

POSSIBILITE D'AMELIORATION DES CYCLES

DE L'ALIMENTATION DE L'AIMANT PRINCIPAL DU PS

O. Bayard

Cette note propose un nouveau mode d'exploitation de l'alimentation de l'aimant principal du PS. La solution proposée permettrait d'augmenter la durée des paliers usuels sans augmenter le temps de répétition et améliorerait la qualité de ces paliers (réduction très importante des perturbations au début du palier et réduction à plus de la moitié de l'ondulation pendant le palier). Ces résultats seraient obtenus au prix d'une extension du système de refroidissement de l'aimant et d'une modification d'une des stations de conversion.

1. Introduction

L'alimentation actuelle du PS a été calculée en 1965 pour doubler et même tripler la fréquence de répétition des cycles utilisés à cette époque. La durée des paliers de ces anciens cycles ne dépassait pas 500 msec. La nouvelle alimentation a été conçue pour réaliser de tels cycles avec le meilleur rendement au moindre prix.

$$\text{rendement } \rho = \text{duty cycle} = \frac{\text{durée du palier}}{\text{temps de répétition}}$$

On trouve sur la fig. 1 le rendement ρ de l'alimentation quand celle-ci pourra être exploitée avec la pleine tension de 10,8 kV, les pertes admissibles dans l'aimant restant fixées à 2800 kW. Dans l'étude qui suit, les améliorations seront comparées à ce programme.

2. Nouveau mode d'exploitation proposé

On a tendance actuellement à réaliser de longs paliers. Cette tendance ne peut que se renforcer après la mise en service du "Booster". Nous avons donc étudié un autre mode d'exploitation permettant d'augmenter la durée des paliers et le rendement par un facteur de l'ordre de 1,25 à 1,29, tout en conservant le temps de répétition initialement prévu. Ce résultat est obtenu par des modifications relativement simples de l'équipement de refroidissement de l'aimant, et aussi des stations de conversion :

i) Pour augmenter la durée des paliers sans augmenter le temps de répétition, il faut admettre des pertes plus élevées dans l'aimant. On a choisi de porter ces pertes de 2,8 MW à 3,5 MW (appendice 1a, fig. 6).

ii) Comme la puissance fournie par le moteur d'entraînement de

l'alternateur est égale à la somme des pertes dans l'aimant et des pertes dans son alimentation, l'augmentation des pertes entraînerait une surcharge du moteur. Pour remédier à cette difficulté, on peut réduire les pertes dans l'alimentation, et par conséquent soulager le moteur, en court-circuitant pendant le palier une des stations de conversion par des thyristors de by-pass de 30 MVA (appendice 1b, fig. 7). La puissance fournie par le moteur reste alors dans des limites admissibles.

Le fonctionnement des mutateurs pendant le palier, quand on le réalise avec une seule station, ne permet pas de maintenir la tension de l'alternateur à un niveau correspondant à 10,8 kV aux bornes de l'aimant. Il est nécessaire, dans ce mode d'exploitation, de ramener cette tension à 9 kV (appendice 1b).

3. Avantages de la solution proposée

i) On améliore le rendement des cycles ayant un long palier compris entre 20 et 26 GeV/c. Les courbes de rendement correspondant à cette solution sont données sur la fig. 2.

En prenant comme valeurs comparatives celles du programme prévu d'exploitation avec 10,8 kV (indice a), l'augmentation relative du rendement $d\rho/\rho_a$ et de la durée des paliers dTP/TP_a , que procure cette solution sans modification du temps de répétition, est donnée sur la fig. 3; le gain maximum est compris entre 26 et 29 0/o. L'augmentation relative du rendement et de la fréquence des cycles d'accélération sans modification de la durée des paliers est donnée sur la fig. 4. On voit sur ces courbes qu'il existe une limite dans la quantité de mouvement et la durée des paliers, au-dessous de laquelle l'augmentation devient négative (diminution due au fait que l'augmentation des temps de montée et de descente devient prépondérante dans le calcul du temps de répétition). La fig. 5, tracée dans le plan

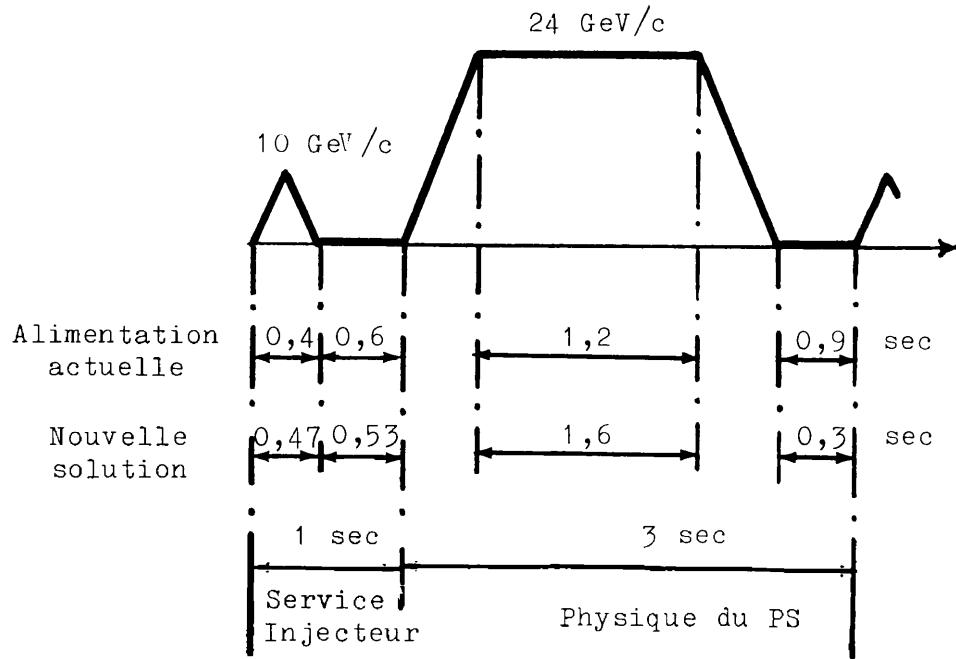
"durée des paliers, quantité de mouvement des paliers", donne la répartition de la zone où l'augmentation du rendement est maximale et de la zone où la diminution du rendement est maximale. On pourrait réaliser, sans diminution de rendement, les cycles situés dans cette dernière zone en exploitant l'alimentation selon le mode actuel, après avoir mis le by-pass hors circuit; en pratiquant ainsi, on ne profiterait pas de l'amélioration de la qualité des paliers.

Sur la fig. 5 est représentée une nouvelle zone d'exploitation, ouverte par cette nouvelle solution, et actuellement interdite par suite de la trop grande variation de la vitesse du groupe à la fin du palier.

ii) Les autres avantages touchent la qualité du palier. On réduirait par 2,6 l'ondulation de la tension appliquée à l'aimant pendant le palier (ondulation produite par les harmoniques régulières). On réduirait de même par un facteur 30 les oscillations transitoires perturbant la tension de l'aimant lors du passage sur le palier (appendice 1b).

4. Cas du fonctionnement du PS comme injecteur pour la 300 GeV

Quand le PS servira d'injecteur pour la 300 GeV, le temps disponible pour les cycles destinés à la physique du PS sera de 3 sec, en tablant sur une répétition de 4 sec pour la 300 GeV. Dans l'hypothèse de ce cyclage lent, ce ne sont plus les pertes dans l'aimant qui limitent la durée des paliers pour un temps de répétition donné, mais la variation de vitesse à la fin du palier. Dans ce cas, l'intérêt de la solution proposée ne réside plus dans l'amélioration du rendement, mais dans la nouvelle zone d'exploitation ouverte (fig. 5), qui permettra d'utiliser au mieux les 3 sec. disponibles pour la physique du PS. Un exemple de réalisation d'un palier de 24 GeV/c dans l'un ou l'autre cas est donné dans le schéma ci-après.



Dans les deux cas, la durée des paliers est limitée par la variation de vitesse du groupe à la fin du palier.

5. Prix de la solution proposée

- Modification de l'équipement de refroidissement FS. 170'000.--
 - Thyristors de by-pass FS. 500'000.--
-
- Total FS. 670'000.--

Distribution : (ouverte)

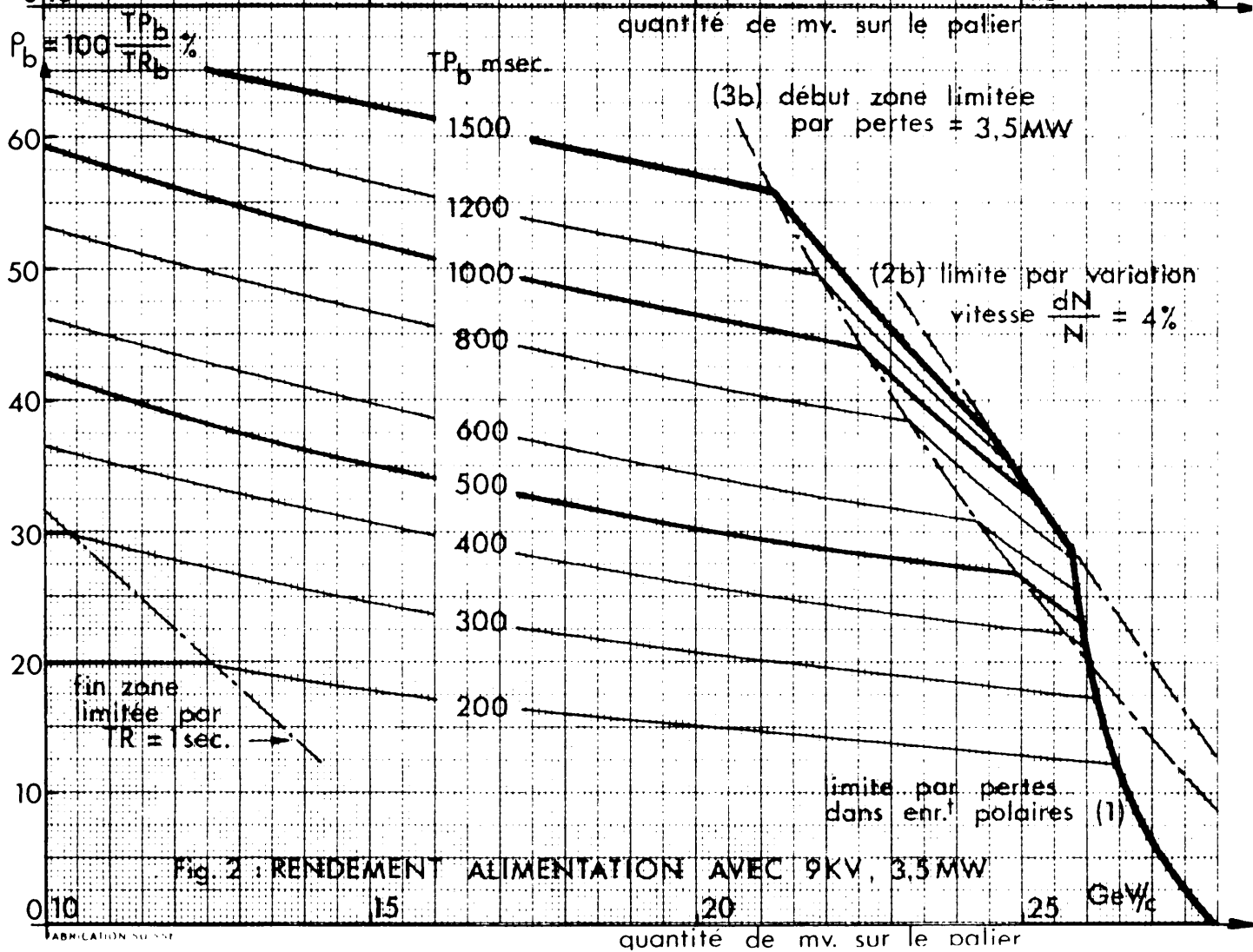
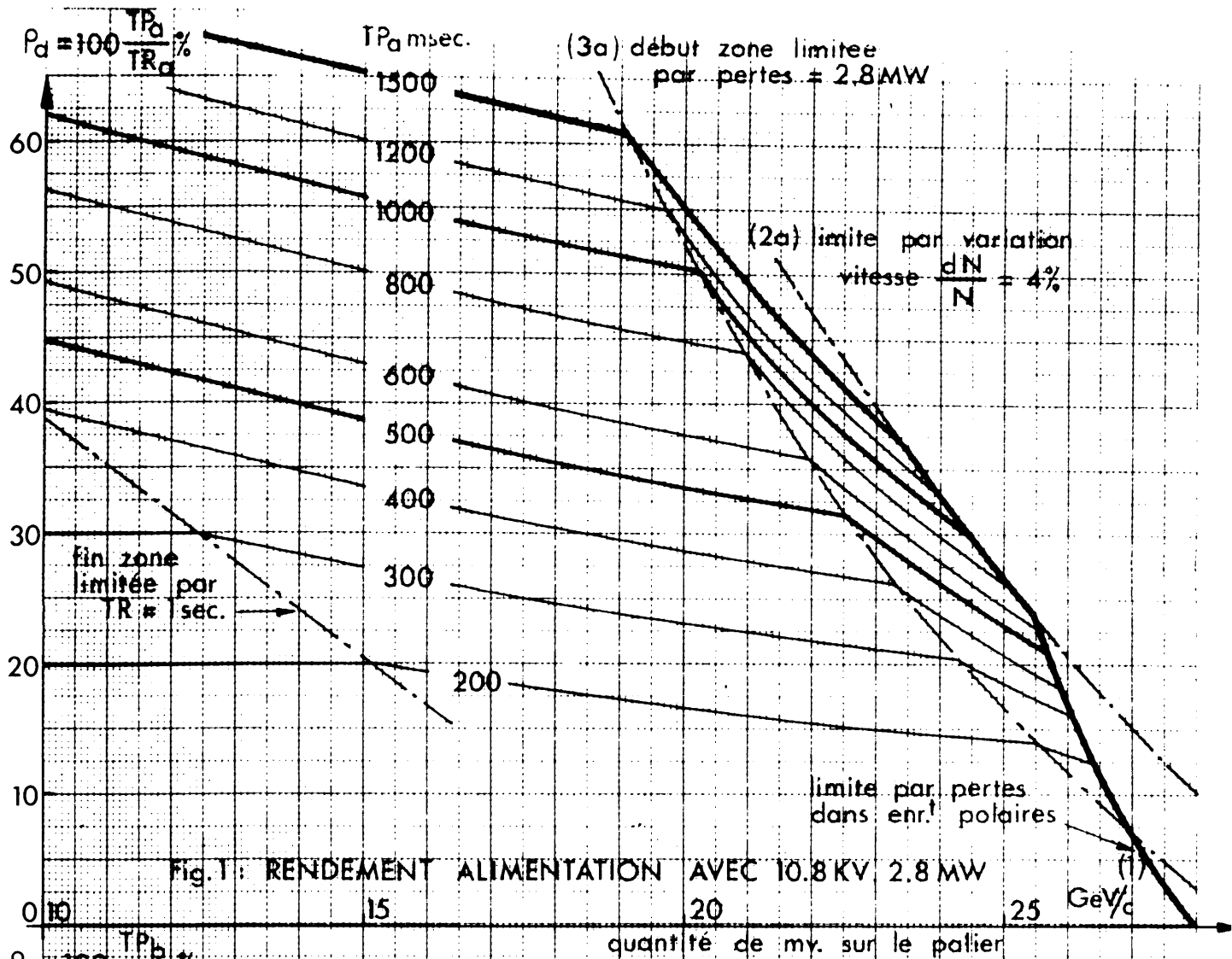


Fig. 3

ACCROISSEMENT DU RENDEMENT ET DE LA DUREE DU PALIER TP
 ▲ TEMPS DE REPETITION TR CONSTANT

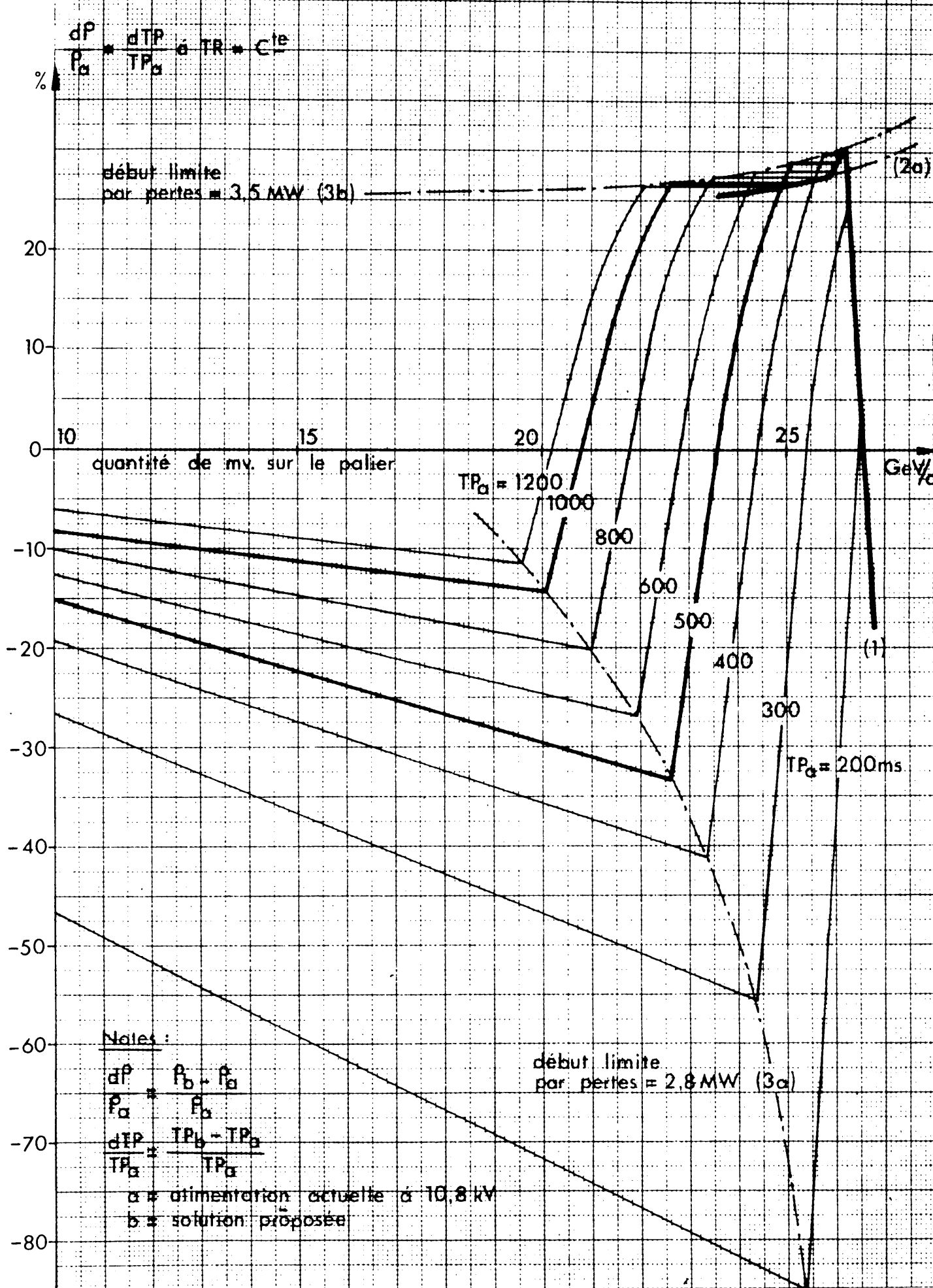
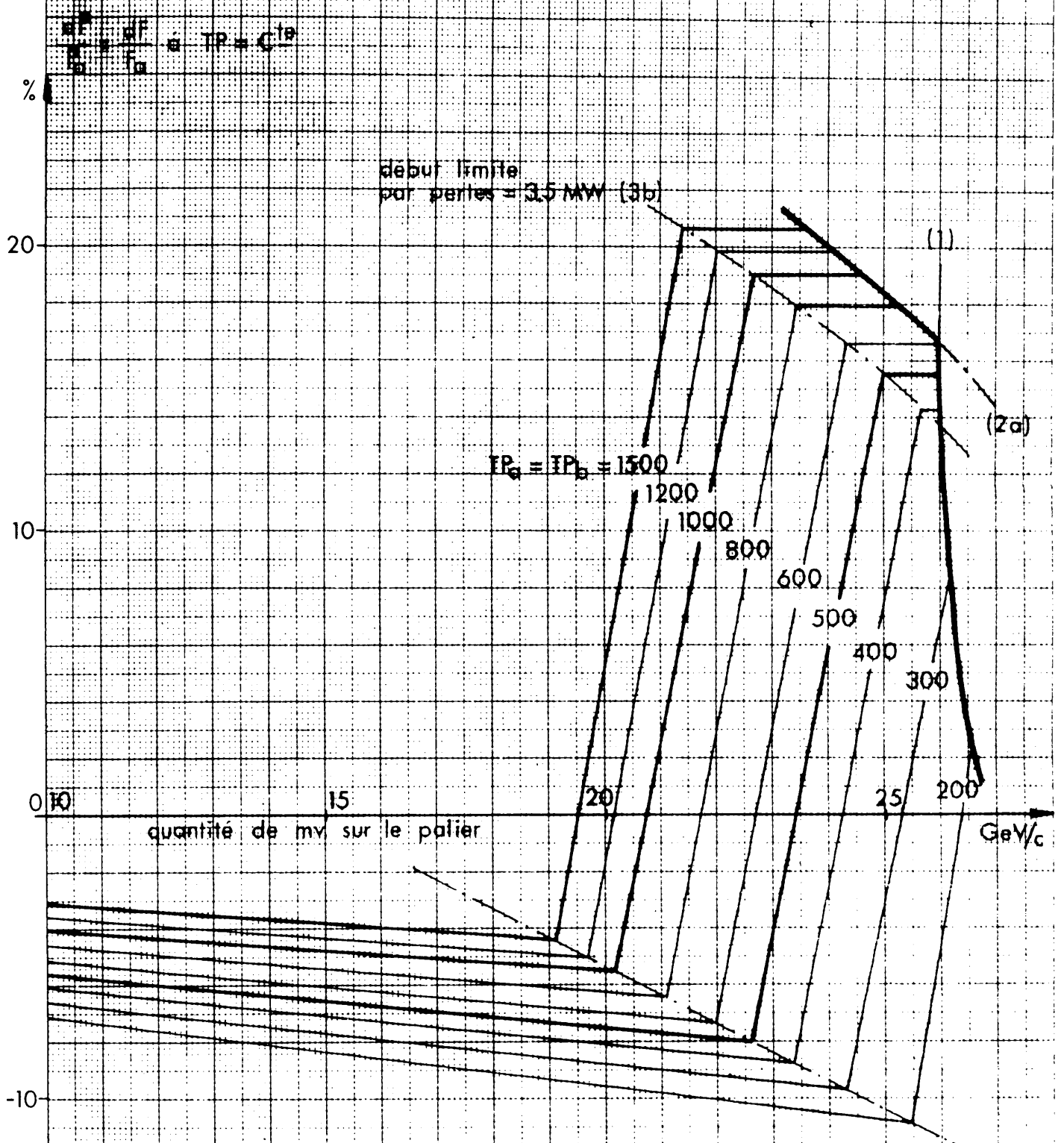


Fig. 4

ACCROISSEMENT DU RENDEMENT ρ ET DE LA FREQUENCE DES CYCLES F A DUREE DE PALIER T_P CONSTANTE



Notes :

$$\frac{dP}{P_a} = \frac{P_b - P_a}{P_a}$$

$$\frac{dF}{F_a} = \frac{F_b - F_a}{F_a} = \frac{1/TR_b - 1/TR_a}{1/TR_a}$$

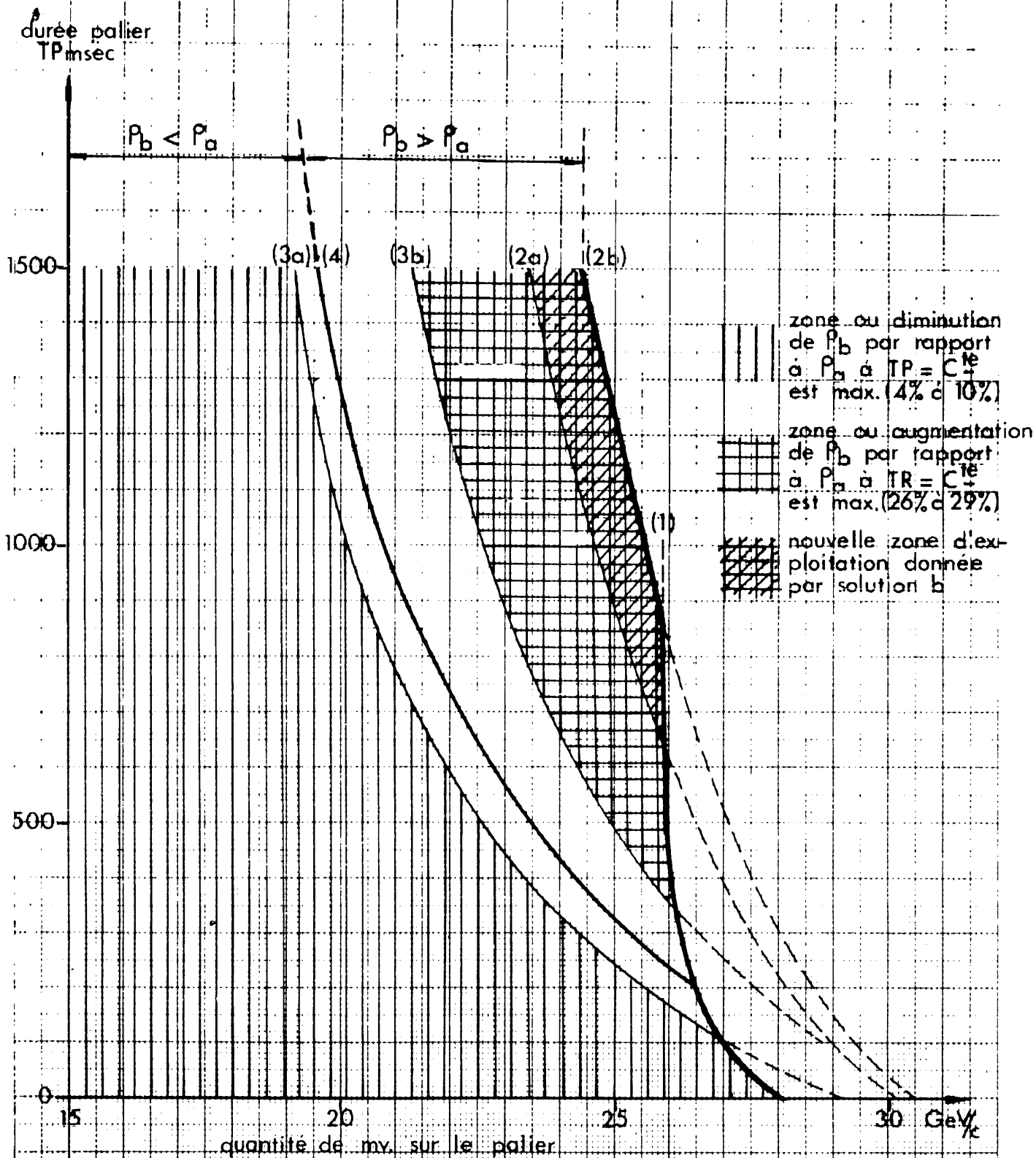
a = alimentation actuelle à 10.8 kV

b = solution proposée

Fig. 5

AVANTAGES COMPARES DES SOLUTIONS (a) 10,8kV, 2,8MW ET (b) 9kV, 3,5MW POUR LES DIFFERENTS CYCLES

- (1) limitation par pertes dans les enroulements paliers
- (2) limitation par variation vitesse = 4% (a et b = repère des solutions)
- (3a) début de la zone limitée, par les pertes de 2,8MW dans l'aimant (cette zone est située à droite de la courbe 3a)
- (3b) début de la zone limitée par les pertes de 3,5MW dans l'aimant (cette zone est située à droite de la courbe 3b)
- (4) courbe d'égal rendement pour a et b $P_a = P_b$



APPENDICE 1 : ETUDE TECHNIQUE DU PROJET

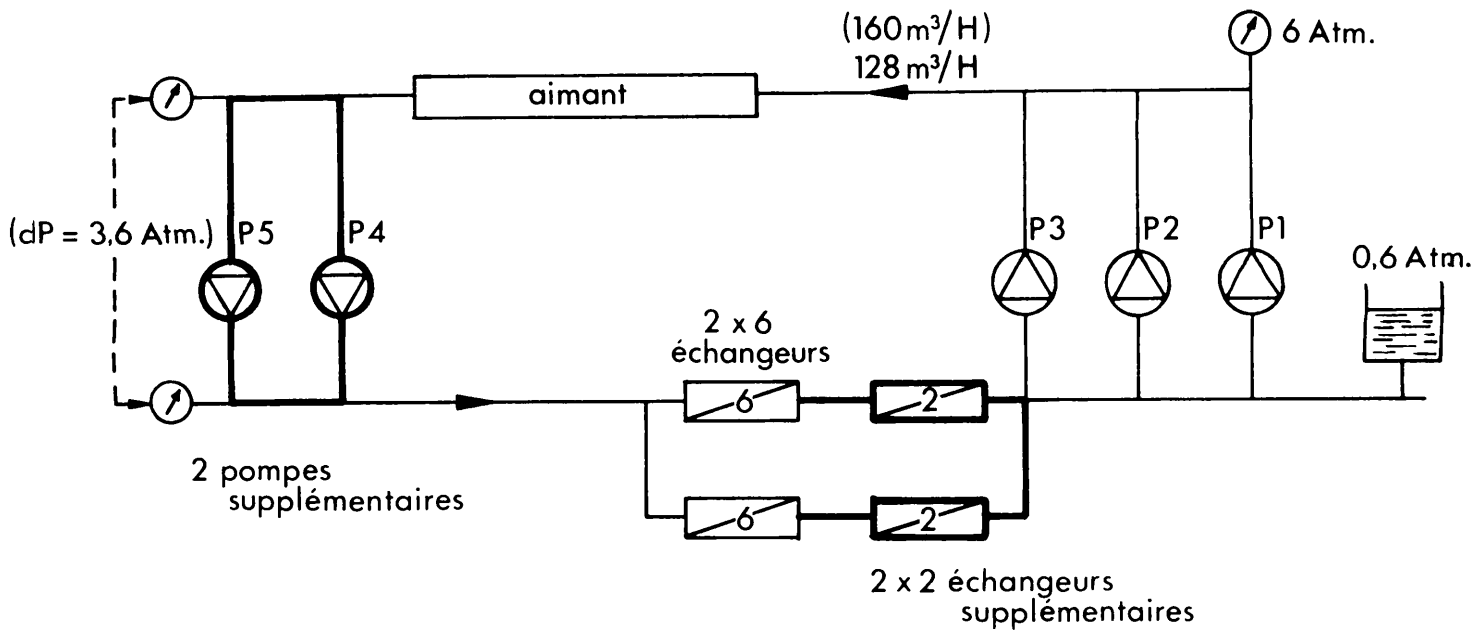
GRANDEURS NOMINALES D'EXPLOITATION DE L'ALIMENTATION ACTUELLE :

- Pertes maximales dans l'aimant	2800 kW
- Tension maximale appliquée à l'aimant	10800 V
- Courant efficace maximum de définition de l'alimentation	3200 A
- Courant moyen maximum dans les stations de conversion	2500 A

1a) Modification du système de refroidissement de l'aimant

Les pertes admissibles dans l'aimant seraient augmentées de 25 %^o, et portées de 2,8 MW à 3,5 MW. Le niveau de 3,5 MW a été choisi, car il correspond à la possibilité limite de l'extension du circuit de refroidissement de l'aimant. De plus, ce niveau de pertes est bien adapté à la puissance nominale du moteur.

Pour maintenir inchangée la température de l'aimant, il faudrait augmenter de 25 %^o le débit d'eau dans l'aimant, qui passerait de 2120 l/min à 2660 l/min. L'augmentation de débit et l'augmentation de pression qui résultent de l'accroissement de 55 %^o des pertes de charge, seraient assurées par un groupe de deux pompes monté en série avec le groupe de pompes existant. Pour ne pas modifier sensiblement la hauteur manométrique dans l'aimant et les tuyauteries, ces deux pompes seraient installées entre l'aimant et les échangeurs. De plus, il faudrait augmenter de 25 %^o la surface d'échange des échangeurs. On y parviendrait en ajoutant aux 12 échangeurs existants quatre échangeurs identiques (fig. 6).



en traits gras : nouveaux équipements
entre parenthèse : nouvelles valeurs

Fig. 6
MODIFICATION DE L'INSTALLATION DE REFROIDISSEMENT

1b) Modification de l'installation électrique

L'alimentation de l'aimant a été dimensionnée pour un courant efficace dans l'aimant de 3200 A. Des pertes de 3500 kW dans l'aimant représentent un courant efficace de 3320 A. La surcharge de l'alimentation en courant serait de 4 % (8 % de pertes joule supplémentaires), ce qui n'est pas admissible. Nous fonctionnons actuellement à 10 % au-dessous du courant nominal; ceci est une pratique industrielle courante qui assure une bonne longévité du matériel.

Pour garder le même coefficient de sécurité et assurer néanmoins la fourniture d'un courant efficace de 3320 A à l'aimant,

il faudrait modifier la conception de l'alimentation et réduire le courant qu'elle doit fournir pendant le palier. Pour cela, on envisage de monter un by-pass aux bornes de l'une des stations de conversion. Ce by-pass, constitué de thyristors en montage série parallèle, serait calculé pour un courant de crête de 6400 A et une tension directe et inverse de 4500 V (puissance de crête équivalente = 30 MVA). Il serait allumé pendant le palier, tandis que la station de conversion connectée à ses bornes cesserait de débiter. (voir fig. 7). Une très importante diminution des pertes dans l'alimentation résulterait de la réduction par deux du courant dans l'alternateur pendant le palier et de l'annulation simultanée du courant dans la station de conversion court-circuitée par le by-pass. Grâce à cela, on pourrait augmenter de 25 % les pertes dans l'aimant tout en diminuant encore de 10 % les pertes dans l'alimentation, et n'augmenter ainsi que de 10 % la puissance absorbée par le moteur d'entraînement; elle passerait de 84 % à 90 % de la puissance nominale du moteur (6 MW).

La tension réduite pendant le palier n'étant produite que par une station de conversion, on obtiendrait une réduction de l'ondulation de la tension de l'aimant par un facteur de 2,2.

Cette manière de procéder a néanmoins une conséquence néfaste. En effet, pendant le palier une seule station de conversion commuterait, au lieu de deux à la fois, dans la solution prévue à l'origine. Il en résulterait une augmentation de l'ordre de 20 % de la vitesse de décroissance di/dt du courant à la fin de la commutation. Comme les contraintes d'anode sont proportionnelles au produit de di/dt par la tension de rétablissement aux bornes du mutateur qui cesse de conduire, et comme la probabilité d'apparition d'arcs en retour est proportionnelle à la puissance $3,5$ des contraintes, on aboutirait à doubler cette probabilité. Ceci serait inadmissible, car un arc en retour a le même effet qu'un court-circuit aux bornes de l'alimentation. La garantie de 50'000 heures qui couvre les mutateurs, ne serait

plus assurée par le constructeur dans ces conditions d'exploitation, rendues encore plus sévères par l'allongement des paliers et l'augmentation du courant moyen qui pourrait atteindre 3000 A (2500 A est la valeur maximale fixée par la garantie). Pour ramener ces contraintes à la valeur maximale admise à l'origine, il faudrait diminuer de l'ordre de 20 % la tension de l'alternateur. La tension aux bornes de l'aimant serait ainsi réduite à 9 kV pendant la montée et 7,8 kV pendant la descente du champ. Il en résulterait une augmentation de l'ordre de 20 % des temps de montée et de descente.

C'est cette solution de compromis qui est proposée dans cette note. Elle représente donc une augmentation de 20 % du temps de répétition des cycles sans palier, et une augmentation de 26 % à 29 % de la durée des paliers sans modification du temps de répétition, dès que ces derniers sont assez longs et énergétiques. De plus, comme nous l'avons vu, cette solution permet d'allonger les paliers au-delà de la zone interdite par la variation excessive de vitesse dans l'alimentation actuelle.

Cette solution permettrait aussi d'améliorer très nettement la qualité des paliers. Ces améliorations seraient de deux ordres :

- i) Une réduction par 2,6 de l'ondulation de la tension de l'aimant (ondulation produite par les harmoniques régulières pendant le palier).
- ii) Les oscillations transitoires perturbant la tension de l'aimant lors du passage sur le palier seraient réduites aux 3 % de leur valeur. Cette réduction considérable est due essentiellement à la très faible variation de la puissance réactive de l'alternateur entre la fin de la montée et le début du palier (1 MVAR dans la solution proposée, au lieu de 34,5 MVAR dans l'alimentation actuelle).

TABLEAU 2

		Alimentation actuelle	Solution proposée
Tension max. aimant		10,8 kV	9 kV
Pertes max. aimant		2,8 MW	3,5 MW
Contrainte d'anode maximum (pour 6400 A aimant)		$1,22 \cdot 10^{10}$ VA/sec	$1,25 \cdot 10^{10}$ VA/sec
<u>CAS D'UN CYCLE A 25,2 GeV/c</u> (5000 A dans aimant)			
Temps de montée		470 msec	573 msec
<u>Etat de l'alternateur à la fin de la montée</u>			
Déphasage		$24,5^\circ$	$28,5^\circ$
Puissance apparente		66 MVA	55 MVA
Puissance réactive		27,5 MVar	25 MVar
<u>Caractéristiques du palier</u>			
Angle d'allumage α		$73^\circ 30'$	$64^\circ 18'$
Angle de commutation u		$11^\circ 48'$	$11^\circ 13'$
Déphasage alternateur		$79^\circ 24'$	$69^\circ 55'$
Courant alternateur		6300 A	3150 A
Puissance réactive alternateur		62 MVar	26 MVar
Variation P. réactive pendant passage sur palier		+ 34,5 MVar	+ 1 MVar
Ondulation crête à crête non filtrée		3720 V	1400 V
Temps de répétition	<u>Durée palier TP</u>		
	300 msec	1,7 sec	1,7 sec
	800 msec	3,1 sec	2,7 sec
" " "	1000 msec	impossible	3,1 sec
Puissance prise par moteur			
300 ms		4955 kW	5016 kW
800 ms		4924 kW	5317 kW
1000 ms			5383 kW
Courant moyen			
300 ms		2200 A	2455 A
800 ms		2015 A	2473 A
1000 ms			2477 A
<u>CAS D'UN CYCLE A 21 GeV/c</u>			
Temps de répétition			
1000 ms		2,2 sec	2,2 sec
1500 ms		3,1 sec	2,7 sec
Courant moyen			
1000 ms		2490 A	2640 A
1500 ms		2407 A	2900 A

On trouve sur le tableau 1 ci-joint un résumé de ces avantages. Le tableau 2 compare différents paramètres de cycles avec un palier de 25,2 GeV/c réalisés, soit avec l'alimentation actuelle, soit avec la solution proposée.

TABLEAU 1

	Valeurs pour l'alimentation actuelle	Facteur de réduction ou d'augmentation avec la solution proposée
Tension aimant	10800 V	0.835
Pertes aimant	2800 kW	1.25
Pertes alimentation	2300 kW	0.91
Puissance max. consommée	5100 kW	1.10
Courant moyen max. pour palier 21 GeV/c, 1.5 sec	2500 A	1.16
Contrainte d'anode max. pour palier 6400 A	$1.22 \cdot 10^{10}$ VA/sec	1.02
Ondulation crête à crête (25 GeV/c) non filtrée	3720 V	0.375
Variation de la puissance réactive lors du passage sur le palier 25 GeV/c	+ 34.5 MVar	0.03
Durée palier à répétition constante		1.26 à 1.29

Fig. 7

MODIFICATION DE L'ALIMENTATION DE L'AIMANT

