

1ère partie
Production
de la vapeur

2ème partie
Utilisation
de la vapeur

3ème partie
Production
de glace



4ème partie
Memento
Technologique

5ème partie
vers d'autres
horizons

3ème Partie Liste des chapitres:

Chap I Présentation générale de la machine à glace

► **Chap II La Documentation disponible**

Chap III – Etude

Chap IV – Construction

Chap V – Fonctionnement et Performances

Chap VI - Les principaux choix et leur discussion

Chap VII – Documentation technique et Fournisseurs.

Chapitre II LA DOCUMENTATION DISPONIBLE

Il s'agit ici de rassembler des sources de documentation scientifique et technique sans lesquelles il serait illusoire de vouloir travailler "ex nihilo" sur un projet de froid par adsorption avec zéolite. On trouvera aussi dans ce chapitre quelques archives concernant la production de froid utilisant l'eau comme fluide frigorigène. Ces modes de production ont existé, ont été supplantés puis oubliés, mais il n'est pas inutile de les connaître à titre de culture technologique, car "de l'ingénierie sans culture, c'est comme de la mécanique sans huile".

Il ne s'agit pas d'un cours magistral, de nombreuses questions de détail restent sans réponse, voire avec des réponses différentes,. Il n'est que de s'en accommoder.

pages

SECTION I LA PRODUCTION DE FROID PAR ADSORPTION AVEC ZEOLITE

2 § 1 - le froid par sorption

3 § 2 - le froid par adsorption avec zéolite

SECTION II LA ZÉOLITE

4 § 1 le matériau zéolite

5 § 2 la documentation sur la zéolite

5 § 3 les courbes caractéristiques

SECTION III L'EAU

11 § 1 Eau, Glace et Vapeur : mots-clés et chiffres clés

13 §2 Les tables de vapeur

16 §3 Que peut-on faire avec 1 kg de glace ?

SECTION IV REFROIDISSEMENT PAR ÉVAPORATION ET HUMIDITÉ DE L'AIR

- 18 § 1 Le refroidissement par évaporation dit aussi "refroidissement adiabatique
- 19 § 2 l'humidité de l'air

SECTION V LES INCONDENSABLES

- 21 §1 – Le problème des incondensables
- 22 § 2 - La loi de Dalton
- 22 § 3 - La loi de Dalton dans un ouvrage sur les machines de marine
- 22 § 4 - La brochure des Ets SARCO
- 34 § 5 - Les incondensables et l'installation solaire thermique
 - A) Les incondensables et la production de glace
 - B) Les incondensables et la stérilisation médicale

SECTION VI LE VIDE

- 36 § 1 La mesure du vide
- 37 § 2 Le niveau de vide
- 38 § 3 Les pompes à vide
- 38 § 4 Comment ne pomper que de l'air, et pas de la vapeur ?

SECTION VII PRODUCTION DE FROID UTILISANT L'EAU COMME FLUIDE FRIGORIGÈNE (ARCHIVES)

- 39 § 1 Machine à absorption à acide sulfurique
- 40 § 2 Machine à éjection de vapeur Westinghouse-Leblanc
- 41 § 3 Machine à éjection de vapeur SCAM-Follain

SECTION I – LA PRODUCTION DE FROID PAR ADSORPTION AVEC ZEOLITE

§1 LE FROID PAR SORPTION

(Les notions de froid par compression/ froid par sorption ont été évoquées à la première section du chapitre précédent)

La production de froid par sorption a coexisté avec la production de froid par compression, mais c'est cette dernière qui est de loin la plus utilisée actuellement, entre autres à cause de la facilité d'utilisation de l'énergie électrique. On trouvera un aperçu sur l'histoire de la production du froid à http://www.iifir.org/userfiles/file/webfiles/in-depth_files/History_refrigeration_Duminil_FR.pdf.

Il existe de nombreux couples permettant de produire du froid par sorption. Pour les machines à absorption, c'est à dire où il y a une combinaison chimique entre l'absorbant et l'absorbé, on trouve entre autres les couples suivants:

–bromure de lithium (absorbant) et eau (fluide frigorigène)

–eau (absorbant) et ammoniac (fluide frigorigène)

Pour les machines à adsorption, c'est à dire où il y a seulement une liaison physique entre adsorbant et adsorbat, il existe de nombreux couples, utilisant comme adsorbants le charbon actif, le gel de silice, la zéolite...., et comme adsorbat, c'est à dire comme fluide frigorigène : l'eau, l'éthanol, l'ammoniac...

Pour avoir un très bon panorama sur la production de froid par adsorption, on peut se reporter aux deux premiers chapitres et à la bibliographie de la thèse de Abdelmoussehel ERROUGANI – Rabat – 2007 <http://fr.scribd.com/doc/38092862/Fabrication-Et-Experimentation-d-Un-Refrigerateur-Solaire-a-Adsorption>.

Au sujet des machines frigorifiques à sorption industrielles : <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11175>

§2 LE FROID PAR ADSORPTION AVEC ZEOLITE

voici quelques sources de documentation.

Site Web de www.zeo-tech.de

<http://fc.uni.edu.pe/mhorn/ISES2003%20%28solar%20refrigeration%29.pdf>

Etude d'une pompe à chaleur de 230 kW et d'une machine frigorifique à adsorption solide. Thèse – Paris 6 – 6 décembre 1991 – Publications du LIMSI, département Mécanique – Energétique année 1991(non publiée)

http://www.siliconindia.com/aiepic/project/solar_adsorption_refrigeration_with_zeolite-pid=6402.html

A review on adsorption refrigeration technology and adsorption deterioration in physical adsorption systems
in Renewable and Sustainable Energy Review 14 (2010) 344-353 Elsevier

Avances on multipurpose solar adsorption systems for domestic refrigeration and water heating
in Applied Thermal Engineering 27 (2007) 813-822 Elsevier

Review on solar sorption refrigeration technologies : developpement and applications
in Renewable and Sustainable Energy Review 11 (2007) 1758-1775 Elsevier

Review of Solar Cooling Technologies
HVAC&R Research, Volume 14, Number 3 May 2009 507-528 ASHRAE

Review paper on solar powered air conditioning through adsorption route
in Renewable and Sustainable Energy Review 14 (2010) 2189-2195 Elsevier

SECTION II – LA ZEOLITE

§ 1 LE MATERIAU ZEOLITE

Une zéolite est un matériau microporeux dont la surface spécifique, c'est à dire la surface développée des parois pour Un gramme de matériau, est très importante :entre plusieurs dizaines et plusieurs centaines de mètres carrés par gramme de matériau.

La principale propriété qui intéresse notre application est sa capacité à adsorber de la vapeur d'eau. Le phénomène est réversible, il est possible de désorber la zéolite, de lui faire rendre l'eau qu'elle a adsorbée, afin de la régénérer et de la rendre à nouveau capable d'adsorber de l'eau.

La zéolite en tant que filtre ne présente aucun intérêt pour notre application, pas plus que son utilisation en tant que substrat pour diverses cultures.

Il existe des zéolites naturelles et des zéolites artificielles, ces dernières sont produites principalement par des sociétés pétrolières, qui en font un usage important lors de opérations de raffinage.

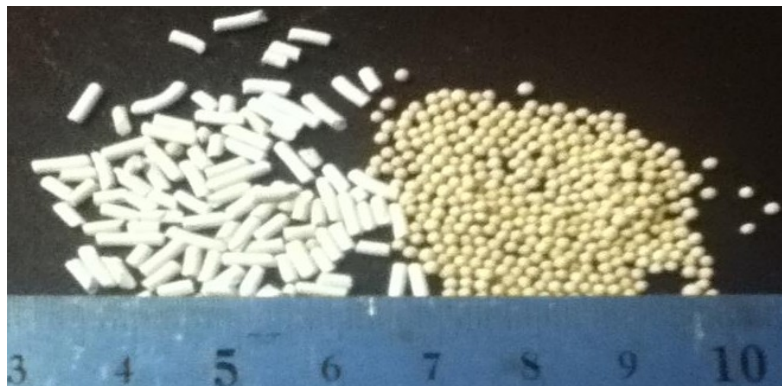
Il existe un Groupe Français des Zéolites (www-gfz.ensicaen.fr), membre de la Federation of European Zeolite Associations , et affiliée à l'International Zeolite Association

La quantité d'eau adsorbée et désorbée par rapport au poids (sec) de la zéolite varie selon les conditions de température et de pression. Ainsi, l'adsorption est d'autant plus importante que la température est basse et que la pression est faible

Lors de l'adsorption, la vapeur d'eau provenant de l'évaporateur se condense sur la zéolite et libère la chaleur latente qu'elle contient. L'adsorption est un phénomène exothermique (qui produit de la chaleur). Il convient donc de refroidir la zéolite afin d'augmenter la quantité d'eau adsorbée par quantité de matière.

A l'inverse, il faut chauffer la zéolite pour la régénérer, jusqu'à vaporiser l'eau liquide adsorbée contre ses parois. Le rôle du capteur solaire sera de produire, sous forme de vapeur, l'énergie thermique nécessaire

Il existe différentes sortes de zéolites. Pour la machine à glace, le choix s'est porté sur sur la zéolite artificielle 13X, en billes ou filée mais rien n'assure que ce choix soit le meilleur.



§ 2 LA DOCUMENTATION SUR LA ZEOLITE

Le producteur français Axens, filiale de Total et de l'Institut Français du Pétrole, publie plusieurs plaquettes sur la zéolite

<http://france.axens.net/fr/>

<http://france.axens.net/fr/component/axensdocuments/875/air-and-gas-drying-with-axsorb-activated-alumina/english.html>

On peut aussi consulter la documentation, beaucoup plus succincte, de zeolyst.com, producteur Nord américain dépendant entre autres de Shell

Il existe un Handbook of Zeolite Science and Technology disponible gratuitement en .pdf

Dans des revues académiques, on peut consulter :

Adsorption properties of a natural zeolite-water pair for use in adsorption cooling cycles in Applied Energy 87 (2010) 2062-2067

Performance of adsorption and heat mass transfer of zeolite 13 x- H₂O in an adsorption cooling system in AES- Vol 31, 445-448 International Absorption Heat Pump Conference ASME 1993

Zéolith/Wasser adsorption-Kälteaggregate, Eichengrün und Winter in Ki Luft- und Kältetechnik 3/1994

Enhancement of thermal Conductivity by using Polymerzeolite for sorption heat pump applications International Institute of Refrigeration IIF-IIR Commission E2 with E1,B1,B2 – Melbourne, Australia – 1996/1

Water adsorption on zeolite 13 X : comparison of the two methods based on mass spectrometry and thermogravimetry F.B. Cortès F. Chejne F. Carrasco-Marin C. Moreno-Castilla A.F. Pérez-Cadenas Springer Science+business Media, LLC 2010
Published on line : 10 February 2010

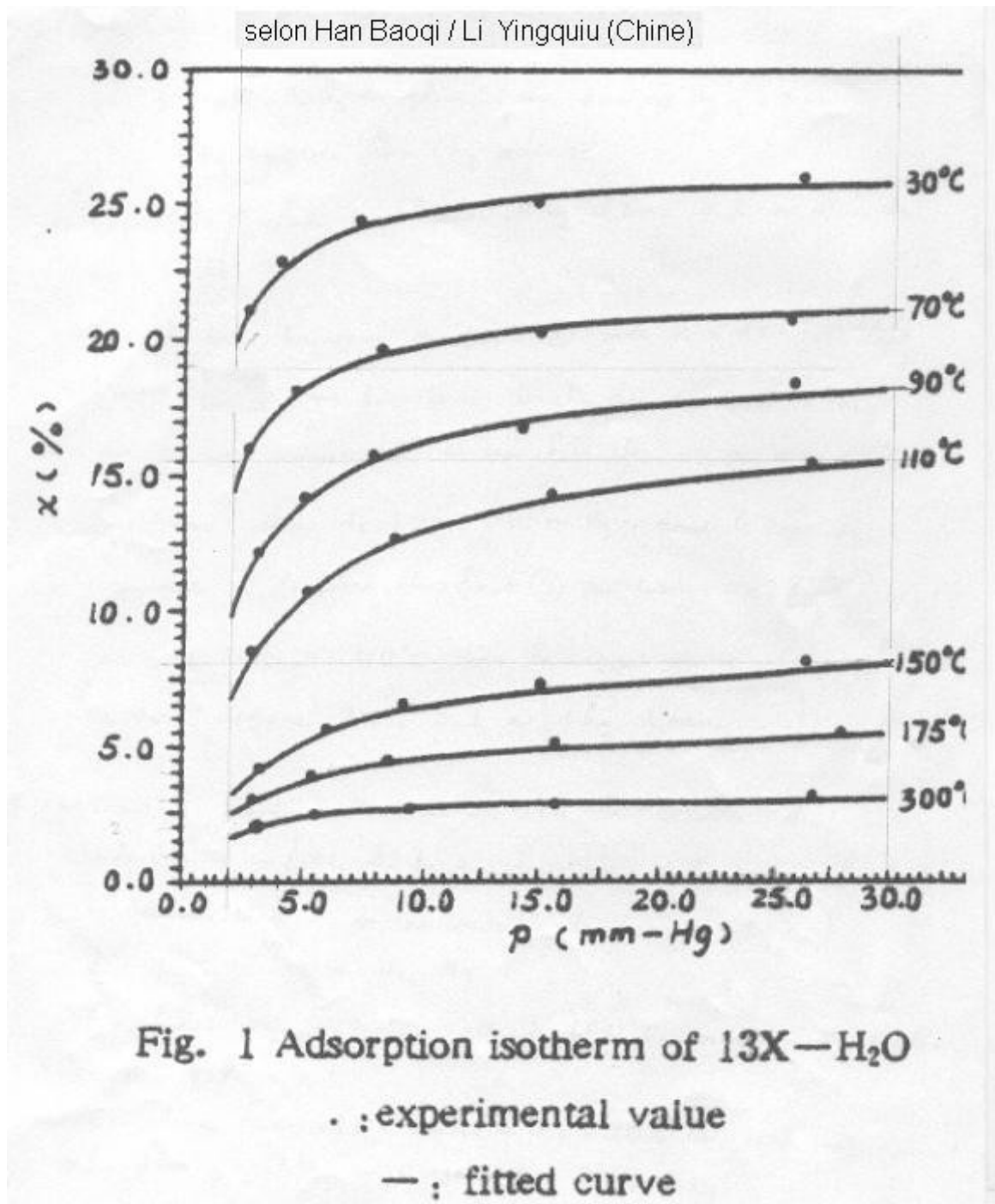
§ 3 LES COURBES CARACTERISTIQUES

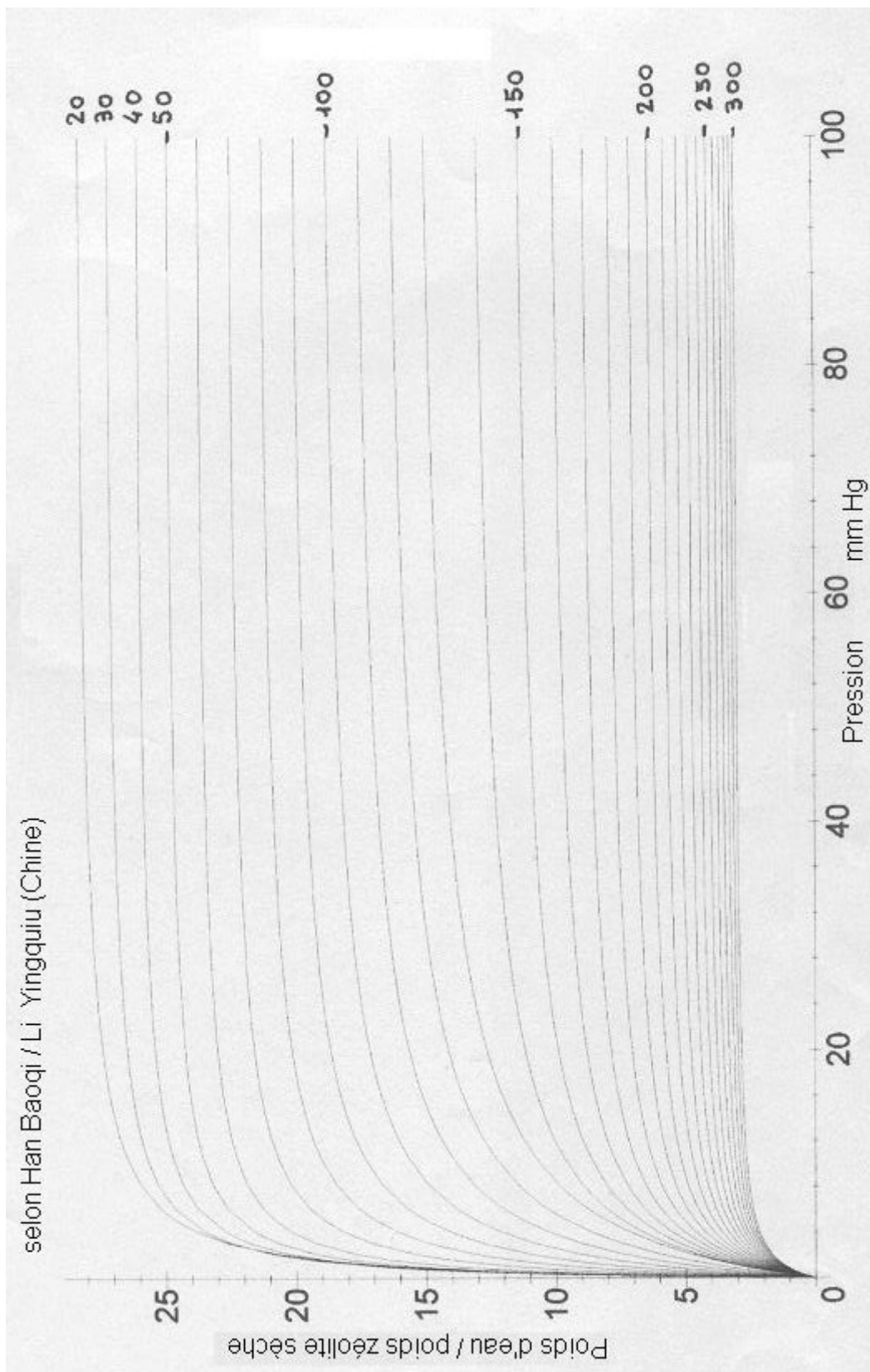
La capacité de rétention d'eau par la zéolite est fonction de la température et de la pression.

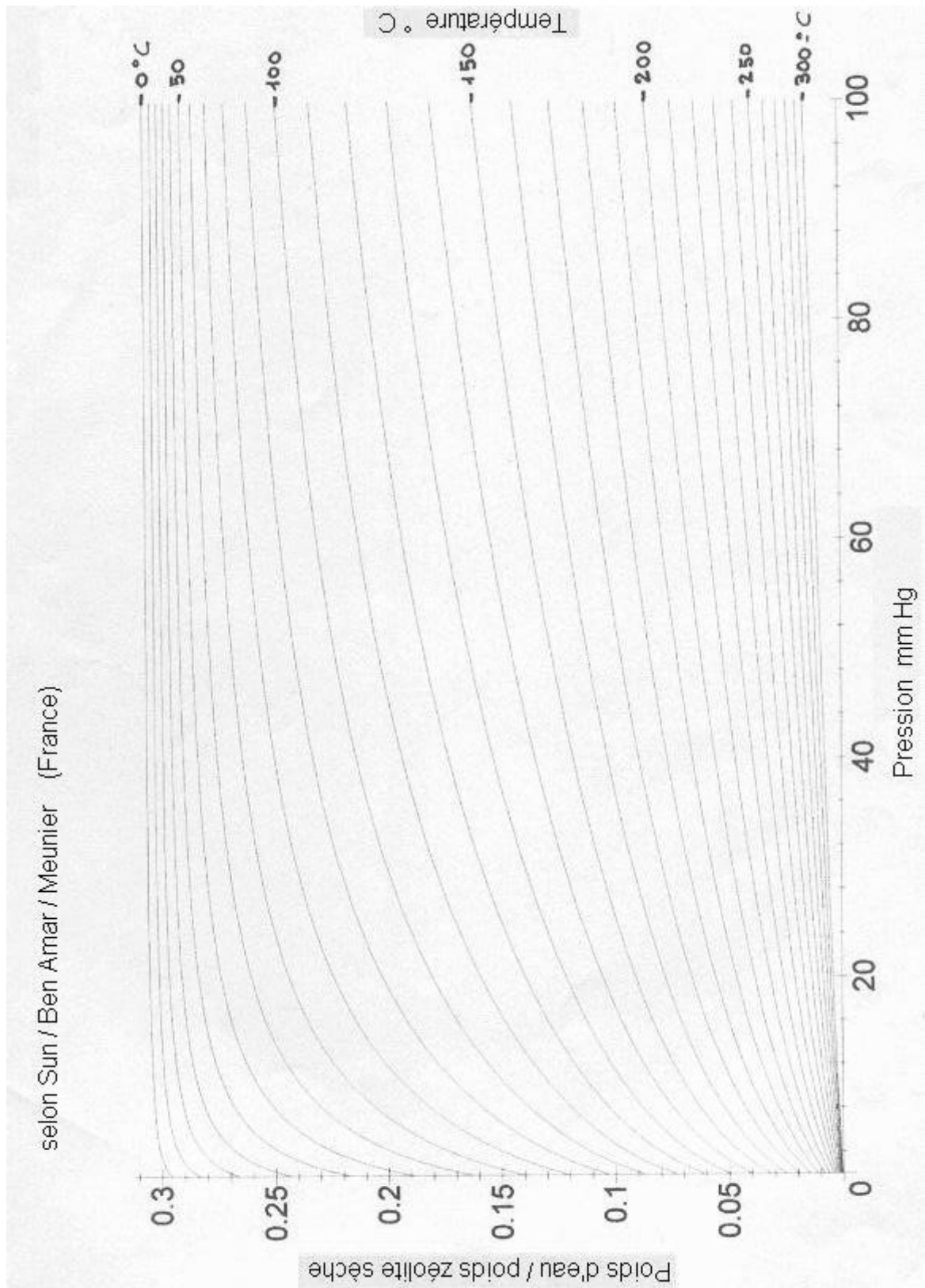
Des graphiques en réseaux de courbes ont été dressés. Ainsi

- Les graphiques en **Isobars** sont des réseaux de courbes indiquant, pour différentes pressions constantes, la quantité d'eau en pourcentage du poids de zéolite sèche, en fonction de la température.
- Les graphiques en **Isothermes** sont des réseaux de courbes indiquant, pour différentes températures constantes, la quantité d'eau en pourcentage du poids de zéolite sèche, en fonction de la pression.
- Les graphiques en **Isostères** sont des réseaux de courbes indiquant, pour plusieurs quantités adsorbées constantes, les températures et pression correspondantes

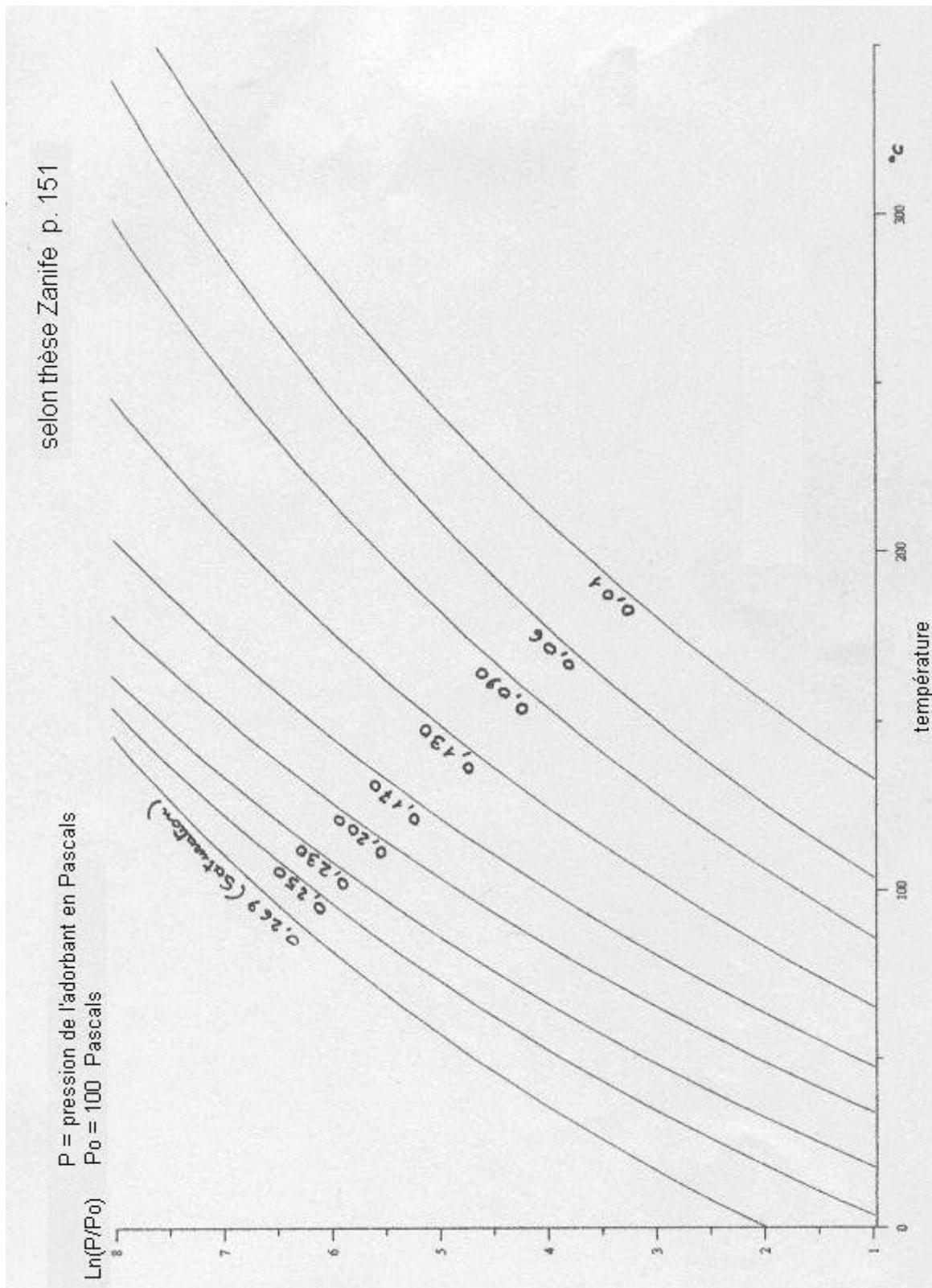
Divers graphiques ont été collectés au fil des recherches et sont retranscrits ci dessous. Les présentations ne sont pas homogènes, et tous n'indiquent pas les mêmes valeurs. Il n'est que de s'en accommoder.





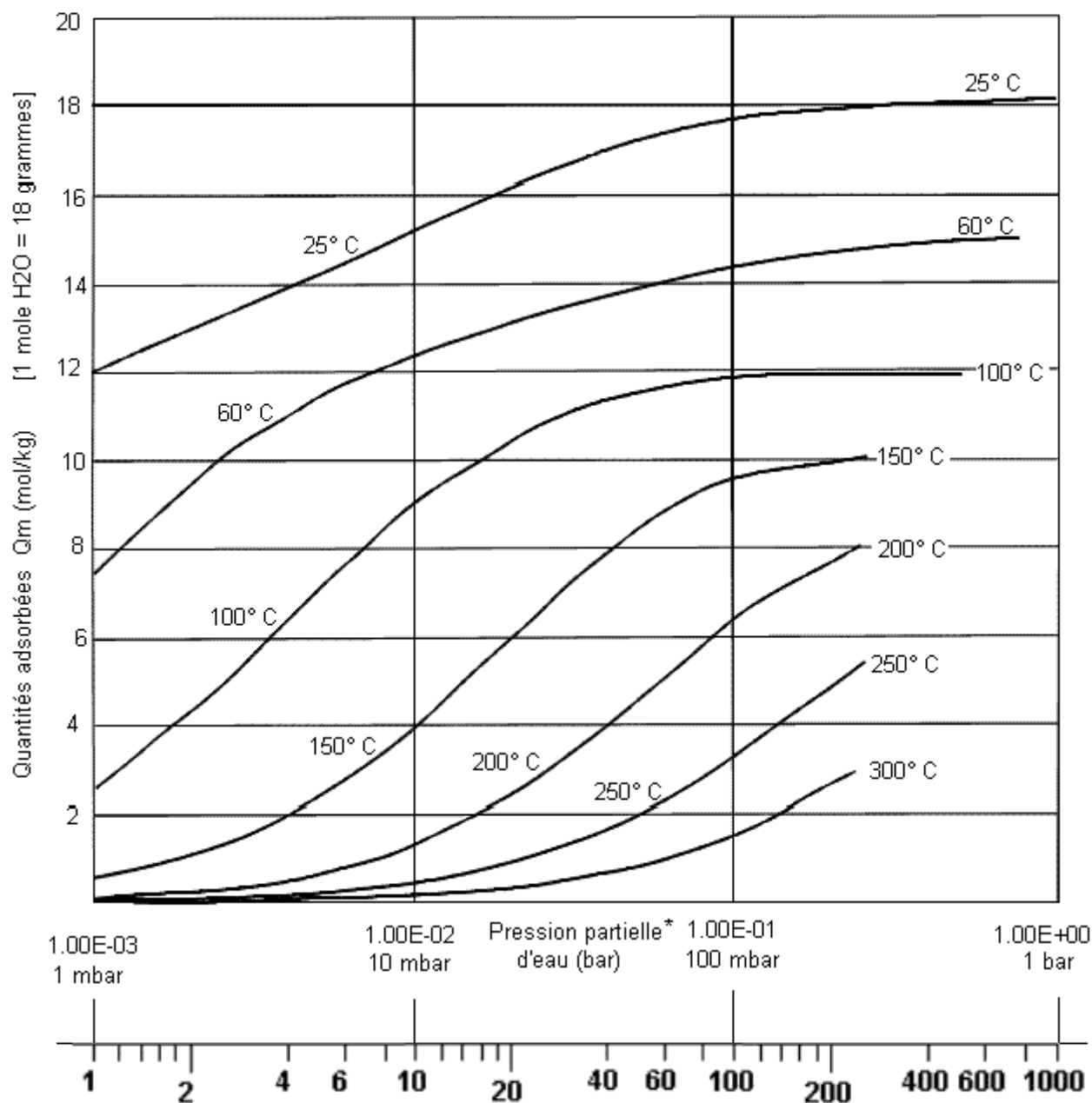


selon thèse Zanife p. 151



Les courbes s'expriment $\ln(P/P_0)$ avec $P_0 = 1$
Ne semblent pas utilisables au dessus de $\ln(P^*P_0) \approx 8$

Isotherme d'adsorption de H₂O sur un tamis 13X
d'après une documentation de l'industrie de la zéolite



*sur la notion de pression partielle, cf la section V "les Incondensables"

SECTION III – L'EAU

On fournit ici quelques renseignements en complément de ceux fournis sur la vapeur dans la 4ème partie "Memento technologique" auxquels le lecteur voudra bien se reporter si besoin.

§1 EAU, GLACE ET VAPEUR : mots-clés et chiffres-clé

Masse volumique (= poids spécifique, ou bien densité)

un litre d'eau = un décimètre cube d'eau, pèse 1 kg

un décimètre cube de glace à 0 °C pèse 0,917 kg

Capacités thermiques massiques = chaleur massique = chaleur spécifique

C'est la quantité d'énergie (= chaleur) pour élever de 1° C la température de 1 gramme d'eau

Eau à 0 °C: 4,218 Joule /gramme .° Celsius

à + 20 °C **4,182 J/g .°C**

à + 100 °C 4,216 J/g. °C

Glacé à 0 °C 2,11 J/g .°C

à -10 °C 2,22 J/g .°C

à -20 °C 2,01 J/g .°C

La calorie est une ancienne unité, interdite depuis 1978. 1 calorie = 4,182 Joule

Fusion/solidification, évaporation/condensation, sublimation/givrage

Tout un chacun connaît les trois états de l'eau : solide (la glace), liquide, et gazeux (la vapeur) ainsi que le changement d'état de l'un à l'autre, on en fait couramment l'expérimentation par exemple en sortant des glaçons du réfrigérateur ou en faisant bouillir de l'eau pour cuire des pâtes.

Mais le changement d'état est lié à un phénomène beaucoup moins facile à appréhender pour l'observateur, à savoir la très grande quantité d'énergie thermique nécessaire pour passer d'un état à l'autre, sans pour autant augmenter la température de l'eau.

Considérons un glaçon de 1 gramme à – 10°. Pour le faire fondre,

- il faut tout d'abord élever sa température de -10 à 0° C, ce qui nécessite $\approx 2,16 \text{ J} \times 10^\circ\text{C} = 21,6 \text{ J}$ qui sont fournis par un apport de chaleur, ou plus simplement par un prélèvement sur l'environnement

- mais pour fondre le glaçon à 0°C, il faut lui apporter **332 J**, sans pour autant augmenter sa température. Cet apport d'énergie nécessaire pour changer d'état est sans commune mesure avec l'apport d'énergie nécessaire pour modifier la température. Pour nommer ces phénomènes, on utilise les termes de chaleur sensible (celle que l'on perçoit facilement lors du changement de température) et de chaleur latente (celle que l'on ne perçoit pas, lors du changement d'état).

Ce phénomène de chaleur sensible/ chaleur latente existe pour tous les corps dans la nature, que ce soit le plomb ou la paraffine.

Ce phénomène est réversible.

Considérons 1 gramme d'eau à 10°. Pour le transformer en glace à 0° C,

- il faut tout d'abord abaisser sa température de 10 à 0° C, ce qui nécessite $\approx 4,2 \text{ J} \times 10 \text{ }^\circ\text{C} = 42 \text{ J}$

- et il faut ensuite fournir 332 J pour faire passer l'eau de l'état liquide à l'état solide.

Cette quantité d'énergie sera restituée lors de la fonte de la glace.

La glace est une forme de stockage d'énergie.

Lors du passage de l'état liquide à l'état gazeux, la chaleur latente est encore beaucoup plus importante au regard de la chaleur sensible.

Considérons 1 kg d'eau à 20° C dans une casserole. Pour la transformer en vapeur

- il faut tout d'abord élever sa température de 20 à 100°C, ce qui nécessite $\approx 4,182 \text{ kJ} \times 80 \text{ }^\circ\text{C} =$

334 kJ de chaleur sensible, fournis par exemple par un rayonnement solaire concentré

- et il faut ensuite fournir **2 257 kJ** de chaleur latente, soit près de 7 fois plus, pour faire passer l'eau de l'état liquide à l'état de vapeur.

Toute cette chaleur latente sera restituée lors du passage de l'état gazeux à l'état liquide. C'est alors le phénomène de condensation, par exemple lorsque la vapeur provenant du capteur "zone chaude" arrive dans la plaque chauffante (qui est la... "zone froide"). La vapeur est un excellent fluide thermique, c'est même le meilleur.

Dans la casserole ci dessus, l'eau se transforme en vapeur à la température de 100° C. La température d'ébullition de l'eau varie en fonction de la pression à laquelle elle est soumise. Dans une casserole, l'eau est soumise à la pression atmosphérique (correspondant à la colonne d'air) d'environ 1,013 bar. Dans une enceinte fermée, par exemple dans le bouilleur du capteur, ou bien dans le vaporisateur de la machine à glace (qui n'est que l'inverse d'un bouilleur) les conditions de vaporisation sont différentes.

Toutes les valeurs indiquées ci dessus varient en fonction des conditions de température et de pression. Toutes ces données sont disponibles dans les immuables tables de vapeur.

Fusion/solidification, vaporisation/condensation, chaleur sensible/chaleur latente : toute la machine à glace présentée dans cette documentation, y compris le capteur solaire produisant de la vapeur, n'est un jeu entre ces différentes notions . On peut y ajouter la sublimation qui est le passage direct de l'état solide à l'état gazeux, à la quelle on aura recours lors de la production de glace. Le givrage est l'inverse de la sublimation, par exemple à l'intérieur d'un réfrigérateur, lorsque l'eau contenue dans les aliments s'évapore et vient se congeler contre la zone froide près du bac à glaçons.

Chaleur de fusion/solidification à 0° C : 332 kJ/kg

Chaleur de vaporisation/condensation à 100° C 2 257 kJ/kg

Chaleur de sublimation ?

§2 LES TABLES DE VAPEUR

Les tables de vapeur sont aisément disponibles, entre autres sur le Web (et dans la quatrième partie "memento technique"), mais il s'agit de tables de vapeur aux températures supérieures à 0 °

Les tables de vapeur aux températures négatives, indispensables pour notre usage, sont beaucoup moins couramment disponibles.

On présente ci dessous

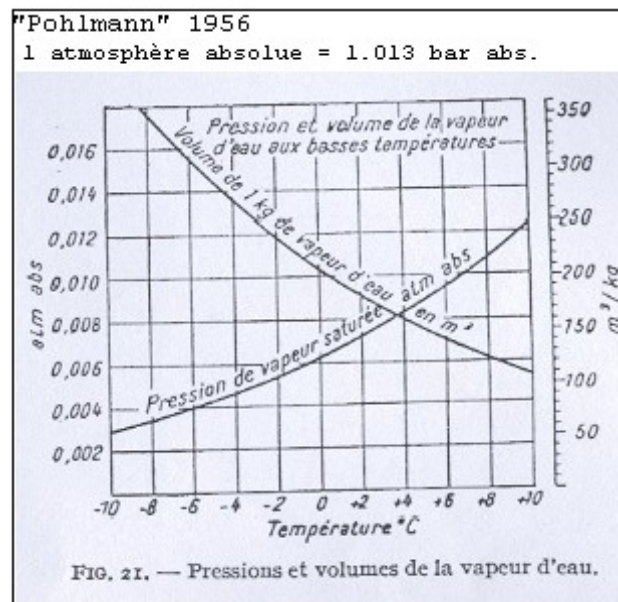
1- une transcription d'une table de vapeur de Regnault, publiée dans un Aide Mémoire de l'Ingénieur, Dunod, 1917. Les pressions en mm de mercure ont été transcrites en millibars

2- une reproduction de tables de vapeur aux températures négatives, publiées dans le "Pohlmann" 1956 page 81 / Bibliothèque de l'ancienne Ecole de Brasserie de Nancy.

3- une table de vapeurs établie à l'intention du conducteur de la machine à glace, qui ne regroupe que les éléments qui lui sont utiles utiles

Ces tables présentent de légères divergences qui sont sans incidence pour notre propos.

Aide mémoire Dunod - 1917		
mba	° C	mm Hg
1,12	-20	0,84
1,23	-19	0,92
1,32	-18	0,99
1,44	-17	1,08
1,49	-16	1,12
1,71	-15	1,28
1,85	-14	1,39
2,03	-13	1,52
2,21	-12	1,66
2,41	-11	1,81
2,61	-10	1,96
2,85	-9	2,14
3,11	-8	2,33
3,37	-7	2,53
3,68	-6	2,76
4,01	-5	3,01
4,36	-4	3,27
4,85	-3	3,64
5,17	-2	3,88
5,63	-1	4,22
6,13	0	4,61



Sur les documents du Pohlmann, remarquer le volume de plusieurs centaines de m³ occupé par la vapeur d'eau aux températures négatives, ce qui explique que l'eau en tant que fluide frigorigène ne puisse être pompée/comprimée mécaniquement comme le sont les fluides frigorigènes usuels, dont les caractéristiques sont différentes.

L'adsorption est un moyen de contourner cette impossibilité.

e) Table pour la vapeur d'eau aux basses pressions au-dessus de l'eau sous-refroidie.

Température t °C	Pression p _s		Volumen spécifiques m ³ /kg	Chaleur de vaporisation r i'' - i' kcal/kg
	mm Hg	kg/cm ² abs.		
- 20	0,96	0,00131	995	608,1
- 19	1,044	0,00142	920	—
- 18	1,135	0,00154	848	—
- 17	1,233	0,00167	782	—
- 16	1,338	0,00182	722	—
- 15	1,451	0,00197	667	605,1
- 14	1,573	0,00214	615	—
- 13	1,705	0,00232	568	—
- 12	1,846	0,00251	526	—
- 11	1,997	0,00271	486	—
- 10	2,159	0,00294	451	602,4
- 9	2,335	0,00318	418	—
- 8	2,521	0,00343	388	—
- 7	2,722	0,00370	359	—
- 6	2,937	0,00399	332	—
- 5	3,167	0,00430	307	599,7
- 4	3,413	0,00464	282	—
- 3	3,677	0,00500	262	—
- 2	3,958	0,00538	244	—
- 1	4,258	0,00580	227	—
0	4,579	0,00622	206	595,0

Table pour la vapeur d'eau au-dessus de la glace.

Temp. °C	Pression mm Hg	Temp. °C	Pression mm Hg	Temp. °C	Pression mm Hg
- 55	0,015	- 14	1,36	- 1	4,22
- 50	0,029	- 13	1,49	+ 0	4,58
- 45	0,052	- 12	1,63		
- 40	0,093	- 11	1,78		
- 35	0,17	- 10	1,95		
- 30	0,28	- 9	2,12		
- 25	0,47	- 8	2,32		
- 20	0,77	- 7	2,53		
- 19	0,85	- 6	2,76		
- 18	0,94	- 5	3,01		
- 17	1,03	- 4	3,28		
- 16	1,13	- 3	3,57		
- 15	1,24	- 2	3,88		

"Pohlmann" 1956
page 81

TABLES DE VAPEUR

de -20 à 0 °C

évaporateur

mba	° C
1,12	-20
1,23	-19
1,32	-18
1,44	-17
1,49	-16
1,71	-15
1,85	-14
2,03	-13
2,21	-12
2,41	-11
2,61	-10
2,85	-9
3,11	-8
3,37	-7
3,68	-6
4,01	-5
4,36	-4
4,85	-3
5,17	-2
5,63	-1
6,13	0

de 0 à 100 °C

condenseur

mbar	° C	mbar	° C
6,11	0	31,66	25
7,06	2	33,60	26
8,13	4	37,78	28
9,35	6	42,41	30
10,72	8	47,53	32
12,27	10	56,21	35
13,12	11	73,74	40
14,02	12	95,81	45
14,97	13	123,34	50
15,98	14	157,40	55
17,04	15	199,20	60
18,17	16	250,10	65
19,37	17	311,60	70
20,63	18	385,50	75
21,96	19	473,60	80
23,37	20	578,00	85
24,86	21	701,10	90
26,43	22	845,30	95
28,08	23	1013	100
29,82	24		

de 100 à 175 °C

bouilleur

bars	° Celsius
0	100,0
0,5	111,6
1	120,4
1,5	127,6
2	133,7
2,5	138,0
3	143,7
3,5	147,2
4	152,0
4,5	155,6
5	158,9
5,5	162,0
6	165,0
6,5	167,8
7	170,2
7,5	173,0
8	175,4

§3 QUE PEUT-ON FAIRE AVEC 1 KG DE GLACE ?

La réfrigération est le fait de refroidir un produit à une température proche de 0° C . Lors de la congélation le produit est porté à une température inférieure à 0° C.

Caractéristiques physiques des aliments, selon *Energie+, version 7, Architecture et Climat, Université catholique de Louvain (Belgique) 2012, réalisé avec le soutien de la Wallonie - DGO4 - Département de l'Énergie et du Bâtiment Durable. Disponible sur : <http://www.energieplus-lesite.be> "*

Chaleur spécifique des aliments						
Produits	Chaleur spécifique (moyennes) au-dessus de 0°C (Wh/kgK) (kJ/kg.K)		Chaleur spécifique (moyennes) en-dessous de 0°C (Wh/kgK) (kJ/kg.K)		Chaleur latente de congélation (moyennes) (Wh/kg) (kJ/kg)	
	Viandes	0,87	3.132	0,47	1.692	64
Poissons	0,93	3.348	0,50	1.800	67	241.2
Fruits et légumes	1,04	3.744	0,53	1.908	80	288
Laitages	1,05	3.780	0,53	1.908	80	288
Fromage/beurre	0,76	2.736	0,41	1.476	47	169.2
Boissons	1,10	3.960	0,56	2.016	87	313.2
Pain/pâtisserie	0,52	1.872	0,52	1.872	37	133.2

On constate que les fruits et légumes, dont la teneur en eau est très élevée, ont une chaleur massique élevée, pas très éloignée de celle de l'eau.

Nota 1 Les chaleurs spécifiques sont exprimées ci dessus en WattHeure, alors que l'unité légale est le Joule.

Le Joule est l'unité de mesure d'une quantité d'énergie (thermique, mécanique, électrique...).

Le Watt est une unité de puissance : une machine qui produit ou consomme 1 joule d'énergie en Une seconde a une puissance de 1 Watt (thermique, mécanique, électrique...)

Le WattHeure représente la quantité d'énergie consommée ou produite en une heure par une machine ayant une puissance de 1 Watt.. Un Wh = 3600 Joule. Un kWh = 3600 kJ. Le kWh est une

unité non légale, et cette invention des producteurs d'énergie électrique favorise la confusion entre les notions de puissance et de quantité d'énergie, ce qui vient immanquablement polluer bon nombre de débats sur la notion d'énergie.

Les WattHeure du tableau ci dessus on été transcrits en Joule.

Nota 2 Concernant les températures, et pour ce qui est de notre propos de machine à glace, la différence entre les ° Kelvin et les ° Celsius est sans incidence.

Nota 3 les caractéristiques physiques des aliments ci dessus n'ont évidemment rien à voir avec leurs caractéristiques nutritionnelles , exprimées usuellement en calories... ou en Joules

Soit Un kg de poisson à 20°C que l'on souhaite refroidir à 0° C. (hors pertes thermiques...)

La quantité d'énergie froid nécessaire est de $3.348 \text{ kJ} \times 20^\circ \text{C} \approx 67 \text{ kJ}$

Si l'on dispose de 0,2 kg de glace à -5°, alors on dispose de

$$0,2 \text{ kg} \times 5^\circ \text{C} \times 2,11 \text{ (capa therm. Glace)} = 2.11 \text{ kJ de chaleur sensible}$$

$$0,2 \text{ kg} \times 332 \text{ (chal. fusion glace)} = \underline{66,4 \text{ kJ de chaleur latente}}$$

$$\approx 68 \text{ kJ de froid, dont on remarque qu'ils sont}$$

quasi entièrement fournis par la chaleur latente de fusion.

Les 200 grammes de glace sont suffisants pour réfrigérer 1 kg de poisson.

On souhaite maintenant congeler le poisson, par exemple à - 5 °C, avec de la glace à - 20° C

Quantité d'énergie froid nécessaire

$$\text{de } 20 \text{ à } 0^\circ \text{C} \quad 68 \text{ kJ comme précédemment}$$

$$\text{pour la congélation} \quad 241 \text{ kJ selon le tableau ci dessus}$$

$$\text{de } 0 \text{ à } -5^\circ \text{C} \quad 1,8 \times 5 \quad \underline{9 \text{ kJ}}$$

$$318 \text{ kJ}$$

Avec 1 kg de glace de -20 à -5 °C, on dispose de $15 \times 2,22 = 33 \text{ kJ}$ d'énergie froid

Pour congeler Un kg de poisson, il faudrait $318/33 \approx 9,6 \text{ kg}$ de glace..., et hors pertes thermiques.

En conclusion

Même si l'on dispose de glace à -20° C, fût-ce en grande quantité, il ne sera pas envisageable de congeler des denrées alimentaires. Le seul usage possible de la glace est la réfrigération.

Le niveau de température de la glace importe très peu dans le processus de réfrigération. Compte tenu du fait que le coût technologique du froid est d'autant plus élevé que le niveau de température est bas, on se contentera, dans le cadre de la machine à glace, de produire de la glace sans se préoccuper outre mesure de son niveau de température. Les gros pains de glace de plusieurs dizaines de kg livrés autrefois à dos d'homme chez les particuliers, avant l'arrivée des réfrigérateurs électriques ménagers, étaient à une température moyenne de l'ordre de - 5 °C.

SECTION IV – REFROIDISSEMENT PAR EVAPORATION ET HUMIDITE DE L'AIR

Comme toute machine thermique, la machine à glace fonctionne à partir d'une source chaude et d'une source froide. La source chaude est fournie par le rayonnement solaire concentré. La source froide est fournie par l'environnement, avec deux fluides disponibles : l'eau et l'air.

Lors de l'absorption, pour refroidir la zéolite, on utilisera exclusivement de l'eau, à faire circuler dans l'échangeur du réacteur. Quelques dizaines de litres d'eau dans un baquet, circulant en circuit fermé avec une pompe de 12 ou 15 Watts du type pompe de fontaines de jardin devraient suffire, l'eau se remettant à température ambiante d'une séance à l'autre.

Lors de la désorption, pour refroidir et condenser les désorbats (= l'eau expulsée de la zéolite), une circulation d'eau froide dans un serpentin conviendrait. Mais on pourrait aussi utiliser un dispositif de refroidissement adiabatique en évaporant un peu d'eau sur le condenseur. Le propos est de profiter du prélèvement d'énergie thermique dû à l'évaporation (la chaleur latente dont il a été question dans les sections précédentes) pour créer une source froide dont le niveau de température pourrait être inférieur de quelques degrés à la température ambiante, tout en réduisant notablement la consommation d'eau "source froide".

On va donc, le temps de cette petite section IV, s'intéresser aux notions de refroidissement adiabatique et d'humidité de l'air.

§1 LE REFROIDISSEMENT PAR EVAPORATION dit aussi "refroidissement par ruissellement" ou "refroidissement adiabatique"

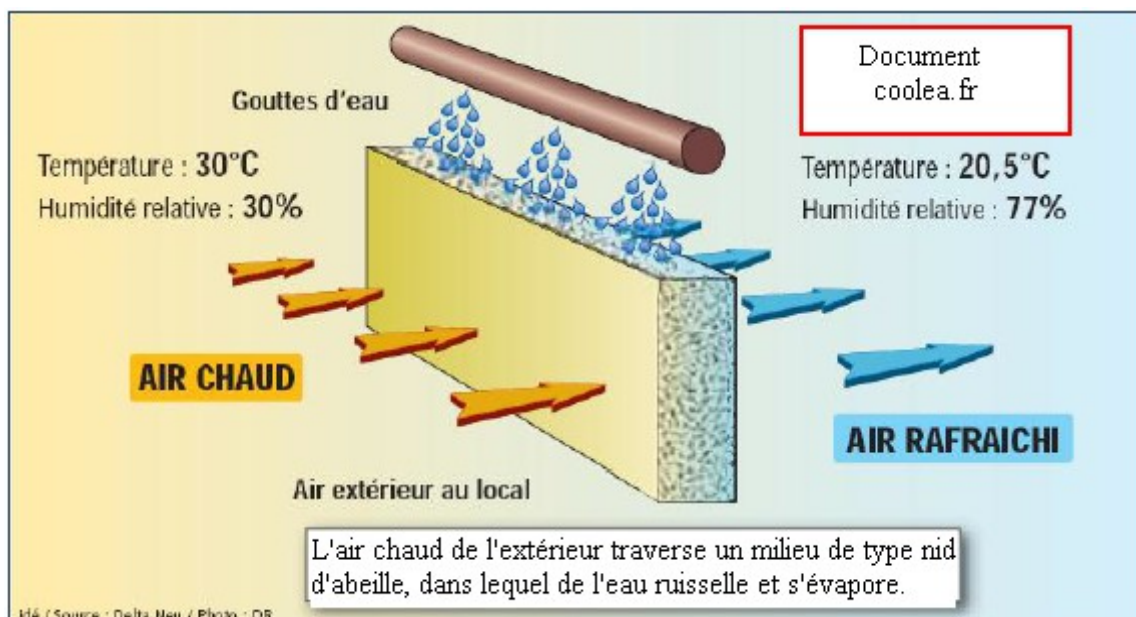
On considère un petit local dans lequel des machines produisent de la chaleur qu'il est nécessaire d'évacuer pour un bon fonctionnement des dites machines.. Par exemple : un local informatique.

Il y a plusieurs solutions, l'une d'entre elles étant de faire traverser le local par de l'air à température ambiante pulsé par un ventilateur. Cela suppose que, par rapport au besoin, le ventilateur a un débit suffisant, et que la température de l'air à l'entrée est suffisamment basse.

Une autre solution consiste à faire se croiser le courant d'air avec un ruissellement d'eau sur un matériau du type nid d'abeille, ce qui provoque une évaporation de l'eau. L'eau puise la chaleur latente nécessaire à son évaporation dans le milieu ambiant, à savoir dans l'air pulsé, lequel est donc refroidi. C'est le principe du refroidissement adiabatique, dit aussi refroidissement par évaporation.

Il ne s'agit pas d'une nouveauté, le principe était connu des Egyptiens dont les jarres quelque peu poreuses laissaient échapper une faible quantité d'eau qui, en s'évaporant, refroidissait le contenu restant. C'est d'ailleurs selon ce principe que fonctionne la machine à glace, la vaporisation de l'eau y étant "dopée" par le vide et par l'avidité de la zéolite.

Dans le cas du local informatique imaginaire ci dessus, le refroidissement adiabatique n'est possible que si le matériel contenu dans le local accepte de l'air contenant un surcroit d'humidité, et l'évaporation dans l'air n'est possible que si l'air n'est pas déjà trop chargé en humidité, ce qui amène à se pencher quelque peu sur la question de l'humidité de l'air.

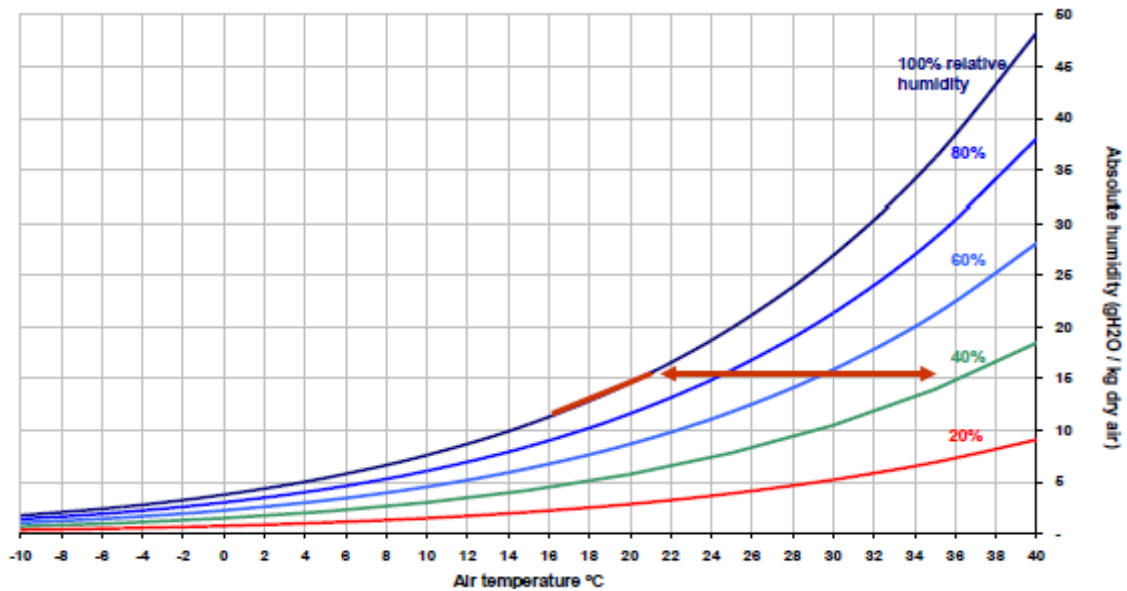


Pour la machine à glace, le dispositif serait quelque peu différent de celui ci dessus, il serait éventuellement précisé dans le chapitre "Etude".

§ 2 L'HUMIDITE DE L'AIR

L'air ne peut contenir qu'une certaine quantité maximum d'eau sous forme de vapeur. Cette quantité maximum varie selon la température. Si l'air n'est pas saturé, l'humidité relative est le rapport entre la quantité d'eau présente dans l'air et la quantité maximale d'eau que l'air pourrait contenir à la même température. (Wikipedia). Pour une température donnée, l'humidité relative caractérise la faculté que possède l'air d'absorber encore de la vapeur d'eau, et c'est bien ce qui nous intéresse

Ci dessous : un diagramme psychrométrique simplifié



Plus la température de l'air atmosphérique est élevée, plus il peut contenir de vapeur d'eau.

La mesure de l'humidité de l'air s'effectue avec des hygromètres, ou bien, pour plus de précision, avec un psychromètre. Est-ce bien utile pour notre propos ? Ce sera à voir ultérieurement.

D'ici là on peut consulter avec profit le site www.education.meteofrance.com

On peut au moins retenir que, si l'air ambiant est déjà très chargé en humidité, le refroidissement par évaporation ne fonctionnera pas, il faudra donc envisager un autre procédé pour la condensation des désorbats.

SECTION V – LES INCONDENSABLES

§1 – LE PROBLEME DES INCONDENSABLES

Toute l'installation solaire thermique à vapeur repose sur le principe du changement de phase de l'eau, sur les notions de vaporisation et de condensation.

Concernant la condensation, cette dernière peut avoir lieu à pression atmosphérique, ou à une pression supérieure à la pression atmosphérique, lorsque l'eau est utilisée comme fluide thermique. C'est le cas dans la plaque à vapeur, où le système de régulation maintient une certaine pression de façon à disposer d'un niveau de température supérieur à 100° C, c'est également le cas pour le circuit de vapeur qui chauffe la zéolite lors de la désorption.

Mais lorsqu'il s'agit de vapeur d'eau en tant que fluide frigorigène lors de l'adsorption, ou lorsqu'il s'agit de la vapeur d'eau en provenance de la désorption, il est hautement souhaitable, pour un meilleur rendement de l'installation, que les condensations correspondantes s'effectuent à une pression inférieure à la pression atmosphérique, communément appelées "condensations sous vide". (cf les tables de vapeur et les courbes de la zéolite.)

Et c'est à l'occasion de la condensation sous vide qu'apparaît un problème majeur, le problème des "incondensables".

La vapeur n'est jamais pure, elle contient toujours, en quantités plus ou moins importantes, d'autres gaz provenant par exemple des gaz dissous dans l'eau et qui se libèrent lors de la vaporisation, ou bien provenant de l'air contenu dans l'installation avant la mise en route du bouilleur. La vapeur, elle, ne demande qu'à se précipiter sur la zone froide, à s'y condenser, à restituer sa chaleur latente – c'est justement ce qu'on lui demande. Mais les autres gaz, eux, les "incondensables" ne savent pas et ne peuvent pas se condenser. Ils restent dans l'installation, et y sèment une perturbation dont le néophyte est à cent lieues de se douter, avec pour conséquences un fonctionnement insatisfaisant puis médiocre de l'installation, pouvant aller jusqu'à l'absence quasi-totale de fonctionnement. "L'air est un poison pour la vapeur", d'autant plus que le problème est impalpable et difficile à appréhender.

Hormis le domaine du génie frigorifique par compression, la question des incondensables est bien sûr parfaitement connue et maîtrisée dans le cadre des installations de vapeur professionnelles, mais si les installations de vapeur sont de plus en plus importantes (y compris les installations nucléaires), elles sont aussi de moins en moins nombreuses, et la question des incondensables dans le cas de la vapeur d'eau n'est désormais partagée que par un cercle très étroit de spécialistes. Dans le cadre de la production de glace par adsorption avec zéolite, la maîtrise de la question des incondensables est une condition sine qua non de bon fonctionnement.

On aborde ici le problème des incondensables sous différentes présentations.

§ 2) LA LOI DE DALTON

Le problème des gaz incondensables est régi par la loi de Dalton, formulée en 1805 :
"La pression totale d'un mélange de gaz est égale à la somme des pressions partielles prises par chacun des constituants de ce gaz comme s'il occupait seul le volume mis à sa disposition"
(Pohlmann 1993 p 183)

En pratique, "l'air empêche la condensation sur une partie des surfaces froides du condenseur, ce qui revient à diminuer la surface d'échange. Il en résulte une augmentation de la température de condensation et donc de la pression de vapeur" (thermodynamique.com/spip.php?article69)

Sur le site très pédagogique [éducation.météofrance](http://education.météofrance) , il est également question de la loi de Dalton, au sujet de l'humidité de l'air "la pression d'un mélange de gaz contenu dans un volume donné et à une température donnée est égale à la somme des pressions de ces gaz, s'ils occupaient chacun le même volume dans les mêmes conditions de température. Dit autrement : il y a suffisamment d'espace entre les molécules de l'air atmosphérique pour qu'elles n'interfèrent pas entre elles."

§ 3) TRAITÉ PRATIQUE des chaudières et machines de la marine de commerce (Guilcher, 1923) wreck.fr/guilcher/chap06.pdf page 153:

" Le chef mécanicien peut contrôler à tout instant les quantités d'air qui se trouvent dans le condenseur en établissant un tableau comparatif d'après la loi de Dalton et les tensions de vapeur d'eau aux différentes températures du condenseur, de la façon suivante :

Loi de Dalton. — 1° *Dans un vase fermé, la force élastique maxima de la vapeur émise est la même que dans le vide à la même température.*

2° *Un mélange de gaz et de vapeur a une force élastique égale à la somme de celles qu'auraient ces gaz s'ils occupaient seuls le volume considéré.*

Supposons que la température intérieure du condenseur soit de 40 degrés et la pression de 8cm,5 de mercure ou 0 kg, 115. Quelles sont les quantités de vapeur d'air qui s'y trouvent?

La tension de la vapeur d'eau à 40 degrés est de 54mm,9 ou : $54,9 \times 1,033 / 760 = 0,075$

Puisqu'il y a au condenseur une tension totale de 0kg,115, il est évident que la tension de l'air sera : $0,115 - 0,075 = 0,040$.

En établissant ainsi un tableau des tensions des vapeurs pour toutes les températures susceptibles du condenseur et transformant en kilogrammes la tension totale du condenseur en millimètres de mercure, d'après le manomètre du vide et la pression atmosphérique du moment, on obtient la quantité d'air au condenseur.

§ 4) LA QUESTION DES INCONDENSABLES PRESENTEE PAR UN CONSTRUCTEUR

Ci dessous : retranscription d'une brochure d'une douzaine de pages des Ets SARCO, publiée dans les années 1970 (?).



- Son origine
- Ses conséquences
- Son élimination

- ORIGINE -

dans une installation standard de vapeur et avec des conditions normales d'utilisation, l'air, de même que d'autres gaz incondensables, s'y trouvent toujours présents. Leur origine est double, à savoir :

1°) Eau d'alimentation de la chaudière :

L'eau d'appoint d'une installation de vapeur contient à la fois de l'oxygène O₂ et du gaz carbonique CO₂.

a) l'oxygène se dégage dans la chaudière avec la vapeur

b) le gaz carbonique se trouve déjà en partie à l'état gazeux dans l'eau d'appoint. Mais celle ci contient plusieurs sels, et en particulier des bicarbonates de Calcium qui vont se transformer en carbonates avec dégagement de CO₂ sous l'effet de la température. D'où un supplément de CO₂

2°) De l'installation elle même :

Dans une installation en fonctionnement, la vapeur se trouve dans toutes les tuyauteries. Lorsque l'on arrête l'ensemble, la vapeur va se condenser petit à petit et de ce fait la pression va diminuer. Il y aura ainsi création d'un vide partiel. L'air pénètre donc à l'intérieur de l'installation étant aspiré par le vide qui y règne.

On a ainsi l'explication de la présence des incondensables dans une installation vapeur. Dans le premier cas on peut faire appel à des spécialistes de traitement des eaux pour effectuer, d'une part un dégazage, et d'autre part une élimination des sels indésirables et ainsi diminuer la quantité de gaz incondensables provenant de l'eau d'alimentation. Malheureusement pour le deuxième cas, il est pour ainsi dire impensable d'avoir une installation standard qui soit étanche au vide.

Par conséquent il y aura toujours de l'air ainsi que d'autres gaz incondensables dans le circuit vapeur, d'une part au démarrage et d'autre part en marche continue.

-CONSEQUENCES-

Cette présence d'incondensables est néfaste à la bonne marche d'une installation pour plusieurs raisons :

1°) Inconvénients à plus ou moins longue échéance : corrosion

Nous avons vu précédemment que l'oxygène et le gaz carbonique se trouvent présents dans un circuit de vapeur. En l'absence d'eau (ex : vapeur saturée sèche), ces deux gaz ne sont pas dangereux mais ils le deviennent dès qu'ils sont en solution et c'est ce qui se produit lors de la

condensation de la vapeur. La corrosion est donc souvent localisée à la chaudière et aux canalisations de retour des condensats.

2°) Inconvénients immédiats

a) abaissement de la température de la vapeur

Pour expliquer cet abaissement de la température de la vapeur, nous ferons appel à la loi de mélange des gaz ou encore appelée loi de Dalton. Cette loi dit que

"la pression d'un mélange de gaz sous le volume V est égale à la somme des pressions de chacun des gaz composants ramenée au volume V" :

$$P = \frac{P_1 V_1}{V} + \frac{P_2 V_2}{V} + \dots$$

Ce qui peut encore s'énoncer sous la forme suivante :

-La pression partielle de chacun des gaz composants est une fraction de la pression totale égale à la fraction du volume total occupé par ce gaz ou vapeur.

Pour montrer plus clairement tout ce que ceci veut dire, nous allons prendre l'exemple suivant : mélange vapeur-air sous une pression totale $P=1,6$ bar absolu [$\approx 0,6$ bar manométrique] constitué de trois parties de vapeur et d'une partie d'air. D'après la loi de Dalton, la pression partielle de la vapeur sera :

$$\frac{3}{4} \times 1,6 = 1,2 \text{ bar abs. Et celle de l'air : } \frac{1}{4} \times 1,6 = 0,4 \text{ bar absolu}$$

Si nous regardons une table de vapeur, on trouve que la température de la vapeur saturée sèche sous 1,6 bar absolu. est de 113° alors qu'elle n'est plus que de 104° sous une pression de 1,2 bar abs. Et c'est à cette dernière température que se trouve notre installation. Par conséquent, il n'est pas possible de se fier à la pression indiquée par le manomètre pour déterminer la température dans une telle enceinte de vapeur.

b) Diminution de la transmission calorifique

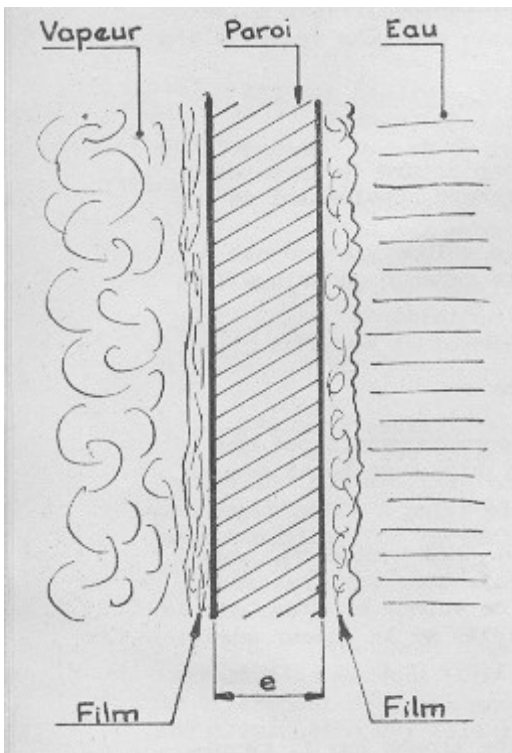
C'est un fait bien connu des habitants des régions froides que l'air est très mauvais conducteur de la chaleur et c'est pour cette raison qu'ils utilisent des doubles fenêtres.

Pour se rendre compte du rôle de l'air en tant qu'isolant thermique dans une installation de vapeur, examinons le chemin que suit la chaleur pour passer du fluide chaud, ici la vapeur, au fluide froid, de l'eau par exemple. Il y a 3 étapes, qui sont pour ainsi dire 3 obstacles à franchir, à savoir :

- 1°) un film stagnant le long de la paroi métallique côté fluide chauffant
- 2°) la paroi métallique
- 3°) un film stagnant le long de la paroi métallique côté fluide chauffé

Ainsi la résistance totale opposée au passage de la chaleur est la somme des résistances représentées par les 3 obstacles et se représente par la formule suivante :

$$(1) \quad \underbrace{\frac{1}{q}}_{\text{Résistance globale}} = \underbrace{\frac{1}{k_1}}_{\text{Résistance d'entrée}} + \underbrace{\frac{e}{\lambda}}_{\text{Résistance de parcours}} + \underbrace{\frac{1}{k_2}}_{\text{Résistance de sortie}}$$



k_1 = coefficient de transmission superficielle du fluide chauffant,

$$k_1 = \alpha_1 + r_1$$

coefficient coefficient
de convection de rayonnement

k_2 = coefficient de transmission superficielle du fluide chauffé

$$k_2 = \alpha_2 + r_2$$

e = épaisseur de la paroi

λ = conductibilité de la paroi supposée homogène.

La quantité de chaleur ayant traversé est alors donnée par

$$(2) Q = qS_z (T - t)$$

T = température du fluide chaud

t = température du fluide froid

S = aire

z = temps

Toutes ces formules sont déterminées par le fait que la chaleur passe

α) par convection-rayonnement du fluide chaud et des parois chaudes à la face chaude de la paroi étudiée

β) par conduction à travers la paroi,

γ) par convection-rayonnement de la face froide de la paroi au fluide froid et éventuellement rayonnement aux parois froides.

Si nous supposons que nous sommes en régime permanent, ces 3 quantités sont égales d'où les formules précédentes (2) et (1)

On s'aperçoit ainsi que le coefficient total sera toujours inférieur au plus petit des coefficients partiels de transmission calorifique de sorte que le film stagnant ayant le plus faible coefficient sera le plus important. Il est intéressant de noter que, à l'exception peut-être des dépôts dans les chaudières (suie, tartre...) le plus usuel des films stagnants à faible coefficient de transmission de chaleur est l'air.

Une très faible proportion d'air dans la vapeur peut rapidement former un film sur la surface d'échange. L'épaisseur de ce film d'air dépend de nombreux facteurs tels que la forme et la rugosité de la paroi métallique et vitesse du fluide le long de cette paroi.

-APPLICATIONS -

Jusqu'à présent nous n'avons fait que décrire de qui se passe dans un circuit de vapeur avec présence d'air. Nous allons maintenant donner quelques chiffres ou tout au moins un ordre de grandeur des différents coefficients en mettant en relief l'effet néfaste de l'air présent dans le circuit de vapeur.

En général le coefficient de transmission superficiel k pour la vapeur dépasse souvent $10\,000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ [1 calorie = 4,18 Joule]

$$k_{\text{vapeur}} \geq 10\,000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

et pour une vapeur qui se condense

$$k \geq 2\,000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

alors que celui de l'eau est souvent compris entre

$$1000 \leq k_{\text{eau}} \leq 5\,000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

Le coefficient de conductibilité λ d'une paroi en acier supposé homogène est de $50 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$

$$\lambda_{\text{acier}} = 50 \text{ kcal m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

alors que pour une paroi en cuivre

$$\lambda_{\text{cuivre}} = 300 \text{ à } 350 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

Prenons comme exemple une marmite en cuivre, ayant une paroi de 5 mm d'épaisseur, contenant de l'eau que l'on veut chauffer par de la vapeur. Avec les coefficients suivants :

$$k_{\text{vapeur}} = 12\,000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$k_{\text{eau}} = 2\,000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{\text{cuivre}} = 300 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$e = 0,005 \text{ m}$$

nous avons :

$$\begin{aligned} \frac{1}{k} &= \frac{1}{12\,000} + \frac{0,005}{300} + \frac{1}{2\,000} \\ &= \frac{1}{12\,000} + \frac{1}{60\,000} + \frac{1}{2\,000} = \frac{36}{60\,000} = \frac{9}{15\,000} \end{aligned}$$

$$k = 1\,666 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

Toutefois, des quantités d'air, même infimes, présentes dans la vapeur peuvent fortement réduire le coefficient k_{vapeur} . On peut dire que 1% d'air en volume diminue k_{vapeur} de moitié approximativement, c'est à dire que pour notre exemple choisi :

1% d'air en volume réduit k_{vapeur} de moitié

$$k_{\text{vapeur}} = 6\,000 \text{ kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$$

2% d'air réduisent du 1/3 k_{vapeur}

$$k_{\text{vapeur}} = 4\,000 \text{ kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$$

et ainsi de suite....

Dans le cas de 1% d'air en volume, le coefficient global sera alors :

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{6\,000} + \frac{0,005}{300} + \frac{1}{2\,000} = \frac{41}{60\,000}$$

$$k = 1\,463 \text{ kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$$

Si maintenant nous avons 5% d'air en volume l'équation devient :

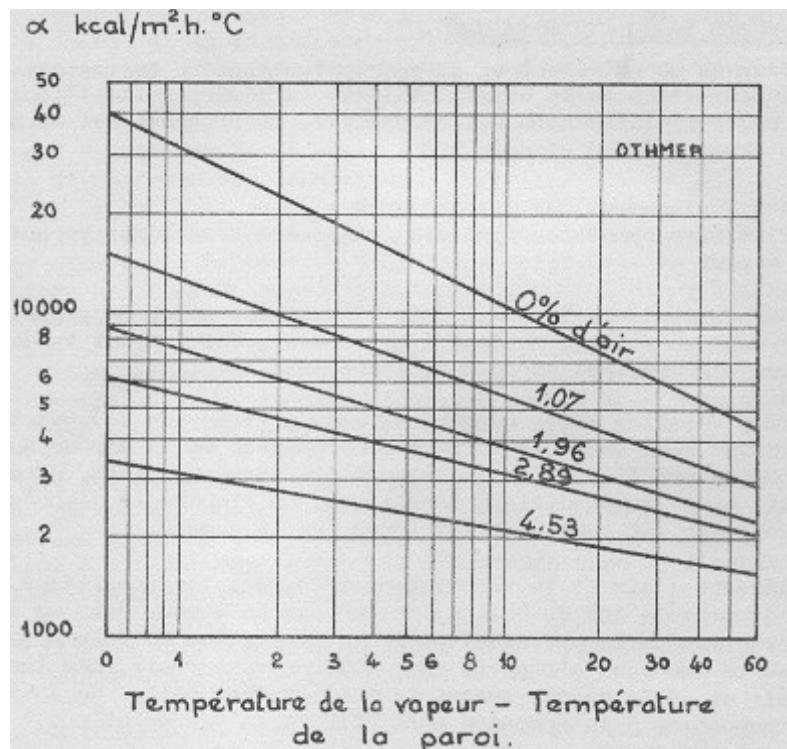
$$\frac{1}{k} = \frac{1}{2\,000} + \frac{0,005}{300} + \frac{1}{2\,000} = \frac{61}{60\,000}$$

$$k = 983 \text{ kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$$

Donc 1% d'air en volume réduit le coefficient de transmission globale de 12% et 5% d'air le réduit de 41%

Ces quelques données permettent de montrer les conséquences qu'entraîne une faible quantité d'air, sur le rendement thermique d'une installation.

Pour se rendre compte de l'importance de l'air dans la vapeur, OTHMER a effectué des mesures sur un tube vertical de $\varnothing 75$ mm et de 1,20 m de long. Les résultats de ces mesures sont représentés sur le tableau ci dessous.



Il est évident que l'influence de l'air amené par la vapeur d'appoint est d'autant plus néfaste que le volume de l'enceinte vapeur est plus petit par rapport à la consommation de vapeur. Expliquons cela par un exemple.

Considérons deux enceintes vapeur de volume différent, l'une étant un aérotherme ($v = 0,03$ m³ environ), l'autre un cylindre sécheur [de papeterie] ($v = 3$ m³ environ), chacun des deux condensant 60 m³/h de vapeur. Supposons d'autre part que la canalisation d'amenée de vapeur contienne 0,001% en volume d'air ou de gaz incondensable. La condensation de la vapeur dans chaque enceinte y laissera l'air, gaz incondensable, ce qui fera qu'après la première heure nous aurons 0,001% de 30 m³ soit 0,0006m³ d'air, après la deuxième heure 0,0012 m³ et ainsi de suite.

Dans l'aérotherme, qui a un volume de 0,03m³ seulement, le rapport $\frac{\text{air}}{\text{vapeur}}$ est égal à 2% alors que dans le cylindre ce rapport n'est que de 0,02% seulement.

Les explications et les exemples numériques que nous venons de détailler ci dessus, nous permettent de dire que l'air, ou encore en utilisant un terme plus général les gaz incondensables, sont à éliminer le plus rapidement possible d'une installation de vapeur.

- ÉLIMINATION DES GAZ INCONDENSABLES-

D'après ce qui précède, la conclusion est que le montage sur l'enceinte vapeur d'appareils éliminant l'air au démarrage de l'installation ainsi qu'en cours d'utilisation est nécessaire. Le problème qui se pose alors est de savoir où les placer.

1°) Emplacement des éliminateurs :

Plusieurs hypothèses ont été émises pour déterminer ce qui se passe entre vapeur et air.

En particulier, il a été émis l'hypothèse selon laquelle l'air et la vapeur dans un même mélange tendent à se séparer, celui ayant la densité la plus élevée s'accumulant au fond de l'enceinte.

Pour vérifier cette hypothèse, nous utiliserons les graphiques I et II. Le premier représente les variations de densité de la vapeur saturée en fonction de la pression et de la température correspondante, ainsi que celle de l'air sous des conditions identiques. On s'aperçoit d'après ce diagramme que l'air est toujours plus lourd que la vapeur.

Lorsque l'air et la vapeur sont mélangés, les conditions changent. On a vu que d'après la loi de Dalton, chaque gaz ou vapeur dans un mélange exerce une fraction de la pression totale en proportion du volume qu'il occupe, de sorte que dans n'importe quel mélange vapeur-air, les températures de l'air et de la vapeur seront toutes les deux celles de la vapeur saturée correspondant à la pression partielle de la vapeur et non à la pression du mélange.

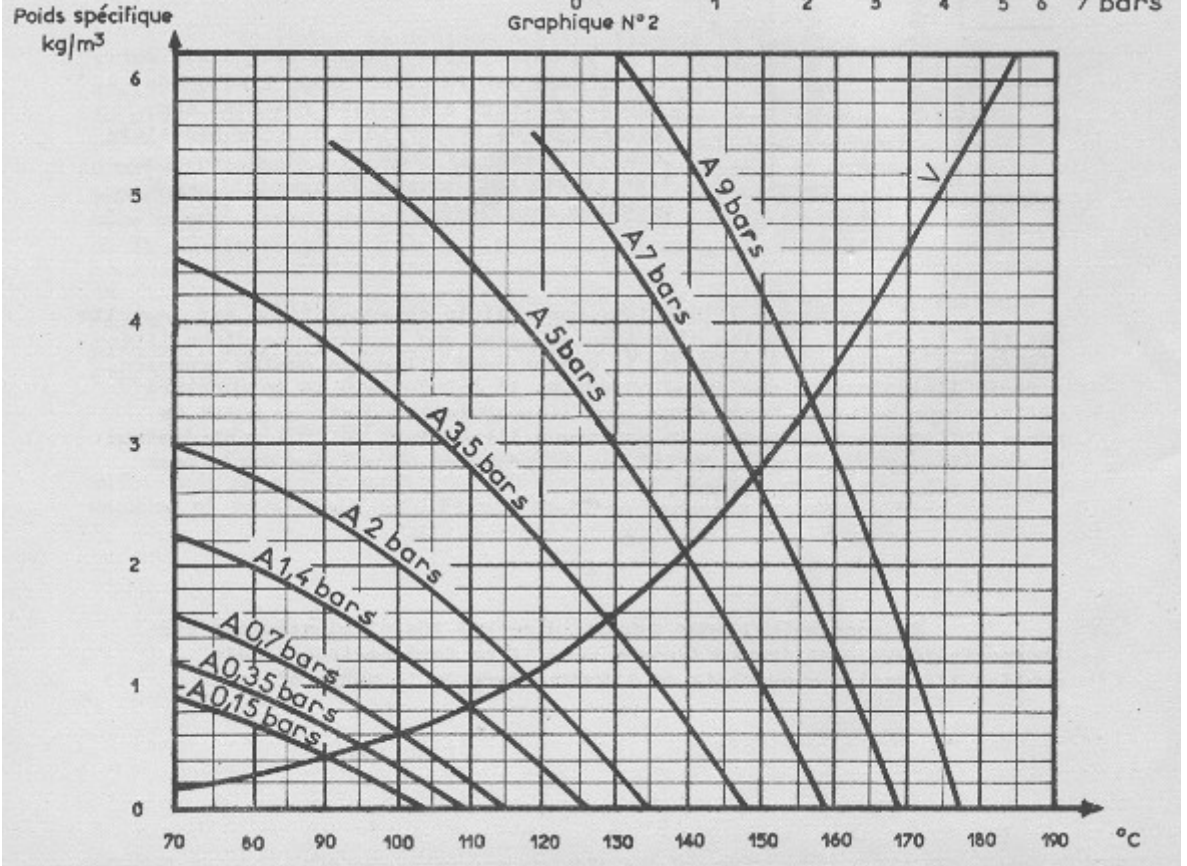
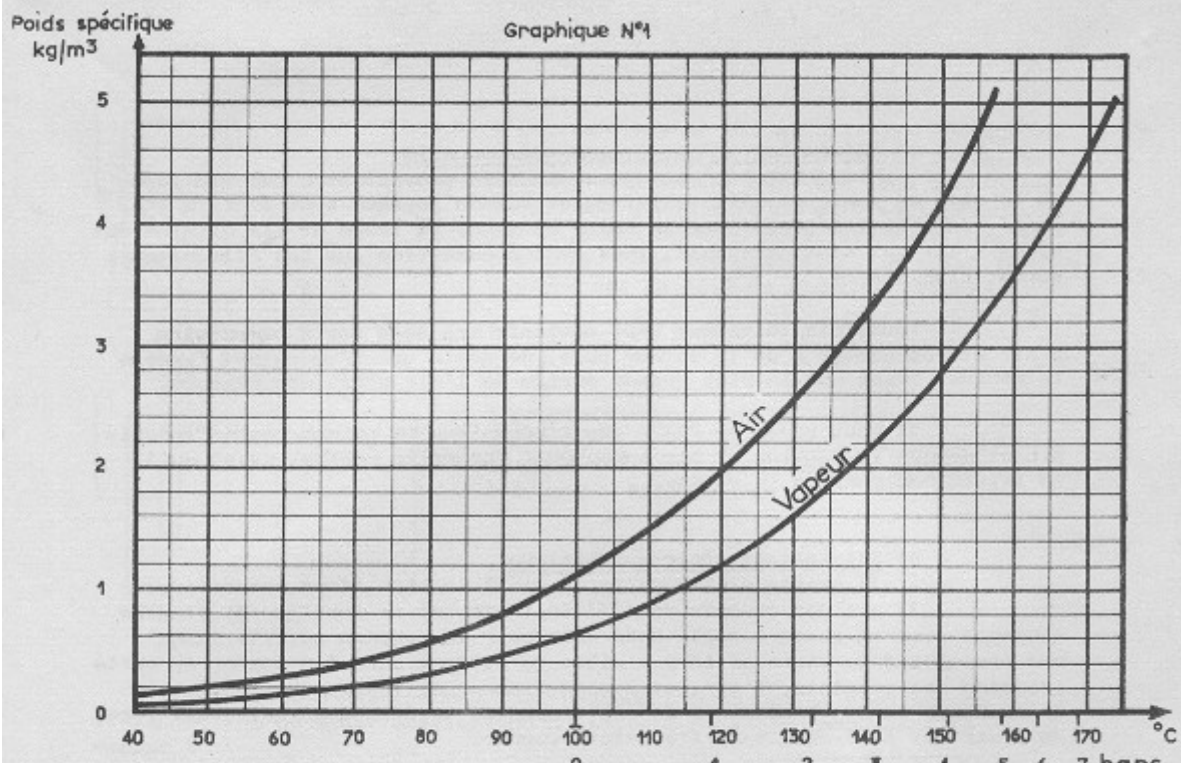
La densité de vapeur correspond toujours au chiffre de la courbe I, mais la densité de l'air varie en fonction de la pression partielle de l'air et de la température du mélange, de sorte que toute variation du rapport air/vapeur amènera une variation de la densité de l'air et de la vapeur. Cela est représenté sur la courbe II.

La courbe V représente la variation de densité en kg/m^3 de la vapeur, pour des températures allant de 70 à 190° C avec les pressions correspondantes. Les courbes A représentent la densité de l'air sous différentes pressions partielles. Les pressions indiquées sur les courbes A sont celles du mélange c'est à dire la pression totale.

Pour trouver la densité relative de l'air et de la vapeur sous n'importe quelles conditions de mélange, il faut connaître, d'une part la pression totale du mélange indiqué par le manomètre branché sur l'enceinte vapeur et d'autre part la température de ce mélange.

On trouve la densité de la vapeur correspondant à la température du mélange sur la courbe V et la densité de l'air sur la courbe A correspondant à la pression du mélange au point d'intersection avec la verticale ayant pour abscisse la température de ce mélange.

Prenons un exemple : un mélange air/vapeur est sous une pression totale de 7 bar et sa température est de 149 ° C. Au point d'intersection de la verticale d' abscisse 149° avec la courbe V, on trouve une densité de vapeur égale à 2,7 kg/m^3 . Ensuite au point d'intersection de la verticale d' abscisse 149° et de la courbe A correspondant à 7 bars, on trouve une densité de l'air égale à 2,7 kg/m^3 c'est à dire la même que celle de la vapeur sous ces conditions.



Si la température du mélange n'avait été que de 145° C par suite d'une plus forte proportion d'air dans celui-ci, les densités auraient alors été pour la vapeur : 2,4 kg/m³, pour l'air : 3,1 kg/m³, l'air étant donc le plus lourd.

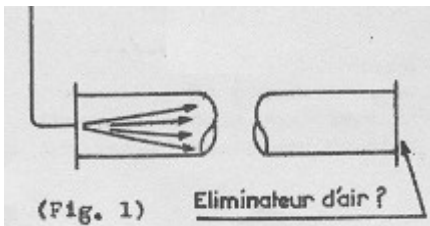
Si la température avait été 155° C, les densités auraient été : pour la vapeur : 3,2 kg/m³, et pour l'air : 2 kg/m³, la vapeur étant maintenant plus lourde que l'air.

Il est évident que les densités relatives de l'air et de la vapeur dans un mélange varient en fonction des conditions à tout moment et ce n'est que sous des conditions connues que l'on peut dire lequel aura tendance à s'accumuler au fond de l'enceinte vapeur, à condition qu'une telle séparation puisse avoir lieu.

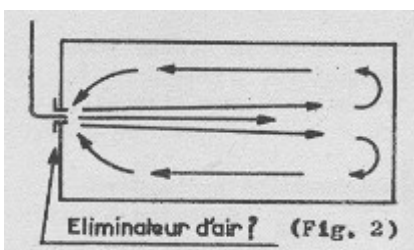
Il s'ensuit que dans le choix de l'emplacement de l'éliminateur la densité relative n'a pas d'importance.

En réalité, au démarrage d'une installation, l'air qui se trouve dans l'enceinte y étant entré grâce au vide dû à la condensation de la vapeur lors de l'arrêt, est chassé par la vapeur, celle-ci agissant comme un piston. Ainsi la plus grande partie de l'air initial est éliminée si l'éliminateur est monté aussi loin que possible de l'arrivée de vapeur, que ce soit en bas ou en haut de l'enceinte. Nous entendons par "point le plus éloigné de l'arrivée de vapeur" le plus long chemin parcouru par la vapeur pour atteindre ce point.

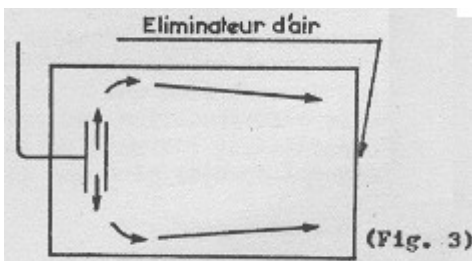
Pour illustrer ceci, nous prendrons quelques exemples



a) l'enceinte vapeur est un tuyau Ø 50 mm avec l'entrée à une extrémité. La vapeur parcourra toute la longueur du tuyau en chassant l'air devant elle, et le point de purge d'air sera sur la face opposée à l'entrée (fig 1)



b) L'enceinte vapeur est un cylindre sécheur de grand diamètre avec l'entrée dans l'axe du cylindre. La vapeur aura tendance à cheminer dans l'axe jusqu'à ce qu'elle soit détournée par la paroi opposée pour retourner vers la première. Sous ces conditions, le point le plus éloigné est du côté de l'entrée. (figure 2)



c) L'enceinte vapeur est un cylindre avec un diffuseur à l'entrée vapeur. Le point le plus éloigné est alors au centre de la face opposée à l'entrée. (figure 3)

Jusqu'à maintenant, nous n'avons examiné que le problème de l'élimination de l'air initial. Qu'advient-il de l'air amené avec la vapeur ?

La vapeur se déplace continuellement le long des parois de l'enceinte où la condensation a lieu et en se condensant elle abandonne l'air. Mais étant donné le mouvement général de la vapeur vers le point le plus éloigné de l'orifice d'entrée, la vapeur aura tendance à transporter l'air vers ce point où il s'accumulera. Si donc un éliminateur d'air est monté au point le plus éloigné de l'entrée, il recevra de l'air apporté par un écoulement naturel de vapeur. Ceci entraîne que la vitesse, même assez lente, de la vapeur empêche une accumulation d'air au point où il aurait tendance à se stratifier étant donné sa densité.

Ainsi, un ou des éliminateurs d'air, montés en un ou plusieurs endroits de l'enceinte vapeur, où la vapeur aura le plus long chemin à parcourir pour les atteindre, purgera l'air initial ainsi que l'air mélangé à la vapeur.

2°) Appareils

Ainsi donc les éliminateurs d'air sont nécessaires. Il s'agit maintenant de savoir quel type d'éliminateur il faut monter sur une enceinte vapeur, si l'appareil doit être à commande manuelle ou automatique

a) Éliminateur d'air à commande manuelle

Des robinets à commande manuelle peuvent être ouverts lors de la mise en route de l'installation, et fermés lorsque tout l'air a été purgé. On peut les ouvrir par la suite de temps en temps et ils élimineront ainsi l'air qui s'est accumulé. Tout ceci à condition que les éliminateurs soient bien placés

Toutefois la vapeur peut contenir une très forte proportion d'air et ressembler à de la vapeur pure, de sorte que l'opérateur fermera le robinet avant que la plus grande partie de l'air n'ait été évacué.

Il peut aussi se faire que l'opérateur ne puisse rester indéfiniment devant la machine et par conséquent fermer le robinet avant qu'il ne laisse échapper de la vapeur.

b) éliminateur d'air automatique

Il existe plusieurs types d'éliminateurs d'air automatique.

il y a par exemple des éliminateurs qui ne sont que de simples soupapes avec un ressort réglé pour maintenir la soupape ouverte jusqu'à une pression déterminée où il y a alors fermeture. Jusqu'au moment où cette pression est atteinte, l'air, et éventuellement de la vapeur, peuvent s'échapper, le fonctionnement de cette soupape ne dépendant en aucune façon de l'air qui se trouve dans l'enceinte vapeur

Un autre type d'éliminateur d'air est celui basé sur le principe de tension de vapeur. Cet appareil répondra aux variations de température causées par l'air dans la vapeur (figure 4) et sa

dénomination exacte est Purgeur Thermostatique à pression équilibrée.

Il comprend à l'intérieur une cellule thermostatique sur laquelle est fixé le clapet, remplie d'un liquide ayant une température d'ébullition légèrement inférieure à celle de la vapeur sous n'importe quelle pression. A froid l'éliminateur est grand ouvert et il est fermé à la température de la vapeur saturée. Etant donné que l'accumulation d'air au point de purge abaisse la température la pression à l'intérieur de l'élément diminue et cet élément est alors comprimé par la pression du mélange air/vapeur amenant l'ouverture du purgeur.

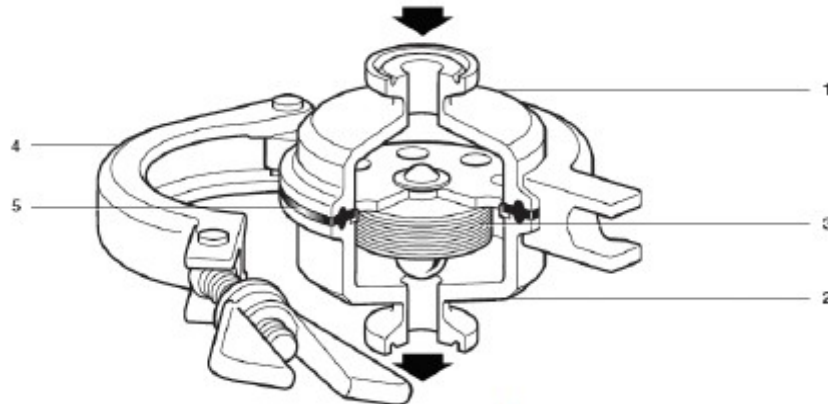


En conclusion nous pouvons dire que les éliminateurs d'air thermostatiques sont très efficaces mais il ne faut surtout jamais oublier l'importance du choix de l'emplacement de la purge d'air.

Signé : -C.F. LUDI -

[fin de la retranscription du document SARCO]

Les purgeurs thermostatiques à pression équilibrée sont actuellement (2013) fabriqués et commercialisés par la société Spiraxsarco.



Ils ne conviennent toutefois pas pour notre usage, pour une double raison

- les enceintes vapeur de la machine à glace, tant pour l'adsorption que pour la désorption, travaillent à une pression inférieure à la pression atmosphérique, alors que les purgeurs proposés travaillent à une pression supérieure à la pression atmosphérique

- le plus petit modèle convient pour un débit de condensats de 300 à plus de mille litres/heure...

§ 5- LES INCONDENSABLES ET L'INSTALLATION SOLAIRE THERMIQUE

Concernant la production de vapeur dans le bouilleur et son utilisation dans la plaque chauffante, le problème des incondensables ne se pose pas de façon majeure. Il y a forcément un peu d'air dans le bouilleur au démarrage de l'installation, puis de l'air dissous dans l'eau qui se libère au cours de l'ébullition, mais les entraînements de vapeur expulsent tout par le robinet de purge en fin de circuit. S'il y avait un effet indésirable, il n'aurait guère d'incidence sur une installation aussi rustique, sur laquelle il n'est pas envisageable de pré-traiter et dégazer l'eau avant de l'envoyer dans le bouilleur...

Par contre lorsque des composants de l'installation travaillent à une pression inférieure à la pression atmosphérique, la question des incondensables devient un problème majeur, par exemple lors de la production de glace, et de la stérilisation médicale

A) LES INCONDENSABLES ET LA PRODUCTION DE GLACE

1- Lors de l'adsorption l'évaporateur et le réacteur contenant la zéolite sont mis sous vide, l'eau commence à bouillir et à se vaporiser conformément aux tables de vapeur. La vapeur est "happée" par la zéolite qui en est avide, la vapeur vient alors se loger dans les pores de la zéolite et s'y condense et abandonnant l'énergie thermique qu'elle avait prélevée dans les plateaux à eau. Si d'autres gaz incondensables viennent se mêler à la vapeur, le déroulement du processus devient bancal.

La question est d'autant plus importante que l'installation de production de glace fonctionne en régime semi-ouvert, c'est à dire que l'installation est mise à l'atmosphère à chaque cycle.

2- Lors de la désorption le réacteur et le condenseur sont mis sous vide de façon à désorber le plus complètement possible la zéolite, conformément aux réseaux de courbes fournis en section II. On se retrouve donc avec un problème "classique" de vide dans un condenseur de vapeur.

B) LES INCONDENSABLES ET LA STERILISATION MEDICALE

La stérilisation médicale à la vapeur n'a à première vue pas grand chose à voir avec la production de glace sous vide, si ce n'est que le problème des incondensables s'y pose exactement de la même façon. La présence d'air sans un stérilisateur rend caduque la relation pression/température telle qu'indiquée dans les tables de vapeur, le niveau de température requis pour la stérilisation ne sera donc pas atteint.

La question est abordée dans un document de L'Association Française de Stérilisation afs.asso.fr / Documents / Documents de travail / Fiches de stérilisation / Fiche N° 9 page 53:

"Dans le cas d'un mélange air/vapeur d'eau, les pressions partielles s'additionnent mais la température du mélange est inférieure à la température correspondant à la pression indiquée.

Précautions à prendre

- Pendant la phase de stérilisation, réguler [le fonctionnement du stérilisateur] à partir de la température mesurée dans l'enceinte et non à partir de la pression.
- Une évacuation complète de l'air est indispensable avant l'introduction de la vapeur, pour éviter les poches d'air résiduelles dans le matériel, responsables des défauts de stérilisation. L'évacuation de l'air est réalisée par des purges successives séparées par des injections de vapeur plutôt que par

un seul vide. C'est très important pour le linge, qui se comporte comme un « piège à air »." L'évacuation de l'air évoquée dans ce document est effectuée par pompage mécanique, jusqu'à 70 à 40 mbar.

Dans le cas d'une installation rustique, il n'y a pas de pompe à vide. Le mode d'emploi de l'autoclave Wafco.com préconise une chasse de l'air par la vapeur, en ouvrant la soupape pendant 7 minutes après le début de l'ébullition. Un flexible plongeant dans le container où sont rangés les matériels à stériliser est spécifiquement prévu pour améliorer l'évacuation de l'air, et la notice d'utilisation insiste sur la nécessité de cette purge.

Sophistication en deça des mers avec du matériel bardé d'outillage et d'électronique, et rusticité au delà avec un simple récipient sous pression...Néanmoins, cette dernière méthode de stérilisation constitue un très grand progrès par rapport au quasi néant, c'était même en France un grand progrès dans les hopitaux au milieu du 20ème siècle, on peut lire à ce sujet le document historique publié sur le site de L'Association Française de Stérilisation afs.asso.fr.

SECTION VI – LE VIDE

La maîtrise du vide, tout comme la maîtrise des incondensables, est une condition sine qua non de bon fonctionnement de la machine à glace. Mal maîtrisée, la question du vide peut rapidement tourner au cauchemar pour le conducteur novice de la machine à glace, alors que c'est une technologie finalement assez franche, pour peu qu'on lui accorde l'attention qu'elle mérite.

Quand il est question ici de tirer au vide, il s'agit bien de pomper de l'air, des incondensables (comme c'est expliqué dans la section précédente), et non de pomper la vapeur d'eau, ce qui est pratiquement impossible, comme c'est expliqué dans la prochaine section.

§ 1 LA MESURE DU VIDE

Pression relative et pression absolue

La pression s'exprime en bars.

Pour les physiciens, seule la pression absolue fait foi. Dans le vide la pression absolue est de 0 bar. "Sur terre", le poids de la colonne d'atmosphère qui est au-dessus de nos têtes engendre une pression absolue de l'ordre de 1,013 bar, soit 1 013 millibar. Mais cette pression varie, en fonction de la hauteur de la colonne d'atmosphère qui est moins haute au sommet de l'Himalaya qu'au niveau de la mer, et en fonction des variations météorologiques.

En usage courant pour mesurer la pression à l'intérieur d'une capacité, on utilise un manomètre à cadran qui indique la pression interne régnant dans la capacité par rapport à la pression absolue du moment : c'est la pression relative. À l'air libre, un manomètre indique donc 0 bar. Par facilité, dans toute la documentation sur l'installation solaire, il n'est question que de la pression relative. Le fait d'utiliser des tables de vapeur où les pressions absolues sont subrepticement remplacées par des pressions relatives est tout à fait abusif; toutefois, pour ce qui est de notre usage, on peut s'en contenter.

Mais quand il s'agit de mesurer le vide, les valeurs affichées correspondent à une pression absolue, exprimée en millibar.

Les vacuomètres

On trouve aisément des vacuomètres chez les fournisseurs de matériels pour frigoristes. Les vacuomètres mécaniques à aiguille et cadran circulaires sont mal adaptés à nos besoins, les vacuomètres électroniques sont d'un grand confort d'utilisation pour notre application. Par exemple : Mastercool 98061, environ 200€ hors taxes.



§ 2 LE NIVEAU DE VIDE

Il existe un classement des différentes catégories de vide. Jusqu'à 1 millibar, c'est le domaine du vide primaire, ou vide industriel.

Pendant l'absorption, c'est à dire pendant la production de glace, le vide dans l'évaporateur et dans le réacteur est de l'ordre de 2 à 3 mbar, correspondant à une température de -10 à -12 ° C, voir tables de vapeur. Ces chiffres sont à confirmer.

Pendant la désorption, selon le niveau de température de la source froide au condenseur (20, 30, 40° C ?) la pression dans le réacteur et le condenseur est de l'ordre de 20 à 70 mbar, cf les tables de vapeur.

§ 3 LES POMPES A VIDE

Les pompes à vide à anneau liquide ne descendent guère en dessous de 30 mb, et sont surpuissantes pour notre usage, alors que la machine à glace est prévue pour fonctionner hors réseau électrique.

Dans l'état actuel des choses, le choix se porte sur les pompes à vide à palettes à huile, d'usage courant chez les frigoristes qui doivent faire le vide dans leur installation avant de la charger en gaz réfrigérant. Leur faible puissance de l'ordre de la centaine de Watt est suffisante et permet d'envisager l'utilisation avec un panneau photovoltaïque, voire avec une motricité humaine à volant.

Le modèle le plus simple, monoétagé, devrait être suffisant (à confirmer), voir par exemple hardeman-outillage.com. Hélas il y a un gros inconvénient : lorsqu'elles commencent à aspirer de la vapeur d'eau, cette vapeur se mélange à l'huile qui fait une émulsion, de la "mayonnaise", les caractéristiques de la pompe s'en trouvent dégradées.

Il existe des pompes à vide à palettes sèches, mais elles ne semblent pas descendre en dessous de 150 mbar



§ 4 COMMENT NE POMPER QUE DE L'AIR, ET PAS DE LA VAPEUR ?

On pourrait concevoir de laisser tourner la pompe à vide de façon continue, et la laisser aspirer de la vapeur une fois qu'elle a aspiré tout l'air. Mais outre qu'il s'agit d'une solution peu élégante, le problème de l'émulsion eau/ huile se poserait très rapidement.

C'est donc une question majeure pour laquelle il n'y a pas de réponse unique péremptoire. On dispose de deux éléments de solution/

1-le choix judicieux de l'emplacement du tirage au vide;

- voir en section V la note SARCO - emplacement des éliminateurs d'air
- voir thermodynamique.com/spip.php?rubrique14 Le Condenseur – Paramètres réduisant l'efficacité du condenseur – Augmentation de la pression des incondensables, où il est question de pomper préférentiellement dans la zone froide du condenseur, dans un refroidisseur d'air protégé par des tôles et nommé "niche à chien" pour y confiner les incondensables..

Il conviendra de tenir compte de ces préceptes lors du dessin du condenseur;

2-Une observation fine du couple température/pression, telle que préconisée dans l'ouvrage sur les machines marines. On dispose maintenant d'outils très précis de mesure des pressions et des températures, mais encore faudra-t-il les palcer judicieusement au bon endroit

Vers une pompe à piston manuelle à balancier ?

La machine à glace est à mettre sous vide à chaque cycle de production. Mais une fois la mise sous vide effectuée, par exemple à l'aide d'une pompe à palettes à huile comme ci dessus, les débits d'incondensables à extraire sont très faibles. On pourrait peut être s'orienter vers une pompe manuelle à balancier, dont le corps serait constitué d'un vérin pneumatique industriel, pour lequel il n'y aurait pas de contre-indication à aspirer soit de l'air soit de la vapeur soit un mélange des deux.

Des capteurs de position et des vannes 2 voies à commande électrique tiendraient lieu de clapets d'aspiration et de refoulement afin de s'affranchir plus facilement, ne serait-ce que dans un premier temps, des questions d'étanchéité, de réglage, et de volume mort de la pompe.



SECTION VII – PRODUCTION DE FROID

UTILISANT L'EAU COMME FLUIDE FRIGORIGÈNE

Dans les trois documents d'archives ci dessous, il est question de production de froid en utilisant l'eau (ou la saumure, qui est un mélange d'eau et de sel afin d'en abaisser le point de congélation) comme fluide frigorigène.

À posteriori on ne peut que regretter que ces tentatives n'aient pas abouti, car on aurait ainsi évité le recours à tous les fluides frigorigènes destructeurs de la couche d'ozone, abondamment utilisés durant les trente "glorieuses" et désormais interdits. Faut-il rappeler que l'eau est le meilleur des fluides frigorigènes, du moins celui dont la chaleur latente est de loin la plus élevée ? Mais, outre le fait qu'elle se transforme en glace en dessous de 0° C (ce qui dans notre cas constitue un avantage majeur), son principal défaut reste le volume pharaonique occupé par la vapeur d'eau aux températures négatives, de l'ordre de plusieurs centaines de m³, et même 1000 m³ par kilogramme à - 20° C, à une pression de 1.3 mbar.

Les tentatives de pompage/ compression mécanique de ces vapeurs, avant la première guerre mondiale, fort bien décrites dans "le Froid Industriel", de L. MARCHIS, éditions Félix Alcan – 1922,(et récemment réédité) n'ont pas abouti.

Le pompage par des machines à éjection de vapeur fournissait un élément de solution, voir ci dessous les machines Westinghouse-Leblanc en § 2 et Scam-Follain en § 3. Noter qu'il s'agit bien de production de froid par compression, et non par absorption. Mais la consommation de vapeur par kg de glace était élevée, et la dimension des condenseurs, qui devaient refroidir à la fois les vapeurs "de compression" et les vapeurs frigorigènes, était importante. Puis l'hégémonie de la vapeur s'est effacée devant les facilités d'utilisation de l'électricité.

Faute de savoir comprimer économiquement les vapeurs d'eau, l'absorption est une alternative. Le § 1 ci dessous décrit une machine utilisée aux alentours des années 1920, où l'absorbeur est de l'acide sulfurique, qu'il faut ensuite distiller pour le concentrer et l'utiliser à nouveau. On espère que l'utilisation de la zéolite sera moins dangereuse.

§ 1 MACHINE À ABSORPTION À ACIDE SULFURIQUE

Dans cette machine, l'acide sulfurique est l'absorbeur, l'eau est le fluide frigorigène ;
Document extrait du "Formulaire du Frigoriste" G Götsche et W. Pohlmann,
Editions Dunod, 1956, pp 95-96

VII. — LES MACHINES FRIGORIFIQUES

B. — MACHINES A VAPEUR FROIDE

1. **Machines à absorption.** — a) Machines à vide. — Dans la machine à vide l'eau est le fluide qui s'évapore et qui produit le froid, et l'acide sulfurique (SO_4H_2) le corps qui absorbe la vapeur émise par l'eau. On produit au moyen d'une pompe à air un vide élevé dans un récipient fermé rempli d'eau : de ce fait une partie de l'eau se vaporise et retire la chaleur de vaporisation nécessaire au reste de l'eau qui par ce moyen se refroidit et gèle. Les vapeurs émises par l'eau sont aspirées par la pompe à air et rapidement éliminées par passage au contact d'acide sulfurique concentré qui les absorbe avidement. Dans ce processus d'absorption, l'acide sulfurique est dilué et il est réchauffé par la combinaison chimique.

Cette diminution de concentration est un inconvénient, car l'acide sulfurique doit être de nouveau concentré par distillation. Plus la concentration de l'acide sulfurique est élevée, plus la formation de la glace a lieu rapidement. La limite inférieure de la concentration est de 78 %. Une charge d'acide sulfurique suffit pour environ 6 opérations. La limite supérieure pour le vide est d'environ 9 mm Hg, correspondant à une température de 9,7° de la vapeur d'eau ; il faut évaporer environ le sixième d'une certaine quantité d'eau pour transformer le reste en glace (1).

On ne construit plus aujourd'hui selon ce principe que de petites machines à glace à main. Voir table de vapeur page 81.

§ 2 MACHINE À EJECTION DE VAPEUR D'EAU WESTINGHOUSE -LEBLANC

2. **Machines à compression.** — a) Machine à éjection de vapeur d'eau. — L'eau a, comparativement à sa haute chaleur de vaporisation, une faible chaleur de liquide et elle serait bien appropriée comme fluide frigorigène, si les pressions correspondant aux basses températures de l'eau n'étaient pas très faibles et si les volumes de la vapeur formée n'étaient pas très grands (voir tables pages 79 et 81 et fig. 21). 1 kg d'eau donne à -10° , 451 m³ de vapeur, à -20° , 995 m³ de vapeur. Une pompe à piston pour l'aspiration des vapeurs

aurait de trop grandes dimensions et des pertes par frottement trop élevées ; la tige du piston, à cause du vide élevé, ne pourrait pas être rendue étanche. Par suite on utilise pour l'aspiration et la compression partielle de la vapeur d'eau des appareils à éjection de vapeur. Les machines des systèmes *Westinghouse-Leblanc* et *Josse-Genescké* sont bien connues.

Dans la machine de *Westinghouse-Leblanc* (voir fig. 22) le refroidissement de la saumure est obtenu par l'évaporation d'une partie de son eau sous un vide élevé. La substance frigorigène est de la saumure.

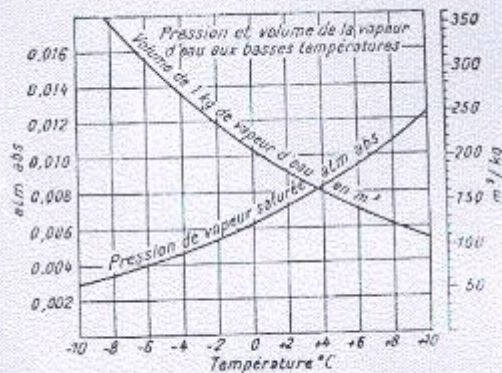


FIG. 21. — Pressions et volumes de la vapeur d'eau.

Un éjecteur produit dans l'évaporateur un vide élevé ; la saumure qui s'y trouve se vaporise en partie et retire la chaleur nécessaire à cette évaporation à la partie restante. La température de la saumure restante dépend de l'importance du vide créé. La saumure refroidie est envoyée au moyen d'une pompe dans les chambres froides. La saumure revenant des points d'utilisation arrive dans un réservoir de compensation, qui évite une dépression dans les tuyauteries, et depuis ce réservoir elle retourne sous forme de pluie dans l'évaporateur grâce au vide qui y règne. Cette pluie présente une grande surface d'évaporation, ce qui augmente l'efficacité.

Les vapeurs prises à l'eau arrivent dans l'éjecteur, puis avec le jet de vapeur atteignent le condenseur dans lequel on crée un vide par une pompe à air. L'eau de condensation formée est aspirée par la pompe à air humide et une partie est

POHLMANN. — *Manuel du Frigoriste*, 1956 - Dunod

5

pp 114-115

§ 3 LA MACHINE FRIGORIFIQUE Scam Follain

Cette machine est un perfectionnement de la machine précédente.

SOCIÉTÉ DE CONDENSATION & D'APPLICATIONS MÉCANIQUES

-42, rue de Clichy (9^e)

Téléphone L. 0. v. r. 27-51 - 27-52 - 40-51
Adresse télégraphique: CONDENSATIONOC PARIS 118

R. FOLLAIN

INGÉNIEUR EN CHEF DU DÉPARTEMENT
• RÉFRIGÉRATION • DE LA SOCIÉTÉ DE
CONDENSATION & D'APPLICATIONS MÉ-
CANIQUES

La nouvelle machine frigorifique à vapeur d'eau à évaporateurs et condenseurs étagés Scam-Follain.

Extrait du III^{ème} Volume des Acts du V^{ème} Congrès Intern. du Froid

ROME — SINDACATO ITALIANO ARTI GRAFICHE
28 - FONTANELLA DI BORGHESE — 1929-VIII

17. RAPPORT

La nouvelle machine frigorifique à vapeur d'eau à évaporateurs et condenseurs étagés Scam-Follain

PAR

MR. R. FOLLAIN

Ingenieur en chef du Département "Réfrigération,"
de la Société de Condensation & d'Applications Mécaniques

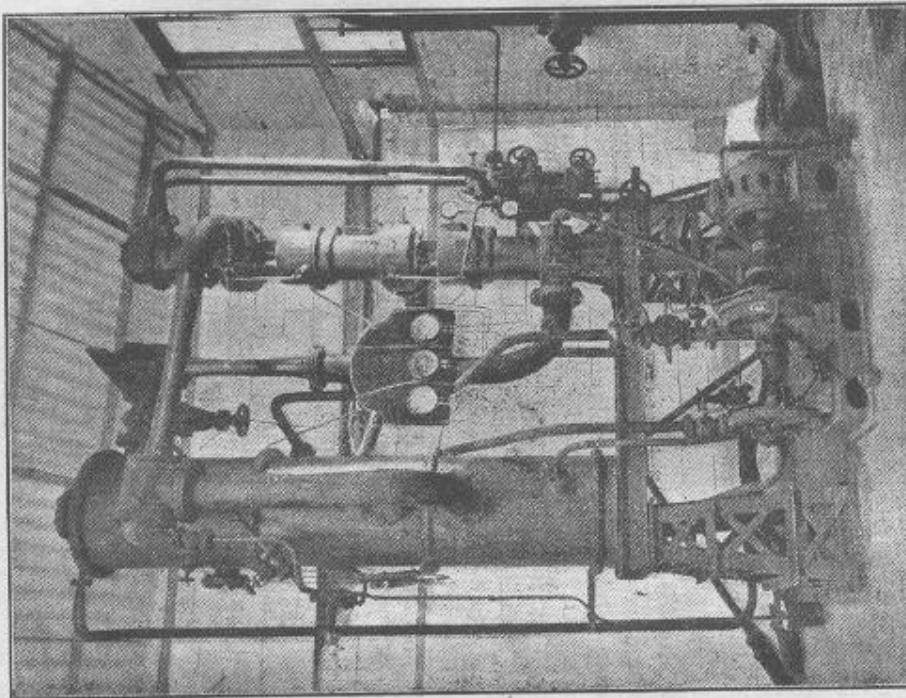
Le Congrès International de Rome va nous fournir l'occasion de faire connaître les perfectionnements que nous avons apportés à la machine frigorifique à vapeur d'eau dans le but de la rendre économiquement applicable aux usages terrestres et, notamment, à ceux qui requièrent l'emploi d'eau glacée, tels que le refroidissement du moût en brasserie, pour ne citer que l'un de ces usages les plus répandus.

La machine terrestre Westinghouse-Leblanc.

Avant de décrire la nouvelle machine, nous croyons utile de rappeler la composition et le fonctionnement de la machine normale, conçue et réalisée industriellement par le grand savant français qu'était Mr. Maurice LEBLANC, à la mémoire de qui il convient de rendre ici un juste hommage auquel s'associeront tous les Congressistes présents.

Le principe de la production du froid par évaporation directe de l'eau au moyen d'un éjecteur à vapeur semble remonter à l'année 1886, époque à laquelle il fut proposé — incom-

plètement d'ailleurs — par ATKINSON, mais qui, à notre connaissance, ne fut jamais suivi de réalisation, sans doute parce



Vue montrant la compacité d'une machine frigorifique à vapeur d'eau à triple étage SCAM-FOLLAIN de 100.000 frigorico-heure à 0°.

qu'à ce moment, on ne disposait pas encore de condenseurs de vapeur d'eau donnant un vide suffisamment voisin du vide théorique; autrement dit, dans les condenseurs de vapeur uti-

lisés à cette époque et encore longtemps après, la différence des pressions absolues correspondant respectivement à la température régnant dans le condenseur et à la température de l'eau

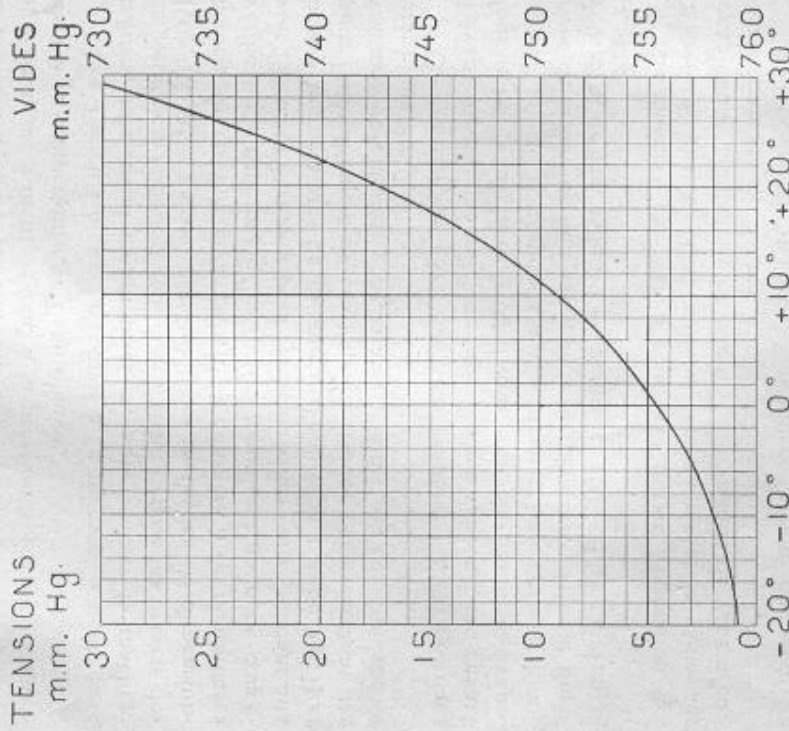


Fig. 1. — Tensions de la vapeur d'eau de -20° à +30° (Kegnaul) et vides correspondants pour baromètre = 760 mm Hg.

chaude, était trop élevée pour que l'on pût utiliser l'éjecteur à vapeur comme compresseur. De plus, les éjecteurs à vapeur eux-mêmes, étaient dépourvus des qualités nécessaires à l'enlèvement des vapeurs froides sous un rendement acceptable.

En 1904, Mr. M. LEBLANC conçut sa pompe à air rotative qu'il utilisa tout d'abord comme pompe à vide sec sur des con-

denseurs par mélange dans lesquels il réalisa ainsi industriellement des vides impraticables auparavant, puisque, dans les appareils ainsi agencés, il était devenu possible d'obtenir que la pression absolue régnant dans le condenseur soit seulement supérieure de 4 m/m de Hg. à la pression absolue correspondant à la température de l'eau chaude.

Les éjecteurs à vapeur connus à ce moment étaient, eux-mêmes, totalement inappropriés et, pour réaliser la machine frigorifique à vapeur d'eau, dont il avait déposé les brevets dès 1903, Mr M. LEBLANC dû établir les méthodes de dimensionnement de ces éjecteurs, puis, il se consacra à de nombreuses vérifications expérimentales qui lui permirent enfin de concevoir l'éjecteur à vapeur pour les hauts vides correspondant aux basses températures de la vapeur d'eau (voir courbe fig. 1) et pour l'entraînement de ces vapeurs froides qui présentent des volumes spécifiques considérables, ainsi qu'en témoigne le graphique fig. 2.

On constate, en effet, que pour évaporer 1 Kg d'eau dans l'évaporateur d'une machine frigorifique à vapeur d'eau devant fournir de l'eau glacée à 0°, il faut entretenir dans cet évaporateur un vide correspondant à la pression barométrique diminuée de la tension de l'eau à cette température, soit pour $Bm = 760$ m/m de Hg, vide à l'évaporateur: $760 - 4,6 = 755,4$ m/m de Hg.

La quantité de chaleur soustraite durant l'opération est, d'après Regnault: 606,5 calories, en supposant la perte par évaporation compensée en eau à 0°; le volume de vapeur correspondant est de 210 m³.

Les tables de Regnault indiquent encore que pour un même poids d'eau à évaporer, mais sous une température de -18°, le volume de vapeur à dégager serait de 983 mètres cubes; la pression absolue à réaliser au-dessus des couches d'eau en évaporation serait de l'ordre de 1 m/m de Hg, nécessitant un vide de 759 m/m de Hg.

On s'explique que de tels volumes soient nettement désavantageux par rapport aux fortes densités des gaz liquéfiables, tels que: CO² - AzH³ - SO², etc... et qu'ils ne puissent être compensés par des compresseurs à piston, en dépit de la réduction

de poids de fluide à aspirer due à une chaleur latente de vaporisation environ 2 fois plus forte que celle de l'AzH³ et, suivant les températures, de 10 à 20 fois plus élevée que celle du CO².

VOLUMES
m³ / mgr.

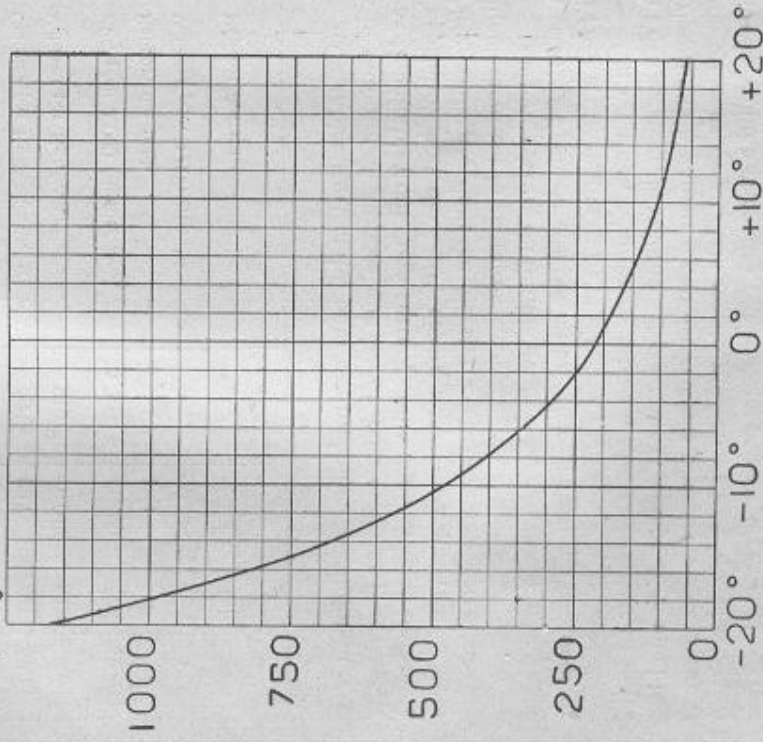


Fig. 2.

Volumes spécifiques de la vapeur d'eau de -20° à +20° (Regnault).

Le tableau ci-dessous donne la relation des poids et des volumes théoriques de fluide à aspirer pour 1000 frigories respectivement pour les trois gaz: CO² - AzH³ - SO², et pour H²O.

lications, serait néanmoins réservé aux machines de faible puissance; il est vrai qu'on pourrait associer en parallèle

VITESSE
m/sec.

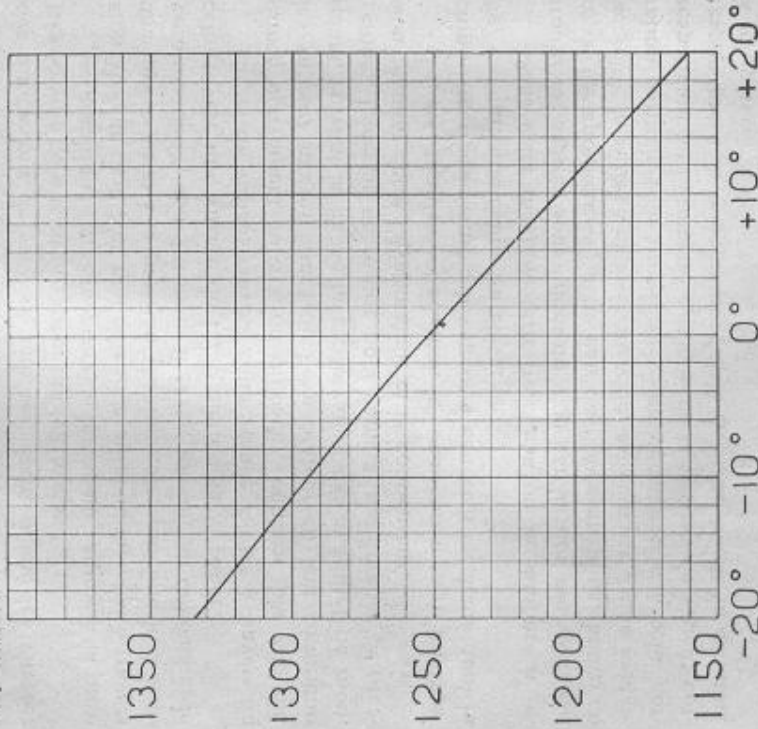


Fig. 3. — Vitesse de la vapeur d'eau à la sortie d'une tuyère divergente pour une pression initiale absolue de 8 kg en fonction de températures finales de détente de - 20° à + 20°.

plusieurs de ces compresseurs, afin de faire face à des productions frigorifiques plus étendues, mais on se heurterait, dans ce cas, à un obstacle commercial, car le prix de semblables installations serait très onéreux.

	0° à la saumure appoint à 20°		- 10° à l'aspiration + 30° au liquide	
	H ₂ O	CO ₂	AzH ₃	SO ₂
Calories par Kgr.	585,5	30,7	269,2	82,7
Volumes par Kgr. m ³	210	0,048	0,430	0,329
Kgr. pour 1.000 frigories	1,700	32,600	3,720	12,100
Rapport des poids	1	19,1	2,18	7,1
Volumes pour 1.000 frigories. . m ³	357	0,465	1,600	4
Rapport des volumes	1	1	1	1
		770	223	89

Ce tableau est établi pour des machines fonctionnant à 0° à la saumure et suppose que les évaporateurs des machines à gaz liquéfiables ont une surface telle que la température à l'aspiration soit de -10°, contre une température de 0° pour H₂O, puisque, dans ce dernier cas, l'évaporation s'effectue directement sur la saumure.

La température du liquide avant détendeur a été prise égale à +30° et l'eau de compensation des pertes à l'évaporateur d'H₂O a été supposée de +20°.

On constate, d'après ce tableau, que pour 1.000 frigories à l'évaporateur, le volume à aspirer par l'éjecteur de la machine frigorifique à vapeur d'eau est 770 fois plus élevé que pour un compresseur de CO₂ de même puissance; 223 fois plus grand que le volume engendré par le compresseur d'AzH₃ et 89 fois plus fort que pour le cas de SO₂.

On pourrait également envisager d'effectuer cette compression de vapeur d'eau au moyen de compresseurs volumétriques à grande vitesse; encore est-il que la production frigorifique d'instruments de ce genre demeurerait forcément réduite: 10.000 à 20.000 frigories environ, c'est-à-dire que leur débouché, bien que pouvant déjà satisfaire à un grand nombre d'ap-

Par contre, le condenseur serait environ 3 fois plus réduit que pour une machine à éjecteurs, d'où compensation, de sorte que rien ne doit être négligé pour encourager les recherches de ce genre actuellement en cours.

L'éjecteur à vapeur peut, par contre, être construit pour des productions frigorifiques considérables, tout en restant sous des dimensions de sections réduites, étant donné les vitesses très élevées qu'atteint la vapeur qui le traverse.

Le graphique fig. 3 montre que la vapeur saturée à la pression absolue de 8 Kgr/cm² détendue adiabatiquement à travers une tuyère jusqu'à la pression absolue correspondant à la température de 0°, soit 4,6 m/m de Hg., atteint, au débouché de cette tuyère une vitesse de 1,250 mètres par seconde.

Le jet de vapeur lancé à cette grande vitesse à travers un orifice convergent suivi d'un diffuseur, entraîne par friction, les vapeurs mortes issues de l'évaporateur en leur communiquant, suivant la loi de la conservation des quantités de mouvement, l'énergie nécessaire pour vaincre la différence de pression régnant entre l'évaporateur et le condenseur.

Tel est, rapidement résumé, le fonctionnement d'une machine frigorifique simple à vapeur d'eau et à éjecteurs dont la fig. 4 donne une coupe en élévation.

Dans cette machine terrestre, l'eau ou la saumure à refroidir est aspirée sous l'effet du vide par la tubulure supérieure de l'évaporateur A; cette eau distribuée en pluie, afin d'en accroître la surface exposée au vide, est soumise à une évaporation partielle sous un vide légèrement supérieur à celui correspondant au baromètre diminué de la tension de vapeur correspondant à la température finale de l'eau ou de la saumure à réfrigérer.

Ce vide est créé au moyen de l'éjecteur à vapeur B par la tuyère duquel se détend la vapeur provenant d'une chaudière; la chaleur disponible de cette vapeur est ainsi transformée en force vive contenue dans le jet de vapeur lancé à une vitesse de l'ordre du kilomètre par seconde, qui aspire et entraîne la vapeur formée en A; le mélange de vapeur motrice et de vapeur entraînée se comprime dans le diffuseur de l'éjecteur B et débouche dans le condenseur C qui, pour les installations

terrestres, est du type par mélange et aspire son eau condensante sous l'effet du vide.

Une pompe centrifuge D extrait du vide et de façon con-

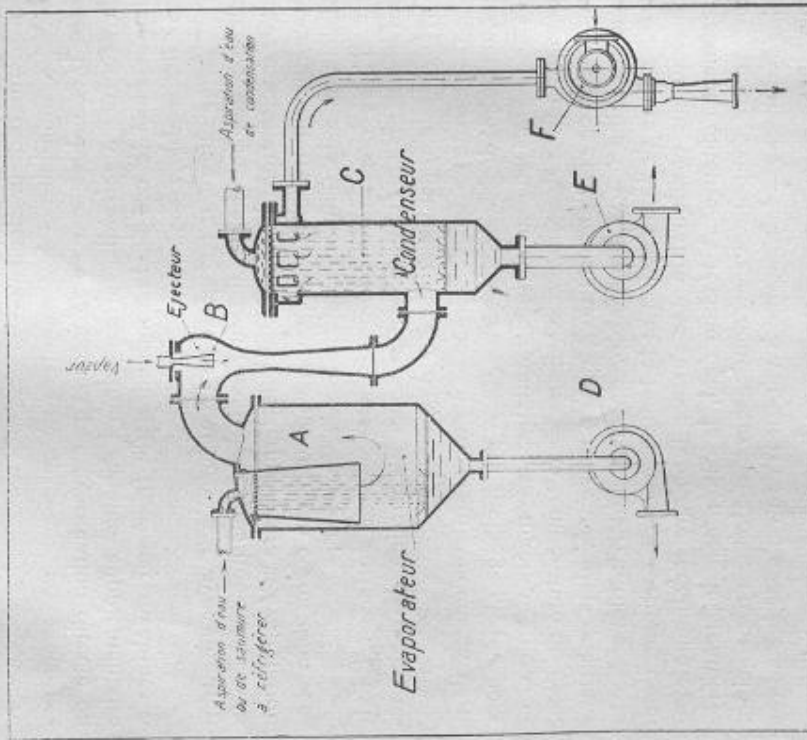


Fig. 4. — Schéma de la machine frigorifique à vapeur d'eau, terrestre, du type classique WESTINGHOUSE-LEBLANC.

tinue l'eau réfrigérée dans l'évaporateur et la refoule dans les appareils d'utilisation du froid.

Une autre pompe centrifuge E extrait du condenseur l'eau réchauffée.

Une troisième pompe *F* est chargée d'extraire l'air du condenseur: c'est précisément la pompe à air rotative M. LE-BLANC, dont nous avons parlé plus haut.

Ces 3 pompes peuvent, naturellement, être actionnées par un même moteur électrique.

La simplicité et les avantages de ce genre de machines sont indéniables, car en procédant par évaporation directe de la saumure à refroidir, on supprime l'échange supplémentaire requis dans le cas de la production du froid par machines à gaz liquéfiables.

Alors que pour réfrigérer de l'eau jusqu'à 0° avec une machine à gaz liquéfiable, il faut fonctionner sous une température d'évaporation d'environ -8°, la température d'évaporation sous laquelle travaille l'éjecteur à vapeur d'eau correspond sensiblement à la température finale désirée de 0°.

L'évaporateur ne comporte donc aucune surface tubulaire; c'est, on en conviendra, un souci d'entretien de moins en faveur de la machine à vapeur d'eau.

La même remarque s'impose à propos du condenseur dans lequel la condensation s'effectue aussi par mélange et, par conséquent, sans aucune surface tubulaire; la température de condensation peut donc être très voisine de la température de l'eau sortant de ce condenseur: de 2 à 3° en moyenne, alors que dans une machine à gaz liquéfiable, un écart aussi faible entre la température de liquéfaction et la température de sortie de l'eau condensante conduirait à une surface tubulaire d'échange extrêmement coûteuse. A régime égal, la différence des températures entre évaporateur et condenseur est donc, en principe, plus réduite avec la machine à vapeur d'eau qu'avec les autres machines.

L'éjecteur, en lui-même, constitue un compresseur des plus simples, exempt d'entretien puisqu'il ne comporte aucune pièce en mouvement. En agissant, dans une certaine mesure, sur la pression de la vapeur qui l'alimente, on peut en diminuer la consommation et réduire progressivement la production frigorifique.

On peut, d'ailleurs, pour plus de commodité, fractionner la puissance de ces éjecteurs de telle façon que leur mise en

service successive permette d'obtenir toute la gamme des productions, disposition qui, alliée à celle de la réduction de la

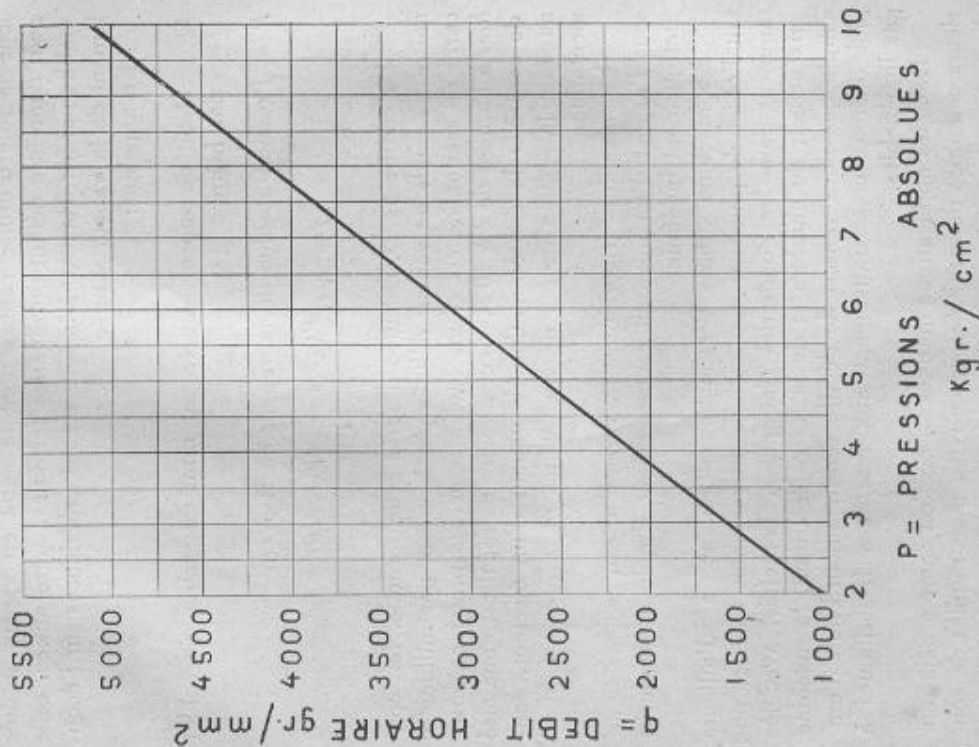


Fig. 5. — Poids de vapeur d'eau débité par heure par m³ de section de col d'une tuyère, pour différentes pressions absolues d'alimentation.

pression d'alimentation, permet alors d'obtenir des variations de production allant de 10% à la marche à plein régime.

A ce sujet, remarquons qu'un éjecteur à vapeur est, de par sa tuyère, un véritable compteur de vapeur. Cette tuyère joue le rôle d'orifice calibré dont le débit en vapeur saturée peut donc être déduit de diverses formules, entre autres, celle établie par Mr. RATEAU à la suite de ses expériences sur l'écoulement de la vapeur saturée.

En appelant :

Q = Débit de vapeur saturée par mm^2 de section de col et par heure

P = Pression absolue de la vapeur en Kgr/cm^2

$$Q = 3600 \frac{P(15,2 - 0,96 \log P)}{100}$$

La courbe *fig. 5*, calculée d'après cette formule, fait connaître les poids de vapeur débités par heure et par millimètre carré de section de col d'une tuyère pour des pressions *abso-*lues à l'amont de 2 à 10 $\text{Kgrs/centimètre carré}$; il est donc aisé de contrôler la consommation de vapeur d'un éjecteur, connaissant la section de col de ses tuyères et la pression d'alimentation.

La machine frigorifique à vapeur d'eau se présente sous l'aspect d'un appareil excessivement simple et de durée pratiquement indéfinie.

La machine simple Westinghouse-Leblanc a d'ailleurs fait l'objet de plusieurs applications intéressantes à terre, notamment dans les Poudreries Nationales. Toutefois, avec les prix actuels du charbon et de la force électrique, la machine simple que nous venons de décrire serait, aujourd'hui, d'emploi onéreux comparativement aux machines frigorifiques à gaz liquéfiables.

Dans les applications marines — où l'on compte déjà plusieurs centaines de machines de ce type, mais munies de condenseurs par surface et dont certaines fonctionnent à basses températures (-18°), l'alimentation en eau de condensation n'offre pas de graves difficultés; à terre, elle serait prohibitive.

Dans la machine terrestre, une économie de force motrice pour l'extraction de l'eau condensante ne pourrait évidemment

être obtenue qu'au prix d'une diminution de son débit, augmentant nuisiblement la température au condenseur, au point que, dans certains cas, il serait indispensable d'employer des éjecteurs en série pour faire surmonter à la vapeur la différence de pression accrue régnant entre l'évaporateur et le condenseur.

Or, dans l'association en série de 2 éjecteurs à vapeur, l'éjecteur d'aval doit débiter une quantité de vapeur motrice suffisante pour entraîner et comprimer le mélange de vapeur motrice et de vapeur aspirée issu de l'éjecteur d'amont. On voit immédiatement qu'avec les éjecteurs en série, la consommation de vapeur augmente en progression géométrique avec le nombre des éléments d'éjecteurs placés en série.

Cette augmentation exagérée de la consommation de vapeur exigeant, à son tour, un plus fort débit d'eau au condenseur, l'une et l'autre de ces alternatives devaient être systématiquement rejetées pour les applications terrestres, de sorte que l'augmentation de rendement des machines frigorifiques de ce système ne pouvait plus dépendre que des améliorations susceptibles d'être apportées aux éjecteurs proprement dits qui, certes, sont encore perfectibles, mais probablement pas dans la proportion exigée pour obtenir des anciens appareils un fonctionnement aussi économique que celui des machines frigorifiques à gaz liquéfiables.

Ce qui précède explique comment survint, il y a dix ans, la situation stagnante dans laquelle s'arrêta l'essor de la machine frigorifique à vapeur d'eau du type simple, pour les applications à terre.

Par ce qui suit, nous exposerons comment nous sommes parvenus à tenir compte de la triple exigence du problème que posait une telle situation, c'est-à-dire: *économie de vapeur, d'eau de condensation et de force motrice*, conditions qu'il nous a paru indispensable de chercher à concilier, afin de redonner à la machine frigorifique à vapeur d'eau les possibilités d'être à nouveau appliquée à tous les problèmes de refroidissement d'eau et, cette fois, avec des rendements d'exploitation au moins égaux à ceux des autres systèmes de machines.

La nouvelle machine à vapeur d'eau terrestre à multiple étage

C'est également une machine à éjecteurs, mais l'évaporation et la condensation s'y effectuent en cascade, c'est-à-dire en plusieurs étages dont les conditions d'utilisation définissent, en chaque cas, le nombre.

La fig. 6 représente le schéma d'une machine de ce genre, à triple étage, dont la fig. 7 donne la vue d'ensemble.

Elle comprend un fût de 3 évaporateurs superposés A_1, A_2, A_3 , desservis chacun par un éjecteur simple B_1, B_2, B_3 . L'eau ou la saumure à refroidir traverse successivement les 3 évaporateurs. Si elle doit se refroidir en tout de ΔT , elle se refroidira dans chacun d'eux de $\frac{\Delta T}{3}$ environ.

L'évaporateur le plus chaud est placé à la partie supérieure; l'eau à refroidir s'écoule par gravité d'un étage à l'autre.

A chacun des éjecteurs B_1, B_2, B_3 , est associé un condenseur par mélange dans lequel il débouche. Ces 3 condenseurs à mélange F_1, F_2, F_3 sont également superposés en un seul fût, le condenseur le plus froid à la partie supérieure. Ils sont parcourus en série par l'eau condensante. L'évaporateur le plus chaud est ainsi réuni par son éjecteur au condenseur le plus chaud, l'évaporateur le plus froid au condenseur le plus froid, l'évaporateur à température moyenne au condenseur à température moyenne.

La valeur des vides va en diminuant du condenseur supérieur au condenseur inférieur; néanmoins l'eau s'écoule par gravité de l'un dans l'autre, grâce à la pression de la colonne d'eau qui se rassemble au fond de chacune de ces enceintes.

On voit ainsi que les frigories, au lieu d'être engendrées d'emblée à la température la plus basse, sont produites par échelons dans 3 machines en série dont les appareils de compression fonctionnent néanmoins en parallèle. Au lieu de l'éjecteur à grand rapport de compression et à rendement très faible qui serait nécessaire avec une machine à un seul étage

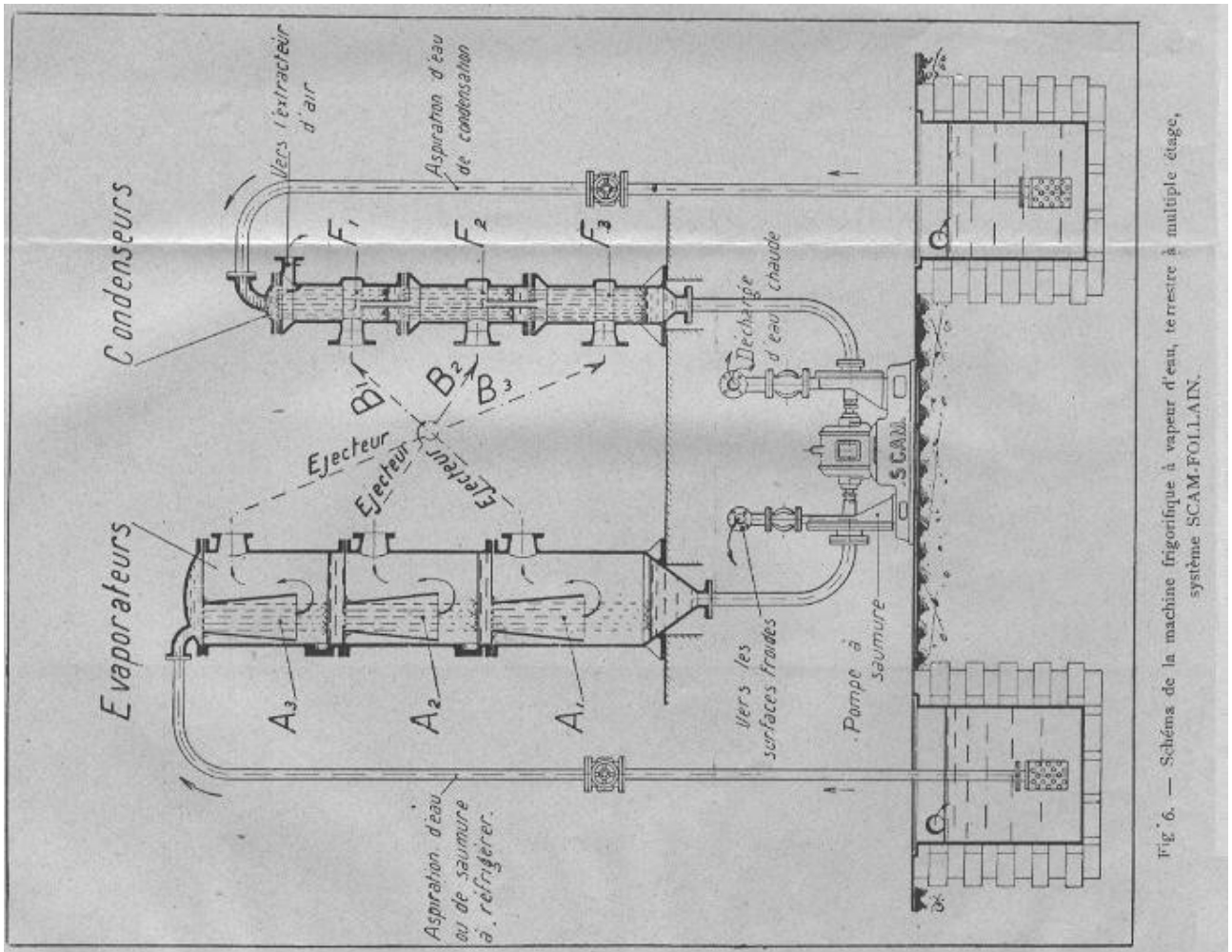


Fig. 6. — Schémas de la machine frigorifique à vapeur d'eau, terrestre à multiple étage, système SCAM-FOLLAIN.

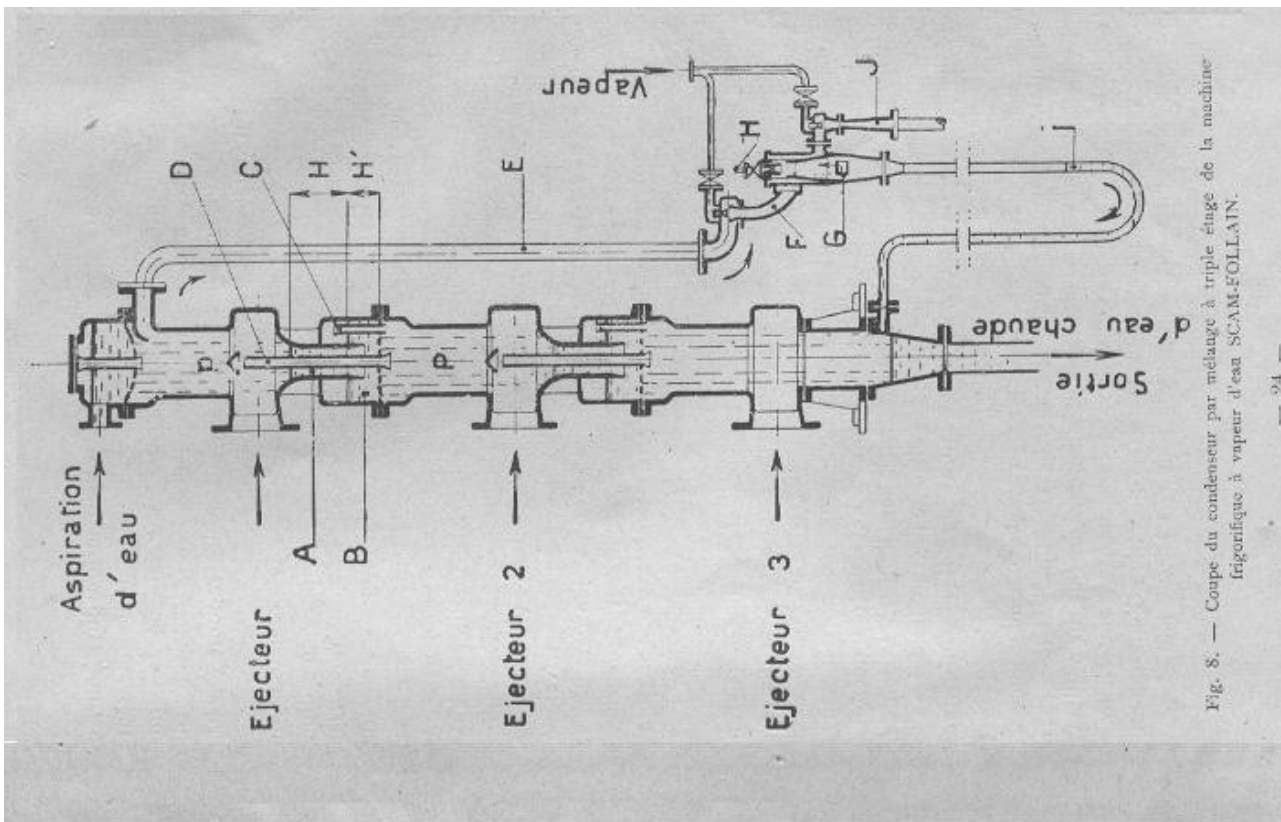


Fig. 8. — Coupe du condenseur par mélange à triple étage de la machine frigorifique à vapeur d'eau SCAM-FOLLAIN.

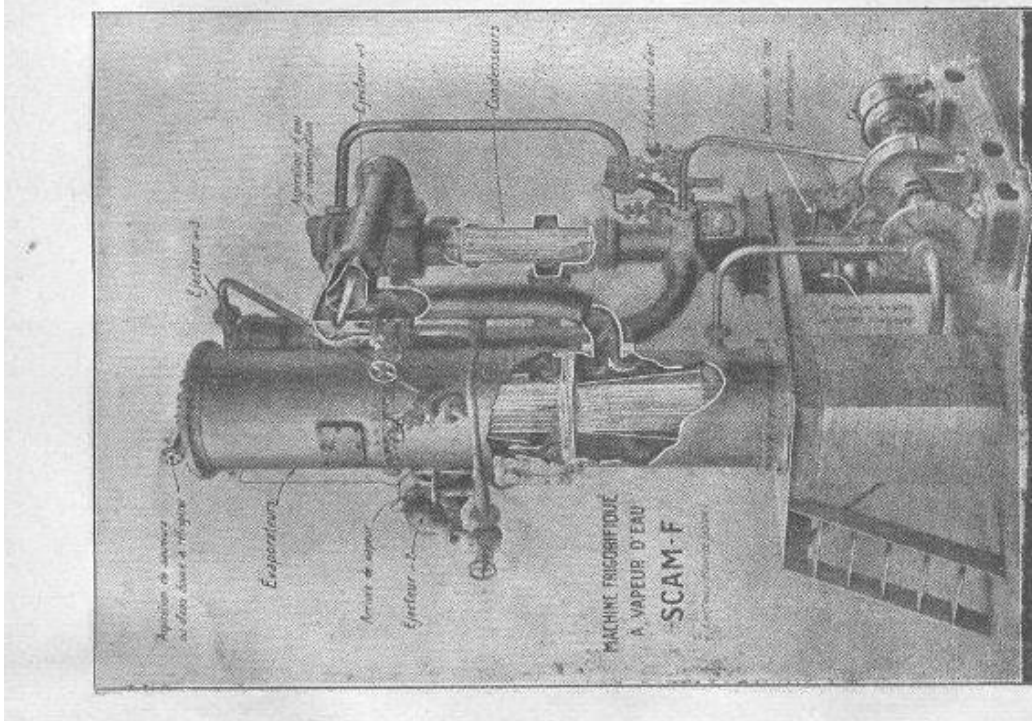


Fig. 7. — Vue en élévation de la machine frigorifique à vapeur d'eau terrestre à multiple étage, système SCAM-FOLLAIN.

fonctionnant sous la même différence extrême de températures, l'ensemble de ces machines élémentaires exige 3 éjecteurs dont le rapport de compression n'est que d'environ la moitié

RESULTATS INDUSTRIELS

Résumé de l'un des essais de réception effectués le 3 Octobre 1926 par l'Association Normande des Propriétaires d'Appareils à Vapeur sur une machine frigorifique « SCAM-FOLLAIN » en service à la MANUFACTURE DE TISSUS CAOUTCHOUTES DE M. M. LANG-VERTE & C. ^{ie} à SOTTEVILLE-LES-ROUEN.

Ces essais avaient pour but d'enregistrer : les débits d'eau réfrigérée et d'eau condensante ; les différences de température entre l'entrée et la sortie d'eau de l'évaporateur et du condenseur ; la consommation de vapeur et la puissance absorbée par le moteur électrique actionnant la pompe à eau réfrigérée et la pompe à eau de condensation.

Machine à triple étage

Eau réfrigérée:		6.550 litres
Débit horaire		1,2 Kgr
Refolement effectif		+ 17°5
/		+ 2°5
Vide à l'évaporateur le plus froid		754,5 mm. de Hg
Production horaire pour les 3 étages		98,200 frigories
Vapeur:		
Section totale des cols de tuyères		0,85 cm ²
Pression effective aux 3 éjecteurs		0,5 Kgrs
Dépense horaire totale des 3 éjecteurs		330 Kgrs
Eau de condensation:		
/		+ 17°5
/		+ 32°
Vide au condenseur le plus chaud		720 mm. de Hg
Débit horaire		21,2 m ³
Refolement		0,3 Kgr
Pompes		5,1 CV
Puissance absorbée pour l'ensemble des 3 pompes centrifuges (eau réfrigérée et eau chaude)		

N.B. — Le condenseur est desservi par un extracteur d'air à éjecteurs absorbant au total 50 Kgrs de vapeur par heure dont la moitié, soit 25 Kgrs, peut être récupérée.

Pour le poids de vapeur dépensé ainsi que pour les débits d'eau et puissance mesurés aux essais, cette machine à triple étage — l'une des toutes premières de ce type sorties des usines de la SOCIÉTÉ DE CONDENSATION — n'avait été garantie, par prudence, que pour 70.000 frigories/heure à + 4°.

On remarquera que la quantité de frigories produites, à dépense égale, a été de 40% supérieure à la production garantie et que le chiffre obtenu a été mesuré sur eau réfrigérée à une température inférieure de 1° 5 à la garantie.

RÉSUMÉ DU PROCÈS-VERBAL.

Description de la machine:

La machine essayée se compose essentiellement de:

3 Evaporateurs superposés à l'intérieur desquels se refroidit directement l'eau destinée à la condensation de la benzine.

3 Ejecteurs à vapeur, système Westinghouse-Leblanc, provoquant l'évaporation dans les appareils précédents.

3 Condenseurs par mélange, disposés également en étages et servant à condenser la vapeur provenant des éjecteurs.

L'éjecteur inférieur qui correspond à l'évaporateur le plus froid, débouche dans le condenseur supérieur, qui est également le plus froid, puisqu'il reçoit directement l'eau condensante.

L'eau à refroidir est puisée dans un bac situé à proximité de l'appareil. Elle s'écoule depuis la partie supérieure de la colonne des évaporateurs et est reprise à la partie inférieure par une pompe centrifuge qui la refoule dans la canalisation d'utilisation.

De même, l'eau servant à la condensation arrive sous l'effet du vide, au sommet de la colonne des condenseurs, puis se rassemble à la base de l'appareil, duquel l'extrait une deuxième pompe mue par le même moteur électrique que la pompe précédente.

Pour extraire l'air apporté par l'eau de condensation et l'eau à réfrigérer, ainsi que l'air introduit par les fuites éventuelles, il existe un extracteur d'air composé de deux éjecteurs à vapeur placés en série.

Le résumé des essais est consigné dans le tableau ci-après:

COMPARAISON.

A titre de comparaison, nous donnons ci-dessous les résultats des essais de réception d'une machine WESTINGHOUSE-LEBLANC du type simple, de 200.000 frigories/heure à +5°, livrée naguère à un grand établissement de Produits Chimiques de l'Etat Français. Nous chiffrerons ensuite, en regard, les économies de vapeur, d'eau et de force motrice que peut réaliser une machine du nouveau type fonctionnant sensiblement au même régime.

ESSAI DU 9 SEPTEMBRE 1915.

Machine simple Westinghouse-Leblanc
pour la Poudrerie Nationale de Toulouse

Éjecteurs Frigo- rifiants	Eau réfrigérée:		11.425 litres
	Débit horaire	Refolement effectif	1 Kgr
Condenseur	t_e		+ 22°5
	t_c		+ 5°
	Vide à l'évaporateur général		758,5 mm. de Hg
Pompes	Production horaire		200.000 frigories
	Dépense horaire de vapeur		1.100 Kgrs
	Eau de condensation:		+ 22°5
		+ 30°	
	Vide au condenseur général		720 mm. de Hg
	Débit/heure		140 m ³
	Refolement.		0,3 Kgr
	Puissance absorbée pour l'ensemble des 3 pompes (dont 8 CV pour la pompe à air rotative)		24,4 CV

BILAN COMPARATIF.

Le rapport des productions frigorifiques horaires, de 200.000 frigories pour l'ancienne machine à 98.250 pour la nouvelle, étant de 2,04, c'est par ce rapport que nous diviserons les dépenses de vapeur, d'eau et de force motrice de la machine de 200.000 frigories pour les mettre en regard des dépenses réduites de la machine à triple étage faisant l'objet du premier procès-verbal.

Consommations horaires à 98.250 frig./heure

	Machine simple ramenée à 98.250 frigories/heure	Machine à triple étage de 98.250 frigories/heure	Economie réalisée par le triple étage
Vapeur	687 Kgrs	340 Kgrs	52 %
Eau de condensation	68,7 m ³	21,2 m ³	69 %
Force motrice	12 CV	5,1 CV	57,5 %

DISCUSSION DU BILAN.

On remarquera que dans la force motrice absorbée par la machine simple, intervient forcément la pompe à air rotative dont la puissance de 8 CV ne peut être récupérée, alors que dans la nouvelle machine, l'extraction de l'air est assurée par des éjecteurs de faible consommation de vapeur, dont la moitié ou, suivant le cas, la totalité est récupérable par barbotage pour réchauffages divers.

C'est ainsi qu'en dirigeant l'effluent de l'éjecteur d'air d'aval J (fig. 8) vers la bêche d'alimentation de la chaudière, on dispose de 25 Kgs de vapeur de réchauffage dont les calories seront réintégréées au générateur de vapeur, ne laissant subsister comme dépense réelle de vapeur que celle des éjecteurs principaux, augmentée de celle de l'éjecteur d'air d'amont F (Fig. 8)

soit 330 + 25 Kgrs si l'extracteur d'air est du type à récupération partielle.

On remarquera encore que la température d'entrée d'eau de condensation qui était de 22°5 pour l'ancienne machine, n'était seulement que de 17°5 pour la machine à triple étage; si cette température de 17°5 avait été observée également à l'entrée du condenseur de la machine simple, seule sa dépense d'eau aurait pu être diminuée et non la consommation de vapeur de ses éjecteurs principaux, attendu que dans la machine simple, c'est la température de sortie qui conditionne le vide, tandis que pour un condenseur à multiple étage, une plus basse température d'entrée d'eau est immédiatement profitable au vide des étages supérieurs, réduisant ainsi la différence de température entre les évaporateurs et les condenseurs les plus froids, d'où accroissement de la production spécifique des étages ainsi avanta-gés.

A température égale de sortie de 30°, une température de 17°5 à l'entrée eût permis de ramener le débit d'eau de la machine simple de 200.000 frigories de 140 m³ à 84 m³, soit pour 98.250 frigories: débit d'eau, 41 m³ au lieu de 68,7 m³, contre 21,2 m³ pour la machine à triple étage. On voit que l'économie d'eau due à l'emploi du triple étage n'en subsiste pas moins très élevée, puisqu'elle se maintient encore à 48%, au lieu de 69%, comme indiqué dans le tableau précédent qui montre encore que l'économie de vapeur réalisée par la machine à triple étage est de 52% et l'économie de force motrice de 57,5%, quoique la température de sortie d'eau du condenseur triple soit de 2° plus élevée que pour le condenseur général de la machine ordinaire.

Il est bien évident que ce sont les conditions à respecter dans chaque cas particulier qui indiquent si l'on peut encore accroître l'économie de vapeur au détriment de l'économie d'eau dans toutes les installations où cette dernière est abondante et la force motrice peu coûteuse.