 \text{ g/cm}^3$

ESSAI N° 2

16/4/77

| temps de mesure | Compteur horaire h | compteur gaz m ³ | débit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | DP mm H ₂ O | m ³ gaz liq. g/mh | m ³ gaz liq. l/h | P _{moteur cap. froid} (kw) | P _{H₂} Kg/cm ² | η_E | E _{eq} kw |
|-----------------|--------------------|-----------------------------|-----------------|----------------|----------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---|----------|--------------------|
| 35 | 1115,2 | 4252,418 | | 12 | 25 | 5 | | | 0,915 | 22,8 | | |
| 40 | 1115,4 | 4252,978 | 0,450 | " | 24,5 | 10 | 32 | 4,352 | " | " | 0,524 | 0,48 |
| 46 | 1115,5 | 4253,650 | 0,130 | " | " | 9 | | | " | " | | |
| 55 | 1115,6 | 4254,230 | 0,226 | " | " | 12 | 32 | 4,352 | 0,870 | " | 0,552 | 0,48 |
| 60 | 1115,8 | 4255,550 | 0,543 | " | 25 | 18 | 28 | 3,808 | " | 22,6 | 0,483 | 0,42 |
| 70 | 1115,9 | 4256,020 | 0,244 | " | " | 16 | | | " | " | | |
| 76 | 1116,0 | 4256,420 | 0,212 | " | " | 17 | 40 | 5,440 | " | " | 0,689 | 0,60 |
| 80 | " | 4256,930 | 0,113 | " | 25,7 | 20 | 41 | 5,576 | " | " | 0,707 | 0,61 |
| 85 | " | 4257,390 | 0,220 | " | 25 | 18 | 42 | 5,712 | " | " | 0,724 | 0,63 |
| 90 | 1116,1 | 4257,870 | 0,200 | " | " | 16 | | | " | " | | |
| 95 | 1116,2 | 4258,340 | 0,189 | " | " | 10 | 40 | 5,440 | " | " | 0,689 | 0,60 |
| 100 | 1116,3 | 4258,810 | 0,213 | " | " | 18 | 42,5 | 5,780 | " | " | 0,733 | 0,63 |
| 105 | 1116,4 | 4259,400 | " | " | " | 13 | 38 | 5,168 | " | " | 0,655 | 0,57 |
| 110 | 1116,6 | 4260,230 | " | " | " | 20 | 44 | 5,984 | " | " | 0,758 | 0,66 |
| 125 | 1116,7 | | " | " | " | 17 | 60 | 8,160 | " | " | | |

Gas à liquéfier = G.N.

$\rho_{GN} = 0,847 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$\rho_{GNL} = 0,440 \text{ g/cm}^3$

Essai N° 3

17.4.77

| Temps de mesure mn | Compteur Horaire h | Compteur gaz (2 liquéf) m ³ | débit eau l/s | t _c eau entrée | t _c eau sortie | DP mm H ₂ O | PH ₂ kg/cm ² | m _{gaz liq.} g/mn | m _{gaz liq.} l/h | P _{moteur} Cap. froid kW. | η_E | E _{liq} kW |
|--------------------|--------------------|--|---------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------------|----------|---------------------|
| 23 | 1120,6 | 1580 | . | 13 | 26 | 14 | 23 | | | 0,945 | | |
| 24 | " | 1760 | | " | " | " | 22,8 | | | 0,885 | | |
| 25 | " | 1930 | | " | " | 18 | " | | | " | | |
| 26 | " | 49293,280 | | " | " | " | " | | | 0,862 | | |
| 28 | 1120,7 | 1810 | | " | " | 19 | 22,7 | | | 0,840 | | |
| 31 | " | 49294,830 | | " | 26 | " | " | 64 | 8,70 | 0,870 | | |
| 37 | 1120,8 | 49297,000 | | " | " | " | " | 62 | 8,43 | 0,855 | | |
| 38 | " | 5320 | | " | " | 28 | 22,8 | | | 0,862 | | |
| 50 | 1121,0 | 49298,150 | 0,103 | " | " | " | " | 58 | 7,88 | 0,840 | | |
| 52 | 1121,1 | 49300,240 | | " | " | 47 | " | | | " | | |
| 57 | 12 | 49300,190 | | " | " | 52 | 22,6 | 56 | 7,61 | " | | |
| 70 | 14 | 49302,420 | | " | " | 70 | " | 50 | 6,80 | 0,855 | 0,877 | 0,750 |
| 76 | 15 | 49305,780 | | " | 26,5 | " | 22,5 | 34 | 4,62 | 0,892 | 0,572 | 0,870 |
| 84 | 16 | 49310,010 | | " | " | " | 22,4 | 22 | 2,99 | 0,900 | 0,367 | 0,330 |
| 107 | 1122,2 | | | " | " | " | 22,6 | 23 | 3,17 | 0,900 | 0,383 | 0,345 |

Gaz à liquéfier = G.N.

$$\rho_{GN} = 0,847 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{GNL} = 0,4409/\text{cm}^3$$

Essai N° 3

17.4.77.

| Temps de Mesure mn | Compteur horaire h | Compteur gaz (2 liquéf.) m ³ | débit d'eau l/s | t°C eau entrée | t°C eau sortie | ΔP mm eau | P_{H_2} kg/cm ² | m gaz lig. g/mn | m gaz lig. l/h | P_{moteur} cap. froid kW | η_E | E_{liq} kW |
|--------------------------|--------------------------|--|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------|--------------------|-------------------|---|----------|------------------------|
| 7 | 1120,3 | 49290,850 | | 13 | | | | 0 | 0 | 0,720 | | |
| 8 | " | 1,870 | | " | | | | " | " | 0,765 | | |
| 9 | " | 1,879 | | " | | | | " | " | 0,810 | | |
| 10 | " | 1,885 | | " | | | | " | " | 0,840 | | |
| 11 | 1120,4 | 1,892 | | " | | | | " | " | 0,885 | | |
| 12 | " | 1,890 | | " | | | | " | " | 0,915 | | |
| 13 | " | 1,956 | | " | | | | " | " | 0,945 | | |
| 14 | " | 49291,060 | | " | | | | " | " | 0,815 | | |
| 15 | 1120,5 | 1,115 | | " | | | | " | " | 0,885 | | |
| 16 | " | 1,320 | | " | | | | " | " | 0,885 | | |
| 17 | " | 1,460 | | " | 25 | | | 40 | 5,44 | " | 0,678 | 0,600 |
| 18 | " | 1,610 | | " | " | | | " | " | " | | |
| 19 | " | 1,760 | | " | " | | | " | " | 0,892 | | |
| 20 | " | 49292,1240 | | " | " | | | " | " | 0,900 | | |
| 22 | 1120,6 | 9410 | | " | 26 | | | 56 | 7,61 | 0,945 | 0,889 | 0,800 |

Gas a' liquifier G.N.

$$P_{GN} = 0,847 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$P_{GNL} = 0,440 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

ESSAI N° 4

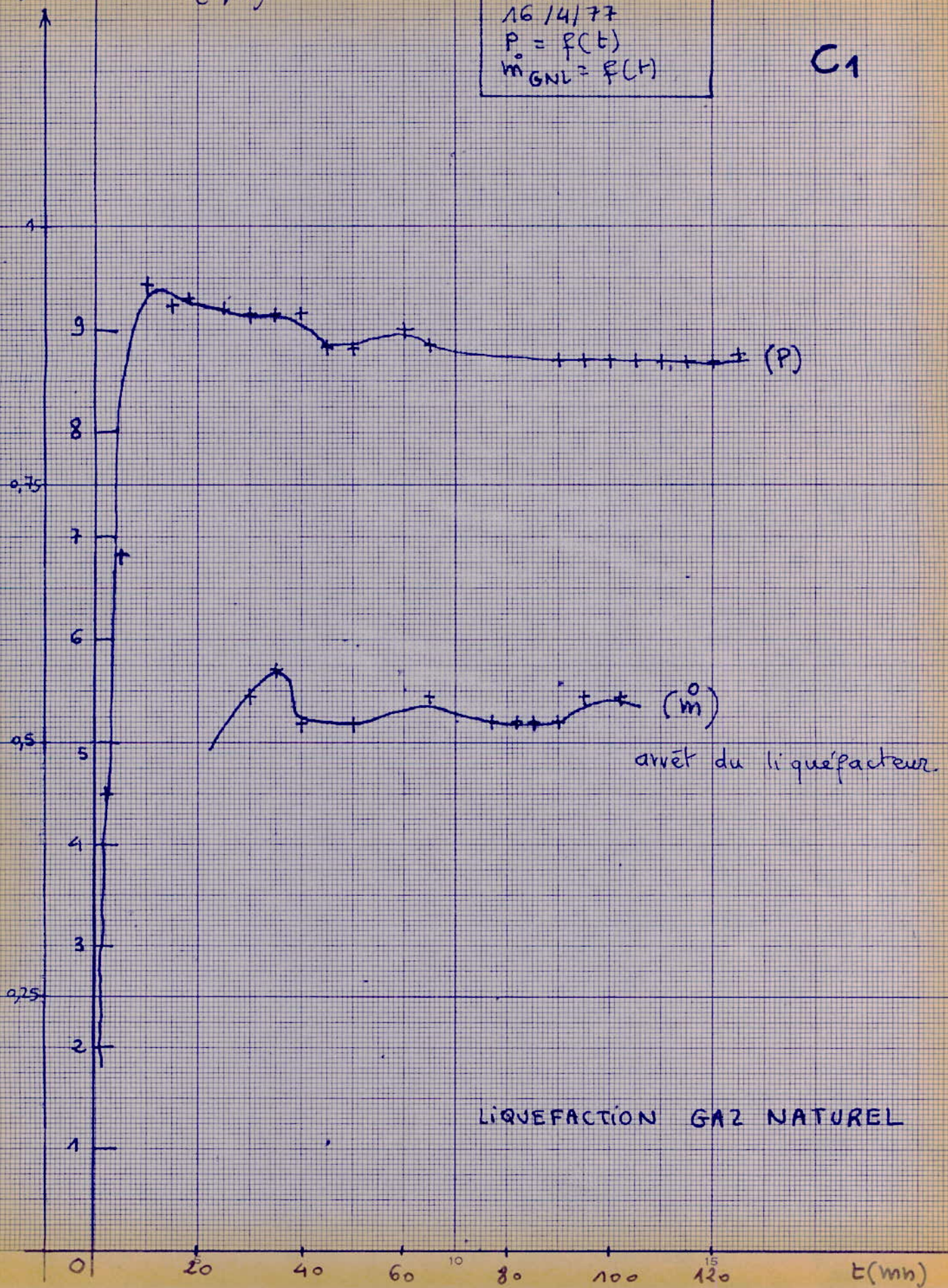
18.4.77

| emps de mesure mn | Compteur horaire h | Compteur gaz m ³ (2 liq.) | débit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P _{H2} kg/cm ² | ΔP mm eau | m ³ gaz liq. g/mn | m ³ gaz liq. l/h | P _{motor cap. froid} | η _E | E _{liq} kW |
|-------------------|--------------------|--------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|------------------------------------|-----------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------|---------------------|
| 0 | | | | 13 | 26 | 22 | 3 | 0 | 0 | | | |
| 6 | 1127,9 | 4355,800 | 0,26 | " | " | " | " | " | " | 0,555 | | |
| 7 | " | " , 890 | " | " | 23 | " | " | " | " | 0,585 | | |
| 8 | " | | " | " | " | " | " | " | " | 0,630 | | |
| 10 | 1128,0 | 4356,130 | " | " | 27,5 | " | " | " | " | 0,720 | | |
| 11 | " | | " | " | " | " | " | " | " | " | | |
| 15 | 1128,0 | | " | " | " | " | " | " | " | 0,795 | | |
| 25 | 1128,2 | 4357,370 | " | " | " | " | " | | | 0,975 | | |
| 26 | " | | " | " | 27 | 23 | " | 62 | 8,432 | " | 0,954 | 0,930 |
| 34 | 1128,3 | 4358,570 | " | " | " | 22,8 | 5 | | | 0,900 | | |
| 39 | 1128,4 | 4359,260 | " | " | " | 22,6 | 7 | 60 | 8,16 | 0,855 | | |
| 49 | 1128,6 | 4360,580 | " | 13,5 | " | " | " | 54 | 7,34 | 0,900 | 0,900 | 0,800 |
| 54 | 1128,7 | 4361,210 | " | " | " | " | 43 | 48 | 6,53 | " | 0,800 | 0,730 |
| 59 | 1128,8 | 4361,830 | " | " | " | " | 54 | | | 0,855 | | |
| 64 | " | 4362,435 | " | " | " | " | 52 | 24 | 3,26 | 0,870 | 0,414 | 0,560 |

P ↑ m gaz liq.
(kw) (l/h)

ESSAI N° 1
16/4/77
P = f(t)
m_{GNL} = f(H)

C1



LIQUEFACTION GAZ NATUREL

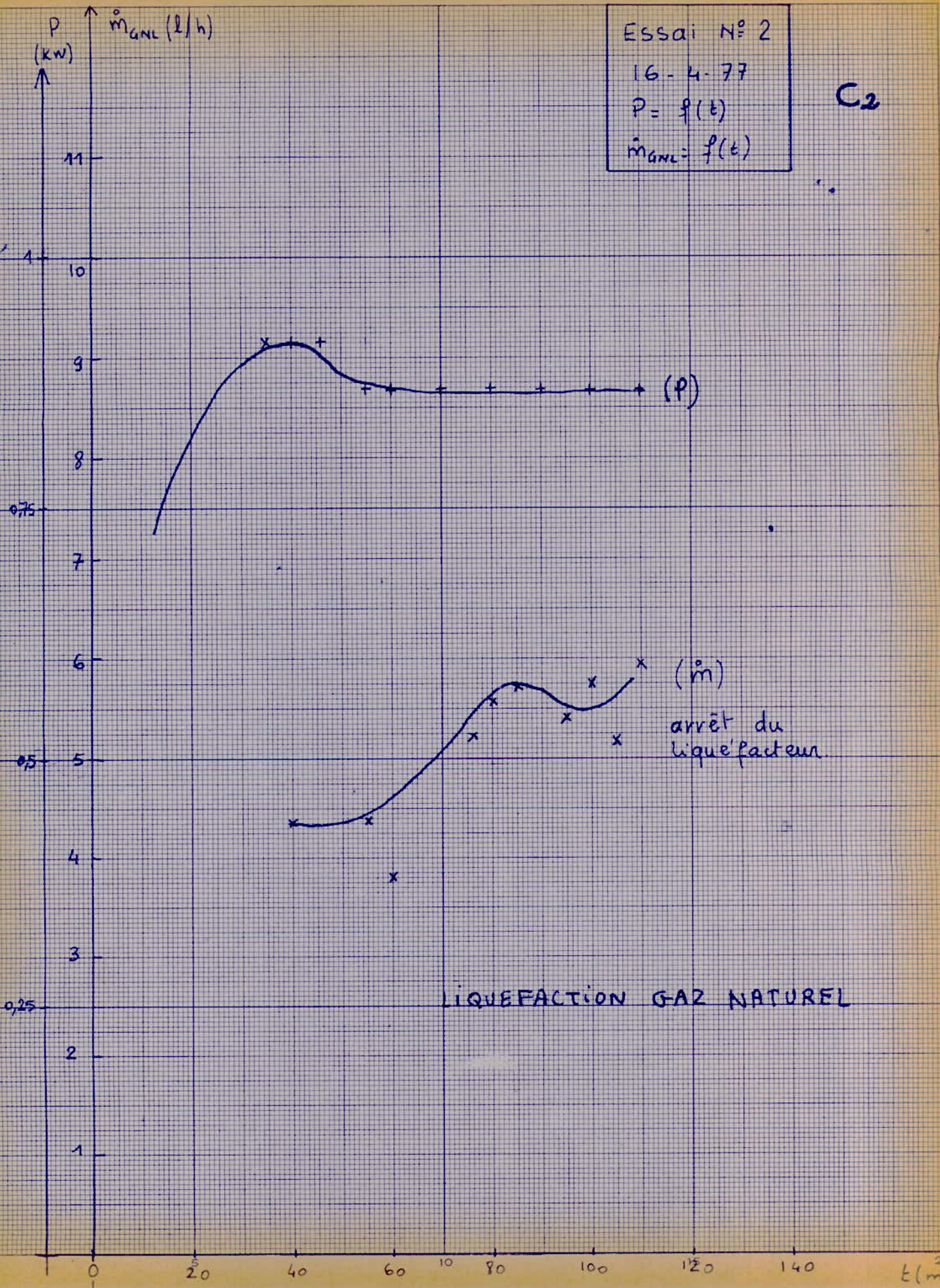
Essai N° 2

16-4-77

$P = f(t)$

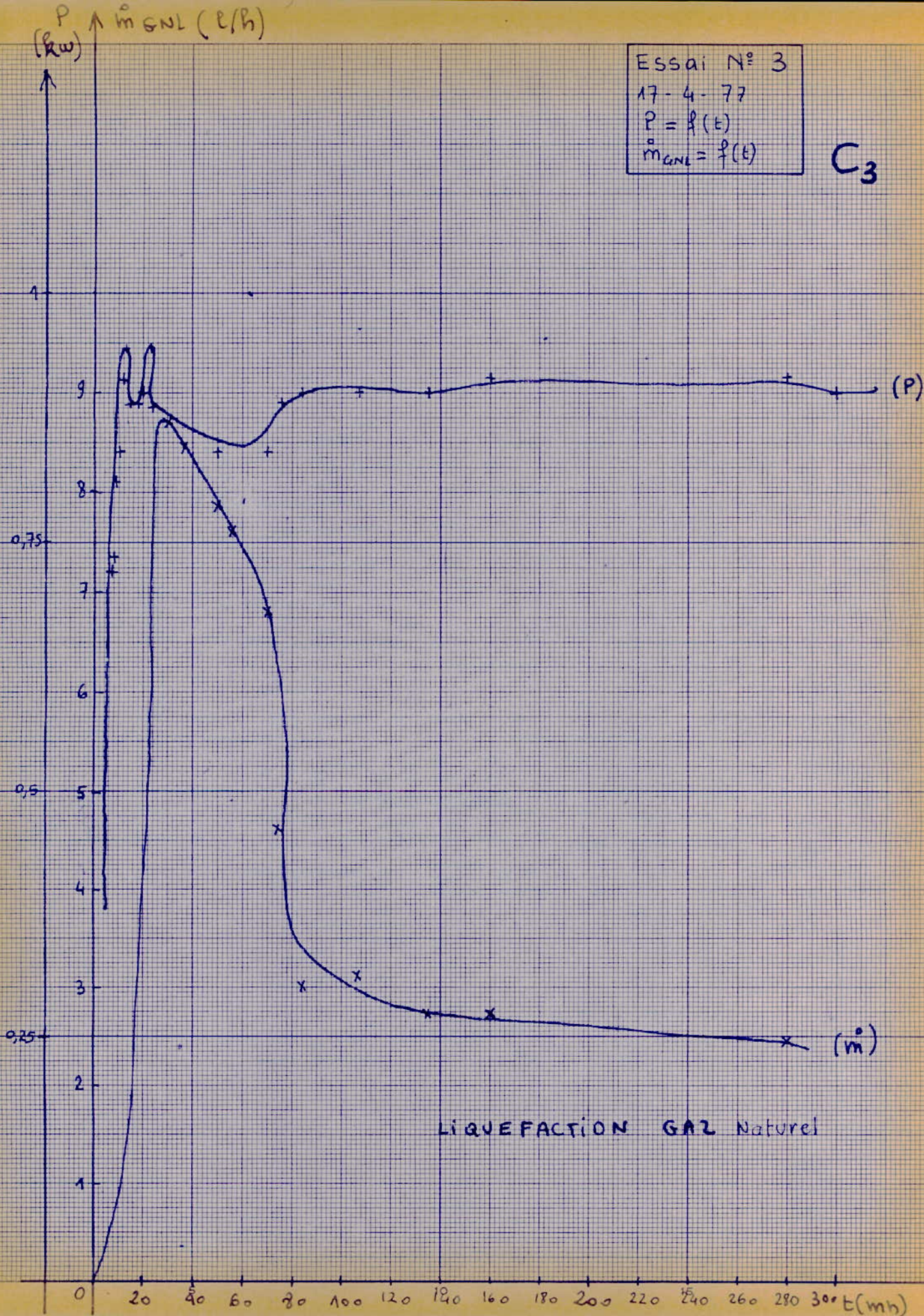
$\dot{m}_{GNC} = f(t)$

C2



Essai N° 3
 17-4-77
 $P = f(t)$
 $\dot{m}_{GNL} = f(t)$

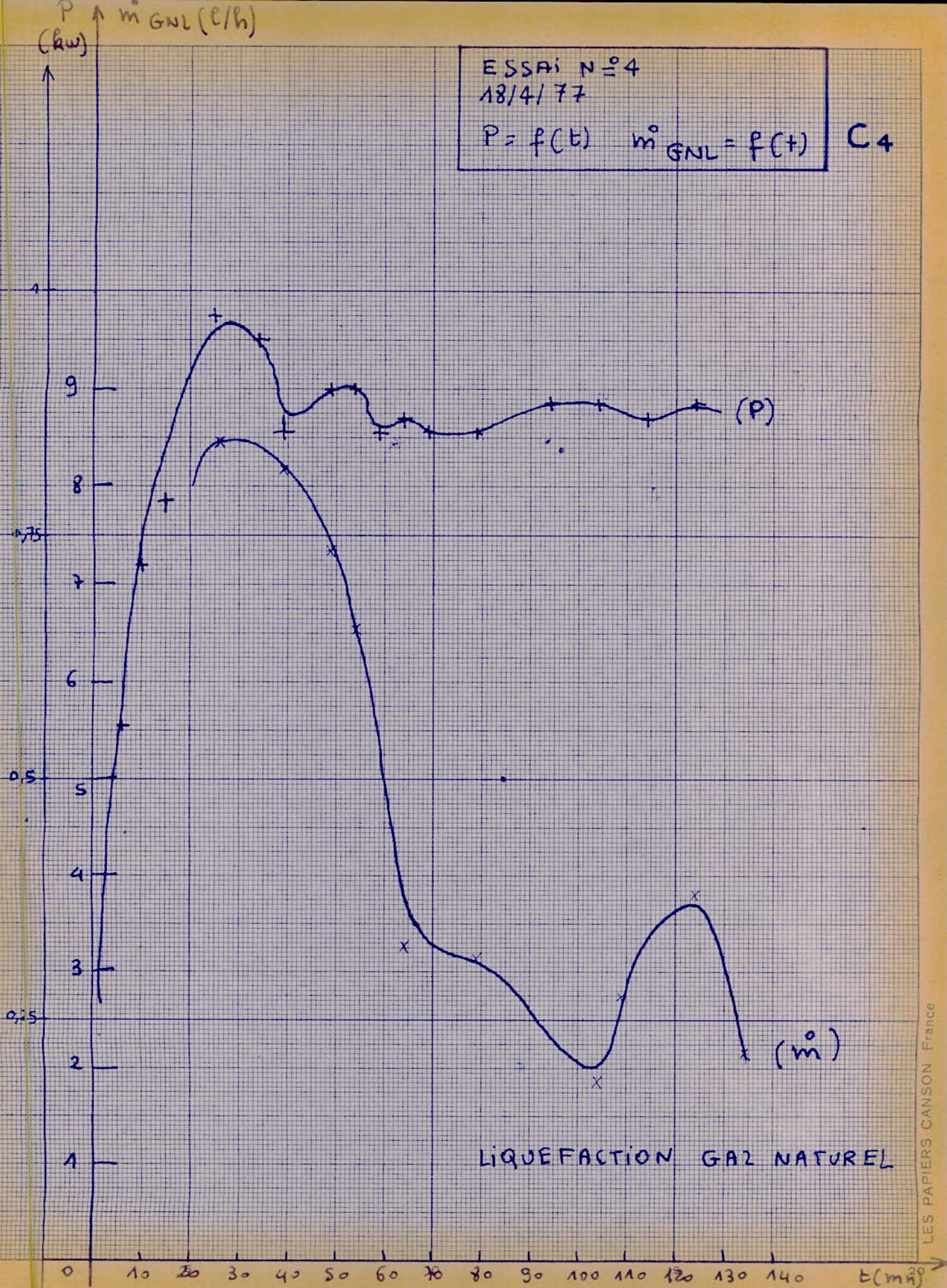
C₃



LIQUEFACTION GAZ Naturel

ESSAI N°4
18/4/77

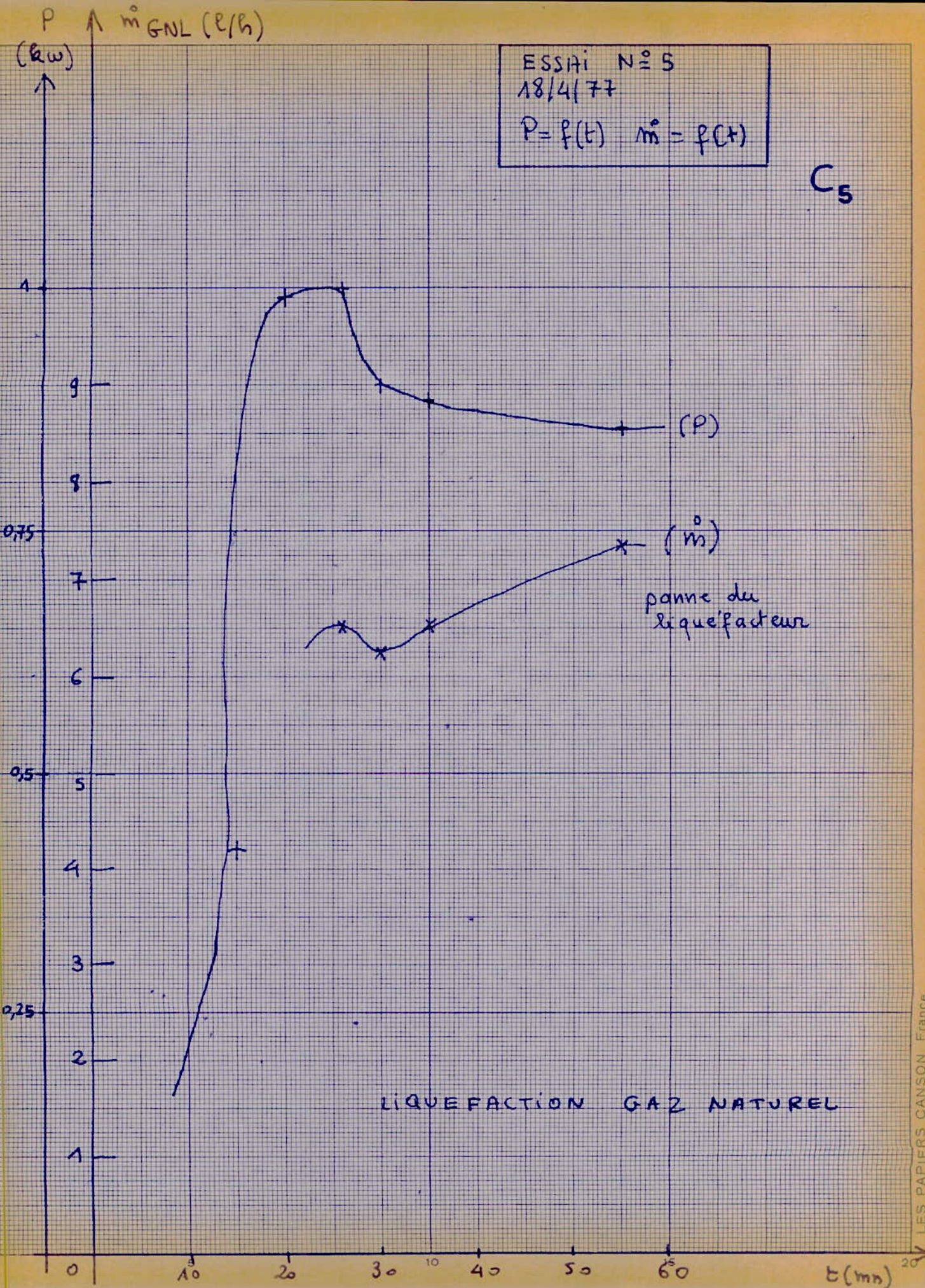
$P = f(t)$ $\dot{m}_{GNL} = f(t)$ C4



LIQUEFACTION GAZ NATUREL

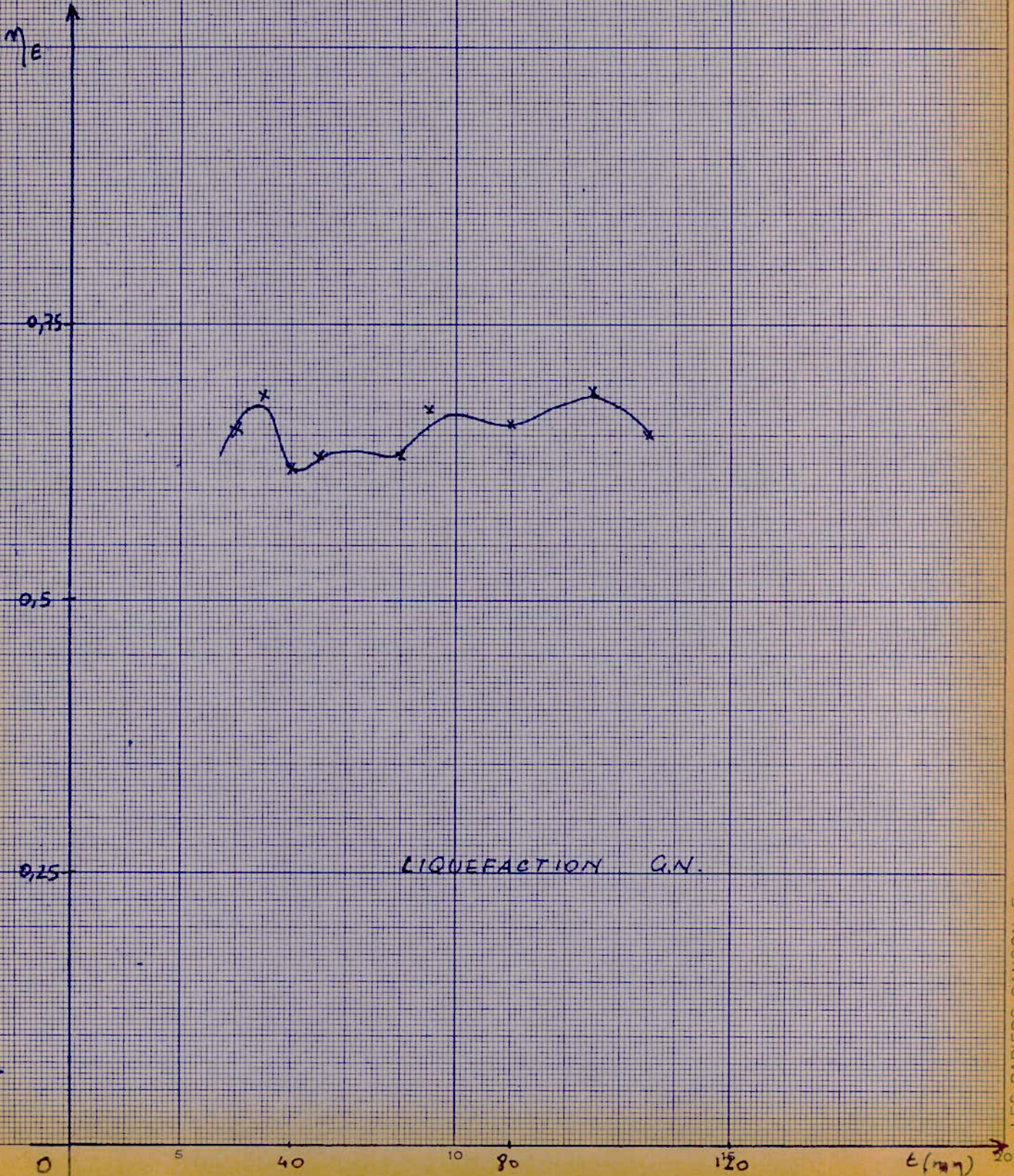
ESSAI N° 5
 18/4/77
 $P = f(t)$ $\dot{m} = f(t)$

C₅



ESSAI N° 1
16-4-77
 $\eta_E = f(t)$

C6



Essai N° 2

16.4.77

$$\eta_E = f(t)$$

C7

η_E
↑

0,75

0,5

0,25

LIQUEFACTION C.N.

0

5

40

10

80

120

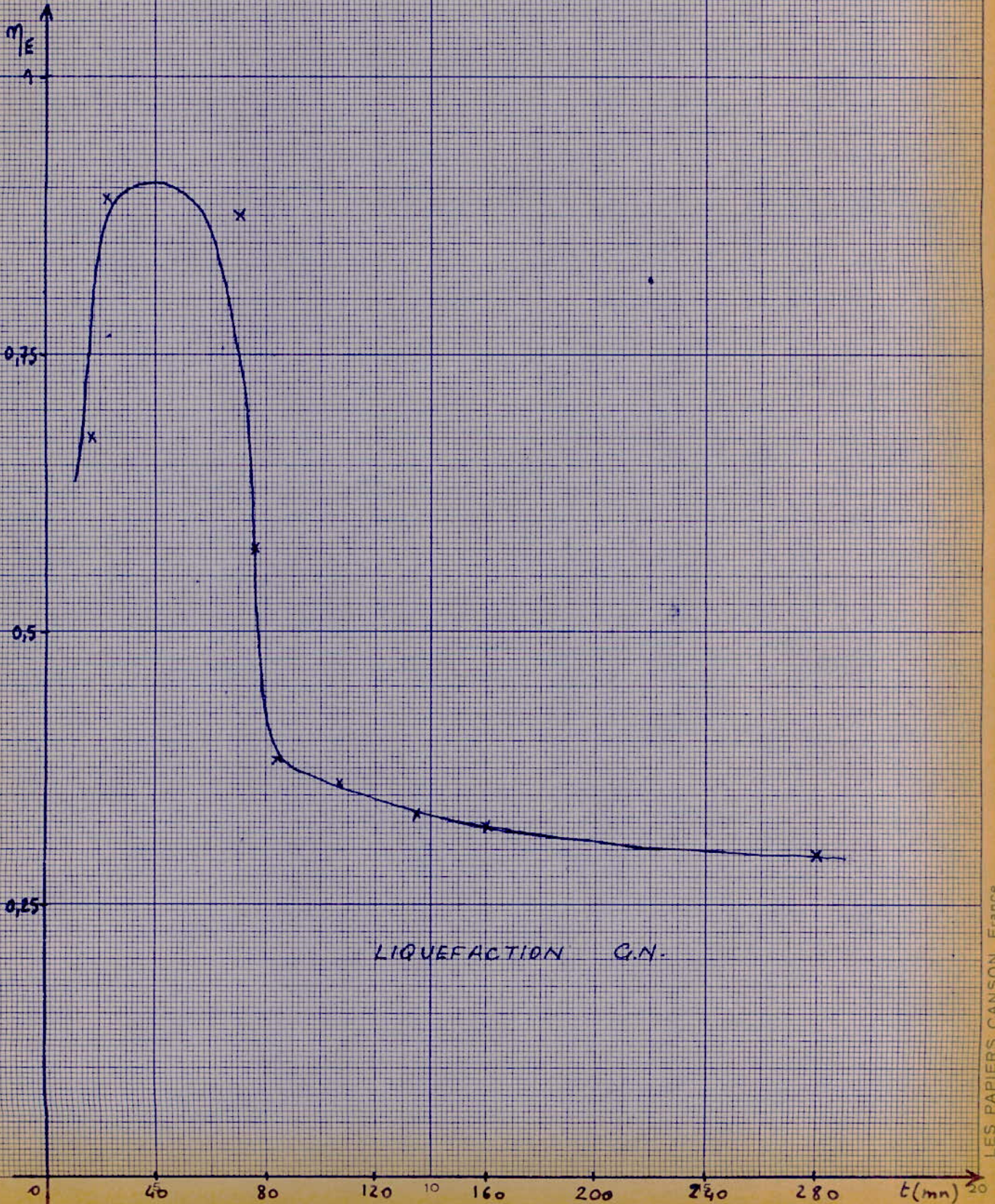
t(mn) → 20

Essai N° 3

17.4.77

$$\eta_E = f(t)$$

C8



LIQUEFACTION G.M.

Essai N° 4.

18.4.77

$$\eta_E = f(t)$$

Cg

η_E

1

0,75

0,5

0,25

0

5

40

10

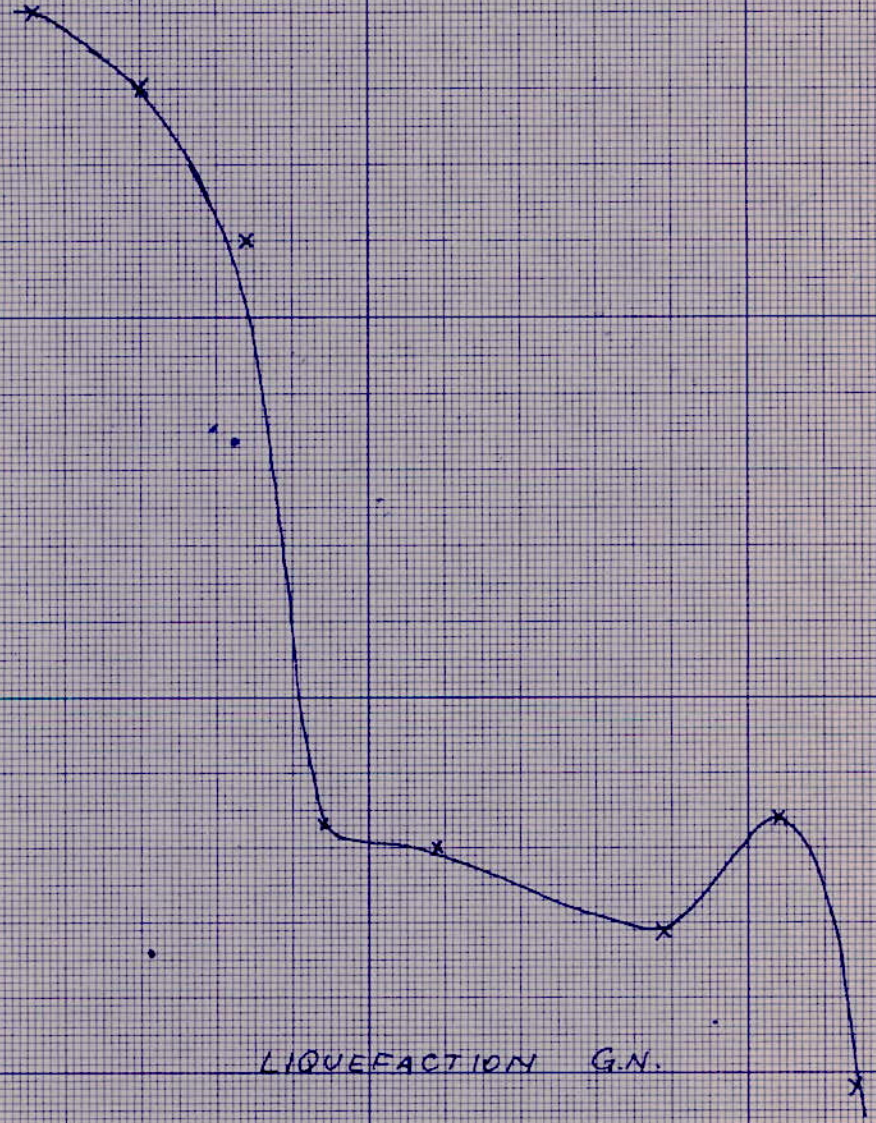
80

120

20

t (mn)

LIQUEFACTION G.N.

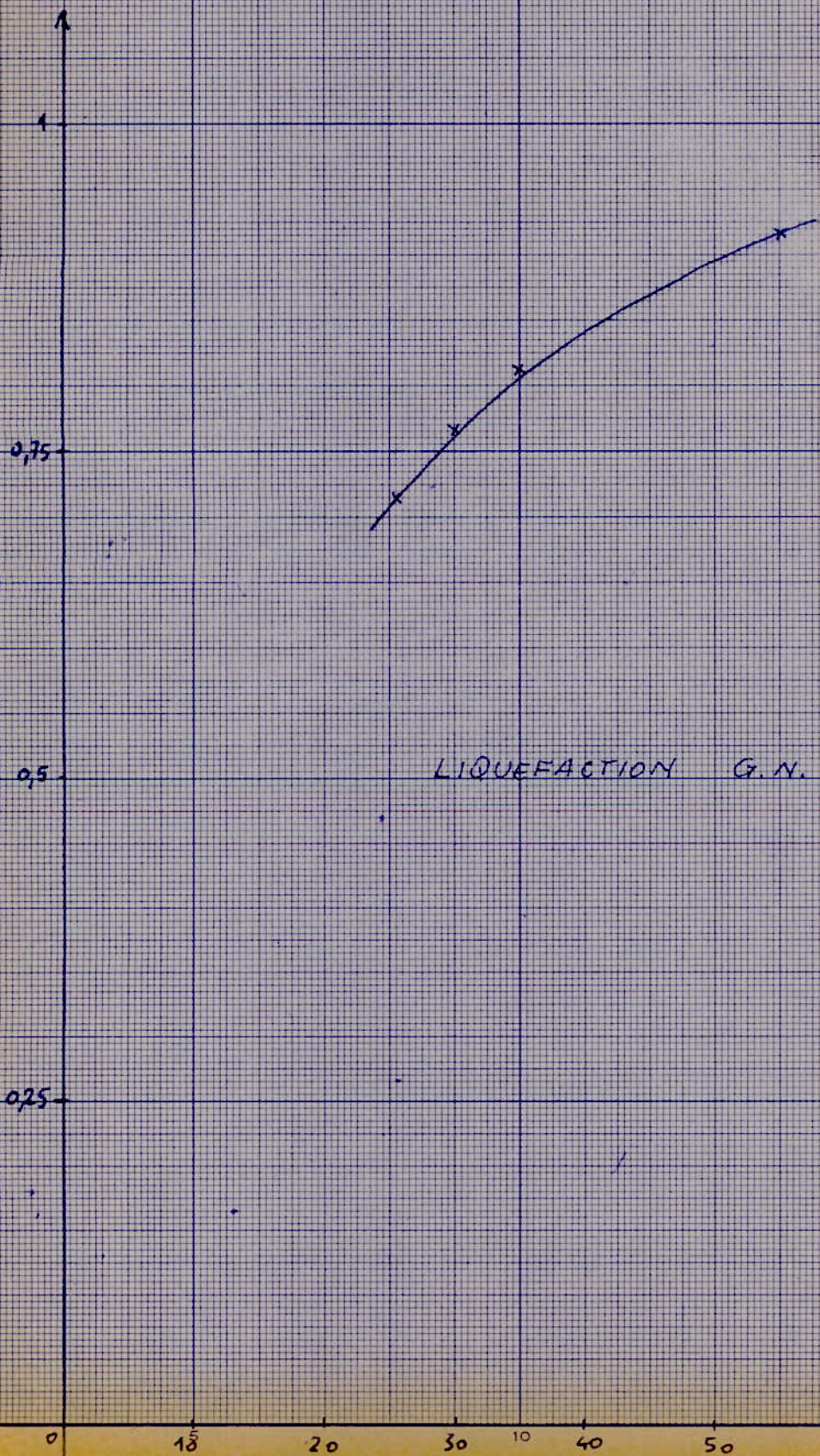


Essai N° 5

18.4.77

$$\eta_E = f(t)$$

C10



LIQUEFACTION AIR

ESSAI N° 1

9-4-77

| L (mm) | m° air (g/mn) (l/h) | m° eau (l/s) | ΔT | En. évac. par e'eau (kw) | En. de liquéf. (kw) | P. mot. (kw) | ME / m'E |
|--------|---------------------|--------------|------------|--------------------------|---------------------|--------------|--------------|
| 30 | 61,20 | 4,284 | 17 | 10,30 | 0,22 | 0,710 | 0,31 / 14,82 |
| 80 | 88,80 | 6,216 | 14 | 8,49 | 0,31 | 0,870 | 0,36 / 10,11 |
| 135 | 88,20 | 6,174 | 15 | 6,96 | 0,31 | 0,870 | 0,36 / 8,36 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

LIQUEFACTION AIR

ESSAI N° 1

9-4-77

| L (mm) | m° air (g/mn) (l/h) | m° eau (l/s) | ΔT | En. évacuée par e'eau (kw) | En. de liquéf. (kw) | P. moteur (kw) | ME / m'E |
|--------|---------------------|--------------|------------|----------------------------|---------------------|----------------|--------------|
| 43 | 85 | 5,95 | 15 | 10,41 | 0,30 | 1,005 | 0,30 / 10,66 |
| 48 | 99 | 6,93 | 15 | 12,54 | 0,35 | 0,975 | 0,36 / 13,22 |
| 56 | 99 | 6,93 | 14,5 | 10,06 | 0,35 | 0,975 | 0,36 / 10,68 |
| 63 | 99 | 6,93 | 14,5 | 10,06 | 0,35 | 0,975 | 0,36 / 10,68 |
| 66 | 98 | 6,86 | 14 | 12,99 | 0,35 | 0,975 | 0,36 / 13,68 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

LIQUEFACTION AIR

ESSAI N° 2

10-4-77

| L (mm) | m° air (g/mn) (l/h) | m° eau (l/s) | ΔT | Energie évacuée par Eau (kw) | Energie de liq. (kw) | P. moteur (kw) | ME / m'E |
|--------|---------------------|--------------|------------|------------------------------|----------------------|----------------|--------------|
| 20 | 60 | 4,2 | 14 | 11,82 | 0,21 | 0,960 | 0,22 / 12,53 |
| 29 | 70 | 4,9 | 14 | 12,17 | 0,25 | 0,975 | 0,26 / 12,74 |
| 34 | 89 | 6,09 | 14 | 10,94 | 0,32 | 0,982 | 0,33 / 11,47 |
| 40 | 90 | 6,30 | 14 | 11,35 | 0,32 | 0,978 | 0,33 / 11,93 |
| 45 | 90,6 | 6,342 | 14 | 11,29 | 0,32 | 0,960 | 0,33 / 12,09 |
| 55 | 92 | 6,43 | 14 | 10,88 | 0,33 | 0,960 | 0,34 / 11,68 |
| 65 | 93 | 6,510 | 14 | 10,88 | 0,33 | 0,960 | 0,34 / 11,68 |

LIQUEFACTION AIR

ESSAI N° 6

12-4-77

| t (mn) | m° air (g/mn) | (l/h) | m° eau (l/s) | DT | Energie évacuée eau (kw) | Energie liq. (kw) | P. moteur (kw) | mE / m'E |
|--------|---------------|-------|--------------|----|--------------------------|-------------------|----------------|--------------|
| 20 | 52,5 | 3,675 | 0,18 | 15 | 11,29 | 0,19 | 0,967 | 0,20 / 11,87 |
| 30 | 80,83 | 5,658 | 0,18 | 15 | 11,29 | 0,29 | 1,035 | 0,28 / 11,19 |
| 40 | 87,85 | 6,149 | 0,17 | 14 | 9,95 | 0,31 | 0,973 | 0,32 / 10,54 |
| 45 | 93,33 | 6,533 | 0,17 | 14 | 9,95 | 0,33 | 0,967 | 0,34 / 10,63 |
| 65 | 92,50 | 6,475 | 0,41 | 14 | 23,99 | 0,33 | 0,967 | 0,34 / 25,15 |
| 70 | 90,83 | 6,358 | 0,186 | 14 | 10,88 | 0,32 | 0,952 | 0,34 / 11,76 |
| 80 | 92,85 | 6,499 | 0,196 | 14 | 11,47 | 0,33 | 0,945 | 0,35 / 12,49 |

LIQUEFACTION AIR

ESSAI N° 7

13-4-77

| t (mn) | m° air (g/mn) | (l/h) | m° eau (l/s) | DT | Energie (kw) évacuée eau | Energie de liq. (kw) | P. moteur (kw) | mE / m'E |
|--------|---------------|-------|--------------|----|--------------------------|----------------------|----------------|--------------|
| 20 | 41,6 | 2,912 | 0,188 | 15 | 11,79 | 0,15 | 0,99 | 0,15 / 12,06 |
| 25 | 60 | 4,20 | 0,178 | 15 | 11,16 | 0,21 | 1,027 | 0,20 / 11,07 |
| 30 | 60 | 4,20 | 0,178 | 15 | 11,16 | 0,21 | 0,967 | 0,22 / 11,76 |
| 35 | 73 | 5,11 | 0,181 | 15 | 11,35 | 0,26 | 0,967 | 0,27 / 12,01 |
| 40 | 79 | 5,13 | 0,180 | 15 | 11,35 | 0,28 | 0,975 | 0,29 / 11,93 |
| 45 | 83 | 5,81 | 0,183 | 15 | 11,35 | 0,30 | 0,973 | 0,31 / 11,97 |
| 50 | 83 | 5,81 | 0,183 | 15 | 11,35 | 0,30 | 0,963 | 0,31 / 12,10 |

LIQUEFACTION AIR

ESSAI N° 7 (Suite)

13-4-77

| | | | | | | | | |
|----|----|------|-------|----|----------|------|-------|--------------|
| 60 | 85 | 5,95 | 0,183 | 15 | 11,35 | 0,30 | 0,975 | 0,31 / 11,95 |
| 65 | 85 | 5,95 | 0,183 | 15 | 11,35 | 0,30 | 0,972 | 0,31 / 11,99 |
| 75 | 85 | 5,95 | 0,176 | 15 | 11,16 | 0,30 | 0,975 | 0,31 / 11,75 |
| 85 | 85 | 5,95 | 0,183 | 15 | 11,35 | 0,30 | 0,975 | 0,31 / 11,95 |
| 90 | 85 | 5,95 | 0,523 | 15 | (32,79)? | 0,30 | 0,975 | 0,31 / 33,94 |

\dot{m} G.N.L. (l/h)

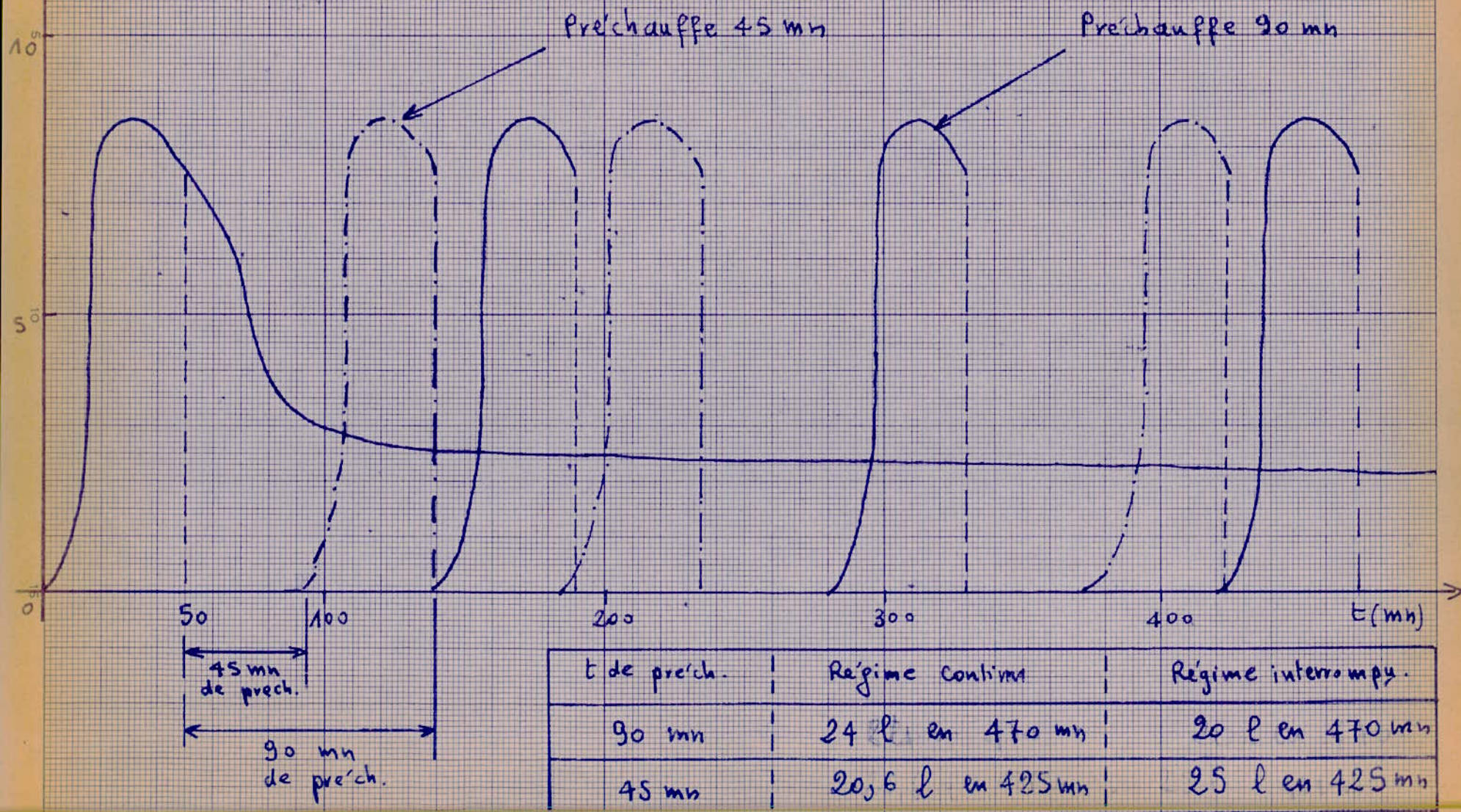
temps de marche
pour régime
interrompu $t = 50$ mn

ESSAI N° 3

17/4/77

\dot{m} G.N.L. = f(t mn)

C 11

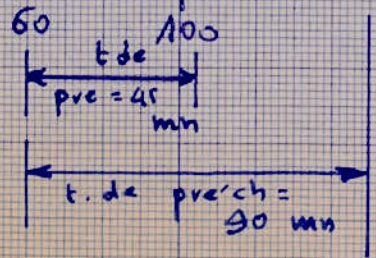
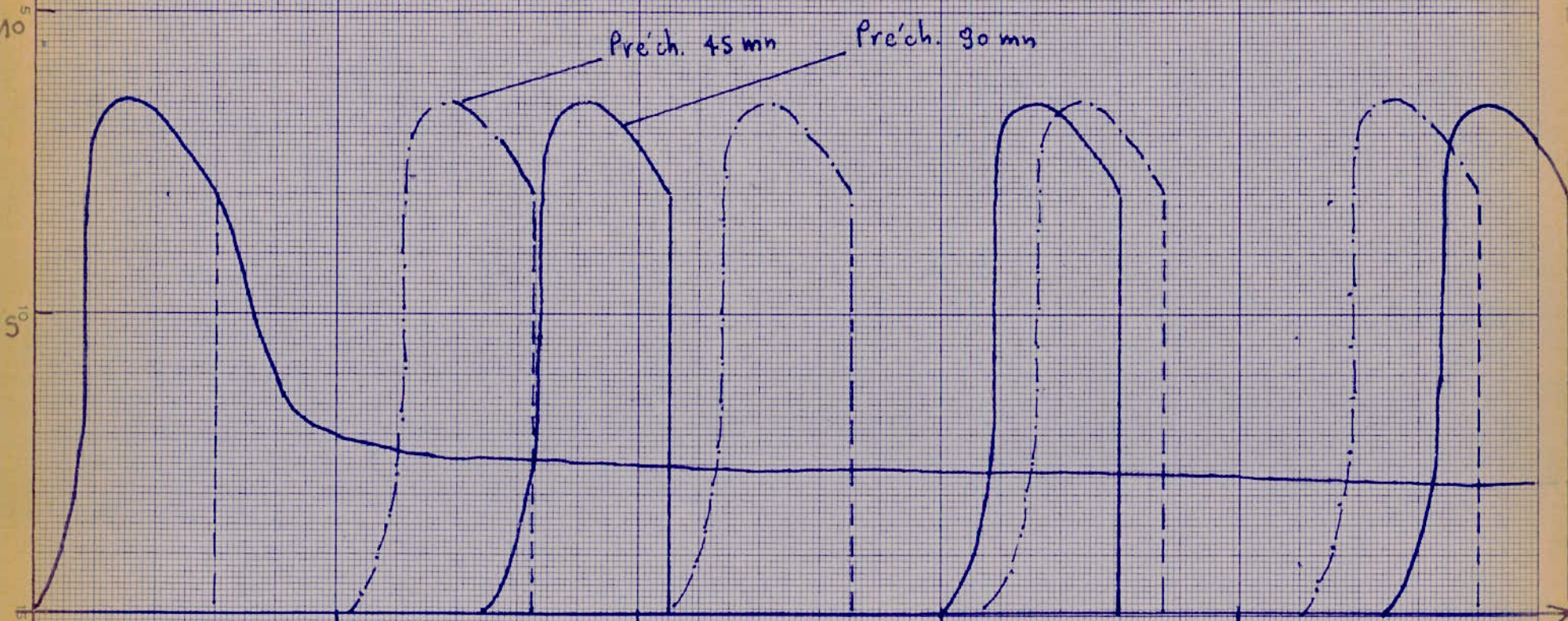


m G.N.L. (l/h)

temps de marche
pour régime
interrompu = 60 mn

ESSAI N° 3
17/4/77
 $m = f(t)$
G.N.L.

C12



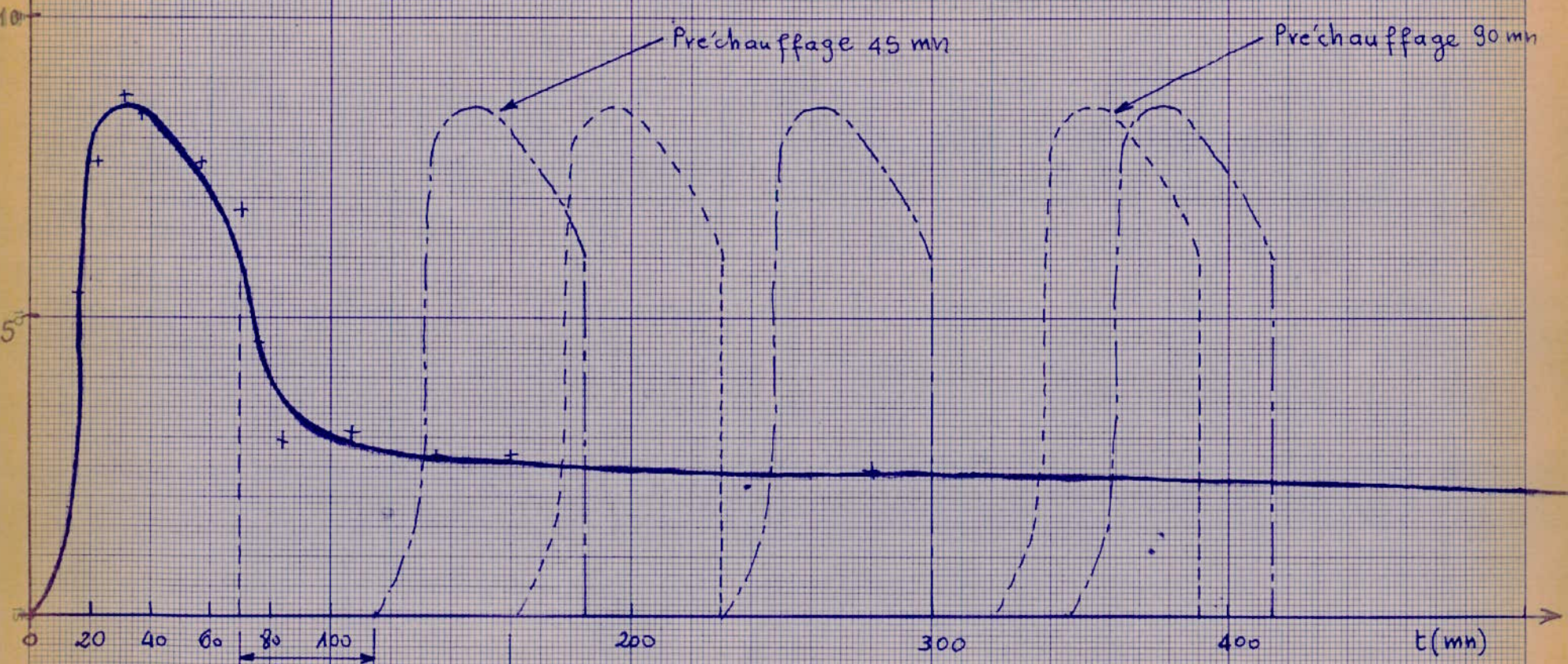
| t de préch. | Régime Continu | Régime ininterrompu |
|-------------|------------------|---------------------|
| 90 mn | 26 l en 510 mn | 24 l en 510 mn |
| 45 mn | 24,3 l en 480 mn | 30 l en 480 mn |

$\dot{m}_{GNL} (l/h)$

temps de marche
pour régime
interrompu = 70 mn.

ESSAI N° 3
17/4/77
 $\dot{m}_{GNL} = f(t)$

C13



45 mn de Prech.
90 mn de préch.

| temps de préchauffe | Régime continu | Régime interrompu |
|---------------------|------------------|-------------------|
| 90 mn | 20,8 l en 390 mn | 22 l en 390 mn |
| 45 mn | 21,7 l en 415 mn | 27 l en 415 mn |

m G.N.L. (l/h)

ESSAI N° 3

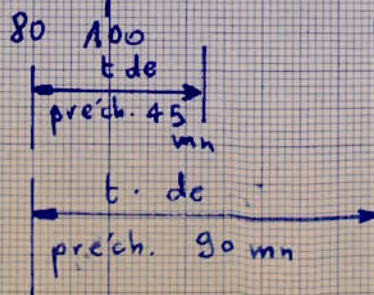
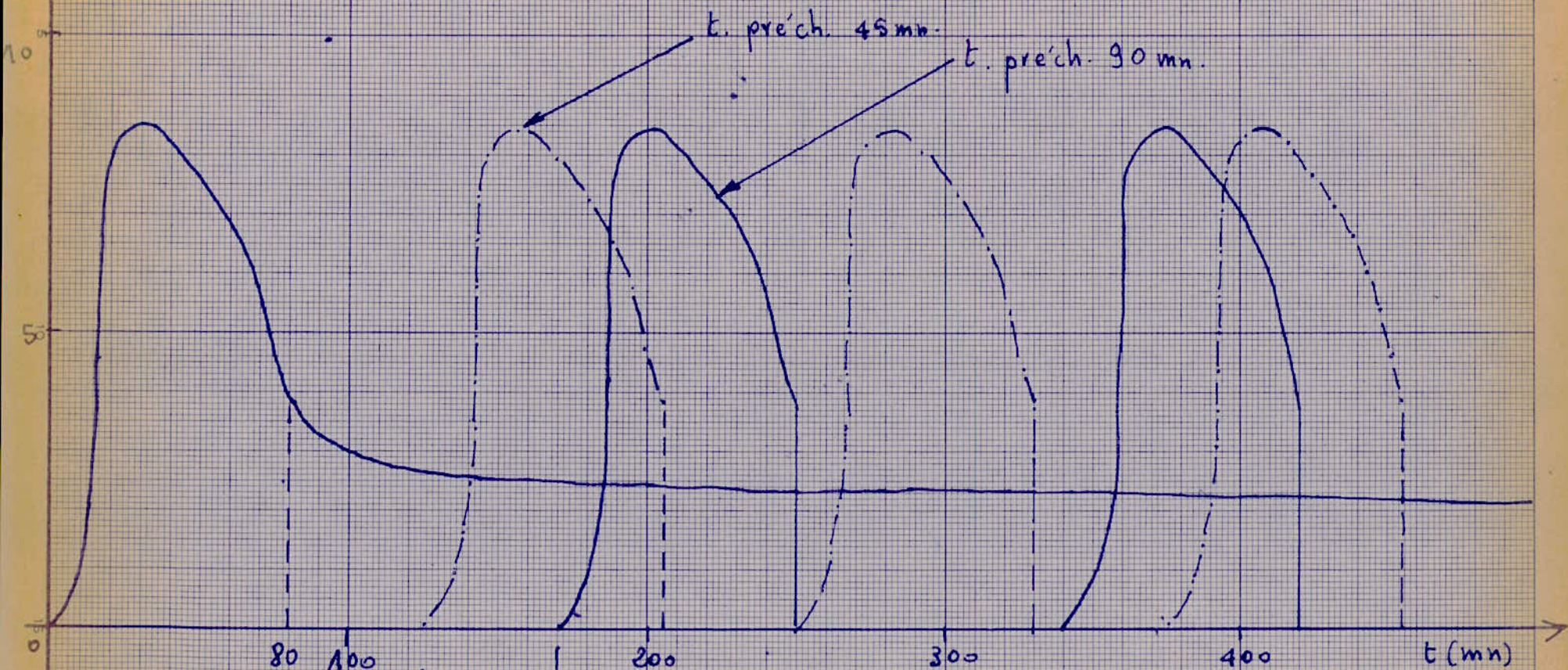
17/4/77

m G.N.L. = f(t).

temps de marche
pour régime

interrompu 80 mn

C14



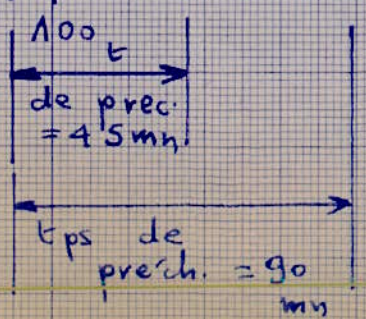
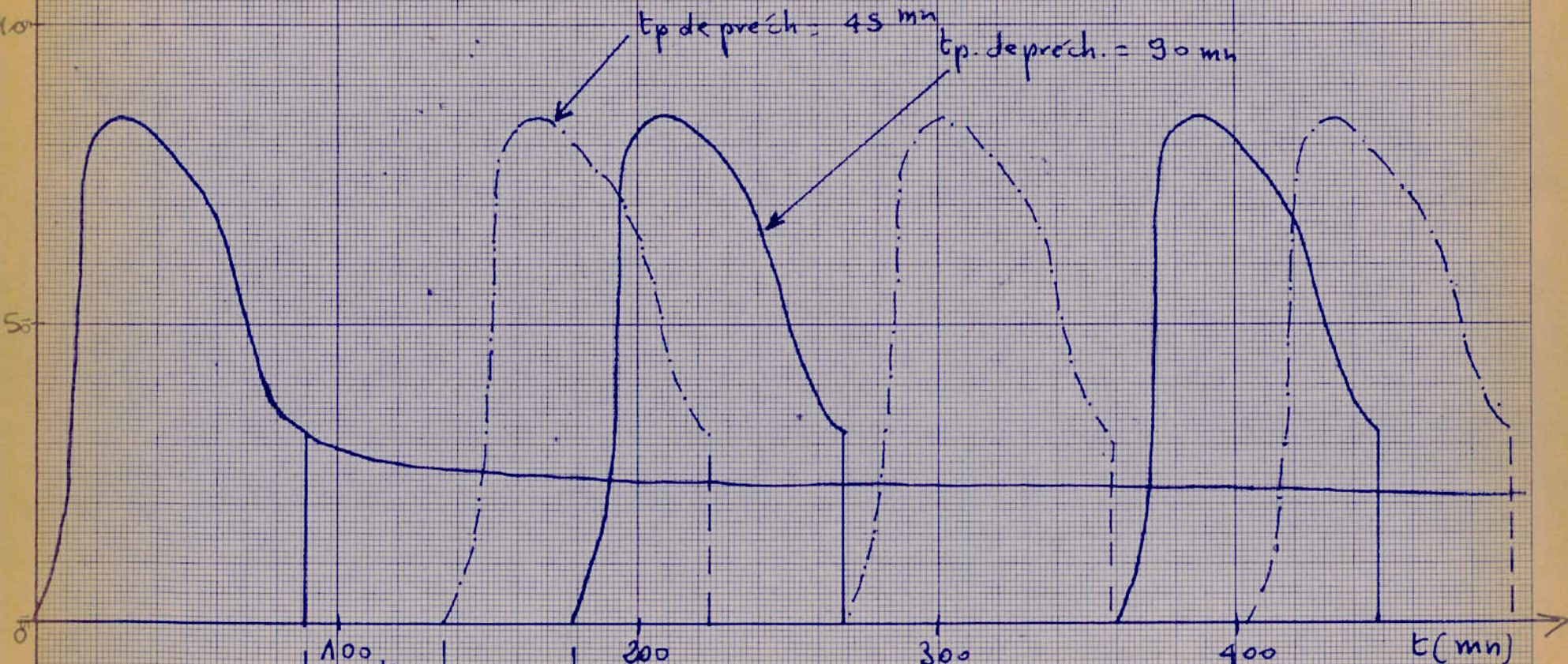
| temps de préch. | Régime continu | Régime interrompu |
|-----------------|------------------|-------------------|
| 90 mn | 21,8 l en 420 mn | 24,5 l en 420 mn |
| 45 mn | 23,6 l en 455 mn | 32,6 l en 455 mn |

$$m(\text{GNL.} = e/h)$$

temps de marche
régime interrompu = 90 mn

ESSAI N° 3
 17/4/77
 $\dot{m} = f(t)$

C15



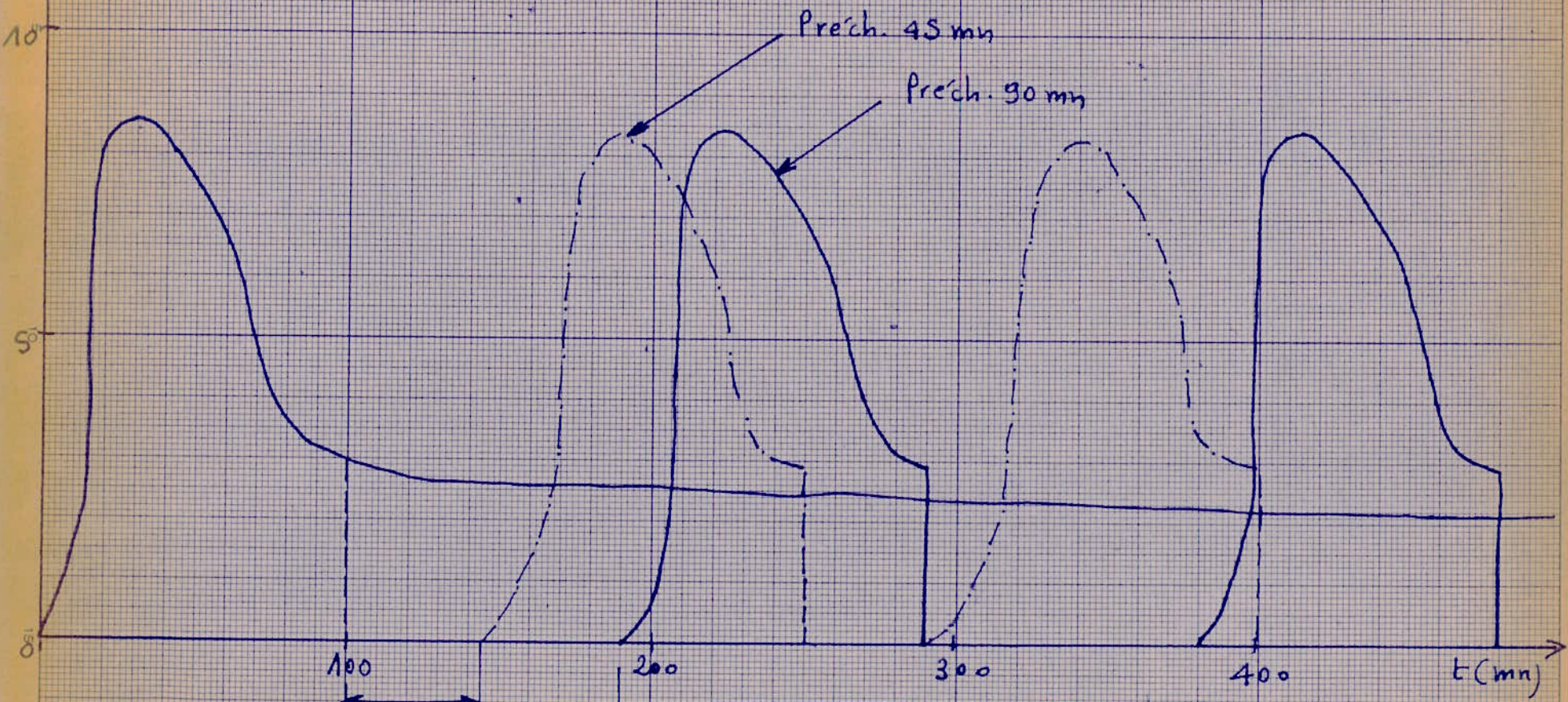
| tp. de préch. | Régime continu | Régime interrompu |
|---------------|------------------|-------------------|
| 90 mn | 23 l en 450 mn | 26,7 l en 450 mn |
| 45 mn | 24,7 l en 495 mn | 35,3 l en 495 mn |

\dot{m} G.N.L. (l/h)

temps de marche
régime interrompu
de 100 mn

ESSAI N°3
17/4/77
 $\dot{m} = f(t)$

C16



100
Préch. 45 mn
200
Préch. 90 mn
300
400
t (mn)

| t de préch. | Régime Continu | Régime interrompu |
|-------------|------------------|-------------------|
| 45 mn | 21,5 l en 400 mn | 27,5 l en 400 mn |
| 90 mn | 26,3 l en 480 | 27,5 l en 480 mn |

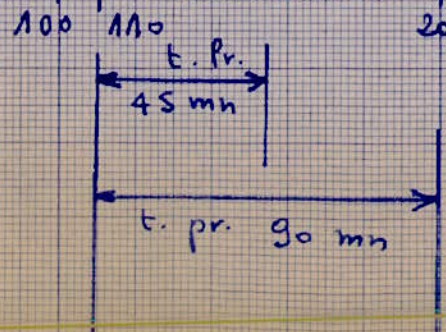
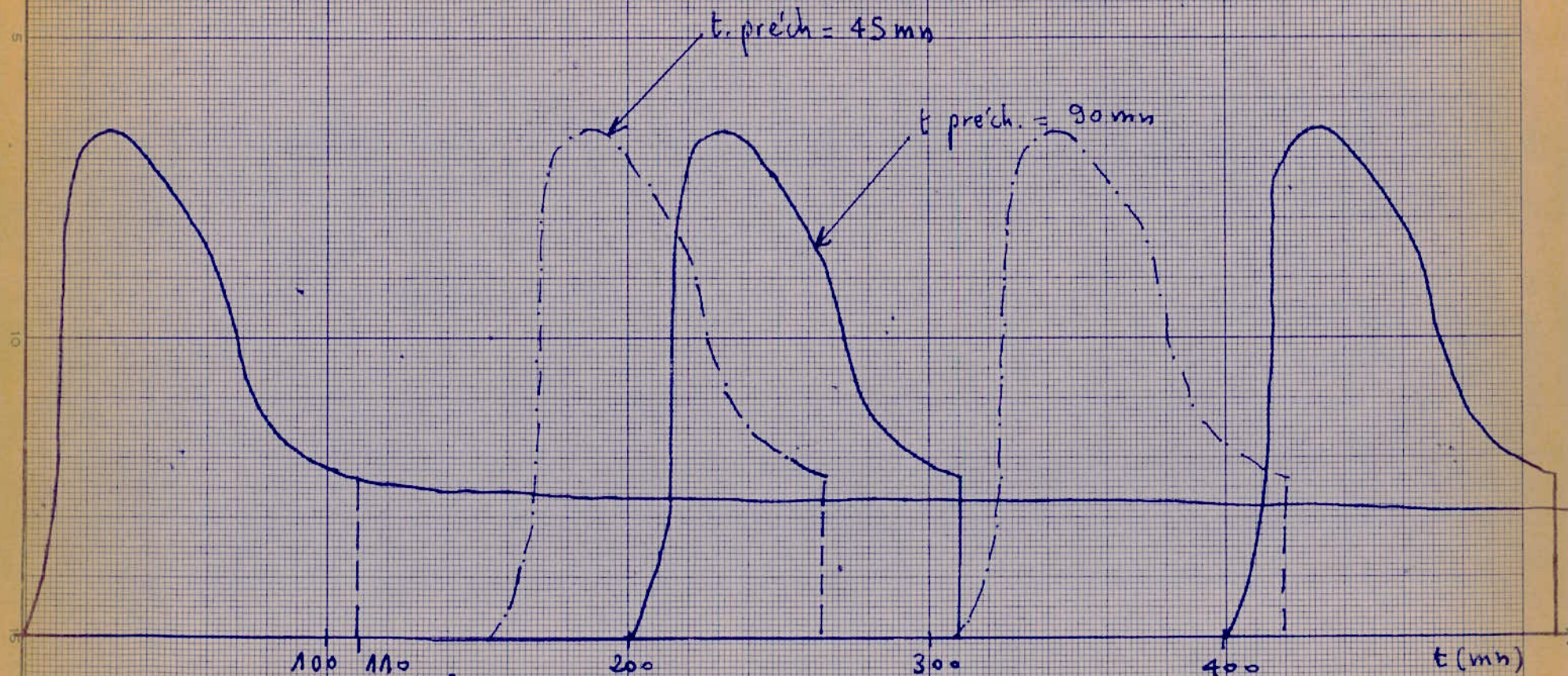
$$\dot{m}_{G.N.L.} = f(t)$$

$$l/h.$$

ESSAI N° 3
17/4/77
 $\dot{m}_{G.N.L.} = f(t).$

temps de marche
régime interrompu : 110 mn

C17



| t. de préch. | Régime Continu | Régime interrompu |
|--------------|------------------|-------------------|
| 90 mn | 26 l en 510 mn | 29,2 l en 510 mn |
| 45 mn | 21,8 l en 420 mn | 29,2 l en 420 mn |

ESSAI N°3 . PLANIMETRISATION
 DE LA COURBE $\dot{m} = f(H)$ DU
 REGIME CONTINU.

N°1

| Temps de fonctionnement (mn) | Production de G.N.L. en l | Temps de fonctionnement (mn) | Production de G.N.L. en l. |
|------------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 10 | 0,16 | 150 | 11,50 |
| 20 | 0,83 | 180 | 12,66 |
| 30 | 2,33 | 210 | 13,83 |
| 40 | 3,90 | 240 | 15,00 |
| 50 | 5,33 | 270 | 15,90 |
| 60 | 6,33 | 300 | 17,46 |
| 70 | 7,13 | 330 | 18,66 |
| 80 | 8,00 | 360 | 19,83 |
| 90 | 8,66 | 390 | 21,00 |
| 100 | 9,16 | 420 | 22,00 |
| 110 | 9,66 | 450 | 23,18 |
| 120 | 10,16 | 480 | 24,33 |

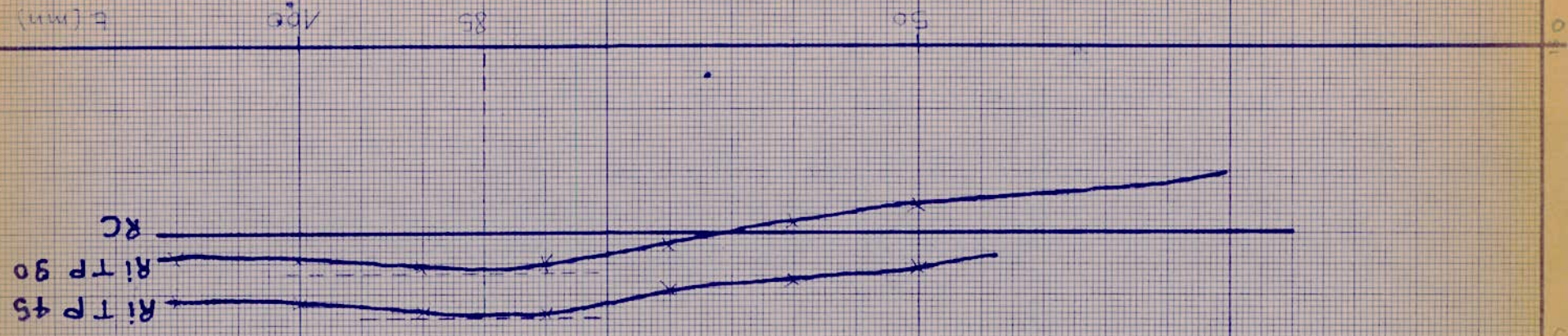
RECAPITULATIF DES RESULTATS
 DE COMPARAISON OBTENUS PAR
 PLANIMETRISEMENT DES COURBES $m^o = f(t)$.

N°2

| " temps de marche " en mn | temps de Préchauffe en mn | PRODUCTION DU REGIME INTERROMPU | PRODUCTION DU REGIME CONTINU |
|------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| 50 | 90 | 20 l en 470 mn | 24 l en 470 mn |
| | 45 | 25 l en 425 mn | 20,6 l en 425 mn |
| 60 | 90 | 24 l en 510 mn | 26 l en 510 mn |
| | 45 | 30 l en 480 mn | 24,3 l en 480 mn |
| 70 | 90 | 22 l en 390 mn | 20,8 l en 390 mn |
| | 45 | 27 l en 415 mn | 21,7 l en 415 mn |
| 80 | 90 | 24,5 l en 420 mn | 21,8 l en 420 mn |
| | 45 | 32,6 l en 455 mn | 23,6 l en 455 mn |
| 90 | 90 | 26,5 l en 450 mn | 23 l en 450 mn |
| | 45 | 35,3 l en 495 mn | 24,5 l en 495 mn |
| 100 | 90 | 27,5 l en 400 mn | 21,3 l en 400 mn |
| | 45 | 27,5 l en 480 mn | 26,3 l en 480 mn |
| 110 | 90 | 29,2 l en 510 mn | 26 l en 510 mn |
| | 45 | 29,2 l en 420 mn | 21,8 l en 420 mn |

courbes de variation des débits moyens en
 fonction des intervalles de marche du
 facteur.
 RI TP 45 = Régime inter. Temps de presch. 45 mn
 RI TP 90 = " " " " " 90 mn
 RC = " " " " " continu.

$m^2 \text{ S.N.L. } (P/H)$



C18

Résultats et conclusion sur la liquéfaction du gaz naturel.

Essais et dépouillement

Nous avons fait 5 essais sur la liquéfaction du gaz naturel; dans les essais (1), (2), (5) l'évolution de la production de G.N.L. n'a pas été bien suivie puisque le temps de marche fut très court et ceci à cause des différents arrêts et pannes du liquéfacteur (ex: détérioration des fusibles qui nécessitent 1/4 d'heure de réparation, arrêt du liquéfacteur quand le débit est trop faible). Par contre, les essais (3) et (4) nous ont permis de contrôler et d'étudier l'évolution de la production de ce liquéfacteur. Nous constatons d'une manière générale, dans les premières 40 mn, la production est croissante jusqu'à une valeur d'environ 8,5 l/h, puis elle décroît brusquement et descend jusqu'à 3 l/h, et ceci en l'espace de 30 mn et se stabilise à cette valeur. On note au passage que l'évolution de la puissance fournie par le moteur est normale et se stabilise à 0,9 kw au bout de 70 mn de marche du liquéfacteur: voir courbes (C1, C2, C3, C4, C5); les rendements pour les essais qui nous intéressent (essais 3 et 4) ont les mêmes allures que celles du débit en fonction du temps; à la stabilisation de la production le rendement est de 0,3, voir courbes (C6, C7, C8, C9, C10);

On remarque que la production est beaucoup affectée par le dépôt de givre sur la tête du condenseur. Le drain d'évacuation des lourds se trouve souvent bouché, ce qui augmente le givrage de la tête, donc

diminution de la production et quelques fois arrêt du liquéfacteur .

Détermination du meilleur temps de marche

Maintenant il s'agit de voir quelle est la meilleure utilisation du liquéfacteur . On aura à comparer pour cela deux sortes d'utilisations :

-Utilisation sous régime permanent .

-Utilisation sous régime interrompu , au bout d'un temps bien approprié en préchauffant à chaque fois .

Pour cette étude , on a choisi l'essai 3 qui est beaucoup plus régulier que l'essai 4 .

Observons pour cela la courbe $\dot{m} = f(t)$, voir C3 . On se propose d'arrêter le liquéfacteur au bout d'un certain temps T de façon que le liquéfacteur aura été utilisé que là où il débite le plus . Donc l'opération aura les séquences suivantes :

1- début: préchauffage du liquéfacteur et mise en marche du liquéfacteur .

2- arrêt du liquéfacteur au bout d'un temps T .

3- préchauffage du liquéfacteur durant un temps t .

4- mise en marche du liquéfacteur de nouveau et arrêt au bout du même temps T ; et ainsi de suite .

Nous avons fait varier le temps de marche T de 50mn à 110mn par pas de 10mn et avons par ailleurs considéré 2 temps de préchauffe $t_1 = 90mn$ donné par la soufflerie (PW 7115) disponible au laboratoire et $t_2 = 45mn$ donné par les souffleries (PW 7201 à 7209) non disponible au laboratoire de liquéfaction . On a construit les courbes débit de G.N.L. en fonction du temps pour ce régime interrompu en reproduisant

le long de l'axe des temps la partie de la courbe du régime continu où le liquéfacteur débite le plus ; voir courbes C11 à C17 .

Pour avoir la production de G.N.L. pour chaque couple (T , t)

(T= temps de marche ou intervalle de marche et t = temps de préchauffe)

on a planimétré donc toutes les courbes C11 à C17 : voir tableau des résultats N° 2. Nous avons calculé les débits moyens pour chaque régime et avons tracé les courbes de débits moyens en fonction du temps, voir courbe C18 .

Sur la courbe C18 on peut voir quelle est le couple (T,t) qui nous donne la meilleure production. On voit dans C18 que pour un préchauffage de 90mn ou de 45mn, le meilleur temps de marche du liquéfacteur est de 85mn. Pour ce temps ou intervalle de temps de marche (85) , les débits sont :

$$-t=45 \text{ mn} , \quad \overset{\circ}{m} = 4,4 \text{ l/h}$$

$$-t=90 \text{ mn} , \quad \overset{\circ}{m} = 3,7 \text{ l/h}$$

$$- \text{régime continu} , \quad \overset{\circ}{m} = 31/\text{h} : \text{constant} .$$

| soufflerie ou temps de préchauffe | t. de marche du liquéfacteur | débit régime continu | débit régime interrompu | accroissement |
|--|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|
| PW 7201 à 7209 t= 45 mn | 85 mn | 3 l/h constant | 4,4 l/h | 46% |
| PW 7115 t= 90 mn | | | 3,7 l/h | 23% |

Donc avec un temps de marche de 85 mn et avec un préchauffage de 90 mn , notre production moyenne passe de 3 l/h à 3,7 l/h et se trouve ainsi accrue de 23% . Mais les résultats atteints par un préchauffage de 45 mn et toujours un temps de marche de 85 mn sont beaucoup plus importants puisque la production moyenne se trouve améliorée de 46% . Il serait donc avantageux que le laboratoire soit équipé de l'une des souffleries PW 7201 à 7209 .

Zone d'utilisation

Observons les courbes C19 : ces courbes représentent en fonction du temps les productions suivantes :

- Production en régime continu.
- Production en régime interrompu avec une préchauffe de 90 mn .
- Production en régime interrompu avec une préchauffe de 45 mn .

On a convenu d'utiliser le liquéfacteur sous régime interrompu (85 mn) avec un temps de préchauffe de 45 mn ou 90 mn . Mais il y a des endroits bien visible dans la courbe C19 où l'utilisation du liquéfacteur sous le régime continu est plus rentable.

DONC : - Résultat général: l'utilisation (85,45) est plus économique que l'utilisation (85, 90) qui elle-même plus économique que le régime continu . Cependant :

- En certains endroits le régime continu (RC) est plus rentable que les utilisations (85,45) ou (85,90)

EXEMPLE: on a un réservoir de 10 l à remplir de G.N.L. , regardons la courbe C19, elle indique :

- le liquéfacteur débite 10 l en 114 mn sous le régime continu
- le liquéfacteur débite 10 l en 156 mn sous le régime (RI 85 45)
- le liquéfacteur débite 10 l en 200 mn sous le régime (RI 85 90)
- le liquéfacteur débite 14 l comme suit :
 - en 186 mn sous le régime (RI 85 45)
 - en 200 mn sous le régime continu (RC)
 - en 234 mn sous le régime (RI 85 90)

RI 85 45 = REGIME INTERROMPU TEMPS DE MARCHE 85 MN , PRECHAUFFE 45 MN

RI 85 90 = ----- 90 MN

RC = REGIME CONTINU

GAIN DE TEMPS = GAIN D'ENERGIE = ECONOMIE

Remarque : ceci est valable que dans le cas où on a à remplir un réservoir de G.N.L. et de n'utiliser le liquéfacteur que plus tard .

On va classer donc ces utilisations particulières du liquéfacteur comme suit :

TABLEAU D'UTILISATION DU LIQUEFACTEUR EN

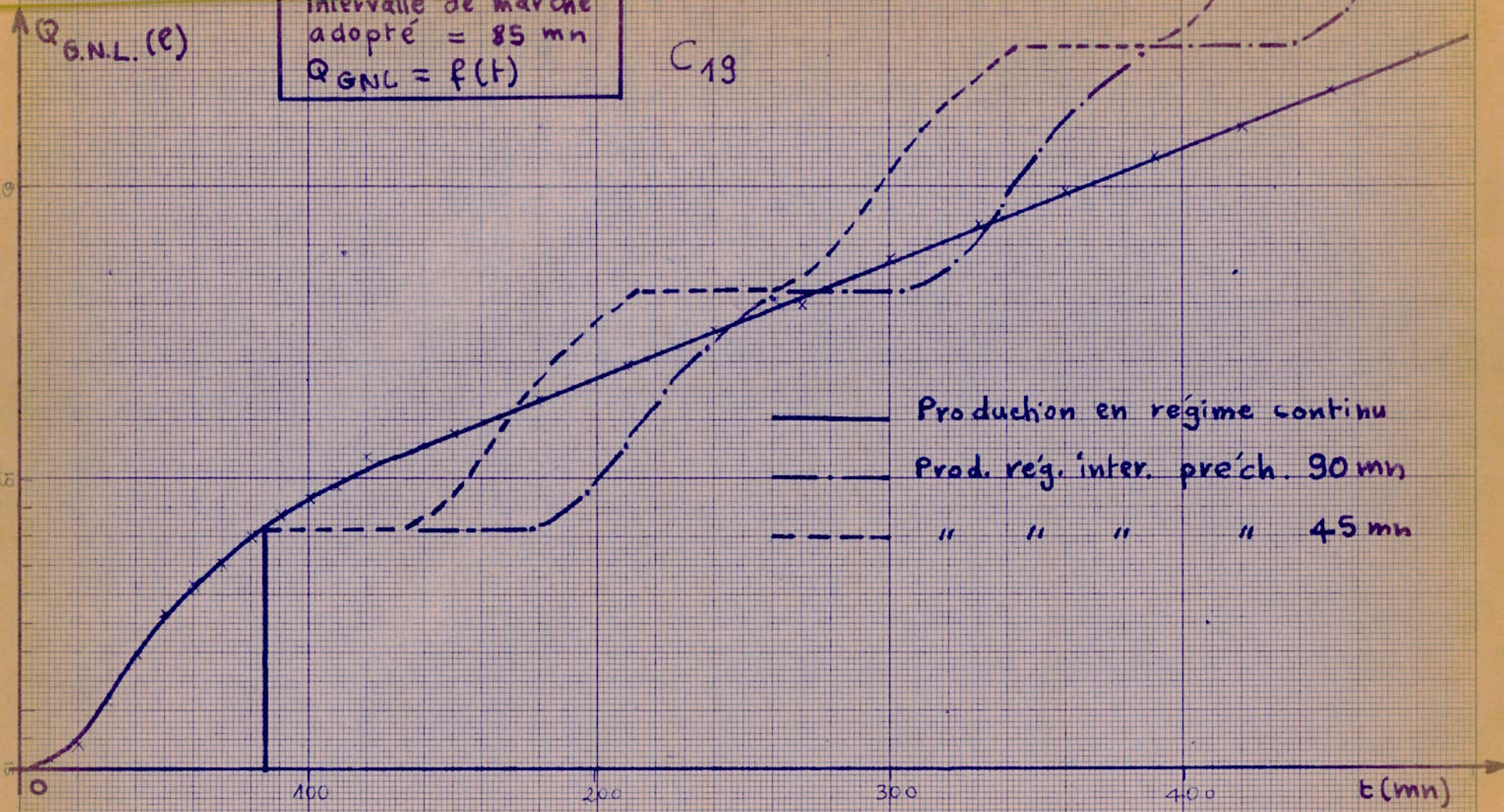
PRODUCTION DE G.N.L.

| | |
|---------------------|---|
| 0,2 Q ≤ 12 litre | (1) RC, (2) RI8545, (3) RI8590 |
| 12,4 Q ≤ 14,4 litre | (1) RI8545, (2) RC, (3) RI8590 |
| 14,4 Q ≤ 16,4 litre | (1) RI8545, (2) RI8590, (3) R.C |
| 16,4 Q ≤ 18,8 litre | (1) RI8545, (2) RC, (3) RI8590 |
| 18,8 Q litre | Utilisation sous RI8545 ou RI8590, les courbes correspondantes sont nettement au-dessus de celles de RC |

Remarque : Q est la production de gaz naturel liquide en litre

intervalle de marche
adopté = 85 mn
 $Q_{G.N.L.} = f(t)$

C19



- Production en régime continu
- · - Prod. rég. inter. préch. 90 mn
- - - " " " " 45 mn

CALCUL DES PERTES DE GAZ NATUREL

Extrait du tableau des résultats de l'essai numéro (1)

| temps de mesure en mn | indication du compteur de G.N. en m ³ | débit de G.NL. mesuré en g/mn | masse b volu. du G.N. en Kg :/m ³ |
|-----------------------|--|-------------------------------|--|
| 85 | 4229,810 | 38,3 | 0,85 |
| 90 | 4230,190 | 38,3 | 0,85 |

Calcul du débit de gaz naturel:

$$\frac{G.N.}{m} = \frac{4230,190 - 4229,810}{90 - 85} \quad m^3 / mn$$

$$\frac{G.N.}{m} = 78,5 \text{ g/mn}$$

Calcul des pertes //

On a fourni 78,5 g/mn et l'on récupère seulement 38,3 g/mn.
On remarque que cet exemple nous donne des pertes assez importantes, de l'ordre de 50%.

REMARQUES ET PROPOSITIONS

Si l'air ambiant était sec , il n'aurait pas fallu préchauffer la tête du condenseur durant 45 mn ou 90 mn . Durant les essais , l'air ambiant était très humide et son humidité est montée jusqu' à 80 % . Mais à défaut d'air sec , on aurait pu utiliser comme gaz sec le gaz naturel lui-même et dans ce cas , quelques minutes suffiront pour faire démarrer le liquéfacteur . Un essai provisoire a été fait auparavant et cela a donné de bons résultats . Il est nécessaire de reconsidérer cette possibilité de préchauffage de la tête avec le gaz naturel et de faire des calculs de rentabilité .

Puisqu'on a convenu d'utiliser le liquéfacteur sous le régime intermittent(interrompu) , il est commode d'automatiser la combinaison arrêt-mise en marche du liquéfacteur et arrêt-mise en marche de la soufflerie par un système d'horlogerie électronique .

Dans les essais de liquéfaction du gaz naturel , nous avons rencontré beaucoup d'inconvénients au niveau des mesures de débit de G.N. , car en vidant le dewar de son contenu de G.N.L. dans un réservoir il y a un dégagement considérable de vapeurs qui nuisent à l'organisme humain .Pour cela il faut que le laboratoire de liqué-

faction soit équipé de masques à gaz ou bien aménager un robinet sur le dewar (ce qui améliorera le transvasement dewar-réservoir)

On a constaté à plusieurs reprises que les pannes du liquéfacteur sont dues pour la plupart à une diminution du débit d'eau de refroidissement , car le liquéfacteur au-delà d'une valeur minimale du débit d'eau , s'arrête de lui-même et déclenche une sonnerie. Cette sonnerie est actuellement en panne .

Cette diminution du débit d' eau de refroidissement est due en particulier à l'utilisation considérable d'eau par les autres au labora-
usagers
toire . Il est donc nécessaire d'isoler le circuit d'alimentation en eau du liquéfacteur .

Bibliographie

- 1- Notice du liquéfacteur.
 - 2- Cours de Mr Muller sur la liquéfaction .
 - 3- Projet de fin d'étude de Mr Achour sur la liquéfaction .
-

13010

EX 13

14/77

UNIVERSITÉ D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

desc

PROJET DE FIN D'ETUDES

LIQUEFACTION DE L'AIR ET
DU GAZ NATUREL
&
COMBUSTION DU
GAZ NATUREL

T₂

Proposée par :

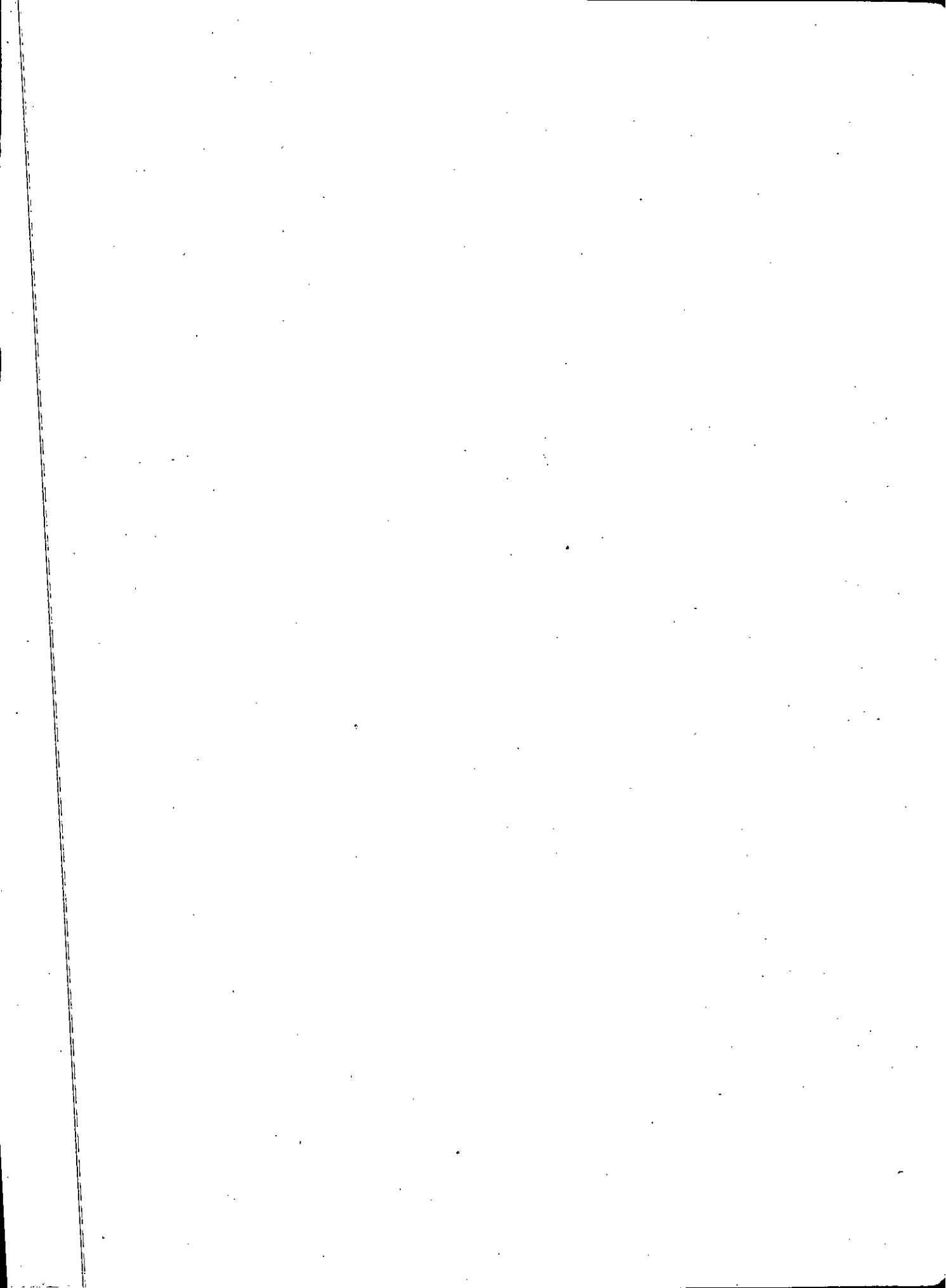
Mr. J.P. MULLER

Etudié par :

GHEDJATTI A.

avec la collaboration de
MEDJBER S.

Promotion : Juin 1977



UNIVERSITÉ D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

LIQUEFACTION DE L'AIR ET
DU GAZ NATUREL
&
COMBUSTION DU
GAZ NATUREL

Proposée par :

Mr. J.P. MULLER

Etudié par :

GHEDJATTI A.

avec la collaboration de
MEDJBER S.

Promotion : Juin 1977

NOS REMERCIEMENTS VONT A MONSIEUR J.P. MULLER
NOTRE PROMOTEUR ET AINSI QU'A MESSIEURS BOUSSARD ET
COEVOET POUR AVOIR SUIVI NOTRE TRAVAIL TOUT LE LONG
DU SEMESTRE .

A MES PARENTS

PREMIERE PARTIE

LIQUEFACTION DE L'AIR

ET DU GAZ NATUREL

INTRODUCTION

D'une manière générale , le but de cette étude est de dégager la plus avantageuse utilisation du liquéfacteur qu'on dispose à l'école nationale polytechnique .

Pour cela , nous avons fait une série d'essais de liquéfaction d'air et de gaz naturel . Nous nous sommes intéressés beaucoup plus à la liquéfaction du gaz naturel que celle de l'air, car c'est la liquéfaction du gaz naturel qui pose beaucoup plus de problèmes quant à la production .

Pour ces différents essais , nous avons relevé essentiellement

- débit d'eau de refroidissement
- puissance fournie par le moteur
- température d'entrée et de sortie de l'eau de refroidissement
- pression d'hydrogène
- débit de gaz liquide (G.N.L. ou air L.)
- humidité de l'air ambiant
- chronométrage du temps de marche du liquéfacteur .

Pour l'étude proprement dite , nous avons calculé les rendements de liquéfaction , les efficacités de liquéfaction . Un calcul des pertes de gaz naturel au cours de sa liquéfaction . a été fait .

Nous avons représenté sur des graphes l'évolution de la production du gaz naturel et air liquides et du rendement de liquéfaction au cours du temps de marche du liquéfacteur . D'autres courbes ont été nécessaires pour pouvoir arriver à une conclusion .

Gaz à Liquéfier AIR

$$\rho_{\text{air}} = 0,764 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{air liq}} = 855 \text{ kg/m}^3$$

Essai N° 1

9/4/77

| temps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d' eau m ³ | débit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P Hz kg/cm ² | m ³ air kg/s | m ³ air liquide g/mn | m ³ air liquide l/h | P moteur eau froid | t°c thermom. humide | % humidité |
|-----------------------|---|---|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------|
| 0 | 1096,0 | 250,2 | | 13 | | | | 0 | 0 | | 14 | 70 |
| 2 | | | | " | | | | " | " | 0,540 | | |
| 3 | | | | " | | | | " | " | 0,645 | | |
| 3.30 | | | | " | | | | " | " | 0,690 | | |
| 4 | | | | " | | | | " | " | 0,705 | | |
| 5 | | | | " | | | | " | " | 0,750 | | |
| 5.30 | | | | " | | | | " | " | 0,780 | | |
| 6 | | | | " | | | | " | " | 0,810 | | |
| 6.30 | | | | " | | | | " | " | 0,840 | | |
| 7 | | | | " | | | | " | " | 0,870 | | |
| 7.30 | | | | " | | | | " | " | 0,870 | | |
| 8 | | | | " | | | | " | " | 0,900 | | |
| 8.30 | | | | " | | | | " | " | 0,930 | | |
| 10 | | | | " | | | | " | " | 0,945 | | |
| 11.30 | | | | " | | | | " | " | 0,960 | | |

Gaz a' liquifier AIR

$P_{air} = 0,764 \text{ kg/m}^3$

$P_{air Lq} = 855 \text{ kg/m}^3$

ESSAI N°1

9/4/77

| temps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d'eau m ³ | debit d'eau l/s | t° eau entree °C | t° eau sortie °C | P H ₂ kg/cm ² | M air kg/s | m air liquide g/mn | m air liquide l/h | P moteur cap. froid kW | t°c thermo. humide | % humidite |
|--------------------|----------------------------------|---|-----------------|------------------|------------------|-------------------------------------|------------|--------------------|-------------------|------------------------|--------------------|------------|
| 19 | 1096,6 | 251,40 | | 13 | 28 | 22,2 | | 0 | 0 | 0,960 | 14 | 70% |
| 21 | 1096,7 | 251,42 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,960 | | |
| 23 | 1096,7 | 251,44 | 0,166 | " | " | 22,5 | | | | 0,963 | | |
| 26 | 1096,7 | 251,46 | 0,111 | " | " | 22,7 | | | | 0,990 | | |
| 31 | 1096,8 | 251,56 | 0,333 | " | 29 | 23 | | | | 1,050 | | |
| 34 | 1096,9 | | | " | " | " | | | | 0,990 | | |
| 36 | 1096,9 | 251,58 | | 14,5 | " | " | | | | 0,990 | | |
| 39 | 1097,0 | 251,60 | 0,111 | " | " | " | | | | 0,966 | | |
| 41 | 1097,0 | 251,62 | 0,166 | " | " | " | | | | 0,996 | | |
| 43 | 1097,1 | 251,64 | 0,166 | " | " | " | | 85 | 5,95 | 1,005 | | |
| 48 | 1097,2 | 251,70 | 0,200 | " | " | " | | 99 | 6,93 | 0,975 | | |
| 56 | 1097,3 | 251,78 | 0,166 | 14 | 28,5 | " | | 99 | 6,93 | 0,975 | | |
| 63 | 1097,4 | 251,85 | 0,166 | " | " | 22,8 | | 99 | 6,93 | 0,975 | | |
| 66 | 1097,5 | 251,89 | 0,222 | 14,5 | " | 22,8 | | 98 | 6,86 | 0,975 | | |

Gaz a' Liquifier AIR

 $\rho_{\text{air}} = 0,764 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{\text{air liq}} = 855 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

ESSAI N° 2

10/4/77

| temps de mesure en mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d'eau m ³ | debit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P Hu kg/cm ² | m° air kg/s | m° air liquide g/mn | m° air liquide l/h | P moteur cap R <u>u</u> | t°c thermo. humide | % humidite |
|-----------------------|----------------------------------|---|-----------------|----------------|----------------|-------------------------|-------------|---------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|------------|
| 0 | . | 252, 386 | | 13 | 19. | 19 | | 0 | 0 | 0 | 14 | 70 |
| 1 | 1098,2 | 252, 398 | 0,200 | " | 20 | 21 | | " | " | 0,435 | | |
| 2 | " | 252, 408 | 0,166 | " | 22 | 21,2 | | " | " | 0,480 | | |
| 3 | " | 252, 420 | 0,200 | " | 22,5 | " | | " | " | 0,540 | | |
| 4 | " | 252, 431 | 0,183 | " | 23 | 21,3 | | " | " | 0,592 | | |
| 5 | " | 252, 442 | 0,183 | " | " | 21,5 | | " | " | 0,645 | | |
| 6 | 1098,3 | 252, 455 | 0,216 | " | 24 | " | | " | " | 0,705 | | |
| 7 | " | 252, 466 | 0,183 | " | 24,5 | 21,7 | | " | " | 0,757 | | |
| 8 | " | 252, 476 | 0,166 | " | 25 | 21,9 | | " | " | 0,810 | | |
| 9 | " | 252, 490 | 0,433 | " | " | 22 | | " | " | 0,862 | | |
| 10 | " | 252, 500 | 0,166 | " | 25,5 | " | | " | " | 0,900 | | |
| 11 | " | 252, 512 | 0,200 | " | 26 | " | | " | " | 0,940 | | |
| 12 | " | 252, 523 | 0,183 | " | " | 22,2 | | " | " | 0,952 | | |
| 13 | " | 252, 535 | 0,200 | " | " | " | | " | " | 0,960 | | |
| 14 | 1098,4 | 252, 545 | 0,166 | " | 26,5 | " | | " | " | 0,960 | | |

Gaz à liquéfier AIR

 $\rho_{\text{Air}} = 0,764 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{\text{Air liq}} = 811 \text{ kg/m}^3$

ESSAI N° 3

10/4/77

| temps de mesure en mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d'eau m ³ | débit d'eau l/s | t ^{oc} eau entrée | t ^{oc} eau sortie | P Hz kg/cm ² | m ^o air kg/s | m ^o air liquide g/mn | m ^o air liquide l/h | P moteur froid cap kw | t ^{oc} thermo. humide | % humidité |
|-----------------------|----------------------------------|---|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------|
| 0 | 1099,3 | 253,255 | | 12,5 | 16,5 | 18 | | 0 | 0 | 0 | 14 | 70 |
| 30 | " | 253,257 | 0,07 | 13 | 21 | 21,5 | | " | " | 0,495 | | |
| 1 | " | 253,265 | 0,27 | " | 22 | " | | " | " | 0,525 | | |
| 1.30 | " | 253,270 | 0,17 | " | " | " | | " | " | 0,570 | | |
| 2 | " | 253,275 | 0,17 | " | 23 | " | | " | " | 0,600 | | |
| 2.30 | 1099,4 | 253,282 | 0,23 | " | " | " | | " | " | 0,630 | | |
| 3 | " | 253,283 | 0,03 | " | 23,5 | 21,6 | | " | " | 0,660 | | |
| 3.30 | " | 253,291 | 0,27 | " | 24 | " | | " | " | 0,697 | | |
| 4 | " | 253,298 | 0,23 | " | " | 21,7 | | " | " | 0,720 | | |
| 4.30 | " | 254,303 | 0,17 | " | 24,5 | 22 | | " | " | 0,757 | | |
| 5 | " | 254,310 | 0,23 | " | 25 | " | | " | " | 0,780 | | |
| 5.30 | " | 254,316 | 0,20 | " | " | " | | " | " | 0,810 | | |
| 6 | " | 254,320 | 0,13 | " | " | " | | " | " | 0,840 | | |
| 6.30 | " | 254,325 | 0,17 | " | 25,5 | " | | " | " | 0,870 | | |
| 7 | " | 254,332 | 0,23 | " | 26 | 22,2 | | " | " | 0,885 | | |

Gaz à liquéfier AIR

 $\rho_{air} = 0,767 \frac{kg}{m^3}$ $\rho_{air liq} = 855 \frac{kg}{m^3}$

ESSAI N° 3

10/4/77

| temps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d'eau m ³ | débit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P H ₂ kg/cm ² | m ³ air kg/s | m ³ air liquide g/mn | m ³ air liquide l/h | P cap. moteur froid Kw | t°c thermo. humide | % humidif. |
|--------------------|----------------------------------|---|-----------------|----------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------|------------|
| 7.30 | " | 254, 338 | 0,20 | 13 | 26 | 22,2 | | " | " | 0,907 | 14 | 70 |
| 8 | " | 254, 344 | 0,20 | " | " | " | | " | " | 0,915 | | |
| 8.30 | 1099,5 | 254, 350 | 0,20 | " | " | " | | " | " | 0,930 | ... | |
| 9 | " | 254, 356 | 0,20 | " | 26,5 | " | | " | " | 0,945 | | |
| 9.30 | " | 254, 360 | 0,13 | " | 26,5 | " | | " | " | " | | |
| 10 | " | 254, 367 | 0,23 | " | " | " | | " | " | " | | |
| 10.30 | " | 254, 372 | 0,17 | " | " | " | | " | " | " | | |
| 11 | " | 254, 377 | 0,17 | " | 27 | " | | " | " | " | | |
| 13.30 | " | 254, 406 | 0,14 | " | " | 22,4 | | " | " | " | | |
| 15 | " | 254, 424 | 0,20 | " | " | 22,6 | | " | " | 0,960 | | |
| 16 | 1099,6 | 254, 435 | 0,18 | " | " | 22,8 | | " | " | 0,967 | | |
| 17 | " | 254, 478 | 0,72 | " | " | " | | 52,5 | 3,675 | 0,975 | | |
| 19 | " | 254, 502 | 0,40 | " | " | " | | | | 1,012 | | |
| 22 | 1099,7 | 254, 535 | 0,18 | " | " | " | | | | 1,027 | | |
| 25 | " | 254, 565 | 0,17 | " | " | " | | | | 0,960 | | |

Gaz à liquifier AIR

$P_{AIR} = 0,764 \text{ kg/m}^3$

$P_{air \text{ lig}} = 855 \text{ kg/m}^3$

ESSAI N° 4

11/4/77

| Temps de mesure mn | indication compteur horaire h | indication compteur d'eau m ³ | débit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P H ₂ kg/cm ² | m° air kg/s | m° air liquide g/mn | m° air liquide l/h | P cop/moteur froid kw | t°c thermo-humide | % humidité |
|--------------------|-------------------------------|--|-----------------|----------------|----------------|-------------------------------------|-------------|---------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|------------|
| 0 | | | | 12,5 | | 21,5 | | 0 | 0 | 0 | 14 | 70 |
| 11 | | | | " | 25 | 22 | | " | " | 0,825 | | |
| 12 | | | | " | 26 | " | | " | " | 0,855 | | |
| 13 | | | | " | " | " | | " | " | 0,900 | | |
| 14 | | | | " | " | " | | " | " | 0,930 | | |
| 15 | | | | " | " | " | | " | " | 0,945 | | |
| 16 | | | | " | " | " | | " | " | 0,952 | | |
| 17 | | | | " | " | " | | " | " | " | | |
| 18 | | | | " | " | " | | 33 | 2,310 | " | | |
| 20 | | | | 12 | 27,5 | 22,5 | | | | 0,960 | | |
| 28 | | | | 12 | 28 | 22,7 | | | | 0,975 | | |
| 32 | | | | " | " | " | | | | 0,997 | | |
| 35 | | | | " | " | 22,8 | | | | 1,035 | | |
| 38 | 1101,6 | 255,195 | | " | " | 22,6 | | | | 0,975 | | |
| 40 | " | 255,218 | 0,190 | " | " | " | | | | " | | |

Gaz à liquéfier AIR

 $P_{\text{air}} = 0,764$ $P_{\text{air liq.}} = 855 \text{ kg/m}^3$

ESSAI N° 5

12/4/77

| Temps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d'eau m ³ | débit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P H ₂ kg/cm ² | m° air kg/s | m° air liq. g/mn | m° air liq. l/h | P moteur comp. froid (kw) | t°c thermo. humide | % humidité |
|--------------------|----------------------------------|---|-----------------|----------------|----------------|-------------------------------------|-------------|------------------|-----------------|---------------------------|--------------------|------------|
| 0 | 1102,6 | 255,870 | | 18 | 17 | 18 | | 0 | 0 | 0 | 14 | 70 |
| 30 | " | 255,876 | 0,200 | " | " | 21 | | " | " | 0,420 | | |
| 1 | " | 255,884 | 0,266 | " | 20 | " | | " | " | 0,450 | | |
| 2 | " | 255,891 | 0,116 | " | " | 21,2 | | " | " | 0,495 | | |
| 2.30 | " | 255,897 | 0,200 | " | 21 | " | | " | " | 0,525 | | |
| 3 | " | 255,902 | 0,166 | " | 21,5 | 21,3 | | " | " | 0,555 | | |
| 3.30 | " | 255,908 | 0,200 | " | 22 | " | | " | " | 0,577 | | |
| 4 | " | 255,916 | 0,266 | " | " | " | | " | " | 0,613 | | |
| 4.30 | " | 255,922 | 0,200 | " | 23 | 21,5 | | " | " | 0,645 | | |
| 5 | " | 255,927 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,673 | | |
| 5.30 | " | 255,931 | 0,133 | " | " | " | | " | " | 0,690 | | |
| 6 | " | 255,937 | 0,200 | " | " | 21,6 | | " | " | 0,720 | | |
| 6.30 | " | 255,944 | 0,233 | " | 23,5 | 21,7 | | " | " | 0,750 | | |
| 7 | 1102,7 | 255,949 | 0,166 | " | 24 | " | | " | " | 0,780 | | |
| 7.30 | " | 255,956 | 0,233 | " | " | 21,8 | | " | " | 0,810 | | |

Gaz a' liquifier AIR

$\rho_{air} = 0,764 \text{ kg/m}^3$

$\rho_{air \text{ liq}} = 855 \text{ kg/m}^3$

ESSAI N° 5

12/4/77

| temps de mesure mn | indication compteur horaire h | indication du compteur de m ³ | debit d' eau l/s | t°c eau entree | t°c eau sortie | P H ₂ kg/cm ² | m ^o air kg/s | m ^o air liq. g/mn | m ^o air liq. g/h | P moteur Pop froid Kw | t°c thermo. humide | % humidite' humide |
|--------------------|-------------------------------|--|------------------|----------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| 8 | 1102,7 | 255,960 | 0,133 | 12 | 24 | 22 | | 0 | 0 | 0,825 | 14 | 70 |
| 8.30 | " | 255,966 | 0,200 | " | 24,5 | " | | " | " | 0,853 | | |
| 9 | " | 255,972 | 0,200 | " | 25 | " | | " | " | 0,892 | | |
| 9.30 | " | 255,977 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,915 | | |
| 10 | " | 255,982 | 0,166 | " | " | 22,2 | | " | " | 0,930 | | |
| 10.30 | " | 255,988 | 0,200 | " | " | " | | " | " | 0,945 | | |
| 11 | " | 255,993 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,957 | | |
| 11.30 | " | 256,000 | 0,233 | " | 25,2 | " | | " | " | 0,960 | | |
| 12 | " | 256,006 | 0,200 | " | 25,5 | " | | " | " | 0,967 | | |
| 12.30 | " | 256,011 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,963 | | |
| 13 | " | 256,018 | 0,233 | " | " | " | | " | " | 0,960 | | |
| 13.30 | " | 256,024 | 0,200 | " | 26 | " | | " | " | 0,967 | | |
| 14 | 1102,8 | 256,029 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,967 | | |
| 14.30 | " | 256,034 | 0,166 | " | " | 22,3 | | " | " | 0,972 | | |
| 15 | " | 256,040 | 0,200 | " | " | " | | " | " | 0,967 | | |

Gaz a' liquifier AIR

$\rho_{air} = 0,764$

$\rho_{air liq.} = 855 \text{ kg/m}^3$

ESSAI N° 6

12/4/77

| temps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d'eau m ³ | débit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P H ₂ kg/cm ² | m ³ air kg/s | m ³ air liq. g/mn | m ³ air liq. l/h | P compteur froid kcw | t°c thermo. humide | % humidité |
|--------------------|----------------------------------|---|-----------------|----------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------|--------------------|------------|
| 0.30 | | | | 12 | 20 | 21,4 | | | | 0,435 | | |
| 1 | | | | " | " | " | | | | 0,472 | | |
| 2 | | | | " | 21 | " | | | | 0,538 | | |
| 2.30 | | | | " | 22 | " | | | | 0,562 | | |
| 3 | | | | " | " | " | | | | 0,592 | | |
| 3.30 | | | | " | 23 | " | | | | 0,630 | | |
| 4.30 | | | | " | " | 21,5 | | | | 0,675 | | |
| 5 | | | | " | 24 | 21,6 | | | | 0,705 | | |
| 5.30 | | | | " | " | 21,7 | | | | 0,735 | | |
| 6 | 1103,3 | | | " | 25 | 21,8 | | | | 0,765 | | |
| 6.30 | " | | | " | " | " | | | | 0,795 | | |
| 7 | " | | | " | " | 21,9 | | | | 0,825 | | |
| 7.30 | " | | | " | " | 22 | | | | 0,855 | | |
| 8 | " | | | " | " | " | | | | 0,870 | | |
| 8.20 | " | | | " | 26 | " | | | | 0,900 | | |

Gaz a' liquifier AIR

$$\rho_{\text{air}} = 0,764 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{Air liq.}} = 855 \text{ kg/m}^3$$

ESSAI N°6

12 / 4 / 77

| temps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur eau m ³ | debit d' eau l/s | t°c eau entree | t°c eau sortie | P Hz kg/cm ² | debit air kg/s | m° air liq g/mh | m° air liq. l/l | P moteur cop. froid kw | t°c therm. humide | % humidite |
|--------------------|----------------------------------|---|------------------|----------------|----------------|-------------------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------------|-------------------|------------|
| 9 | | | | 12 | 26 | | | | | 0,915 | | |
| 9.30 | | | | | | | | | | 0,937 | | |
| 10 | | | | | | | | | | 0,945 | | |
| 10.30 | 1103,4 | | | | | 22 | | | | 0,960 | | |
| 11 | | | | | | 22,1 | | | | 0,967 | | |
| 11.30 | | | | | | 22,2 | | | | 0,967 | | |
| 12 | | | | | | 22,3 | | | | 0,967 | | |
| 12.30 | | | | | | .. | | | | 0,967 | | |
| 13 | | | | | | 22,4 | | | | 0,960 | | |
| 13.30 | | | | | | | | | | 0,960 | | |
| 14 | | | | | | 22,5 | | | | 0,960 | | |
| 14.30 | | | | | | | | | | 0,960 | | |
| 15 | | | | | | 22,6 | | | | 0,967 | | |
| 20 | 1103,5 | | | | 27 | 22,7 | | 52,5 | 3,675 | 0,967 | | |
| 25.30 | 1103,6 | | | | | | | | | 0,984 | | |

ESSAI Gaz a' liquifier AIR

 $P_{Air} = 0,764 \text{ kg/m}^3$ $P_{Air liq.} = 855 \text{ kg/m}^3$

ESSAI N° 6

12/4/77

| temps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d'eau | débit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P Hz Kg/cm ² | débit air kg/s | débit air liq. g/mn | débit air liq. l/h | P moteur cop. froid kW | t°c thermo-humide | % humidité |
|--------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------------|----------------|---------------------|--------------------|------------------------|-------------------|------------|
| 30 | 1103,7 | 256,842 | | 12 | 27 | 22,8 | | 80,83 | 5,658 | 1,035 | | |
| 35 | 1103,8 | 256,900 | 0,193 | " | 26 | 22,5 | | | | 0,967 | | |
| 40 | " | 256,953 | 0,176 | " | " | 22,6 | | 87,85 | 6,149 | 0,973 | | |
| 45 | 1103,9 | 257,022 | 0,00023 | " | " | 22,5 | | 93,33 | 6,533 | 0,967 | | |
| 55 | 1104,1 | 257,124 | 0,170 | " | " | " | | | | 0,973 | | |
| 60 | 1104,2 | 257,181 | 0,190 | " | " | " | | | | 0,963 | | |
| 65 | 1104,3 | 257,304 | 0,410 | " | " | 22,2 | | 92,50 | 6,475 | 0,967 | | |
| 70 | 1104,4 | 257,360 | 0,186 | " | " | 22,1 | | 90,83 | 6,358 | 0,952 | | 68% |
| 80 | 1104,5 | 257,419 | 0,196 | " | " | 22 | | 92,85 | 6,499 | 0,945 | | |
| 85 | 1104,6 | 257,475 | 0,186 | " | " | " | | | | 0,945 | | 72% |
| 90 | 1104,7 | 257,532 | 0,190 | " | " | " | | 91,66 | 6,416 | 0,960 | | |
| 101 | 1104,8 | 257,656 | 0,188 | " | " | " | | | | 0,952 | | |
| 110 | 1104,9 | 257,757 | 0,240 | " | " | " | | | | 0,952 | | 70% |
| 115 | 1105,1 | 257,815 | 0,193 | " | " | " | | 91,66 | 6,416 | 0,952 | | |
| 125 | 1105,3 | 257,878 | 0,188 | " | " | " | | 81,90 | 5,733 | 0,960 | | 74% |

Gaz à liquéfier AIR

$$P_{\text{air}} = 0,1764 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$P_{\text{air liq.}} = 855 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

ESSAI N° 7

13/4/77

| Temps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d'eau m ³ | débit d' eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P _{H₂} kg/cm ² | m° air kg/s | m° air liq. g/mn | m° air liq. l/h | P _{compteur} moteur froid kw | t°c thermo. humide | % humidité |
|-----------------------|---|---|------------------------|----------------------|----------------------|--|----------------|------------------------|-----------------------|--|--------------------------|---------------|
| 0 | 1105,6 | 257,310 | | 12 | 17,5 | 19 | | 0 | 0 | 0 | | |
| 0.30 | " | 257,314 | 0,133 | " | 18 | 21 | | " | " | 0,397 | | |
| 1 | " | 257,320 | 0,200 | " | 19,5 | 21,5 | | " | " | 0,420 | | |
| 1.30 | " | 257,325 | 0,166 | " | 20 | " | | " | " | 0,450 | | |
| 2 | " | 257,330 | 0,166 | " | 21 | " | | " | " | 0,480 | | |
| 2.30 | " | 257,335 | 0,166 | " | 22 | " | | " | " | 0,510 | | |
| 3 | " | 257,340 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,530 | | |
| 3.30 | 1105,7 | 257,345 | 0,166 | " | 22,5 | " | | " | " | 0,570 | | |
| 4 | " | 257,350 | 0,166 | " | 23 | 21,6 | | " | " | 0,600 | | |
| 4.30 | " | 257,358 | 0,266 | " | " | " | | " | " | 0,620 | | |
| 5 | " | 257,362 | 0,133 | " | " | 21,7 | | " | " | 0,640 | | |
| 5.30 | " | 257,367 | 0,166 | " | 23,5 | " | | " | " | 0,690 | | |
| 6 | " | 257,375 | 0,266 | " | 24 | 21,8 | | " | " | 0,720 | | |
| 6.30 | " | 257,380 | 0,166 | " | " | 21,9 | | " | " | 0,750 | | |
| 7 | " | 257,385 | 0,166 | " | 24,5 | 9,9 | | " | " | 0,780 | | |

Gas a' liquifier AIR

$\rho_{air} = 0,764 \frac{kg}{m^3}$

$\rho_{air liq} = 855 \frac{kg}{m^3}$

ESSAI N° 7

13/4/77

| emps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur d'eau m ³ | débit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P Hz kg/cm ² | m ³ air kg/s | m ³ air liq g/mn | m ³ air liq l/h | P moteur froid. cal/h | t°c thermo. humide | % humidité |
|-------------------|----------------------------------|---|-----------------|----------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------|------------|
| 7.30 | 1105,7 | 257,390 | 0,166 | 19 | 24,5 | 22, | | 0 | 0 | 0,802 | | |
| 8 | " | 257,395 | 0,166 | " | 25 | " | | " | " | 0,825 | | |
| 8.30 | " | 258,400 | 0,166 | " | " | 22,1 | | " | " | 0,855 | | |
| 9 | 1105,8 | 258,407 | 0,233 | " | 25,5 | 22,2 | | " | " | 0,877 | | |
| 9.30 | " | 258,412 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,900 | | |
| 10 | " | 258,417 | 0,166 | " | 26 | " | | " | " | 0,915 | | |
| 10.30 | " | 258,422 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,930 | | |
| 11 | " | 258,428 | 0,200 | " | " | 21,1 | | " | " | 0,945 | | |
| 11.30 | " | 258,433 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,960 | | |
| 12 | " | 258,440 | 0,233 | " | " | 22,2 | | " | " | 0,960 | | |
| 12.30 | " | 258,445 | 0,166 | " | 26,5 | " | | " | " | 0,960 | | |
| 13 | " | 258,450 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,960 | | |
| 14 | " | 258,460 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,960 | | |
| 14.30 | " | 258,465 | 0,166 | " | " | " | | " | " | 0,960 | | |
| 20 | 1105,9 | 258,577 | 0,188 | " | 27 | 22,7 | | 41,6 | 2,919 | 0,990 | | |

Gaz à liquifier AIR

$$\rho_{\text{air}} = 0,764 \text{ kg/m}^3 - \rho_{\text{air liq}} = 855 \text{ kg/m}^3$$

ESSAI N° 7

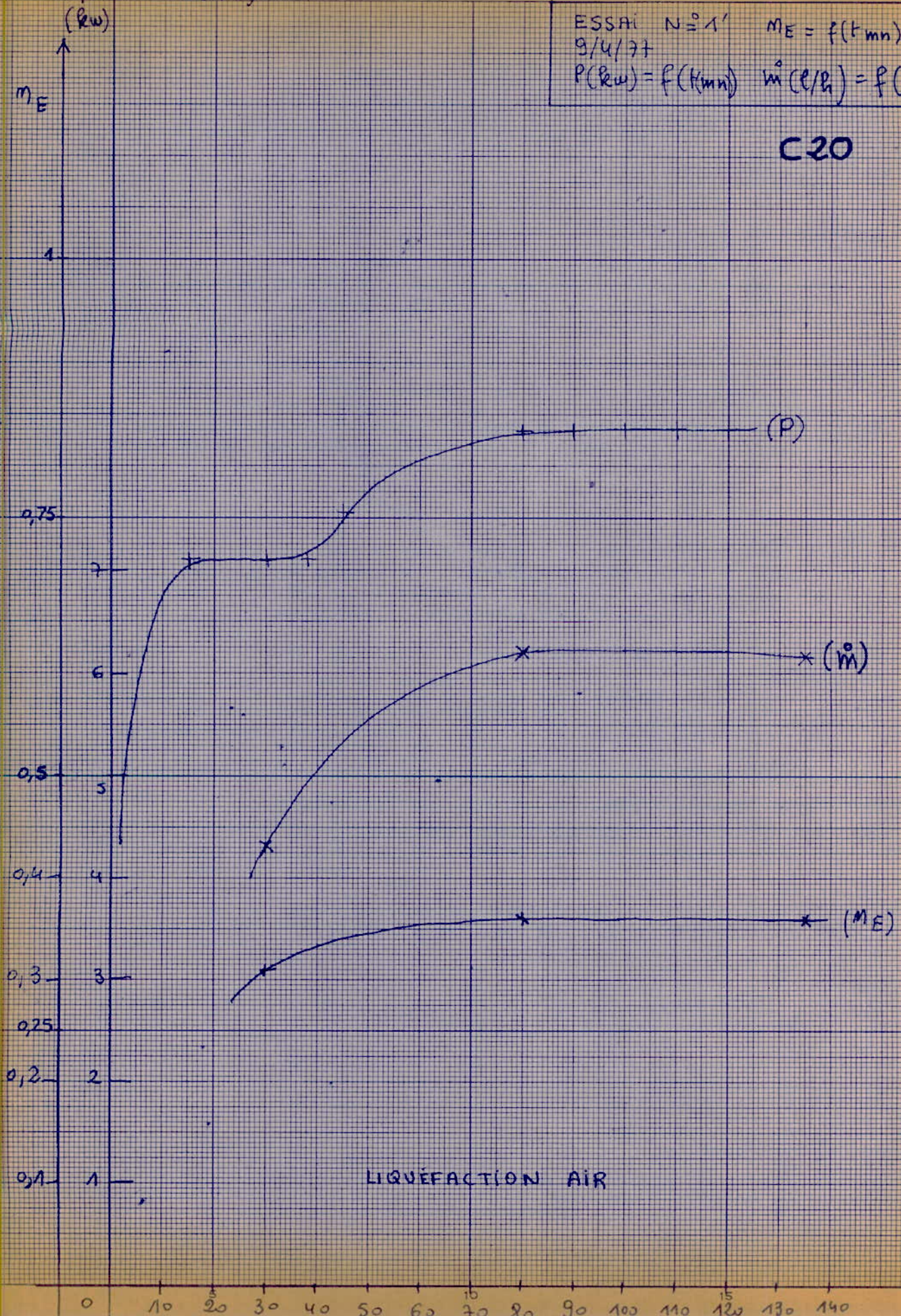
13/4/77

| temps de mesure mn | indication du compteur horaire h | indication du compteur eau m ³ | débit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P H ₂ kg/cm ² | m° air kg/s | m° air liq. g/mn | m° air liq. l/h | P _{cap. froid} moteur kW | t°c thermo. humide | % humidité |
|--------------------|----------------------------------|---|-----------------|----------------|----------------|-------------------------------------|-------------|------------------|-----------------|-----------------------------------|--------------------|------------|
| 25 | 1106,0 | 258,580 | 0,183 | 12 | 27,5 | 22,8 | | 60 | 4,20 | 1,027 | | |
| 30 | 1106,1 | 258,635 | 0,178 | " | 27 | 22,5 | | 60 | 4,20 | 0,967 | | |
| 35.30 | 1106,2 | 258,694 | 0,178 | " | " | 22,6 | | 73 | 5,11 | 0,967 | 13 | 52% |
| 40 | 1106,3 | 258,743 | 0,181 | " | " | " | | 79 | 5,53 | 0,975 | 14 | 52% |
| 45 | 1106,4 | 258,797 | 0,180 | " | " | " | | 83 | 5,81 | 0,973 | 14,5 | 53% |
| 50 | " | 258,852 | 0,183 | " | " | 22,5 | | 83 | 5,81 | 0,963 | 13 | 43% |
| 56 | 1106,5 | 258,915 | 0,175 | " | " | " | | | | 0,972 | 13,5 | 46% |
| 60 | 1106,6 | 258,959 | 0,183 | " | " | " | | 85 | 5,95 | 0,975 | 13,5 | 49% |
| 65 | 1106,7 | 259,014 | | " | " | " | | 85 | 5,95 | 0,972 | | |
| 70 | 1106,8 | 259,069 | 0,183 | " | " | " | | | | 0,970 | | |
| 75 | 1106,9 | 259,122 | 0,176 | " | " | 22,6 | | 85 | 5,95 | 0,975 | | |
| 80 | " | 259,175 | 0,176 | " | " | " | | | | 0,975 | | |
| 85 | 1107,0 | 259,230 | 0,183 | " | " | " | | 85 | 5,95 | 0,975 | 13 | 49% |
| 90 | 1107,1 | 259,387 | 0,523 | " | " | 22,5 | | 85 | 5,95 | 0,975 | | |

$\rho \wedge \dot{m}_{air} (e/h)$

ESSAI N° 1' $m_E = f(t_{mn})$
9/4/77
 $P(\rho_w) = f(t_{mn})$ $\dot{m} (e/h) = f(t_{mn})$

C20



LIQUÉFACTION AIR

ESSAI N°1

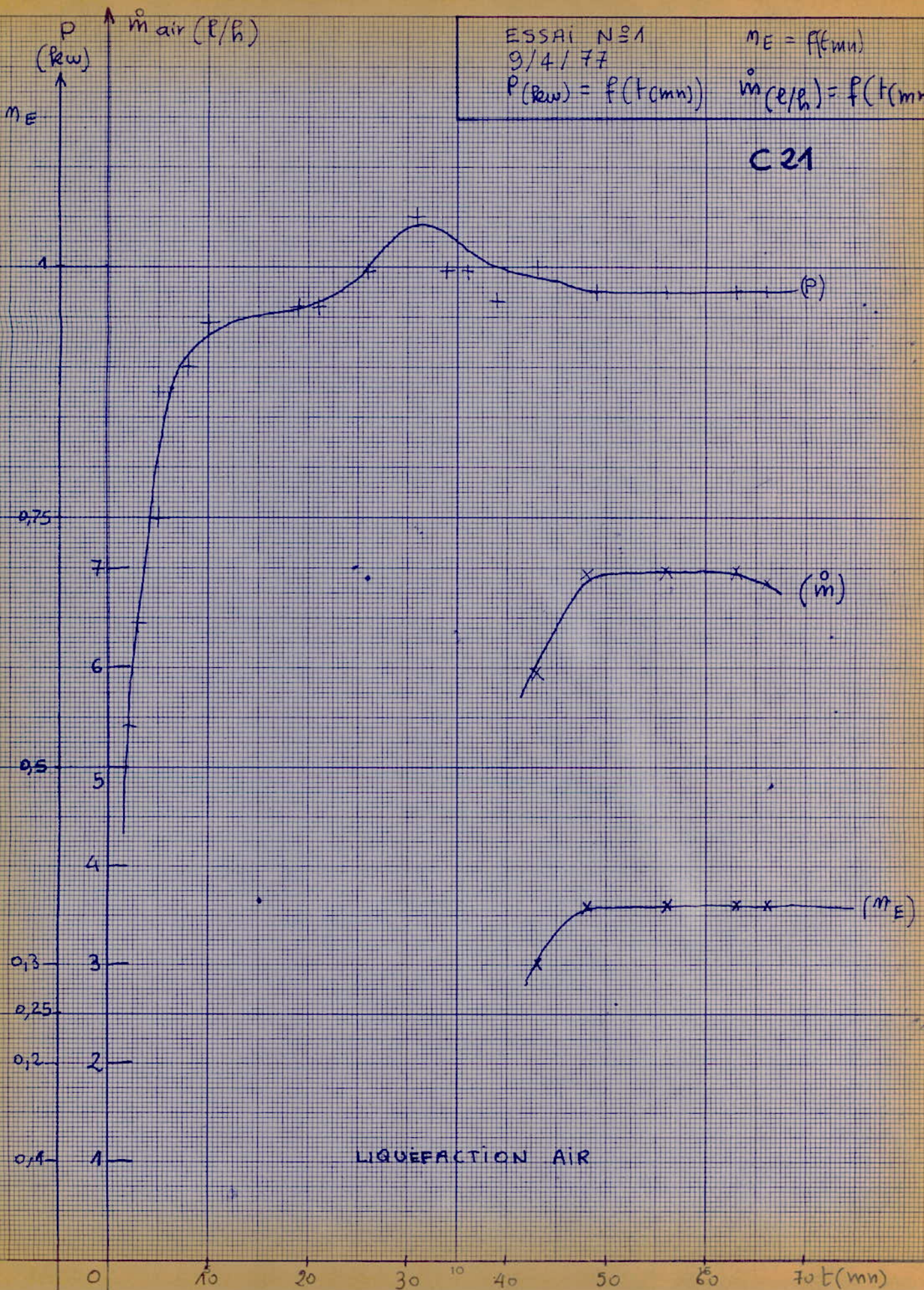
9/4/77

$P(\text{kgw}) = f(t(\text{mn}))$

$m_E = f(t(\text{mn}))$

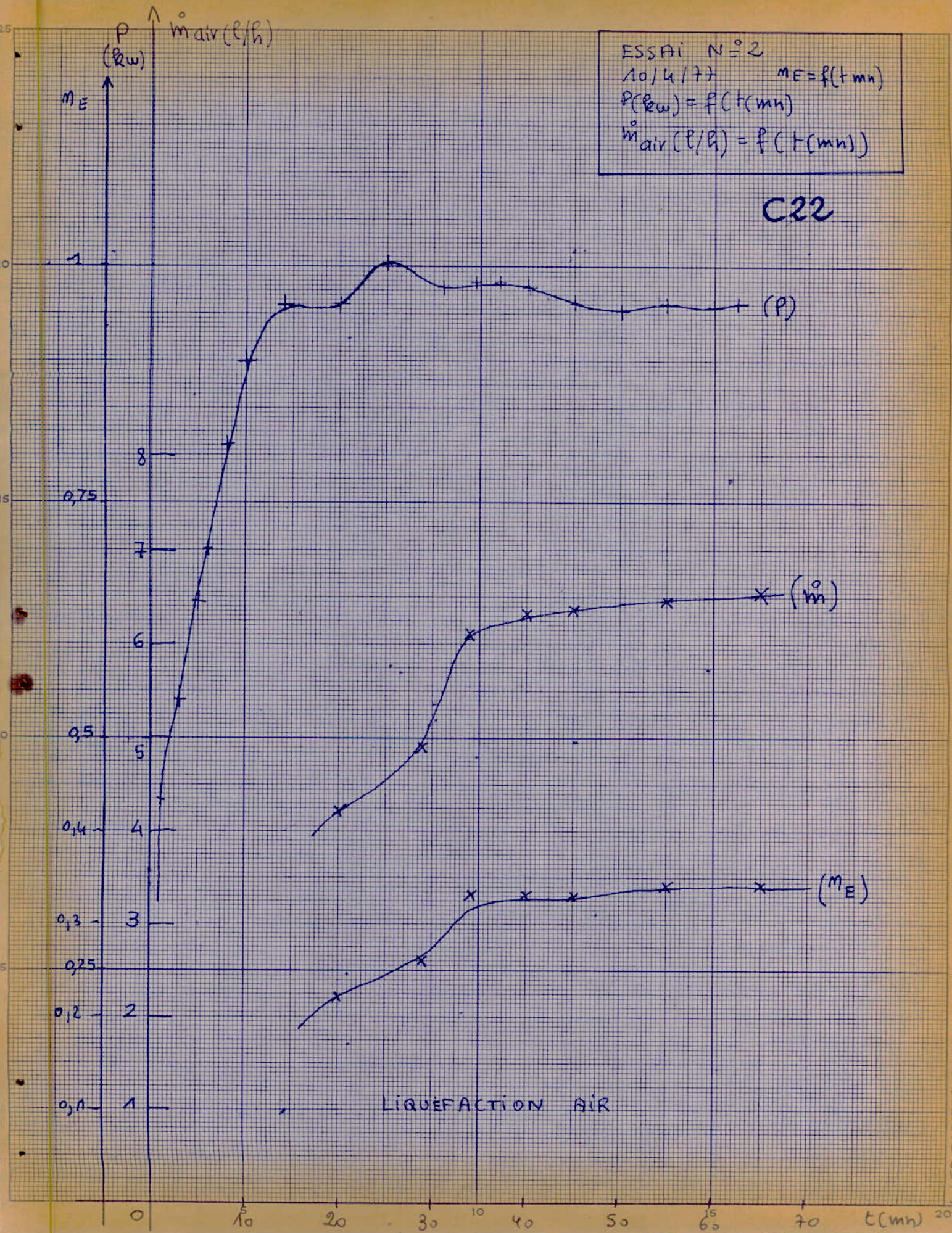
$\dot{m}_{\text{air}}(\text{g/h}) = f(t(\text{mn}))$

C21



ESSAI N°2
 10/4/77 $m_E = f(t_{mn})$
 $P(R_w) = f(t_{mn})$
 $\dot{m}_{air}(l/h) = f(t_{mn})$

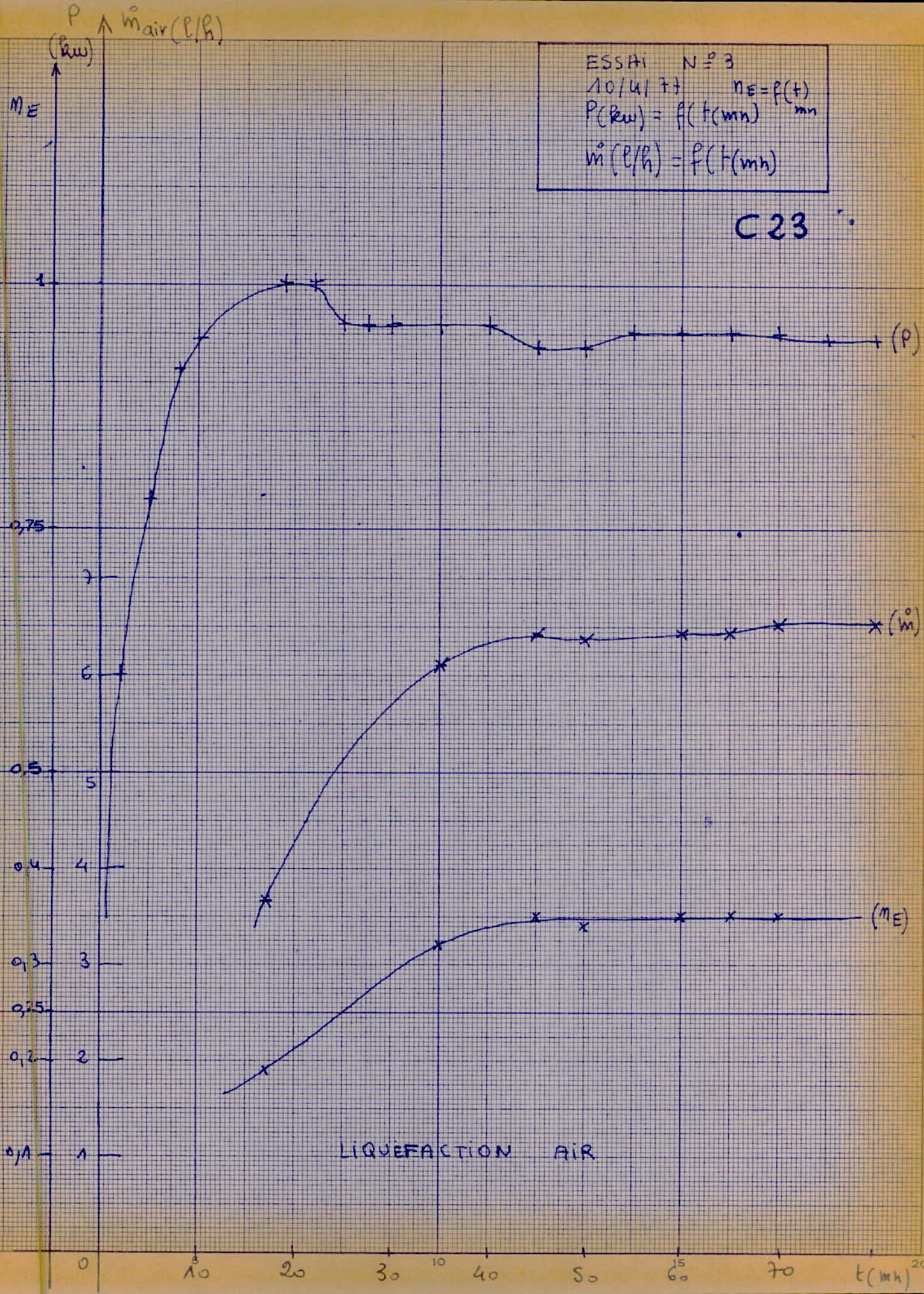
C22



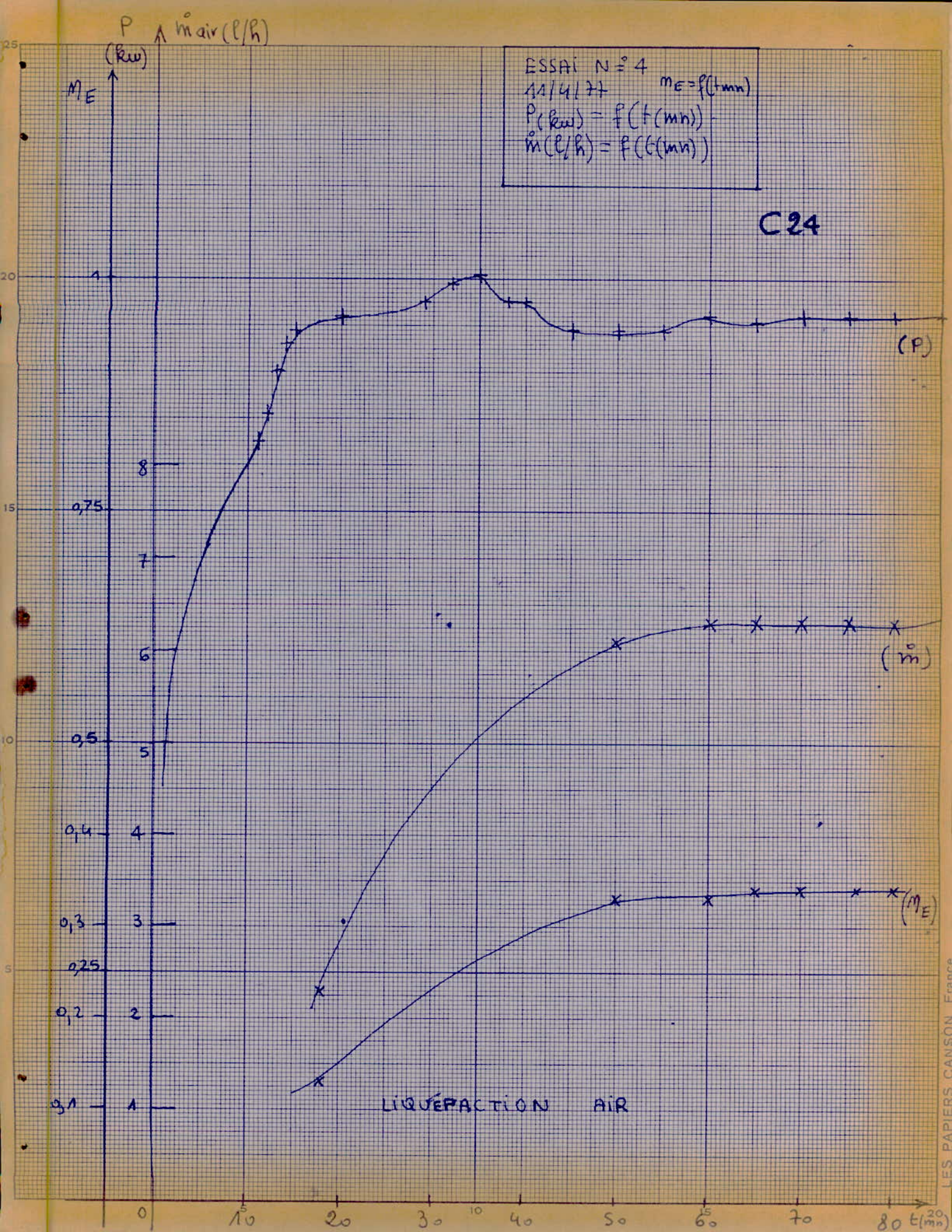
LIQUEFACTION AIR

ESSAI N° 3
 10/4/77 $\eta_E = f(t)$
 $P(\text{kW}) = f(t(\text{mn}))$
 $\dot{m}(\text{g/h}) = f(t(\text{mh}))$

C23

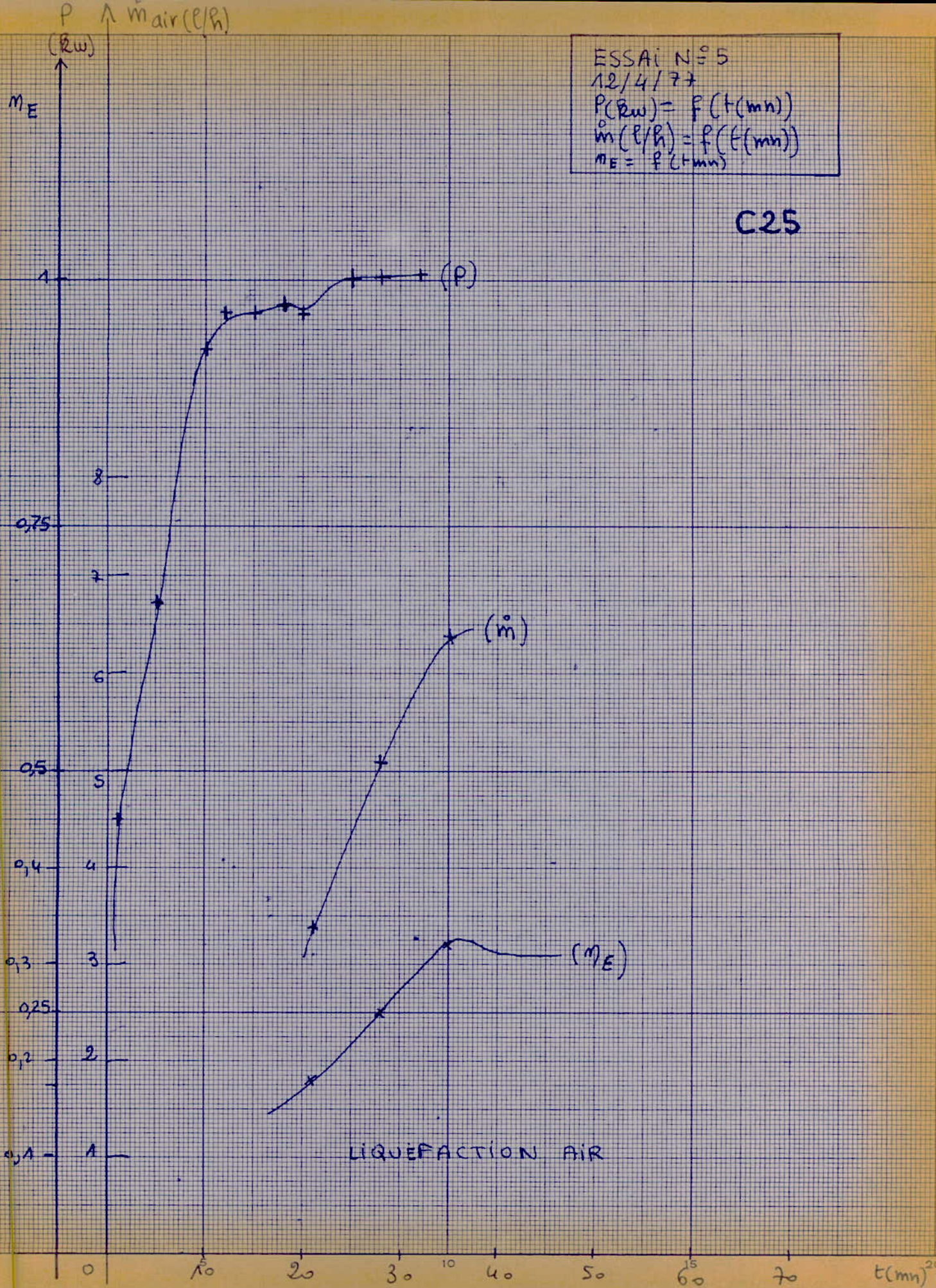


LIQUEFACTION AIR



ESSAI N° 5
 12/4/77
 $P(R_w) = f(t(\text{mn}))$
 $\dot{m}(\text{l/h}) = f(t(\text{mn}))$
 $m_E = f(t(\text{mn}))$

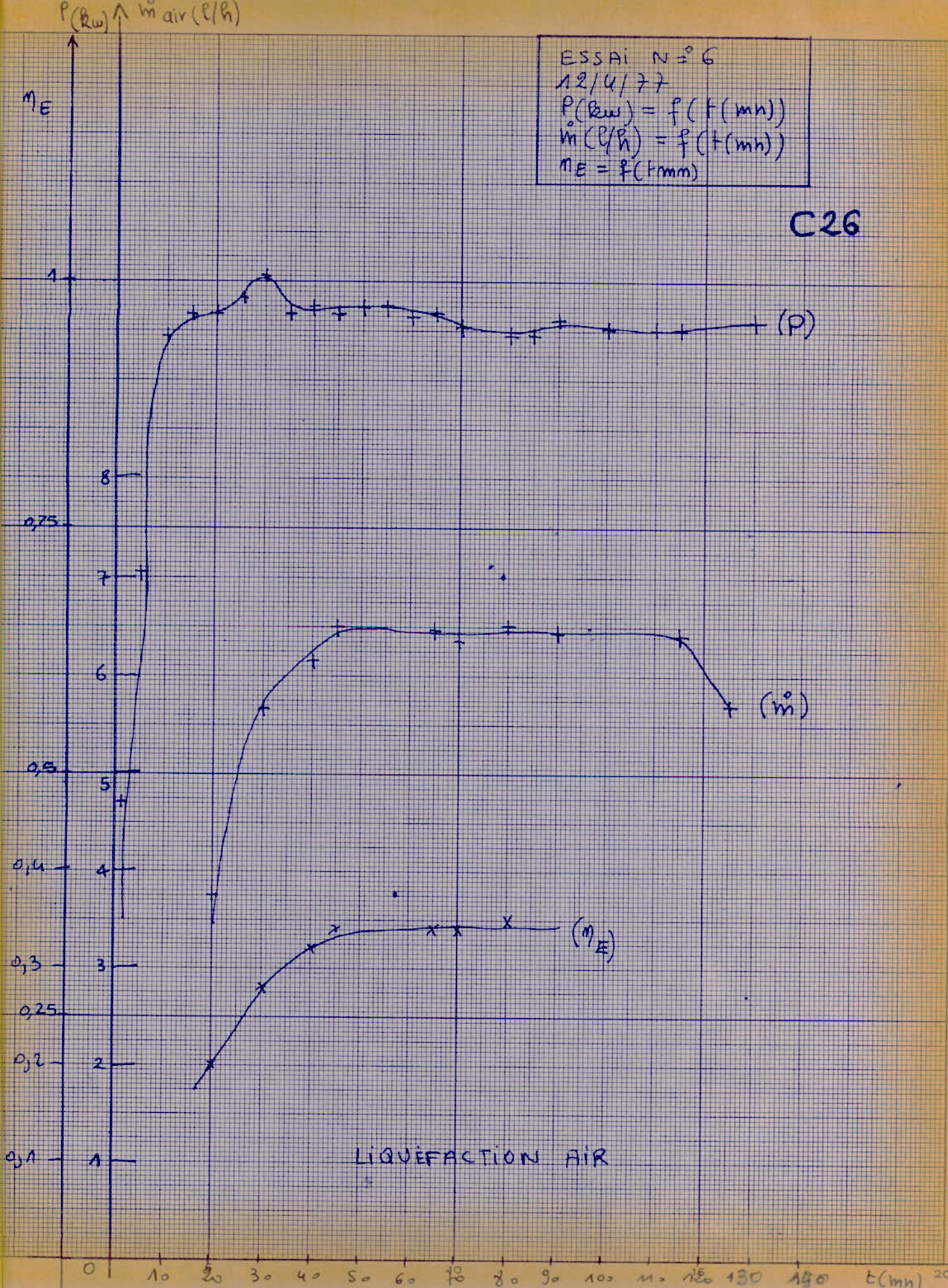
C25



LIQUEFACTION AIR

ESSAI N° 6
 12/4/77
 $P(R_w) = f(t(\text{mn}))$
 $\dot{m}(\text{P/R}) = f(t(\text{mn}))$
 $\eta_E = f(t(\text{mn}))$

C26

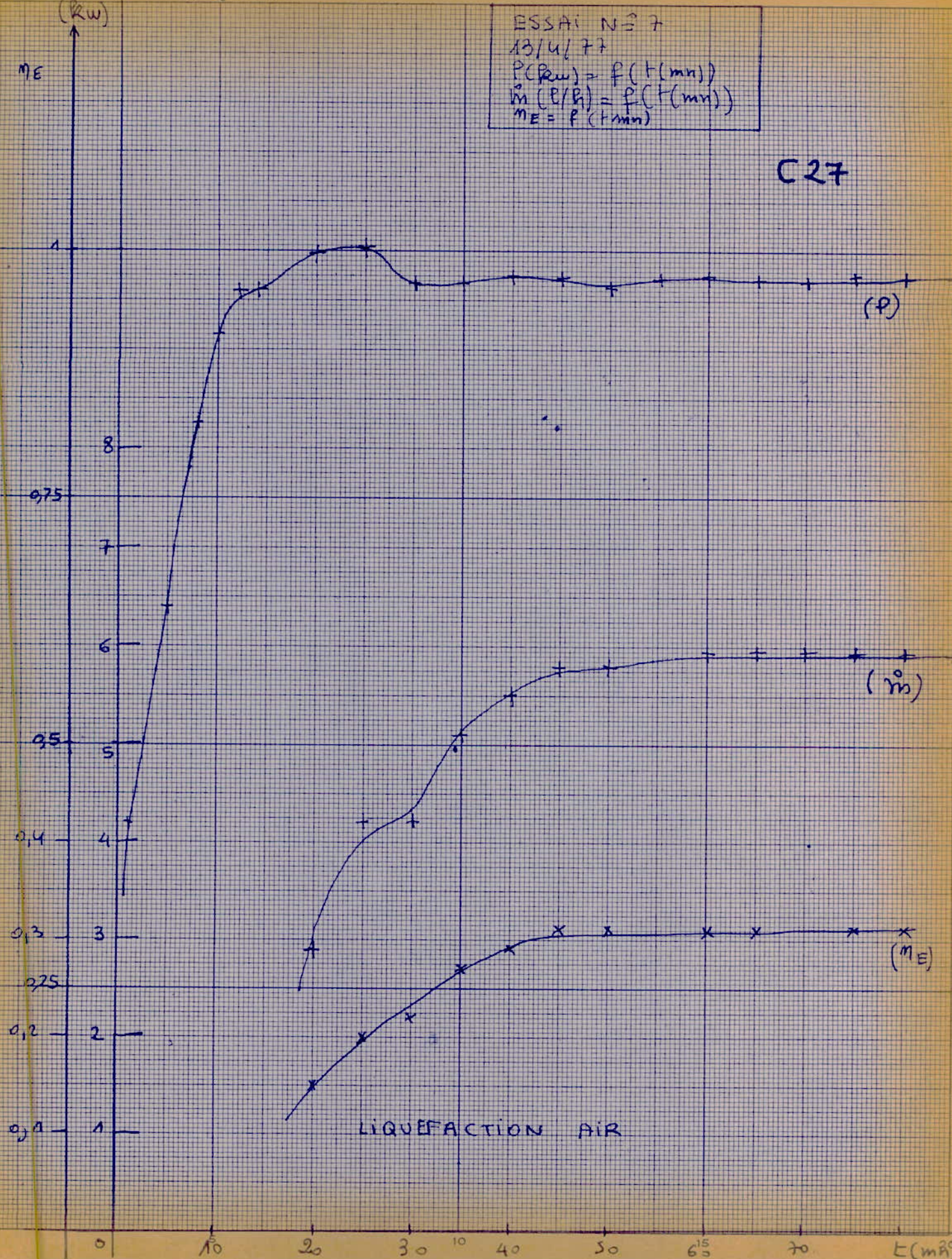


LIQUEFACTION AIR

P ↑ \dot{m}_{air} (l/h)

ESSAI N° 7
 13/4/77
 $P(\text{kgw}) = f(t(\text{mn}))$
 $\dot{m}(\text{l/h}) = f(t(\text{mn}))$
 $\eta_E = f(t(\text{mn}))$

C27



CALCUL DES RENDEMENTS ENERGETIQUES

1- calcul de l'énergie de liquéfaction

$$E_1 = \dot{m} c_p \Delta T$$

E_1 = énergie de liquéfaction du gaz

\dot{m} = débit du gaz liquide

c_p = chaleur massique (c_p air = 1 Kj / Kg °)

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

T_2 = t° entrée gaz (T_2 air = 20° c, T_2 G.N. = 20° °c)

T_1 = t° de liquéfaction (T_1 air = - 194 °c , T_1 G.N. = - 162 °c)

Pour l'air , on a effectué tous les calculs nécessaires , par contre

pour le gaz naturel on a utilisé le diagramme de Mollier pour le Méthane (CH_4) qui nous donne directement cette variation d'enthalpie

On aurait pu aussi utiliser un diagramme de Mollier pour les calculs relatifs à l'air .

2- calcul du rendement de liquéfaction

$$\eta_E = \frac{\text{Energie de liquéfaction}}{\text{Energie fournie}}$$

La valeur de l'énergie fournie nous est donnée par un wattmètre

Ex de calcul:

Extrait de l'essai (7) de la liquéfaction de l'air

$$t = 45 \text{ mn}$$

$$E_l = 0,300 \text{ kw}$$

$$E_f \equiv 0,973 \text{ kw}$$

$$\eta_E = \frac{0,300}{0,973} \equiv 0,31$$

Extrait de l'essai (2) de la liquéfaction du G.N.

$$t = 105 \text{ mn}$$

$$E_l = 0,570 \text{ kw}$$

$$E_f = 0,870 \text{ kw}$$

$$\eta_E = \frac{0,570}{0,870} = 0,65$$

Remarque : on a représenté $\eta = f(t)$, voir par la suite .

Nous avons représenté la variation du rendement en fonction du temps de marche . On constate que pour la liquéfaction de l'air le rendement augmente au début et se stabilise à 0,35 au bout de 60 mn de marche (voir courbes C20 à C27) . Pour la liquéfaction du gaz

naturel , le rendement au début augmente jusqu'à 0,9 et puis descend brusquement à 0,4 en l'espace de 40 mn et se stabilise à 0,3 au bout de 200 mn de marche (voir courbes C3 à C4) .

La liquéfaction du gaz naturel fera l'objet d'une étude approfondie dans la suite .

CALCUL DES EFFICACITES DE LIQUEFACTION

$$\varepsilon = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

T_f = t° de liquéfaction du gaz considéré

T_c = t° d'entrée dans le liquéfacteur du gaz considéré

AIR : $T_f = -194 \text{ °C} = 78,7 \text{ °K}$

$$T_c = 20 \text{ °C} = 293 \text{ °K}$$

$$\varepsilon_{\text{air}} = 0,37$$

GAZ NATUREL: $T_f = 162 \text{ °C} = 111 \text{ °K}$

$$T_c = 20 \text{ °C} = 293 \text{ °K}$$

$$\varepsilon_{\text{gaz nat.}} = 0,61$$

LIQUEFACTION DES GAZ .

Résultats et conclusion sur la liquéfaction de l'air .

Les résultats obtenus sont valables, puisqu'on a atteint approximativement le débit affiché (voir notice), qui est de 7 l/h dans les conditions de travail normales .

Le débit d'air liquide se stabilise après une heure de marche environ , à 6,5 l/h ; la période de démarrage du liquéfacteur étant de l'ordre de 15 mn environ .

Le tableau des facteurs de correction nous permet de déduire le débit d'air liquide dans les conditions de travail propres à l'expérience :

| Conditions de travail | Facteurs de correction |
|--|------------------------|
| Pression $H_2 = 22\text{Kg/cm}^2$ | 0,92 |
| Tpre eau de refroid. = 12°C | 1,02 |
| Débit eau de refroid. = $0,7\text{m}^3/\text{h}$ | 0,98 |
| Tpre humide = 14°C | 1 |
| Altitude = 0 m | 1 |

Le débit dans ces conditions devrait être égal à :

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{air liq.}} &= 7,5(0,92 \times 1,02 \times 0,98 \times 1 \times 1) \\ &= 7,5 \times 0,9196 \text{ l/h} \\ &= 6,9 \text{ l/h}\end{aligned}$$

Le débit d'air calculé est de 6,9 l/h et celui mesuré à la stabilisa-

tion est de 6,5 l/h : nous avons ici deux résultats assez voisins l'un de l'autre , avec une précision de 6 % .

Pour la liquéfaction de l'air nous avons fait une série de rendements η_E pour les sept essais (voir courbes $\eta_E = f(t)$) . A la stabilisation , le rendement est de 0,3 ; acceptable .

Remarque :

POUR toute la serie d'essais l'evolution de la puissance du moteur est normale .

Liquide GNL

 $P_{GN} = 0,847 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ $P_{GNL} = 0,440 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

ESSAI N° 1

16/4/77

| temps de mesure mn | Compteur horaire h | Compteur gaz (2 liquefacteurs) m ³ | débit d'eau l/s | t°c eau entrée | t°c eau sortie | P H ₂ kg/cm ² | ΔP mm H ₂ O | m gaz liq g/mn | m gaz liq l/h | P moteur cap. froid kW | η _E | E liq. kW |
|--------------------|--------------------|---|-----------------|----------------|----------------|-------------------------------------|------------------------|----------------|---------------|------------------------|----------------|-----------|
| 0 | 1107,1 | 4224,426 | 0,166 | 12 | 16 | 18 | 9 | | | 0 | | |
| 0.30 | " | " , " | 0,200 | " | 18 | " | 5 | | | 0,427 | | |
| 1 | " | " | 0,200 | " | 20 | " | " | | | 0,450 | | |
| 1.30 | 1107,2 | " | 0,166 | " | 21 | 21,5 | 7 | | | 0,480 | | |
| 2 | " | " | " | " | " | " | 7 | | | 0,495 | | |
| 2.30 | " | " | 0,166 | " | 22 | " | 8 | | | 0,540 | | |
| 3 | " | " | " | " | " | 21,6 | 6 | | | 0,562 | | |
| 3.30 | " | " | 0,430 | " | 23 | " | " | | | 0,600 | | |
| 4 | " | " | 0,330 | " | " | 21,7 | 8 | | | 0,622 | | |
| 4.30 | " | " | 0,400 | " | 24 | 21,8 | " | | | 0,667 | | |
| 5 | " | " | 0,260 | " | 24,5 | 21,9 | " | | | 0,682 | | |
| 6 | " | 4224,428 | 0,176 | " | 25 | 22 | " | | | 0,742 | | |
| 7 | " | " | " | " | " | 22,1 | 6 | | | 0,802 | | |
| 7.30 | " | " | 0,200 | " | " | 22,2 | " | | | 0,825 | | |
| 8 | 1107,3 | " | 0,166 | " | " | " | 5 | | | 0,855 | | |

Gas a liquifier - G.N.

$\rho_{GN} = 0,847 \text{ kg/m}^3$

$\rho_{GNL} = 0,440 \text{ g/cm}^3$

ESSAI N°1

ESSAI 16/4/77

| emps de mesure mn | Compteur horaire h | Compteur gaz (2 liq) m ³ | débit d'eau l/s | t°C eau entrée | t°C eau sortie | P H ₂ kg/cm ² | DP mm H ₂ O | m ³ gaz liq. g/mn | m ³ gaz liq. l/h | P moteur cap. froid kW | η_E | Eliq. kW |
|-------------------|--------------------|-------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------|----------|----------|
| 8.30 | 1107,3 | 4224,428 | 0,166 | 12 | 25,5 | 22,2 | 10 | | | 0,877 | | |
| 9 | " | " | 0,200 | " | 26 | 22,3 | " | | | 0,900 | | |
| 9.30 | " | " | 0,130 | " | " | " | " | | | 0,930 | | |
| 10 | " | 4224,432 | 0,230 | " | " | 22,4 | 8 | | | 0,945 | | |
| 10.30 | " | " , 435 | 0,166 | " | " | " | " | | | 0,967 | | |
| 11 | " | " , 439 | 0,260 | " | " | 22,5 | " | | | 0,975 | | |
| 11.30 | " | " , 445 | 0,200 | " | " | " | " | | | 0,967 | | |
| 12 | " | " , 456 | " | " | " | " | " | | | 0,952 | | |
| 12.30 | " | " , 456 | 0,166 | " | " | " | " | | | 0,930 | | |
| 13 | " | " , 462 | " | " | " | 22,6 | " | | | " | | |
| 13.30 | 1107,4 | " , 488 | " | " | " | 22,5 | " | | | 0,915 | | |
| 14 | " | " , 490 | " | " | " | " | " | | | " | | |
| 14.30 | " | " , 496 | 0,166 | " | " | 22,6 | 9 | | | " | | |
| 15 | " | " , 506 | " | " | " | 22,8 | " | | | 0,922 | | |
| 17 | " | " , 604 | 0,175 | " | 26,5 | 22,9 | 4 | | | 0,922 | | |

Gaz à liquéfier = G.N.

$$\rho_{GN} = 0,847 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{GNL} = 0,4409/\text{cm}^3$$

Essai N° 1

16/4/77

| emps de mesure mn | Compteur Horaire h | Compteur Gaz m ³ | débit eau l/s | t°C entrée eau | t°C sortie eau | ΔP. mm eau | m gaz liq. l/h | m gaz liq. g/mn | P _{H₂} kg/cm ² | P _{motor} cap. froid kW. | η _E | E _W kW |
|-------------------|--------------------|-----------------------------|---------------|----------------|----------------|------------|----------------|-----------------|---|-----------------------------------|----------------|-------------------|
| 19 | 1107,4 | 4224,734 | 0,166 | 12 | 26,5 | 12 | | | 22,9 | 0,930 | | |
| 2.30 | 1107,5 | " 5,024 | 0,190 | " | 26 | 9 | | | 22,8 | 0,975 | | |
| 25 | " | " , 192 | 0,180 | " | " | 11 | | | " | 0,945 | | |
| 30 | 1107,6 | " , 611 | 0,196 | " | " | 20 | 5,44 | 40 | " | 0,915 | 0,656 | 0,599 |
| 35 | 1107,7 | " , 965 | 0,170 | " | " | 20 | 5,71 | 42 | " | " | 0,688 | 0,629 |
| 40 | 1107,8 | " 6, 348 | 0,186 | " | " | 20 | 5,17 | 38 | " | " | 0,623 | 0,569 |
| 45 | 1107,9 | " , 815 | 0,206 | " | " | 20 | | | " | 0,892 | 0,639 | 0,630 |
| 50 | 1108,0 | " 7, 147 | 0,170 | " | " | 20 | 5,17 | 38 | " | " | | |
| 57 | 1108,1 | " , 663 | 0,174 | " | " | 27 | 5,17 | 38 | " | 0,900 | 0,633 | 0,579 |
| 60 | 1108,1 | " , 883 | 0,177 | " | " | 20 | | | " | " | | |
| 00.30 | 1108,2 | " 8, 312 | 0,188 | " | " | 30 | 5,44 | 40 | " | 0,885 | 0,678 | 0,600 |
| 77 | 1108,4 | " 9, 197 | 0,182 | " | " | 20 | 5,20 | 38,3 | " | 0,870 | 0,660 | 0,67 |
| 81 | 1108,5 | " , 518 | 0,187 | " | " | 25 | 5,20 | 38,3 | " | " | 0,660 | 0,674 |
| 85 | " | " , 810 | 0,175 | " | " | 23 | 5,20 | 38,3 | " | 0,877 | | |
| 90 | 1108,6 | 4230, 190 | 0,180 | " | 26,5 | 20 | 5,20 | 38,3 | " | 0,870 | | |

Gas aliquidier G.N

$\rho_{GN} = 0,847 \text{ kg/m}^3$

$\rho_{GNL} = 0,44 \text{ g/cm}^3$

ESSAI N° 2

16/4/77

| temps de mesure | Compteur horaire h | compteur gaz m ³ | débit d'eau l/A | t°c eau entrée | t°c eau sortie | DP mm H ₂ O | m° gaz liq. g/mn | m° gaz liq. l/h | P _{moteur cap. froid (kw)} | P _{H2} Kg/cm ² | η_E | E _{liq} kW |
|-----------------|--------------------|-----------------------------|-----------------|----------------|----------------|------------------------|------------------|-----------------|--------------------------------------|------------------------------------|----------|---------------------|
| 35 | 1115,2 | 4252,418 | | 12 | 25 | 5 | | | 0,915 | 22,8 | | |
| 40 | 1115,4 | 4252,978 | 0,450 | 11 | 24,5 | 10 | 32 | 4,352 | 11 | 11 | 0,524 | 0,480 |
| 46 | 1115,5 | 4253,650 | 0,130 | 11 | 11 | 9 | | | 11 | 11 | | |
| 55 | 1115,6 | 4254,230 | 0,226 | 11 | 11 | 12 | 32 | 4,352 | 0,870 | 11 | 0,552 | 0,480 |
| 60 | 1115,8 | 4255,550 | 0,543 | 11 | 25 | 18 | 28 | 3,808 | 11 | 22,6 | 0,483 | 0,420 |
| 70 | 1115,9 | 4256,020 | 0,244 | 11 | 11 | 16 | | | 11 | 11 | | |
| 76 | 1116,0 | 4256,420 | 0,212 | 11 | 11 | 17 | 40 | 5,440 | 11 | 11 | 0,689 | 0,600 |
| 80 | 11 | 4256,930 | 0,113 | 11 | 25,7 | 20 | 41 | 5,576 | 11 | 11 | 0,707 | 0,610 |
| 85 | 11 | 4257,390 | 0,220 | 11 | 25 | 18 | 42 | 5,712 | 11 | 11 | 0,724 | 0,630 |
| 90 | 1116,1 | 4257,870 | 0,200 | 11 | 11 | 16 | | | 11 | 11 | | |
| 95 | 1116,2 | 4258,340 | 0,189 | 11 | 11 | 10 | 40 | 5,440 | 11 | 11 | 0,689 | 0,600 |
| 100 | 1116,3 | 4258,810 | 0,213 | 11 | 11 | 18 | 42,5 | 5,780 | 11 | 11 | 0,733 | 0,637 |
| 105 | 1116,4 | 4259,400 | 11 | 11 | 11 | 13 | 38 | 5,168 | 11 | 11 | 0,655 | 0,570 |
| 110 | 1116,6 | 4260,230 | 11 | 11 | 11 | 20 | 44 | 5,984 | 11 | 11 | 0,758 | 0,600 |
| 125 | 1116,7 | | 11 | 11 | 11 | 17 | 60 | 8,160 | 11 | 11 | | |

Gas à liquéfier: G.N.

$$\rho_{GN} = 0,847 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{GNL} = 0,4409/\text{cm}^3$$

Essai N° 3

17.4.77.

| Temps de Mesure mn | Compteur horaire h | Compteur gaz (2 liquéf.) m ³ | débit d'eau l/s | t°C eau entrée | t°C eau sortie | ΔP mm eau | P_{H_2} kg/cm ² | $m_{\text{gaz liq.}}$ g/mn | $m_{\text{gaz liq.}}$ l/h | P_{moteur} cap. froid kW | η_E | E_{liq} kW |
|--------------------------|--------------------------|--|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---|----------|------------------------|
| 7 | 1120,3 | 49290,850 | | 13 | " | | | 0 | 0 | 0,720 | | |
| 8 | " | 1870 | | " | " | | | " | " | 0,765 | | |
| 9 | " | 1879 | | " | " | | | " | " | 0,810 | | |
| 10 | " | 1885 | | " | " | | | " | " | 0,840 | | |
| 11 | 1120,4 | 1892 | | " | " | | | " | " | 0,885 | | |
| 12 | " | 1890 | | " | " | | | " | " | 0,915 | | |
| 13 | " | 1956 | | " | " | | | " | " | 0,945 | | |
| 14 | " | 49291,060 | | " | " | | | " | " | 0,815 | | |
| 15 | 1120,5 | 1115 | | " | " | | | " | " | 0,885 | | |
| 16 | " | 1320 | | " | " | | | " | " | 0,885 | | |
| 17 | " | 1460 | | " | 25 | | | 40 | 5,44 | " | 0,678 | 0,600 |
| 18 | " | 1610 | | " | " | | | | | " | | |
| 19 | " | 1760 | | " | " | | | | | 0,892 | | |
| 20 | " | 49292,1240 | | " | " | | | | | 0,900 | | |
| 22 | 1120,6 | 9410 | | " | 26 | | | 56 | 7,61 | 0,945 | 0,889 | 0,800 |

Gas à liquéfier = G.N.

$\rho_{GN} = 0,807 \frac{kg}{m^3}$

$\rho_{GNL} = 0,440 \frac{g}{cm^3}$

Essai N° 3

17.4.77

| Temps de mesure mn | Compteur Horaire h | Compteur gaz (2 liquéf) m ³ | débit eau l/s | t _c eau entrée | t _c eau sortie | DP mm H ₂ O | P H ₂ kg/cm ² | m _{gaz liq.} g/mn | m _{gaz liq.} l/h | P _{moteur} Cap. froid kW. | η_E | E _{liq} kW |
|--------------------|--------------------|--|---------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------------|----------|---------------------|
| 23 | 1120,6 | 1580 | | 13 | 26 | 14 | 23 | | | 0,945 | | |
| 24 | " | 1760 | | " | " | " | 22,8 | | | 0,885 | | |
| 25 | " | 1930 | | " | " | 18 | " | | | " | | |
| 26 | " | 49293,280 | | " | " | " | " | | | 0,862 | | |
| 28 | 1120,7 | 1810 | | " | " | 19 | 22,7 | | | 0,840 | | |
| 31 | " | 49294,830 | | " | 26 | " | " | 64 | 8,70 | 0,870 | | |
| 37 | 1120,8 | 49297,000 | | " | " | " | " | 62 | 8,43 | 0,855 | | |
| 38 | " | 5320 | | " | " | 28 | 22,8 | | | 0,862 | | |
| 50 | 1121,0 | 49298,150 | 0,103 | " | " | " | " | 58 | 7,88 | 0,840 | | |
| 52 | 1121,1 | 49300,240 | | " | " | 47 | " | | | " | | |
| 57 | 12 | 49300,190 | | " | " | 52 | 22,6 | 56 | 7,61 | " | | |
| 70 | 14 | 49302,420 | | " | " | 70 | " | 50 | 6,80 | 0,855 | 0,877 | 0,750 |
| 76 | 15 | 49305,780 | | " | 26,5 | " | 22,5 | 34 | 4,62 | 0,892 | 0,572 | 0,570 |
| 84 | 16 | 49310,010 | | " | " | " | 22,4 | 22 | 2,99 | 0,900 | 0,367 | 0,330 |
| 107 | 1122,2 | | | " | " | " | 22,6 | 23 | 3,17 | 0,900 | 0,383 | 0,345 |

Gas a' liquifier G.N.

$P_{GN} = 0,847 \frac{kg}{m^3}$

$P_{GNL} = 0,440 \frac{g}{cm^3}$

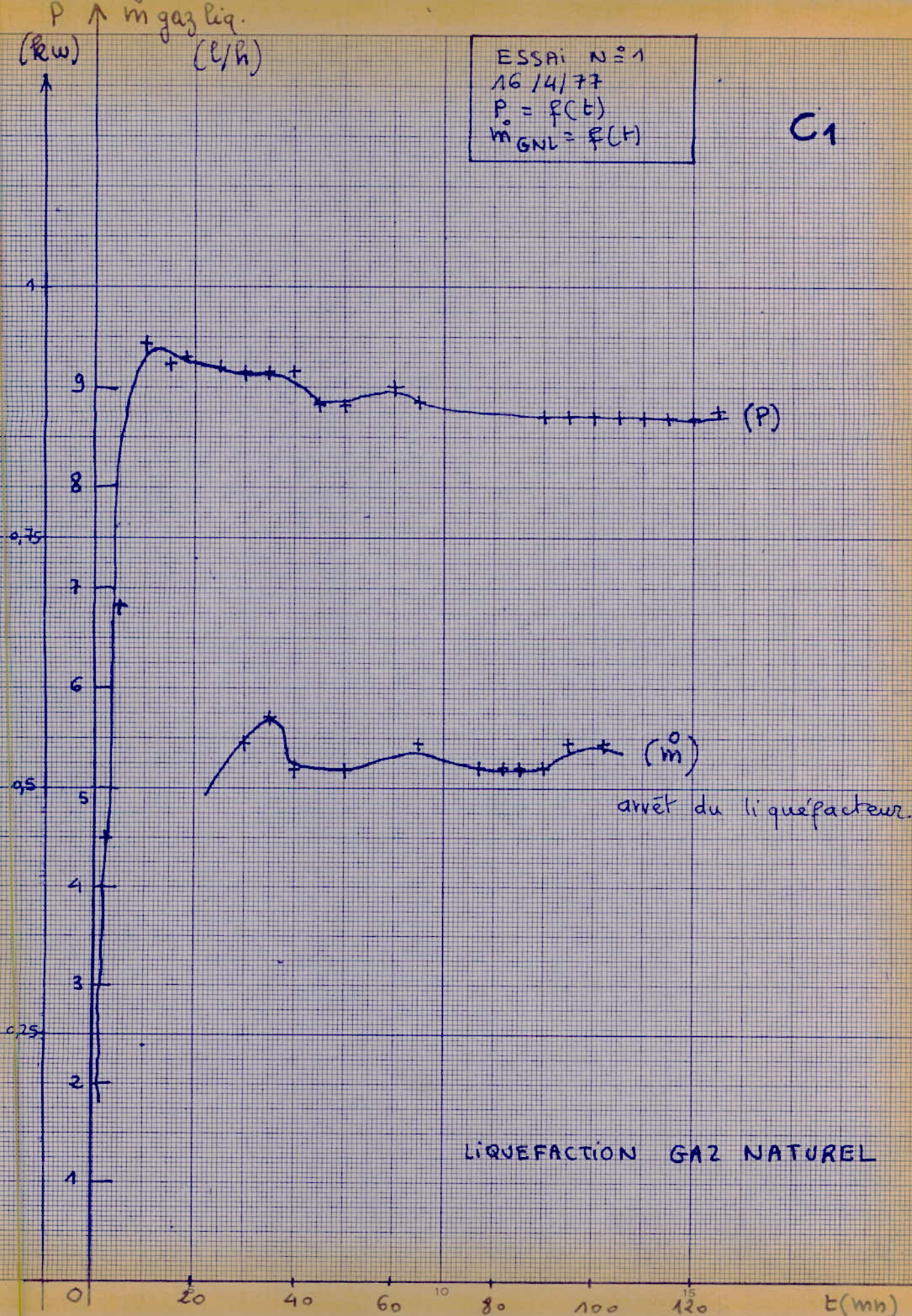
ESSAI N° 4

18.4.77

| emps de mesure mn | Compteur horaire h | Compteur gaz m ³ (2 liq.) | debit d'eau l/s | Ec eau entree | Ec eau sortie | PH ₂ kg/cm ² | ΔP mm eau | m ³ gaz liq. g/mn | m ³ gaz liq. l/h | P _{moteur cap. froid kW} | η _E | E _{liq} kW |
|-------------------|--------------------|--------------------------------------|-----------------|---------------|---------------|------------------------------------|-----------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|----------------|---------------------|
| 0 | | | | 13 | 26 | 22 | 3 | 0. | 0 | | | |
| 6 | 1127,9 | 4355,800 | 0,26 | " | " | " | " | " | " | 0,555 | | |
| 7 | " | " , 890 | " | " | 23 | " | " | " | " | 0,585 | | |
| 8 | " | | " | " | " | " | " | " | " | 0,630 | | |
| 10 | 1128,0 | 4356,130 | " | " | 27,5 | " | " | " | " | 0,720 | | |
| 11 | " | | " | " | " | " | " | " | " | " | | |
| 15 | 1128,0 | | " | " | " | " | " | " | " | 0,795 | | |
| 25 | 1128,2 | 4357,370 | " | " | " | " | " | | | 0,975 | | |
| 26 | " | | " | " | 27 | 23 | " | 62 | 8,432 | " | 0,954 | 0,930 |
| 34 | 1128,3 | 4358,570 | " | " | " | 22,8 | 5 | | | 0,900 | | |
| 39 | 1128,4 | 4359,260 | " | " | " | 22,6 | 7 | 60 | 8,16 | 0,855 | | |
| 49 | 1128,6 | 4360,580 | " | 13,5 | " | " | " | 54 | 7,34 | 0,900 | 0,900 | 0,800 |
| 54 | 1128,7 | 4361,210 | " | " | " | " | 43 | 48 | 6,53 | " | 0,800 | 0,730 |
| 59 | 1128,8 | 4361,830 | " | " | " | " | 54 | | | 0,855 | | |
| 64 | " | 4362,435 | " | " | " | " | 52 | 24 | 3,26 | 0,870 | 0,414 | 0,560 |

ESSAI N°1
 16/4/77
 $P = f(t)$
 $\dot{m}_{GNL} = f(H)$

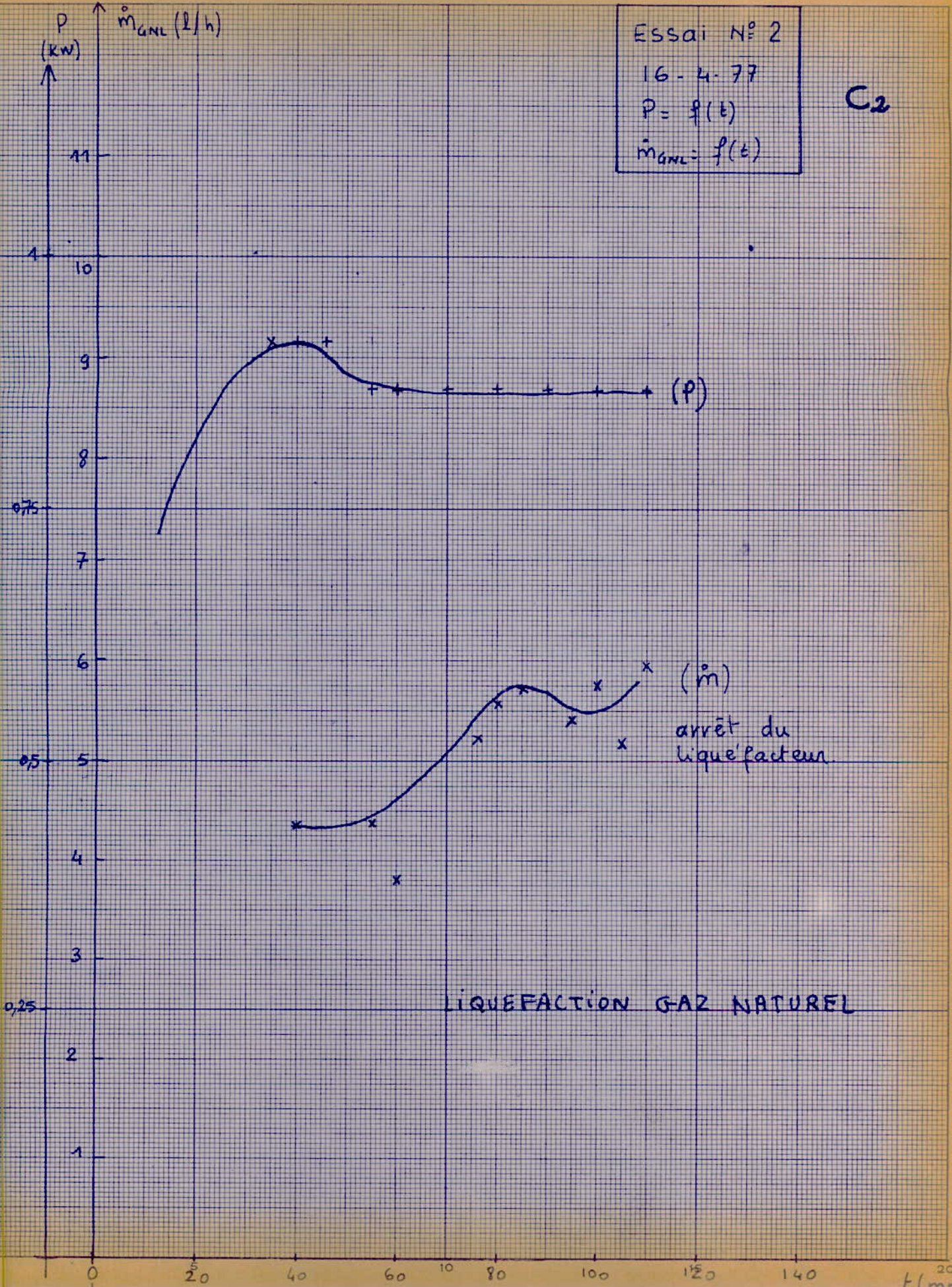
C1



LIQUEFACTION GAZ NATUREL

Essai N° 2
 16-4-77
 $P = f(t)$
 $\dot{m}_{GNL} = f(t)$

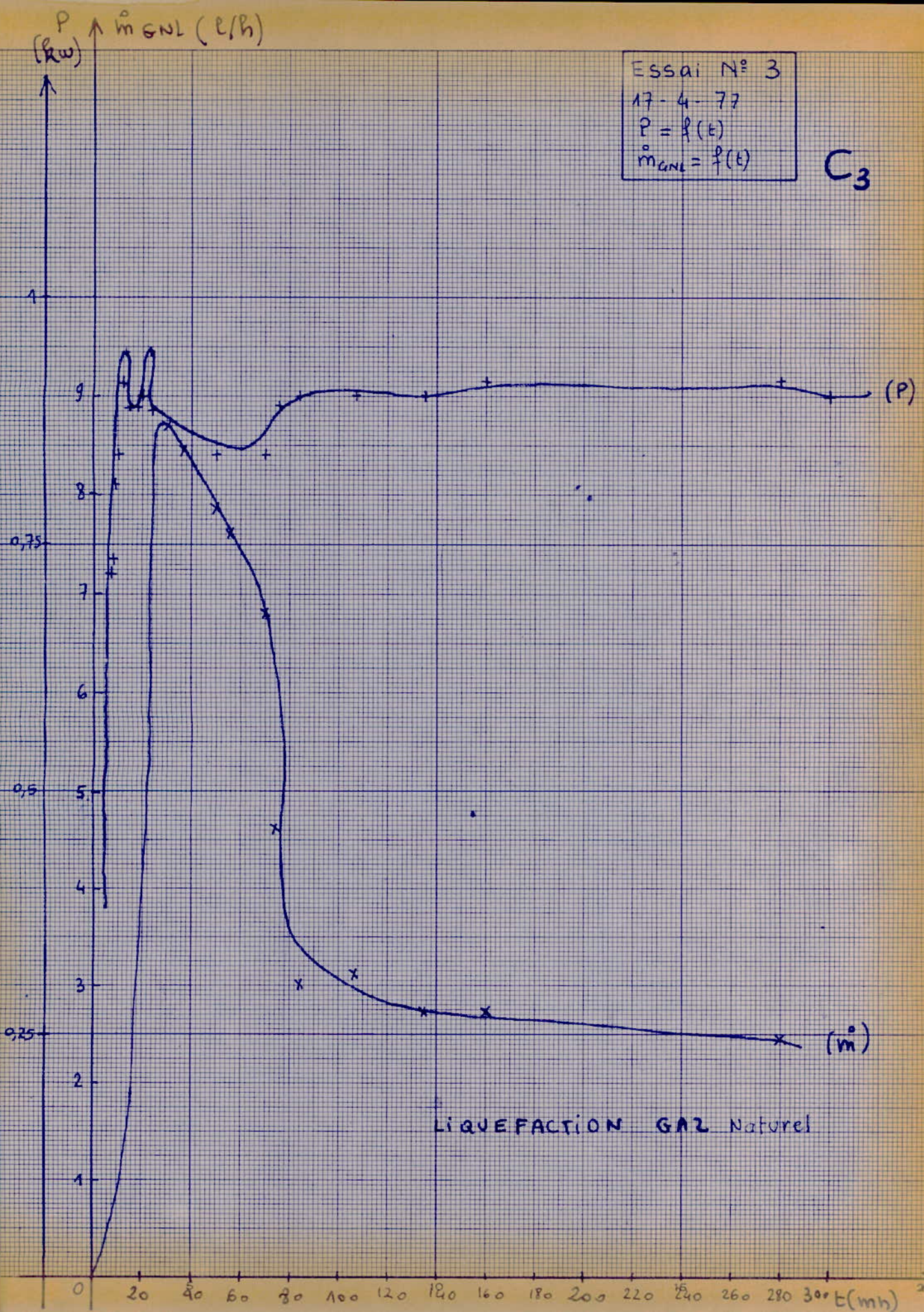
C2



LIQUEFACTION GAZ NATUREL

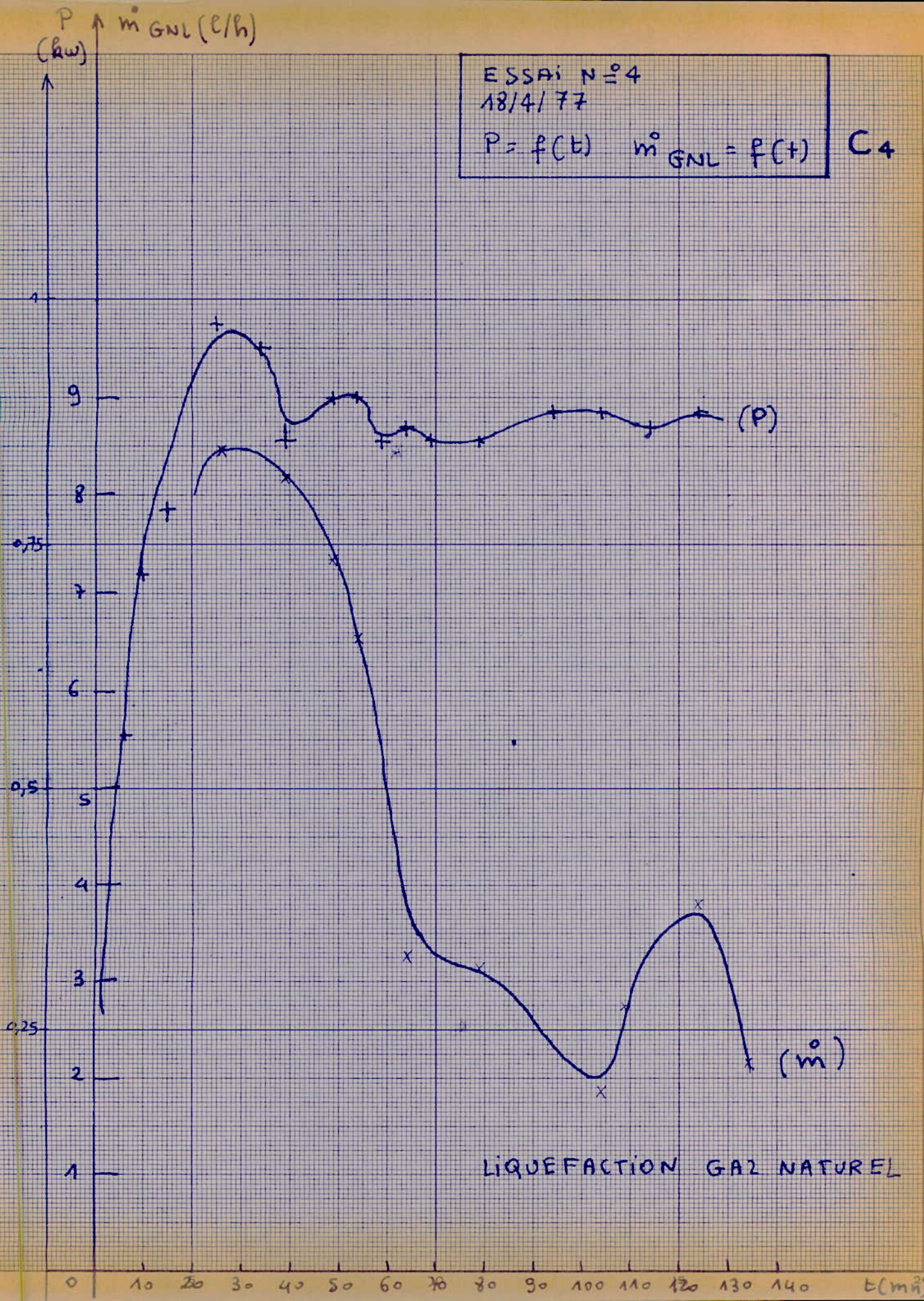
Essai N° 3
 17-4-77
 $P = f(t)$
 $\dot{m}_{GNL} = f(t)$

C₃



LIQUEFACTION GAZ Naturel

ESSAI N°4
 18/4/77
 $P = f(t)$ $\dot{m}^{\circ}_{GNL} = f(t)$ C4



LIQUEFACTION GAZ NATUREL

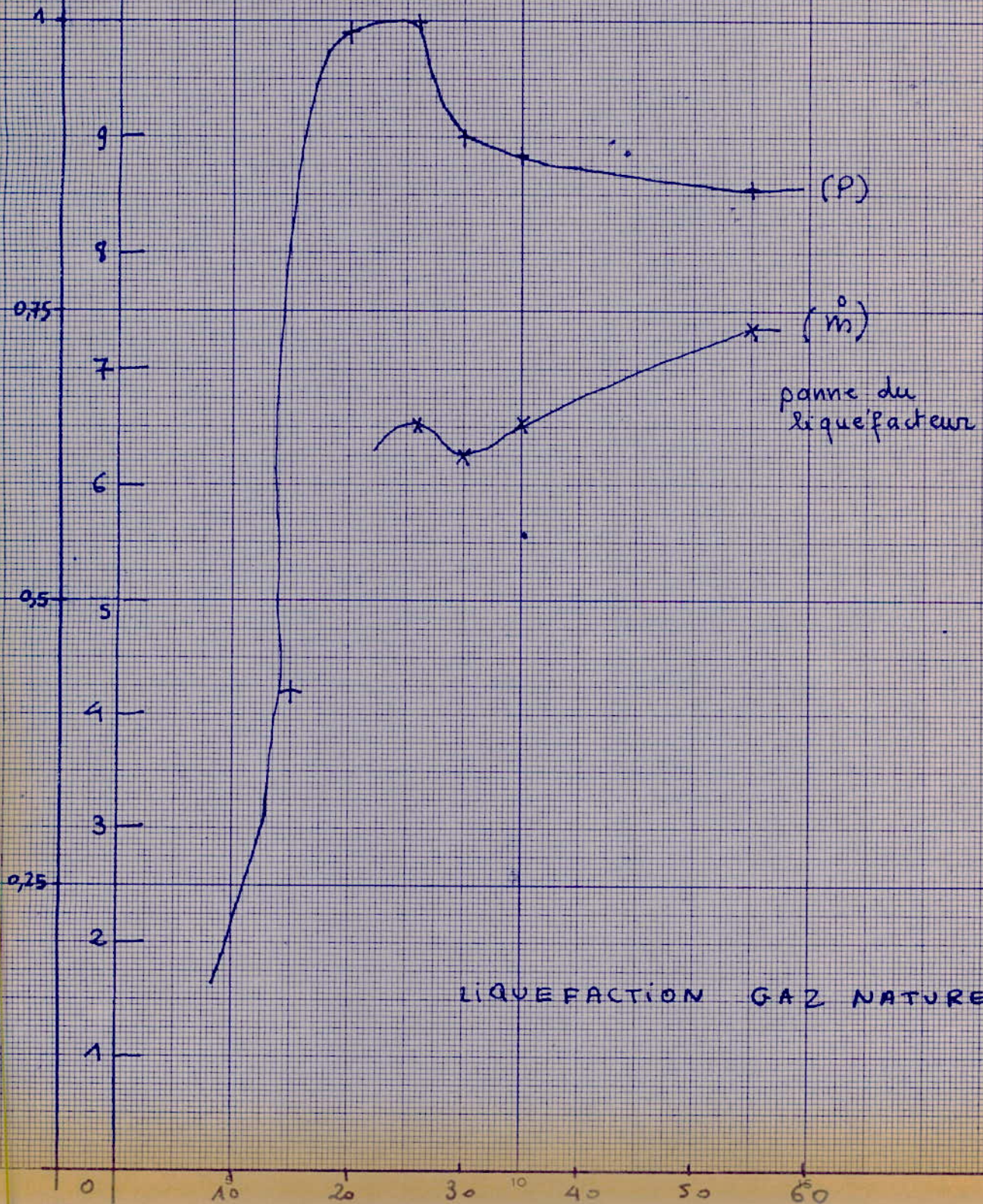
P \dot{m}_{GNL} (l/h)

ESSAI N° 5

18/4(77)

$P = f(t)$ $\dot{m} = f(t)$

C₅



LIQUEFACTION GAZ NATUREL

ESSAI N° 1.

16.4.77

$$\eta_E = f(t)$$

C6

η_E

0,75

0,5

0,25

LIQUEFACTION Q.N.

0

5

40

10

80

120

t (min)

Essai N° 2

16.4.77

$$\eta_{\pm} = f(t)$$

C7

η_{\pm}
↑

0,75

0,5

0,25

LIQUEFACTION G.N.

0

5

40

10

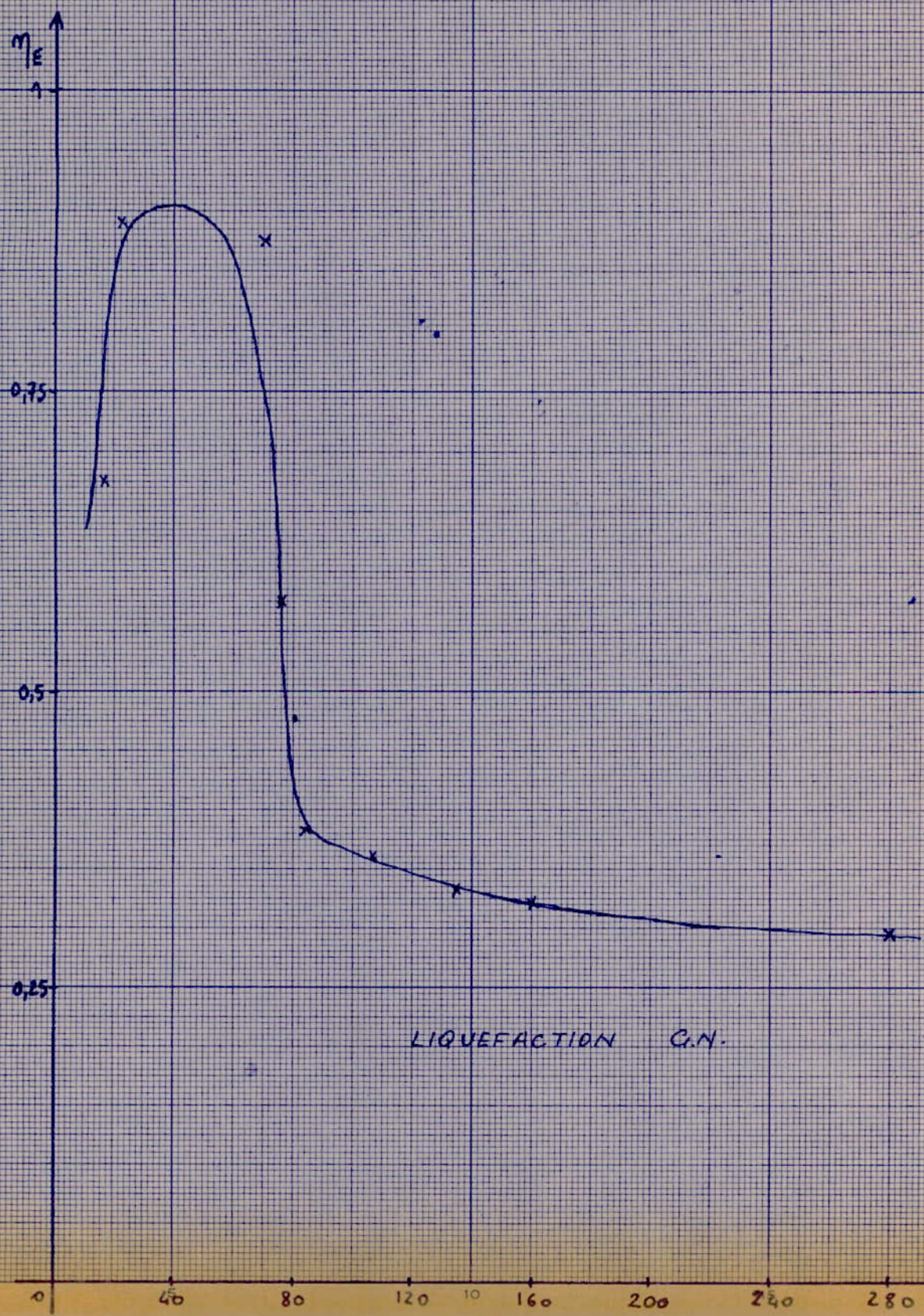
80

120

t(mn) 20

Essai N° 3
17-4-77
 $\eta_E = f(t)$

C8



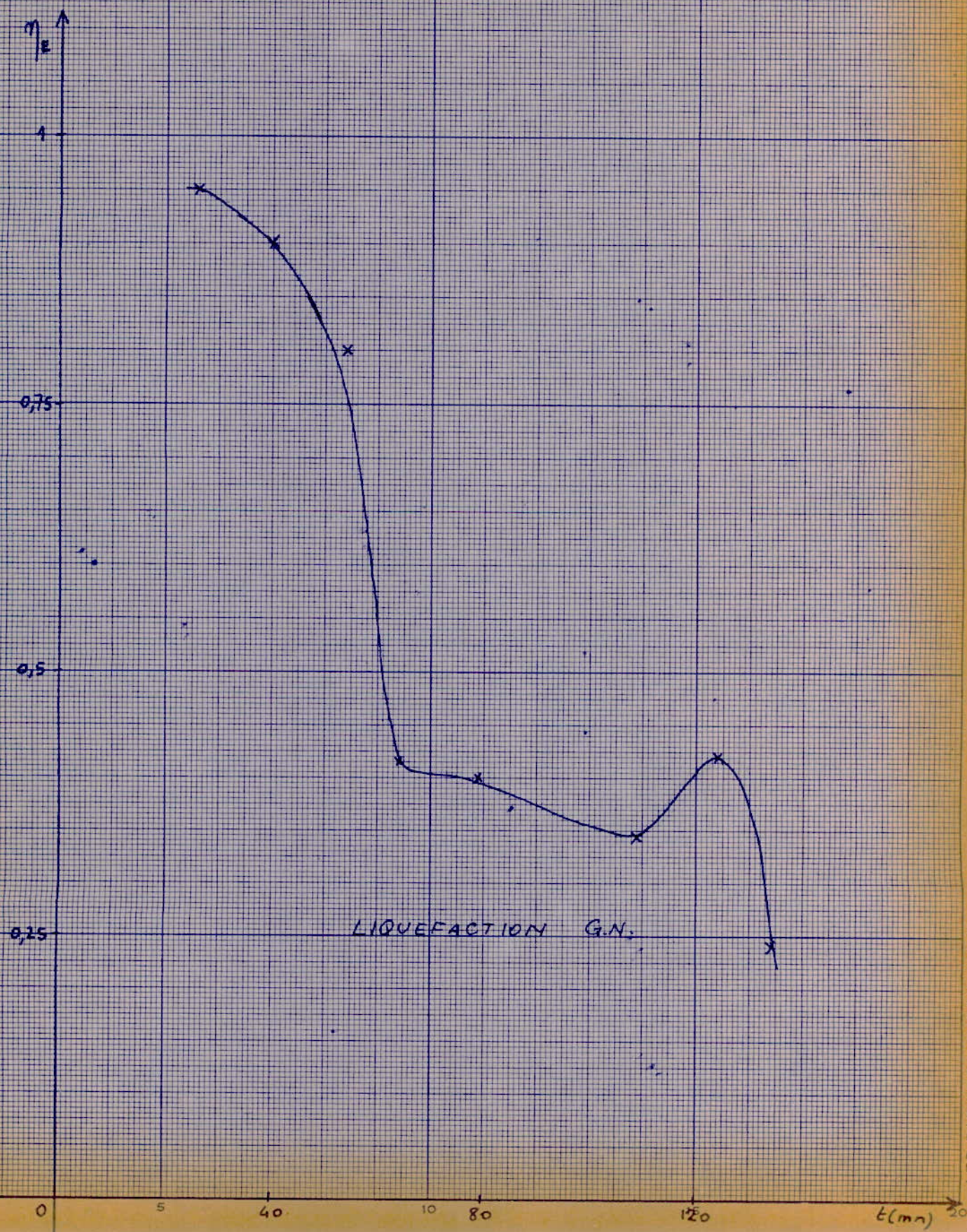
LIQUEFACTION G.N.

Essai N° 4.

18.4.77

$$\eta_E = f(t)$$

Cg



Essai N° 5

18.4.77

$$\eta_E = f(t)$$

C₁₀



LIQUEFACTION G.N.

LIQUEFACTION AIR

ESSAI N° 1

9-4-77

| t (mn) | m° air (g/mn) (l/h) | m° eau (l/s) | ΔT | En. évac. par e'eau (kw) | En. de liquef. (kw) | P. mot. (kw) | ME m'E |
|--------|---------------------|--------------|------------|--------------------------|---------------------|--------------|------------------------|
| 30 | 61,20 | 4,284 | 0,145 | 17 | 10,30 | 0,22 | 0,710 0,31 14,82 |
| 80 | 88,80 | 6,216 | 0,145 | 14 | 8,49 | 0,31 | 0,870 0,36 10,11 |
| 135 | 88,20 | 6,174 | 0,111 | 15 | 6,96 | 0,31 | 0,870 0,36 8,36 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

LIQUEFACTION AIR

ESSAI N° 1

9-4-77

| t (mn) | m° air (g/mn) (l/h) | m° eau (l/s) | ΔT | En. évacuée par e'eau (kw) | En. de liquef. (kw) | P. moteur (kw) | ME m'E |
|--------|---------------------|--------------|------------|----------------------------|---------------------|----------------|------------------------|
| 43 | 85 | 5,95 | 0,166 | 15 | 10,41 | 0,30 | 1,005 0,30 10,66 |
| 48 | 99 | 6,93 | 0,200 | 15 | 12,54 | 0,35 | 0,975 0,36 13,22 |
| 56 | 99 | 6,93 | 0,166 | 14,5 | 10,06 | 0,35 | 0,975 0,36 10,68 |
| 63 | 99 | 6,93 | 0,166 | 14,5 | 10,06 | 0,35 | 0,975 0,36 10,68 |
| 66 | 98 | 6,86 | 0,222 | 14 | 12,99 | 0,35 | 0,975 0,36 13,68 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

LIQUEFACTION AIR

ESSAI N° 2

10-4-77

| t (mn) | m° air (g/mn) (l/h) | m° eau (l/s) | ΔT | Energie évacuée par e'eau (kw) | Energie de liq. (kw) | P. moteur (kw) | ME m'E |
|--------|---------------------|--------------|------------|--------------------------------|----------------------|----------------|------------------------|
| 20 | 60 | 4,2 | 0,202 | 14 | 11,82 | 0,21 | 0,960 0,22 12,53 |
| 29 | 70 | 4,9 | 0,208 | 14 | 12,17 | 0,25 | 0,975 0,26 12,74 |
| 34 | 89 | 6,09 | 0,187 | 14 | 10,94 | 0,32 | 0,982 0,33 11,47 |
| 40 | 90 | 6,30 | 0,194 | 14 | 11,35 | 0,32 | 0,978 0,33 11,93 |
| 45 | 90,6 | 6,342 | 0,193 | 14 | 11,29 | 0,32 | 0,960 0,33 12,09 |
| 55 | 92 | 6,43 | 0,186 | 14 | 10,88 | 0,33 | 0,960 0,34 11,65 |
| 65 | 93 | 6,510 | 0,186 | 14 | 10,88 | 0,33 | 0,960 0,34 11,68 |

LIQUEFACTION AIR

ESSAI N° 6

12-4-77

| t (mn) | m° air (g/mn) | (l/h) | m° eau (l/s) | DT | Energie évaporée eau (kw) | Energie liq. (kw) | P. moteur (kw) | ME m'E |
|--------|---------------|-------|--------------|----|---------------------------|-------------------|----------------|---------------|
| 20 | 52,5 | 3,675 | 0,18 | 15 | 11,29 | 0,19 | 0,967 | 0,20 11,87 |
| 30 | 80,83 | 5,658 | 0,18 | 15 | 11,29 | 0,29 | 1,035 | 0,28 11,19 |
| 40 | 87,85 | 6,149 | 0,17 | 14 | 9,95 | 0,31 | 0,973 | 0,32 10,41 |
| 45 | 93,33 | 6,533 | 0,17 | 14 | 9,95 | 0,33 | 0,967 | 0,34 10,63 |
| 65 | 92,50 | 6,475 | 0,41 | 14 | 23,99 | 0,33 | 0,967 | 0,34 25,15 |
| 70 | 90,83 | 6,358 | 0,186 | 14 | 10,88 | 0,32 | 0,952 | 0,34 11,76 |
| 80 | 92,85 | 6,499 | 0,196 | 14 | 11,47 | 0,33 | 0,945 | 0,35 12,40 |

LIQUEFACTION AIR

ESSAI N° 7

13-4-77

| t (mn) | m° air (g/mn) | (l/h) | m° eau (l/s) | DT | Energie (kw) évaporée eau | Energie de liq. (kw) | P. moteur (kw) | ME m'E |
|--------|---------------|-------|--------------|----|---------------------------|----------------------|----------------|---------------|
| 20 | 41,6 | 2,912 | 0,188 | 15 | 11,79 | 0,15 | 0,99 | 0,15 12,06 |
| 25 | 60 | 4,20 | 0,178 | 15 | 11,16 | 0,21 | 1,027 | 0,20 11,07 |
| 30 | 60 | 4,20 | 0,178 | 15 | 11,16 | 0,21 | 0,967 | 0,22 11,76 |
| 35 | 73 | 5,11 | 0,181 | 15 | 11,35 | 0,26 | 0,967 | 0,27 12,04 |
| 40 | 79 | 5,13 | 0,180 | 15 | 11,35 | 0,28 | 0,975 | 0,29 11,93 |
| 45 | 83 | 5,81 | 0,183 | 15 | 11,35 | 0,30 | 0,973 | 0,31 11,97 |
| 50 | 83 | 5,81 | 0,183 | 15 | 11,35 | 0,30 | 0,963 | 0,31 12,10 |

LIQUEFACTION AIR

ESSAI N° 7 (Suite)

13-4-77

| | | | | | | | | |
|----|----|------|-------|----|----------|------|-------|---------------|
| 60 | 85 | 5,95 | 0,183 | 15 | 11,35 | 0,30 | 0,975 | 0,31 11,95 |
| 65 | 85 | 5,95 | 0,183 | 15 | 11,35 | 0,30 | 0,972 | 0,31 11,99 |
| 75 | 85 | 5,95 | 0,176 | 15 | 11,16 | 0,30 | 0,975 | 0,31 11,75 |
| 85 | 85 | 5,95 | 0,183 | 15 | 11,35 | 0,30 | 0,975 | 0,31 11,95 |
| 90 | 85 | 5,95 | 0,523 | 15 | (32,79)? | 0,30 | 0,975 | 0,31 33,90 |

m G.N.L. (e/g)

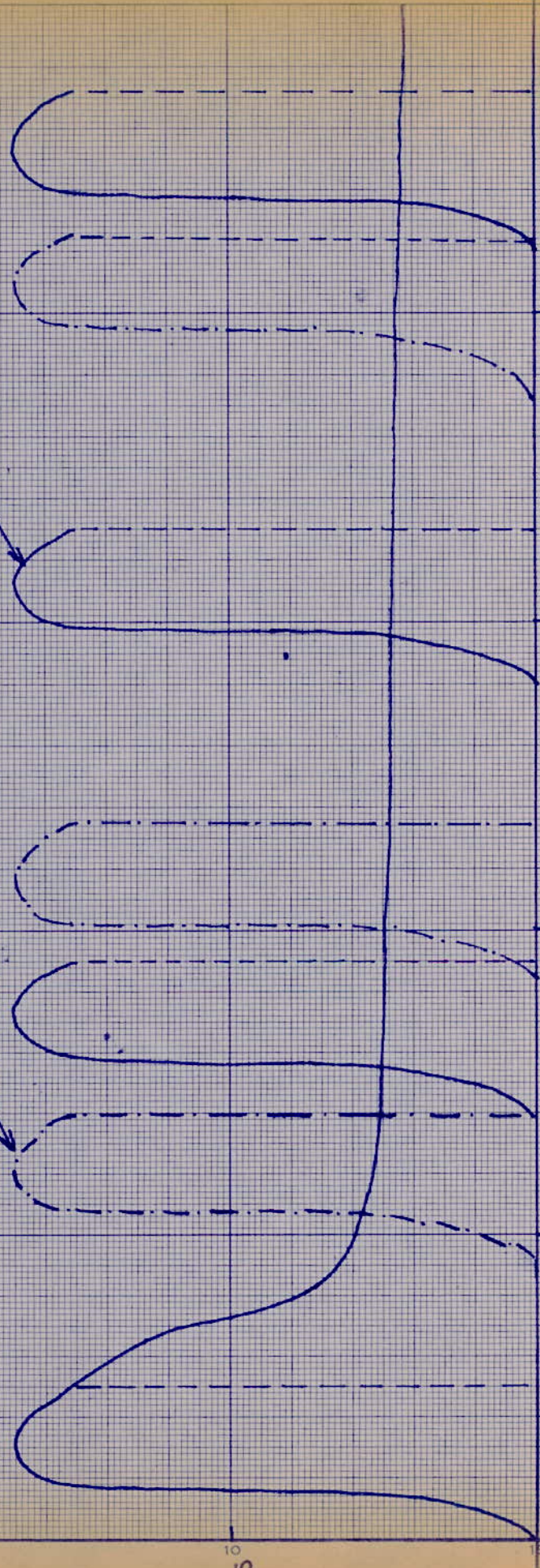
Temps de marche
pour régime
interrompu $t = 50 \text{ mn}$

ESSAI N°3
17/4/77
m G.N.L. = f(t_{mn})

C11

Préchauffe 45 mn

Préchauffe 90 mn



| t de préch. | Régime continu | Régime interrompu. |
|-------------|------------------|--------------------|
| 90 mn | 24 l en 470 mn | 20 l en 470 mn |
| 45 mn | 20,6 l en 425 mn | 25 l en 425 mn |

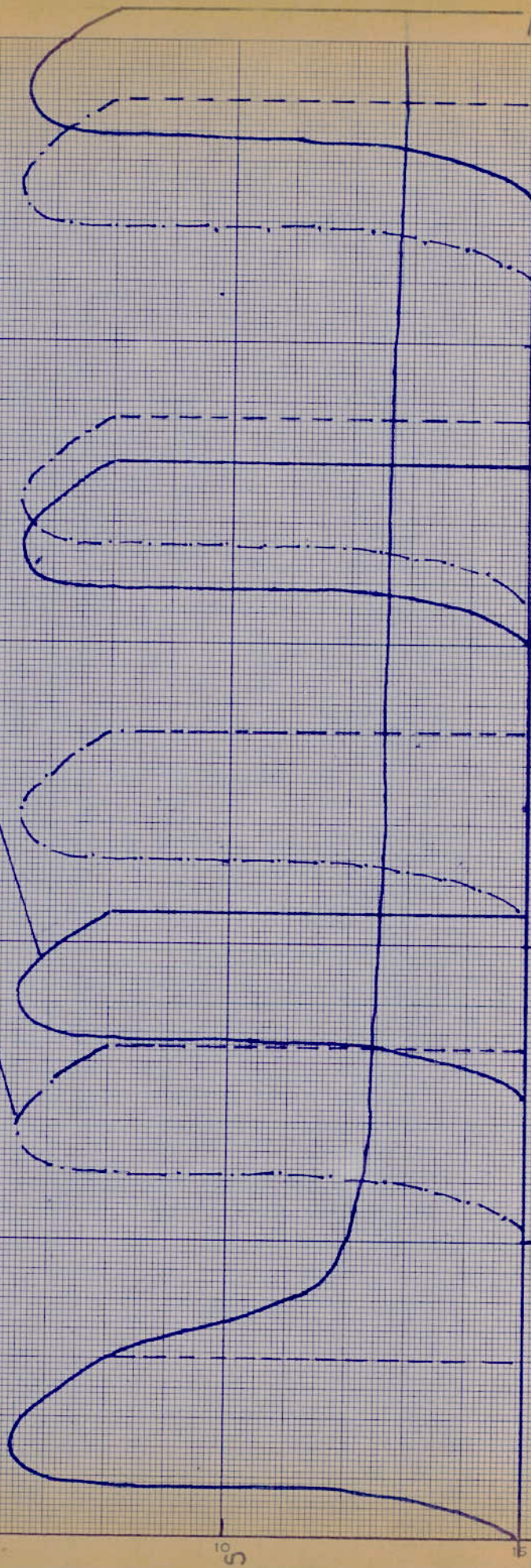
m G.N.L. (P/R)

C12

ESSAI N° 3
17/4/77
m² = f(t).
G.N.L.

temps de marche
pour ve'gime
interrompu = 60 min

Préch. 45 mn Préch. 90 mn



60 100
 t_{de}
 pré = 45 min
 t_{de} préch = 90 min

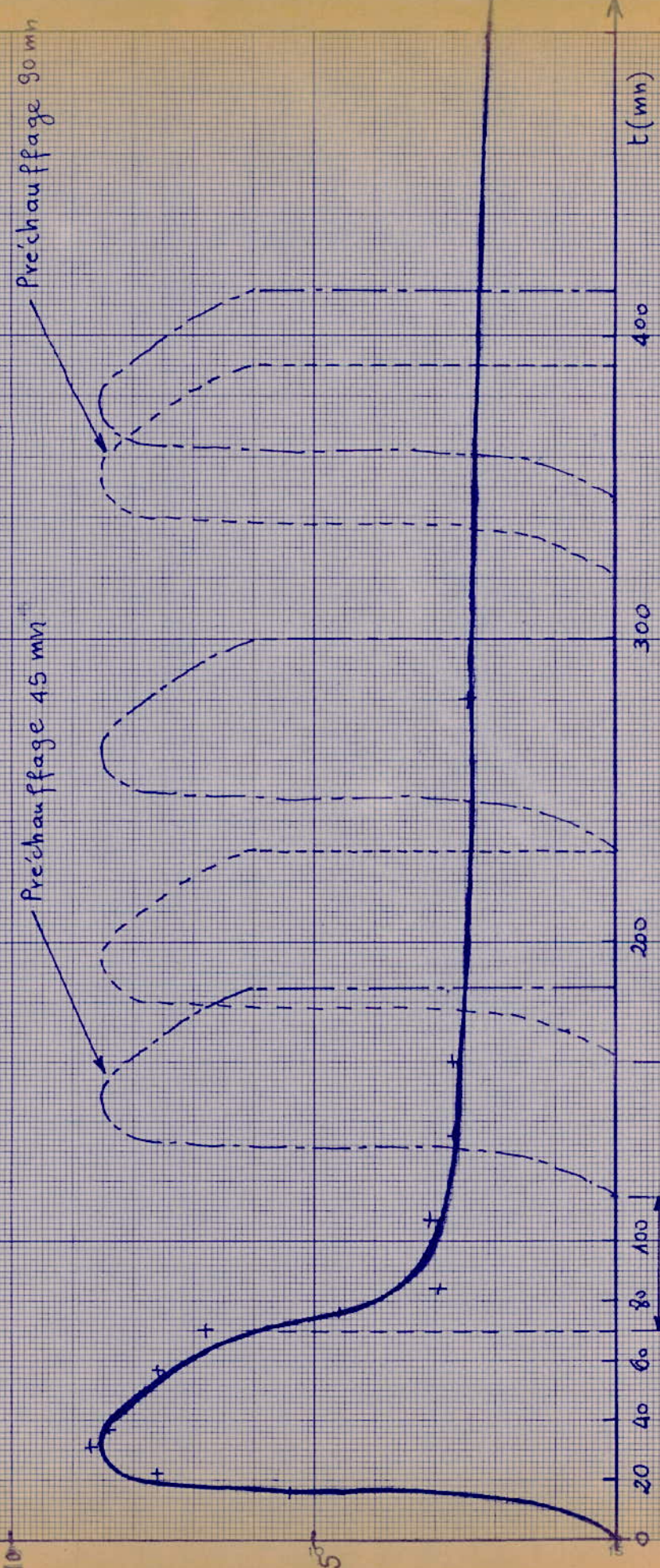
| t de préch. | Régime Continu | Régime interrompu |
|-------------|------------------|-------------------|
| 90 mn | 26 l en 510 mn | 24 l en 510 mn |
| 45 mn | 24,3 l en 480 mn | 30 l en 480 mn |

en GNL (l/h)

Temps de marche
pour ASGIMC
interompu = 70 mn.

ESSAI N° 3
17/4/77
en GNL = f(t)

C13.



| Temps de préchauffage | Régime continu | Régime interompu |
|-----------------------|------------------|------------------|
| 90 mn | 20,8 l en 390 mn | 22 l en 390 mn |
| 45 mn | 21,7 l en 415 mn | 27 l en 415 mn |

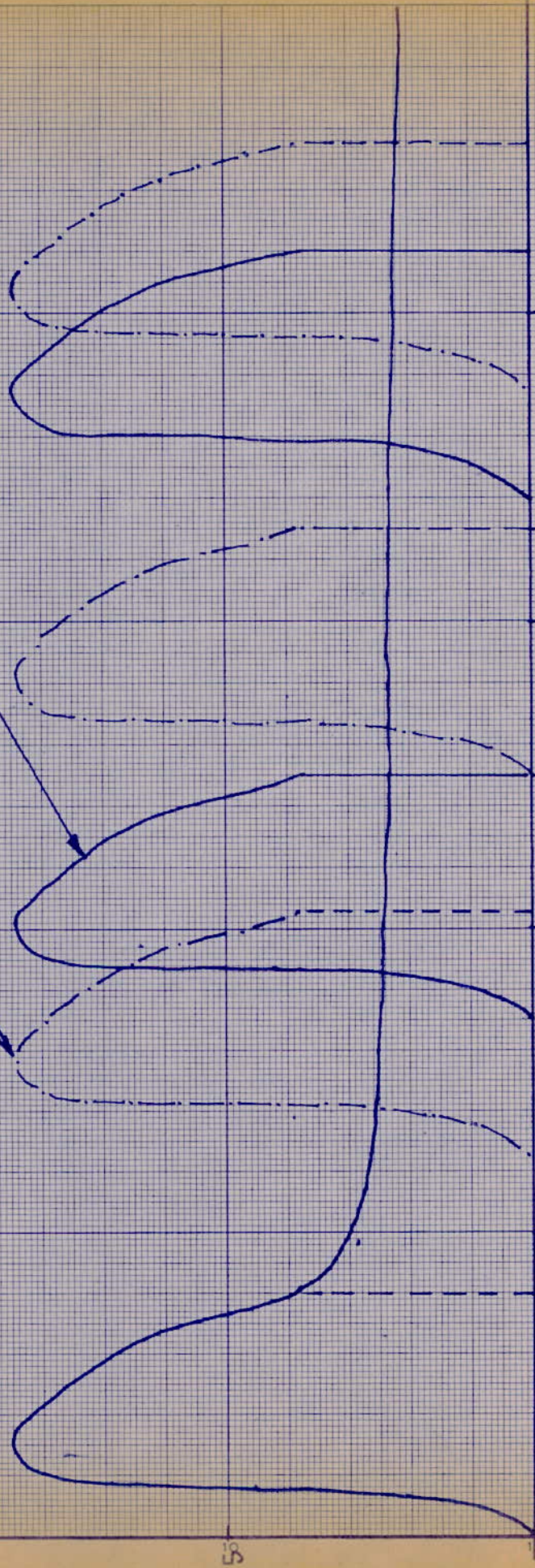
M G.N.L. (e/g)

ESSAI N° 3
17/4/77
M G.N.L. = f(t).

C11

temps de marche
pour régime
interrompu 80 mn

t. préch. 45 mn.
t. préch. 90 mn.



| temps de préch. | Régime continu | Régime interrompu |
|-----------------|------------------|-------------------|
| 90 mn | 21,8 l en 420 mn | 24,7 l en 420 mn |
| 45 mn | 23,6 l en 455 mn | 32,6 l en 455 mn |

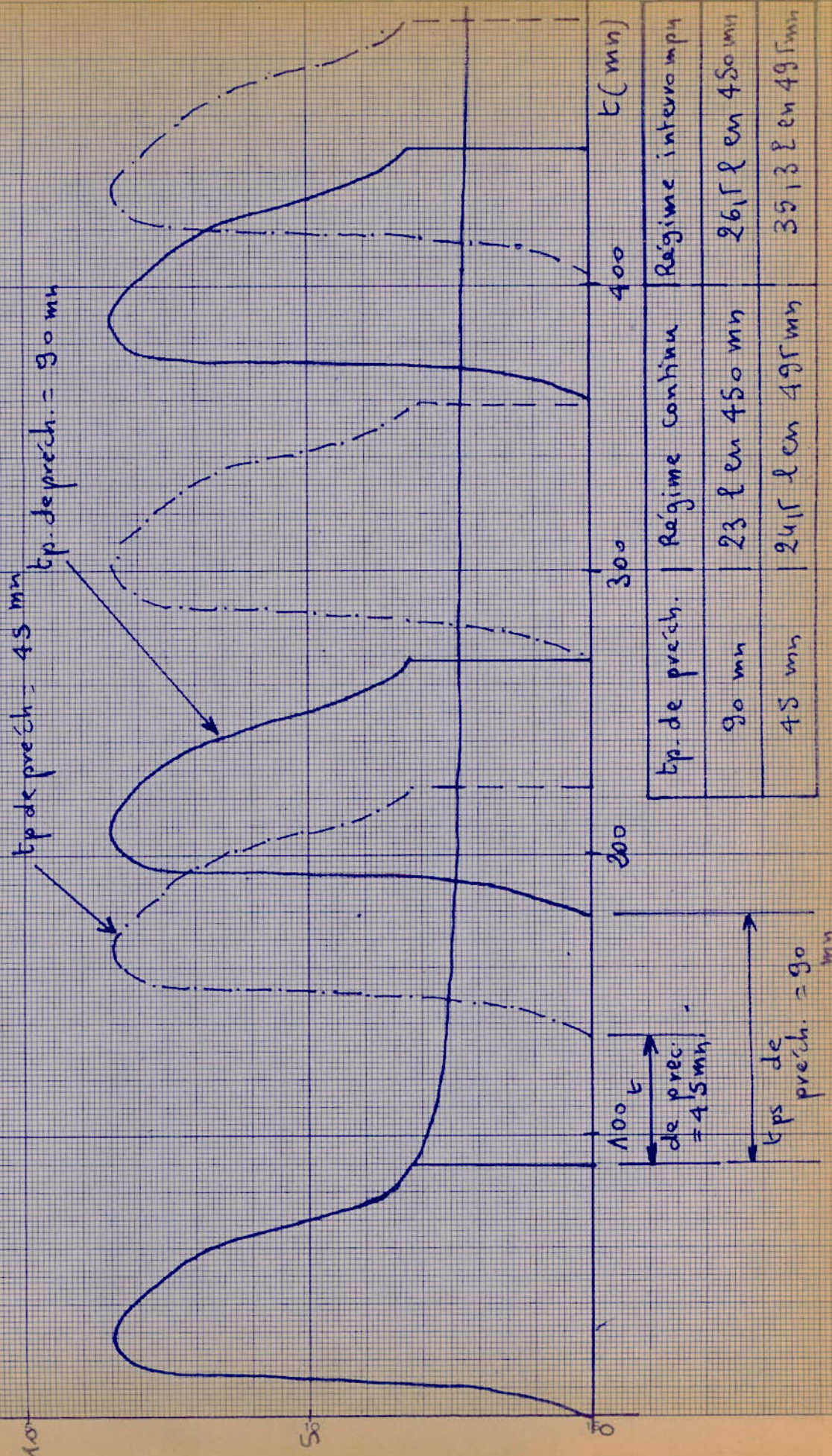
$\Delta M (GNL) = C/R$

Temps de marche

régime intermittent = 90 mn

ESSAI N° 3
17/4/77
 $M_0 = f(t)$

C15



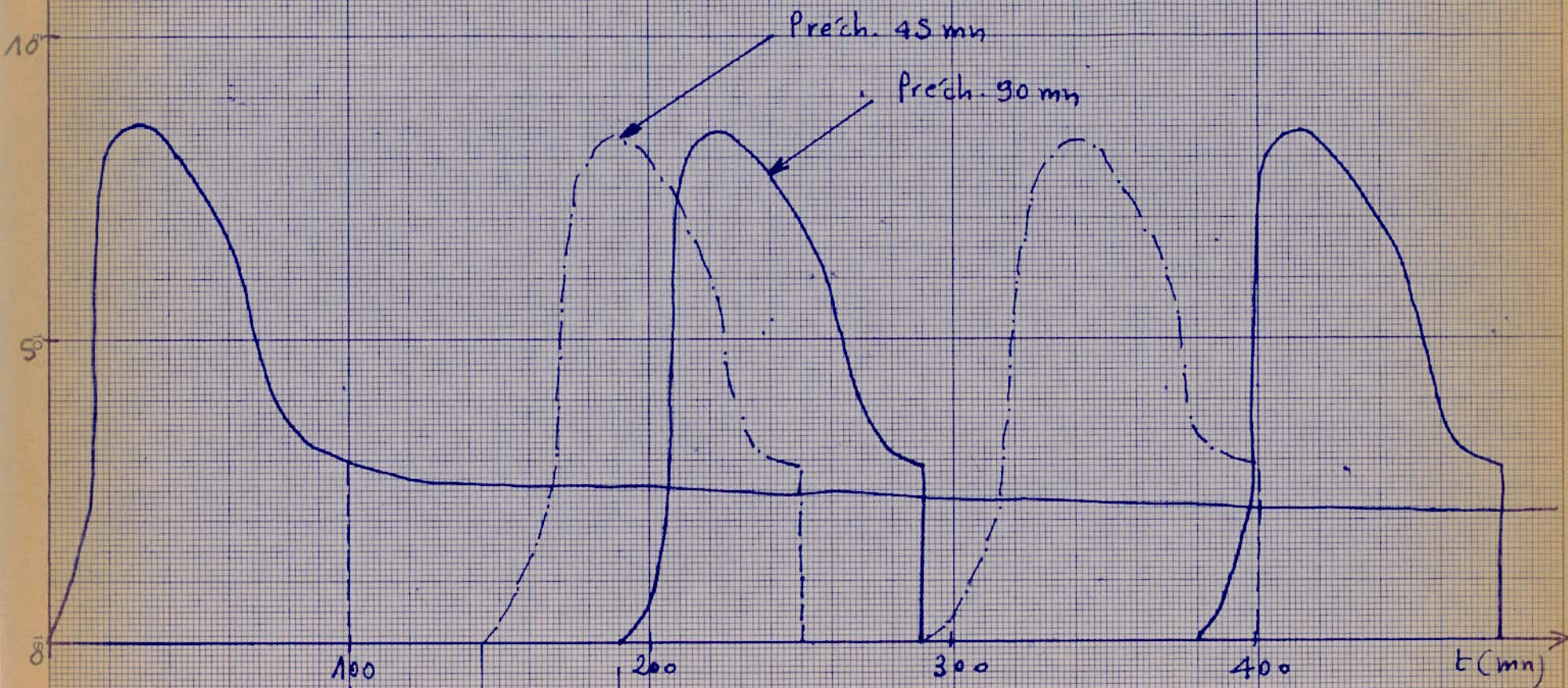
| tp. de préch. | Régime continu | Régime intermittent |
|---------------|------------------|---------------------|
| 90 mn | 23 l en 450 mn | 26,7 l en 450 mn |
| 45 mn | 24,7 l en 495 mn | 30,3 l en 495 mn |

m G.N.L. (l/h)

Temps de marche
régime interrompu
de 100 mn

ESSAI N°3
17/4/77
 $m = f(t)$

C16



100
200
300
400
t (mn)

Préch. 45 mn

Préch. 90 mn

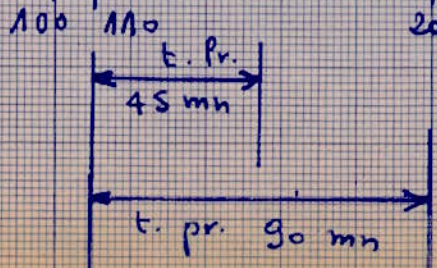
| t de préch. | Régime Continu | Régime interrompu |
|-------------|------------------|-------------------|
| 45 mn | 21,5 l en 400 mn | 27,5 l en 400 mn |
| 90 mn | 26,3 l en 480 | 27,5 l en 480 mn |

$m_{G.N.L.} = f(t)$
e/h.

ESSAI N° 3
17/4/77
 $m_{G.N.L.} = f(t)$

temps de marche
régime interrompu : 110 mn

C17



| t. de préch. | Régime Continu | Régime interrompu |
|--------------|------------------|-------------------|
| 90 mn | 26 l en 510 mn | 29,2 l en 510 mn |
| 45 mn | 21,8 l en 420 mn | 29,2 l en 420 mn |

ESSAI N°3 . PLANIMETRISATION
 DE LA COURBE $m = f(H)$ DU
 REGIME CONTINU.

N°1

| Temps de fonctionnement (mn) | Production de G.N.L. en l | Temps de fonctionnement (mn) | Production de G.N.L. en l. |
|------------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 10 | 0,16 | 150 | 11,50 |
| 20 | 0,83 | 180 | 12,66 |
| 30 | 2,33 | 210 | 13,83 |
| 40 | 3,90 | 240 | 15,00 |
| 50 | 5,33 | 270 | 15,90 |
| 60 | 6,33 | 300 | 17,46 |
| 70 | 7,13 | 330 | 18,66 |
| 80 | 8,00 | 360 | 19,83 |
| 90 | 8,66 | 390 | 21,00 |
| 100 | 9,16 | 420 | 22,00 |
| 110 | 9,66 | 450 | 23,18 |
| 120 | 10,16 | 480 | 24,33 |

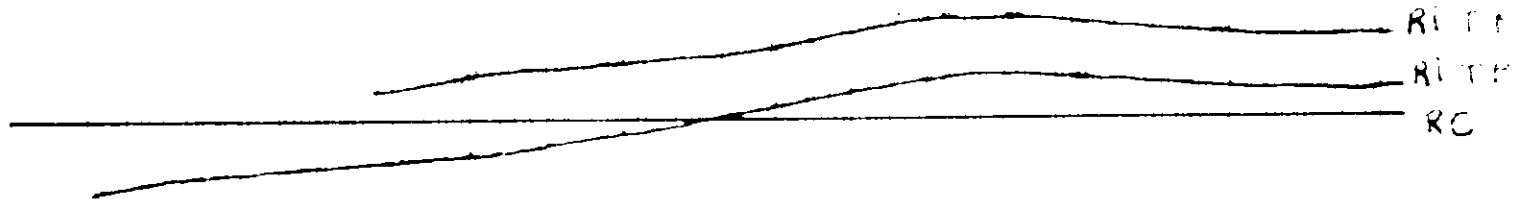
RECAPITULATIF DES RESULTATS
DE COMPARAISON OBTENUS PAR
PLANIMETRISEMENT DES COURBES $m^o = f(t)$.

N°2

| " temps de marche " en mn | temps de Préchauffe en mn | PRODUCTION DU REGIME INTERROMPU | PRODUCTION DU REGIME CONTINU |
|------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| 50 | 90 | 20 l en 470 mn | 24 l en 470 mn |
| | 45 | 25 l en 425 mn | 20,6 l en 425 mn |
| 60 | 90 | 24 l en 510 mn | 26 l en 510 mn |
| | 45 | 30 l en 480 mn | 24,3 l en 480 mn |
| 70 | 90 | 22 l en 390 mn | 20,8 l en 390 mn |
| | 45 | 27 l en 415 mn | 21,7 l en 415 mn |
| 80 | 90 | 24,5 l en 420 mn | 21,8 l en 420 mn |
| | 45 | 32,6 l en 455 mn | 23,6 l en 455 mn |
| 90 | 90 | 26,5 l en 450 mn | 23 l en 450 mn |
| | 45 | 35,3 l en 495 mn | 24,5 l en 495 mn |
| 100 | 90 | 27,5 l en 400 mn | 21,3 l en 400 mn |
| | 45 | 27,5 l en 480 mn | 26,3 l en 480 mn |
| 110 | 90 | 29,2 l en 510 mn | 26 l en 510 mn |
| | 45 | 29,2 l en 420 mn | 21,8 l en 420 mn |

courbes de variation des débits moyens en fonction des intervalles de marche du liquéfacteur.

Ri TP 45 = Régime interr. temps de proch. 45 mn
Ri TP 90 = " " " " 90 mn
RC = " continu.



Résultats et conclusion sur la liquéfaction du gaz naturel.

Essais et dépouillement

Nous avons fait 5 essais sur la liquéfaction du gaz naturel; dans les essais (1) , (2) , (5) l'évolution de la production de G.N.L. n'a pas été bien suivie puisque le temps de marche fut très court et ceci à cause des différents arrêts et pannes du liquéfacteur (ex: détérioration des fusibles qui nécessitent 1/4 d'heure de réparation , arrêt du liquéfacteur quand le débit est trop faible) . Par contre , les essais (3) et (4) nous ont permis de contrôler et d'étudier l'évolution de la production de ce liquéfacteur . Nous constatons d'une manière générale , dans les premières 40 mn , la production est croissante jusqu'à une valeur d'environ 8,5 l/h, puis elle décroît brusquement et descend jusqu'à 3l/h, et ceci en l'espace de 30 mn et se stabilise à cette valeur . On note au passage que l'évolution de la puissance fournie par le moteur est normale et se stabilise à 0,9 kw au bout de 70 mn de marche du liquéfacteur : voir courbes (C1,C2,C3, C4,C5); les rendements pour les essais qui nous intéressent(essais 3 et 4) ont les mêmes allures que celles du débit en fonction du temps ; à la stabilisation de la production le rendement est de 0,3 , voir courbes (C6,C7,C8,C9,C10) ;

On remarque que la production est beaucoup affectée par le dépôt de givre sur la tête du condenseur. Le drain d'évacuation des lourds se trouve souvent bouché , ce qui augmente le givrage de la tête , donc

diminution de la production et quelques fois arrêt du liquéfacteur .

Détermination du meilleur temps de marche

Maintenant il s'agit de voir quelle est la meilleure utilisation du liquéfacteur . On aura à comparer pour cela deux sortes d'utilisations :

-Utilisation sous régime permanent .

-Utilisation sous régime interrompu , au bout d'un temps bien approprié en préchauffant à chaque fois .

Pour cette étude , on a choisi l'essai 3 qui est beaucoup plus régulier que l'essai 4 .

Observons pour cela la courbe $\dot{m} = f(t)$, voir C3 . On se propose d'arrêter le liquéfacteur au bout d'un certain temps T de façon que le liquéfacteur aura été utilisé que là où il débite le plus . Donc l'opération aura les séquences suivantes :

1- début: préchauffage du liquéfacteur et mise en marche du liquéfacteur .

2- arrêt du liquéfacteur au bout d'un temps T :

3- préchauffage du liquéfacteur durant un temps t .

4- mise en marche du liquéfacteur de nouveau et arrêt au bout du même temps T ; et ainsi de suite .

Nous avons fait varier le temps de marche T de 50mn à 110mn par pas de 10mn et avons par ailleurs considéré 2 temps de préchauffe $t_1 = 90mn$ donné par la soufflerie (PW 7115) disponible au laboratoire et $t_2 = 45mn$ donné par les souffleries (PW 7201 à 7209) non disponible au laboratoire de liquéfaction . On a construit les courbes débit de G.N.L. en fonction du temps pour ce régime interrompu en reproduisant

le long de l'axe des temps la partie de la courbe du régime continu où le liquéfacteur débite le plus ; voir courbes C11 à C17 .

Pour avoir la production de G.N.L. pour chaque couple (T , t)

(T= temps de marche ou intervalle de marche et t = temps de préchauffe)

on a planimétré donc toutes les courbes C11 à C17 : voir tableau des résultats N° 2. Nous avons calculé les débits moyens pour chaque régime et avons tracé les courbes de débits moyens en fonction du temps, voir courbe C18 .

Sur la courbe C18 on peut voir quelle est le couple (T,t) qui nous donne la meilleure production. On voit dans C18 que pour un préchauffage de 90mn ou de 45mn, le meilleur temps de marche du liquéfacteur est de 85mn. Pour ce temps ou intervalle de temps de marche (85) , les débits sont :

$$-t=45 \text{ mn} , \quad \overset{\circ}{m} = 4,4 \text{ l/h}$$

$$-t=90 \text{ mn} , \quad \overset{\circ}{m} = 3,7 \text{ l/h}$$

$$- \text{régime continu} , \quad \overset{\circ}{m} = 3 \text{ l/h} : \text{ constant .}$$

| soufflerie ou temps de préchauffe | t. de marche du liquéfacteur | débit régime continu | débit régime interrompu | accroissement |
|--|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|
| PW 7201 à 7209 t= 45 mn | 85 mn | 3 l/h constant | 4,4 l/h | 46% |
| PW 7115 t= 90 mn | | | 3,7 l/h | 23% |

Donc avec un temps de marche de 85 mn et avec un préchauffage de 90 mn ; notre production moyenne passe de 3 l/h à 3,7 l/h et se trouve ainsi accrue de 23% . Mais les résultats atteints par un préchauffage de 45 mn et toujours un temps de marche de 85 mn sont beaucoup plus importants puisque la production moyenne se trouve améliorée de 46% . Il serait donc avantageux que le laboratoire soit équipé de l'une des souffleries PW 7201 à 7209 .

Zone d'utilisation

Observons les courbes C19 : ces courbes représentent en fonction du temps les productions suivantes :

- Production en régime continu.
- Production en régime interrompu avec une préchauffe de 90 mn .
- Production en régime interrompu avec une préchauffe de 45 mn .

On a convenu d'utiliser le liquéfacteur sous régime interrompu (85 mn) avec un temps de préchauffe de 45 mn ou 90 mn . Mais il y a des endroits bien visible dans la courbe C19 où l'utilisation du liquéfacteur sous le régime continu est plus rentable.

DONC : - Résultat général: l'utilisation (85,45) est plus économique que l'utilisation (85, 90) qui elle-même plus économique que le régime continu . Cependant :

- En certains endroits le régime continu (RC) est plus rentable que les utilisations (85,45) ou (85,90)

EXEMPLE: on a un réservoir de 10 l à remplir de G.N.L. , regardons la courbe C19. elle indique :

- le liquéfacteur débite 10 l en 114 mn sous le régime continu
- le liquéfacteur débite 10 l en 156 mn sous le régime (RI 85 45)
- le liquéfacteur débite 10 l en 200 mn sous le régime (RI 85 90)
- le liquéfacteur débite 14 l comme suit :
 - en 186 mn sous le régime (RI 85 45)
 - en 200 mn sous le régime continu (RC)
 - en 234 mn sous le régime (RI 85 90)

RI 85 45 = REGIME INTERROMPU TEMPS DE MARCHE 85 MN , PRECHAUFFE 45 MN

RI 85 90 =

 90 MN

RC = REGIME CONTINU

GAIN DE TEMPS = GAIN D'ENERGIE = ECONOMIE

Remarque : ceci est valable que dans le cas où on a à remplir un réservoir de G.N.L. et de n'utiliser le liquéfacteur que plus tard .

On va classer donc ces utilisations particulières du liquéfacteur comme suit :

TABIEAU D'UTILISATION DU LIQUEFACTEUR EN

PRODUCTION DE G.N.L.

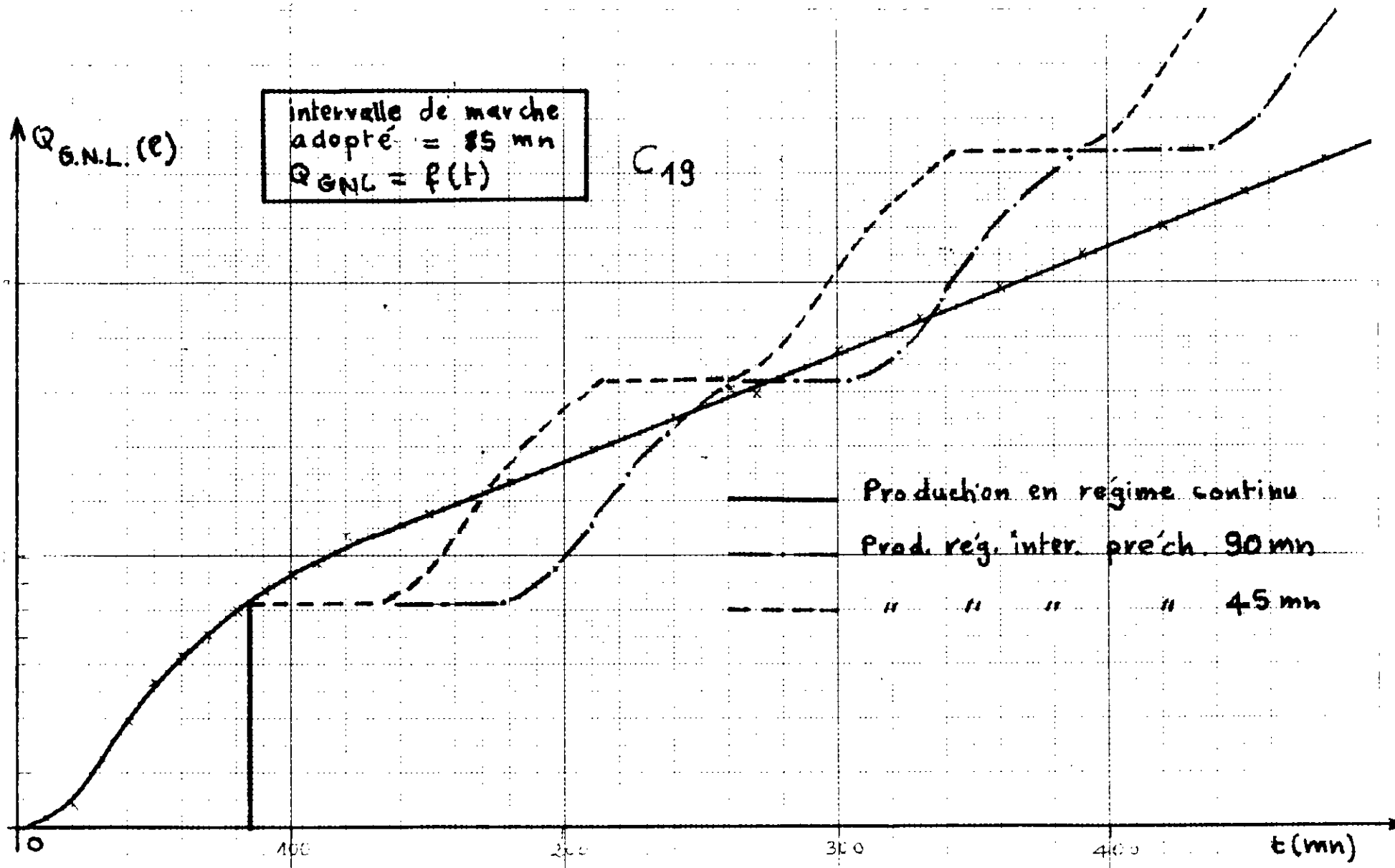
| | |
|----------------------------|---|
| $0 < Q \leq 12$ litre | (1) RC, (2) RI8545, (3) RI8590 |
| $12 < Q \leq 14,4$ litre | (1) RI8545, (2) RC, (3) RI8590 |
| $14,4 < Q \leq 16,4$ litre | (1) RI8545, (2) RI8590, (3) R.C |
| $16,4 < Q \leq 18,8$ litre | (1) RI8545, (2) RC, (3) RI8590 |
| $18,8 < Q$ litre | Utilisation sous RI8545 ou RI8590, les courbes correspondantes sont nettement au-dessus de celles de RC |

Remarque : Q est la production de gaz naturel liquide en litre

$Q_{G.N.L.}(t)$

intervalle de marche
adopté = 85 mn
 $Q_{G.N.L.} = f(t)$

C.19



Production en régime continu

Prod. rég. inter. préch. 90 mn

" " " " 45 mn

CALCUL DES PERTES DE GAZ NATUREL

Extrait du tableau des résultats de l'essai numéro (1)

| temps de mesure en mn | indication du compteur de G.N. en m ³ | débit de G.NL. mesuré en g/mn | masse b volu. du G.N. en Kg :/m ³ |
|-----------------------|--|-------------------------------|--|
| 85 | 4229,810 | 38,3 | 0,85 |
| 90 | 4230,190 | 38,3 | 0,85 |

Calcul du débit de gaz naturel:

$$\frac{\text{m}^3 \text{ G.N.}}{\text{mn}} = \frac{4230,190 - 4229,810}{90 - 85} \text{ m}^3 / \text{mn}$$

$$\frac{\text{m}^3 \text{ G.N.}}{\text{mn}} = 78,5 \text{ g/mn}$$

Calcul des pertes //

On a fourni 78,5 g/mn et l'on récupère seulement 38,3 g/mn .
 On remarque que cet exemple nous donne des pertes assez importantes , de l'ordre de 50 % .

REMARQUES ET PROPOSITIONS

Si l'air ambiant était sec , il n'aurait pas fallu préchauffer la tête du condenseur durant 45 mn ou 90 mn . Durant les essais , l'air ambiant était très humide et son humidité est montée jusqu' à 80 % . Mais à défaut d'air sec , on aurait pu utiliser comme gaz sec le gaz naturel lui-même et dans ce cas , quelques minutes suffiront pour faire démarrer le liquéfacteur . Un essai provisoire a été fait auparavant et cela a donné de bons résultats . Il est nécessaire de reconsidérer cette possibilité de préchauffage de la tête avec le gaz naturel et de faire des calculs de rentabilité .

Puisqu'on a convenu d'utiliser le liquéfacteur sous le régime intermittent(interrompu) , il est commode d'automatiser la combinaison arrêt-mise en marche du liquéfacteur et arrêt-mise en marche de la soufflerie par un système d'horlogerie électronique .

Dans les essais de liquéfaction du gaz naturel , nous avons rencontré beaucoup d'inconvénients au niveau des mesures de débit de G.N. , car en vidant le dewar de son contenu de G.N.L. dans un réservoir il y a un dégagement considérable de vapeurs qui nuisent à l'organisme humain .Pour cela il faut que le laboratoire de liqué-

faction soit équipé de masques à gaz ou bien aménager un robinet sur le dewar (ce qui améliorera le transvasement dewar-réservoir)

On a constaté à plusieurs reprises que les pannes du liquéfacteur sont dues pour la plupart à une diminution du débit d'eau de refroidissement , car le liquéfacteur au-delà d'une valeur minimale du débit d'eau , s'arrête de lui-même et déclenche une sonnerie. Cette sonnerie est actuellement en panne .

Cette diminution du débit d' eau de refroidissement est due en particulier à l'utilisation considérable d'eau par les autres au labora-
usagers
toire . Il est donc nécessaire d'isoler le circuit d'alimentation en eau du liquéfacteur .

Bibliographie

- 1- Notice du liquéfacteur.
 - 2- Cours de Mr Muller sur la liquéfaction .
 - 3- Projet de fin d'étude de Mr Achour sur la liquéfaction .
-

DEUXIEME PARTIE

COMBUSTION

DU GAZ NATUREL

AVERTISSEMENT

Il arrive que la méthode de calcul de certains coefficients ou de certaines grandeurs (ex: richesse) ne figure pas dans cette étude .Pour cela il faut se référer à la documentation et notamment au cours de Mr Matton sur la combustion.

Dans ce cours figure aussi la théorie complète sur l'utilisation du diagramme Enthalpie-richesse et les calculs de rendements .

INTRODUCTION

Dans cette troisième partie de notre projet , on s'est fixé pour but d'étudier le comportement d'une chambre de combustion d'un réacteur , en comparant les résultats expérimentaux avec les résultats théoriques .

Mais limités par le temps , nous n'avons pas pu faire des essais sur cette chambre et comme côté pratique nous avons procédé à certains travaux d'ordre secondaire (ex : changement de la vanne de régulation de température

Comme point de départ , nous avons reconsidéré les essais qui ont été faits en juin 1975 . Nous avons repris les calculs et avons complété le dépouillement de quelques essais , notamment en procédant aux calculs des rendements .

Donc cette étude comprendra deux parties : une partie sur la théorie et la pratique des mesures et une partie sur les essais et le dépouillement avec la conclusion .

Dans la partie théorie et pratique des mesures nous trouverons:

- Description du banc de combustion et mise en marche .
- Calcul des enthalpies globale et de combustion.
- Calcul du coefficient stoechiométrique.
- Calcul des débits de gaz et d'air .
- Théorie des analyses de gaz à absorption de rayonnement infrarouge.
- Théorie des analyses d'oxygène .

Partie essai et dépouillement

-ESSAIS

-Calcul des rendements

-Courbes $\eta = f(T_{bi})$

- Courbes $\eta = f(\phi_g)$

MANIPULATION

BANC DE COMBUSTION

But

La manipulation consiste à enflammer un mélange gazeux (air - gaz) dans une chambre de combustion d'un reacteur pour etudier le comportement de celle-ci sous different regime et a comparer les resultats experimentaux à la theorie présentée sous forme de diagramme.

Description

Se referer aux differentes schémas d'installations : Pl n°3, P 1 n°6
Pl n°7 .

Le banc se compose essentiellement de :

- 1- Une chambre de combustion (Pl n°2)
- 2- turboventilateur (arrivée d'air)
- 3- Une centrale de gaz (stockage de gaz de gaz naturel) , se referer aux Pl n°1 et Pl n°6.
- 4- Un pupitre de commande (Pl n°3)
- 5- Un ensemble d'analyse des gaz Pl n°4
- 6- Un systeme de sonde (Pl n°9)

Remarque

En ce qui concerne l'ensemble d'analyse des gaz , il y aura dans cette etude un chapitre où seront étudiés les analyseurs de gaz .

2- Banc de combustion

a- Préchauffe C.P.

- Ouvrir la vanne d'arrivée du gaz naturel (vanne n°4, 8Pln°5)
- Régler le mano-détendeur à 10 bars relatifs (10 Pln°5)

b- Chambre de combustion C.C.

- Ouvrir la vanne d'arrivée du gaz c.c. (vanne n°5 , 1Pln°5)
- Régler le mano-détendeur à 10 bars relatifs (9Pl n°5)

3- Compresseur

- Mettre la commande 18 planche n°3 sur position marche .

4- Allumage C.P

a- Sans régulation en préchauffe

- Mettre le pupitre sous tension (1Pl n°3)
- Enclencher l'électrovanne (2Pl n°3)
- S'assurer que la vanne papillon de l'entrée d'air du compresseur est au minimum (7Pl n°3)
- Mettre le compresseur en route (6Pl n°3)
- Ouvrir légèrement la vanne C.P (vanne n°7 , 28 Pln°3) jusqu'à ce que le débit mètre indique une pression de quelques centimètres (31 Pl n°3)
- Appuyer sur l'allumage(10 Pl n°3) jusqu'à ce que la chambre s'allume et de façon intermittente (la durée d'enclenchement continu ne doit en aucun cas dépasser 2 secondes, et ceci pour ne pas détériorer le transformateur inséré dans le circuit de commande par un échauffement excessif.

5- Allumage de la chambre de combustion

- Ouvrir légèrement la vanne C.C (vanne n°6, 27 Pl n°3) jusqu'à ce qu'on aurait une dénivellation sur le manomètre (30 Pln°3)

MISE EN MARCHÉ

Préparation

Étalonnage des analyseurs

-il faut que le système soit mis en circuit au moins quatre heures avant l'étalonnage .

-Voir plus loin la théorie sur les analyseurs et la méthode d'étalonnage .

1- Centrale des gaz

Se référer au schéma d'installation (Pl n°6)

Avant tout , il faut que toutes les bouteilles de gaz soient remplies environ à 130 bars à l'aide du compresseur haute pression

a- S'assurer que toutes les vannes du banc sont fermées , il s'agit des vannes suivantes :

vanne n°1 (9P1 n°6)

vanne n°4 (8P1 n°5)

vanne n°2 (4P1 n°6)

vanne n°5 (1P1 n°5)

b- Ouvrir la vanne de sortie de la rampe allant vers le réchauffeur (vanne n°1 -9P16)

c- Brancher le réchauffeur (8P1 n°6)

Prise de courant 220 volts (7P1 n°6)

d- Mettre le mano détendeur à 16 bars relatifs en basse pression .

e- Ouvrir la vanne d'alimentation du banc (vanne n°2 -4P16)

Appuyer de façon intermittente (au maximum 2 secondes d'enclenchement) sur le bouton d'allumage (9P1 n°3) jusqu'à ce que la chambre de combustion s'allume.

MESURES

1- Débit d'air comburant

Le débit d'air comburant se mesure à l'aide d'un venturi dont on lit la différence de pression amont - col sur le manomètre (19P1 n°3), (PI n°8)

Un rappel sur cette méthode de mesure sera présenté en annexe (voir annexe 3)

2- Débit de gaz C.C et débit de gaz C.P

Ces débits se lisent sur les manomètres 30 et 31 Planche n°3) reliés à deux débit -mètres à orifice.

Un rappel sur la théorie de ces mesures suivra en annexe (voir annexe 4) .

Résumé

Pour l'air on aura à relever:

- La pression atmosphérique
- La température de l'air à l'entrée
- Le h d'eau (19P1 n°3)

Pour le gaz il faut relever :

- La pression d'arrivée(20 et 21 P1 n°3)
- La température du gaz (gaz C.C et C.P)

Les thermomètres sont situés derrière le pupitre A (voir P1 3 et P1 7)

3- Analyse des gaz:

Pour l'analyse des gaz il faut relever :

a- % de CO₂

b- % de CO₂ total

c- % de CO

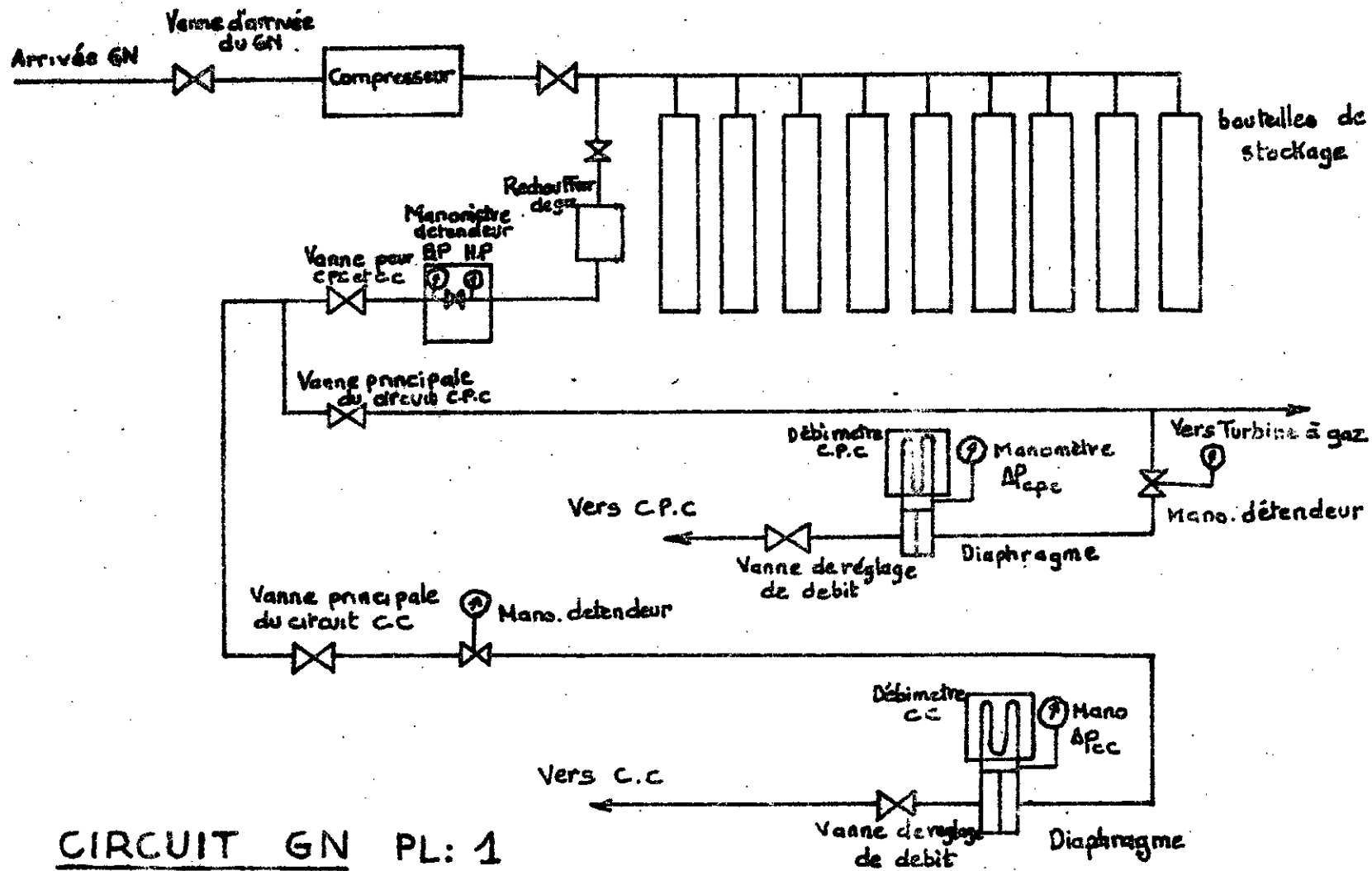
d- % de O₂

Se référer à l'annexe sur les analyseurs qui suit (Annexe 1)

4- Mesure des températures

a- Relever la température de sortie du turboventilateur

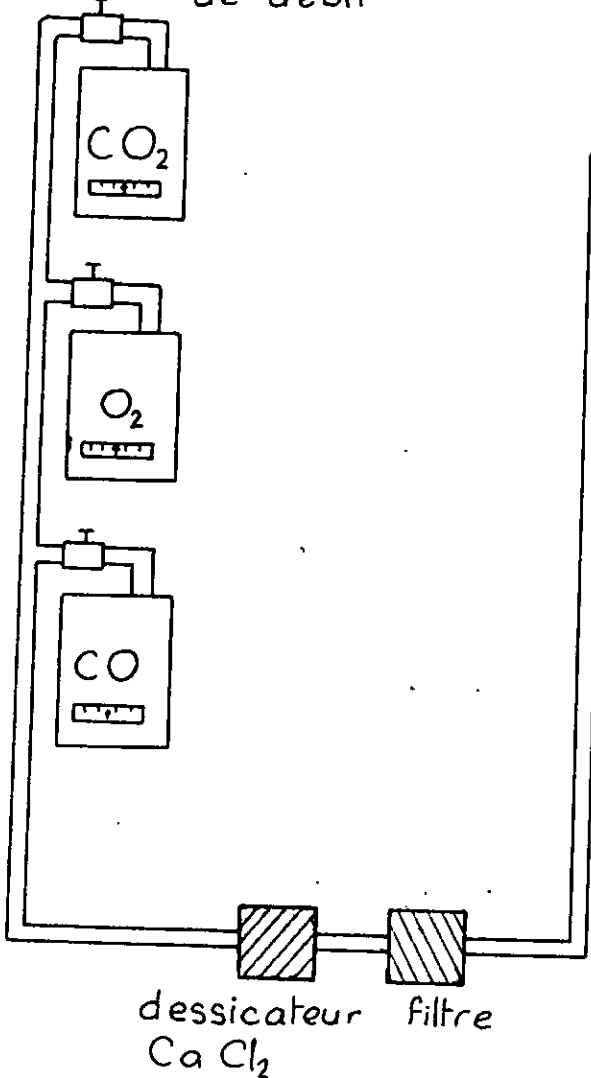
b- Relever la ou les températures de sortie des cham-
bres , .



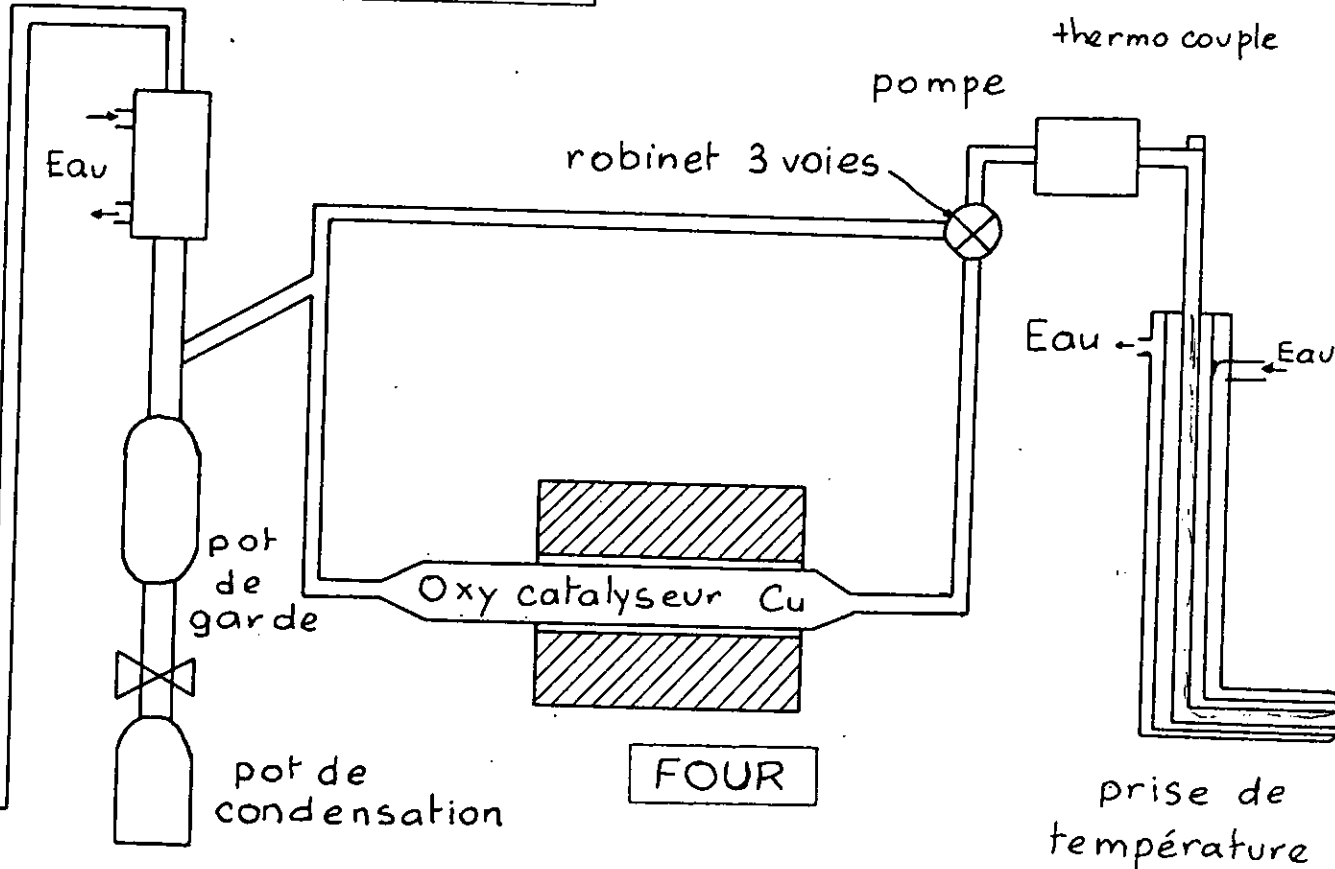
CIRCUIT GN PL: 1

ANALYSEURS

robinet de réglage de débit



DESHYDRATEUR



SCHEMA DE L'INSTALLATION D'ANALYSE DES GAZ

Notice

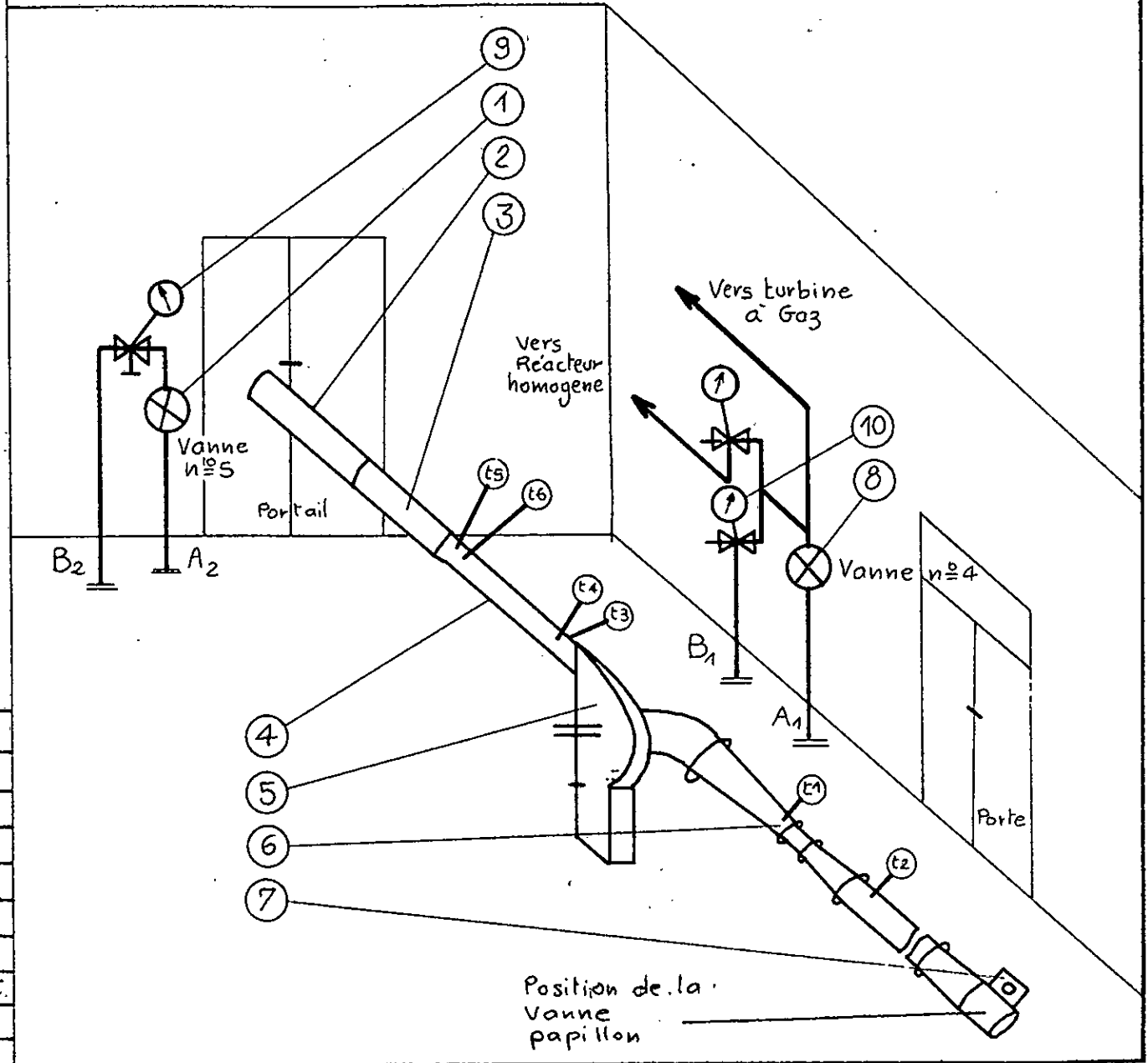
A₁ et A₂ : arrivées du Gaz Naturel de A₀ (Voir PI n°6)

B₁ : conduite du gaz naturel vers diaphragme de la chambre de préchauffe (voir PI n°1 et PI n°8)

B₂ : conduite du gaz naturel vers diaphragme de la chambre de combustion (voir PI n°1 et PI n°8)

Pour les tubes de prise de pression, voir PI n°3 et PI n°7.

SCHEMA D'INSTALLATION BANC DE COMBUSTION PI 5



| | |
|----|------------------------------------|
| 1 | Vanne d'alimentat. generale C.C. |
| 2 | Uniformiseur |
| 3 | Chambre de combustion |
| 4 | Chambre de préchauffe |
| 5 | Turboventilateur |
| 6 | Venturi |
| 7 | Réglage d'air du compresseur |
| 8 | Vanne d'alimentat. generale C.P.C. |
| 9 | Mano. détenteur C.C. |
| 10 | Mano. détenteur C.P.C. |

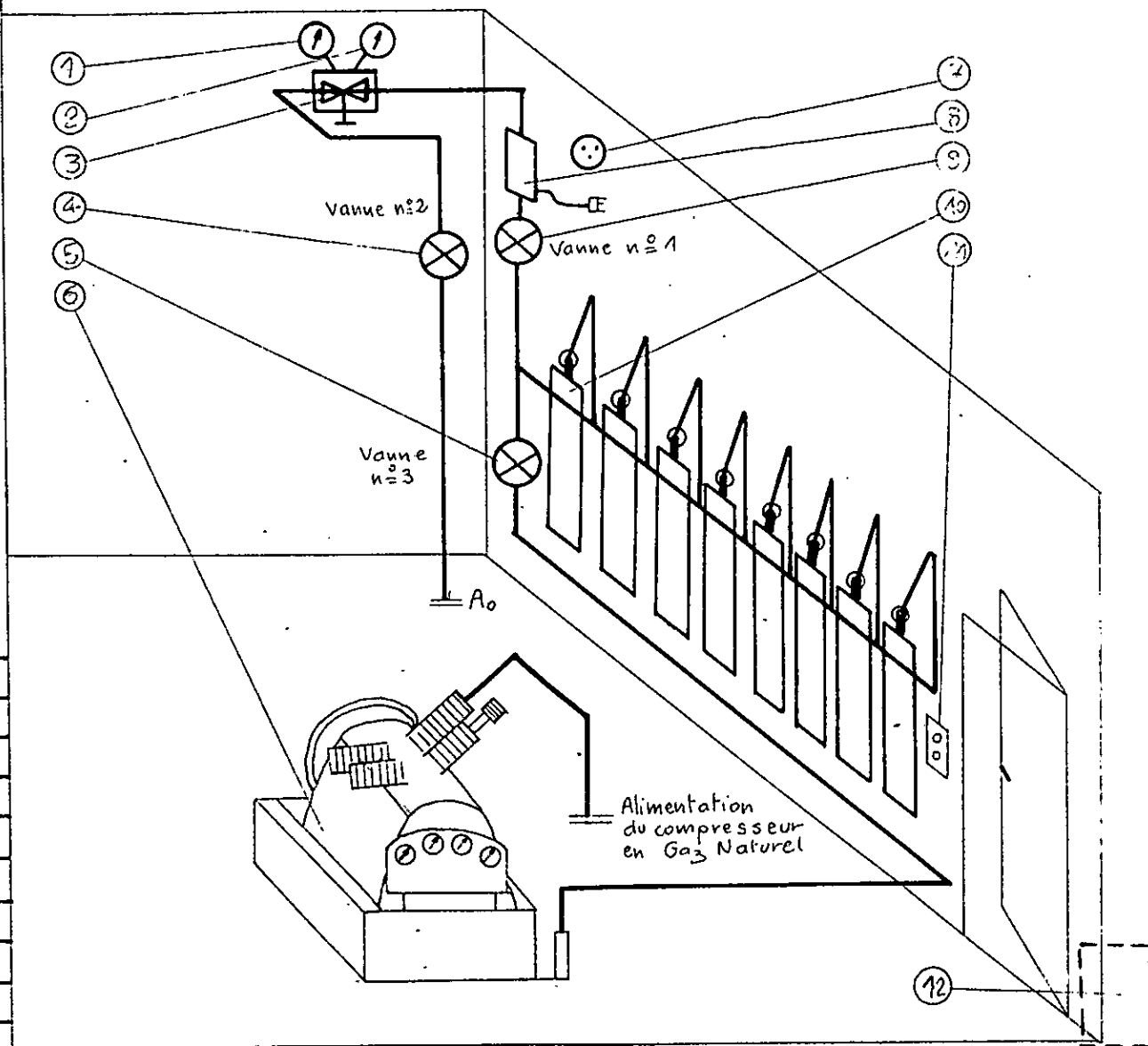
Notice

quand le compresseur refoule le gaz naturel dans les bouteilles, la vanne n°3 est ouverte et la vanne n°1 est fermée.

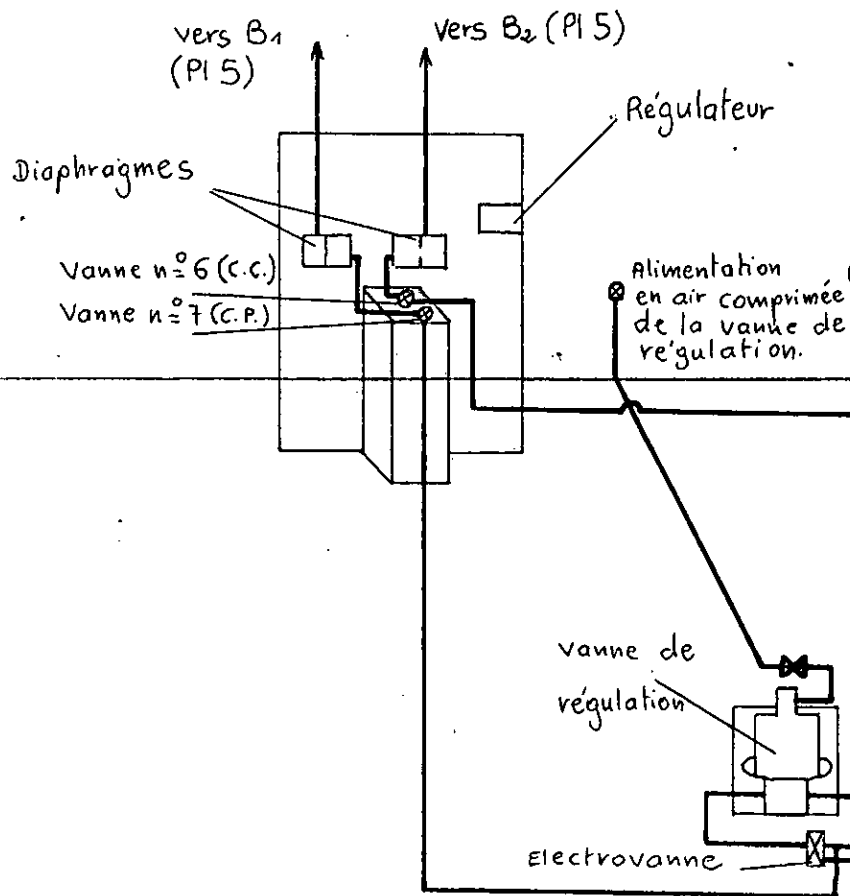
quand les bouteilles alimentent le banc de combustion, la vanne n°1 est ouverte et la vanne n°3 est fermée.

A₀ vers A₁ et A₂ (voir PI 5 et PI 1)

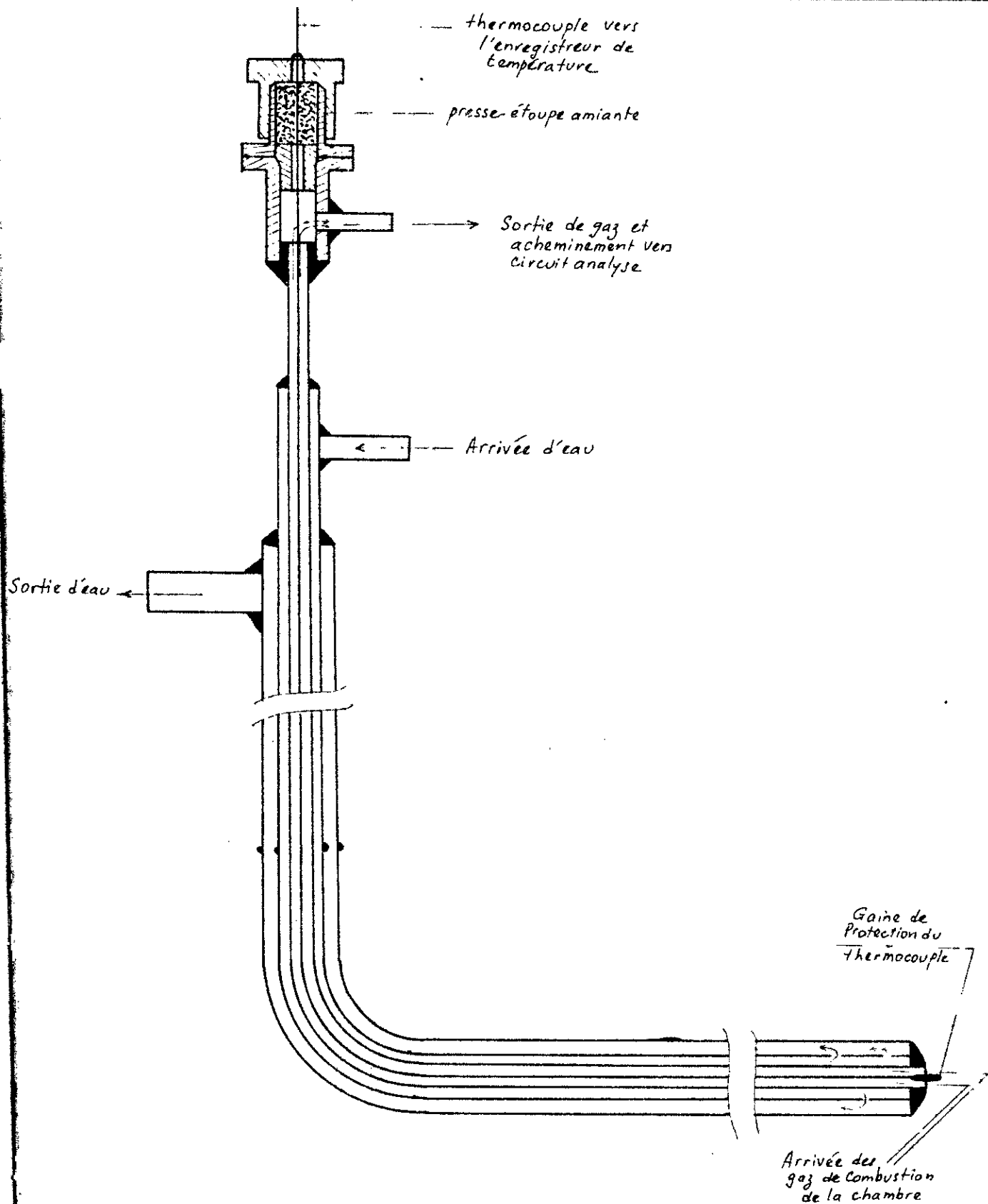
| | |
|----|------------------------------------|
| 1 | Manomètre H.P. |
| 2 | Manomètre B.P. |
| 3 | Détendeur |
| 4 | Vanne d'alimentation CC et C.P.C. |
| 5 | Vanne (Voir Notice) |
| 6 | Compresseur haute pression |
| 7 | Prise 220 V |
| 8 | Rechauffeur de Gaz |
| 9 | Vanne (Voir Notice) |
| 10 | Bouteilles de Stockage G.N. |
| 11 | commande électrique du compresseur |
| 12 | Compteur général du G.N. |



SCHEMA D'INSTALLATION CENTRALE DES GAZ PI 6



SCHEMA D'INSTALLATION
 BANC DE COMBUSTION
 PI N° 7



SONDE REFROIDIE

ANNEXE I

Analyseur de gaz à absorption de
rayonnement infrarouge. CO, CO₂
type ANIR 11

1. Utilisation

Il assure la mesure en continu, de la teneur d'un gaz considéré, dans un mélange binaire ou complexe.

1.1 caractéristiques techniques

Etendue de la mesure

minimale (à la pression atmosphérique)

CO₂ 0 à 50 ppm.

CO 0 à 100 ppm.

1 ppm = 10⁻⁶ = 10⁻⁴% 1% = 10⁴ ppm

ex: 1% CO = 10⁴ ppm

maximale: 0 à 100%.

1.2 Alimentation pneumatique:

- Caractéristiques du gaz : l'appareil résiste à tous les gaz usuels sauf aux vapeurs d'acide.
- Pression d'alimentation de 0,5 à 1,5 bar absolu, l'indication en concentration est directement proportionnelle à la pression absolue.
- Débit recommandé 60 l/h. Le débit est fonction de la pression d'alimentation.
- Température ambiante limite de fonctionnement +15 à +35°C
- Alimentation : 127V, 220V ± 15%, 50 Hz

Consommation 100VA environ

- Bloc d'injection des gaz étalons

Il faut toujours prévoir des bouteilles de gaz étalons et d'azote munies de détendeurs régulateurs de pression de manière à ce que les trois gaz, mesure zéro (azote), fin d'échelle (gaz étalon) soient tous réglés à une même surpression comprise entre 120 et 150 mbar par rapport à la pression atmosphérique.

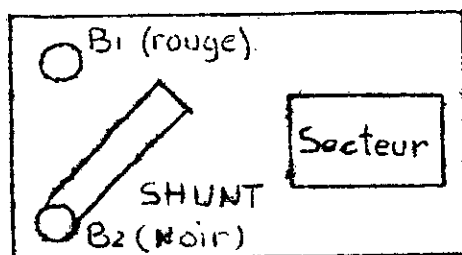
- la régulation du débit se fait à l'intérieur de l'analyseur par le robinet pointeau précédant le débitmètre.

- Ne jamais faire passer dans l'appareil un mélange gazeux saturé ou contenant des poussières.

1.3 Récepteur extérieur

La sortie de la mesure est en courant et en outre isolée de la masse. Il faut donc toujours shunter la sortie de l'analyseur (bornes B_1 et B_2) situées à l'arrière de l'appareil par une impédance donnant pour le courant maximal une chute de tension inférieure à 24V.

Par exemple: calibre 5mA impédance admissible de 0 à 4000 . Dans le cas où il y a plusieurs récepteurs extérieurs il faut les brancher en série.



Plaque de raccordement

Raccorder l'analyseur à une source tension 110 - 127 - 220 ou 237 V (50 Hz) au moyen du cordon.

Remarque ; au dessus du transformateur d'alimentation générale se trouve une plaque équipée de bornes permettant d'effectuer les différents raccordements secteur (110 6 127 - 220 - 237 V)

Raccordement gaz

Raccorder sur la face avant ;

- le filtre de sécurité à l'entrée du gaz
- la tubulure sortie à une canalisation d'évacuation

Exploitation

Si le mélange contenant le gaz à analyser est saturé d'humidité il est recommandé à brancher l'appareil au moins une heure à l'avance sans mettre la pompe en marche , pour éviter les condensations de la vapeur d'eau contenue dans le mélange à l'intérieur du tube d'analyse.

Si le temp de préchauffage de l'appareil est respecté le tarage sera précis et plus stable.

Mise en service de l'analyseur

-Verifications préliminaires

Verifier le zéro de l'amplificateur(agir sur le potentiomètre P_2 si c'est nécessaire , situé à l'intérieur de l'appareil).

-Réglage du zéro des teneurs

Faire circuler dans le tube d'analyse un gaz neutre(azote ou air) ne contenant pas le gaz à doser.

-Vérifier que le commutateur CO1 est sur la position mesure, et que le gain est à la valeur probable indiquée.

Pseudo-tarage et tarage

- Pseudo-tarage:

Cette opération consiste à contrôler le fonctionnement de l'appareil .

-Balayer le tube d'analyse avec un gaz neutre (N_2).

-Mettre le commutateur CO 1,(verifier la correspondance entre la valeur lue

sur le milliampèremètre et la valeur indiquée sur la fiche d'instruction.

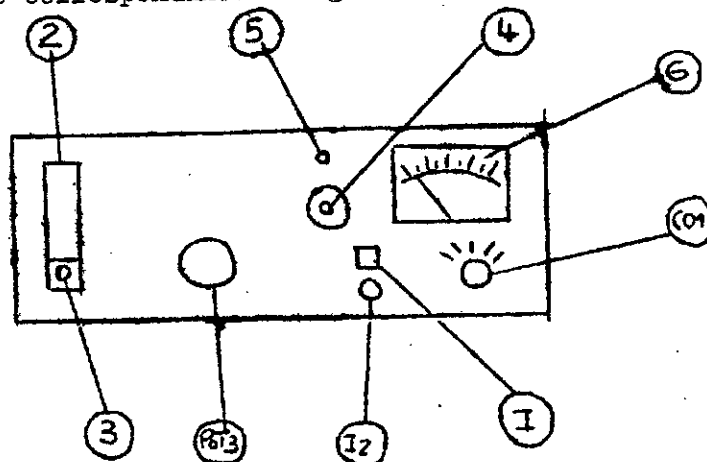
Tarage

-Mettre le commutateur sur la position mesure.

-Balayer le tube d'analyse avec un gaz titré.

-Controler que la valeur lue sur le milliampèremètre correspond à la valeur lue sur la courbe d'étalonnage .

-Ajuster cette correspondance en agissant sur le potentiomètre POT 3.



CO 1: commutateur (zéro amplificateur, tarage, mesure)

G : milliampèremètre

I : bouton poussoir MARCHÉ ARRÊT

I2 : inverseur zéro

POT3: potentiomètre gain

4 : filtre de sécurité

5 : tubulure sortie gaz

2 : débitmètre

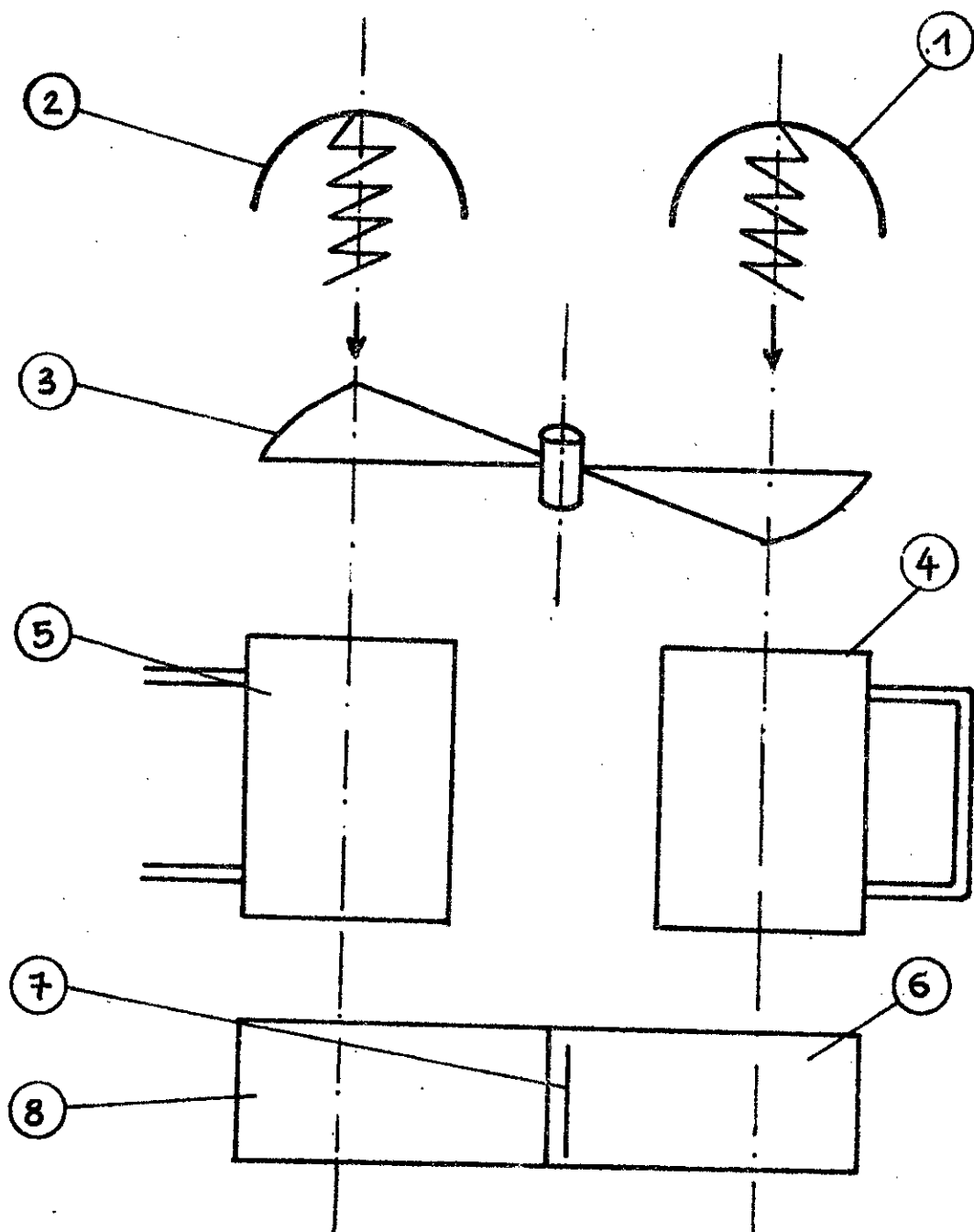
3 : axe fendu(débitmètre)

Fonctionnement

L'analyseur comprend deux émetteurs identiques 1 et 2 constitués de spirales chauffées électriquement au rouge, et munies de réflecteurs ; Les tubes 3 et 4 servent, l'un de tube d'analyse et contient le mélange gazeux à analyser, l'autre de tube de comparaison et contient un gaz neutre.

Les deux chambres 5 et 6 du récepteur sont remplies par le même gaz que celui que l'on veut analyser. Le gaz absorbera les radiations qui ont été affaiblies par la présence dans le mélange du gaz à doser. L'émission infrarouge est interrompue périodiquement et simultanément par la rotation d'un obturateur 7. Les pressions qui régnent dans les deux chambres de mesure se trouvent modulées à la fréquence de passage des pales de l'obturateur.

La membrane séparant les deux chambres, constituant l'armature d'un condensateur, substitue la mesure de la variation de pression à une variation de capacité électrique, qui s'effectue au moyen d'un amplificateur dont le signal de sortie fait dévier un milliampèremètre.



1-2 Emetteurs

4 Tube de comparaison

5 Tube d'analyse

3 Obturateur

7 Membrane

6-8 Chambre (recepteur)

SCHEMA DE PRINCIPE DE L'ANALYSEUR

Analyseur d'Oxygène

Type OSCAR

Principe : Oscar est un analyseur de gaz utilisant les propriétés paramagnétiques de l'oxygène. Il mesure en continu, la teneur en oxygène d'un mélange gazeux

gaz paramagnétiques : O_2 ; NO_2 ; NO

- De tous les gaz industriels, seul l' O_2 est paramagnétique.
- (les deux oxydes d'azote NO et NO_2 sont également paramagnétiques, mais leur susceptibilité magnétique est plus faible et on les rencontre généralement en très faible proportion)

Caractéristiques techniques

- alimentation secteur
- Tension $220V \pm 10\%$
- Fréquence 45 à 65 Hz sinusoïdal
- Consommation 120 VA

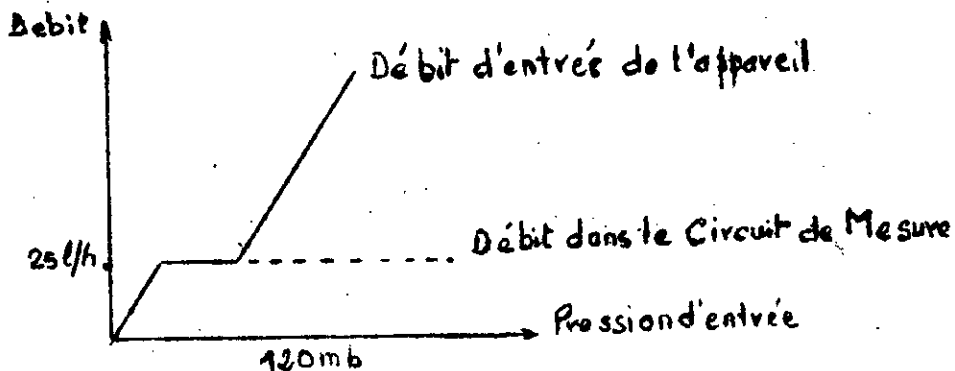
Alimentation pneumatique

L'appareil résiste à tous les gaz usuels sauf aux vapeurs de solvants et aux vapeurs d'acide (HCl) .

Ne pas faire passer de mélange inflammable dans l'analyseur .
celui-ci comportant un point chaud (230°) .

Pression d'alimentation : 0,1 à 1b absolu

Débit muni d'un régulateur à 25l/h



Etalonnage de l'analyseur

Reglage du zero des teneurs - après deux heures de fonctionnement faire

passer de l'azote

- Ramener l'indicateur de l'échelle des teneurs à l'aide du potentiomètre (4)

- Lorsque l'appareil est utilisé sur ses 3 sensibilités, régler le zero sur la position 1 du commutateur (5)

Reglage du gain

Envoyer dans l'analyseur un mélange de gaz étalon . Amener la lecture à la valeur voulue en agissant sur le potentiomètre du gain (3)

quand l'appareil est utilisé sur ces trois sensibilités, faire le reglage du gain sur la sensibilité correspondant à la valeur du gaz étalon .

On peut utiliser l'air ambiant dans certains cas.

Fonctionnement

Circuit de mesure:

Le circuit de mesure est constitué de deux tubes en acier inoxydable amagnétique . Le gaz à doser est envoyé à l'intérieur de ces tubes qui ont une section rectangulaire afin de soumettre un grand volume de gaz aux variations du champ magnétique. Le gaz est chauffé par des résistances électriques.

Les tubes de mesure sont soumis à un champ magnétique périodique obtenu en alimentant simultanément la bobine en courant continu et en courant alternatif Cette superposition de courant, permet l'obtention d'un champ magnétique très intense . Les variations de pression sont transmises au condensateur de mesure.

THEORIE DE LA COMBUSTION DU GAZ NATUREL.

- 1- Calcul de l'enthalpie globale, soit: $(\Delta H_G^0)^{298^\circ K}$
- Calcul de l'enthalpie de combustion, soit: (ΔH_R^{298})
- 2- Calcul du rapport stœchiométrique, soit: $(C/A)_{st}$

1- Calcul des enthalpies globale et de combustion

1.1-Composition moyenne volumétrique en % du gaz naturel

| | | | | | | | | |
|------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| He | N ₂ | CO ₂ | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₃ H ₈ | C ₄ H ₁₀ | C ₅ H ₁₂ | C ₆ H ₁₄ |
| 0,19 | 5,93 | 0,21 | 83,43 | 0,13 | 0,21 | 6,92 | 2,12 | 0,83 |

1.2-Rappel théorique

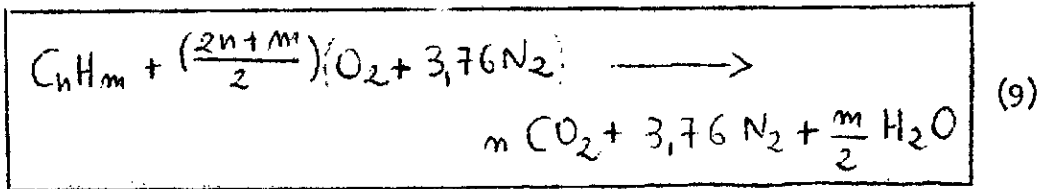
a) Déf.(1): l'enthalpie globale est la somme de l'enthalpie de formation à la température de référence et de l'enthalpie sensible.

$$(\Delta H_G^0)^{298} = (\Delta H_F^0)^0 + \int_0^{298} c_p dT \quad (1)$$

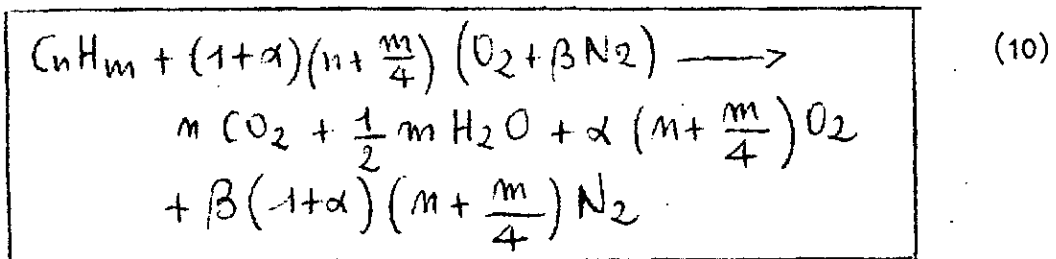
b) Déf.(2): l'enthalpie de combustion est égale à la différence des enthalpies globales des produits et des réactifs

$$(\Delta H_R^0)^{298} = \sum_{\text{produits}} (\Delta H_G^0)^{298} - \sum_{\text{réactifs}} (\Delta H_G^0)^{298} \quad (2)$$

Equation stoéchiométrique de la combustion d'un hydrocarbure
dans l'air .



ou bien



$\beta = 3,76$ (nbre de moles d'azote par mole d'oxygène)

$\alpha = \text{excès d'air} = \frac{1 - \phi}{\phi}$

$\phi = \text{richesse} = \frac{C/A}{(C/A)_{st}}$

Nous aurons donc une enthalpie de réaction donnée par :

$$(\Delta H_R)^{298} = \left[m (\Delta H_G^0)_{CO_2}^{298} + 3,76 (\Delta H_G^0)_{N_2}^{298} + \frac{m}{2} (\Delta H_G^0)_{H_2O}^{298} \right] - \left[(\Delta H_G^0)_{C_n H_m}^{298} + \frac{2n+m}{2} (\Delta H_G^0)_{O_2}^{298} + 3,76 (\Delta H_G^0)_{N_2}^{298} \right]$$

(11)

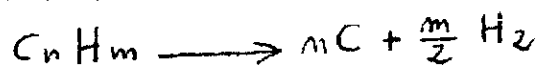
Toutes les enthalpies globales du second membre de cette égalité sont données par les tables de Ribaud .

(Voir TABLE DE RIBAUD)

Pour le CO₂

$$(\Delta H_F^\circ)^{0^{\circ}K}_{CO_2} = (\Delta H_F^\circ)^{298}_{CO_2} - (\Delta H_S^\circ)_{CO_2} + (\Delta H_S^\circ)_C + (\Delta H_S^\circ)_{O_2} \quad (6)$$

Pour les hydrocarbures



$$(\Delta H_F^\circ)^{0^{\circ}K}_r = (\Delta H_F^\circ)^{298}_r - (\Delta H_S^\circ)_r + n(\Delta H_S^\circ)_C + \frac{m}{2}(\Delta H_S^\circ)_{H_2} \quad (7)$$

d) Théorie sur le calcul de l'enthalpie de réaction

Application de la loi de Kirchoff:

$$\begin{aligned} (\Delta H_R^\circ)^T &= \sum_{i=1}^n \nu_i \left[(\Delta H_F^\circ)_{x_i}^{Tr} + \int_{Tr}^T c_{p, x_i} dT \right] \\ &\quad - \sum_{i=1}^m \nu_i \left[(\Delta H_F^\circ)_{x_i}^{Tr} + \int_{Tr}^T c_{p, x_i} dT \right] \\ &= A - B \end{aligned}$$

ν_i : nbre de moles des produits

ν_i : Nbre de moles des réactifs

A : enthalpie globale du produit .

B : enthalpie globale du réactif .

c) Théorie sur le calcul de l'enthalpie de formation du G.N.

à Tr = 0° K

$$\left(\Delta H_F^\circ\right)_{\text{G.N.}}^{0^\circ\text{K}} = \frac{1}{100} \sum_i p_i \left(\Delta H_F^\circ\right)_{r_i}^{0^\circ\text{K}} \quad (3)$$

p_i = % du réactif i dans le gaz naturel .

$$\left(\Delta H_F^T\right)_r^{T^\circ\text{K}} - \left(\Delta H_F^\circ\right)_r^{0^\circ\text{K}} = \int_0^T c_p dT - \sum \left(\nu_i \int_0^T c_{p_i} dT \right) \quad (4)$$

On pose : $T=298^\circ\text{K}$

Et soit:

$$\int_0^{298} c_p dT = \left(\Delta H_S^\circ\right)_r$$

l'enthalpie sensible du gaz à l'état standard .

$$\left(\Delta H_F^\circ\right)_r^{0^\circ\text{K}} = \left(\Delta H_F^\circ\right)_r^{298} - \left(\Delta H_S^\circ\right)_r + \sum \nu_i \left(\Delta H_S^\circ\right)_i \quad (5)$$

Tous les termes de l'égalité (5) sont donnés par les tables de Ribeaud .

TABLE DE RIBAUD DES ENTHALPIES DE FORMATION

| | ΔH_F^{298} | ΔH_S^{0-298} | T_F | T_N | $-\Delta H_R^{298}$ | $-\Delta H_R^{298}$ | Etat physique du combustible |
|--------------------------------|--------------------|----------------------|---------|---------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| | Kcal/mole | Kcal/mole | °C | °C | H ₂ O liq. Kcal/mole | H ₂ O Nap Kcal/mole | |
| H ₂ | 0 | 2,02381 | -259,2 | -252,77 | 68,3174 | 57,7979 | Gas |
| C | 0 | 0,2516 | | 3497 | 94,052 | Pas de formation d'eau. | |
| O ₂ | 0 | 2,06978 | -218,77 | -182,97 | — | — | |
| N ₂ | 0 | 2,07227 | -210,01 | -195,80 | — | — | |
| CO | -26,4157 | 2,07263 | -205,06 | -191,49 | 67,6361 | Pas de formation d'eau | Gas |
| CO ₂ | -94,0518 | 2,23811 | -56,18 | -78,48 | — | — | |
| H ₂ O | -57,7979 | 2,3651 | 0 | 100 | — | — | |
| CH ₄ | -17,889 | 2,397 | -182,48 | -161,49 | 212,798 | 191,759 | Gas |
| C ₂ H ₆ | -20,236 | 2,856 | -183,23 | -88,63 | 372,820 | 341,261 | Gas |
| C ₃ H ₈ | -24,820 | 3,512 | -187,65 | -42,07 | 530,605 | 488,527 | Gas |
| | | | | | 526,782 | 484,704 | Liq. |
| C ₄ H ₁₀ | -29,812 | 4,645 | -138,33 | -0,5 | 687,982 | 635,384 | Gas |
| | | | | | 682,844 | 630,246 | Liq. |
| C ₅ H ₁₂ | -35,00 | 5,668 | -129,72 | 36,07 | 845,16 | 782,04 | Gas |
| | | | | | 838,8 | 775,68 | Liq. |
| C ₆ H ₁₄ | -39,96 | 6,691 | -95,32 | 68,74 | 1002,57 | 928,93 | Gas |
| | | | | | 995,01 | 921,37 | Liq. |

| ΔH Gaz | $-(\Delta H_F^{\circ})^{0^{\circ}\text{K}}$ | | | $-(\Delta H_G^{\circ})^{298^{\circ}\text{K}}$ | | | $-(\Delta H_R^{\circ})^{298^{\circ}\text{K}}$ | | |
|--------------------------------------|---|-------------|-------------|---|-------------|-------------|---|-------------|-------------|
| | Kcal/mole | Kcal / Kg | KJ / Kg | Kcal/mole | Kcal / Kg | KJ / Kg | Kcal/mole | Kcal / Kg | KJ / Kg |
| N ₂ | 0 | 0 | 0 | 2,07227 | 73,96737 | 309,590451 | 0 | 0 | 0 |
| CO ₂ | 93,96853 | 2135,163145 | 8936,725343 | 91,73042 | 2084,30856 | 8723,87350 | 0 | 0 | 0 |
| C ₂ H ₆ | 16,51737 | 549,333843 | 2299,23680 | 13,66137 | 454,34914 | 1901,6783 | 341,2613 | 11349,6507 | 47503,202 |
| CH ₄ | 15,98678 | 996,55778 | 4171,09261 | 13,58978 | 847,137514 | 3545,6940 | 191,7586 | 11952,9983 | 50029,111 |
| C ₃ H ₈ | 19,48196 | 441,8279131 | 1849,27073 | 15,96996 | 362,179884 | 1515,90392 | 448,527 | 11079,21713 | 46372,0003 |
| C ₄ H ₁₀ | 23,33155 | 401,437543 | 1680,216836 | 18,68655 | 321,5166896 | 1345,70810 | 635,3847 | 10932,2900 | 45156,1004 |
| C ₅ H ₁₂ | 27,26714 | 377,943891 | 1581,88415 | 21,59914 | 299,38097 | 1253,05908 | 782,0464 | 10839,7749 | 45303,8111 |
| C ₆ H ₁₄ | 30,97473 | 359,45237 | 1504,487913 | 24,28373 | 281,805342 | 1179,49626 | 928,93609 | 10780,0224 | 45113,7831 |
| G.N. en tenant compte des % | 151,38230402 | 813,5926558 | 3405,292061 | 121,92365708 | 683,5512075 | 2867,003579 | 202,0798617 | 10688,30074 | 44735,88275 |

CALCUL DU RAPPORT STOECHIMETRIQUE (C/A)_{st} : GN et GNL

III.1 (C/A)_{st} du GN:

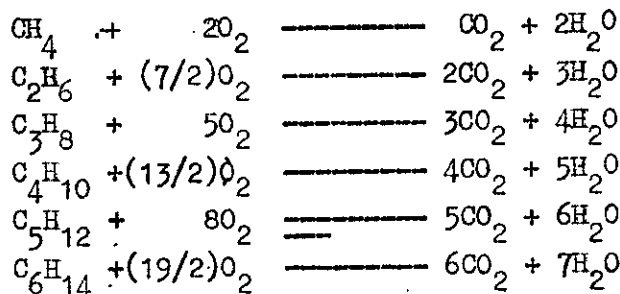
III.1.1 Masse molaire du GN: M_{GN}

100 moles de GN contiennent:

| | | |
|--|--------|------------------------------|
| 83,43 moles de Méthane.....(CH ₄) | pesant | 83,43.16,042 = 1338,38406 gr |
| 6,92 " " Ethane.....(C ₂ H ₆) | " | 6,92.30,068 = 208,07056 gr |
| 2,12 " " Propane.....(C ₃ H ₈) | " | 2,12.44,094 = 93,47928 gr |
| 0,83 " " Butane.....(C ₄ H ₁₀) | " | 0,83.58,120 = 48,33960 gr |
| 0,21 " " Pentane.....(C ₅ H ₁₂) | " | 0,21.72,146 = 15,15066 gr |
| 0,13 " " Hexane.....(C ₆ H ₁₄) | " | 0,13.86,173 = 11,20236 gr |
| 0,19 " " Hélium.....(He) | " | 0,19.4,003 = 0,7657 gr |
| 5,93 " " Azote.....(N ₂) | " | 5,93.28,016 = 166,13488 gr |
| 0,21 " " Gaz carbonique.(CO ₂) | " | 0,21.44,010 = 9,24210 gr |
| <hr/> | | <hr/> |
| =100 | | = 1890,664 gr |

| |
|-------------------------------------|
| M _{GN} = 18,90664 Kg/Kmole |
|-------------------------------------|

III.1.2 Réactions des composants du GN en mélange stoechiométrique:



III.1.3 Calcul de la masse d'air

Masse d'oxygène nécessaire à la combustion de 100 MOLES de GN :

| | | |
|---|-----------|---|
| Pour 83,43 moles de (CH ₄) | il faut : | 2.83,43 = 166,86 moles d'O ₂ |
| " 6,92 " " C ₂ H ₆ | " " : | $\frac{7}{2}.6,92 = 24,22$ " " |
| " 2,12 " " C ₃ H ₈ | " " : | $5.2,12 = 10,60$ " " |
| " 0,83 " " C ₄ H ₁₀ | " " : | $\frac{13}{2}.0,83 = 5,395$ " " |
| " 0,21 " " C ₅ H ₁₂ | " " : | $8.0,21 = 1,68$ " " |
| " 0,13 " " C ₆ H ₁₄ | " " : | $\frac{19}{2}.0,13 = 1,235$ " " |

La masse d'oxygène nécessaire à la combustion de 100 moles de GN est:
 $166,86 + 24,22 + 10,60 + 5,395 + 1,68 + 1,235 = 209,99$ moles d' O_2

La quantité de N_2 est : $3,76 \cdot 209,99$ moles de N_2

La masse d'air est de:

$$209,99 \cdot 32 + 3,76 \cdot 209,99 \cdot 28,016 = 6719,68 + 22120,3802 = 28840,0602 \text{ gr}$$

Pour 100 moles de GN il faut une masse d'air de:

$$A = 28840,0602 \text{ GR}$$

III.1.4 - $(C/A)_{st}$ du GN:

100 moles de GN pèsent:

$$C = 100 \cdot M_{GN} = 1890,664 \text{ gr}$$

$$(C/A)_{st} = \frac{1890,664}{28840,0602} = 0,06555$$

$$f_s = (C/A)_{st} = 0,06555$$

III.2. $(C/A)_{st}$ du GNL:

III.2.1 Masse molaire du GNL

Nous partons du pourcentage en masse estimé suivant :

80 % de Méthane (CH_4)

13,6 % " Ethane (C_2H_6)

6,4 % " Propane (C_3H_8)

Ceci nous donne la composition molaire suivante:

89,301 % de Méthane (CH_4)

8,100 % de Ethane (C_2H_6)

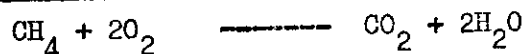
2,599 % de Propane (C_3H_8)

100 moles de GNL contiennent donc:

| | | |
|---------------------------------------|------------|---|
| 89,301 moles de Méthane (CH_4) | qui pèsent | $89,301 \cdot 16,042 = 1432,5666$ gr |
| 8,100 " " Ethane (C_2H_6) | " " | $8,100 \cdot 30,068 = 243,5508$ " |
| <u>2,599</u> " " Propane (C_3H_8) | " " | $2,599 \cdot 44,094 = \underline{114,6003}$ " |
| = 100 | | = 1790,7177 gr |

$$M_{GNL} = 17,907177 \text{ Kg/Kmole}$$

III.2.2-Réactions chimiques:



III.2.3 Calcul de la masse d'air :

Pour 89,301 moles de CH_4 il faut $2.89,301 = 178,602$ moles d' O_2

" 8,100 " " C_2H_6 " " $\frac{7}{2} \cdot 8,100 = 28,350$ " "

" 2,599 " " C_3H_8 " " $5.2,599 = 12,995$ " "

La quantité d'oxygène nécessaire à la combustion de 100 moles de GNL est

$$178,602 + 28,350 + 12,995 = 219,947 \text{ moles d}'\text{O}_2$$

La quantité de N_2 est : $219,947 \cdot 3,76$ moles de N_2

La masse d'air est de:

$$219,947 \cdot 32 + 3,76 \cdot 219,947 \cdot 28,016 = 7038,304 + 23169,252 = 30207,256 \text{ Gr}$$

Pour 100 moles de GNL il faut une masse d'air de:

$$\underline{A = 30207,256 \text{ gr}}$$

2.4 - $(C/A)_{st}$ du GNL:

100 moles de GNL pèsent:

$$C = 100 \cdot M_{\text{GNL}} = 1790,7177 \text{ gr}$$

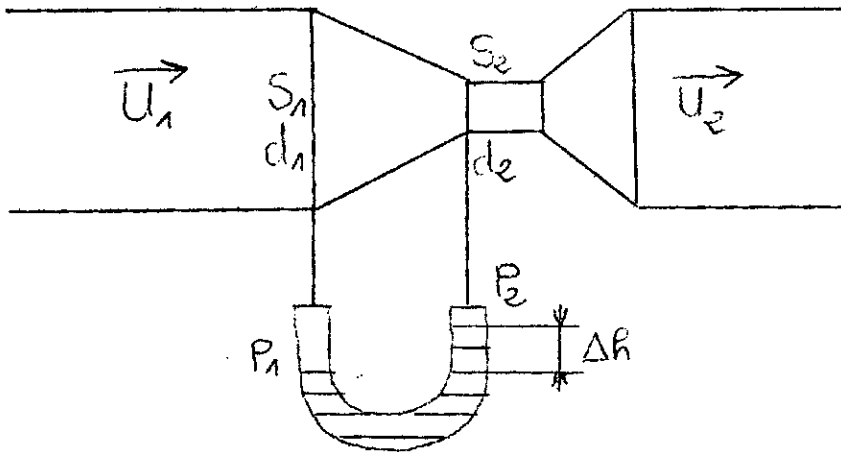
$$(C/A)_{st} = \frac{1790,7177}{30207,256} = 0,05928$$

$$\boxed{f_s = (C/A)_{st} = 0,05928}$$

ANNEXE 3

CALCUL DU DEBIT D'AIR

La méthode utilisée est celle du tube de Venturi (Schéma ci dessous)



On suppose l'air incompressible ($\rho = \text{constante}$)

Equation de continuité:

$$U_1 S_1 = U_2 S_2 \quad (1)$$

Equation de Bernoulli :

$$\frac{P_1}{\rho_{\text{air}}} + \frac{U_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho_{\text{air}}} + \frac{U_2^2}{2} \quad (2)$$

En plaçant (1) dans (2)

$$U_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_{\text{air}} \left[1 - \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right]}}$$

Débit massique /

$$\dot{m}_{th} = \rho_{\text{air}} S_2 U_2$$

Données:

$$\begin{aligned} d_1 &= 0,320\text{m} & d_2 &= 0,16 \text{ m} \\ S_1 &= 0,08024 \text{ m}^2 & S_2 &= 0,0201 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\rho_e = 10^3 \text{ Kg/m}^3$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Pour un mano à eau : } P_1 - P_2 = \rho_e g \Delta h$$

$$\dot{m}_{th} = S_2 \sqrt{\frac{2 \rho_{air} (P_1 - P_2)}{1 - (S_2/S_1)^2}}$$

En pratique le débit mesuré est inférieur au débit lu du fait d'une répartition des vitesses non uniforme. Pour tenir compte de cette anomalie on introduit un coefficient de contraction K.

$$\text{Et } A = \dot{m}_r = \dot{m}_{th} \cdot K$$

K dépend de S_1/S_2 et de $Re = U_2 D_2 / \nu$

Pour ce genre de venturi, $K = 0,96$ à $0,98$

Soit en prenant $K = 0,97$

$$A = 0,97 S_2 \sqrt{\frac{2 \rho_{eau} g \Delta h \rho_{air}}{1 - (S_2/S_1)^2}}$$

D'ou avec les données précédentes, en calculant les opérations sur les termes constants.

$$A = 89,24 \sqrt{\rho_{air} \Delta H}$$

A en g/s

ρ_{air} en Kg/m^3

ΔH en mm d' H_2O

en. S.I.

$$A = 0,002822 \sqrt{\rho_{\text{air}} \Delta H}$$

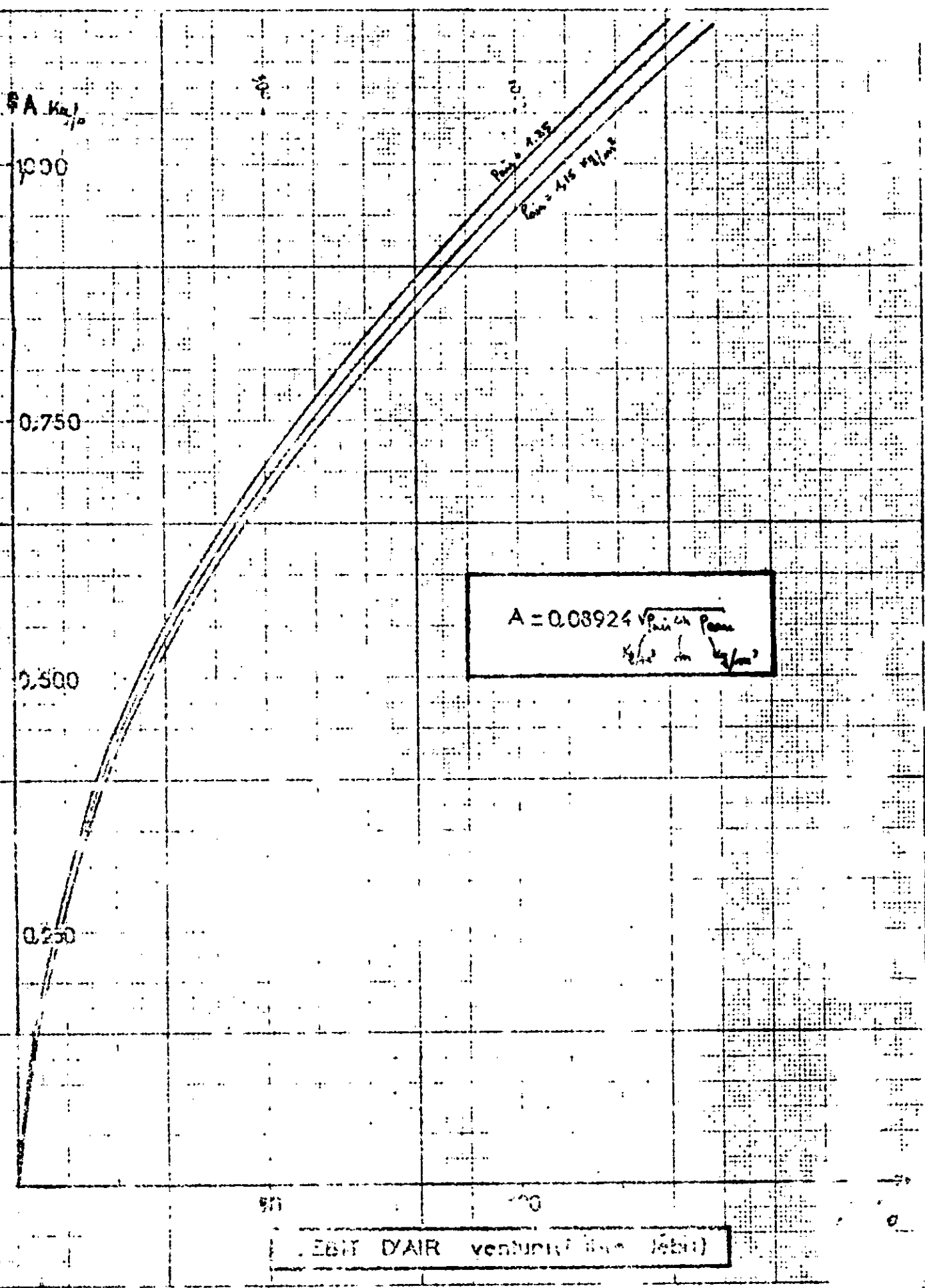
A en Kg/s

ρ_{air} en Kg/m³

ΔH en m d'H₂O

On a établit des courbes du débit A (Kg/s) en fonction de ΔH (mm H₂O)
et ceci pour différentes valeurs de ρ_{air} .

On distinguera deux courbes , l'une pour des faibles et l'autre
pour des débits élevées .



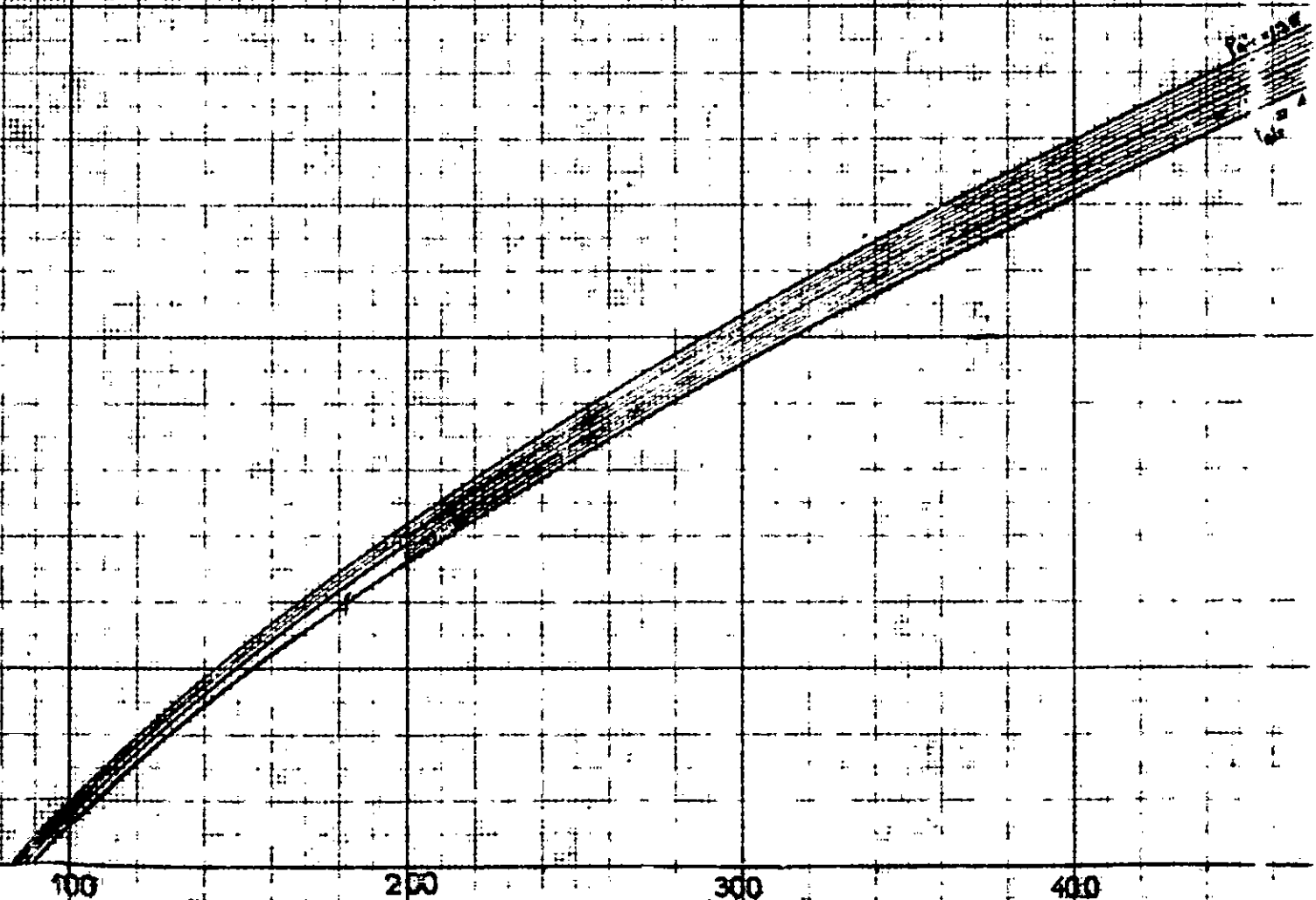
LEBIT D'AIR venturi (line tabel)

A kg/a

2500

$$Q_m = A = 0,08924 \sqrt{\frac{P_{air} \Delta h}{\rho_{air}}} \quad \frac{kg}{m^3} \quad m \quad \frac{kg}{m^3}$$

2500
2000
1500
1000
0



DEBIT D'AIR venturi

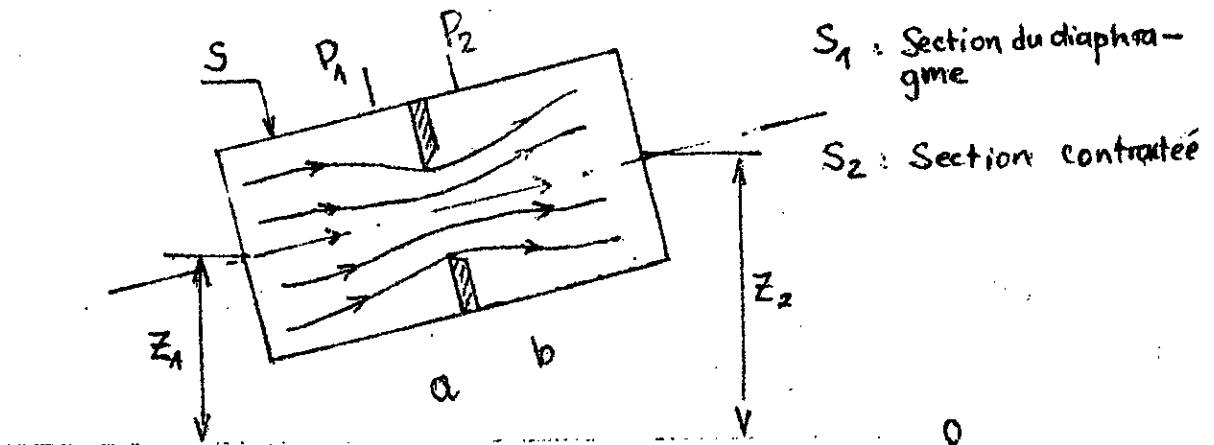
2200
2000

Débit de gaz dans la chambre de combustion : (C2)

a) fluide incompressible :

En supposant un fluide parfait sécoulant dans une conduite dans laquelle est intercalé un diaphragme. On néglige les frottements du fluide sur les parois.

Considérons les mesures de pressions entre les sections a et b



L'Equation de BERNOULLI appliquée entre a et b s'écrit :

$$Z_1 \cdot g + \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = Z_2 \cdot g + \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2}$$

Z_1 et Z_2 : Altitude des axes des deux sections considérées.

P_1 et P_2 : Pressions statiques.

V_1 et V_2 : Vitesses aux sections droites.

ρ : Masse volumique du fluide.

La différence d'Altitude peut être négligée

$(z_2 - z_1)$ faible.

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho (V_2^2 - V_1^2)}{2}$$

Dont le second membre représente la pression différentielle dynamique.

$$\text{or : } S \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2 \Rightarrow V_1 = \frac{S_2}{S} \cdot V_2$$

$$\text{on a : } \frac{S_2}{S} = \frac{S_2}{S_1} \cdot \frac{S_1}{S} \quad \text{on pose } m = \frac{S_1}{S} \quad \text{Coefficient d'ouverture}$$

$$\text{et } \frac{S_2}{S} = \mu \cdot m \quad \text{et } V_1 = m \cdot \mu \cdot V_2$$

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} (1 - m^2 \mu^2) V_2^2$$

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2 \mu^2}} \cdot \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

Or le débit volume est :

$$Q_v = S_2 V_2 = S_1 V_2 \cdot \mu$$

$$Q_v = \frac{\mu}{\sqrt{1 - m^2 \mu^2}} \cdot S_1 \cdot \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

On pose $\Delta P = P_1 - P_2$

Du fait qu'il y ait des frottements et que dans la section, la vitesse varie, on prend un coefficient ζ .

$$Q_v = \frac{\zeta \cdot U}{\sqrt{1 - m^2 U^2}} S_1 \sqrt{\frac{2 (\Delta P)'}{P}}$$

On pose: $\alpha = \frac{\zeta \cdot U}{\sqrt{1 - m^2 U^2}}$ (coefficient d'écoulement de débit)

Le débit masse sera $Q_v = \alpha \cdot S_1 \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta P'}{P}} = C_2$

α est déterminé expérimentalement puisqu'il tient compte de plusieurs facteurs : (vitesse, frottement.....)

Si on considère que la section contractée est égale à la section du diaphragme, on aura :

$$\frac{S_2}{S_1} = U = 1$$

Si nous négligeons les frottements et l'irrégularité de la vitesse dans la section, il vient :

$$Q_m = C_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} S_1 \sqrt{2 \rho_{\text{gaz}} \Delta P'}$$

En réalité cette formule n'est pas correcte et pour la rétablir, on introduit un coefficient C qui tient compte de toutes les hypothèses.

Donc en rétablissant les corrections :

$$Q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - m^2}} S_1 \sqrt{2 \rho_{\text{gaz}} \Delta P'}$$

C : coefficient de perte de charge.

Si le fluide est compressible (gaz, vapeur), on introduit (ϵ) un coefficient de compressibilité : ce qui est le cas puisqu'on a du gaz. (voir courbe de compressibilité)

$$C = \alpha \sqrt{1 - m^2}$$

$$\alpha = \frac{C}{\sqrt{1 - m^2}}$$

$$Q_m = \epsilon \cdot \alpha \cdot S_1 \sqrt{2 \Delta P' \rho}$$

(kg/s) (m²) (Pa) (kg/m³)

En S.I. $\Delta p = \rho_{\text{eau}} \cdot g \cdot \Delta h$ (en utilisant un manomètre à eau)

$$Q_m = \epsilon \cdot \alpha \cdot S_1 \sqrt{2g} \sqrt{\rho_{\text{eau}} \Delta h \rho_{\text{gaz}}}$$

$$Q_m = \varepsilon \alpha d_1^2 \sqrt{\frac{2g \pi^2}{16}} \sqrt{p_{\text{eau}} \Delta h p_{\text{gaz}}}$$

$$Q_m = 3,4788 d_1^2 \alpha \varepsilon \sqrt{p_{\text{eau}} \Delta h p_{\text{gaz}}}$$

1) Chambre de combustion

$$d = 20 \text{ mm}$$

$$d_1 = 13 \text{ mm}$$

$$\alpha = 0,69$$

$$m = 0,42$$

$$Q_m = 4,057 \cdot 10^{-4} \varepsilon \sqrt{p_{\text{eau}} \Delta h p_{\text{gaz}}}$$

2) Chambre de préchauffage

$$d = 20 \text{ mm}$$

$$d_1 = 8 \text{ mm}$$

$$m = 0,16 \quad \alpha = 0,628$$

$$Q_m = 1,398 \cdot 10^{-4} \varepsilon \sqrt{p_{\text{eau}} \Delta h p_{\text{gaz}}}$$

Remarque:

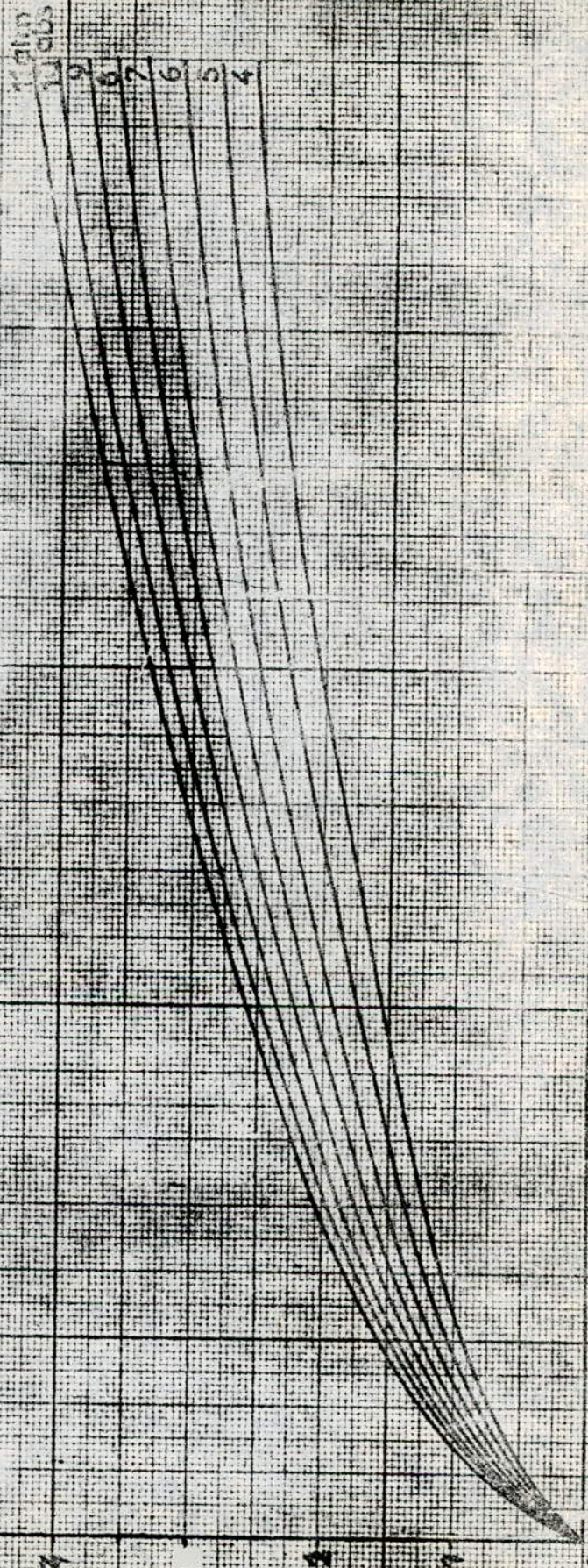
Précédemment, on a établi des courbes $Q_m (\text{kg/s}) = f(\Delta H_{\text{mmH}_2\text{O}})$ pour des valeurs de pressions absolues allant de 4 atm à 11 atm. On distinguera deux séries de courbes:

- faible débit
- débit élevé.

on a aussi des courbes représentant le coefficient de compressibilité (ε) en fonction de la pression absolue et enfin la variation du coefficient d'écoulement (α) en fonction de m ou de $m d$ pour les diaphragmes.

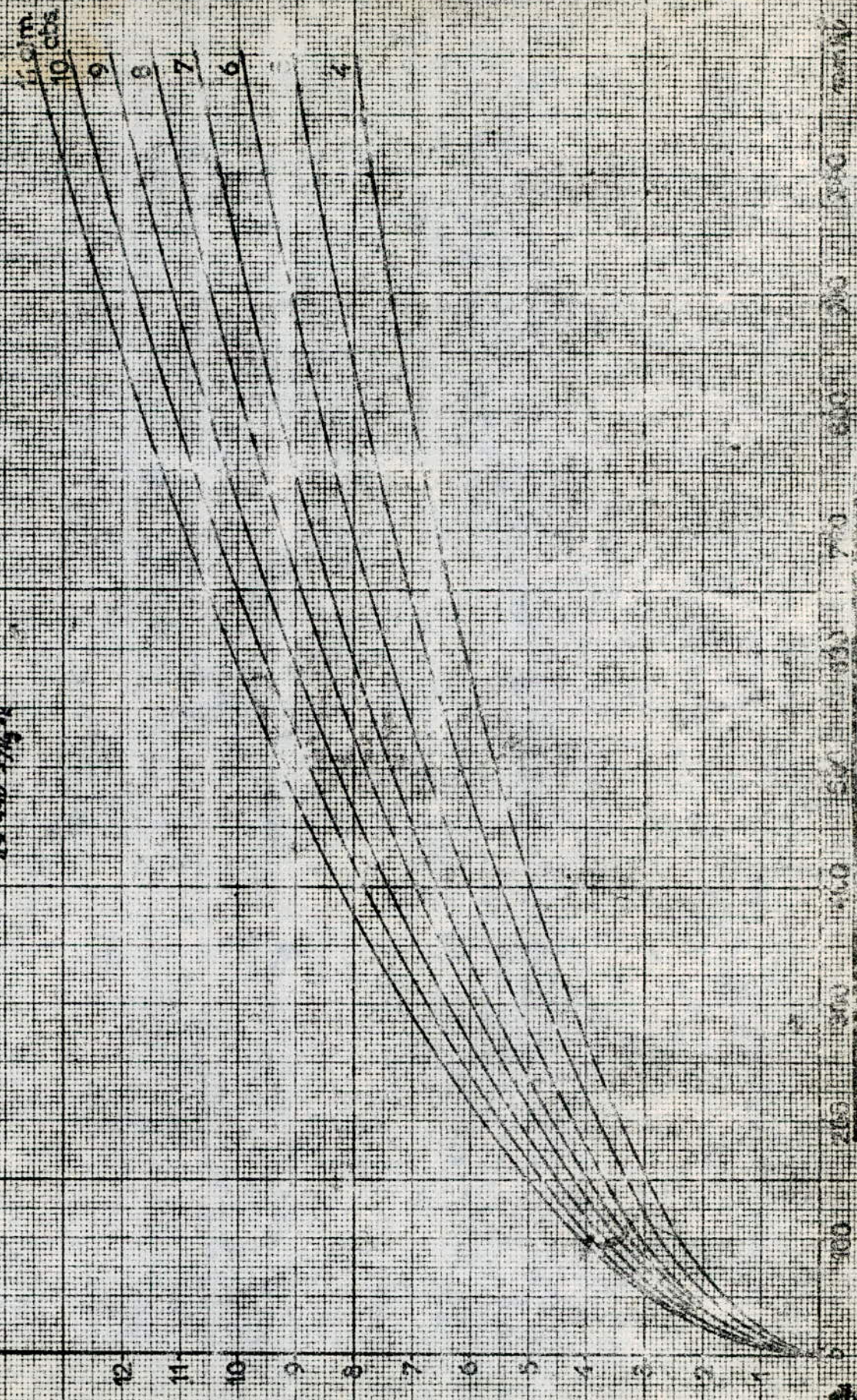
$$Q_{nr} = 1,398 \cdot 10^{-4} \cdot E \sqrt{\frac{2h}{\rho_{\text{max}}}} \cdot \frac{5/2 \pi}{4h^2}$$

$\alpha = 0,686$ $m = 0,14$ $T = 2920K$
 $\xi = 1$ $n = 440 \text{ J/kg}^\circ K$



$Q_{IT} = 1,398 \times 10^{-4} E \sqrt{V_{\text{eau}} \Delta h \rho_{\text{eau}}}$
 $\alpha = 0,28 \quad m = 0,16 \quad T = 292 \text{ OK}$
0,9862
 $n = 9,240 \text{ F} / \text{kg} \cdot \text{m}^2$

Q %



10 cm
 10 cts

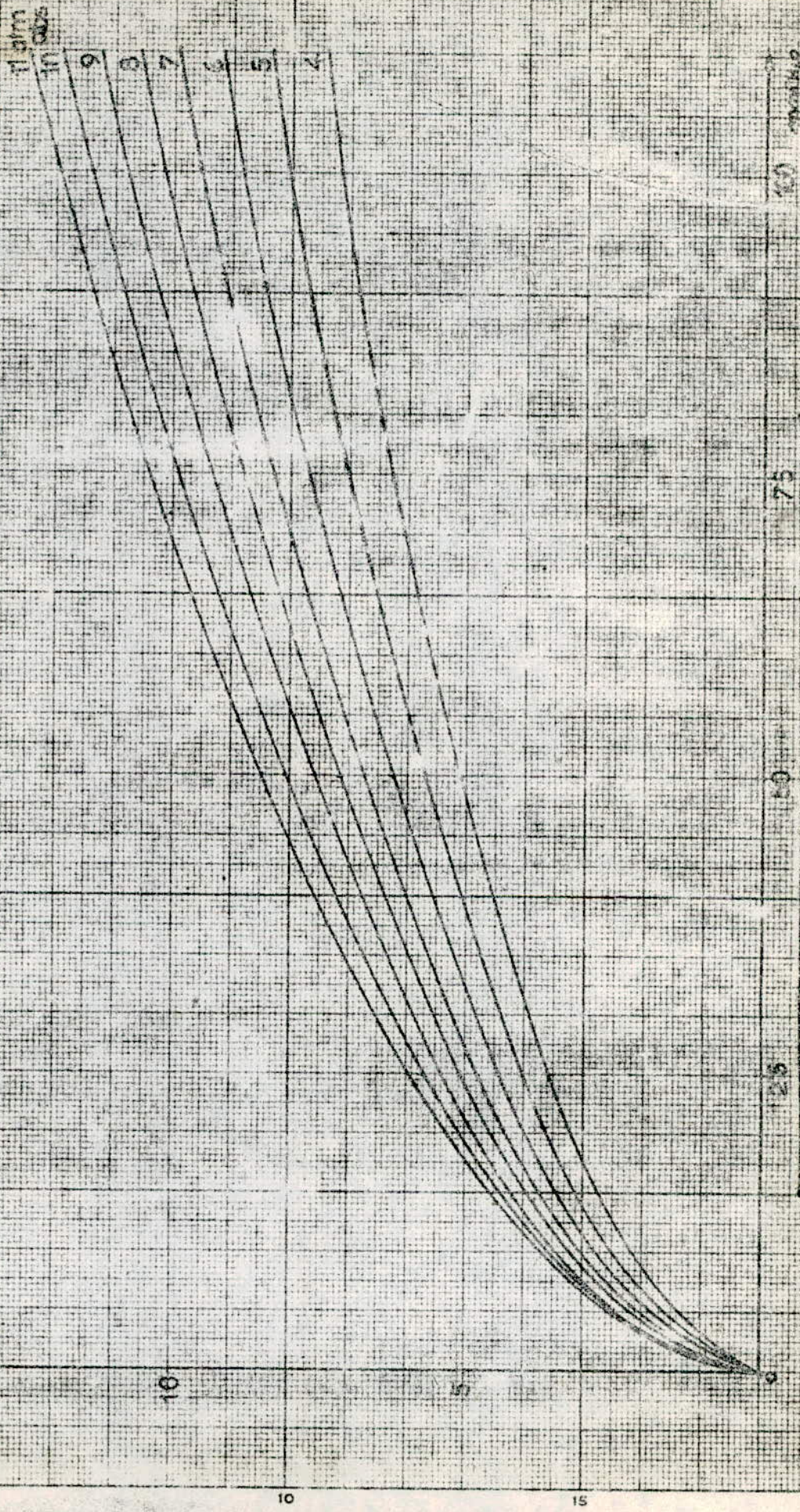
100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000

COURBES DE DEBIT - Chambre de prechambrage

$$Q = 4,056 \cdot 10^{-4} \cdot E \sqrt{\frac{P_{max} \cdot P_{atm}}{m \cdot \rho_{atm} \cdot T}}$$

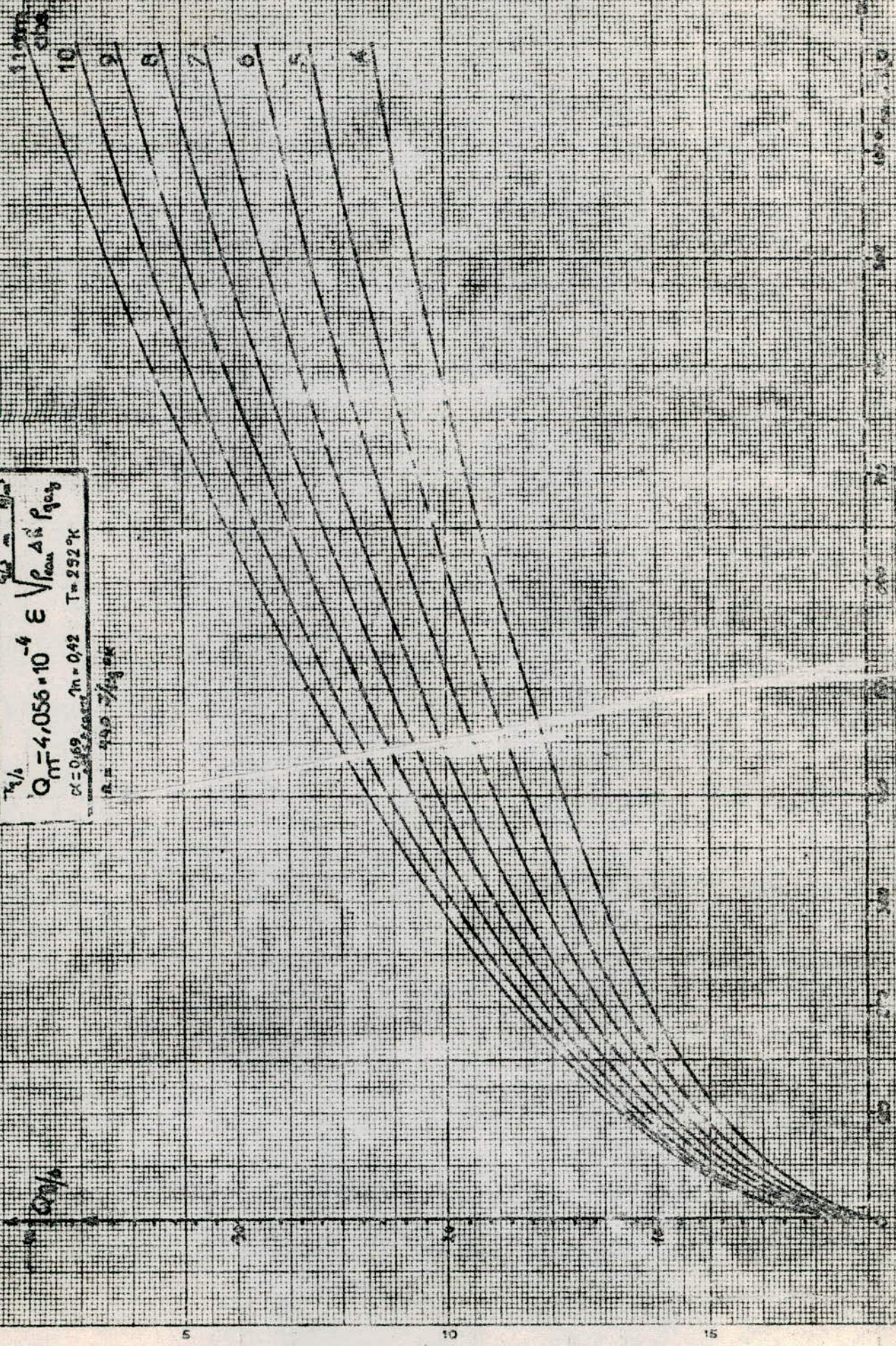
$\frac{kg/s}{kg/s}$
 $d = 0,69$ $m = 0,42$ $E = 1$ $T = 292 K$

$Q = \frac{kg/s}{kg/s}$

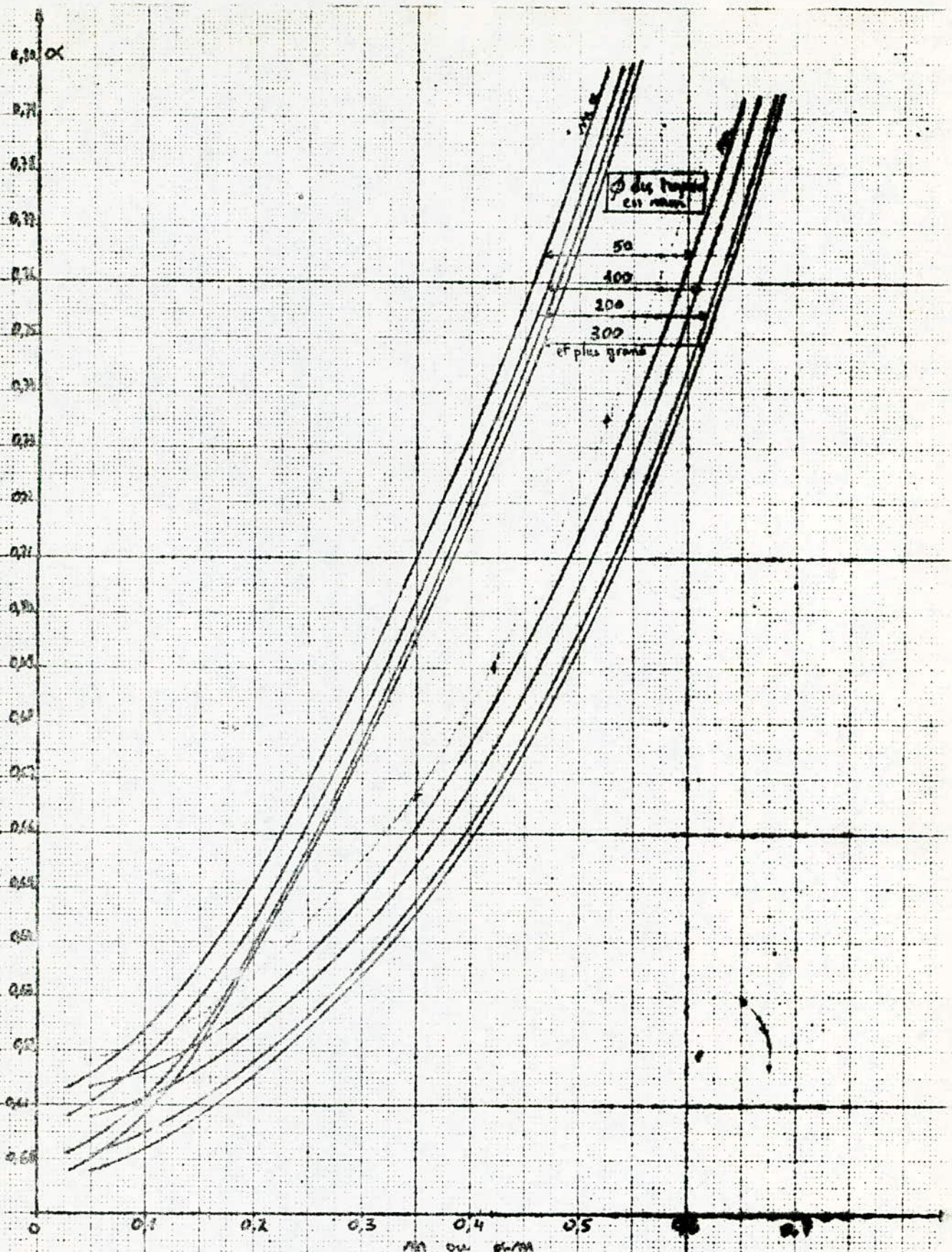


COURBES DE FAIBLES DEBITS Chambre de combustion

$Q_{HT} = 4,056 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{P_{\text{comb}} \Delta R} \cdot P_{\text{atm}} \cdot g_{\text{atm}}$
 $\alpha = 0,69$
 $n = 0,92$
 $T = 292^\circ K$
 $\rho = 999 \text{ kg/m}^3$



COURBES DE DEBIT CHAMBRE DE COMBUSTION



Coefficient d'écoulement α en fonction de d en mm pour les diaphragmes

Formulaire des calculs
de rendement.

1- Rendement déduit du bilan thermique

$$\eta_h = \frac{h_2 - h_1}{h_b - h_1}$$

2- Rendement déduit de la richesse équivalente

$$\eta_\phi = \frac{\phi_0}{\phi_1}$$

3- Efficacité thermique

$$\eta_T = \frac{T_2 - T_1}{T_b - T_1}$$

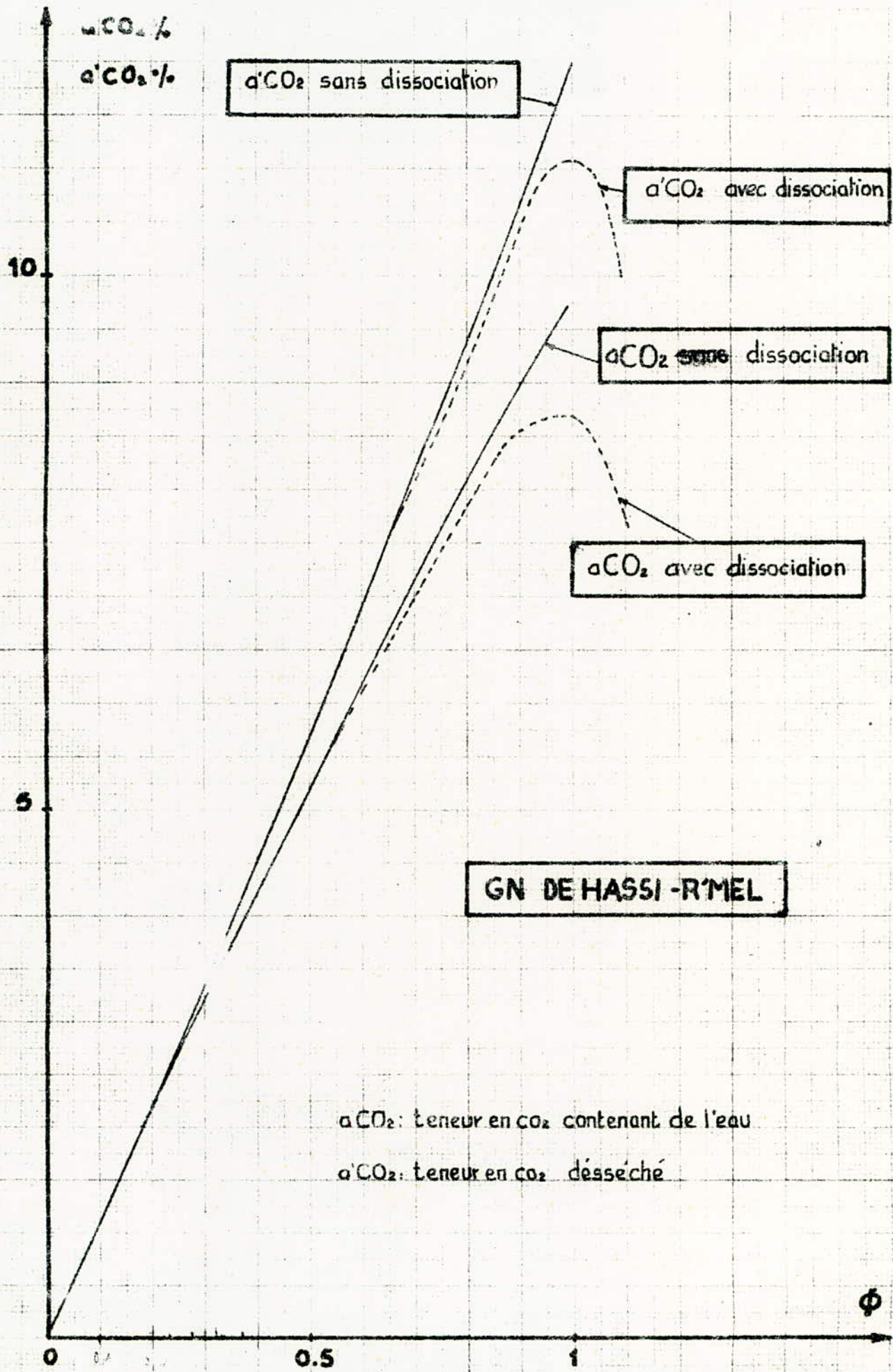
4- Indice de qualité de combustion

$$\eta_{a'CO_2} = \frac{a'CO_2 \text{ réelle}}{a'CO_2 \text{ théorique}}$$

| Expérience 2 | | | | | | Expérience 3 | | | | | |
|------------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ϕ' | 0,08 | 0,09 | 0,095 | 0,11 | 0,135 | ϕ' | 0,16 | 0,145 | 0,26 | 0,14 | 0,095 |
| T_1 °K | 323 | 323 | 323 | 323 | 323 | T_1 | 323 | 323 | 323 | 323 | 323 |
| h_1 $\frac{K}{kg \cdot s}$ | 80 | 45 | 40 | -15 | -80 | h_1 | -160 | -325 | -470 | -100 | 30 |
| $T_2 = T_{bi}$ | 533 | 563 | 583 | 613 | 673 | $T_2 = T_{bi}$ | 753 | 863 | 953 | 713 | 583 |
| h_2 | 320 | 300 | 300 | 307 | 290 | h_2 | 380 | 285 | 275 | 330 | 315 |
| T_b | 555 | 580 | 590 | 630 | 690 | T_b | 750 | 820 | 985 | 700 | 590 |
| h_b | 314 | 314 | 314 | 309 | 304 | h_b | 299 | 289 | 279 | 299 | 310 |
| ϕ_0 | 0,022 | 0,079 | 0,0795 | 0,112 | 0,131 | ϕ_0 | 0,167 | 0,202 | 0,217 | 0,147 | 0,097 |
| η_h | 1,030 | 0,950 | 0,948 | 0,993 | 0,963 | η_h | 1,176 | 0,993 | 0,994 | 1,088 | 1,021 |
| η_T | 0,910 | 0,930 | 0,970 | 0,940 | 0,950 | η_T | 1,007 | 0,917 | 0,951 | 1,034 | 0,973 |
| η_ϕ | 1,062 | 0,883 | 0,942 | 1,018 | 0,970 | η_ϕ | 1,013 | 0,939 | 0,950 | 1,050 | 1,020 |
| $\eta_{a'\omega_2}$ | 0,945 | 0,952 | 0,913 | 0,923 | 0,937 | $\eta_{a'\omega_2}$ | 0,994 | 0,957 | 0,920 | 0,986 | 1 |

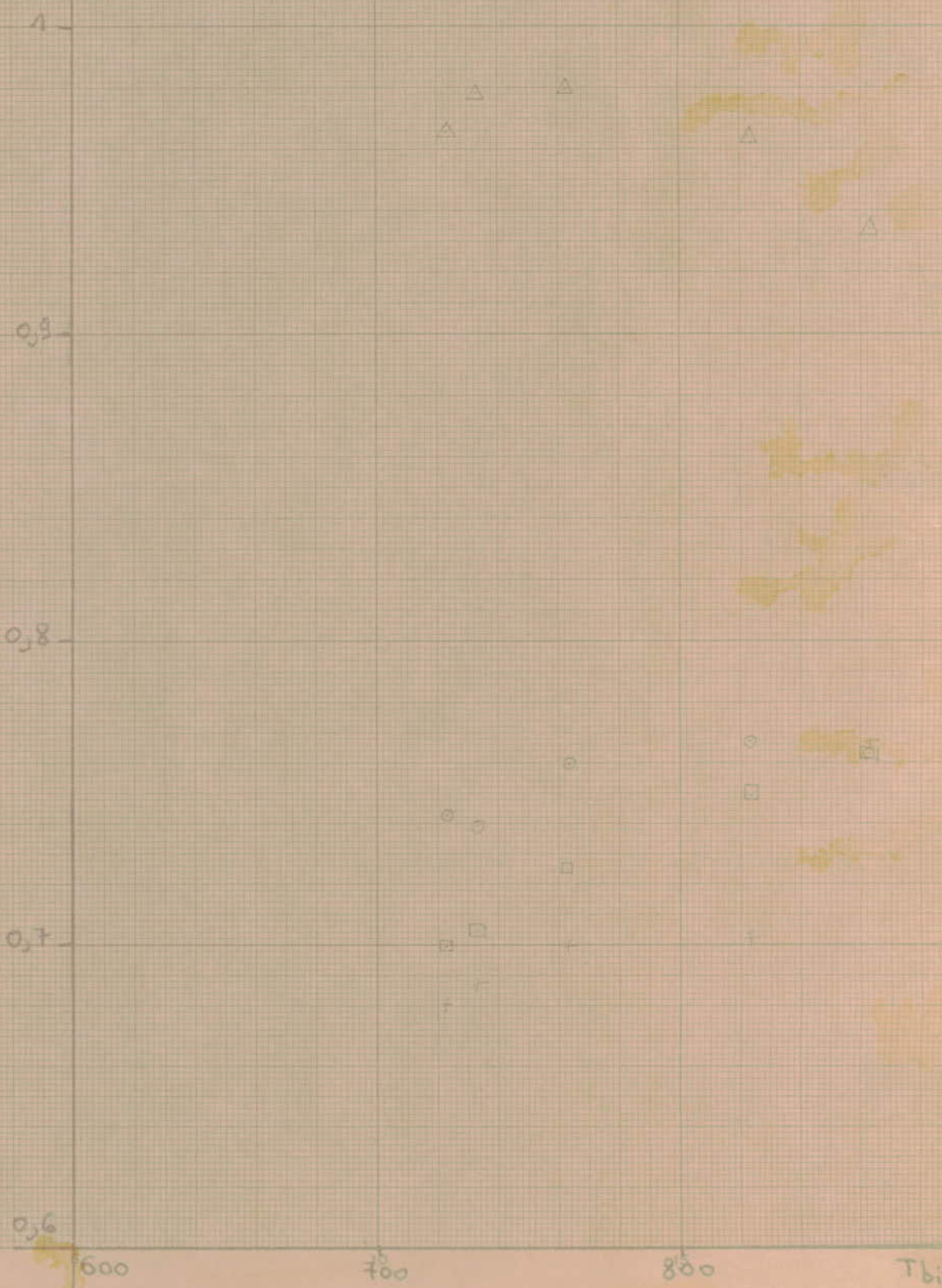
| Experience 4 | | | | | | Experience 5 | | | | | |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ϕ' | 0,225 | 0,280 | 0,245 | 0,200 | 0,15 | ϕ' | 0,182 | 0,215 | 0,175 | 0,105 | 0,210 |
| T_1 °K | 323 | 323 | 323 | 323 | 323 | T_1 | 323 | 323 | 323 | 323 | 323 |
| h_1 $\frac{kJ}{kg^{air}}$ | -350 | -530 | -420 | -285 | -130 | h_1 | -215 | -325 | -515 | -295 | -355 |
| $T_2 = T_{bi}$ | 893 | 1013 | 953 | 843 | 713 | $T_2 = T_{bi}$ | 783 | 853 | 973 | 833 | 913 |
| h_2 | 260 | 260 | 290 | 280,5 | 285 | h_2 | 290 | 265 | 225 | 265 | 255 |
| T_b | 900 | 1030 | 950 | 850 | 730 | T_b | 800 | 880 | 1020 | 855 | 940 |
| h_b | 289 | 274 | 279 | 289 | 299 | h_b | 294 | 289 | 274 | 279 | 284 |
| ϕ_0 | 0,220 | 0,274 | 0,247 | 0,202 | 0,147 | ϕ_0 | 0,179 | 0,202 | 0,217 | 0,197 | 0,227 |
| η_h | 0,974 | 0,982 | 1,025 | 0,986 | 0,967 | η_h | 0,932 | 0,961 | 0,937 | 0,975 | 0,917 |
| η_T | 0,987 | 0,971 | 1,004 | 0,986 | 0,958 | η_T | 0,964 | 0,951 | 0,932 | 0,958 | 0,956 |
| η_ϕ | 0,912 | 0,982 | 1,007 | 1,010 | 0,983 | η_ϕ | 0,939 | 0,934 | 0,960 | 0,983 | 0,945 |
| $\eta_{a'CO_2}$ | 0,979 | 0,984 | 0,981 | 0,986 | 0,987 | $\eta_{a'CO_2}$ | 0,971 | 0,949 | 0,986 | 0,977 | 0,992 |

| Experience 8 | | | | | | Experience 9 | | | | | |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ϕ' | 0,240 | 0,230 | 0,200 | 0,130 | 0,170 | ϕ' | 0,3 | 0,26 | 0,225 | 0,255 | 0,21 |
| T_1 °K | 323 | 323 | 323 | 323 | 323 | T_1 | 323 | 323 | 323 | 323 | 323 |
| $T_2 = T_{bi}$ | 963 | 873 | 773 | 703 | 1023 | h_1 | -584 | -460 | -352 | -442 | -307 |
| h_1 $\frac{m^2}{kg \cdot s}$ | -395 | -365 | -277 | -65 | -490 | $T_2 = T_{bi}$ | 1073 | 1053 | 873 | 933 | 833 |
| h_2 | 300 | 220 | 205 | 338 | 300 | h_2 | 267 | 375 | 238 | 220 | 242 |
| T_b | 940 | 915 | 850 | 675 | 1005 | T_b | 1080 | 990 | 910 | 980 | 1010 |
| h_b | 284 | 286 | 274 | 304 | 278 | h_b | 272 | 279 | 287 | 280 | 289 |
| ϕ_0 | 0,245 | 0,107 | 0,174 | 0,142 | 0,279 | ϕ_0 | 0,299 | 0,295 | 0,208 | 0,233 | 0,193 |
| m_R | 1,023 | 0,898 | 0,874 | 1,092 | 1,028 | m_R | 0,994 | 1,129 | 0,923 | 0,916 | 0,994 |
| m_T | 1,037 | 0,929 | 0,853 | 1,079 | 1,026 | m_T | 0,990 | 1,094 | 0,937 | 0,928 | 0,932 |
| m_ϕ | 1,020 | 0,900 | 0,810 | 1,092 | 1,033 | m_ϕ | 0,996 | 1,134 | 0,924 | 0,913 | 0,919 |
| $m_a' \omega_2$ | 0,98 | 0,862 | 0,792 | 0,944 | 0,983 | $m_a' \omega_2$ | 0,936 | 0,926 | 0,957 | 0,962 | 0,955 |



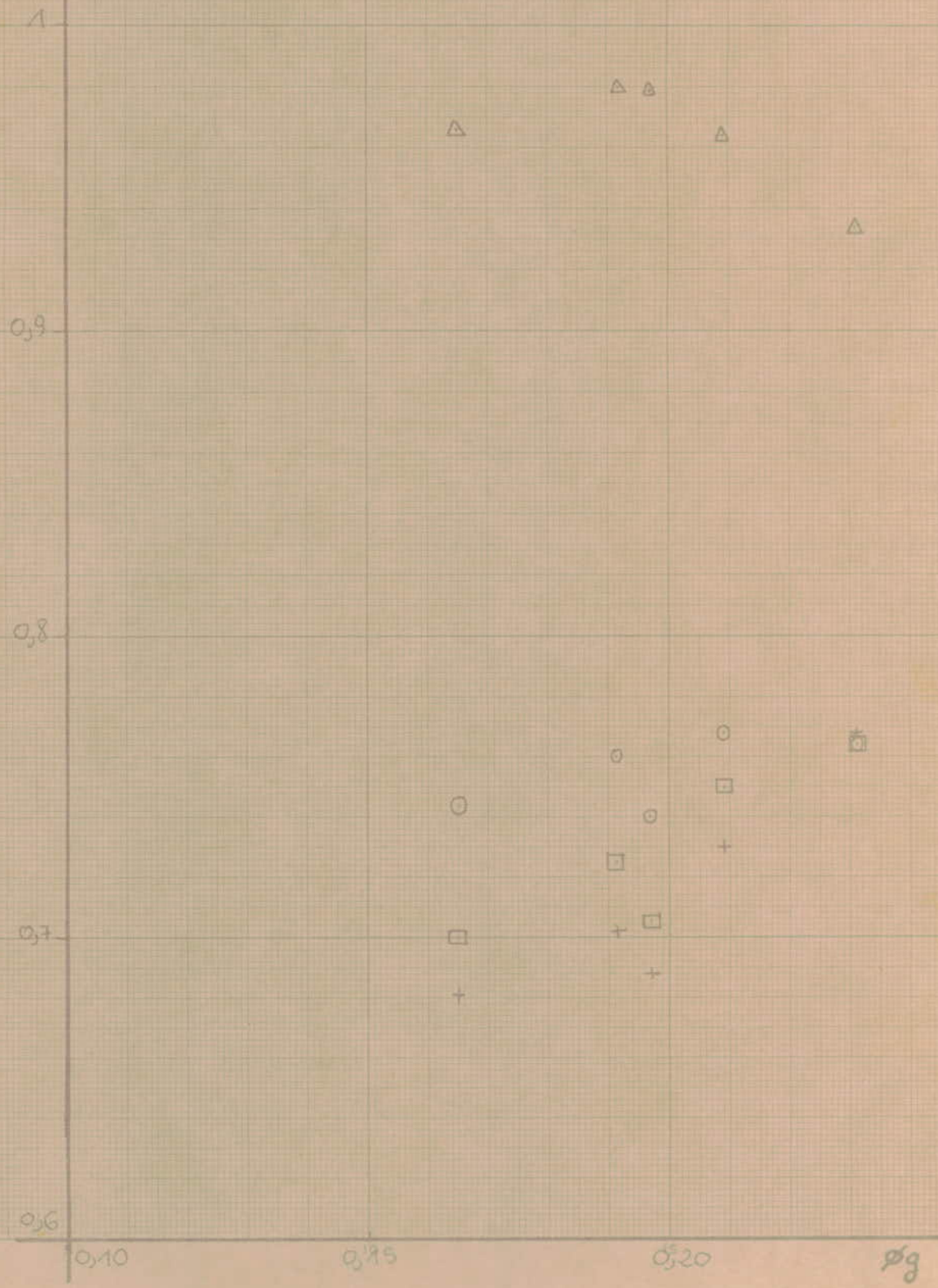
$$\eta = f(T_{bi})$$

| | | |
|--------------------|-------------|-------------|
| EXP 1 | \triangle | $m_{a'coz}$ |
| $\eta = f(T_{bi})$ | \square | m_T |
| | \circ | m_h |
| | $+$ | m_ϕ |



EXPA
 $M = f(\phi_g)$

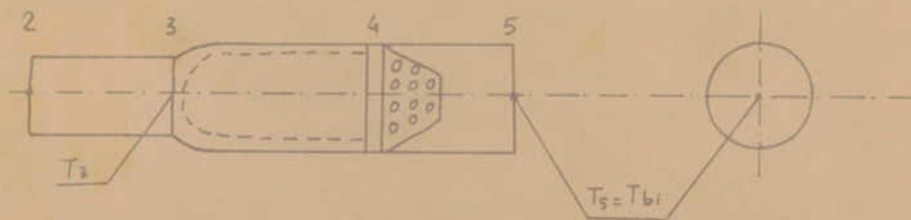
Δ $M_a'(\alpha_1)$
 \circ M_b'
 $+$ M_c'
 \square M_T



ESSAI AU G.N. PRECHAUFFE SEULE AVEC PANIER

EXP. 2

Mesures faites par Boughouas - Boumoza - Taïvi J. 75

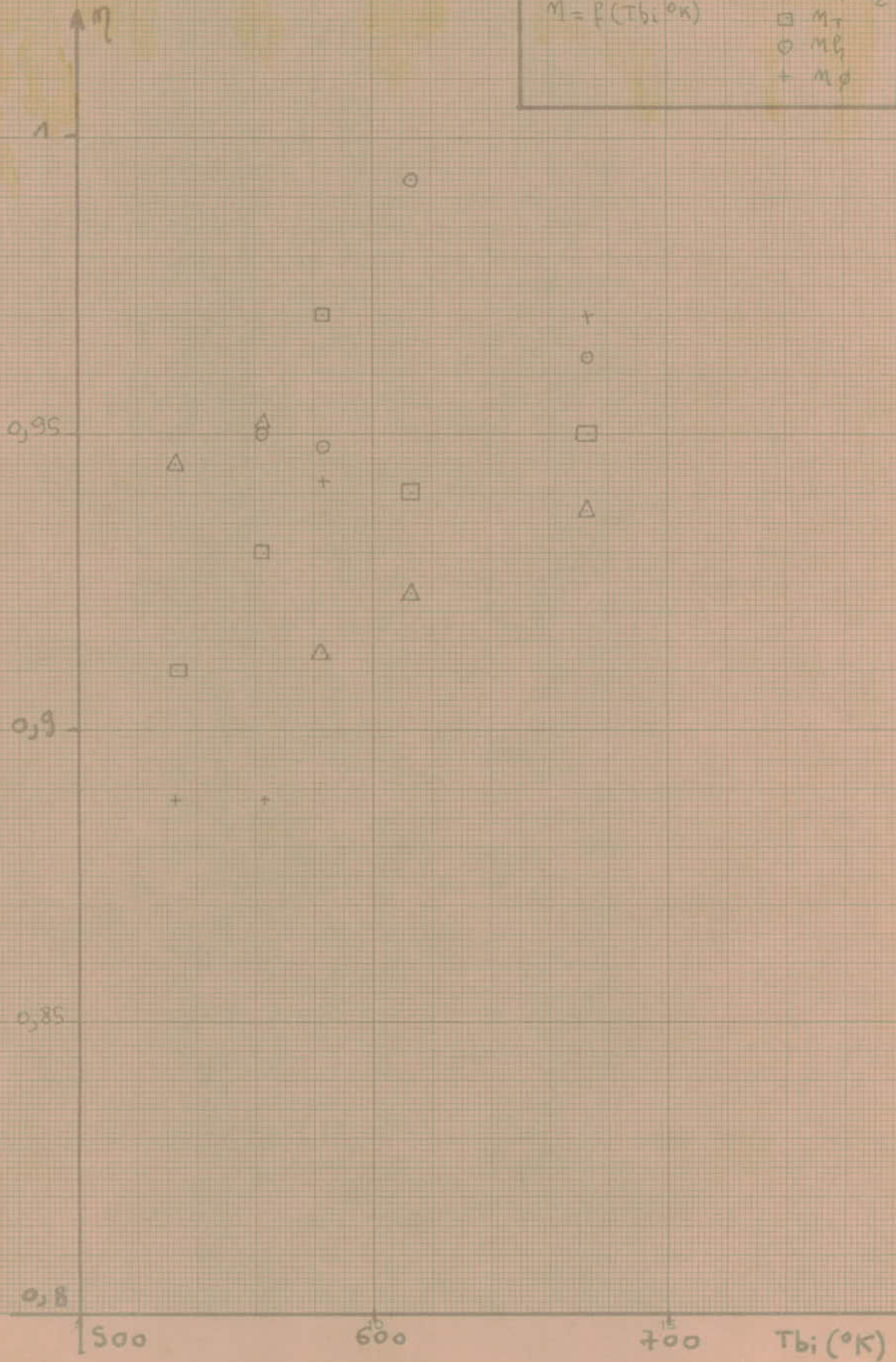


$P_A = 746 \text{ mm Hg}$
 $T_A = 291 \text{ }^\circ\text{K}$
 $\rho_A = 1,19 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
 $\left(\frac{C}{A}\right)_{\text{nt}} = 0,0655$

| Essai N ^o Mesures | Indicat. | Unité | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------------------------------|---------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---|---|
| Venturi | ΔH | mm H ₂ O | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | | |
| débit d'air | A | g/s | 424,46 | 424,46 | 424,46 | 424,46 | 424,46 | | |
| Pression Amont C.P. de G.N | P_{acp} | bar Abs. | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | | |
| t° GN | T_{GN} | $^\circ\text{K}$ | 292 | 292 | 292 | 292 | 292 | | |
| masse. vol. G.N. | ρ_{GN} | kg/m ³ | 6,70 | 6,70 | 6,70 | 6,70 | 6,70 | | |
| débit G.N. | C_1 | g/s | 2,25 | 2,56 | 2,77 | 3,26 | 3,81 | | |
| Riches. globale | ϕ_g | / | 0,081 | 0,092 | 0,099 | 0,117 | 0,137 | | |
| t° sortie P.C. | T_3 | $^\circ\text{K}$ | 623 | 673 | 723 | 773 | 873 | | |
| t° après panier | $T_{\text{bi}} = T_5$ | $^\circ\text{K}$ | 533 | 563 | 583 | 613 | 673 | | |
| t° entrée | T_e | $^\circ\text{K}$ | 323 | 323 | 323 | 323 | 323 | | |
| a'co ₂ réelle | a'_{CO_2r} | % | 0,87 | 1,00 | 1,05 | 1,20 | 1,50 | | |
| a'co ₂ théor. | a'_{CO_2t} | % | 0,92 | 1,05 | 1,15 | 1,30 | 1,60 | | |
| CO | CO | % | 0,025 | 0,035 | 0,040 | 0,045 | 0,055 | | |
| O ₂ | O ₂ | % | 19,00 | 19,00 | 18,75 | 18,75 | 18,00 | | |
| Riches. locale | $\phi_l = \phi'$ | / | 0,08 | 0,090 | 0,095 | 0,110 | 0,135 | | |
| $\phi_l \rightarrow T_b$ | T_{ba} | $^\circ\text{K}$ | 555 | 580 | 590 | 630 | 690 | | |
| η a'co ₂ | $\eta_{a'_{\text{CO}_2}}$ | / | 0,945 | 0,952 | 0,913 | 0,923 | 0,937 | | |
| η_h | η_h | / | 1,030 | 0,950 | 0,948 | 0,993 | 0,963 | | |
| η_T | η_T | / | 0,910 | 0,930 | 0,970 | 0,940 | 0,950 | | |
| η_ϕ | η_ϕ | / | 1,062 | 0,983 | 0,942 | 1,018 | 0,997 | | |

EXP 2
 $\eta = f(T_{bi} \text{ } ^\circ\text{K})$

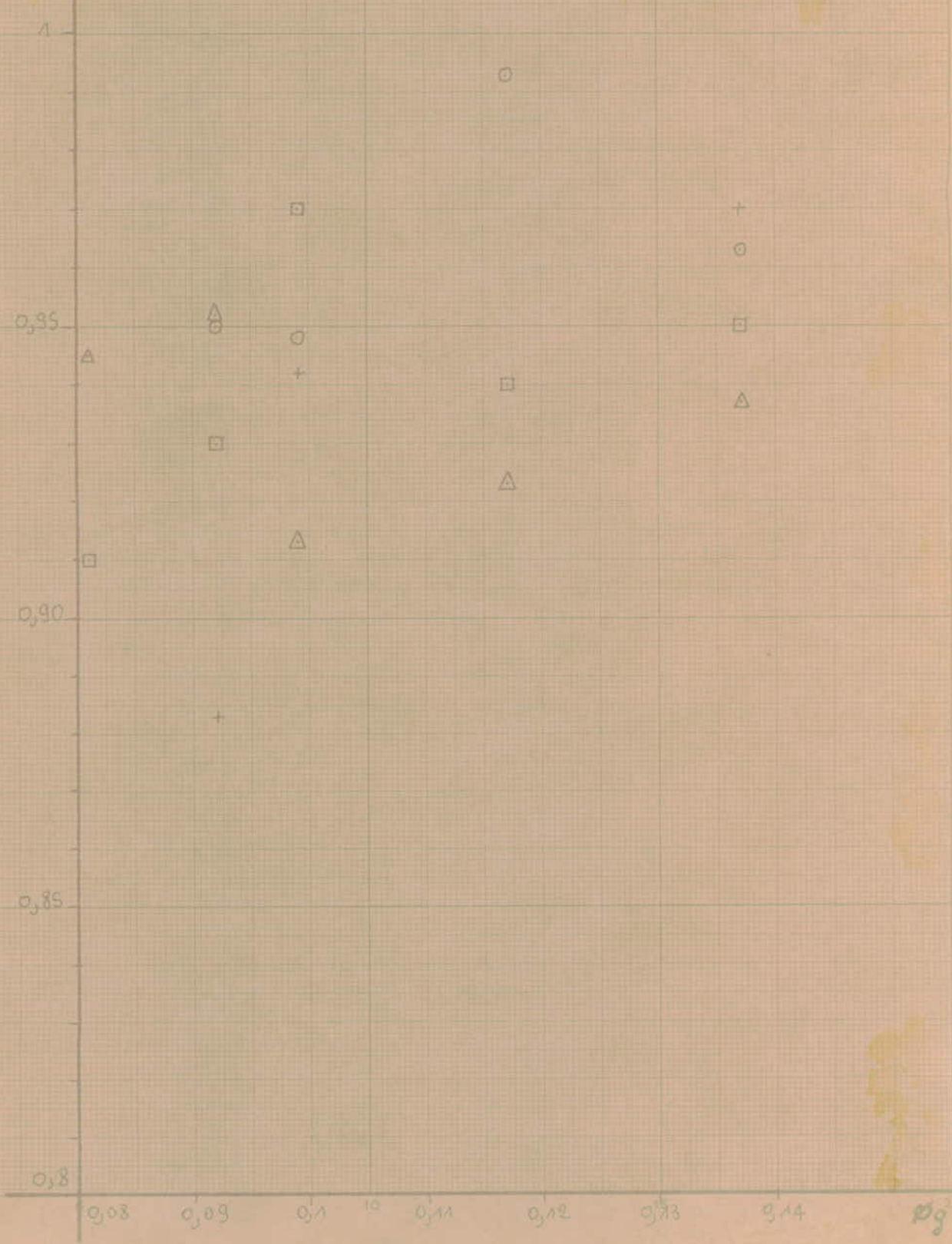
- Δ η_{O_2}
- \square η_T
- \circ η_H
- $+$ η_ϕ



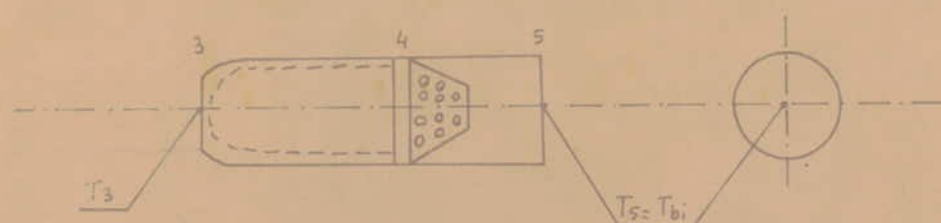
η

EXP 2
 $\eta = f(\phi_g)$

Δ $\eta_{a'Co_2}$
 \circ η_b
 \square η_T
 $+$ η_ϕ



Mesures faites par Bouhavas - Boumoza - Zairi J. 75



$$P_A = 746 \text{ mmHg}$$

$$T_A = 291 \text{ } ^\circ\text{K}$$

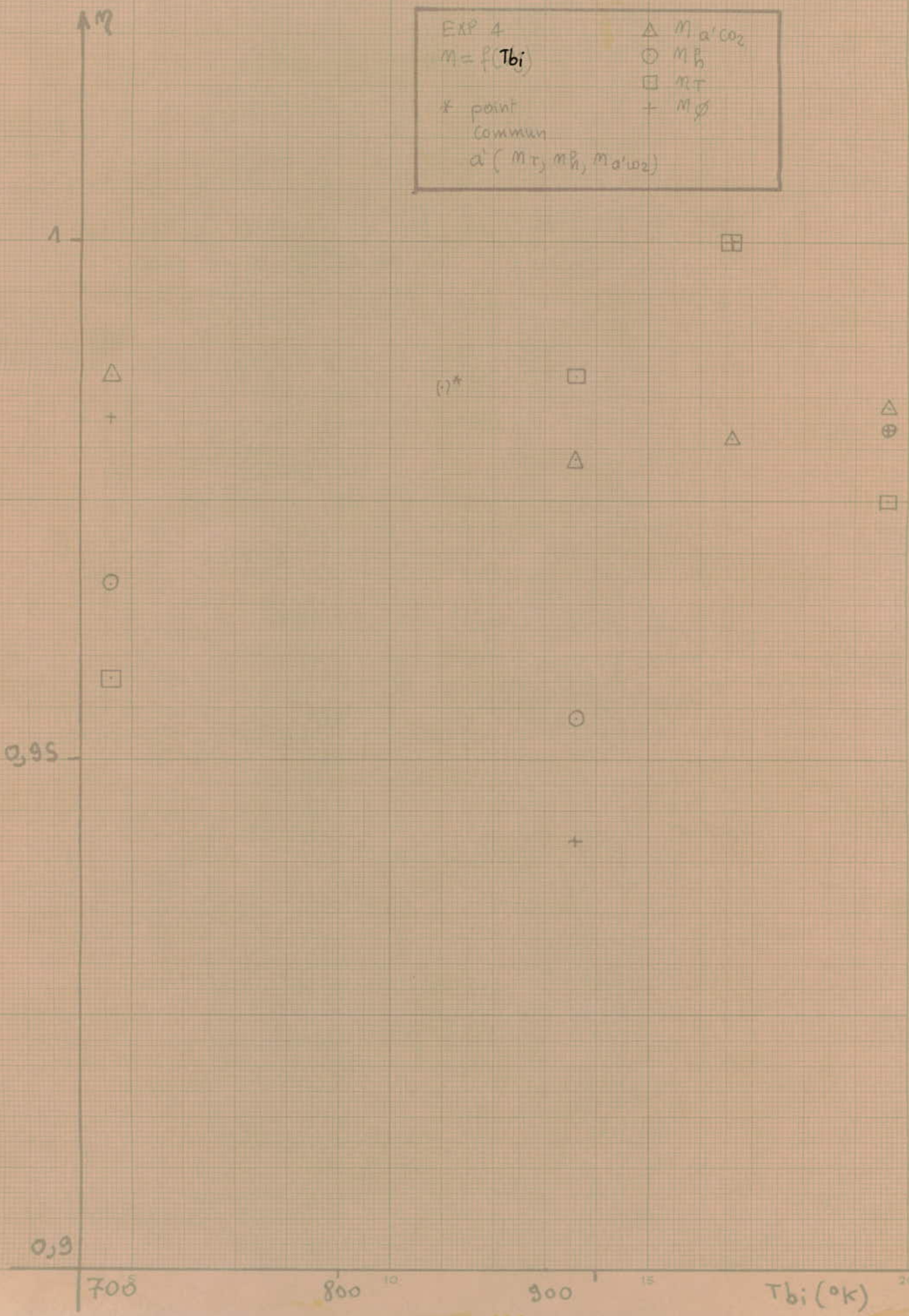
$$P_A = 1,1907 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\left(\frac{c}{A}\right)_{\Delta t} = 0,0677$$

| N° ESSAI | Indicat. | unité | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------------------------|---------------------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---|---|
| Mesures | | | | | | | | | |
| Venturi | ΔH | mm eau | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | | |
| débit Air | A | g/s | 424,46 | 424,46 | 424,46 | 424,46 | 424,46 | | |
| Pression Amont G.N. (C.C.) | P_{acc} | bars absol. | 10,6 | 10,5 | 10,4 | 10,7 | 10,7 | | |
| $t = ^\circ$ G.N. | t_{GN} | $^{\circ}\text{K}$ | 292 | 292 | 292 | 292 | 292 | | |
| ρ G.N. | $\rho_{G.N.}$ | kg/m^3 | 8,1377 | 8,1278 | 8,1199 | 8,1436 | 8,1436 | | |
| débit G.N. dans C.C. | ΔH_{cc} | mm eau | 8 | 26 | 42 | 20 | 4 | | |
| débit G.N. dans C.C. | C_2 | g/s | 2,436 | 4,371 | 5,129 | 3,870 | 1,731 | | |
| Richesse globale | ϕ_g | / | 0,087 | 0,157 | 0,198 | 0,139 | 0,062 | | |
| $t = ^\circ$ sortie panier | T_{bi} | $^{\circ}\text{K}$ | 753 | 863 | 953 | 713 | 583 | | |
| a' CO_2 réelle | a'_{CO_2r} | % | 1,72 | 2,25 | 2,67 | 1,50 | 1,05 | | |
| a' CO_2 théor. | a'_{CO_2t} | % | 1,73 | 2,35 | 2,90 | 1,52 | 1,05 | | |
| a' CO | CO | % | 0,005 | 0,035 | 0,100 | 0,050 | 0,00 | | |
| a' O_2 | O_2 | % | 17,77 | 16,50 | 15,25 | 17,1 | 18,77 | | |
| t entrée C.C. | t_e | $^{\circ}\text{K}$ | 323 | 323 | 323 | 323 | 323 | | |
| richesse locale | $\phi' = \phi_e$ | / | 0,16 | 0,215 | 0,26 | 0,14 | 0,095 | | |
| $\phi_e \rightarrow T$ | t_{ba} | $^{\circ}\text{K}$ | 750 | 880 | 985 | 700 | 540 | | |
| $\eta_{a'_{\text{CO}_2}}$ | $\eta_{a'_{\text{CO}_2}}$ | / | 0,994 | 0,957 | 0,920 | 0,986 | 1 | | |
| η_B | η_B | / | 1,176 | 0,993 | 0,994 | 1,088 | 1,021 | | |
| η_T | η_T | / | 1,007 | 0,917 | 0,951 | 1,034 | 0,973 | | |
| η_ϕ | η_ϕ | / | 1,043 | 0,939 | 0,950 | 1,05 | 1,02 | | |

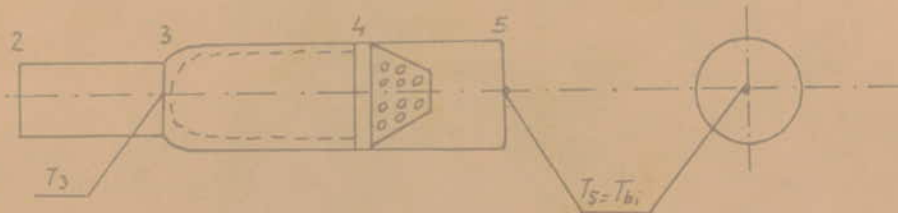
EXP 4
 $M = f(T_{bi})$
 * point
 commun
 $a'(m_T, m_H, m_{a'CO_2})$

Δ $m_{a'CO_2}$
 \odot m_H
 \square m_T
 $+$ m_{ϕ}



Mesures faites par Boughouas - Boumaza - tairi J 75

$P_A = 743 \text{ mm Hg}$
 $T_A = 291 \text{ }^\circ\text{K}$
 $\rho_A = 1,1907 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
 $\left(\frac{C}{A}\right)_{st} = 0,0657$
 $t_{pc} = 473 \text{ }^\circ\text{K}$
 $m_{GN} = 12 \text{ mm}$
 $(C_1)_{CP} = \text{eau}$



| ESSAI N° | Indic. | Unité | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------------------------|-------------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|---|
| Mesures | | | | | | | | | |
| Venturi | ΔH | mm eau | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | | |
| débit d'air | A | g/s | 424,46 | 424,46 | 424,46 | 424,46 | 424,46 | | |
| Pressi Amont c.c. de G.N. | P_{acc} | bars abs. | 10,4 | 10,4 | 10,5 | 10,6 | 10,8 | | |
| t° de G.N. | TGN | °K | 292 | 292 | 292 | 292 | 292 | | |
| masse volum. de G.N. (cc) | ρ_{GN} | kg/m ³ | 8,2 | 8,2 | 8,278 | 8,357 | 8,545 | | |
| débit GN. dans cc | $\Delta H_{cc}^{(C_2)}$ | mm eau | 22 | 30 | 20 | 8 | 6 | | |
| débit totale de G.N. | $C_1 + C_2$ | | 6,599 | 7,489 | 6,367 | 6,367 | 4,501 | 4,191 | |
| $f_1 + f_2$ | $\frac{C_1 + C_2}{A}$ | / | 0,0157 | 0,0176 | 0,0150 | 0,0106 | 0,001 | | |
| Richesse glob. | ϕ_g | / | 0,237 | 0,268 | 0,229 | 0,160 | 0,067 | | |
| t° sortie après panier | T_{bi} | °K | 893 | 1013 | 953 | 840 | 713 | | |
| $\phi_e \rightarrow T_b$ | T_{ba} | °K | 900 | 1030 | 950 | 850 | 730 | | |
| $\phi_e = \phi'$ | $\phi_e = \phi'$ | / | 0,225 | 0,280 | 0,245 | 0,200 | 0,150 | | |
| a'CO ₂ réelle | $a'CO_{2r}$ | % | 2,40 | 3,10 | 2,67 | 2,17 | 1,60 | | |
| a'CO ₂ totale | $a'CO_{2t}$ | % | 2,45 | 3,15 | 2,72 | 2,20 | 1,62 | | |
| CO | CO | % | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,018 | | |
| O ₂ | O ₂ | % | 15,75 | 14,25 | 15,00 | 16,25 | 17,10 | | |
| $\eta_{a'CO_2}$ | $\eta_{a'CO_2}$ | / | 0,979 | 0,984 | 0,981 | 0,986 | 0,987 | | |
| η_h | η_h | / | 0,954 | 0,982 | 1,025 | 0,986 | 0,967 | | |
| η_T | η_T | / | 0,987 | 0,975 | 1,004 | 0,986 | 0,958 | | |
| η_ϕ | η_ϕ | / | 0,942 | 0,982 | 1,008 | 1,01 | 0,983 | | |

EXP 4
 $\eta = f(\phi_g)$

- Δ $\eta_{a'CO_2}$
- \circ η_b
- \square η_T
- $+$ η_ϕ

0,95

0,9

0,05

0,1

0,15

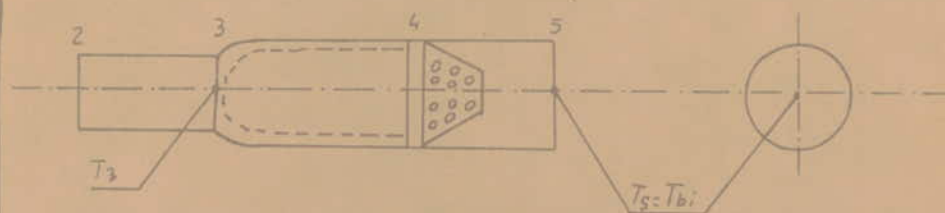
0,20

0,25

ϕ_g



Mesures faites par Boughouas - Boumaza - Zairi J 75



$P_A = 746 \text{ mmHg}$
 $T_A = 291^\circ\text{K}$
 $T_e = 323^\circ\text{K}$
 $\rho_A = 1,19 \text{ kg/m}^3$
 $\left(\frac{c}{A}\right)_{nt} = 0,0677$
 $T_{P_e} = 623^\circ\text{K}$

| ESSAI N° | Indic. | Unité | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mesures | | | | | | | |
| Venturi | DH | mm eau | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| débit d'air | A | g/s | 424,46 | 424,46 | 424,46 | 424,46 | 424,46 |
| Pressi amont cc de G.N. | P _{acc} | bars. Abs. | 10,8 | 10,8 | 10,5 | 10,7 | 10,6 |
| t° de GN | T _{GN} | °K | 292 | 292 | 292 | 292 | 292 |
| masse vol. de G.N. | P _{GN} | kg/m ³ | 8,515 | 8,515 | 8,278 | 8,436 | 8,357 |
| débit de G.N. dans CC | DH cc | mm eau | 10 | 6 | 24 | 10 | 18 |
| " " | C ₂ | g/s | 3,672 | 2,844 | 5,609 | 3,677 | 4,88 |
| débit GN. dans C.P. | C ₁ | / | 2,206 | 2,206 | 2,264 | 2,264 | 2,264 |
| Riches. globale | φ _g | / | 0,210 | 0,180 | 0,282 | 0,212 | 0,256 |
| t° sortie après panier | T _{bi} | °K | 783 | 853 | 973 | 833 | 913 |
| φ _e → T _b | T _{ba} | °K | 800 | 880 | 1020 | 855 | 940 |
| φ _e = φ' | φ _e | / | 0,182 | 0,215 | 0,275 | 0,205 | 0,240 |
| a'CO ₂ réelle | a'CO _{2r} | % | 1,95 | 2,25 | 2,98 | 2,20 | 2,65 |
| a'CO ₂ totale | a'CO _{2t} | % | 2 | 2,37 | 3,02 | 2,25 | 2,67 |
| CO | CO ₂ | % | 0,022 | 0,025 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| O ₂ | O ₂ | % | 17 | 16,25 | 14,5 | 16,25 | 15,5 |
| η _{a'CO₂} | η _{a'CO₂} | / | 0,977 | 0,949 | 0,986 | 0,977 | 0,992 |
| η _T | η _T | / | 0,964 | 0,971 | 0,932 | 0,978 | 0,976 |
| η _h | η _h | / | 0,992 | 0,961 | 0,937 | 0,977 | 0,977 |
| η _φ | η _φ | / | 0,983 | 0,939 | 0,934 | 0,960 | 0,947 |

$\eta = f(T_{bi})$

| | | |
|--------------------|-----------|----------------|
| EXP 5 | Δ | η_{acO_2} |
| $\eta = f(T_{bi})$ | \circ | η_h |
| | \square | η_r |
| | + | η_d |

20

4

15

0

5

0,95

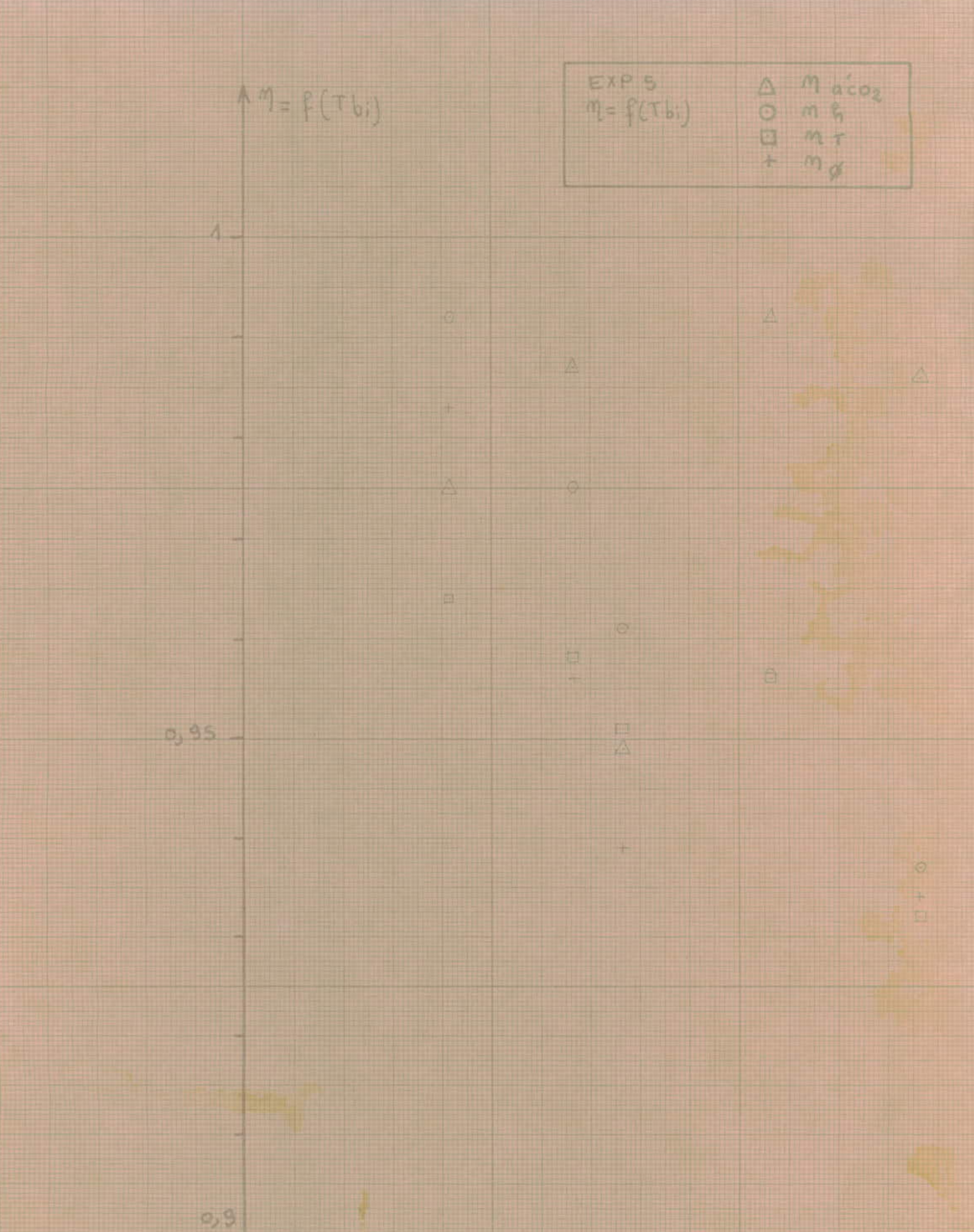
0,9

700

800

900

$T_{bi}(^{\circ}K)$



\circ

Δ

Δ

Δ

+

Δ

\circ

\square

+

\circ

\square

\square

+

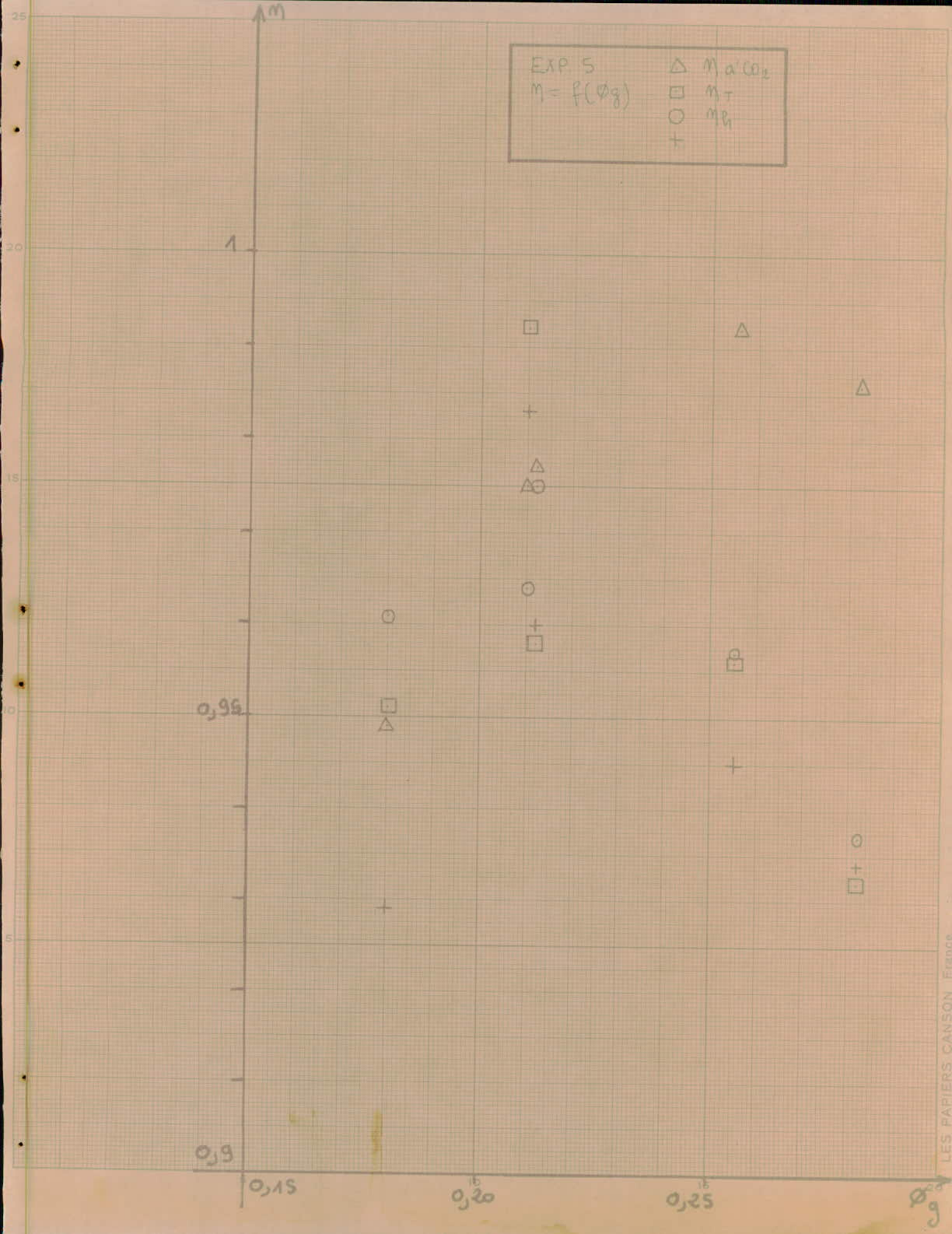
\circ

+

\square

EXP 5
 $\eta = f(\phi_g)$

| | |
|-----------|----------------|
| Δ | η_{aCO_2} |
| \square | η_T |
| \circ | η_R |
| $+$ | |



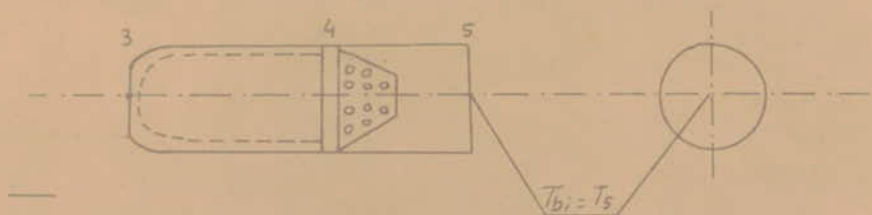
Mesures faites par Bouhouas-Boumaza-Tairi J 75

$$P_A = 768 \text{ mm Hg}$$

$$T_A = 291,7 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$\rho_A = 1,22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

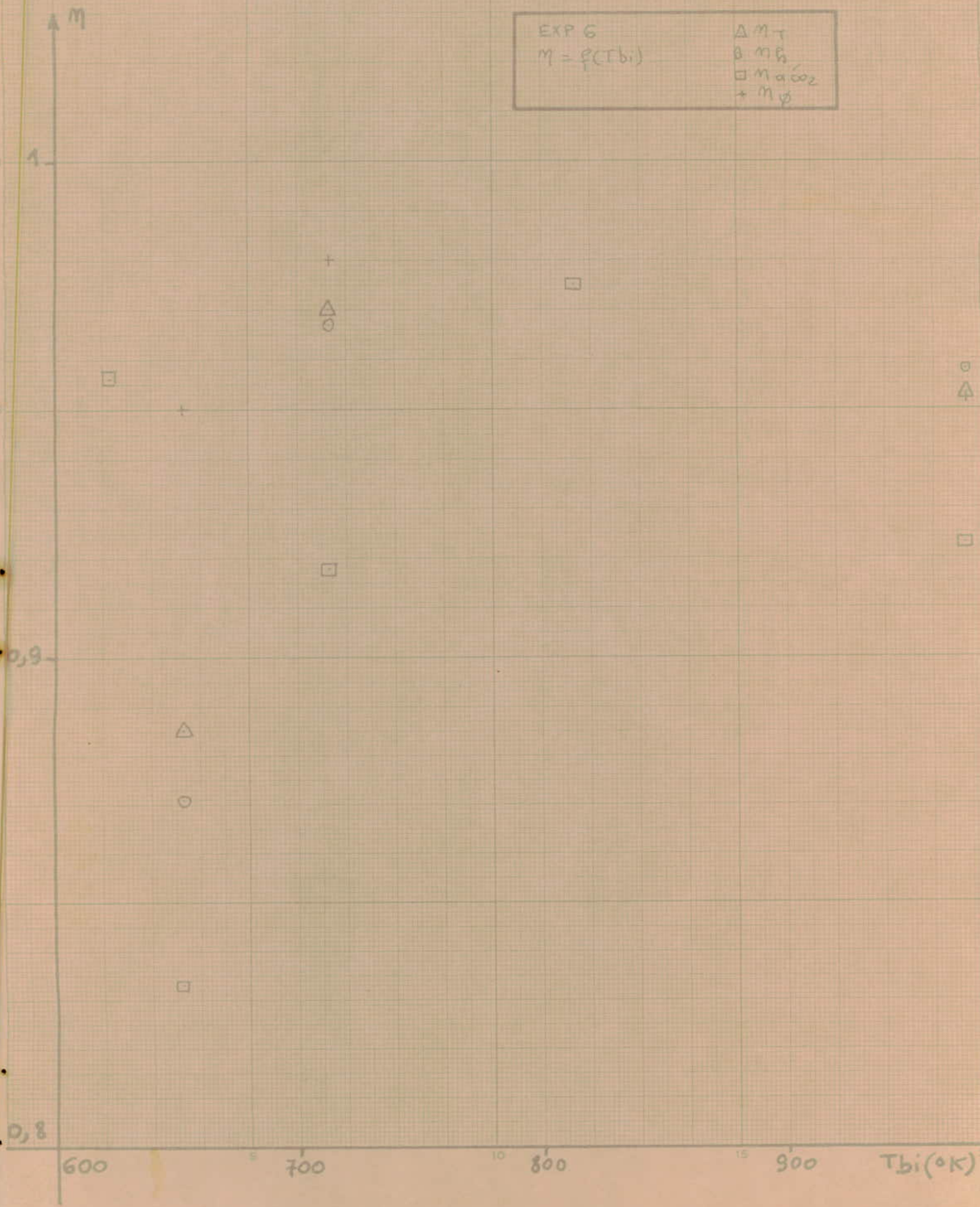
$$\left(\frac{C}{A}\right)_{\text{at}} = 0,0677$$



| ESSAI N° | Indic. | Unité | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------------|--------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---|---|
| Mesures | | | | | | | | | |
| Venturi | ΔH | mm eau | 19 | 44 | 70 | 95 | 118 | | |
| débit d'air | A | g/s | 429,82 | 654,09 | 825,02 | 961,12 | 1071,17 | | |
| Pression Am. de GN cc | P_{acc} | bars Abs. | 10,3 | 10,3 | 10,3 | 10,3 | 10,3 | | |
| T° de GN | T_{GN} | $^\circ\text{K}$ | 290 | 290 | 290 | 290 | 290 | | |
| masse vol. de GN | ρ_{GN} | $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ | 8,177 | 8,177 | 8,177 | 8,177 | 8,177 | | |
| débit de GN c.c. | ΔH_{cc} | mm eau | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | | |
| débit de GN | C_2 | g/s | 8,249 | 8,249 | 8,249 | 8,249 | 8,249 | | |
| $T_{entrée}$ | T_3 | $^\circ\text{K}$ | 323 | 323 | 323 | 323 | 323 | | |
| ϕ globale | ϕ_g | / | 0,293 | 0,192 | 0,152 | 0,131 | 0,116 | | |
| t° après panier | T_{bi} | $^\circ\text{K}$ | 973 | 813 | 713 | 653 | 623 | | |
| ϕ locale | $\phi_l = \phi'$ | / | 0,27 | 0,18 | 0,15 | 0,14 | 0,10 | | |
| $\phi' \rightarrow T_b$ | T_{ba} | $^\circ\text{K}$ | 1005 | 800 | 725 | 700 | 600 | | |
| a'_{CO_2} réelle | a'_{CO_2r} | % | 2,77 | 1,97 | 1,47 | 1,25 | 1,1 | | |
| a'_{CO_2} théo. | a'_{CO_2t} | % | 3 | 2 | 1,6 | 1,5 | 1,17 | | |
| CO | CO | % | 0,12 | 0,025 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | | |
| O ₂ | O ₂ | % | 15,25 | 17,25 | 18 | 18,25 | 18,75 | | |
| $\eta_{a'_{CO_2}}$ | $\eta_{a'_{CO_2}}$ | / | 0,923 | 0,975 | 0,918 | 0,833 | 0,956 | | |
| η_B | η_B | / | 0,958 | 1,057 | 0,967 | 0,871 | 1,143 | | |
| η_T | η_T | / | 0,953 | 1,027 | 0,970 | 0,877 | 1,083 | | |
| η_ϕ | η_ϕ | / | 0,951 | 1,057 | 0,980 | 0,950 | 1,140 | | |

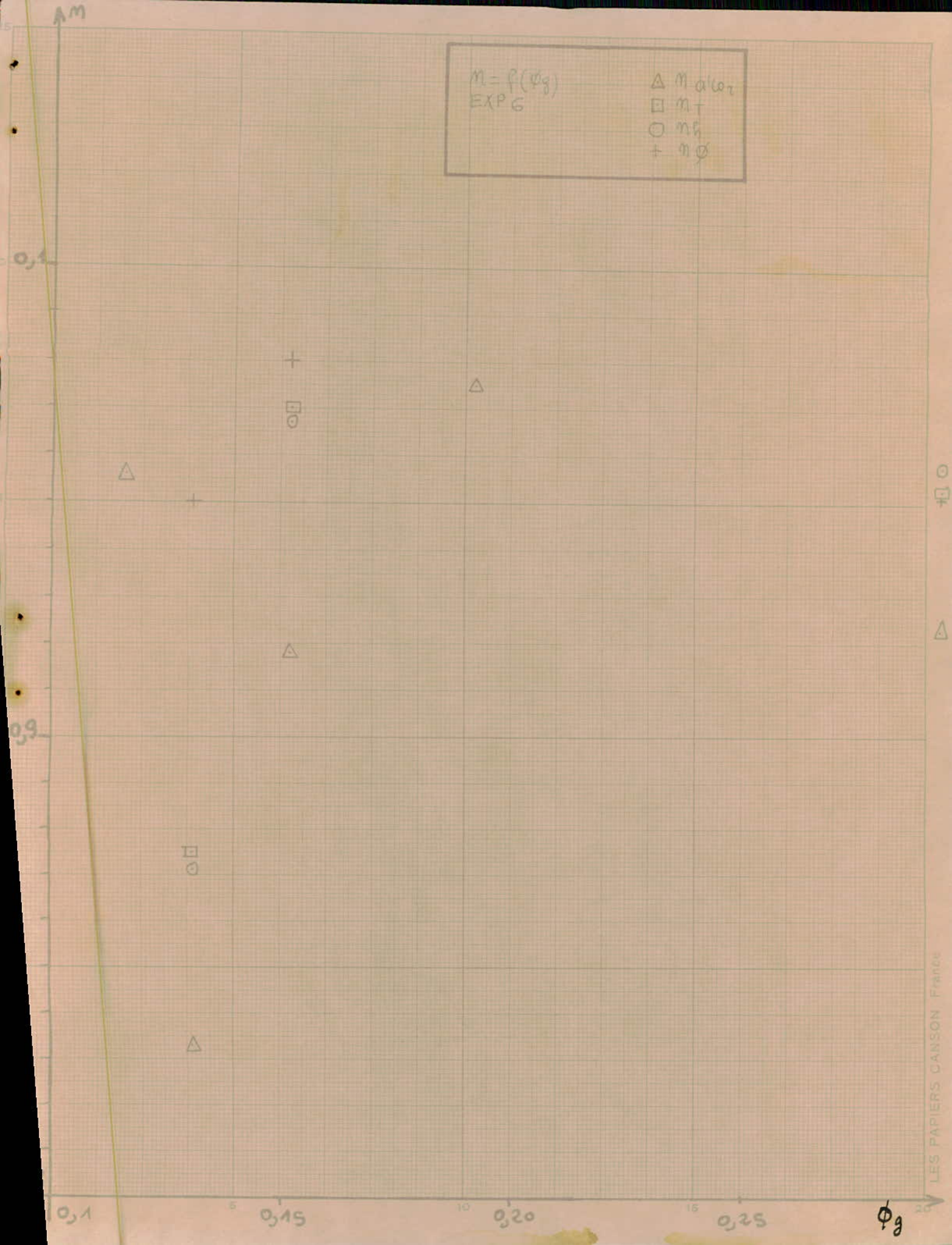
EXP 6
 $\eta = \frac{P}{P(T_{bi})}$

| | |
|-----------|---------------|
| Δ | η_T |
| \circ | η_H |
| \square | η_{CO_2} |
| $+$ | η_{ϕ} |



$m = f(\phi_g)$
EXP 6

- Δ $m_{al\omega_1}$
- \square m_+
- \circ m_g
- $+$ m_\emptyset

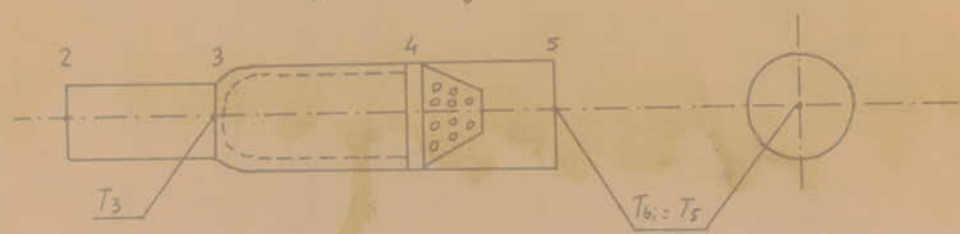


ESSAI AU GN. AVEC PRECHAUFFE AVEC PANIER

EXP 7

Mesures faites par Boukhous-Boumaza-tairi J. 75

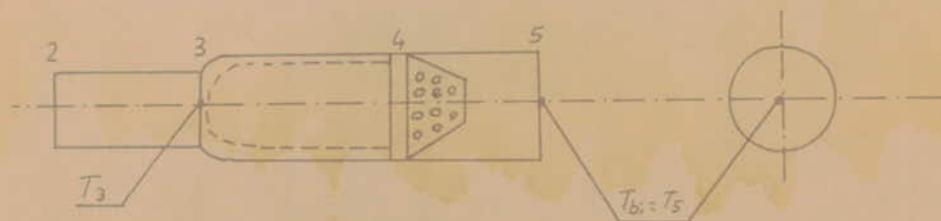
$P_A = 768 \text{ mm Hg}$
 $T_A = 291,1^\circ \text{K}$
 $\rho_A = 1,221 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
 $(\frac{C}{A})_{\text{OT}} = 0,0677$
 $T_{pc} = 623^\circ \text{K}$



| ESSAI N° mesures | Indic. | Unité | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------------|------------------|--------------------------------|-------|--------|--------|-------|--------|---|---|
| débit d'air | A | g/s | 654,1 | 665,78 | 665,78 | 654,1 | 636,17 | | |
| Pression Am. GN. CC | Pacc | bars Abs. | 10,5 | 10,6 | 10,5 | 10,3 | 10,2 | | |
| t° de G.N. | TGN | °K | 291 | 291 | 291 | 291 | 291 | | |
| masse vol. de GN (CC) | ρ_{GNCC} | $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ | 8,307 | 8,386 | 8,307 | 8,148 | 8,069 | | |
| débit de GN CC | C2 | g/s | 5,13 | 2,577 | 3,244 | 5,903 | 7,832 | | |
| débit de GN CP | C1 | g/s | 2,902 | 2,902 | 2,902 | 2,902 | 2,902 | | |
| masse vol. de GN (CP) | ρ_{GNCP} | $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ | 6,962 | 6,962 | 6,962 | 6,962 | 6,962 | | |
| richesse glob. | ϕ_g | / | 0,187 | 0,127 | 0,140 | 0,167 | 0,177 | | |
| t entrée | t3 = te | °K | 323 | 323 | 323 | 323 | 323 | | |
| t° après panier | Tbi | °K | 853 | 733 | 773 | 913 | 1033 | | |
| ϕ locale | $\phi_e = \phi'$ | / | 0,20 | 0,14 | 0,17 | 0,22 | 0,26 | | |
| $\phi' \rightarrow T_b$ | Tba | °K | 850 | 700 | 775 | 895 | 985 | | |
| a' CO2 réelle | a' CO2r | % | 2,17 | 1,55 | 1,75 | 2,37 | 2,90 | | |
| a' CO2 totale | a' CO2t | % | 2,2 | 1,6 | 1,85 | 2,40 | 2,92 | | |
| CO | CO | % | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,035 | | |
| O2 | O2 | % | 16,5 | 17,75 | 17,50 | 16,25 | 15 | | |
| M a' CO2 | M a' CO2 | / | 0,986 | 0,968 | 0,945 | 0,987 | 0,993 | | |
| M B | M B | / | 1,030 | 1,092 | 0,997 | 1,038 | 1,087 | | |
| M T | M T | / | 1,007 | 1,080 | 0,990 | 1,031 | 1,072 | | |
| M ϕ | M ϕ | / | 1,010 | 1,160 | 0,976 | 1,040 | 1,092 | | |

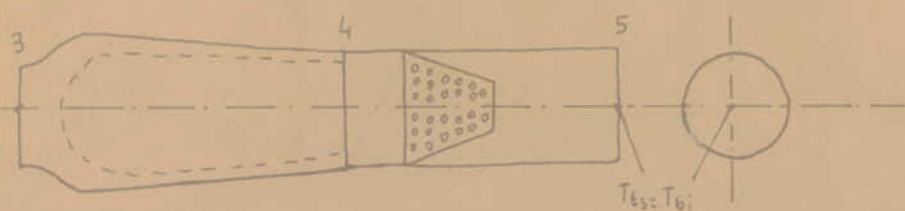
Mesures faites par Boumaza-Boughouas-Zairi J 7r

$\rho_A = 1,221 \text{ kg/m}^3$
 $T_e = 323 \text{ }^\circ\text{K}$
 $P_A = 768 \text{ mm Hg}$
 $\left(\frac{C}{A}\right)_{\text{nt}} = 0,0677$
 $T_{pc} = 473 \text{ }^\circ\text{K}$



| ESSAI N° Mesures | Indicat. | Unité | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------------------------|--------------------|-------------------|--------|--------|---------|--------|---------|---|---|
| Venturi | ΔH | mm eau | 44 | 45 | 46 | 46 | 42 | | |
| débit d'air | A | g/s | 654,09 | 661,49 | 665,780 | 665,78 | 636,11r | | |
| t° de G.N. | TGN | °K | 291,5 | 292 | 292 | 292 | 291 | | |
| masse vol. de G.N. (CC) | ρ_{GNCC} | kg/m ³ | 7,898 | 8,121 | 8,278 | 8,278 | 8,386 | | |
| masse vol. de G.N. (CP) | ρ_{GNCP} | kg/m ³ | 7,108 | 7,096 | 7,096 | 7,017 | 7,041 | | |
| Pamont de GN (C.C) | ρ_{GNCC} | bars Abs. | 10 | 10,3 | 10,5 | 10,5 | 10,6 | | |
| débit de GN (CC) | C ₂ | g/s | 9,086 | 7,523 | 5,609 | 2,290 | 10,179 | | |
| débit de GN (CP) | C ₁ | g/s | 1,719 | 1,717 | 1,717 | 1,708 | 1,711 | | |
| Richesse glob. | ϕ_g | / | 0,252 | 0,213 | 0,167 | 0,091 | 0,285 | | |
| CO | CO | % | 0,038 | 0,035 | 0,030 | 0,03 | 0,077 | | |
| a'CO ₂ réelle | a'CO _{2r} | % | 2,77 | 2,20 | 1,72 | 1,37 | 2,92 | | |
| a'CO ₂ théo. | a'CO _{2t} | % | 2,60 | 2,55 | 2,17 | 1,47 | 2,97 | | |
| O ₂ | O ₂ | % | 16 | 16,75 | 17,5 | 18 | 15 | | |
| t° aprè's panier | T _{bi} | °K | 963 | 873 | 773 | 703 | 1023 | | |
| richesse locale | $\phi_l = \phi'$ | / | 0,24 | 0,23 | 0,20 | 0,13 | 0,27 | | |
| $\phi_l \rightarrow T_b$ | T _b | °K | 940 | 915 | 850 | 655 | 1005 | | |
| $\eta_{a'CO_2}$ | $\eta_{a'CO_2}$ | / | 0,998 | 0,862 | 0,792 | 0,944 | 0,983 | | |
| η_h | η_h | / | 1,023 | 0,898 | 0,874 | 1,092 | 1,022 | | |
| η_T | η_T | / | 1,037 | 0,928 | 0,813 | 1,079 | 1,026 | | |
| η_ϕ | η_ϕ | / | 1,060 | 0,900 | 0,870 | 1,092 | 1,033 | | |

Mesures faites par Bouhouas-Boumouza-Zairi J. 75



$$P_A = 770 \frac{\text{mm}}{\text{Hg}}$$

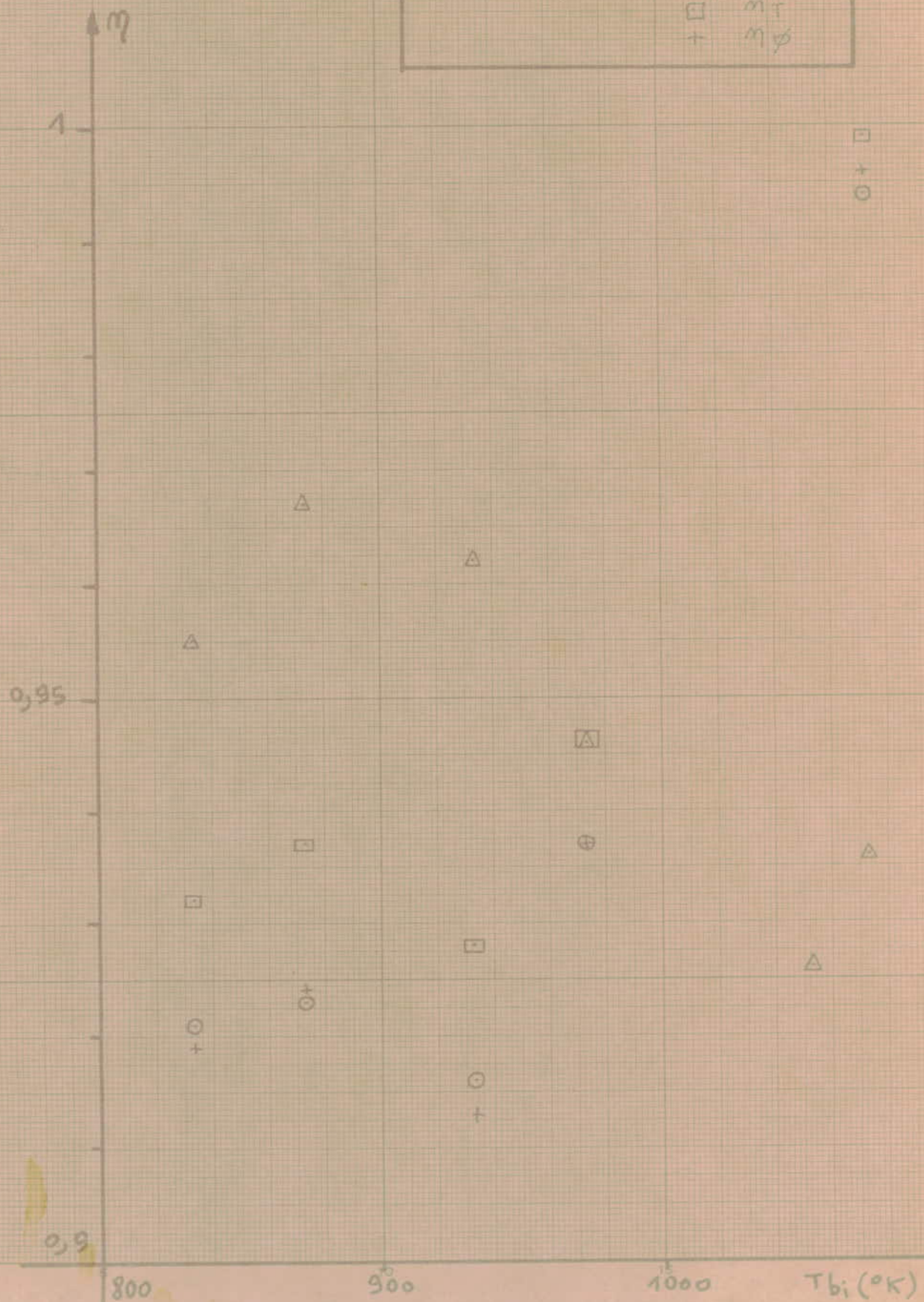
$$T_A = 15^\circ\text{C}$$

$$\rho_A = 1,19 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

| ESSAI N° Mesures | Ind. | Unité | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------------------------------|---------------------|--------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|
| débit d'air | A | g/s | 754 | 784 | 802,7 | 884,2 | 1066,4 | 1021 | 1200 |
| Pression Res. | PR | bar abs. | 11 | 10,7 | 10,3 | 9,9 | 9,6 | 9,2 | 9,0 |
| Pression INJ. | PI | bar abs. | 9 | 7 | 6,3 | 7,3 | 6,9 | 8 | 7,75 |
| Richesse local | ϕ' | / | 0,3 | 0,26 | 0,215 | 0,255 | 0,21 | 0,27 | 0,23 |
| $\phi' \rightarrow T_b$ | T_{ba} | $^\circ\text{K}$ | 1080 | 990 | 910 | 980 | 870 | 1010 | 920 |
| t° après panier | T_{bi} | $^\circ\text{K}$ | 1073 | 1053 | 873 | 933 | 833 | 973 | 863 |
| débit massi- d'après ϕ' | C | g/s | 13,4 | 12,08 | 10,70 | 13,63 | 13,27 | 16,34 | 16,36 |
| t° GNL. | TGNL | $^\circ\text{K}$ | 151,55 | 150,84 | 150 | 149,23 | 148,66 | 147,7 | 147,1 |
| masse vol. de GNL. | ρ_{GNL} | $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ | 416 | 417 | 418 | 419 | 420 | 421 | 422 |
| débit Calculé | C_c | g/s | 27,13 | 23,16 | 20,9 | 27,93 | 27,41 | 27,48 | 30,47 |
| Ind. du débit mètre | Q_v | l/h | 240 | 200 | 180 | 240 | 235 | 235 | 260 |
| ϕ gicleur | ϕ | mm | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 |
| O_2 | O_2 | % | 18,5 | 17 | 15,75 | 16 | 16,75 | 16,75 | 16,5 |
| CO | CO | % | 0,12 | 0,09 | 0,06 | 0,08 | 0,08 | 0,1 | — |
| $a'CO_2$ totale | $a'CO_2t$ | % | 3,15 | 2,70 | 2,325 | 2,65 | 2,20 | 2,80 | 2,40 |
| $a'CO_2$ réelle | $a'CO_2$ | % | 2,95 | 2,50 | 2,225 | 2,55 | 2,10 | 2,65 | 2,15 |
| $m a'CO_2$ | $M a'CO_2$ | / | 0,936 | 0,926 | 0,957 | 0,962 | 0,955 | 0,946 | 0,896 |
| m_H | M_H | / | 0,994 | 1,129 | 0,923 | 0,916 | 0,921 | 0,937 | 0,900 |
| m_T | M_T | / | 0,990 | 1,094 | 0,937 | 0,928 | 0,932 | 0,946 | 0,904 |
| m_ϕ | M_ϕ | / | 0,996 | 1,134 | 0,924 | 0,913 | 0,919 | 0,937 | 0,895 |

EXP 9
 $\eta = f(T_{bi})$

Δ $\eta_{a'CO_2}$
 \circ η_{H_2}
 \square η_T
 $+$ η_{ϕ}



REMARQUES SUR LES ESSAIS RECONSIDERES

Nous avons repris et complété le dépouillement de 9 essais repérés par EXP.1 à EXP.9 . Parmi ces 9 essais nous avons sélectionné 6 essais , les 3 autres essais présentant beaucoup de points aberrants :

EXP.1 , EXP.2 , EXP.4 , EXP.4 , EXP.5 , EXP.6 , EXP.9

EXP.1 EXP6 EXP9 : avec panier sans préchauffage

EXP2 EXP4 EXP5 : avec panier et avec préchauffage.

L'essai EXP9 est au gaz naturel liquide .

POUR ces 6 essais nous avons calculé les rendements

Nous avons représenté l'évolution de ces rendements en fonction de la température T_{bi} mesurée à la sortie du panier , d'une part et d'autre part en fonction de la richesse globale .

D'une manière générale , l'évolution du rendement de combustion α_{CO_2} est croissante aux faibles températures et décroissante aux températures élevées (au-delà de 900°K). Ceci est dû aux différentes fuites et en moindre partie au phénomène de dissociation (créant des réactions qui absorbent de la chaleur) . Ce phénomène de dissociation devient assez important aux températures élevées .

Cependant l'essai EXP6 est assez particulier puisque la variation de

α_{CO_2} est différente et ressemble à une sinusoidale : cet essai est à revoir.

Pour les rendements η_h , les essais EXP6 EXP1 EXP4 et EXP2 nous donnent des paraboles présentant un maximum aux environs de 800°K . L'essai EXP9 au G.N.L. EST aussi à revoir puisque le dernier point correspondant à une t^o de 1073°K est très proche de l'unité .(même remarque pour les trois autres rendements en cet essai EXP9). Les autres rendements à savoir

et ont une variation normale (à part pour l'essai EXP9) .

Ces 9 essais contiennent des points aberrants nous donnant des rendement supérieures à 1 . Les prises de mesure ont été faites par une sonde placée juste à la sortie du panier en son axe .

Pour ces points , les différentes - mesure ne sont pas homogènes et il faut donc refaire ces mesures en prenant le soin de balayer toute la section du panier suivant les axes XX , YY et même suivant des axes in-

ternédiaires ; et prendre la valeur moyenne des mesures . C'est ce que nous nous sommes proposés de faire , mais des travaux sur le banc de combustion ne nous ont pas permis de commencer les mesures à temps .

CONCLUSION SUR LA COMBUSTION DU GAZ NATUREL

1- le préchauffage améliore les rendements de combustion .

2- Différence entre la richesse déterminée à partir de $\dot{a}CO_2$ et celle mesurée

La richesse déterminée à partir de $\dot{a}CO_2$ (% donné par l'analyseur) ne correspond pas à la richesse mesurée. Ceci est dû en partie à l'imprécision des débinètres.

3- Différence entre $\dot{a}CO_2(\phi)$ et $\dot{a}CO_2$ (analyseur)

A partir de la richesse globale on peut déterminer $\dot{a}CO_2$ (courbe $\dot{a}CO_2$ en fonction de la richesse) et la comparer avec celle donnée par les analyseurs. Elle n'est pas la même , car l'air qui entre ne participe en sa totalité à la combustion .

4- Courbes T_{bi} en fonction des richesses

- T_{bi} en fonction de la richesse locale: voir thèse juin 75 . Les points obtenus sont très voisins de la courbe théorique .

- T_{bi} en fonction de la richesse globale : nous avons une répartition de part et d'autre de la courbe théorique (car sans uniformiseur , pour les richesses élevées , augmentation du débit de gaz , la flamme s'allonge et la sonde en certains moments plonge dans la flamme /travaux MULLER-MATTON).
POUR les petites richesses la flamme n'est pas très allongée et est donc accrochée au prévaporisateur, donc la chambre a aussi la fonction de panier dans ce cas : la courbe expérimentale n'est pas exactement confondue avec la courbe théorique à cause de l'air de Muft qui ne participe pas à la combustion .

5- Essai au G.N.L.

Cet essai EXP.9 au point de vue rendement semble assez régulier : tous les rendements sont supérieurs à 0,9 et ne comportant qu'une série de points de rendements supérieurs à 1 .

L'essai a été fait avec deux diamètres différents du gicleur et sans préchauffage et avec panier mélangeur . Pour le diamètre (1,05 mm) les t° mesurées sont assez voisines de celles données par le diagramme .

Pour le second diamètre (1,10 mm) les températures lues sont très éloignées de celles données par la théorie .

Pour une richesse égale à 0,3 les rendements η_T , η_h , η_ϕ sont de l'ordre de 0,99 ce qui est assez remarquable. L'essai au G.N.L. est très délicat puisque il y a le phénomène de vaporisation partielle du G.N.L. (ébullition nucléée) et donc augmentation du volume massique de G.N.L. qui fausse tous les calculs et les mesures. On remarque aussi un % de CO très faible pour l'ensemble des mesures !

6- Comparaison entre les différents rendements

Le nombre de mesures effectuées ne nous permet pas de conclure sur la position relative des trois rendements η_T , η_h , η_ϕ . Cependant le η_{CO_2} est supérieur à ces derniers, ceci s'explique par le fait que ce rendement ne tient compte que du processus chimique, tandis que la détermination des trois autres rendements est tributaire de la précision des instruments de mesure des pertes thermiques et aussi de la précision de lecture.

7- Le % de CO diminue quand on utilise un panier mélangeur, la combustion se complète ainsi dans le panier mélangeur : double utilité du panier.

BIBLIOGRAPHIE

- Les diagrammes enthalpie-entropie P. CHAMBADAL
 - Combustion SURRUGUE-BARRERE
 - Recherches sur la combustion d'un mélange d'hydrocarbure J. RAPPENEAU
 - Cours sur la combustion G. MATTON
 - Pratique de la mesure et du contrôle dans l'industrie BURTON
 - PROJETS de fin d'études sur la combustion PROMOTION juin 74
PROMOTION juin 75
PROMOTION juin 76
PROMOTION FEVRIER 77
-

