

4/80

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GÉNIE CHIMIQUE

SEA



PROJET DE FIN D'ETUDES

Sujet :

PROPRIETES DES PELLETS DE MINERAI DE FER

DE L'OUENZA PREPAREES AVEC DES BENTONITES

DE MOSTAGANEM.

Proposé par : TOBRETENOV Etudié par : DJELLOULI B

Promotion : JUIN 1980



Membres du JURY.

---

Président :

Monsieur S. E. Chitour

Professeur à l'E.N.P.A.

Chef de département du Génie Chimique.

Examineurs :

Madame E. Dumoulin

Maître-assistante à l'E.N.P.A.

Monsieur GEORGIEU

Maître-assistant à l'E.N.P.A.

Monsieur Ts. OBETENOV.

Professeur à l'E.N.P.A.

Monsieur Menas Lounis

Ingénieur métallurgiste à La S.N.S.

A mes parents ~

M. Ramia ~

A. T. Boua Ziz - Abdallah ~

M. merouane - Nebil ~

Que chacun trouve ici mon  
Profond respect.

Brahim.

## Sommaire

	Pages
Introduction.	
A - Partie générale.	
Bibliographie.	1
Conclusion.	6
B - Partie théorique.	
I. La bentonite.	7
II. Les minerais de fer.	14
III. Palletisation.	20
C - Partie expérimentale.	
C.1. Matériaux utilisés.	37
C.2. Méthode des préparations des pellets.	37
C.3. Méthode de mesure de la qualité des pellets	39
C.4. Résultats expérimentaux.	41
C.5. Analyse des résultats obtenus.	61
Conclusion.	
Bibliographie.	

## Introduction

Le problème de la nature de la charge des hauts fourneaux, agglomérés ou pellets, qui conduit au plus bas prix de la fonte a fait l'objet de débats dans l'industrie sidérurgique. Les hauts fourneaux à production spécifique élevée de fonte réclament un lit de fusion dont les propriétés chimiques et métallurgiques assurent ces hautes performances.

De nombreuses publications soulignent l'importance de la qualité des pellets sur la productivité, la mise au mille de combustible et la marche des hauts fourneaux.

La question qui se pose est de savoir comment agir sur la qualité des pellets de minerais de fer. Les bentonites semblent répondre au problème posé.

L'Algérie, pays producteur de grandes quantités de bentonites, et de minerais de fer pourra utiliser cette argile dans l'industrie de la pelletisation des minerais de fer.

L'objet de notre travail consiste à étudier les propriétés des pellets de minerai de l'Ouenza obtenues avec des additifs de bentonite des gisements de Mostaganem.

Dans ce rapport, il ya:

- Une partie bibliographique.
- Une partie théorique qui traite surtout les procédés de pelletisation.
- Une partie expérimentale présentant certaines propriétés des pellets, ainsi que l'influence de la bentonite sur la qualité de ces dernières.

- A : P A R T I E G E N E R A L E -

---

- Bibliographic

- Conclusion

Utilisation des bentonites dans la  
pelletisation des minerais de fer.

- A - BIBLIOGRAPHIE -

A . 1 Introduction

Grim a décrit la méthode de préparation de pellets à partir des concentrés des gisements de fer " taconites " (i) situés dans les "Grands lacs " aux Etats Unis .

Un mélange de concentré, de coke et de bentonite Wyoming est mouillé , et passe dans un tambour. Les pellets, ainsi obtenues de diamètres un inch, ou plus, contenant 0,5 % de bentonite sont chauffées à 93 - 240°C, et ensuite durcies dans un four à 900 - 980°C .

La bentonite Wyoming donnent aux pellets , aussi bien à l'état sec ( sans chauffage ) , qu'après cuisson une résistance à la rupture très grande .

Les pellets ainsi préparées constituent une charge convenable des hauts fourneaux pour l'élaboration de la fonte .

Divers auteurs ont publiés des résultats concernant l'utilisation des différentes bentonites dans l'industrie de la pelletisation .

Certains ont étudié le comportement des pellets de différentes origines, pendant la réduction, d'autres ont souligné la nécessité d'améliorer la qualité des boulettes de minerai de fer , et de connaître les différents facteurs qui la font varier .

A. 2 : I.F. Dvornichenko, et ses collaborateurs ont préparé des pellets à base de 0,5 % de bentonite provenant des gisements russes, à partir d'un concentré de Ledenskyi (2) contenant 69,9 % de Fer .

Pendant, l'étape de préchauffage, la température optimale est entre 105 - 450°C .

L'éclatement des pellets peut être évité au delà de 450°C .

Pendant le chauffage des pellets de 800 - 1000°C , la résistance des pellets augmente avec le temps de séjour dans le four , pendant que la quantité des ions  $Fe^{2+}$  continues à diminuer .

Le ramollissement des pellets arriva à 1100 - 1200°C , produisant par cristallisation une couche solide responsable du collage ou même de la soudure des pellets .

La phase solide - liquide est observée à une température supérieure à 1200°C . Une perte rapide de la résistance des pellets est constatée à 30 % de réduction .

La résistance initiale des pellets fut de 250 Kg/ Pellet. Une addition de bentonite de plus de 0,5 % en poids à base humide , n'est pas justifiée .

A. 3 Essais de pelletisation des minerais de fer de L'OUENZA.

A. 3. i Essai de pelletisation Effectuées par (Lurgi ) . (3)

Lurgi a effectué des essais de pelletisation à partir d'un échantillon de 5 tonnes de minerai de fer OUENZA dans les installations du Laboratoire de :

Lurgi Gesellschaft für Chemie und HÜTTENWESEN m.b. H. , à Frankfort amMain, Allemagne .

Les résultats fondamentaux des essais sont les suivants :

- i) la résistance à la compression des pellets vertes fut de 1,3 à 1,8 Kg/P humide, et de 3,6 à 4,6 Kg après séchage à 105°C.
- ii) eau nécessaire au bouletage fut de 11,3 % à base humide.
- iii) La résistance de chutes des pellets vertes fut en moyenne de 9 chutes d'une hauteur de 45 cm .
- iv) Une addition de 0,5 % de bentonite Wyoming permet aux pellets de survivre l'étape de pré-chauffage .
- v) La résistance après brûlage fut de 200 - 220 Kg/P de moyenne.
- vi) L'indice d'abrasion fut en moyenne de 4,5 - 5,0 % passant au crible de 0.6 mm.
- vii) Une réduction ( élimination de l'oxygène ) de 71,2 % et une résistance après réduction d'environ 31 Kg/P
- ix) L'analyse des pellets a donné :

	% poids
Fe	59.7
SiO2	4.02
CaO	6.24

L'échantillon utilisé contient 54,8 % de fer ( sur base sec ) , le brûlage des pellets a été fait dans un four à cuve .

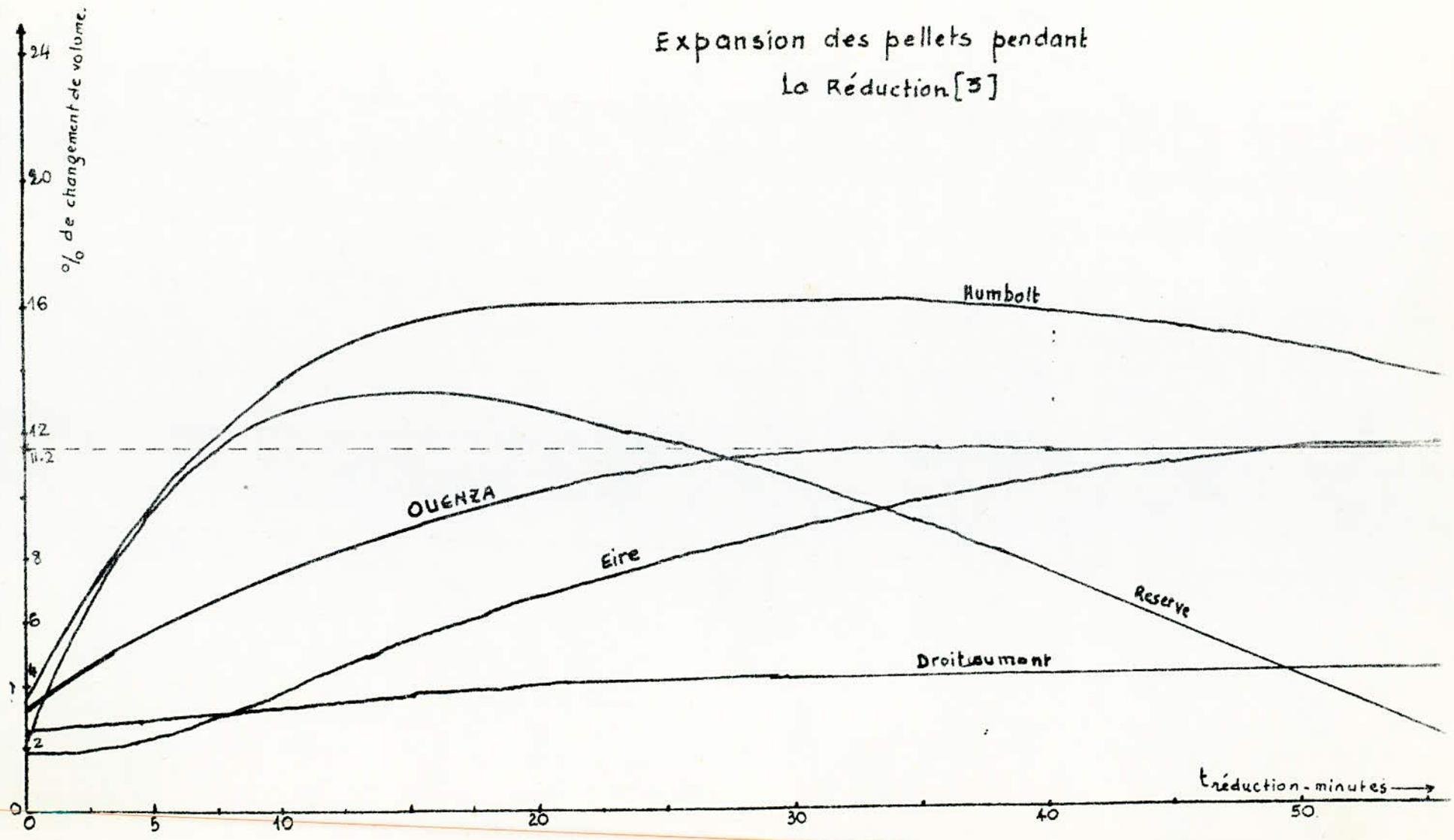
La bentonite employée comprenait 93 % - 40 microns avec une surface spécifique de 3600 cm<sup>2</sup>/g .

Données pour essai en four à cuve . (3)

Essai N°		2	3	5	7	I
<u>Séchage en courant ascendant</u>						
temps	mn	-	5	5	5	
pression	mm H <sub>2</sub> O	-	400	300	400	
temperature	°C	-	290	320	270	
<u>Préchauffage en courant descendant</u>						
temps	mn	7	6	6	6	
pression	mm H <sub>2</sub> O	200	200	200	200	
temperature	°C	50-1250	70-1250	80-1270	70-1200	
<u>Brûlage et rébulage</u>						
temps	mn	18	14	22	12	
Aspiration	mmH <sub>2</sub> O	400	400	300	400	
température	°C	1250-800	1250-800	1300-800		
<u>Refroidissement en courant ascendant</u>						
temps	mn	15	12,5	16	11	
pression	mmH <sub>2</sub> O	400	450	350	400	
bentonite	— %	0,5	0,5	0,5	0,5	
<u>Capacité</u>	ml/m <sup>2</sup> . 24h	15,8	16,9	12,9	18,7	
<u>Pellets vertes</u>						
Resistance à la compression	Kg/P	1.3	1,3	1,5	1,8	1,5
Nbre de chutes	I8"	8.4	8.8	9.6	9.6	9.6
teneur en humidité	%	11.5	11.4	11.6	11.5	11.5
Resistance à la compression à l'état sec -	Kg/P	3.6	3.8	4.2	4.6	1.7
<u>Pellets durcies</u>						
Resistance à la compression	Kg/P					
Haut	"	202	253	199	253	
Milieu	"	206	237	217	249	
Fond	"	149	213	190	217	

Figure. I-2.1

### Expansion des pellets pendant La Réduction [3]



Index ASTEM

-5 mm	-----	%	4,8	4,3	5,1	4,9
-28mesh (0.6mm)	-----	%	4,6	4,2	4,7	4.7

Essai N°		3	7
<u>Degré de Réduction</u>		%	
après	15min	27,0	31.7
	30min	27.1	51.2
	45min	68.8	61.5
	60min	75.2	72,0
	90min	84.5	90,8

<u>Gonflement</u>			vol	vol
après	60 mn	%	9,5	13.2
	90 mn	%	10.7	13.05
voire figure		( I.3.i ).		

<u>Resistance à la compression</u>				
après	15 min	Kg/P	139	138
	60 mn	"	81	84
	90 mn	"	94	29

<u>Resistance à la compression avant reduction</u>				
		Kg/P	234	240

A. 3. 2

Essais de Pelletisation Effectués par Stewarts and lloyds :

La teneur en fer de l'échantillon utilisé par SL ( 57,4 % sur sec) était plus élevée que celle de l'échantillon utilisé par Lurgi(54,8 % sur sec). Quoiqu'on ne mentionne pas , la quantité et la nature de bentonite réalisée par ( SL.) les résultats sont concordants .et montrent qu'on peut obtenir des pellets de très bonnes qualités physiques. Les résultats obtenus sont les suivants ( 3 ) :

Analyse de la gangue	
Si O <sub>2</sub>	3.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5
CaO	4.4
Mg O	1.1
Resistance en Kg/Pellet .....	253
TAMBOUR ASTM - 30 mesh (0.5mm)	3.5
Densité en vrac Kg/m <sup>3</sup>	1970
Porosité	27.4
Réductibilité ( essai Linder )	54
Teneur en fer	61.8

#### A. 4 Conclusion :

Il y a encore d'autres publications ( 8 - II - I2 - I4 ) dans lesquelles il existe des resultats concernant la pelletisation de differents mineraux et de concentrés de fer avec des bentonites provenant de differents gisements .

Cependant , nous ne trouvons pas de résultats pour les bentonites, Algeriennes . Les publications citées ci dessus, soulignent aussi l'importance de la qualité des pellets sur la productivité, la mise au mille de combustible et la marche générale des hauts fourneaux. En raison des différentes conditions operatoires de ceux ci, il est difficile d'associer une propriété déterminée des pellets à un comportement déterminé dans le fourneau pouvant être définie quantitativement. Toutefois on admet qu'une resistance faible, dégradation élevée, un ramollissement prématuré et un gonflement excessif , ont un effet défavorable sur la marche des hauts fourneaux. Bien que l'influence négative de ces phénomènes a été mise en evidence par un grand nombre de résultats de marche, les valeurs limites qui peuvent être tolérées ne sont pas bien connues.

Dans ce modeste travail, nous avons essayé de donner quelques résultats concernant l'application des bentonites des gisements de Mostaganem dans la preparation des pellets à partir des mineraux de fer de l'OUENZA .

B P A R T I E T H E O R I Q U E

- I . la bentonite
- II . les Minerais de Fer
- III . Pelletisation

# I . La bentonite .

## I. i Introduction :

Le terme " bentonite " designe une argile particulière découverte vers la fin du dix neuvième siècle près de Fort Benten ( Wyoming ) aux USA.

Le composant minéralogique principal de la bentonite est la montmorillonite . Sous sa forme brute, la bentonite est une roche tendre, onctueuse au toucher et presente des teintes qui varient du blanc au jaune brúnâtre.

Selon l'étude originale de la bentonite est une cendre de composées de volcans eteints.

L'importance economique de ce materiau reside principalement dans le fait qu'il susceptible d'augmenter considerablement de volume quand il est plongé dans l'eau.

Les gels de bentonite manifestent le phenomène de Thixotropie, c'est à dire qu'ils epaississent durant un repos prolongé, et reprennent leur viscosité normale par simple agitation, cette operation peut être répétée indefiniment tant que le séchage ne dépasse pas 200°C, et laisse dans la matière 5 % d'eau environ ( 5 ) .

## I . 2 Structure et composition

Les cristaux de montmorillonite sont des particules très petites.

Un cristal de montmorillonite, isolé ne permet pas d'obtenir de diffractions de rayon (X) .

La composition de la montmorillonite varie d'une bentonite à une autre, soit par sa structure, soit par la nature même des ions échangeables. Par conséquent, les caractéristiques des bentonites peuvent varier d'un gisement à un autre.

Voila, pourquoi plusieurs chercheurs ont fait des suppositions pour expliquer la structure des montmorillonites (Hoffman et collaborateurs en 1933 Marshal en 1936, Hendrix en 1942 etc ... ).

Selon, la conception faite à partir de ces differentes suppositions, la montmorillonite se compose de deux feuillets ( 4 ) principaux :

- a ) le premier feuillet constitué de tetraédre (Si O4)<sup>4-</sup> est designé par " couche tetraédre " la projection de la couche tetraedrique sur le plan XOY ( voir fig I et 2 ) fait apparaitre les motifs hexagonaux de l'empilement des oxygènes dont les centres sont occupés par des ions hydroxy-les ( OH<sup>-</sup> )

Figure 1.2.1

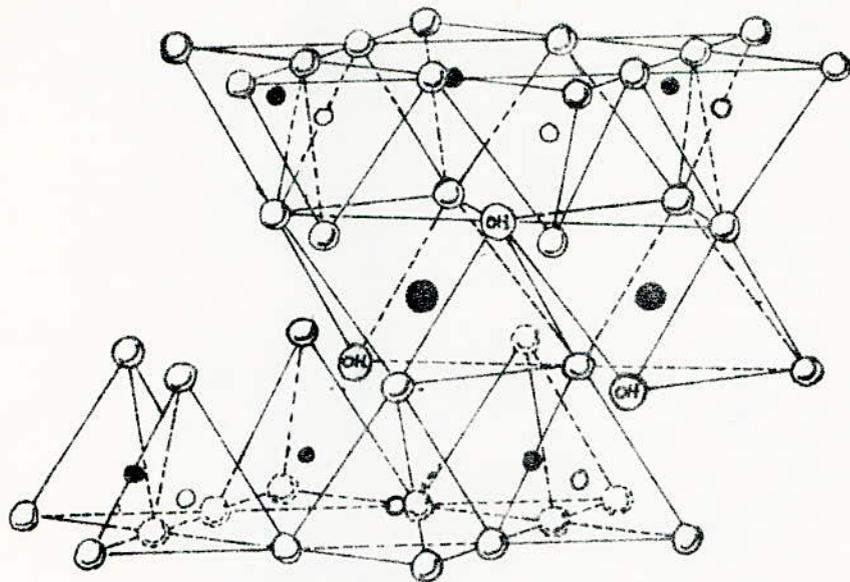
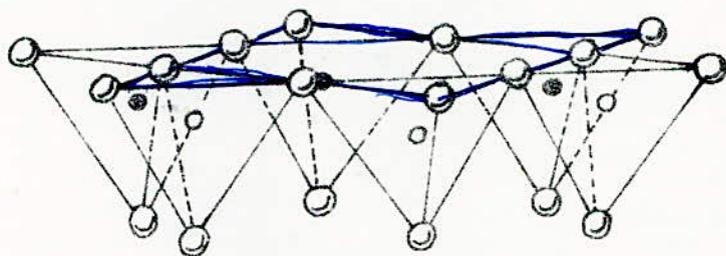


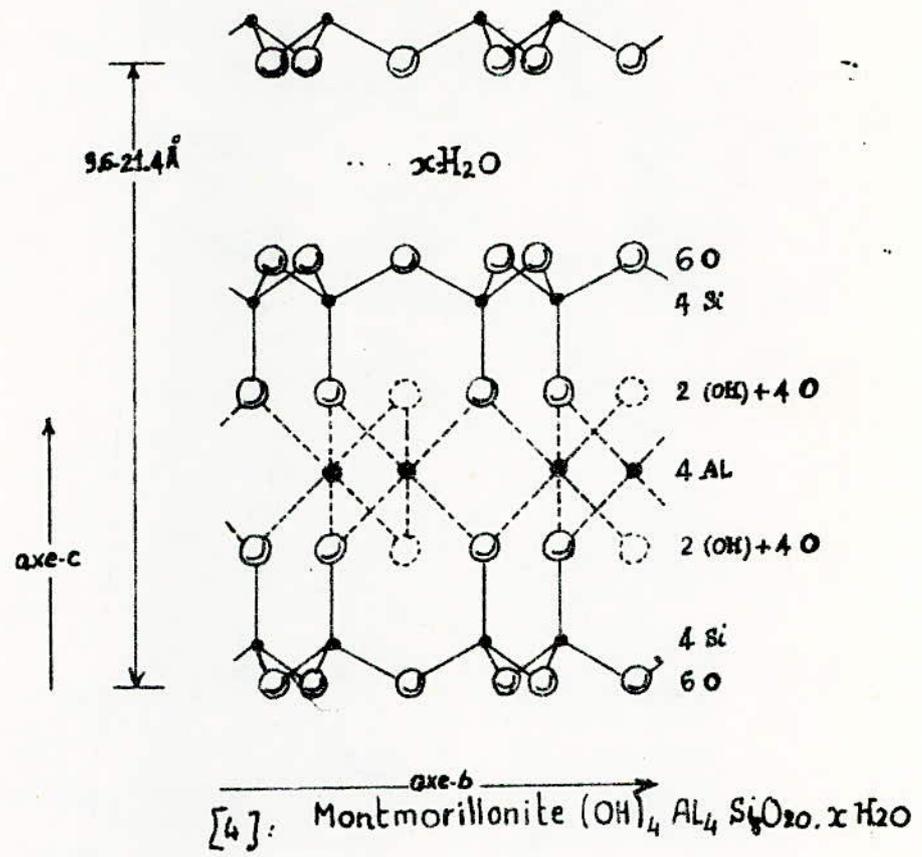
Fig 1  
cations échangeables



○ OXYGÈNE OH HYDROXYLE ● Al, Fe, Mg  
● et ○ Si, occasionnellement Al.

Structure de la montmorillonite [4]

Figure I-2-2



-b) le second feuillet ou " couche octaédrique " est constituée d'octaédres formés par deux ions  $O^{2-}$  et 4 ions  $(OH^-)$ .

Leurs centres sont occupés par un atome métallique trivalent tel que ( Al ), di valent ( Mg ) ou même monovalent ( Li ) .

Il existe des atomes d'oxygène qui sont communs aux couches de tétraédres et d'octaédres . Ces atomes peuvent occuper une partie des places des groupes  $(OH^-)$ . Il peut y avoir également des couches composées uniquement d'atomes d'oxygène, ce qui explique la présence de liaisons fortes dans un plan et de liaisons faibles dans un autre .

Cette particularité importante dans la structure de la montmorillonite explique le mécanisme de gonflement des bentonites : " L'eau introduite au contact des molécules, de bentonite est attirée et s'insinue entre les feuillets, en les éloignant les uns des autres ; à mesure que progresse le mouillage , les particules gonflent dans d'énormes proportions, puis subissent un clivage le long des feuillets, ces derniers se dispersent alors en suspension colloïdale'.

I. 3 Analyse chimiques des bentonites ( 4 ) .

Differentes analyses des bentonites de diverses origines sont données dans le tableau suivant .

tableau I - i

ANALYSE DES BENTONITES ( 4 ) .

Composé	Echantillon , composition en %		
	(1)	(2)	(3)
Si O <sub>2</sub>	55.44	51.52	67.42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.14	19.03	15.83
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.67	1.98	0.88
Fe O	0,30	-	-
Mgo	2.49	3.08	1.29
CaO	0.50	0.16	2.64
K <sub>2</sub> O	0.60	1.36	
Na <sub>2</sub> O	2.75	1.17	
Ti O <sub>2</sub>	0.10	-	-
H <sub>2</sub> O (110°C)	14.70 (a)	14.55	10.83(a)
H <sub>2</sub> O (900°C)	8.21		
TOTAL	100.69	100.06	99.98

1: Wyoming U S A  
2: Maghnia,Algerie (a) : teneur en eau .  
3: Pozza, Italie

I. 4 Utilisation des bentonites :

Très économique par l'exploitation peu onéreuse, de la simplicité de la technologie, les bentonites ont été utilisées dans plusieurs domaines technologiques, en particulier dans les céramiques, les bétons, la papeterie comme charge de pâte ou comme agent de desencrage, le caoutchouc où elles apportent au latex des propriétés adhésives ( 5 ) intéressantes qui se manifestent même dans les dispersions très diluées, comme liant des sables pour la préparation des moules pour la fonte des métaux, en tant que catalyseur dans le cracking des substances organiques, decolorant des huiles et des graisses.

Elles sont également utilisées dans la préparation des boues de forage dans la recherche du pétrole et du gaz; dans le traitement des fibres, et enfin dans l'industrie de pelletisation des minerais de fer etc ...

a) Utilisation en génie civil :

Les principales propriétés des bentonites utilement mises en cause dans ce domaine sont : la plasticité, la granulométrie, l'imperméabilité et enfin leurs caractéristiques chimiques et thixotropiques.

La plasticité est la propriété essentielle des argiles; les mesures d'analyse granulométrique ont permis de montrer que l'état argileux était en rapport étroit avec l'extrême finesse des constituants ( 5 ).

- Adjuvants et Mortiers : l'addition de bentonite au ciment diminue considérablement les fuites.

- Agglomération des graviers : En petites quantités de l'ordre de 0,5 % en poids, la bentonite facilite l'agglomération des graviers.

- Imperméabilisation : Une suspension de bentonite pénètre dans les pores du matériau perméable, et constitue un écran étanche.

Egalement, les bentonites sont utilisées dans les travaux de fondation, et les constructions de routes telles que la stabilisation des émulsions d'asphaltes.

b) Catalyse : Cracking catalytique

Après avoir subi un traitement acide ( 15 ), l'argile lavée est mise sous forme de grains de tailles contrôlées : grains de 1,3 à 3 mm pour les opérations en lit fluidisé, ou en poudre de 20 à 150 microns pour la fluidisation.

La calcination des grains d'argile à 500 - 600°C permet de donner une résistance mécanique et une stabilité thermique convenable à une charge catalytique .

Les montmorillonites activées sont également utilisées comme catalyseur des réactions d'alkylation , d' <sup>e</sup> déshydratation et d'isomérisation .

### c) Exploration pétrolière

La demande croissante de l'industrie du pétrole a contribué au développement de nombreux gisements de bentonite .

Leur utilisation aux USA dans la préparation des boues de forage remonte aux années 1928 où la bentonite ( Wyoming ) fut utilisée pour la première fois , depuis les argiles sont étudiées pour considérer leurs teneurs en sable et en eau , P.H. , rendement en boue etc ...

On définit le rendement d'une argile comme étant le nombre de barils de boue d'une viscosité donnée obtenu à partir d'une tonne dispersée dans l'eau .

Les bentonites typiques des boues de forages sont celle du Wyoming dont la majeure proportion d'ions échangeables concerne le sodium et le calcium : Le rendement en boue à 15 cp est entre 100 - 125 barils/ tonne .

### d) Les bentonites organophiles ( 5 ) .

Sous la marque " Bentone " La National Lead CO . ( ~~Baroid~~ DIVISION ) a commercialisé des produits nouveaux , dérivés des bentonites .

Leur découverte est le résultat des travaux du professeur Hauser et ses collaborateurs .

Le professeur Hauser réussit par une réaction d'échange à préparer des bentonites organophiles.

Ces complexes hydrophobes sont capables de se disperser et de former des gels dans les liquides organiques . Les études poursuivies en même temps par le Dr JORDAN aboutiront à la mise au point des bentones 18 et 34 .

La bentone 34 est le composé d'ammonium quaternaire bentonite obtenu par l'échange de base entre la bentonite et le chlorure de diméthyl-dihexadécyle .

#### Utilisation des bentones

Parmi les différentes utilisations des bentones, Le Professeur Chitour ( 5 ) cite le cas de la bentone 34 dont le champ d'application est très vaste et varié :

- 1) Utilisation dans les peintures : Elle permet le maintient des pigments en suspension , et donne à la peinture une stabilité à la température. La nature hydrophobe de la bentone intervient dans la resistance élevée qu'elle presente vis à vis de l'eau .

- 2 ) Agent stabilisant des mousses.
- 3 ) Utilisation dans la fabrication d'encre d'imprimerie.
- 4 ) Utilisation dans les graisses .
- 5 ) Utilisation en chromatographie :

La bentone 34 possède des propriétés adsorbantes selectives vis à vis des isomères du xylene , la bentone 34 retient micux l'isomère para que l'ortho ou le méta .

## II Les Minerais de fer.

Le terme "minerai de fer" désigne toute substance ferrugineuse susceptible d'être utilisée de façon économique pour la production de la fonte.

Tous les composants du minerai qui sont indésirables dans la fabrication du fer sont des impuretés. Cependant, la minéralogie du minerai de fer ne se prête pas toujours à une élimination aisée de certaines de ces impuretés par les procédés ordinaires de traitement de minerai.

Certaines impuretés, notamment la silice, l'alumine et la chaux jouent un rôle positif important dans l'élimination d'autres impuretés du fer fondu.

### II. 1 Constituants majeurs :

II. 1. i. Les composés du fer : La teneur en fer des minerais utilisés dans le haut fourneau varie largement de 30 à 71 % environ.

Cependant, la valeur du minerai ne dépend pas exclusivement de sa teneur en fer. Il faut aussi tenir compte des éléments auxquels le fer est combiné dans le minerai, de la teneur en éléments volatils et de la proportion relative des différents composés scorifiants.

L'hématite est plus facile à réduire dans un haut fourneau que la magnétite, bien que la quantité d'oxygène combinée au fer y soit plus importante.

La magnétite dense est plus aisément réduite si, avant d'être chargée dans le haut fourneau, elle subit un grillage en atmosphère oxydante jusqu'à sa conversion en oxyde ferrique presque pur.

Aussi, dans l'agglomération ou la pelletisation de concentré de magnétite à grain fin, est-il important que la magnétite atteigne un haut degré d'oxydation. Les minerais à haute teneur en silicates de fer ont un faible degré d'oxydation et sont difficilement réduits dans le haut fourneau.

Les géotites et les carbonates de fer contiennent de l'eau de constitution et du gaz carbonique qui sont éliminés dans la partie supérieure du haut-fourneau.

Pour comparer des minerais ayant une teneur différente en fer, des siderurgistes considèrent la quantité de laitier formé par tonne de fonte en y comprenant le laitier des cendres du combustible de même que la chaux ou la chaux calcinée qui sont généralement ajoutées pour donner au laitier la composition voulue.

a) Silice (Si O<sub>2</sub>)

C'est l'un des composants les plus importants de la gangue d'un minerai de fer. Durant la fusion, elle représente avec l'alumine ( Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub> ) le principal constituant du laitier acide. La silice peut être présente sous forme de quartz, d'alumino - silicates ferrifères, tels que chlorites, amphiboles, pyroxènes, ou dans des minéraux argileux. Pour évaluer la quantité de chaux nécessaire à la neutralisation de la silice dans le minerai, on convient de prendre pour point de départ une certaine alcalinité du laitier définie par l'expression  $i_p = \frac{CaO + MgO}{Si O_2}$

La quantité de silice tolérée dans le minerai est déterminée par le volume du laitier dans le haut fourneau, volume qui dépend tout d'abord de la proportion de soufre dans la charge et ensuite du laitier lui-même qui doit être suffisamment fluide pour pouvoir recouvrir le fer liquide.

b) Alumine Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub>

L'alumine en quantités nettement inférieures à la silice, est rarement utilisée comme fondant dans les hauts fourneaux, elle se rencontre comme impureté dans un grand nombre de tout-venants, et elle apparaît en conséquence dans le laitier. Son caractère amphotère lui permet de se comporter soit comme acide, soit comme base.

Dans les laitiers les plus siliceux, l'alumine peut intervenir sous forme d'alumino-silicates, et, dans des laitiers fortement alcalins, en présence de beaucoup de chaux, elle peut former des aluminates de calcium.

La fluidité du laitier alcalin est accrue s'il contient 10 à 15% d'alumine, et ainsi, il est possible de travailler avec un laitier plus alcalin, ce qui facilite l'élimination du soufre. ( 6 ).

c) Chaux :

La magnésie et la chaux sont les constituants dominants d'un laitier alcalin. La chaux présente dans les minerais de fer, soit sous forme de calcite, soit en tant que constituant des silicates et d'alumino-silicates complexés, est un composé scorifiant très apprécié durant la fusion. Elle a pour rôle de former avec les cendres de coke, la gangue et les autres impuretés du foyer, un laitier fluide, c'est à dire, de réaliser une composition chimique qui puisse assurer efficacement le mélange du laitier avec la fonte.

Sauf, dans les fours alimentés par des minerais ( en pellets ) fortement autofondants , on ajoute généralement du calcaire à la charge , ce qui fournit un complément de chaux pour le bon déroulement du processus de fusion .

d) Magnésie ( MgO ).

La grande viscosité des laitiers renfermant des teneurs en alumine supérieures à la normale peut être diminuée si on augmente leur teneur en magnésie .

La dolomie , qui est essentiellement un carbonate de calcium et de magnésium , est parfois ajoutée conjointement au calcaire dans les hauts fourneaux , ce qui améliore leur rendement .

II. 2 Constituants mineurs :

Parmi les constituants décrits ci dessus , quatre ( Si O<sub>2</sub> , Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub> , Ca O et MgO ) sont indispensables à la formation du laitier dans le haut fourneau . Le cinquième , l'oxyde de manganèse , est un constituant de type plutôt spécial puisque la majeure partie de cet oxyde est réduite à l'état de métal .

De faibles quantités de silice sont également réduites à l'état de silicium qui entre dans la composition de la fonte .

Les autres composés chimiques : les constituants mineurs ou impuretés qui peuvent tous se rencontrer dans un minerai de fer - se classent en 3 groupes selon leur comportement durant le processus de réduction .

- a ) Ceux qui ne sont jamais réduits dans le haut fourneau et de ce fait n'ont aucun effet sur le fer . Ce sont les composés d'éléments chimiquement actifs comme Na<sub>2</sub>O , K<sub>2</sub>O , les oxydes d'autres alcalins et ceux des alcalino - terreux .

- b ) Impuretés qui peuvent être partiellement réduites. Elles comprennent les sulfates , les sélénates et le titane ( Ti O<sub>2</sub> ) ainsi que des composés tels que Cr , V , Co et de certains éléments rares .

- c ) Impuretés totalement réduites dans le haut fourneau, ces impuretés comprennent tous les composés de l'arsenic et du phosphore .

### II . 3 FUSION DU MINERAI DE FER.

Un haut fourneau de minerai est un four où la dimension verticale de la salle de chauffe est d'environ 3 fois sa dimension horizontale. Le minerai de fer , le coke ou le charbon de bois et du fondant en quantité nécessaire sont chargés par le haut du haut fourneau tandis que l'air est soufflé par le bas . Le coke est le combustible qui fournit la chaleur, et son carbone se combine à l'oxygène pour donner des oxydes de carbone . Le monoxyde de carbone ainsi formé est le principal réducteur des oxydes de fer du minerai, qu'il convertit à l'état de métal .

L'air soufflé par des tuyères dans la zone de fusion est préchauffé dans un système comprenant au moins trois fours dont les briques qui constituent les parois sont disposées en damier et laissent entre elles des espaces vides . Dans ces fours le feu est entretenu par les gaz libérés par le haut fourneau.

Un système de deux mécanismes à cloches disposé au sommet du haut fourneau interrompt la libération des gaz chauds et permet ainsi son chargement .

Le fer liquide et le laitier formés par la gangne et le fondant sont retirés périodiquement à la partie inférieure du creuset par un trou de coulée dans le metal chaud et le laitier.

Dans les fours modernes , une partie de la chaleur est fournie par la combustion de gaz naturel , de pétrole ou de charbon pulvérisé que l'on injecte dans la zone de fusion situées à la partie inférieure du four .

La hauteur des hauts fourneaux varié de moins de 9 mètres à plus de 30 mètres , et leur capacité de 100 à plus de 4000 tonnes de fer liquide par jour .

Le haut fourneau représente le moyen le plus efficace connu pour fondre le minerai de fer . Cependant , il nécessite l'utilisation d'un combustible, coke ou charbon de bois par exemple , suffisamment résistant pour supporter à la fois son propre poids et celui du minerai dans la cheminée du haut fourneau; par ailleurs un tel combustible ne doit pas former une masse imperméable dans la cheminée .

Le laitier idéal du haut fourneau renferme des quantités stoechiométriques à peu près égales d'acides et de base ; la silice (  $SiO_2$  ) et les composés du phosphore interviennent généralement comme acides ; le calcaire (  $CaCO_3$  ) et la dolomite (  $CaMg(CO_3)_2$  ) sont les fondants basiques.

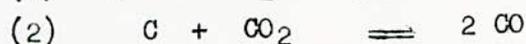
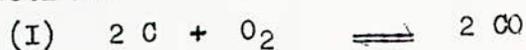
Certains minerais renferment des proportions presque égales d'acides et de bases . Ces minerais , designés sous le nom d'autofondants, ont plus de valeur que les minerais auxquels une importante quantité de fondant doit être ajoutée pour entraîner leur fusion .

#### II . 4 Réduction des minerais de fer.

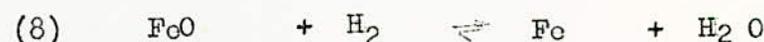
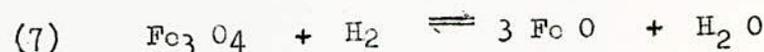
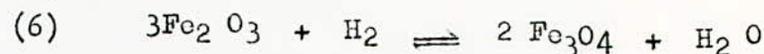
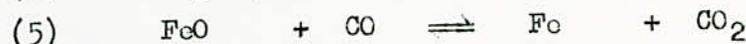
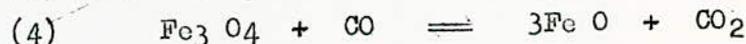
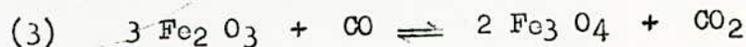
Les trois principaux oxydes de fer sont :

- i) L'hématite :  $\text{Fe}_2 \text{O}_3$  : 69.94 % Fe —
- ii) La magnetite :  $\text{Fe}_3 \text{O}_4$  : 72.36 % Fe —
- iii) La wustite :  $\text{FeO}$  : 77.78 % Fe —

En fait, il y a seulement trois substances qui peuvent intervenir dans la réduction du minerai de fer : le carbone , le monoxyde de carbone et l'hydrogène. La réduction directe des oxydes de fer par le carbone solide, coke ou charbon, ne joue qu'un rôle secondaire dans ce contexte particulier car la véritable réduction se fait par le monoxyde de carbone d'après les réactions :



Les réactions de réductions qui se produisent , entre les oxydes de fer et le monoxyde de carbone ou l'hydrogène s'écrivent comme suit :



Reduits à des températures en dessous de  $900^\circ\text{C}$ , les oxydes de fer forment des masses poreuses gris sombres , qui conservent la dimension des morceaux et des particules originels . Sauf si le minerai est finement dimensionné , une température  $950-1000^\circ\text{C}$  est nécessaire pour obtenir une réduction complète dans un temps raisonnable (1)

A 1000°C le produit commence à se sinteriser , et à 1200°C il forme une masse poreuse et pâteuse .

A 1300°C le carbone s'il est présent , est rapidement absorbé , avec fusion de la masse , et le fer liquide se produit à des températures de 1300 à 1500 °C .

le degré de reduction du minerai de fer est exprimé par la relation =

$$\left( \frac{\text{O}_2 \text{ Combiné dans le minerai} - \text{O}_2 \text{ Combine dS le produit}}{\text{O}_2 \text{ combiné dans le minerai}} \right) \times 100.$$

ou par le pourcentage de metallisation :  $\frac{\text{Fer metal dans le produit}}{\text{Fer total dans le produit}} \times 100$

### III Pelletisation des mineraux de fer

#### III. 1. Introduction

Pour être utilisable , le minerai de fer ne doit être ni trop fin, ni trop grossier , et il souhaitable qu'il soit constitué de grains de taille uniforme ou qu'il révèle une graduation régulière de petites particules aux grandes. On obtient ces caractéristiques physiques par concassage, broyage et tamisage .

L'agglomération des mineraux de fer s'étant révélée un procédé capable d'accroître l'efficacité de la fusion a acquis une importance particulière dans le traitement des mineraux de fer. Elle est largement appliquée à une grande variété de substances ferrugineuses à grains fins .

La pelletisation , la sinterisation , ou le briquetage sont les principaux procédés d'agglomération.

#### III i. i. La Sinterisation .

La sinterisation est employée presque uniquement pour la fusion du minerai de fer . Ce procédé consiste à chauffer de façon contrôlée une couche de matériel mixte , humide et à grain fin jusqu'au point de fusion naissante. Le matériel se trouve ainsi aggloméré en un gâteau poreux et cellulaire appelé sinter . Il est ensuite chargé dans un haut fourneau situé non loin de la fabrication du sinter .

#### III. 1. 2. Le briquetage

Le briquetage a pour but d'agglomérer le minerai de fer, quand un produit dense est nécessaire ou quand d'autres procédés se révèlent inapplicables. Le minerai est transformé en briquette au moyen d'un liant à une température proche du point de fusion . Experimentalement, le briquetage a été appliqué pour produire un matériel destiné à la fusion en vue de la fabrication du fer ; commercialement, il est employé uniquement pour produire un matériel adapté au four Martin (6) , et suffisamment dense pour pouvoir s'enfoncer dans le laitier.

#### III. i. 3. La pelletisation .

Un procédé d'agglomération parmi d'autres, la pelletisation consiste à transformer , au moyen d'un liant, les substances ferrugineuses à grains fins en boulettes ( ou pellets ) de taille contrôlée que l'on indure ensuite par la chaleur .

La sinterisation a pendant longtemps été la seule méthode d'agglomération usuelle, et la pelletisation n'est apparue que relativement récemment.

Elle constitue un procédé d'agglomération complémentaire à la sinterisation plutôt qu'un procédé concurrent.

Quand les minerais, et les concentrés peuvent être pelletisés économiquement; ils sont susceptibles de donner un produit qui possède des caractéristiques excellentes en tant qu'aliment des hauts fourneaux et des fours électriques car ils possèdent :

- Une teneur en fer élevée et une composition et des dimensions uniforme .
- Un haut degré d'oxydation. et une forte reductibilité
- Une résistance mécanique et une densité en vrac élevés.
- La qualité de pouvoir se distribuer de façon régulière à travers le haut fourneau .

Les pellets destinées directement au haut fourneau ont , en général une dimension moyenne de 12 - 15 mm , tandis que celles fabriquées pour le four électrique atteignent des tailles de 20 - 25 mm .

### III. 2. Procédés de pelletisation .

#### III. 2. i. Historique :

Le lieu principal d'origine de cette technique ( d'où est venu le flot subséquent de réussites industrielles , est la station Experimentale des Mines de l'Université du Minnesota , U.S.A.. (I) .

Au cours des années 1940 , sous la direction du Dr. Davis, les chercheurs de cette station examinèrent le problème de l'utilisation des minerais de fer à faible teneur du Minnesota avec une attention spéciale accordée aux roches ferrifères contiques aux gisements principaux du Mesabi. Ces minerais à faible teneur ( 25 - 30 % Fe ), connus sous le nom de "taconites", sont exceptionnellement durs et abrasifs. Ils constituent la roche d'origine dont sont dérivés, par un procédé de lessivage et d'oxydation naturels, les hématites à haute teneur du Mesabi. Le minéral qui contient le fer récupérable est une magnetite finement disséminée, et le minéral doit être broyé à environ 200  $\mu$  en dessous de 325 mesh pour obtenir sa libération. Après enrichissement on obtient un concentré qui contient environ 65 % de fer et 8 % de silice .

En 1945 , les recherches et les essais d'application industrielle effectués à la station Experimentale avaient fait des progrès considérables, car on avait non seulement mis au point une technique de concentration utilisable, mais des procédés nouveaux pour pouvoir employer ces concentrés ultra-fins étaient également à l'étude .

Le concentré humide était " boulette " dans un tambour tournant et ensuite durci par un traitement thermique approprié dans un four à cuve .Les pellets durcies , d'environ 12 à 25 mm de diamètre, semblaient constituer un aliment convenable pour les hauts fourneaux et leur essai dans un petit haut fourneau experimental avait été encourageant .

Aux Etats Unis , les sidérurgistes et les mineurs de fer comprirent que cette techniques était susceptible de prolonger la vie des ressources décroissantes en minerai de fer du Minnesota et du Michigan en mettant en valeur les matériaux à faibles teneur inutilisables jusqu'à ce jour, pour remplacer les minerais riches .

III . 2. 2 Methodes de preparation des pellets :

La preparation des pellets necessite un traitement en trois etapes des materiaux d'origine, à savoir :

- a) Un broyage fin pour obtenir la composition granulométrique requise .
- b) le bouletage du minerai broyé fin , ou du concentré pour produire des pellets crues : ( appelées pellets vertes ) .
- c) le transport des pellets crues, et leur durcissement à des température de rapprochant de celles utilisées pour la sintérisation, afin d'obtenir des pellets finies pouvant résister à la manutention , au transport et au traitement en haut fourneau.

III. 2. 2. i. Broyage du minerai .

Pour pouvoir être convenablement bouletés les minerais et les concentrés fins doivent avoir une composition granulométrique bien définie. Le problème consiste à équilibrer la nécessité de réduire la quantité de matériaux grossiers avec le danger de produire une quantité excessive d'ultra-fines. Dans une extrémité, l'excès de particules grossières pourra empêcher le bouletage continu de se produire, on donnera une pellets brûlée grossière de mauvaise qualités.

Dans l'autre extrémité , une surface spécifique des particules trop élevée donnera , une pellet trop compacte pour résister à la rupture dans l'appareil de broyage .

La littérature (7) montre que la capacité de rétention d'humidité d'un matériau donné augmente en même temps que la surface et les particules s'agglomèrent plus facilement. De plus, pour une pellet d'un diamètre donné la résistance à la compression augmente en même temps que la surface. Toutefois, comme le broyage est une opération couteuse, le matériau doit être broyé seulement jusqu'à l'obtention de la surface requise pour donner à la pellet verte une résistance acceptable à la compression .

III. 2. 2. 2 Formation des pellets :

La théorie de la pelletisation pourrait bien s'appeler la théorie du bouletage , car le succès ou l'insuccès de toute l'opération de la pelletisation dépend principalement de la fabrication, au cours de l'opération de bouletage, de pellets crues de qualité adéquate. Le bouletage se fait dans un tambour , un disque ou un cône ( voir III. i ). Par suite de la rotation et de la pente de l'appareil de bouletage, le concentré ou le minerai finement broyé roule à l'intérieur de l'appareil en progressant lentement vers le bord de décharge .

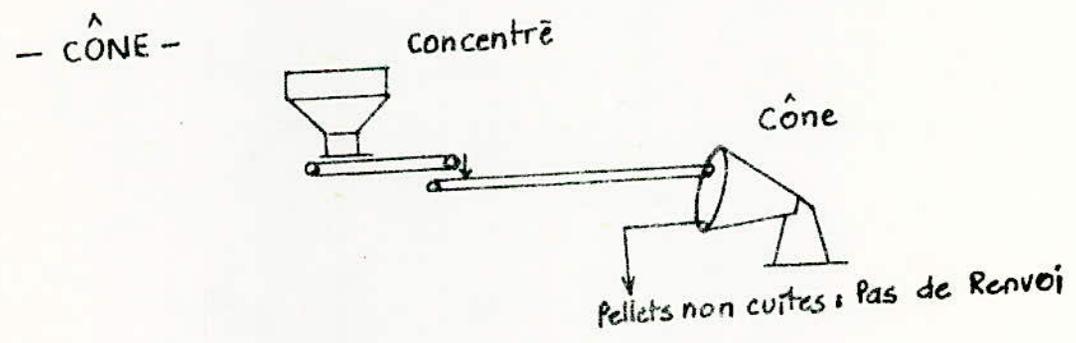
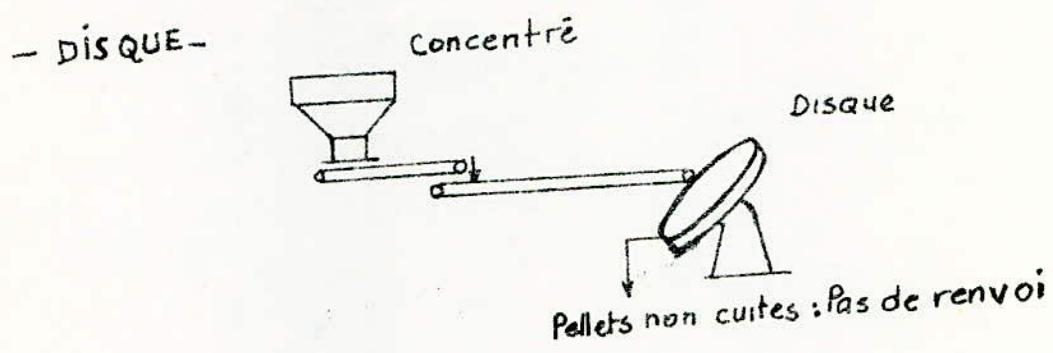
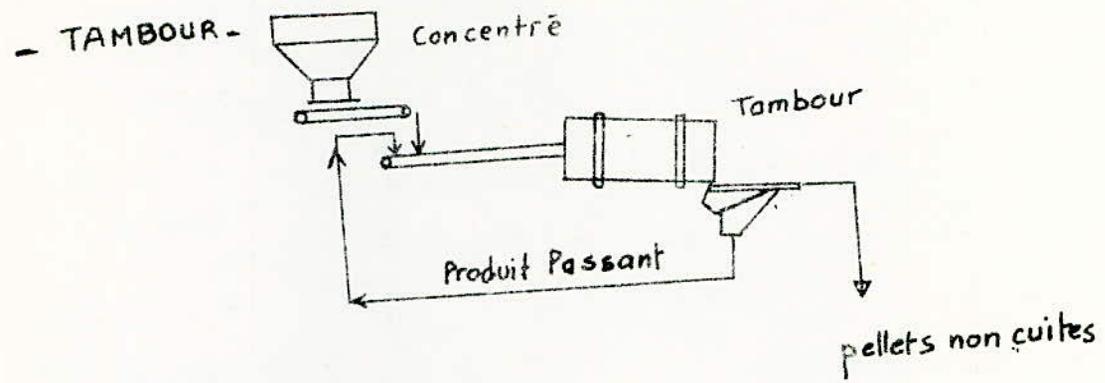
Une particule de minerai finement broyé, enrobée d'humidité, entre en collision avec les particules adjacentes de minerai et , par l'effet de la tension superficielle , elles fusionnent en un noyau. Ceci se répète de nombreuses fois et des embryons de boulettes se forment à partir d'un certain nombre de ces noyaux .

La rotation de l'appareil produit une rotation, dans le même sens, des embryons de boulettes en, contact avec la paroi de l'appareil et ce mouvement se transfère aux autres pellets de la charge, le tout se mettant en un mouvement de rotation continue .

Les particules de minerai qui se trouvent dans cette masse en rotation adhèrent aux embryons de boulettes et les font croître petit à petit.

Une fois que les particules se sont jointes, l'eau contenue dans la masse forme une pellicule autour d'elles et, au fur et à mesure que des particules minuscules se rejoignent pour former une pellet, un lacis continu de capillaires chargés d'eau se forme à l'intérieur de la pellet .

Figure III.1.



trois méthodes de ballage : TAMBOUR, DISQUE, CÔNE.

La tension superficielle de l'eau exerce une tension dans chaque capillaire , comme sous le terme de " potentiel de succion" ), et permet la cohésion des pellets crues.

L'effet de rotation et de pétrissage dans l'appareil de boulettage rend les pellets plus compactes et permet à l'action capillaire de se développer en chassant l'air et l'eau vers la surface de chaque pellet .

Pour pouvoir agglomérer un minerai de fer fin , il doit être broyé assez finement pour permettre le développement des forces capillaires .

Dans une poudre à grains relativement gros et de taille homogène, il n'existe pas assez de capillaires pour développer le potentiel de succion total suffisamment pour qu'il retienne les particules en une masse sphérique.

Aux débuts de la pelletisation , le boulettage des concentrés humides se faisait de préférence dans des tambours munis de radoirs spéciaux . Les disques furent ensuite employés et enfin la Steel CO . de Lebanon , Pennsylvanie , mit au point le cône de boulettage(3). Le tambour produit un mélange de pellets vertes dont les diamètres varient beaucoup et dont les pellets trop petites doivent être éliminées par criblage pour retourner dans le circuit. Le disque et ce cône donnent des pellets dont les diamètres varient dans des limites de dimensions relativement étroites. Le criblage n'est donc pas strictement indispensable , mais il est souhaitable d'éliminer les fragments de pellets et les fines non pelletisées pour assurer une meilleure perméabilité des gaz dans la couche des pellets à l'intérieur de l'appareil de brûlage.

### III.2. 3. Durcissement des pellets .

La résistance des pellets vertes (crues) est très faible et leur transport à l'appareil de brûlage doit être effectué sans les briser et sans affaiblir leur structure. Il existe deux méthodes générales pour éviter les bris des pellets ; soit en y ajoutant un liant plastifiant soit en employant un équipement de manutention spécial qui permet le déplacement doux des pellets préparés .

On trouve trois techniques principales qui partagent les procédés de durcissement des pellets à savoir .

- i) le brûlage dans un four vertical
- ii) le brûlage sur grille mobile
- iii) le brûlage sur un combiné, grille mobile - four rotatif.

Les tableaux III. 1, III. 2, III. 3 , montrent l'expansion de l'industrie de la pelletisation depuis 1953 et de la part de la production mondiale par procédé, par fabricant et par matériaux et enfin le tableau III.4 montre la production mondiale de pellets jusqu'à l'année 1972 .

tableau III. 1

Part de la production Mondiale par procédé et par fabricant en 1967. ( 3 )

	%
Grilles Lurgi - Dravo	33.5
Fours à cuve	23.5
Grilles - fours	23.3
Grilles - Mc Kee	14.6
Midland - Ross	2.6
Autres Grilles	2.5
	100

tableau III. 2

Part dans la production mondiale par Matériaux et procédés en 1965 . ( 3 )

	Magnetite %	Hematite %	Magnetite et Hematite %	Hematite et monite %	TOTAL %
Part du total	61.6	19.5	14.8	4.1	100 %
Lurgi - Dravo					
Grilles Continues... 5,8		67.6	85.0	45.5	
Autres Grilles					
Continues... 40.3	40.3	6.7	-	54.5	
Fours à cuve	47.3	-	15.0	-	
Grilles - fours	6.6	25.7	-	-	
TOTAL	100	100	100	100	

tableau III. 4

Production Mondiale de Pellets ( 8 )

Année	Production Mondiale million de tonne de pellets	PAYS	% de la production Mondiale
1960	20	USA	36
1965	70	CANADA	22
1972	200	URSS	13
		AUSTRALIE	7
		JAPON	5
		<hr/>	<hr/>
		TOTAL	83
		UNIDO STATISTICS ( 1972 ).	

tableau III. 3

Methodes de brulage ( 3 )

ANNEE	1953	1955	1960	1962	1965	1967
Methodes de brulage exprimée en %						
Four à cuve	100	20	57,3	58.0	25	24
Grille continue	-	80	39.0	34.0	54	52
Grille - Four	-	-	3.7	8.0	21	24

Ref: Nations Unis- " Aspects économiques de la préparation des  
minerais de fer . "

### III. 2. 3. i Procédé Grille - Four

Le procédé grille four mis au point par lepol en europe pour l'industrie du ciment, fut appliqué par Allis - Chalmers ( ACL ) à la pelletisation des concentrés de minerai de fer peu après qu'ils se soient associés avec la société ARTHUR G . Mc Kee pour installer des grilles continues pour pelletisation à la reserve Mining .

Le système ACL comprend : ( fig.III.2 )

Une grille pour le séchage et le prechauffage des pellets vertes, un four pour le durcissement thermique des pellets , et un refroidisseur annulaire pour le refroidissement des pellets et la recuperation de la chaleur sainsible .

Au cours du refroidissement des pellets , de l'air à la température ambiante est soufflé dans le refroidisseur et sa température croît à environ 900°C . Cet air pré-chauffé est alors introduit dans le four comme air de combustion secondaire . Quand ils quittent l'extrémité d'alimentation du four, les gaz sont à environ 400°C et sont alors dirigés vers la hotte de pré-chauffage de la grille d'où ils sont aspirés vers le bas à travers le lit de pellets. Après nettoyage, ces gaz, qui sont maintenant à environ 200°C , sont conduits de nouveau vers le haut de la grille et vers la hotte de séchage et puis sont aspirés vers le bas, à travers le lit des pellets humides d'alimentation pour les sécher .

Les pellets sont transferées de la grille au four à une température d'environ 700 - 900°C , et sont durcies à des températures d'environ 1200 - 1300°C , selon la nature du minerai .

Les pellets refroidies sont dechargées à une temperature d'environ 120°C .

Le système ( ACL ) a gagné en popularité au cours de ces dernières années .

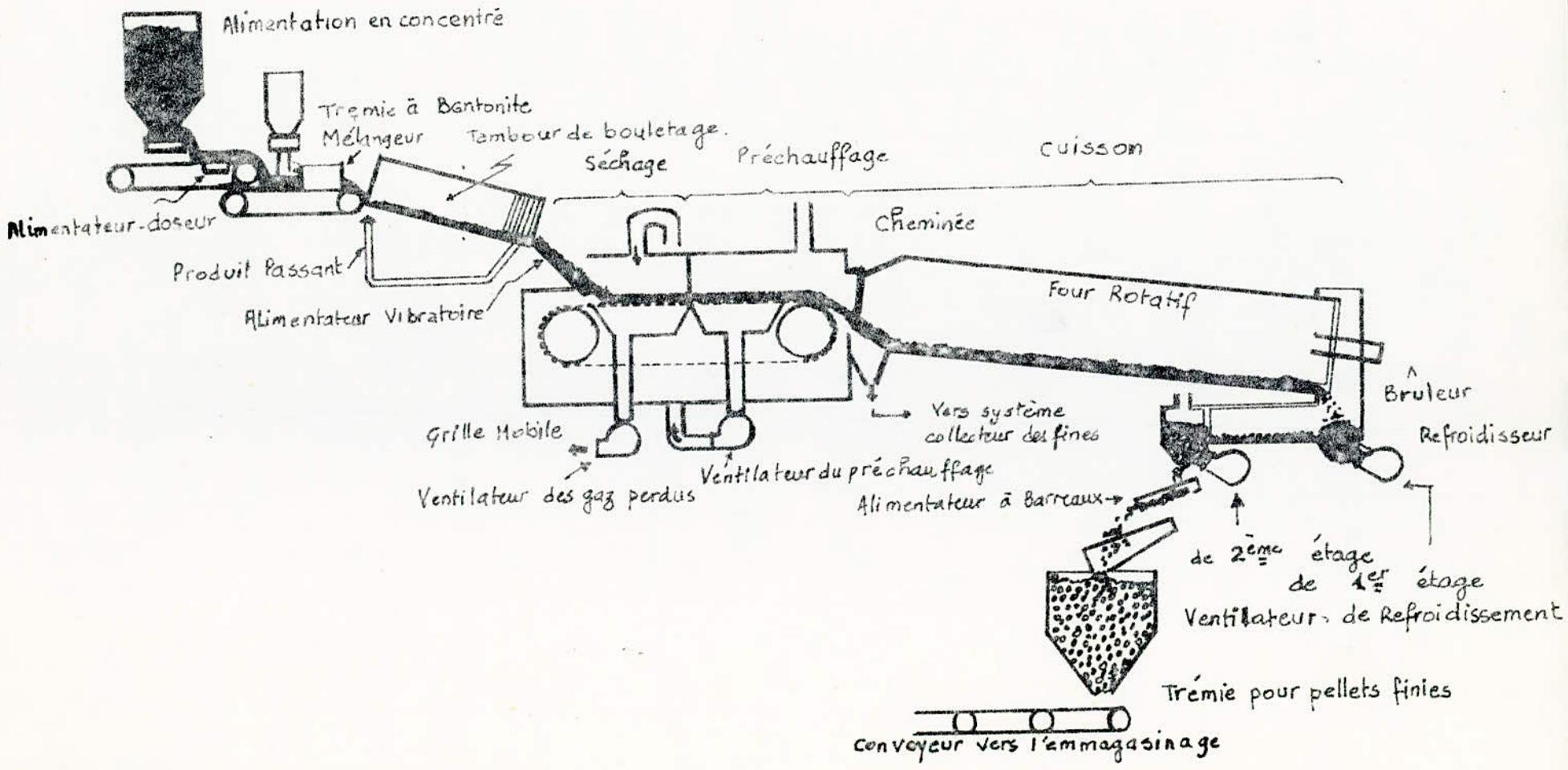
### II .2. 3.2

#### Procédé par Grillecontinue

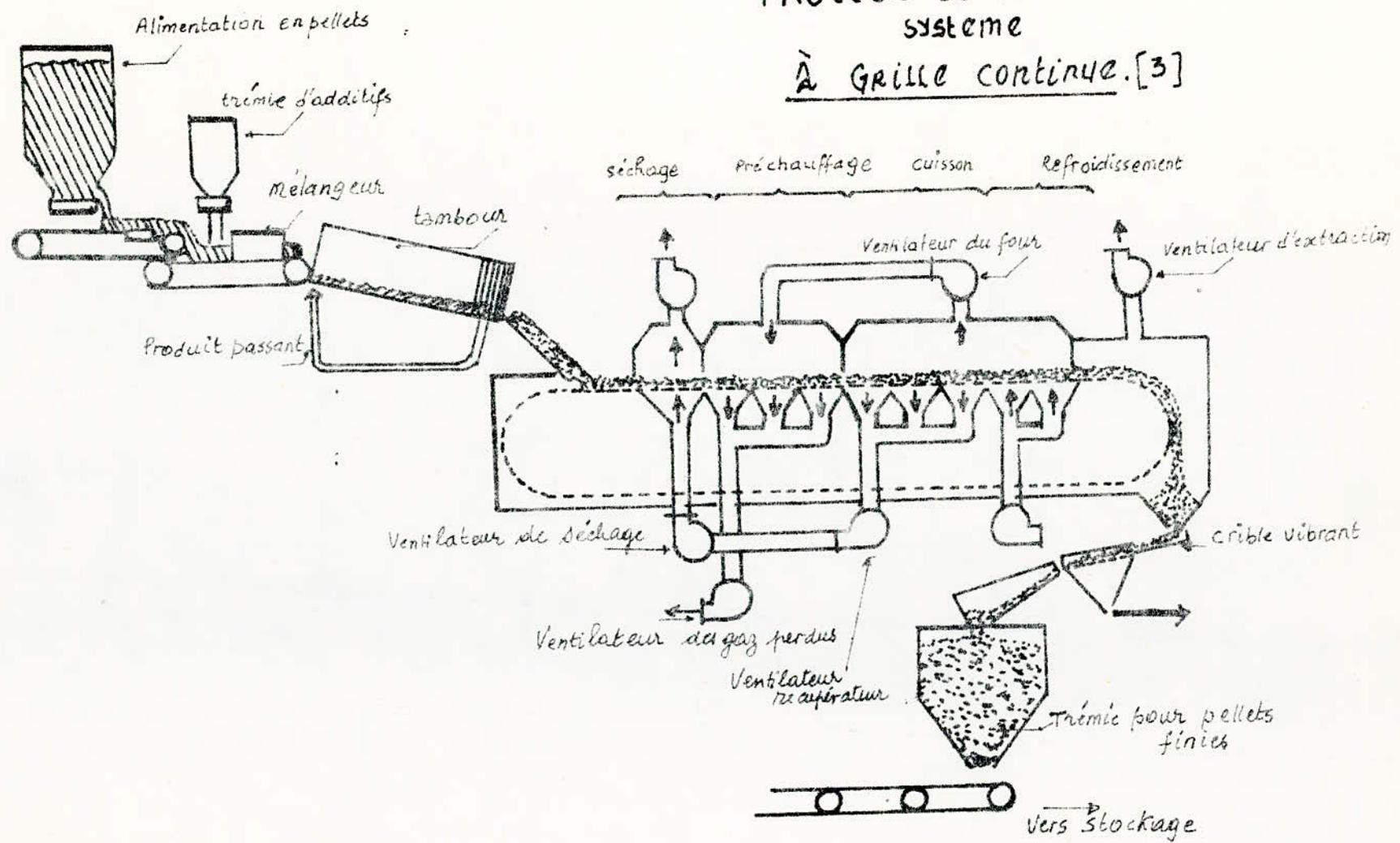
La figure III. 3 montre une machine typique à grille continue, correspondant au cycle généralement adopté de séchage en courant de gaz ascendant, brûlage en courant descendant, et refroidissement en courant ascendant .

# Procédé de Pelletisation

## Systeme Grille-Four. [3]



# PROCÉDÉ de pelletisation système à grille continue. [3]



Les pellets vertes sont presque entièrement sechées dans la première zone, à courant ascendant, de façon à ce que peu pas d'humidité se recondece sur les couches inferieures de pellets quand le courant d'air est inversé, pour eliminer la possibilité que cette couche s'écrase.

Le lit de pellets est ensuite pré - chauffé , brûlé et re-brûle en courant d'air descendant. Quand le font de chaleur a avancé assez bas dans le lit pour assurer une bonne qualité de pellets sur toute son epaisseur, le courant d'air est de nouveau inversé en sens ascendant, pour sauvegarder les pallettes et pour recupérer la quantité maxima de chaleur sensible. Les pellets sortent de la machine à une température qui permet leur manutention sur des bandes convoyeuses en caoutchouc .

Pour la magnetite , la température de séchage en courant ascendant est d'environ 350°C , suivie d'une courte phase de séchage en courant descendant à environ 300°C. Le pré - chauffage et le brûlage en courant descendant sont à environ 900 et 1300°C respectivement .

Pour l'hématite n le cycle du traitement thermique est très semblable, la différence consistant en une zona de brûlage plus longue et une zone de rebrulage courte, parcequ'il n'ya pas de reaction exothermique qui puisse aider à allumer les parties inferieures du lit.

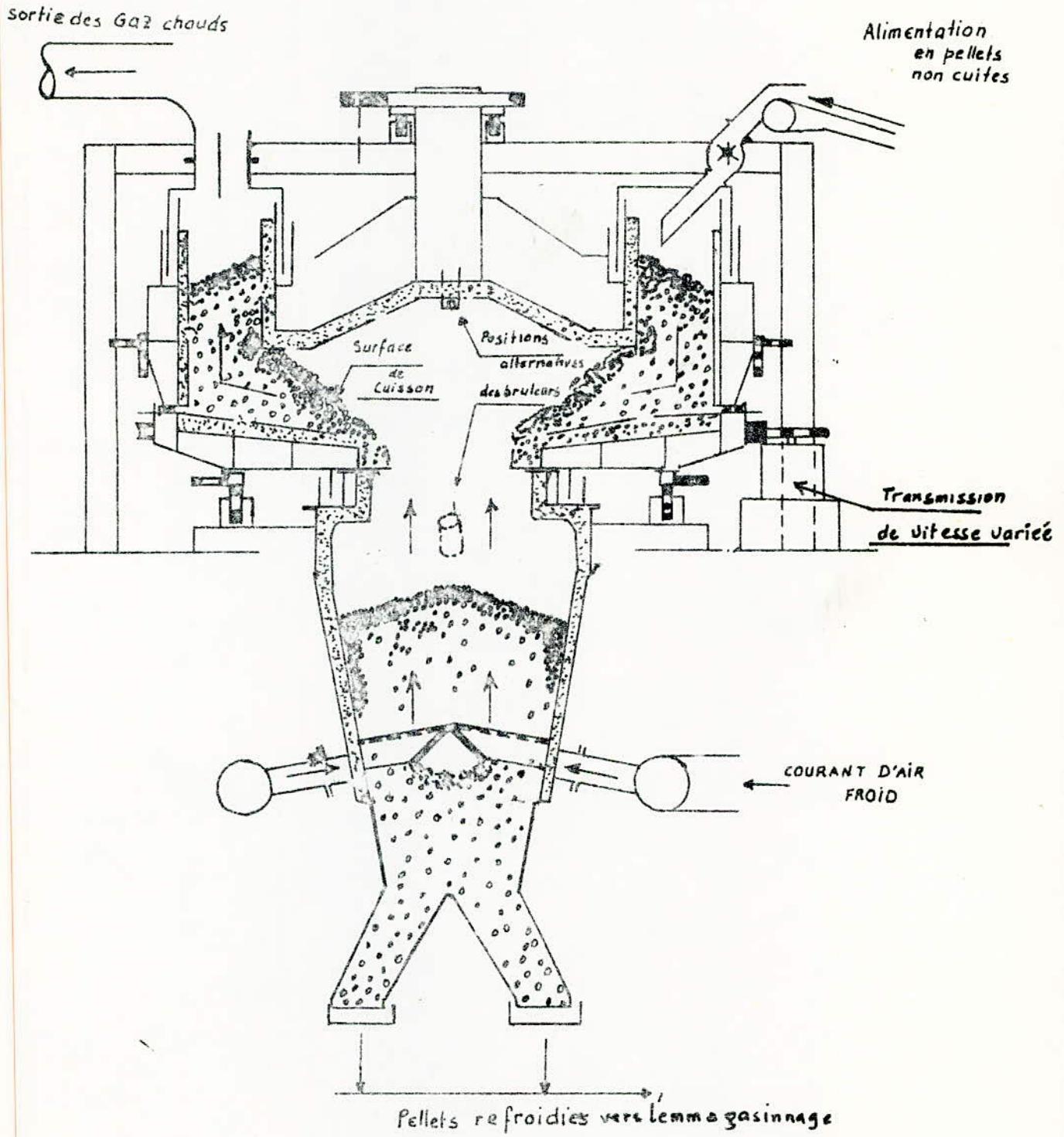
Les besoins thermiques typiques sont : Magnetite naturelle -  
 150000 - 165000 Kcal/tonne  
 hematite : 300.000 - 350 000 /

### II.2. 3. 2

#### Four Annulaire Huntington - Heberlein

Ce four fut mis au point par la " Associated Portland cement CO. Ltd " , Angleterre, pour remplacer le séchoir à grille continue, ainsi que la section de préchauffage , du système grille - four de cimenterie .

Huntington - Heberlein l'ont adapté pour le durcissement des pellets. Les pellets vertes , préparées au préalable, sont introduites dans le four au point indiqué , par un alimentateur en étoile ( voir fig III.4 ), qui agit également comme joint empechant l'entrée d'air .



Coupe Transversale : Four annulaire [3]

A cause de la rotation de la charge, les pellets introduites sont réparties uniformément , sous forme d'une couche annulaire retenue entre les parois cylindriques extérieures et intérieures, qui sont garnies de réfractaires. La couche est soutenue sur une base circulaire garnies de réfractaires munie d'un orifice central de décharge d'un diamètre inférieur à celui de la paroi interne qui supporte les pellets . La charge des pellets adopte son talus naturel entre l'orifice de décharge et la base de la paroi interne, produisant ainsi une surface de brûlage en forme de tronc de cône inversé .

La <sup>base</sup> circulaire est mise en rotation par un entraînement à vitesse variable, et entraîne avec elle la charge de pellets et la paroi de support extérieure des pellets .

Les pellets chauds tombent dans un refroidisseur à air à lit profond qui comporte un ventilateur de soufflage , et l'air chaud à sa sortie est renvoyée dans la zone de brûlage .

### III. 3 CONCLUSION .

Initialement, la pelletisation fut appliqué aux concentrés enrichis qui étaient trop fins pour pouvoir être incorporés dans un mélange normal de sinterisation , mais l'expérience acquise dans l'industrie sidérurgique montra que les pellets possédaient des caractéristiques d'une charge idéale de haut fourneau et présentaient des avantages considérables sur d'autres agglomérés sinters ou sur les minerais rocheux. Les performances mondiales des hauts fourneaux avaient été obtenues avec des charges constituées forte proportion de sinter mélange à un minerai rocheux, mais il existe beaucoup d'exemples de hauts fourneaux ayant fonctionné avec des charges de pellets, qui ont obtenu des meilleurs rendements et des diminution de la consommation de coke .

Les avantages généraux des pellets peuvent cités comme suit :

1) Densité en vrac élevée : ce qui conduit à une capacité de charge augmentée du haut fourneau, et donc à l'augmentation de la quantité de fer contenue par ( m<sup>3</sup>) du haut fourneau.

2) une teneur en fer élevée et une composition chimique uniforme.

3) Une forte résistance mécanique, et résistance satisfaisante en cours de réduction :

4) Etat d'oxydation élevée :

5) Porosité et en particulier la micro-porosité élevée :

6) Bonne reductibilité.

7) Gamme de dimensions réduite et une forme sphérique des pellets donne une repartition uniforme de la charge dans les hauts fourneaux .

8) Le contrôle de la composition du fer amélioré.

A cause des températures employées, il est impossible d'éviter un certain degré de fusion au cours de la sinterisation , ce qui tend à refermer les pores , et réduit ainsi la perméabilité aux gaz et diminue la reductibilité. La pelletisation s'effectue à des températures moindres et le degré de fusion est beaucoup plus faible .

Les pellets donnent donc un meilleur équilibre entre les propriétés contradictoires qui sont requises par le haut fourneau : résistance mécanique , dimensions régulières , forme idéale, porosité, reductibilité etc...

Un meilleur contrôle de la composition du fer conduit à des avantages économiques considérables au stade de fabrication de l'acier.

La diminution de la teneur en fer des sinters par suite de l'addition des cendres de coke et des fondants est du même ordre de grandeur que la diminution de la teneur en fer des pellets par suite de l'addition de la bentonite .

Cependant , divers inconvénients se présentaient dans la pelletisation les plus importants sont :

- les pellets tendent à gonfler, ou à augmenter de volume, pendant la réduction. Le degré de gonflement varie selon le minerai et l'effet sur le haut fourneau dépend du gonflement et de la proportion des pellets dans la charge.

Ce gonflement est dû au changement dans le réseau moléculaire de l'hématite au cours de sa transformation en magnétite .

- Une charge de pellet conduit à une dispersion totale des gaz dans le haut fourneau , la température de la paroi intérieure du four augmente et augmente l'usure des revêtements dans la partie inférieure de la cuve .

==O== C PARTIE / EXPERIMENTALE ==O==

## INTRODUCTION

Comme nous l'avons signalé dans la partie bibliographique, nous n'avons pas trouvé dans la littérature des données sur la possibilité d'utilisation des bentonites Algériennes dans l'industrie de la pelletisation des minerais de fer .

Cependant, des pellets préparées à partir des minerais de fer de L'OUENZA ont été obtenues avec des bentonites étrangères, notamment celle du, Wyoming.

Nous avons jugé utile de réaliser cette étude, puisqu'il est important de déterminer les propriétés physiques et métallurgiques de pellets fabriquées à la fois à partir des minerais de fer et des bentonites provenant de gisements Algériens.

Pour réaliser cette étude, nous avons obtenu un échantillon de bentonite " tout venant " des gisements de Mostaganem , un autre du même gisement nous a été fourni par le laboratoire National Sonarem ( Boumerdes ) \*

Le département Mine et Metallurgie (\*\*) nous a fourni un échantillon de 20Kg de minerai de fer de L'OUENZA .

Cet échantillon a été utilisée durant tout notre travail.

Un autre échantillon de minerai de fer nous a été envoyé par la suite par la Société Nationale de Siderrurgie ( Annaba ) .

\* Nous remercions Monsieur T. Zioui Ingénieur au L.N SONAREM(Boumerdes)

\*\* Nous remercions Monsieur S. GUERRAK Chef de département Mine et Metallurgie.

\*\*\* Nous remercions Monsieur S.E. Chitour Professeur et chef de département de G. Chimique .

C.I. 1 Les gisements de bentonite de Mostaganem :  
-----

- Les réserves sont estimées à 1 million de tonnes.
- Composition chimique moyenne (\*).

$Al_2 O_3$	$Si O_2$	$Fe_2 O_3$	CaO	MgO	MnO	$Na_2O$	FeO	$TiO_2$
13.3	66	3.05	4.65	2,43	0.02	1,21	1,21	0,27

C.I. 2 Le gisement de fer de L'OUENZA :

Le gisement de l'ouenza est situé à environ 150 Km d'ANNABA, soit 50 Km environ de souk - Ahras .

La mine de L'OUENZA est l'une des plus importantes mines de fer en exploitation en Algérie. Ce gisement fait partie d'une grande province de fer qui s'étend depuis la région de tébbessa jusqu'au gisement Tunisien de DJERISSA en passant par le gisement de BOU-Khadra. Gros amas de substitutions dans les calcaires aptiens de Km de longueur sur 400 à 600 mètres de largeur, et jusqu'à 100 mètres de profondeur, le gisement de L'OUENZA est exploité à ciel ouvert. On y extrait 2,5 à 3 millions de tonnes par an . Le minerai le plus riche atteint 60 % en fer. La teneur moyenne de la production en fer de ces dernières années est de l'ordre de 53,5 % avec 2 % de manganèse. Le minerai de fer présente l'avantage d'être auto-fondant, il est très prisé car il est très facilement digéré par le haut fourneau. Les réserves à haute teneur sont estimées à 80 millions de tonnes .

\* D'après L.N SONAREM ( Boumerdès ).

C. II Méthode de préparation des pellets .

La fabrication des pellets a nécessité un traitement en trois étapes des matériaux d'origine à savoir :

i) Nous avons procédé tout d'abord à broyer le minerai de fer et l'échantillon de bentonite pour obtenir une composition granulométrique requise.

Nous sommes partis d'un échantillon de minerai de fer de 20 Kg . Il a été concassé suivant un schéma à deux étapes. Le concasseur primaire est un concasseur à mâchoires, le secondaire à cylindres .

Le minerai réduit à des grains de 10 mm environ a été ensuite broyé à sec dans un broyeur à boulets , jusqu'à une granulométrie jugée nécessaire pour les étapes suivantes, avec un recyclage à chaque fois de la quantité prélevée pour l'analyse granulométrique .

L'échantillon de bentonite a été simplement broyé dans un mortier. Nous l'avons préalablement déshydraté, par chauffage dans l'étuve réglée à 110°C durant 24 heures. Nous avons procédé ensuite à un tamisage. Les fractions supérieures à 63 microns sont de nouveau broyées et tamisées. L'opération continue jusqu'à la réduction totale des échantillons à des fractions inférieures ou égales à 63 microns.

ii) Le bouletage du minerai broyé fin , après avoir fait des additions de bentonite en des proportions voulues.

Durant cette étape nous avons déterminé la quantité d'eau nécessaire au mouillage pour la formation des pellets. Le mélange minerai de fer, bentonite et eau constitue 100 % en poids .

iii) Séchage des pellets vertes dans une étuve munie d'une pompe à vide, et d'un thermocouple (Pt -Rh -Pt)

Les pellets sont ensuite indurées dans un four à moufle (HERAUSS ) chauffé électriquement. Le four est muni d'un système de régulation de température, d'un thermo-couple ( Pt-Rh -Pt ). L'avant de l'appareil est obturé par un bouchon d'amiante qui peut laisser passer un second thermo-couple de contrôle de température qui peut pénétrer jusqu'au centre de la couche des pellets .

Relié à un pyromètre gradué jusqu'à 1200°C , ce second thermo-couple (Pt-Rh-Pt ) nous a permis de suivre la vitesse de chauffe, ainsi que d'évaluer les fluctuations de température pendant le durcissement des pellets .

Les pellets indurées sont entassées les unes sur les autres dans des creusets réfractaires, dont les parois internes sont garnies des matériaux de protection de façon à supposer une éventuelle réaction qui peut avoir lieu lors du contact pellet -creuset . Ces matériaux de protection consistaient en des pellets cassés de 3 à 5 millimètres environ.

Dans cette étape de durcissement des pellets nous avons deux paramètres importants que nous pouvons faire varier, à savoir le temps de séjour des creusets dans le four et la température à laquelle se fait la cuisson des pellets .

Mais nous avons dû **fixer** le parametre temps égal à 30 minutes pour toutes les expériences car :

- d'une part le temps qui nous était importé et le nombre d'essais envisagés ne nous permettaient pas de jouer sur le facteur temps .

- et d'autre part en gardant le temps constant on peut établir une comparaison entre les différents états de pellets à savoir résistance, ramollissement et température de collage des pellets .

En ce qui concerne les températures nous avons opéré de 900°C jusqu'à 1350°C dans certains cas .

Les pellets préparées pendant l'étape de bouletage contiennent de 0 à 2 % à base humide de bentonite . Etant donné que la quantité de bentonite ajoutée au minerai est , relativement faible, il est important que le mélange soit effectué aussi bien que possible pour assurer sa distribution égale, pour cela, il a fallu pour préparer un mélange, ayant une teneur en bentonite donnée, de placer la quantité de minerai de fer broyé dans un mortier ensuite, ajouter la quantité de bentonite désirée avant de compléter le mélange minerai plus bentonite par l'eau de ville .

### C.III Méthodes de mesure de la qualité des pellets .

Les pellets que nous avons testés ont été fabriqués au laboratoire . Pour déterminer les propriétés physiques et métallurgiques les essais suivants ont été faits :

#### a/ Pellets vertes :

La résistance à la compression des pellets vertes séchées à 110°C a été mesurée par pression ponctuelle entre deux plaques d'acier jusqu'à ce que rupture se produise .

La moyenne des essais séparés effectués sur des pellets de même masse et même diamètre fut prise comme chiffre de référence .

Pour déterminer la résistance maximale des pellets vertes à la chute, nous avons fait tomber séparément, cinq pellets, chacune trois fois, sur une dalle de pierre, d'une hauteur telle qu'elles supportent la chute sans détérioration ou déformation. La hauteur de chute mesurée en centimètre et la résistance des pellets à la compression après chute en Kilogramme peuvent être considérées comme constituant le chiffre de référence des pellets vertes à la chute .

En plus de la résistance à la chute, le nombre de chutes a été déterminé, tel que c'est de pratique courante aux Etats Unis d'Amérique .

Nous avons laissé, tomber, séparément des pellets de façon répétée d'une hauteur de 18 inch ( environ 46 cm ) sur une plaque d'acier jusqu'à ce qu'elles se cassent ou qu'apparaissent des fentes .

La moyenne arithmétique des dix essais séparés constitue le "nombre de chutes" ( dropnumber ) .

Il a fallu également faire varier la température de séchage dans l'étuve pour trouver la température optimale qui donnera les meilleurs résultats des essais cités en dessus .

#### b/ Pellets durcis dans le four .

Pour déterminer la résistance à la compression des pellets, chaque pellet a été écrasé individuellement, entre deux plaques d'acier, dans une presse hydraulique (représentée dans la figure ). La lecture du cadran au moment de la rupture des pellets fut notée et constitue la charge d'écrasement des pellets (notée Co Kg/-Pellet ).

Pour déterminer la résistance aux intempéries, des pellets ont été placés dans un bain d'eau durant une semaine, puis séchés à 110°C et, leur résistance à la compression a été déterminée.

#### IV. Résultats Experimentaux

##### IV, 1, Granulométrie du minerai de fer broyé

L'objet des opérations de broyages du minerai étant de préparer une composition granulométrique uniforme, et d'obtenir 85 % en poids un produit passant à travers un tamis de 74 microns.

Le minerai peut être broyé à 85,9 % - 74 microns pendant 15 heures 30 mn, sous les conditions opératoires suivants :

broyeur à boulets ( Type LOS ANGELES ).  
nombre de boulets : 9  
Charge des boulets : 9 X 0.5 Kg .  
Charge du minerai : 7,5 Kg.  
Puissance : 1 Kw .  
Diametre du moulin ; 250 mm .

##### Analyse granulométrique

+ 0.250 mm	-
- 0.250 + 0.160 mm	0.3 %
- 0.160 + 0.125 mm	0.7 %
- 0.125 + 0.074 mm	13.1 %
- 0.074 + 0.063 mm	23.1 %
- 0.063 mm	62.8 %
<hr/>	
Total:	100 %

Nous avons porté dans la figure une, le pourcentage du produit de dimensions inférieures ou égale à 74 microns en fonctions du temps ( heures ) de broyage. Par contre la figure deux représente les courbes de répartition granulométrique du minerai de fer .

La première où il a fallu 15h 30 mn de broyage présente dans l'intervalle 68 - 205 microns une allure régulière qui donne des proportions " uniformes " des particules de différentes tailles .

Figure-1-

Pourcentage du produit passant 0.074 mm  
en fonction de la durée de broyage (heure).

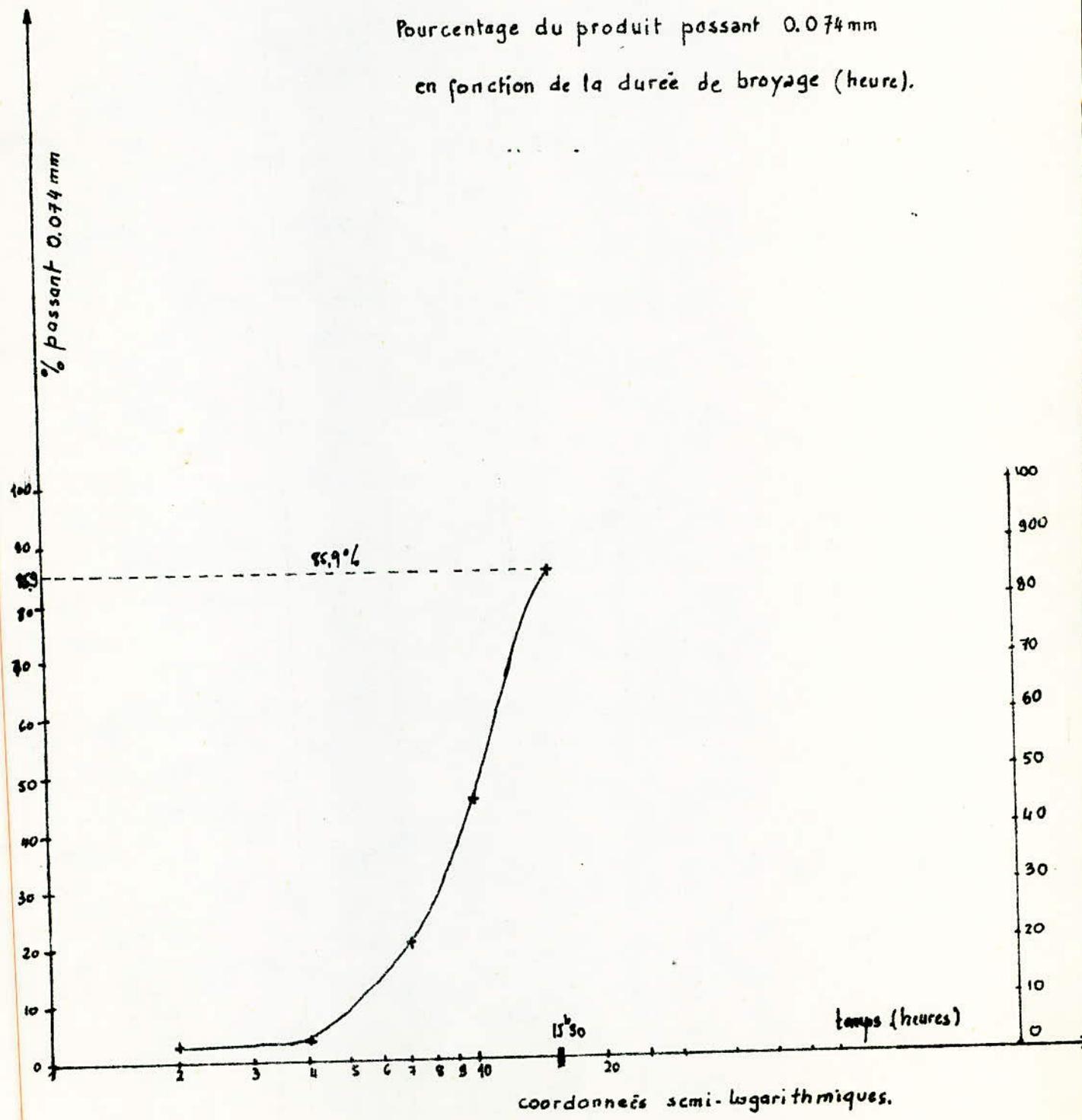
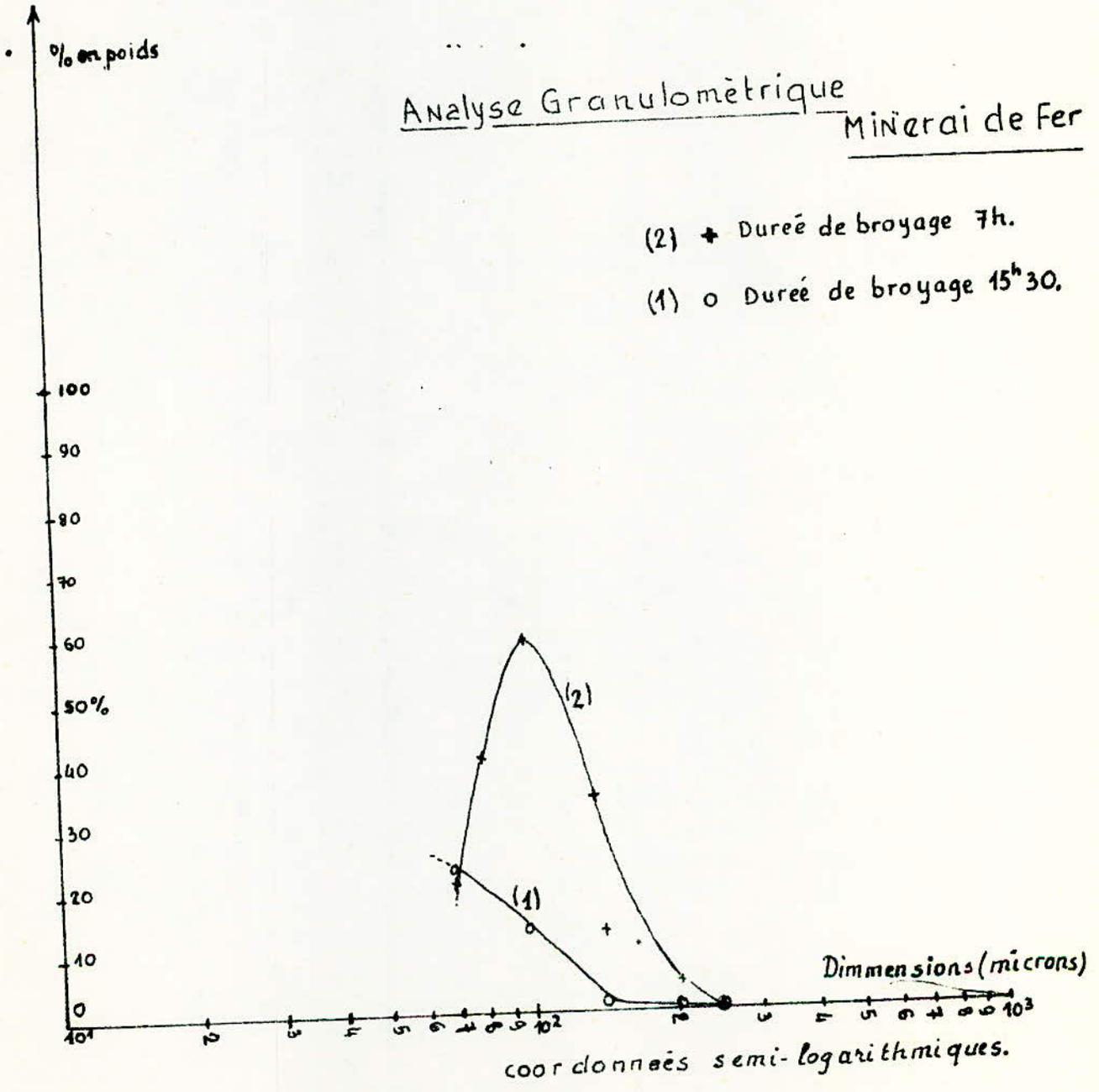


figure 9.

Analyse Granulométrique Minerai de Fer

- (2) + Durée de broyage 7h.
- (1) o Durée de broyage 15<sup>h</sup> 30.



La seconde obtenue à  $t ( h ) = 7$  présente une disproportion entre les éléments fins et les particules supérieures à 200 microns environ .

Le tableau ci-dessous donne les valeurs du pourcentage du produit passant à travers le tamis 74  $\mu$  en fonction de la durée de broyage .

$t ( h )$	0	2	4	6	7	9	13	15.5
% de produit 74 $\mu$	0	3.5	3.7	15.1	21.2	38.4	62	85.9

## IV 2. Notations:

On note par:

$x_b$ : Le pourcentage massique de la bentonite utilisé dans le mélange eau, bentonite plus minerai de fer.

$x_a$ : Le pourcentage en masse d'eau nécessaire dans le mélange.

$x_m = 100 - (x_b + x_a)$ : Le pourcentage massique du minerai de fer broyé.

Sait:

$D_n$ : La résistance à la chute des pellets vertes séchées à  $110^\circ\text{C}$  pendant 30 mn. Exprimées par le nombre de chutes sans déformation d'une hauteur de 46 cm (Drop number).

$H_n$ : La nombre de chutes des pellets <sup>séchés</sup> à  $110^\circ\text{C}$  pendant 30 mn, que peuvent supporter d'une hauteur  $H$  exprimée en cm.

$N_p$ : Nombre de pellets.

$C_a$ : En Kg/pellets. Résistance à la compression des pellets vertes séchées à  $110^\circ\text{C}$  et des pellets durcis dans le four.

$D_{\text{moy}}$ : Diamètre moyen (en mm) des pellets durcis. Il a été calculé en déterminant le poids et le volume de la pellet assimilée à une sphère idéale.

On note également par  $T_c$  (°C) la température de collage des pellets durcis dans le four. C'est la température au-dessus de laquelle les pellets seront complètement ramollies, et leur séparation ne serait possible (à froid) sans les briser.

On désigne par  $t_s$  (mn) le temps de séjour des pellets durcis à la température  $T_c$  (°C).

### V.3. Composition des différents mélanges:

Tableau 1:

N°	1	2	3	4
X <sub>b</sub>	0	0,5	1,0	2,0
X <sub>a</sub>	14,2	13,5	13,5	13,2
X <sub>m</sub>	85,8	86,0	85,5	86,6

#### a. Pallets vertes séchées à 110°C:

Tableau 2:

N°	D <sub>N</sub>	N <sub>p</sub>	Tailles (mm)	Remarques
(1)	0	10	—	Toute taille et quelque soit N <sub>p</sub>
(2)	1	10	7-10	
(3)	1-2	10	7-12	
(4)	2-3	10	7-14	

Tableau 3:

N°	H (cm)	H <sub>n</sub>	Poids g/Pallet	Remarques.
(1)	—	—	—	Elles ne peuvent supporter la chute.
(2)	17	6	2,8	
(3)	28	4	2,3	
(4)	46	3	1,8	

Tableau 4:

#### Résistance à la compression des pallets séchées à 110°C:

N°	C <sub>a</sub> kg/AN	Poids g/P	N <sub>p</sub>
1	0,9-1,4	2-2,3	10
2	1,2-1,8	2-3,8	10
3	1,4-2,5	2-4,0	10
4	2-2,5	2-4,0	10

b. Pellets durcis dans la four:Tableau (5) :

$$t_s = 30 \text{ mn.}$$

$$x_b = 0.$$

$$x_{\text{eau}} = 14,2.$$

$$T_c = (1320 - 1330)^\circ\text{C.}$$

T°C	Diamètre : D <sub>moy</sub> (mm) des pellets C <sub>e</sub> : charge d'écrasement Kg/Pellets					
	1000	7,9 13	10,3 22	11,5 28	13,8 23	
1100	9,0 17	9,5 20	10,0 35	12,2 50	13,2 66	
1200	9,8 45	10,4 62	11,4 62	14,7 85	12,0 90	13,0 110
1250	7,5 38	10,5 110	10,8 48	11,0 73	12,4 125	
1300	8,7 120	9,2 170	10,5 262	11,0 245		
1320	9,1 180	9,9 250	10,2 277	10,3 228	10,4 155	10,5 290

Tableau (6) :

$$T_c = (1325 - 1335)^\circ\text{C.}$$

$$x_b = 0,5.$$

$$x_c = 13,5.$$

T°C	Diamètre : D <sub>moy</sub> (mm) des pellets C <sub>e</sub> : charge d'écrasement Kg/Pellets							
	1100	9,2 13	9,7 30	10,4 30	11,9 46	12,5 47	14,8 75	
1200	9,2 43	10 85	10,2 73	11,8 80	12,4 107	13,0 126	14,2 160	15,0 170
1250	8,2 75	10,4 110	10,8 112	12,0 146	12,5 127	13,5 175		
1325	9,5 117	10,4 115	10,9 190	12,5 260				

Tableau (7):

$$x_b = 1.$$

$$x_a = 13,5.$$

$$t_s = 30 \text{ mm.}$$

$$t_c = (1340 - 1350)^\circ \text{C.}$$

T <sup>o</sup> C	Diamètre : D <sub>mo</sub> y (mm) des pellets.											
	C <sub>a</sub> : charge d'accroissement Kg / Pellets.											
925	9,5	10,1	10,6	10,7	11,7	14						
	15	12,1	22	23	21	25						
1100	9,6	10,7	11,9	14								
	25	30	35	50								
1200	10,4	11,2	11,4	12,0	12,6	12,8	12,9	13,5				
	45	77	80	83	107	106	120	120				
1250	9,1	10,5	10,8	11,0	11,5							
	75	100	107	125	119							
1300	8,5	8,6	9,0	9,4	10,0	10,3	10,3	11,1	11,7	12	13	
	222	212	240	240	268	275	252	297	347	365	370	

Tableau (8):

$$x_b = 2.$$

$$x_a = 13,2.$$

$$t_c = 1350^\circ \text{C.}$$

$$t_s = 30 \text{ mm.}$$

T <sup>o</sup> C	Diamètre : D <sub>mo</sub> y (mm) des pellets.											
	C <sub>a</sub> : charge d'accroissement Kg / Pellets.											
1100	10,0	10,5	10,9	11,0	11,7	12,0	12,5	12,9				
	15	16	13	17	17	18	19	19				
1200	9,0	10,0	11,1	11,9	12,8	12,9						
	16	20	12	18	19	18						
1250	7,5	7,8	8,5	9,0	10,6	10,5	13,5					
	40	47	55	64	68	71	82					
1300	9,1	10,0	11,3	12,2								
	149	150	222	257								
1350	8,5	9,0	10,0	10,5	11,2							
	109	150	182	200	240							

COURBE 3-1

Pellets sans bentonite

$t_s = 30$  minutes

$T_c = 1325$  °c

$$C_e = f(D_{moy})$$

(Kg/P)

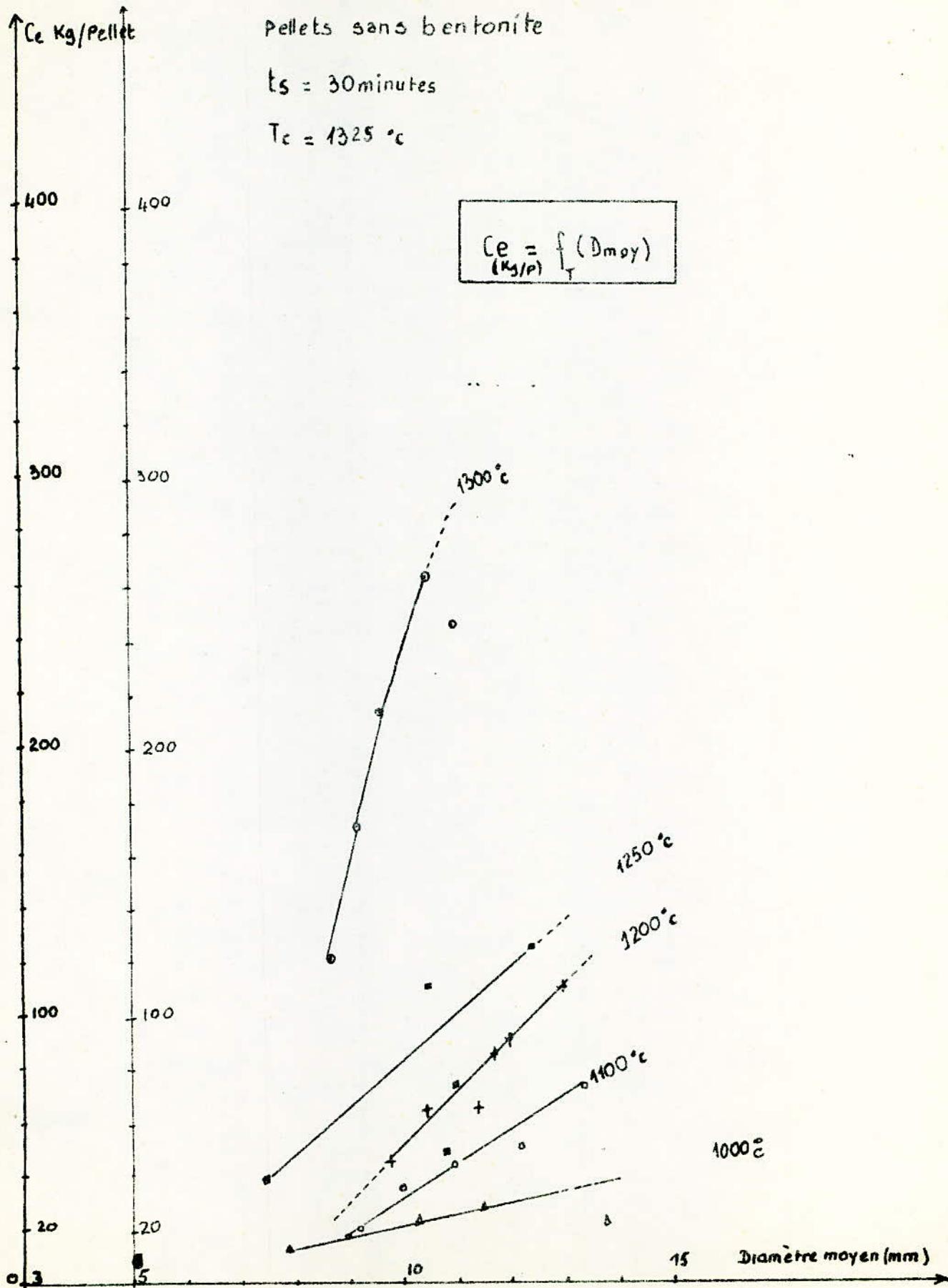


figure 3.2

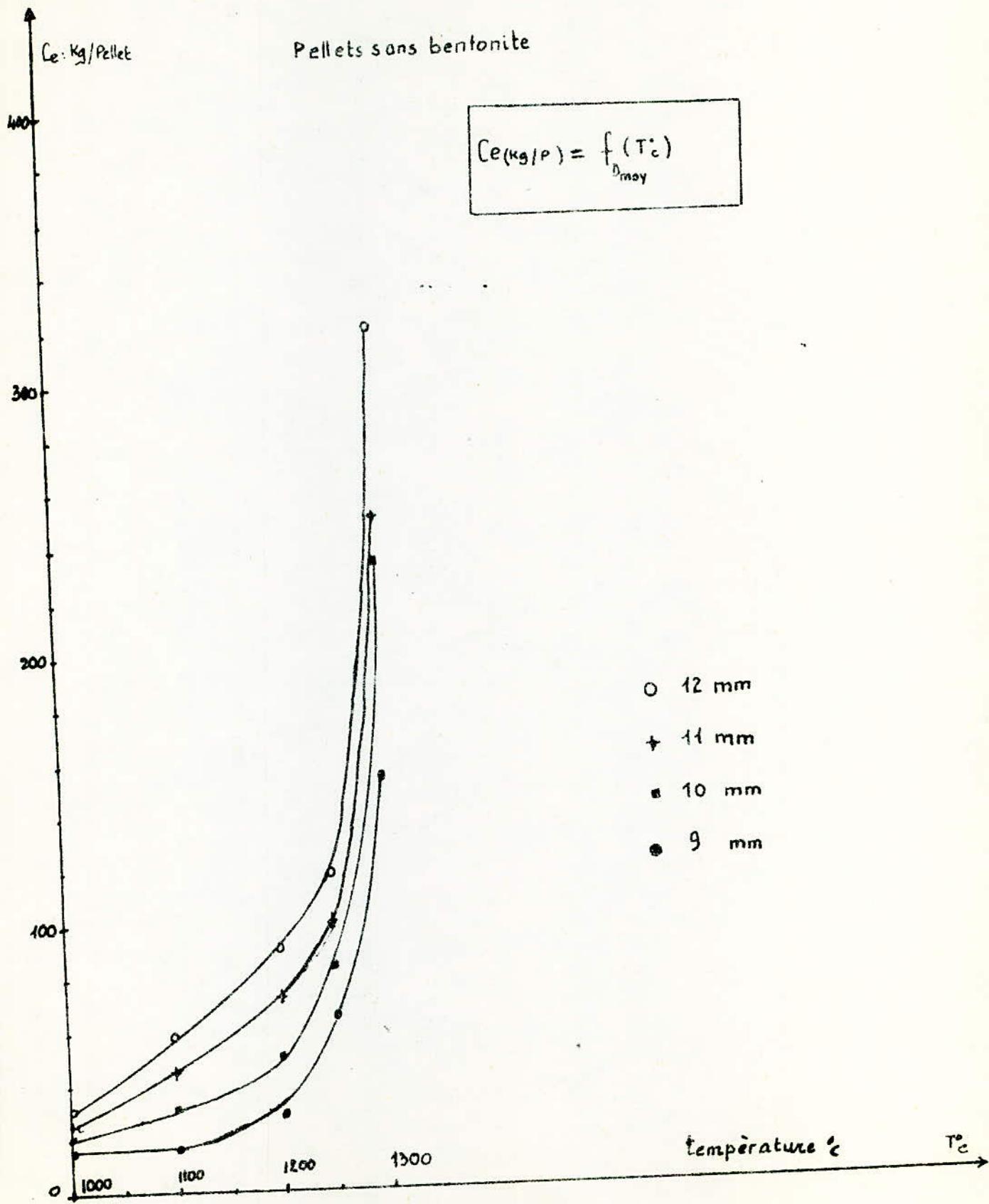


figure 4.1

$$C_{e_{kg/P}} = f(D_{moy})$$

0.5 % : bentonite

13,5 % : eau

$t_s = 30mn$

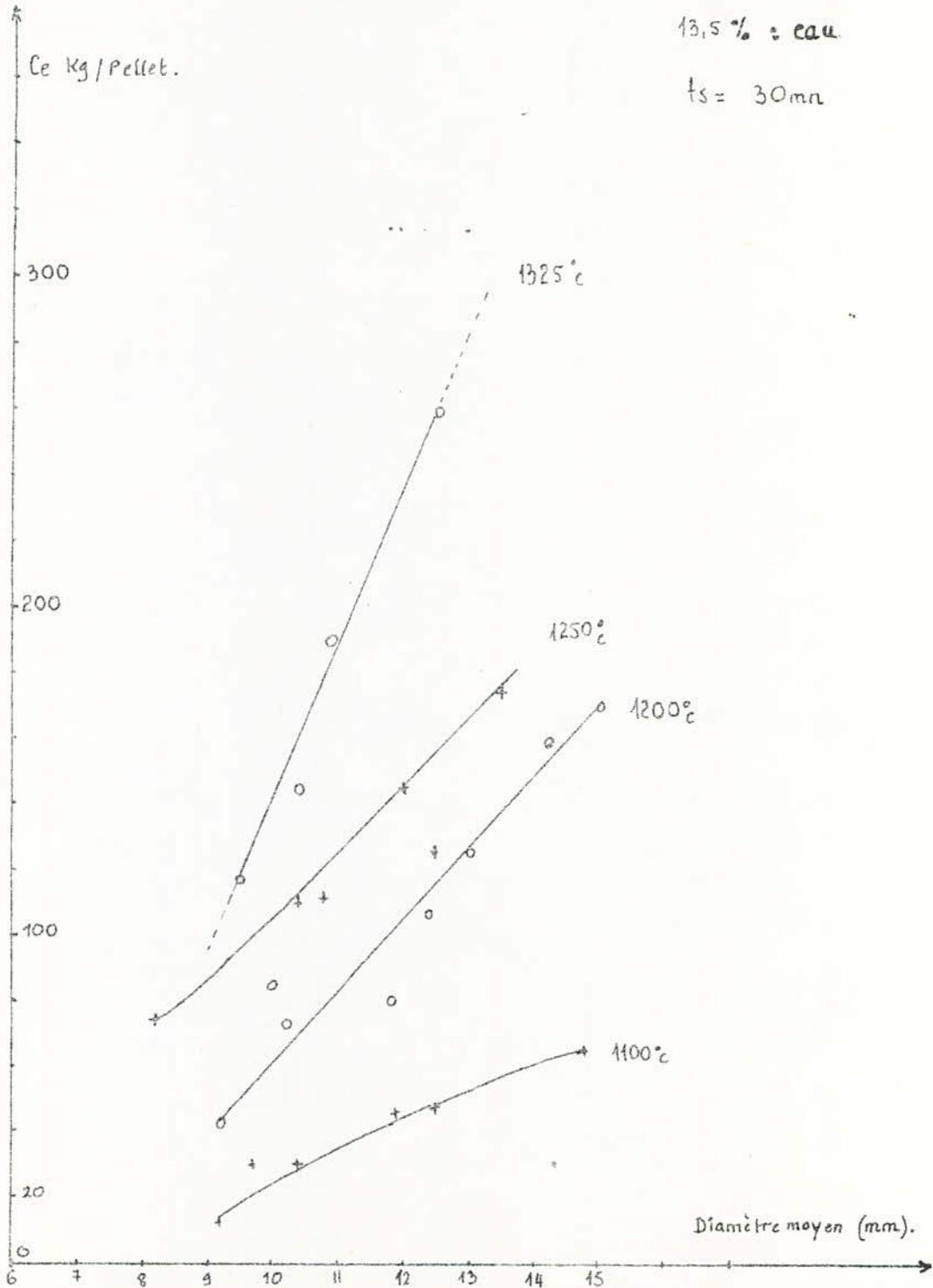


figure 4.2

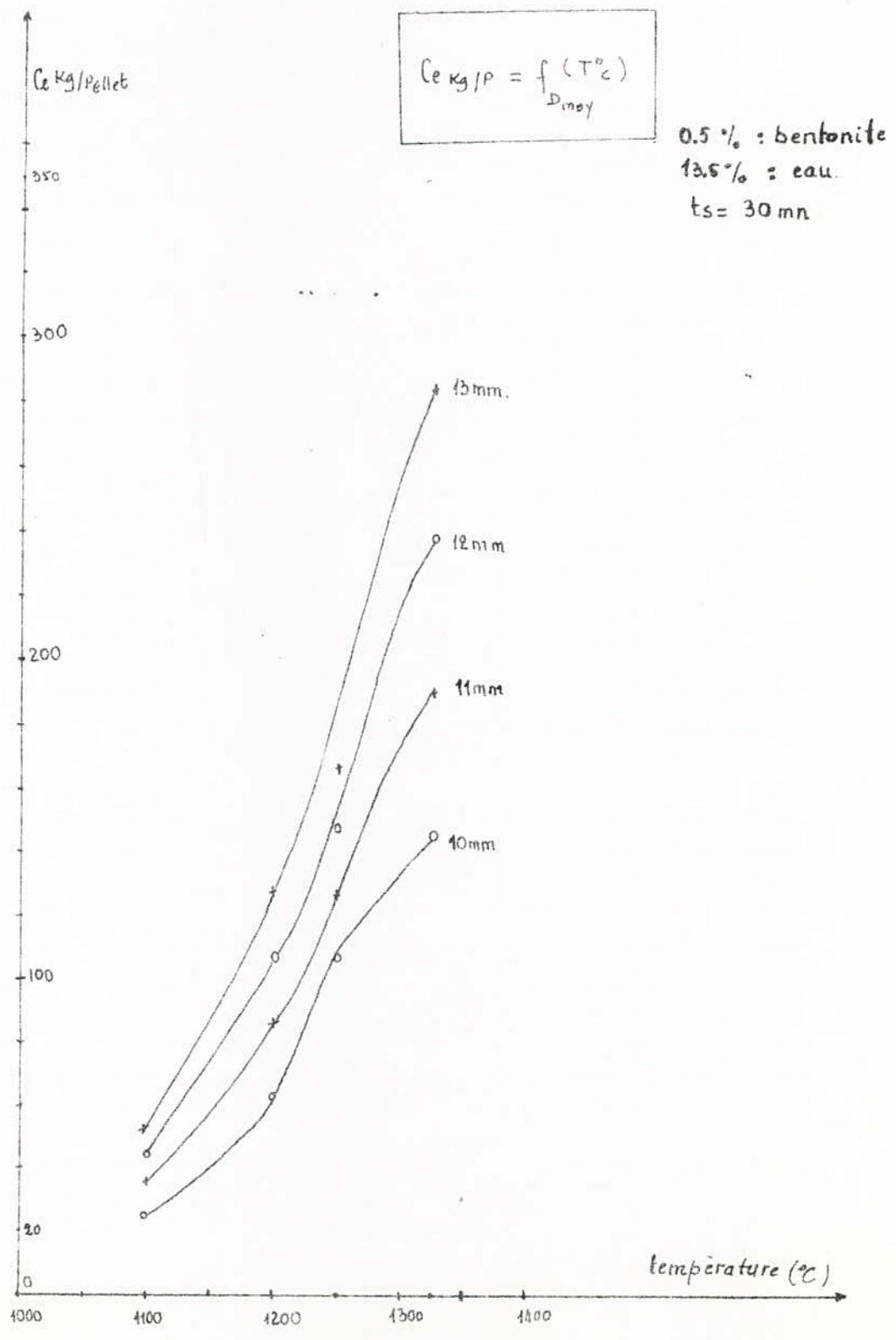


figure 5.1

$$C_{e(Kg/P)} = f_{T^{\circ}C} (D_{moy})$$

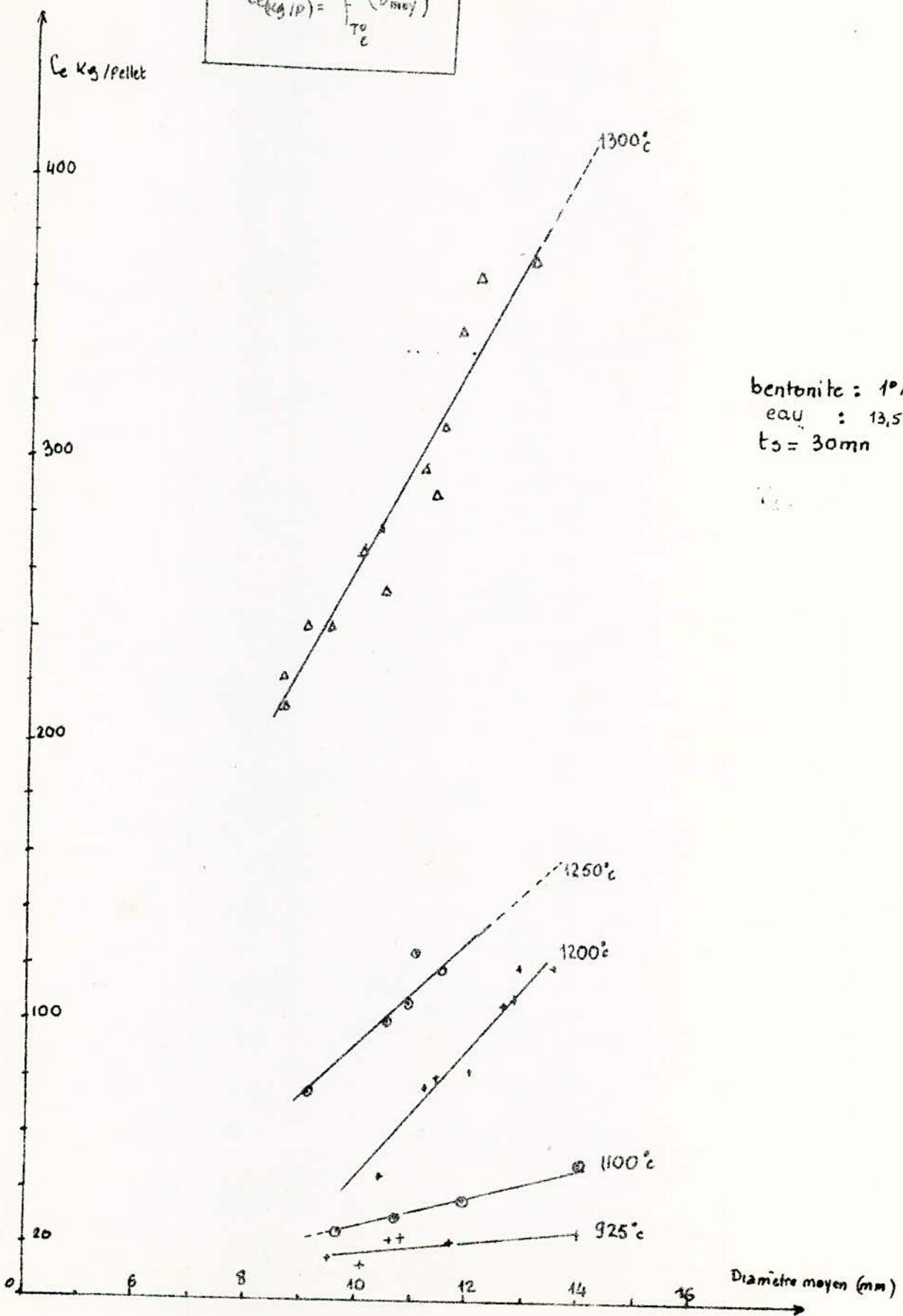
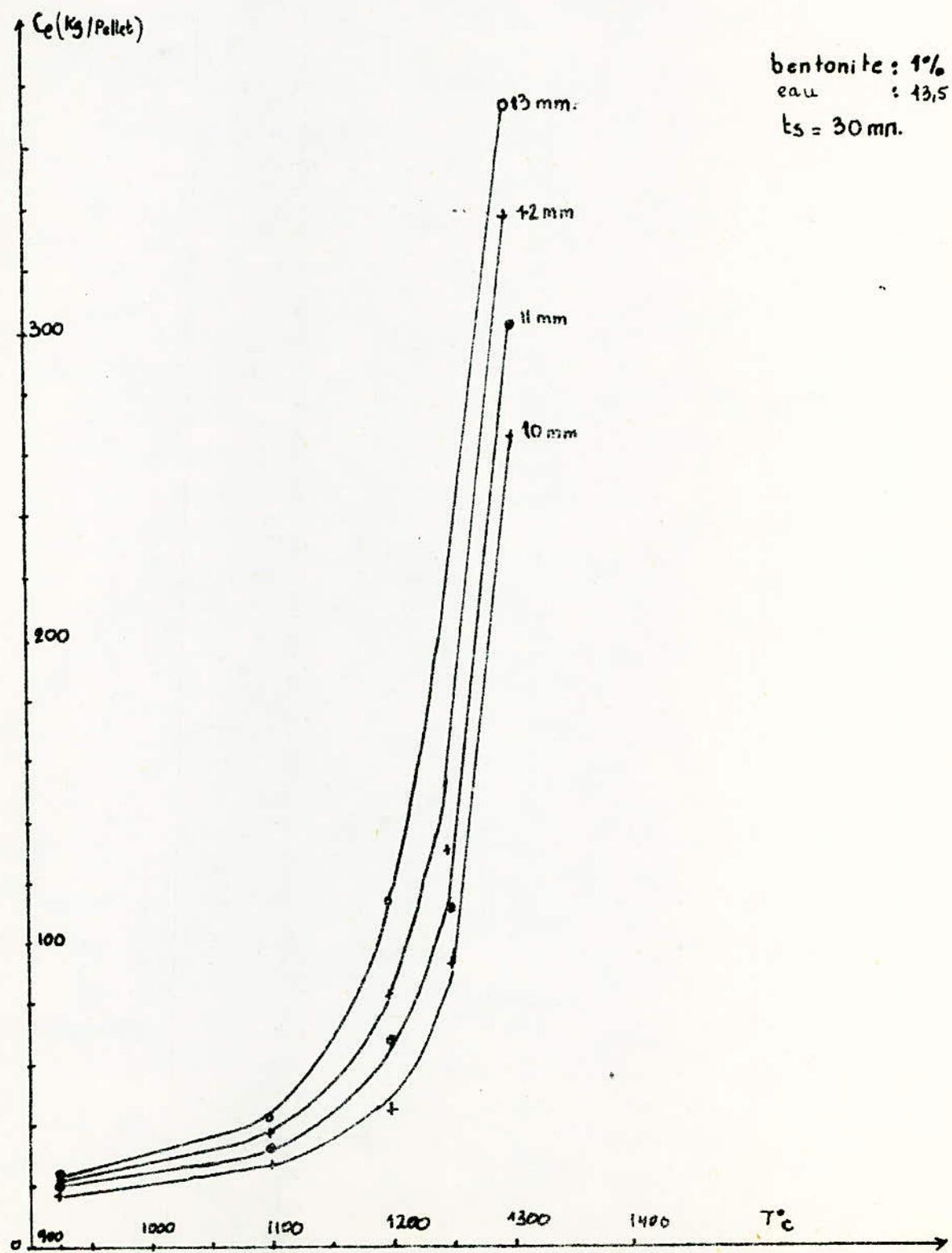


Figure 5.2

$$C_e(\text{kg/Pellet}) = f(T_c)_{D_{\text{moy}}}$$



bentonite : 1%  
eau : 13,5 %  
 $t_s = 30 \text{ mn.}$

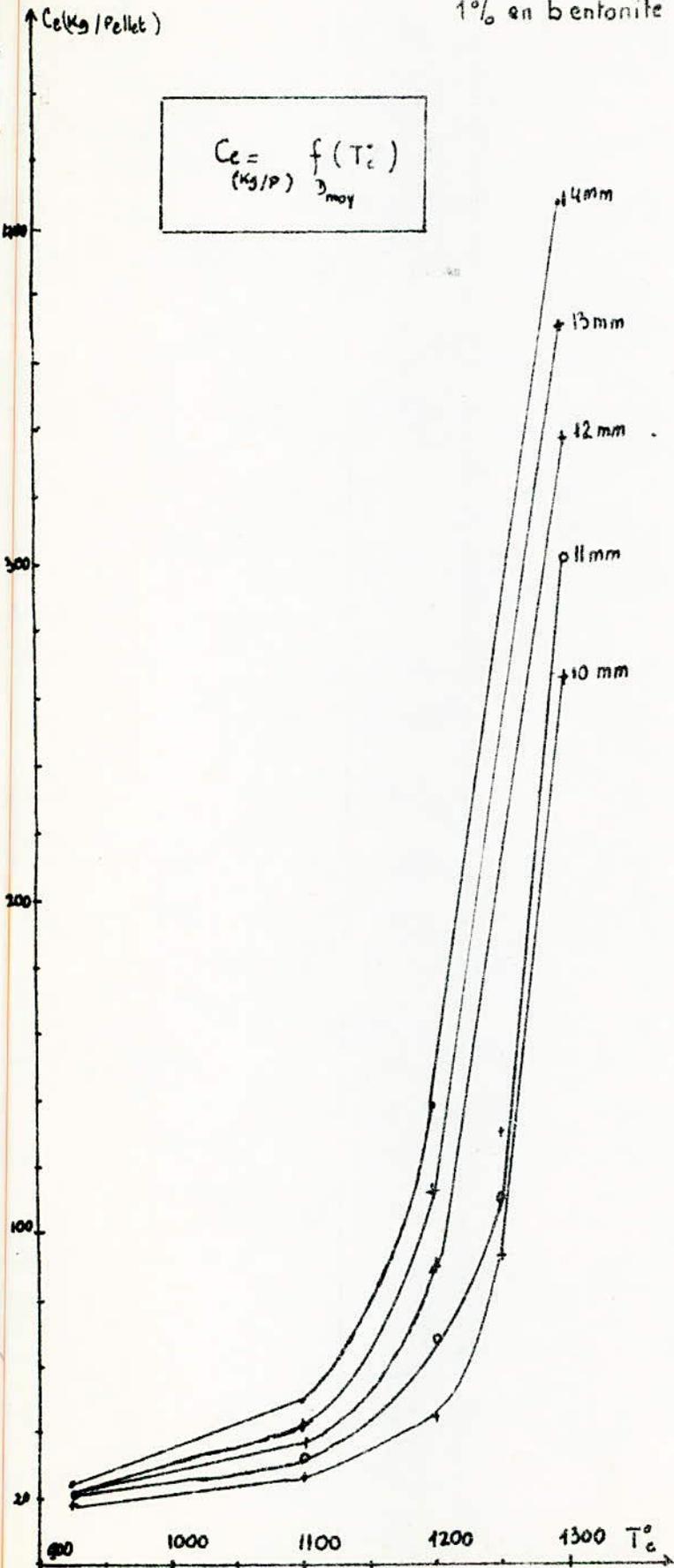
Es: 30 mm

Fig 5-3

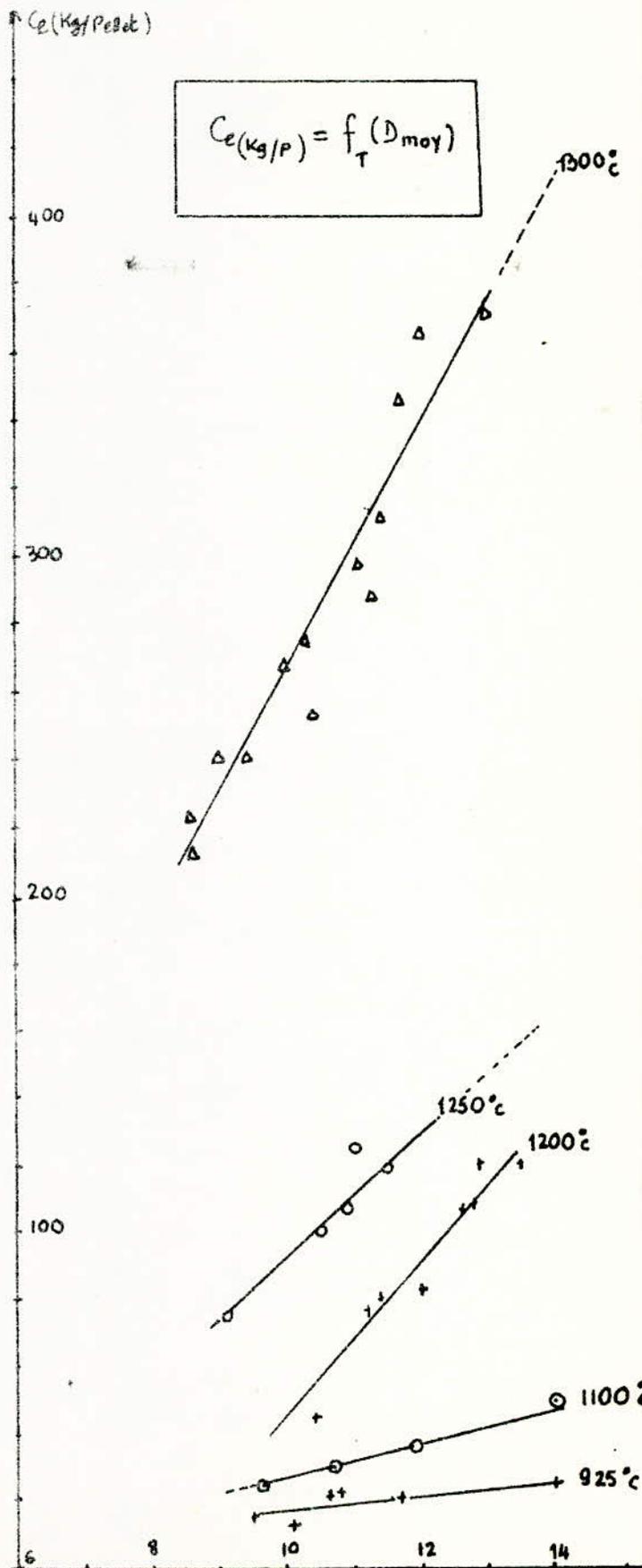
-55-

1% en bentonite

$$C_e = f(T_c) \quad \text{with } \left( \frac{\text{kg}}{\text{P}} \right)_{D_{\text{moy}}}$$



$$C_e(\text{kg/P}) = f_T(D_{\text{moy}})$$



bentonite: 2%

$t_s = 30$  mn.

$T_c = 1350^\circ C$

$$C_c(\text{kg/p}) = f(D_{\text{moy}})$$

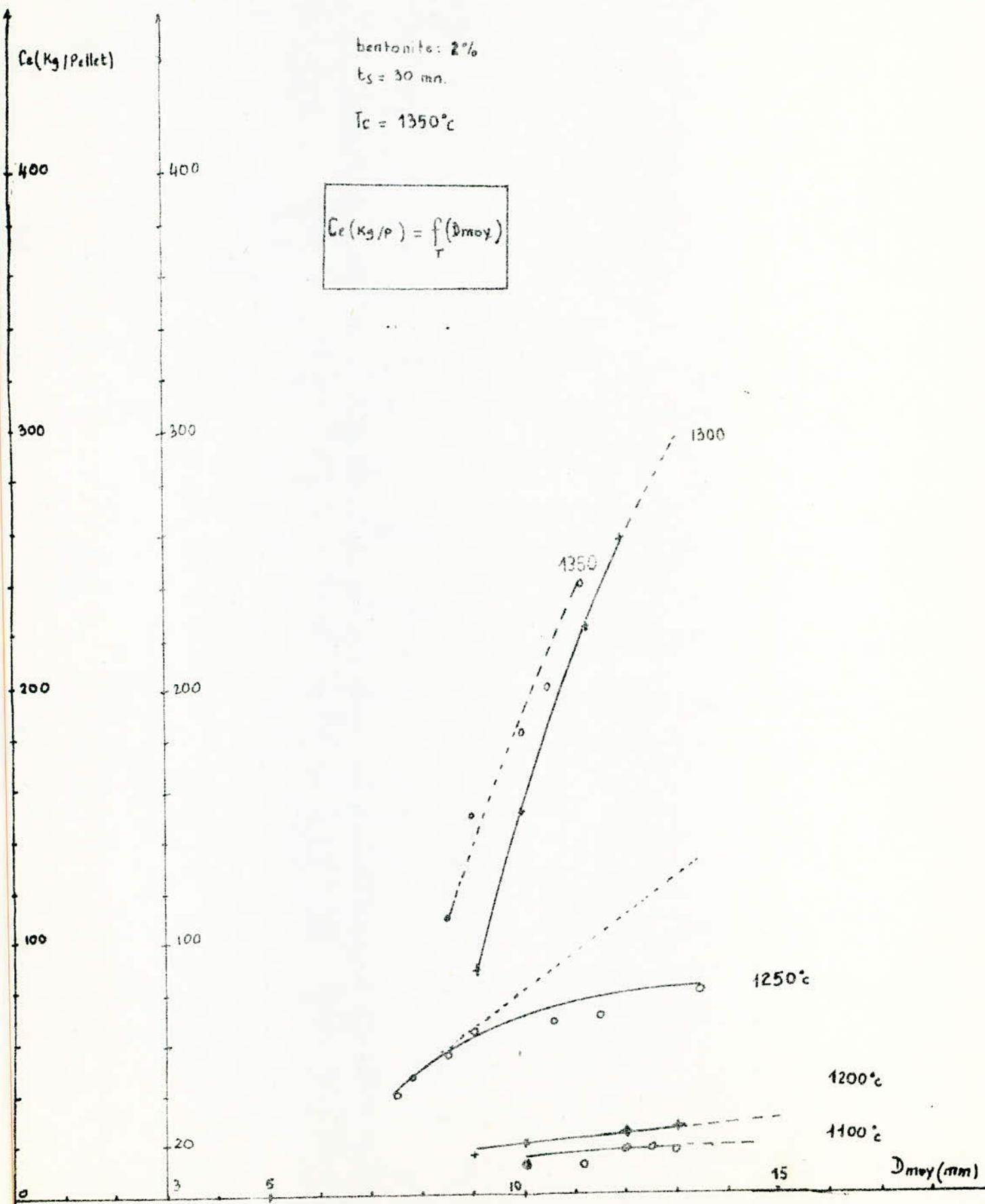


fig 6-2

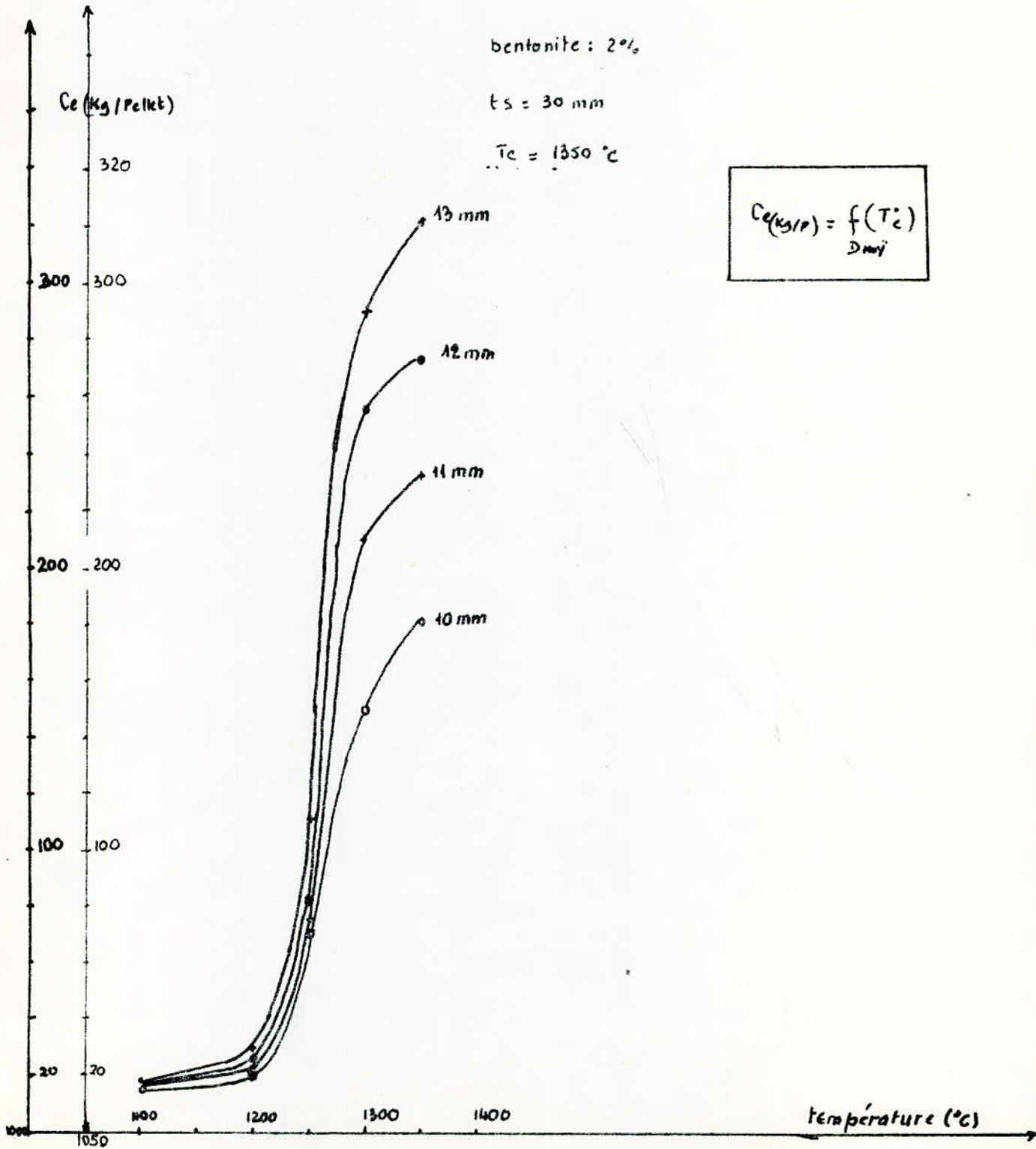


Tableau 9:

Résistance à la compression des pellets durcis en fonction de la température et de  $X_b$ .

		Melange	(1)	(2)	(3)	(4)
		T °C	$X_b=0$	$X_b=0,5$	$X_b=1,0$	$X_b=2,0$
$D_{moy} = 10mm$	1200		54	62	48	20
	1250		85	109	95	70
	1300		234	138	260	180
$D_{moy} = 12mm$	1200		92	106	84	25
	1250		120	156	160	100
	1300		320	220	338	256

c. Ramollissement des pellets:

(exprimée par la température de collage  $T_c$  °C)

Melange N°	(1)	(2)	(3)	(4)
$T_c$ (°C)	1320 - 1325	1325 - 1335	1340 - 1350	1350

d: Résistance aux intempéries:

La résistance des pellets cuites à 1300°C tombe de

$$320 \text{ kg/p (Melange 1)} \rightarrow 207 \text{ kg/pellet}$$

$\left( \begin{array}{c} 12mm \\ N_p = 5 \end{array} \right)$

fig 7.1

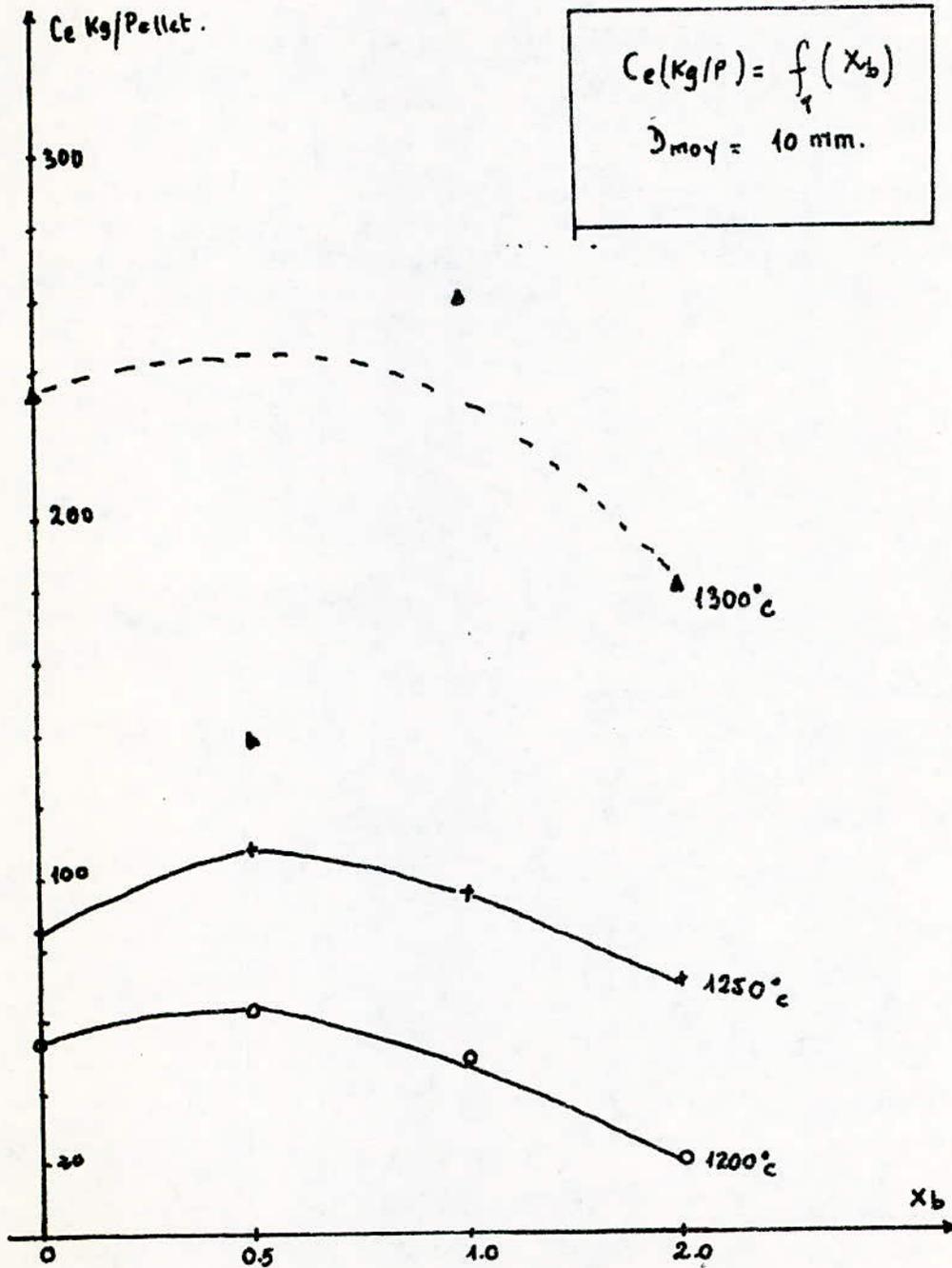
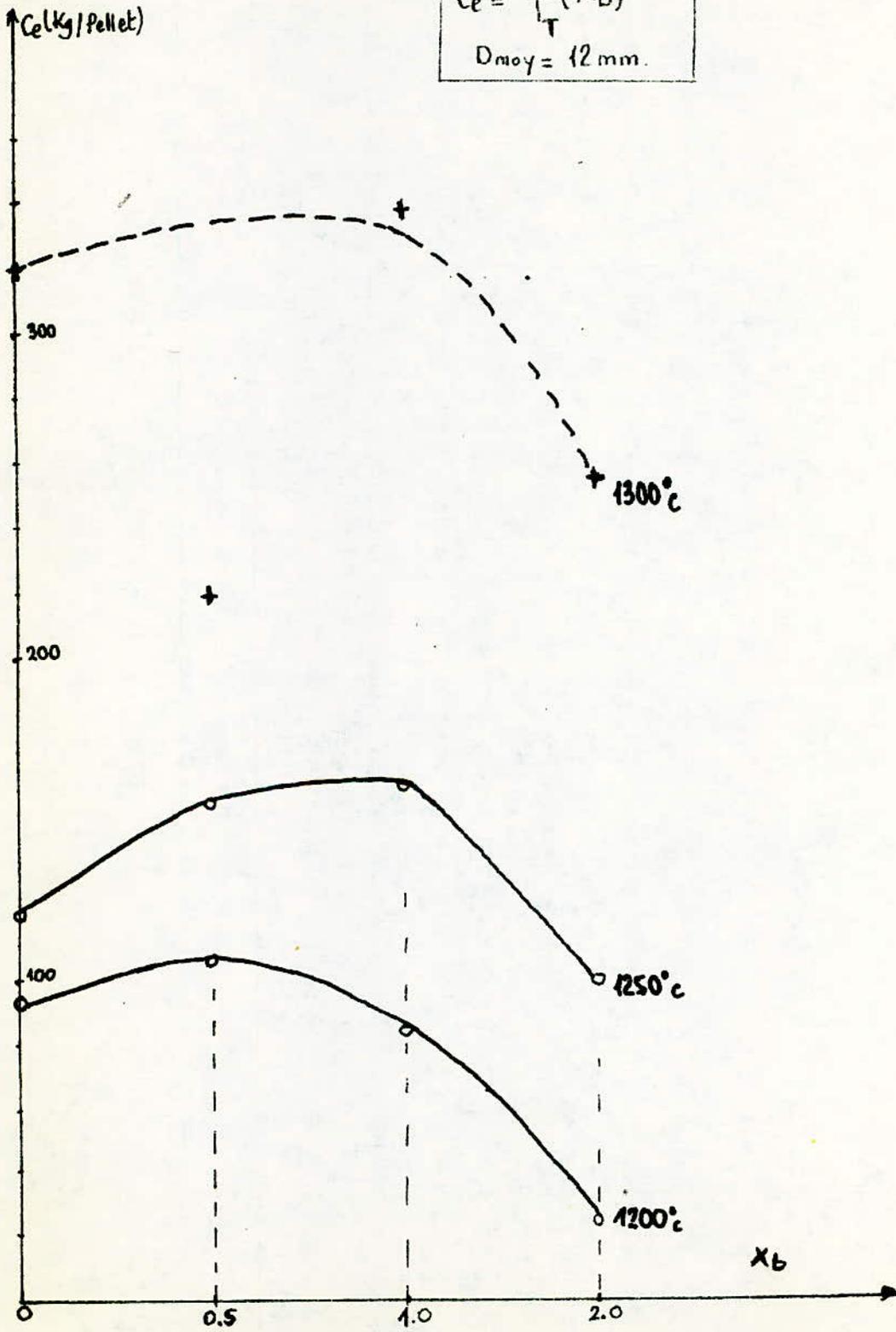


fig 7.2

$$C_e = f(x_b)$$

$D_{moy} = 12 \text{ mm.}$



#### IV.4 Analyse des résultats

##### IV Pellets Vertes

Pour préparer les pellets vertes on a pu employer, sans grande difficulté un mélange de divers pourcentages dont les proportions de bentonite ont été fixées d'avance. Il a fallu plus d'eau pour pouvoir bouletter le minerai de fer sans bentonite. L'addition de bentonite facilite la nodulation, en rendant la surface des pellets moins rugueuse. Les pellets sans bentonite sont très sensibles à la chaleur, celles de taille supérieure à 12 - 13 mm se fissaient, ou même éclataient dans l'étape de durcissement.

La résistance des pellets du mélange (1) est très faible, et ne peuvent supporter la chute [tableau (2) et (3)].

En augmentant  $X_b$  la résistance des pellets augmente.

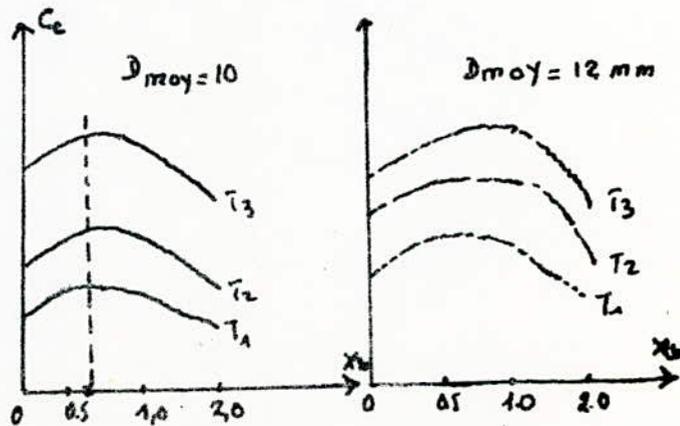
##### IV.4.2 Influence de $X_b$ sur la résistance des pellets durcis

Les courbes 7-1 et 7-2 représentent de  $C_e = f(X_b)$ . nous avons pris deux valeurs de  $D_{moy}$  : 1)  $D_{moy} = 10 \text{ mm}$   
2)  $D_{moy} = 12 \text{ mm}$ .

Allure Générale :

$C_e \uparrow$  avec  $\begin{cases} T^\circ (C) \\ D_{moy} \end{cases}$

$C_e \text{ Kg/P max } 0.5 \leq X_b \leq 1.0$



$(T_1 < T_2 < T_3)$ .

$0 \leq X_b \leq 0.5$   $C_e \uparrow$

$X_b \geq 1.0$   $C_e \downarrow$

$0.5 \leq X_b \leq 1.0$   $C_e$  maximale.

## Conclusion.

Nous avons préparé des pellets de minerai de fer de l'Ouenza ~~avec~~ de bentonites des gisements de Mostaganem. Les résultats obtenus ont montré qu'on peut obtenir des pellets de propriétés physiques convenables en tant que charge des hauts fourneaux.

Nous avons travaillé avec des proportions de bentonite, différentes, de 0 à 2,0 % en masse. Les essais effectués sans bentonite, nous ont permis d'une part de comparer avec les autres résultats, et par conséquent de déterminer l'effet de la bentonite de Mostaganem sur les propriétés des pellets, d'autre part de déterminer la quantité de bentonite nécessaire. Les résistances à la compression des pellets, et à la chute des pellets vertes sont bonnes. Ainsi, on peut obtenir une résistance supérieure à 200 Kg/p à condition de choisir la taille des pellets, la température de cuisson, la quantité de bentonite.

Nous avons travaillé à une granulométrie unique du minerai de fer de 85,9% - 74  $\mu$ , nous pensons qu'on peut améliorer la résistance à la chute en faisant varier la granulométrie du minerai.

L'intervalle de température (1250 - 1300°C) a donné des pellets bien durcis, leur ramollissement ne débuta que dans (1325° - 1350°).

Nous espérons que ces propriétés devraient être complétées par la détermination des propriétés métallurgiques telles que: gonflement, réductibilité ainsi que la dégradation à basse température au début de la réduction.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 : RAIF.E. GRIM : "APPLAIED CLAY MINERALOGY" Mc GRAW HILL BOOK Co,  
NEW YORK -- TORONTO -- LONDON ( 1962 ).
- 2: DVORNI CHERKO.I.F ; DROZHILOV. LA, et COLL VOL 90-9605 CA (1974 ).
- 3: COMPTE-RENDU DES ESSAIS DE PELLETISATION DE L'OUENZA PAR :  
STEMARTS § LLOYDS ( 1967 )
- 4: R. PAPIN "KIRK OTTMER: ENCYCLOPEDIA OF CHEMICAL TECHNOLOGY "  
VOL 3 , 2eme EDIT .P (339-360) 1960
5. S.E CHITOUR et J.M VERGNAUD "CHIMIE MODERNE" VOL 15 N° 90 (1970)
- 6: G.A. GROSS . PUBLICATIONS DES NATIONS UNIES P 38-55 ( 1969 ).
- 7: R.H. PERRY . C.H. CHILLON : CHEMICAL ENGINEER'S HAND BOOK  
2eme ED, Mc GRAW HILL BOOK, COMPAGNY P(8.8-8.57)
8. G.K JONES "IRON ORE PELLETISATION " INDUSTRIAL MINERALS MARCH(1979)
9. P. BLAZY "VALORISATION DES MINERAIS "  
PRESSES UNIVERSTIAIRES DE FRANCE (1970)
10. METALLURGIE GENERALE MASSON et Cie EDITEURS PARIS (1969)
11. REVUE DE METALLURGIE : "IRON ORE PREPARATION "N°3 P 247-283(1976)
12. REVUE DE METALLURGIE : "IRON ORE PREPARATION "N° P 625 (1976)
- 13: A.L NORRISON ,J.K WRIGHT et COLL :IRON MAKING & STEELMAKING  
VOL 5 N° (1978) P 25-32
- 14: M. GROSS "IRONMAKING & STEELMAKING " VOL 4 N°3 P 159 (1977).
- 15: TS OBRETIENOV et P.PETROV " COMPTE-RENDU DE L'ECOLE SUP DE -  
TE et DE LA CHIMIE" TOME VIII "BURGAS " (1969).



