

# MODULE 5 :

Les procédés  
thermodynamiques

## Module 5.1

### **5.1 L'utilisation de la vapeur d'eau**

# Module 5.1: Utilisation de la vapeur d'eau

La vapeur d'eau trouve ses applications courantes dans divers secteurs industriels:

- La vapeur comme **source de chaleur** (la vapeur d'eau chauffe le produit pour ensuite se transformer en condensat qui est alors évacué à l'aide d'un purgeur à vapeur).
- La vapeur comme mécanisme de **propulsion/d'entraînement** (force d'entraînement) dans des applications comme les turbines à vapeur).
- La vapeur comme **agent moteur** (qui sert à propulser un liquide ou un gaz à travers une conduite).
- La vapeur comme moyen **d'atomisation** (L'atomisation à vapeur est un procédé où la vapeur d'eau sépare un fluide mécaniquement. Dans certains brûleurs, par exemple, on injecte de la vapeur d'eau à l'intérieur du combustible afin d'augmenter l'efficacité du procédé de combustion et de minimiser la production d'hydrocarbures (suie)).
- La vapeur comme **nettoyant** (pour le nettoyage d'une grande variété de surfaces).
- La vapeur comme **hydratant** (utilisée pour transférer de la chaleur tout en hydratant un produit, p.ex. production du papier).
- La vapeur comme **agent humidificateur** (vapeur saturée à pression basse comme source de chaleur pour les systèmes de chauffage de bâtiments commerciaux et industriels. Des humidificateurs à vapeur sont souvent utilisés en conjonction avec ces systèmes pour améliorer la qualité de l'air).

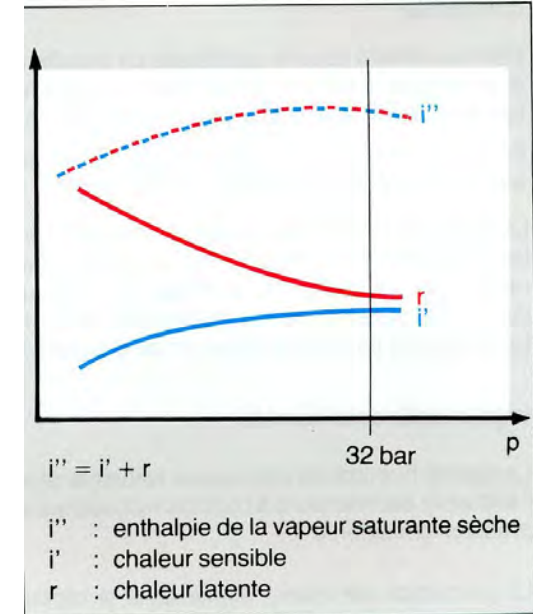
## Module 5.1.1

### **5.1 L'utilisation de la vapeur d'eau**

#### **5.1.1 Théorie de la vapeur d'eau**

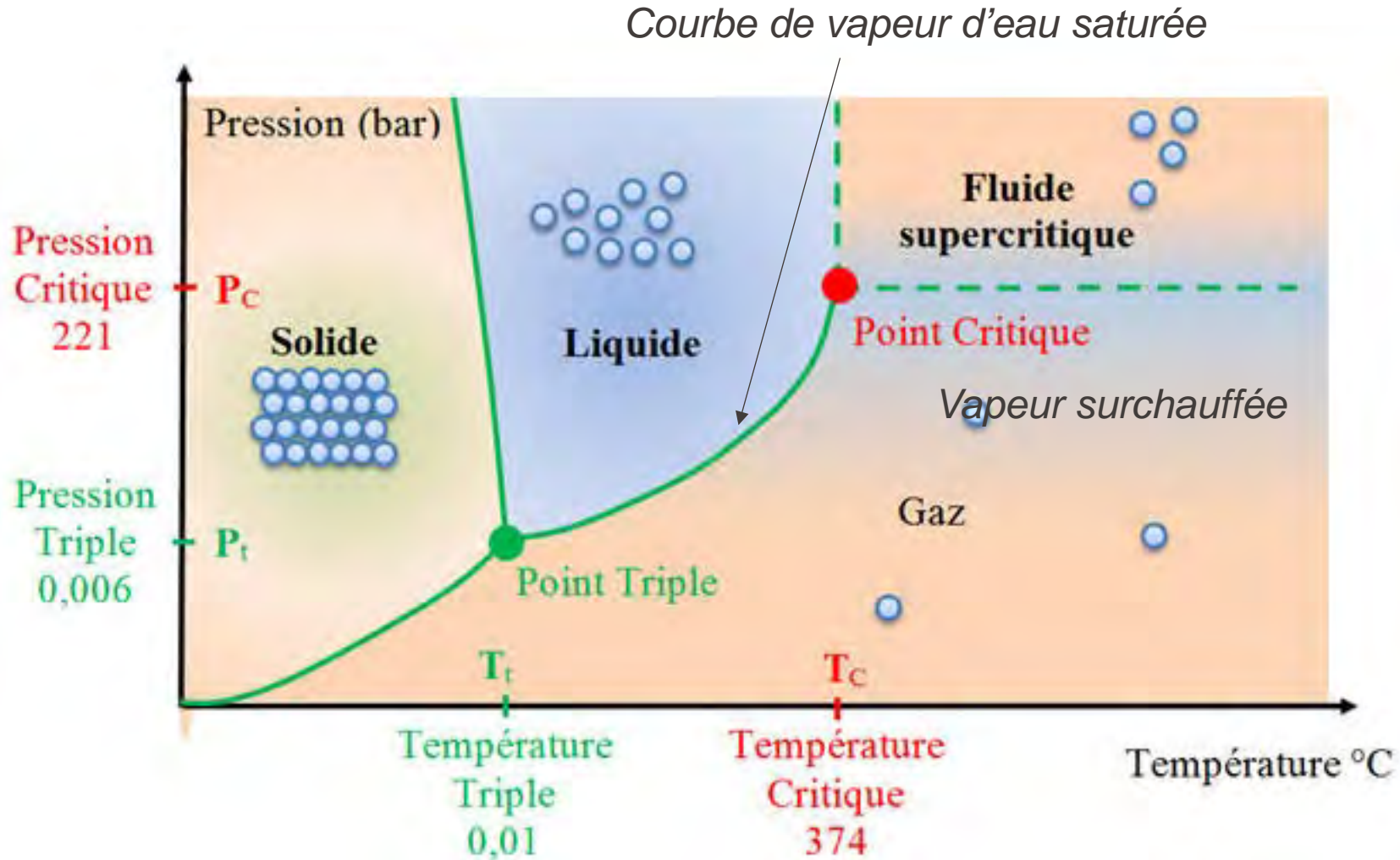
Il existe deux types de chaleur:

- Chaleur **sensible**: est l'énergie thermique qui fait augmenter la température d'un corps sans provoquer de changement d'état. C'est une énergie que l'on peut sentir au toucher, d'où le terme "sensible".
- Chaleur **latente**: est l'énergie stockée pour un changement d'état sans variation de température. Cela inclut la chaleur latente de fusion ou de vaporisation.
- La somme de ces deux chaleurs donne **l'enthalpie** de la vapeur.



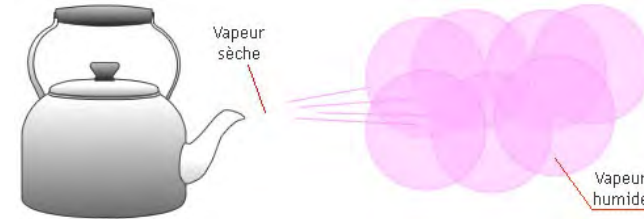
Enthalpie de la vapeur à 10 bars absolus	=	Chaleur sensible de l'eau à 180°C	+	Chaleur latente de vaporisation à 10 bars absolus
2776.1 kJ / kg	=	762.6 kJ / kg	+	2013.5 kJ / kg

# Module 5.1.1: Diagramme de phase de l'eau



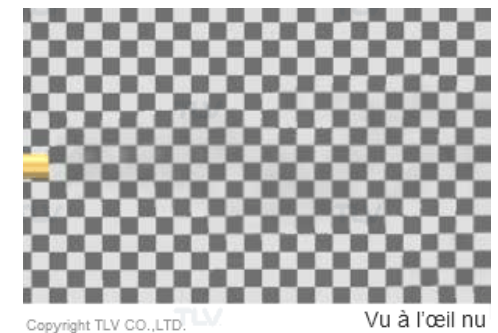
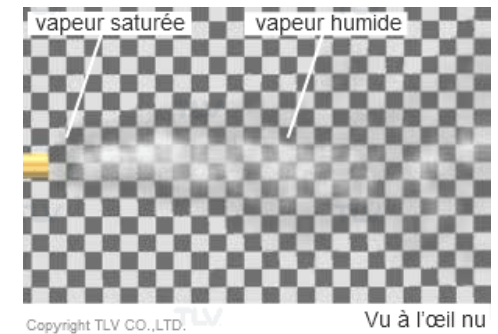
# Module 5.1.1: Choix de la vapeur

Caractéristiques	L'eau	La vapeur	Avantages de la vapeur
<b>Capacité thermique</b>	4.23 kJ/kg K à 110°C	2.08 kJ/kg K à 110 °C	Section des conduites moins élevée, pertes thermiques plus faibles
<b>Coeff. de transfert de chaleur</b>	900 – 1600 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	1600 – 2000 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	Surface d'échange plus faible, économie à l'investissement
<b>Distribution, pertes de charge</b>	Pompe de circulation obligatoire, l'évolution du réseau entraîne une modification de la pompe.	Pertes de charge compensées par DP entre chaufferie et fin du réseau.	Le réseau de distribution peut aisément être modifié, évolution de l'outil de production.
<b>Régulation</b>	Par mélange ou échange.	Par vanne, variation de P et T dans l'échangeur.	Variation rapide et précise de la T par P.
<b>Température de paroi</b>	Température variable.	Mode isoperibolique	Indispensable pour procédés à T <sub>p</sub> =cst.
<b>Qualité du fluide</b>	Eau non alimentaire.	Fluide propre, sans goût ni odeur.	La vapeur peut être en contact avec des produits alimentaires.
<b>Usages</b>	Limités à échange thermique	Peut être utilisée comme source d'énergie (turbines)	La vapeur dégradée devient de l'eau. Deux modes avec un seul vecteur.



Il y a principalement trois types de vapeurs d'eau :

1. **Vapeur saturée ou sèche** : Il s'agit d'un gaz composé uniquement de molécules d'eau à l'état gazeux. C'est un gaz transparent, qui suit la courbe d'équilibre liquide-gaz.
2. **Vapeur humide** : Cette vapeur contient non seulement des molécules d'eau à l'état gazeux, mais également des gouttelettes d'eau en suspension à l'état liquide.
3. **Vapeur surchauffée** : On obtient cette vapeur en chauffant la vapeur d'eau sèche ou humide au-delà de son point de saturation. La température de la vapeur surchauffée est supérieure à celle de la vapeur saturée, tout en ayant une masse volumique moindre pour une même pression





# Module 5.1.1: Enthalpie

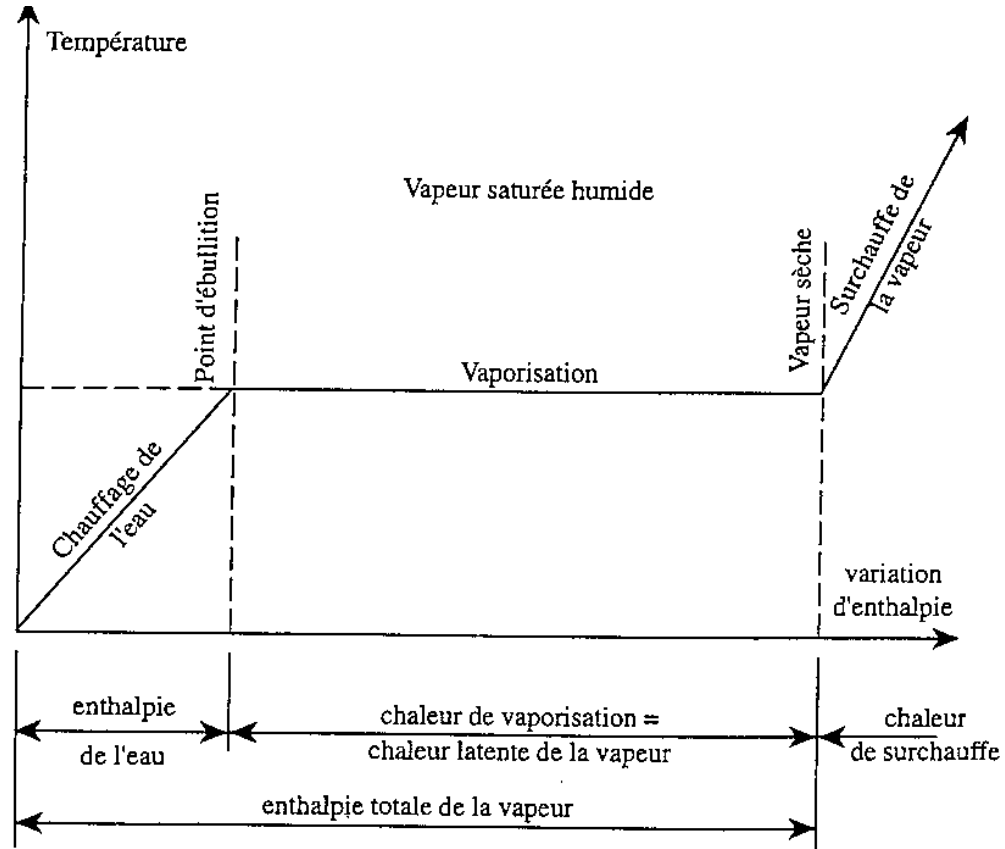
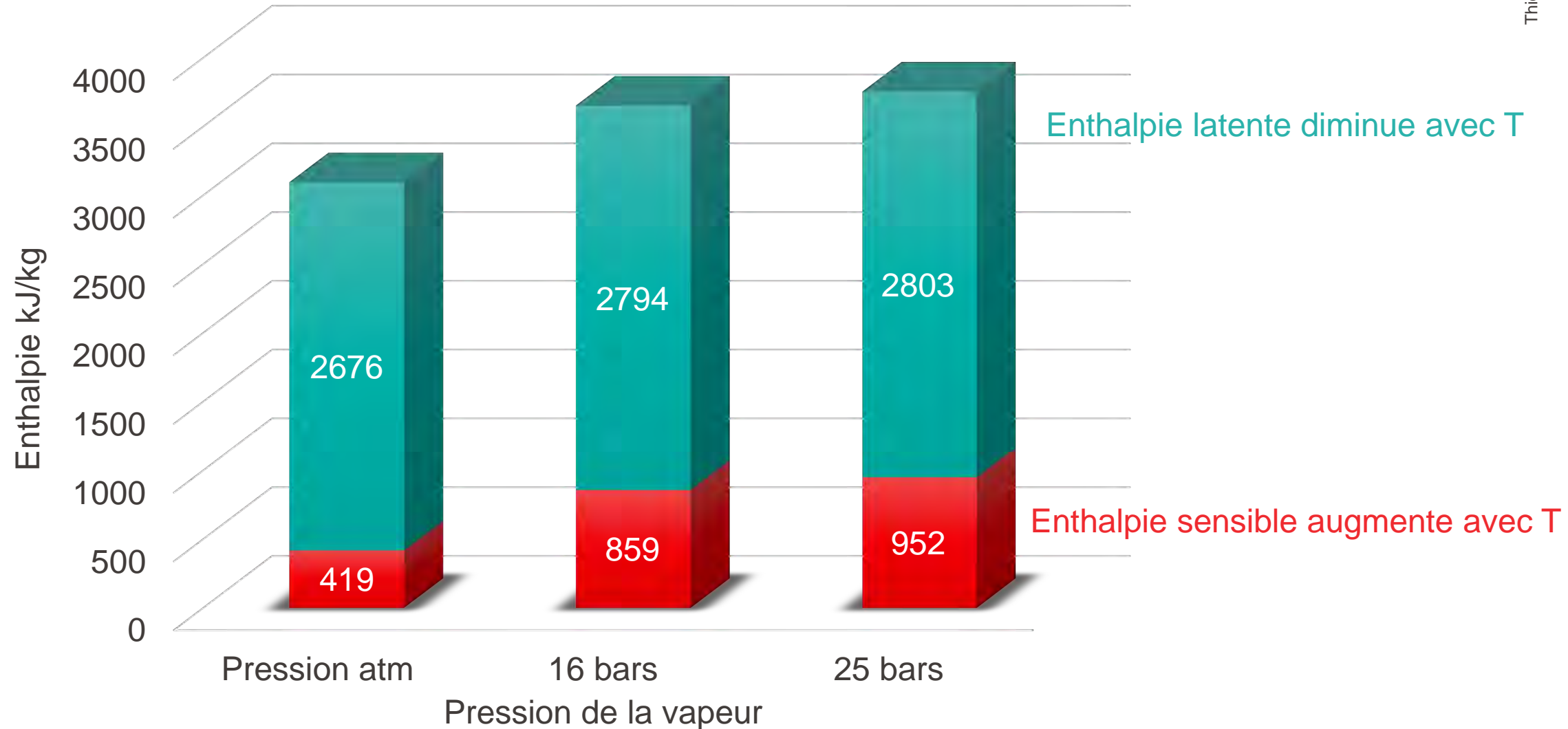


Diagramme d'enthalpie de la fusion, ébullition de l'eau à Patm

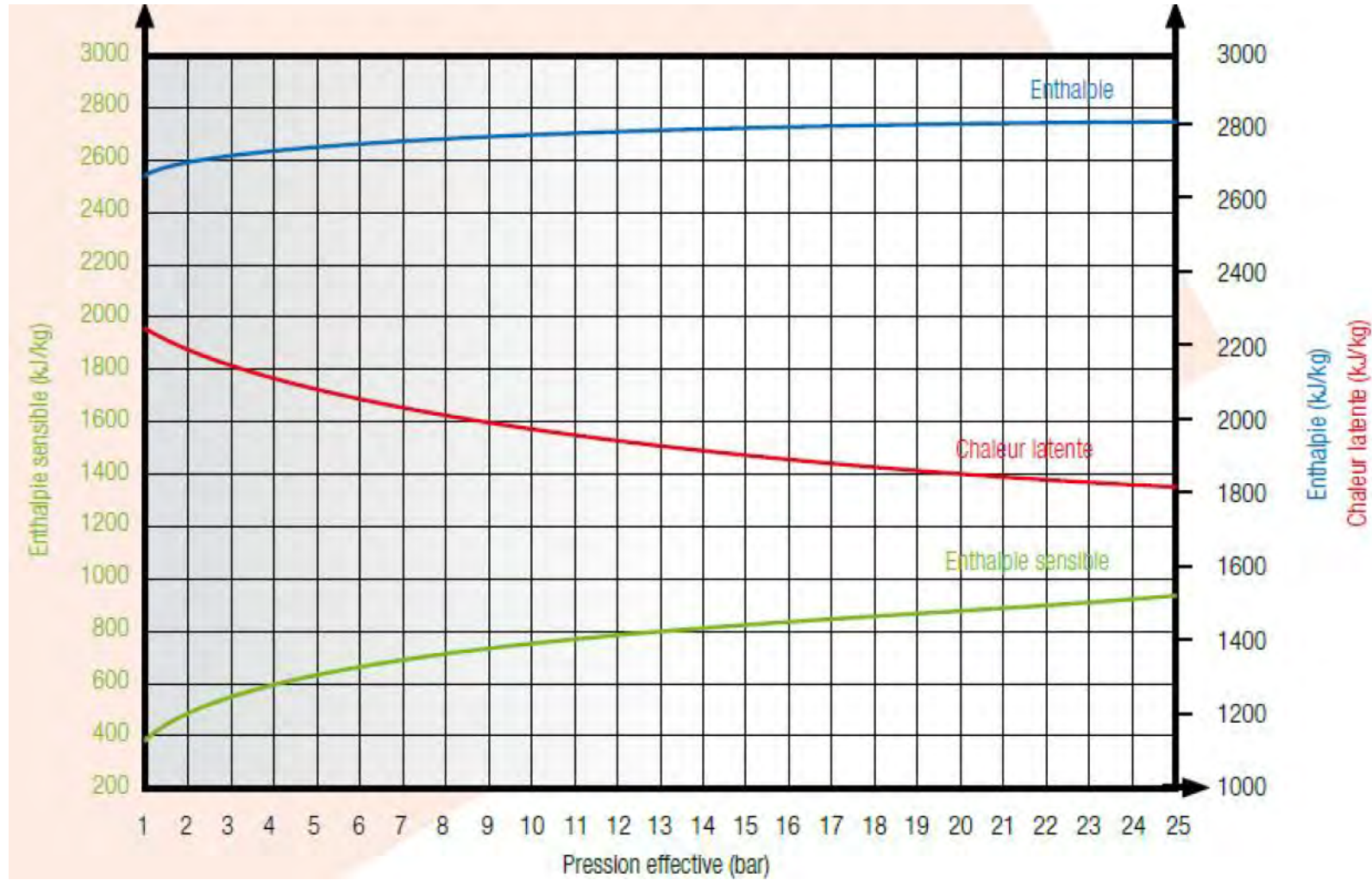
## 1.3.1 - En kJ/kg

Pression (p) (bar)	Temp. vaporis (θ) (°C)	VAPEUR SATURÉE				VAPEUR SURCHAUFFÉE							
		ENTHALPIE (en kJ/kg)			Volume massique (m³/kg)	Masse vol : (kg/m³)	ENTHALPIE à p bar et θ °C (en kJ/kg)						
		Eau (sensib.) (hf)	Vaporis. (latente) (hfg)	Vapeur (totale) (hg)			θ = 150 °C	θ = 200 °C	θ = 250 °C	θ = 300 °C	θ = 350 °C	θ = 400 °C	
Abs 0,1	45,81	191,83	2392,8	2584,7	14,674	0,0681							
Abs 0,2	60,06	251,4	2358,3	2609,7	7,649	0,1307							
Abs 0,3	69,1	289,23	2336,1	2625,3	5,229	0,1912							
Abs 0,4	75,87	317,58	2319,2	2636,8	3,993	0,2504							
Abs 0,5	81,33	340,49	2305,4	2645,9	3,24	0,3086							
Abs 0,6	85,94	359,86	2293,6	2653,5	2,732	0,366							
Abs 0,7	89,95	376,7	2283,3	2660	2,365	0,4228							
Abs 0,8	93,5	391,66	2274,1	2665,8	2,087	0,4791							
Abs 0,9	96,71	405,15	2265,7	2670,9	1,869	0,535							
Abs 1	99,63	417,46	2258	2675,5	1,694	0,5903	2779,5	2880	2976,2	3077	3183	3283	
Rel 0	100	419,04	2257	2676	1,673	0,5977	2779,5	2880	2976,2	3077	3183	3283	
Rel 0,2	105,1	440,8	2243,4	2684,2	1,414	0,7072	2778	2879	2976	3077	3182	3283	
Rel 0,4	109,55	459,7	2231,3	2691	1,225	0,8163	2776	2879	2976	3077	3181	3283	
Rel 0,6	113,56	476,4	2220,4	2696,8	1,083	0,9233	2775	2878	2976	3077	3180	3282	
Rel 0,8	117,14	491,6	2210,5	2702,1	0,971	1,0298	2773	2877	2976	3077	3179	3282	
Rel 1	120,42	505,6	2201,1	2706,7	0,881	1,135	2771	2876	2976	3077	3178	3282	
Rel 1,5	127,62	536,1	2181	2717,1	0,714	1,4005	2767	2872	2974	3076	3176	3280	
Rel 2	133,69	562,2	2163,3	2725,5	0,603	1,6583	2763	2867	2972	3075	3176	3278	
Rel 2,5	139,02	585	2147,6	2732,6	0,522	1,9157	2759	2865	2970	3074	3175	3278	
Rel 3	143,75	605,3	2133,4	2738,7	0,461	2,1691	2755	2864	2969	3074	3174	3277	
Rel 3,5	148,02	623,6	2120,3	2743,9	0,413	2,4213	2754	2863	2968	3073	3173	3277	
Rel 4	151,96	640,7	2108,1	2748,8	0,374	2,6737		2861	2967	3072	3172	3276	
Rel 4,5	155,55	656,3	2096,7	2753	0,342	2,9239		2858	2966	3070	3171	3275	
Rel 5	158,92	670,9	2086	2756,9	0,315	3,1746		2855	2962	3068	3169	3274	
Rel 5,5	162,08	684,6	2075,7	2760,3	0,292	3,4246		2851	2961	3064	3168	3273	
Rel 6	165,04	697,5	2066	2763,5	0,272	3,6764		2848	2960	3063	3167	3273	
Rel 6,5	167,83	709,7	2056,8	2766,5	0,255	3,9215		2846	2958	3062	3166	3272	
Rel 7	170,5	721,4	2047,7	2769,1	0,24	4,1666		2842	2955	3061	3165	3272	
Rel 7,5	173,02	732,5	2039,2	2771,7	0,227	4,4052		2838	2953	3060	3164	3271	
Rel 8	175,43	743,1	2030,9	2774	0,215	4,6511		2833	2951	3059	3164	3270	
Rel 8,5	177,75	753,3	2022,9	2776,2	0,204	4,9019		2832	2949	3058	3163	3269	
Rel 9	179,97	763	2015,1	2778,1	0,194	5,1546		2830	2947	3057	3163	3268	
Rel 9,5	182,1	772,5	2007,5	2780	0,185	5,4054		2826	2945	3056	3162	3267	
Rel 10	184,13	781,6	2000,1	2781,7	0,177	5,6497		2821	2943	3055	3160	3266	
Rel 11	188,02	798,8	1986	2784,8	0,163	6,1349		2817	2939	3054	3158	3265	
Rel 12	191,68	815,1	1972,5	2787,6	0,151	6,6225		2813	2934	3052	3156	3262	
Rel 13	195,1	830,4	1959,6	2790	0,141	7,0921		2805	2930	3047	3154	3261	
Rel 14	198,35	845,1	1947,1	2792,2	0,132	7,5757		2800	2926	3043	3152	3260	
Rel 15	201,45	859	1935	2794	0,124	8,0645			2922	3039	3148	3258	
Rel 16	204,38	872,3	1923,4	2795,7	0,117	8,547			2918	3037	3146	3257	
Rel 17	207,17	885	1912,1	2797,1	0,11	9,0909			2913	3035	3145	3256	
Rel 18	209,9	897,2	1901,3	2798,5	0,105	9,5238			2909	3033	3144	3255	
Rel 19	212,47	909	1890,5	2799,5	0,1	10			2905	3031	3143	3253	
Rel 20	214,96	920,3	1880,2	2800,5	0,0949	10,5374			2899	3027	3142	3251	
Rel 22	219,65	941,9	1860,1	2802	0,0868	11,5207			2893	3022	3140	3248	
Rel 24	224,02	952,2	1840,9	2803,1	0,0797	12,547			2884	3014	3131	3244	
Rel 26	228,15	981,6	1822,2	2803,8	0,074	13,5135			2872	3006	3127	3240	
Rel 28	232,05	999,7	1804,4	2804,1	0,0689	14,5137			2859	3001	3123	3236	
Rel 30	235,78	1017,1	1787	2804,1	0,0645	15,5038			2845	2993	3117	3232	
Rel 34	242,63	1049,7	1753,8	2803,5	0,0571	17,5131			2830	2985	3110	3227	
Rel 38	248,95	1080,3	1721,6	2801,9	0,051	19,6078			2802	2968	3098	3219	
Rel 42	254,74	1108,6	1691,2	2799,8	0,0461	21,6919				2963	3091	3210	
Rel 46	260,13	1135,3	1661,6	2796,9	0,0421	23,7529				2945	3080	3202	
Rel 50	265,26	1160,8	1632,8	2793,6	0,0386	25,9067				2928	3068	3193	
Rel 99	310,96	1408	1320	2728	0,01804	55,43					2927	3099	

# Module 5.1.1: Enthalpie vapeur saturée



# Module 5.1.1: Enthalpie de l'eau



$$\text{Capacité thermique } c_p = \frac{\text{chaleur transférée}}{\text{différence de } T} \text{ de l'objet} = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \text{ en } \text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$$

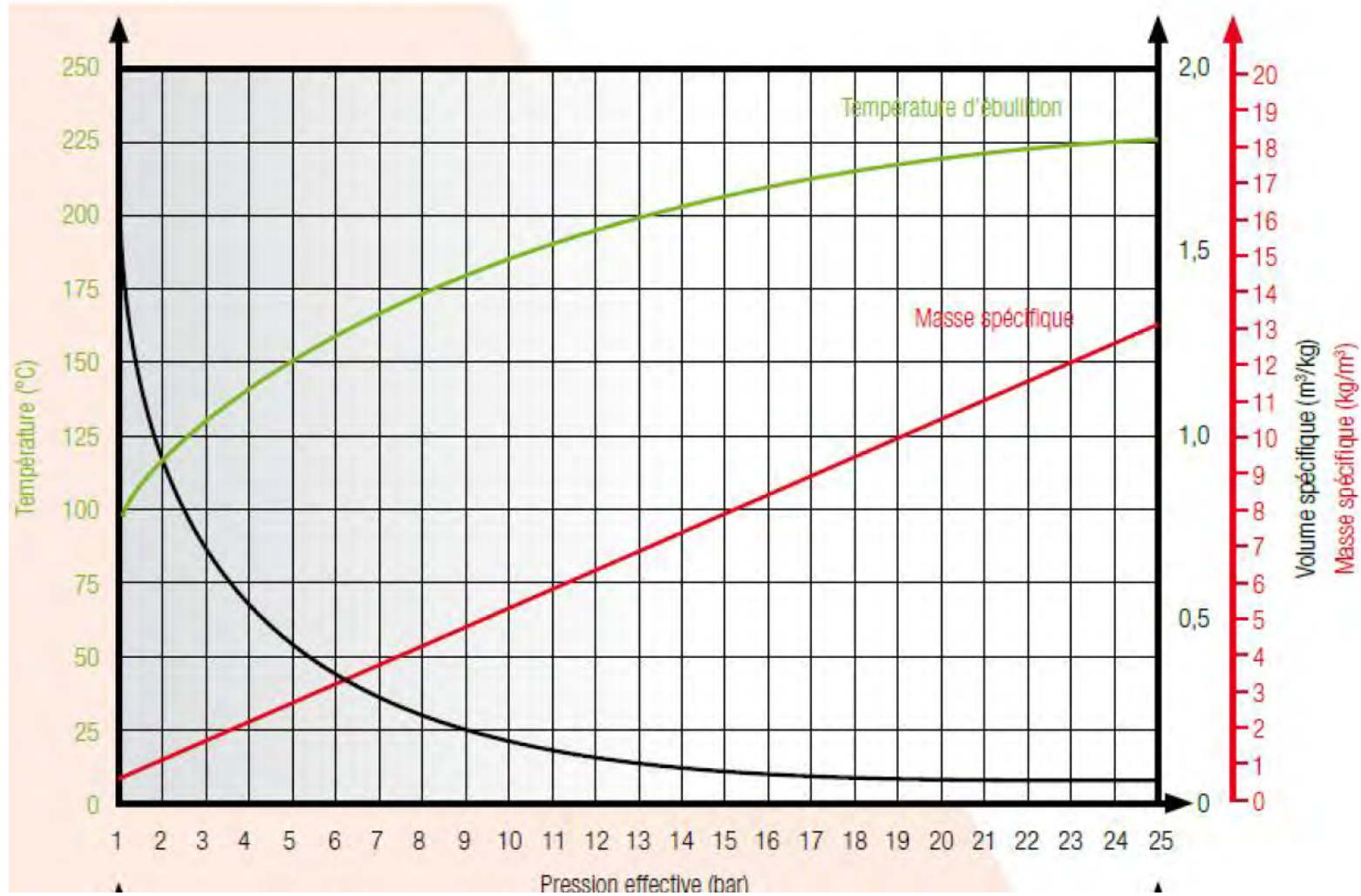
Capacité thermique  $c_p$  (kJ/kg K) à pression constante de l'eau en fonction de T et P

Druck bar	Temperatur in °C														
	0	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800
1	4,217	4,182	4,181	2,032	1,979	1,974	1,988	2,011	2,037	2,068	2,099	2,132	2,200	2,270	2,341
5	4,215	4,181	4,180	4,215	4,310	2,143	2,079	2,065	2,073	2,093	2,118	2,146	2,208	2,276	2,346
10	4,212	4,179	4,179	4,214	4,308	2,431	2,215	2,141	2,121	2,126	2,141	2,164	2,219	2,283	2,352
50	4,191	4,166	4,170	4,205	4,296	4,477	4,855	3,299	2,669	2,451	2,360	2,324	2,311	2,347	2,402
100	4,165	4,151	4,158	4,194	4,281	4,450	4,791	5,703	4,042	3,078	2,726	2,569	2,445	2,429	2,465
150	4,141	4,137	4,148	4,183	4,266	4,425	4,735	5,495	8,863	4,155	3,235	2,875	2,597	2,517	2,531
200	4,117	4,123	4,137	4,173	4,252	4,402	4,685	5,332	8,103	6,327	3,959	3,257	2,767	2,610	2,598
250	4,095	4,109	4,127	4,163	4,239	4,379	4,639	5,201	7,017	13,02	5,020	3,731	2,956	2,709	2,666
300	4,073	4,097	4,117	4,153	4,226	4,358	4,598	5,091	6,451	25,71	6,624	4,317	3,161	2,814	2,736
350	4,052	4,084	4,107	4,144	4,214	4,338	4,560	4,999	6,084	11,79	8,875	5,019	3,381	2,925	2,807
400	4,032	4,073	4,098	4,135	4,202	4,319	4,525	4,919	5,820	8,784	10,89	5,807	3,612	3,040	2,878
450	4,013	4,062	4,089	4,126	4,190	4,301	4,493	4,848	5,616	7,517	10,83	6,584	3,849	3,158	2,951
500	3,994	4,051	4,081	4,117	4,179	4,284	4,463	4,786	5,451	6,814	9,483	7,200	4,086	3,278	3,024
600	3,957	4,032	4,064	4,100	4,157	4,252	4,410	4,681	5,200	6,047	7,466	7,480	4,521	3,515	3,168
700	3,920	4,014	4,049	4,084	4,137	4,222	4,362	4,595	5,014	5,621	6,440	6,913	4,857	3,736	3,309
800	3,883	3,997	4,035	4,068	4,117	4,195	4,320	4,523	4,871	5,340	5,844	6,310	5,053	3,928	3,441
900	3,844	3,982	4,022	4,054	4,099	4,169	4,282	4,462	4,757	5,135	5,465	5,854	5,104	4,082	3,562
1000	3,800	3,968	4,010	4,039	4,081	4,145	4,248	4,410	4,663	4,975	5,203	5,511	5,057	4,196	3,670

Source: VDI-Wärmeatlas



# Module 5.1.1: Propriétés de l'eau



# Module 5.1.1: Vapeur d'eau saturée

Utilisation de la vapeur d'eau saturée ou sèche comme source de chaleur

Propriété	Avantage
Chauffage rapide et uniforme à l'aide de la chaleur latente	Amélioration de la qualité du produit et de la productivité
La pression contrôle la température	Possible d'établir la température désirée rapidement et précisément
Coefficient de transmission de chaleur élevé	Surface de transmission de la chaleur plus petite que l'eau chaude, réduisant les coûts d'installations
Provient de l'eau	Sécuritaire, propre et peu coûteux

La vapeur d'eau saturée est une source idéale de chaleur, surtout pour le chauffage à des températures supérieures à 100 °C.

# Module 5.1.1: Vapeur d'eau surchauffée

Utilisation de la vapeur d'eau surchauffée comme source de chaleur

Propriété	Désavantage
Coefficient de transmission de chaleur plus bas	Productivité réduite
	Nécessité d'une plus grande surface de transmission de la chaleur
Pour une même pression, la température de la vapeur n'est pas nécessairement uniforme	La vapeur surchauffée doit être maintenue à une vitesse élevée pour empêcher les pertes de chaleur
Chauffage avec la chaleur sensible	Les chutes de température peuvent avoir un effet néfaste sur la qualité du produit
La vapeur surchauffée peut atteindre des températures très élevées	Les installations nécessitent des matériaux plus robustes, ce qui augmente les coûts d'installation

La vapeur d'eau surchauffée est principalement employée à des fins motrices, notamment dans les turbines, et n'est généralement pas utilisée comme source de chaleur.

Comparaison entre transfert de chaleur par un fluide ou vapeur

Propriété	Fluide (eau, huile)	Vapeur d'eau
Coeff. éch. chaleur [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	1'000 – 6'000	6'000 – 15'000
Mode de transfert	convection	condensation
Changement d'état	Non	Oui
Température	Tp variable entre entrée et sortie	Tp = cst.

Conclusions:

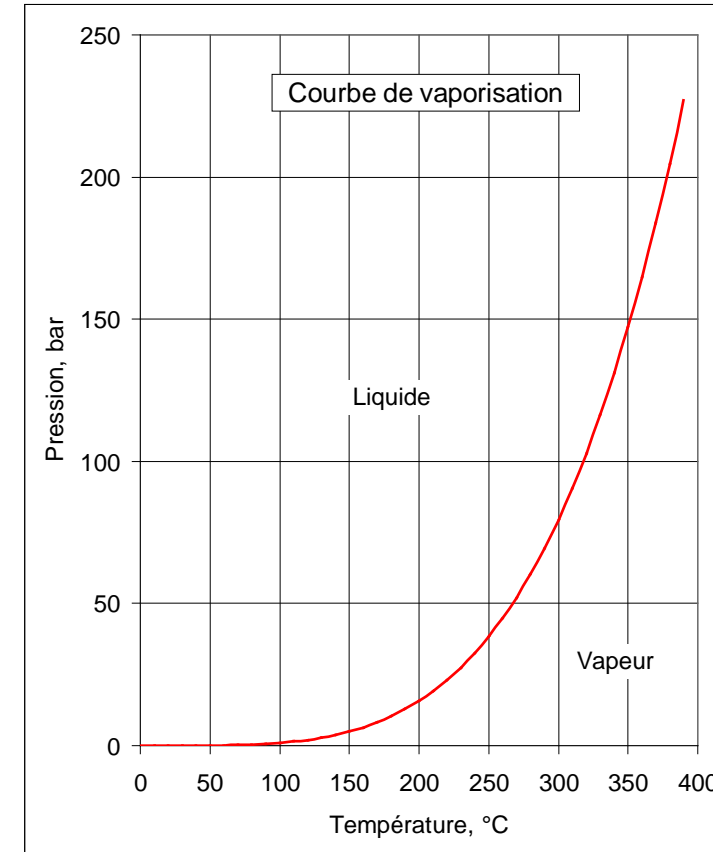
- La vapeur fournit un chauffage égal
- La vapeur fournit un chauffage rapide



# Module 5.1.1: La vapeur saturée (1)

Relation étroite entre T et P

- La vapeur est automotrice (utilisation de la pression).
- On appelle *condensats* l'eau résultant de la condensation de la vapeur.
- La chaleur latente de vaporisation est transférée lors du changement d'état à T et P constants.



# Module 5.1.1: La vapeur saturée (2)

Il existe des formules empiriques pour la vapeur saturée:

Pression d'ébullition:

$$P(\text{bar}) = 0.981 \left[ \frac{T}{100} \right]^4 \quad \text{Dupperay , } T > 100 \text{ en } ^\circ\text{C}$$

Chaleur latente de vaporisation:

$$\Delta H_v (J / g) = 4.18 (606.5 - 0.695 \cdot T) \quad \text{Regnault , } T \text{ en } ^\circ\text{C}$$

Relation en pression d'ébullition et volume massique:

$$P \cdot V_m = 2 \quad \text{Bertin}$$

$$(\text{bar}) (m^3 kg^{-1})$$

# Module 5.1.1: La vapeur saturée (3) – le titre

## Le titre de la vapeur saturée

Le **titre** de la vapeur : définit la fraction massique de vapeur sèche

$$\text{titre } \chi = \frac{m_{\text{vapeur}}}{m_{\text{vapeur}} + m_{\text{eau}}}$$

La vapeur sèche ne contient aucune particule d'eau sous forme liquide, c'est un gaz.

Une vapeur de titre 0.95 contient par kg, d'une part, 950 g de vapeur sèche et 50 g d'eau non vaporisée.

Ce mélange vapeur/eau ne contient donc que 95% de l'enthalpie de vaporisation.

→ Enthalpie réelle = enthalpie d'évaporation x titre

# Module 5.1.1: La vapeur saturée sèche

- La vapeur, lors de son transport devient « humide » à cause des pertes thermiques.
- La vapeur sèche à un titre de 1.
- Pour garantir de la vapeur sèche on utilise des sécheurs ou **séparateurs d'eau**.
- Installation en série, où la vapeur subit un changement brusque de vitesse et de direction pour séparer les particules d'eau vers le point de purge.

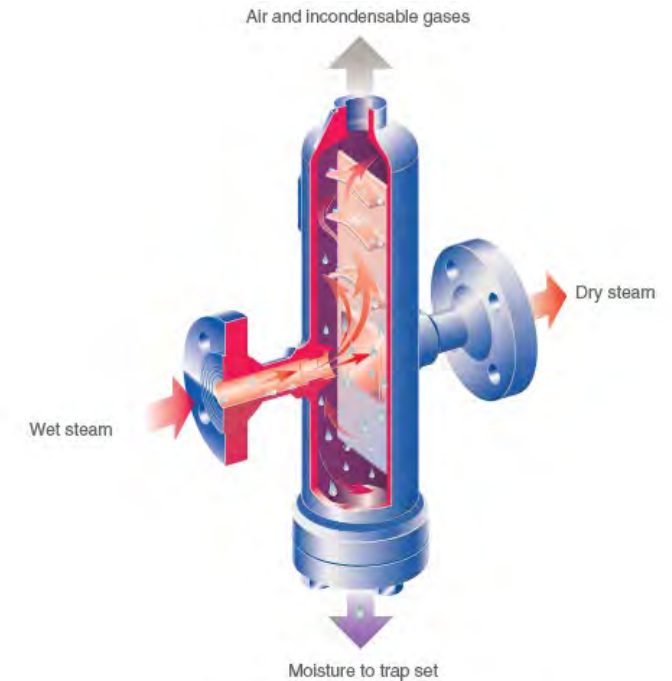
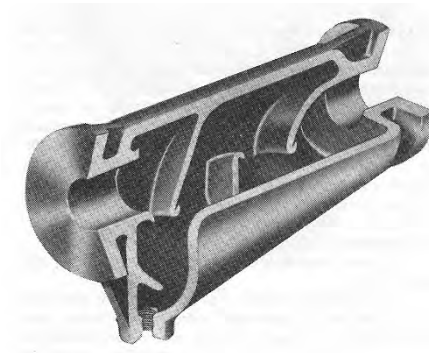


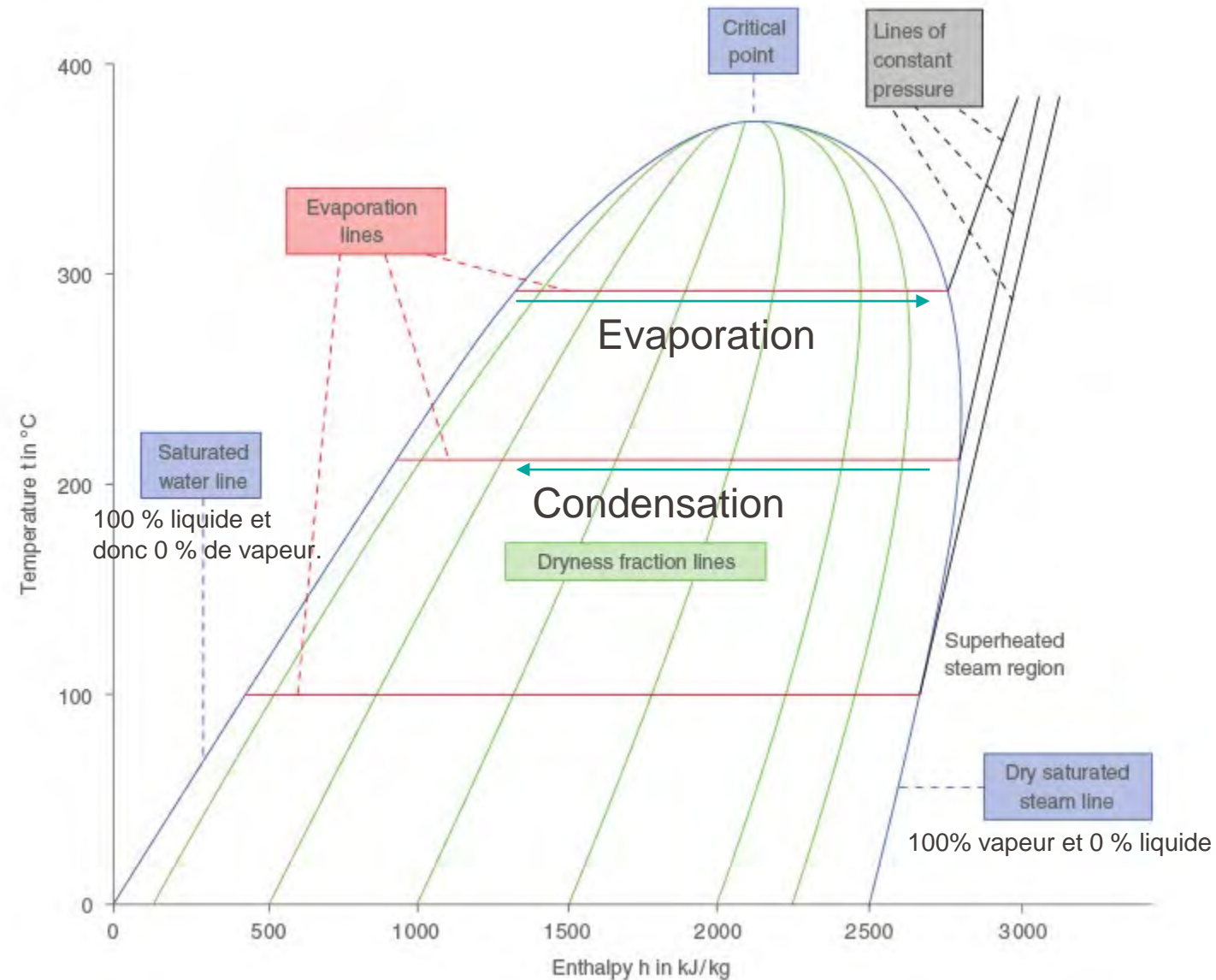
Fig. 2.4.3 A steam separator

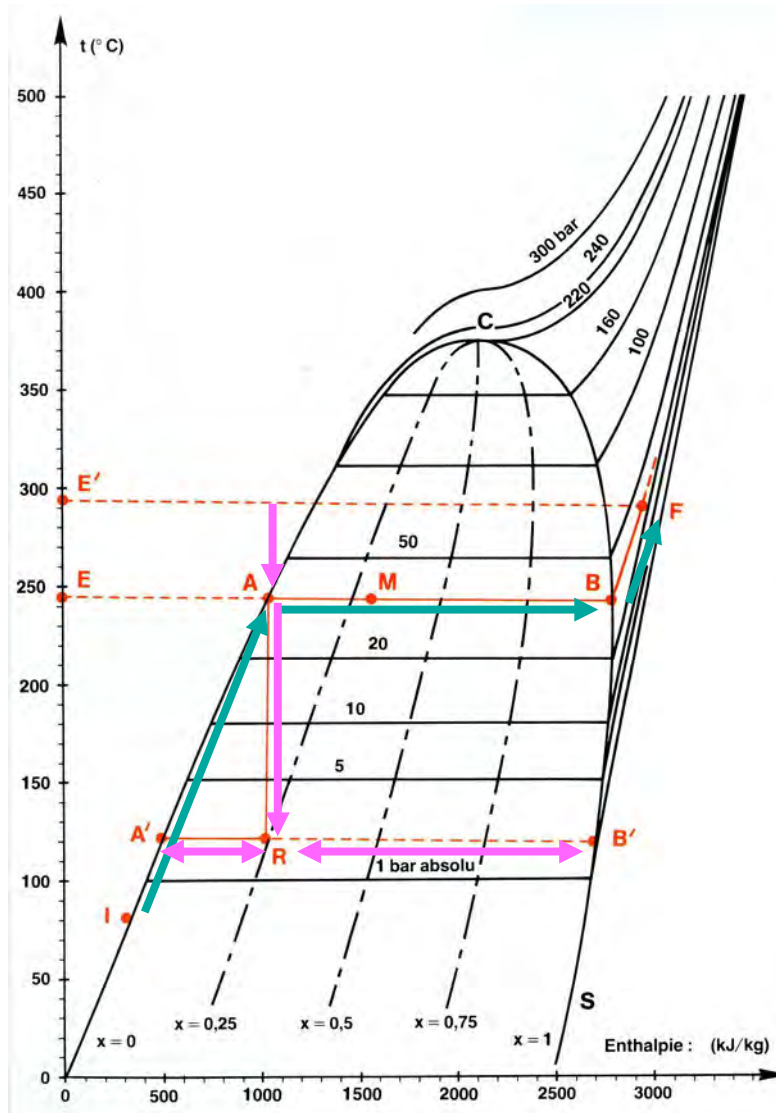


Source: Spirax Sarco, cahier technique, IB5

En chauffant d'avantage la vapeur sèche, elle devient surchauffée :

- La courbe de saturation n'est plus suivie.
- Il n'y a plus d'eau sous forme liquide.
- $T$  n'est pas fonction de  $P$ .
- Son utilisation principale est le turbinage (parfois jusqu'à 700 °C), évite la présence de gouttelettes.
- Pour les grandes distances à parcourir, on évite la condensation qui survient avec la vapeur saturée.
- Le transfert thermique est inférieur à celui de la vapeur sèche ou saturée.
- Seul le  $c_p$  est utilisé jusqu'à la courbe d'équilibre, ensuite le  $\Delta H_v$





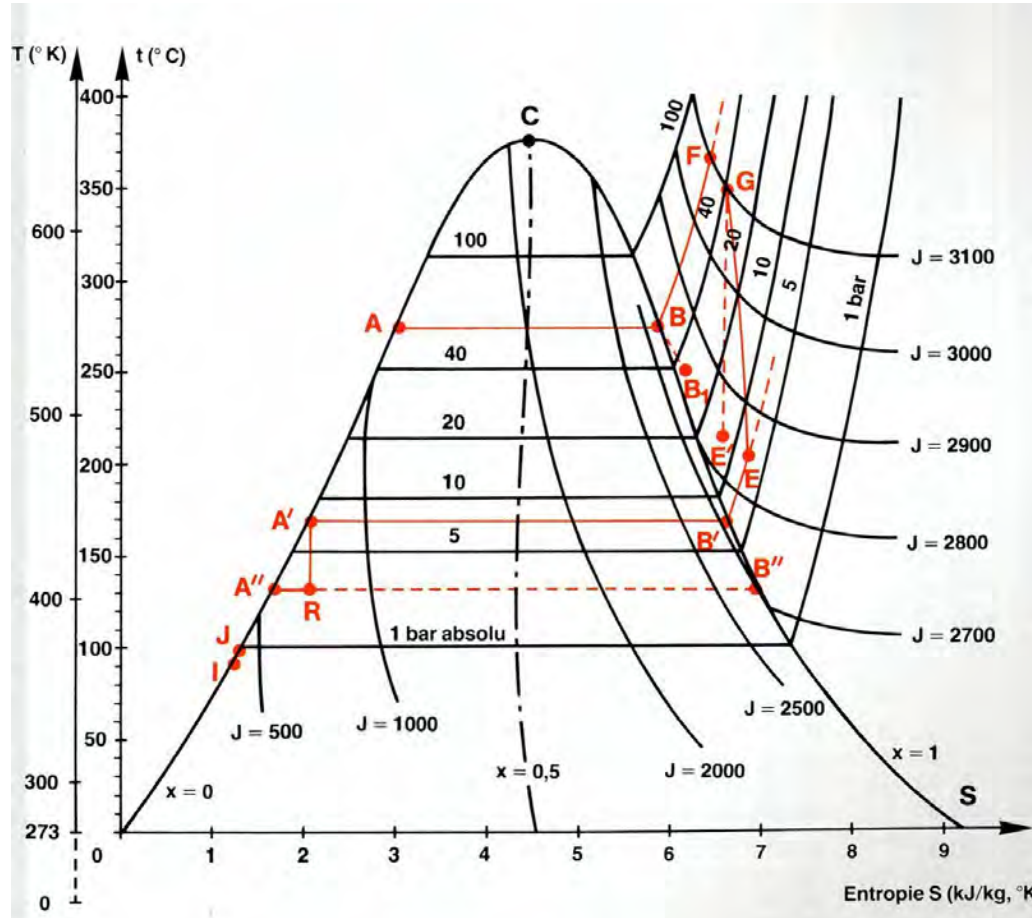
- **EA**: enthalpie du liquide à T saturation
- **EB**: enthalpie de la vapeur sèche ( $x=1$ ) à T saturation
- **EM**: enthalpie d'un mélange biphasique T saturation
- **E'F**: enthalpie de la vapeur surchauffée
- **AB**: chaleur latente de vaporisation
- **x**: titre de la vapeur en un point M, rapport  $AM/AB$

Exemple: En partant d'un état initial I, on chauffe l'eau jusqu'à une température correspondante à A. On vaporise entre A et B, et on surchauffe jusqu'en F.

Inversement en utilisant la vapeur elle cèdera la chaleur de F à A. Le purgeur recevra les condensats en amont A et d'une manière isenthalpique les enverra dans la canalisation au point R (nouvel équilibre). Il y a revaporisation partielle et le nouveau titre est  $RA'/A'B'$ .

Source: technique de l'ingénieur





- OC: courbe de saturation
- CS: courbe de vapeur saturée sèche
- AB: palier isobare
- BF: courbe isobare en vapeur surchauffée
- J: courbe isenthalpique
- IJ: compression adiabatique de l'eau avant chauffage
- JA: chauffage de l'eau → T saturation
- AB: vaporisation de l'eau
- BF: surchauffe de la vapeur
- FG: détente isenthalpique (par vanne de réglage).
- GE: détente réelle de la vapeur dans une turbine (GE' sans pertes = isentropique)

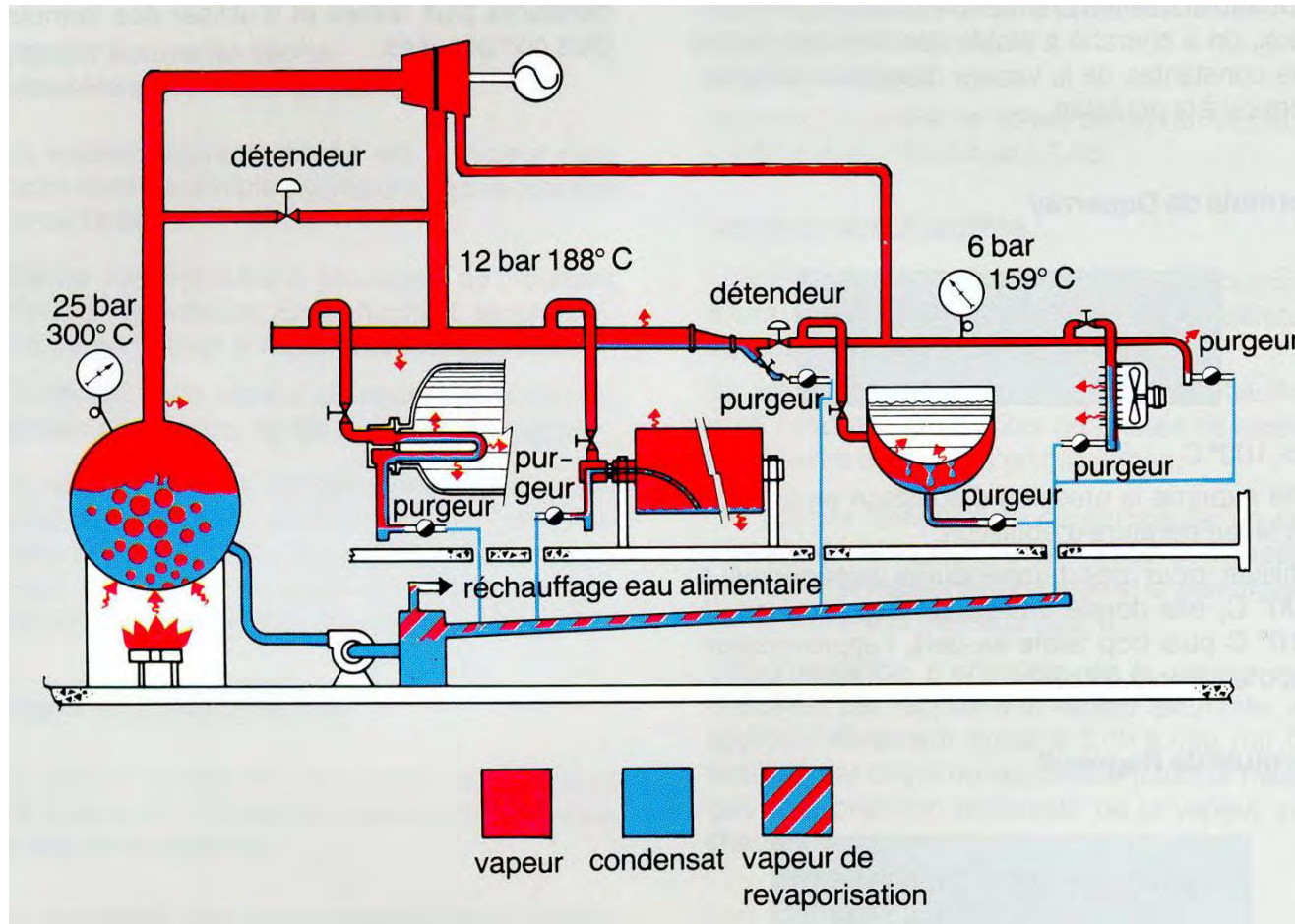


## Module 5.1.2

### **5.1 L'utilisation de la vapeur**

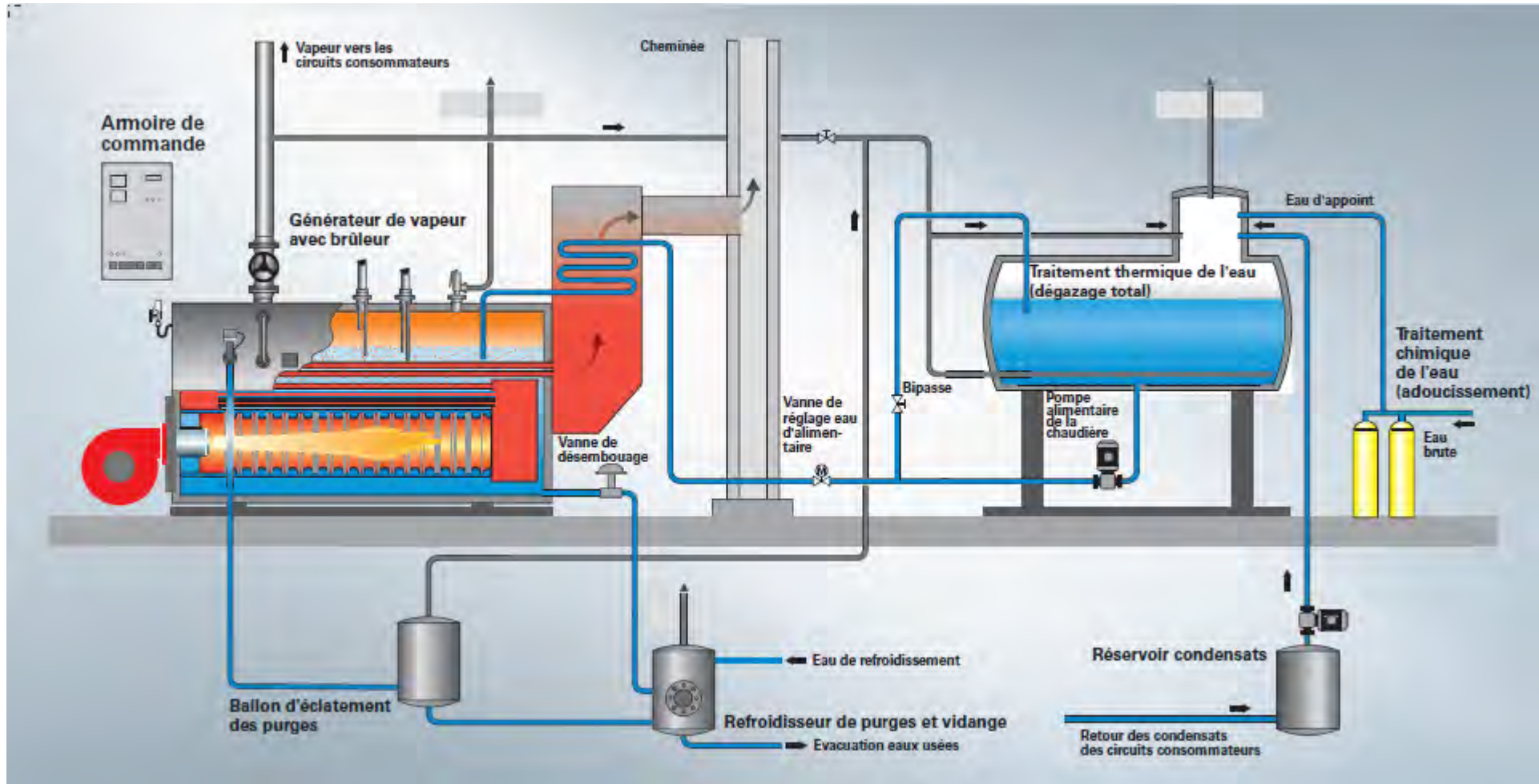
#### **5.1.2 La production de vapeur**

# Module 5.1.2: Production de vapeur (1)



La vapeur produite peut être utilisée sous deux aspects: énergie **potentielle** et énergie **calorifique**

# Module 5.1.2: Production de vapeur (2)



## Energie potentielle ou de pression:

**Sans travail extérieur:** si aucun échange calorifique entre la vapeur et le milieu environnant n'est possible, l'énergie de vapeur ne peut se dégrader par chute de pression car l'enthalpie reste constante. Au passage d'une vanne de détente, la vapeur saturée devient surchauffée mais à une pression inférieure.

**Avec travail extérieur:** en cas de travail fourni par la vapeur, il y a chute de pression et échange calorifique, l'enthalpie diminue. La vapeur est alors détendue dans une turbine. A cette chute de pression correspond une chute d'enthalpie.

## Energie calorifique:

La vapeur peut transférer de la chaleur au milieu environnant par condensation. Elle cède l'énergie (chaleur latente) emmagasinée lors de la vaporisation



## Chaudière thermique

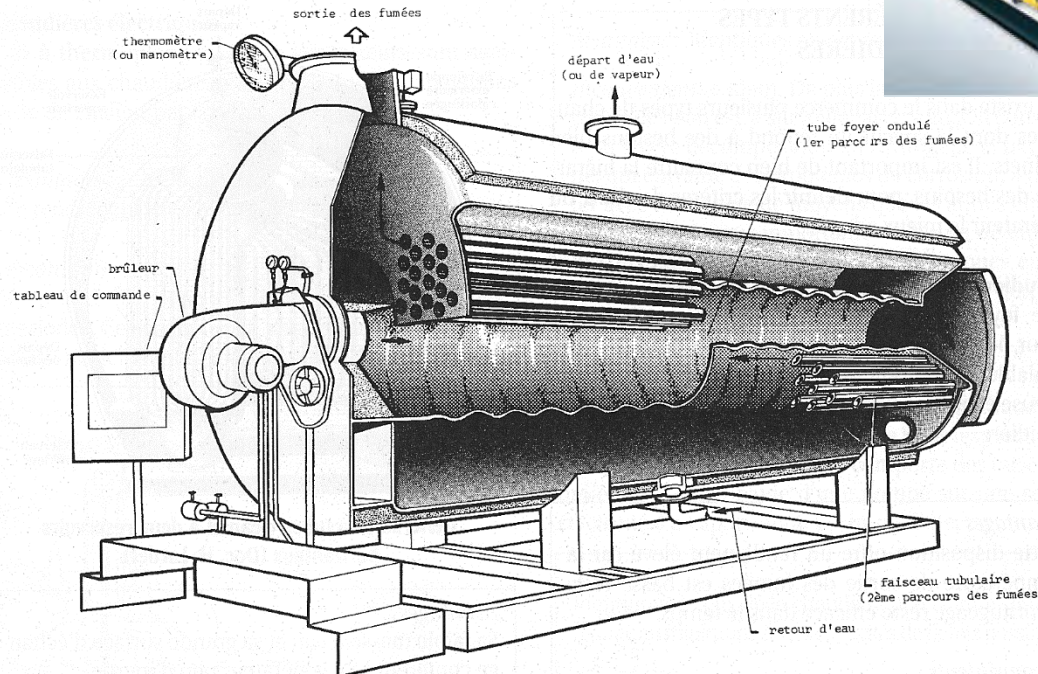
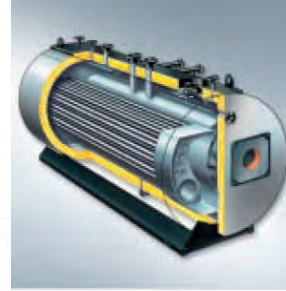
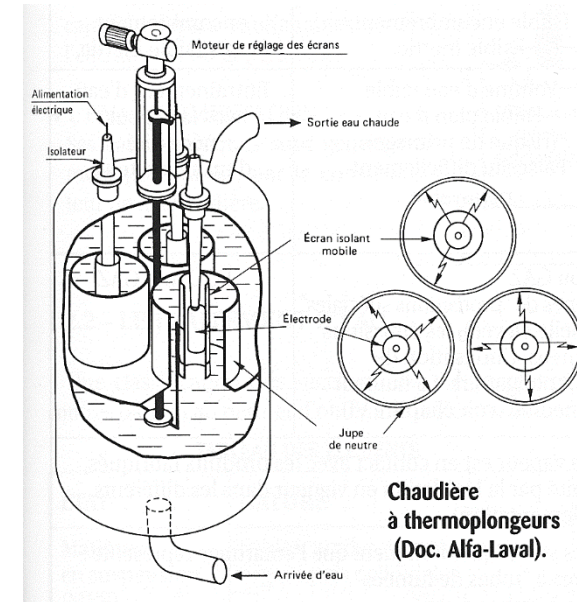


Fig. 1. — Chaudière de type industriel à tubes de fumée et à foyer concentrique (Doc. SEUM)

- Rendement élevé
- Températures des fumées basses
- Grand volume d'eau, grande inertie au démarrage
- Limite: 20 t/h et 25 bars.

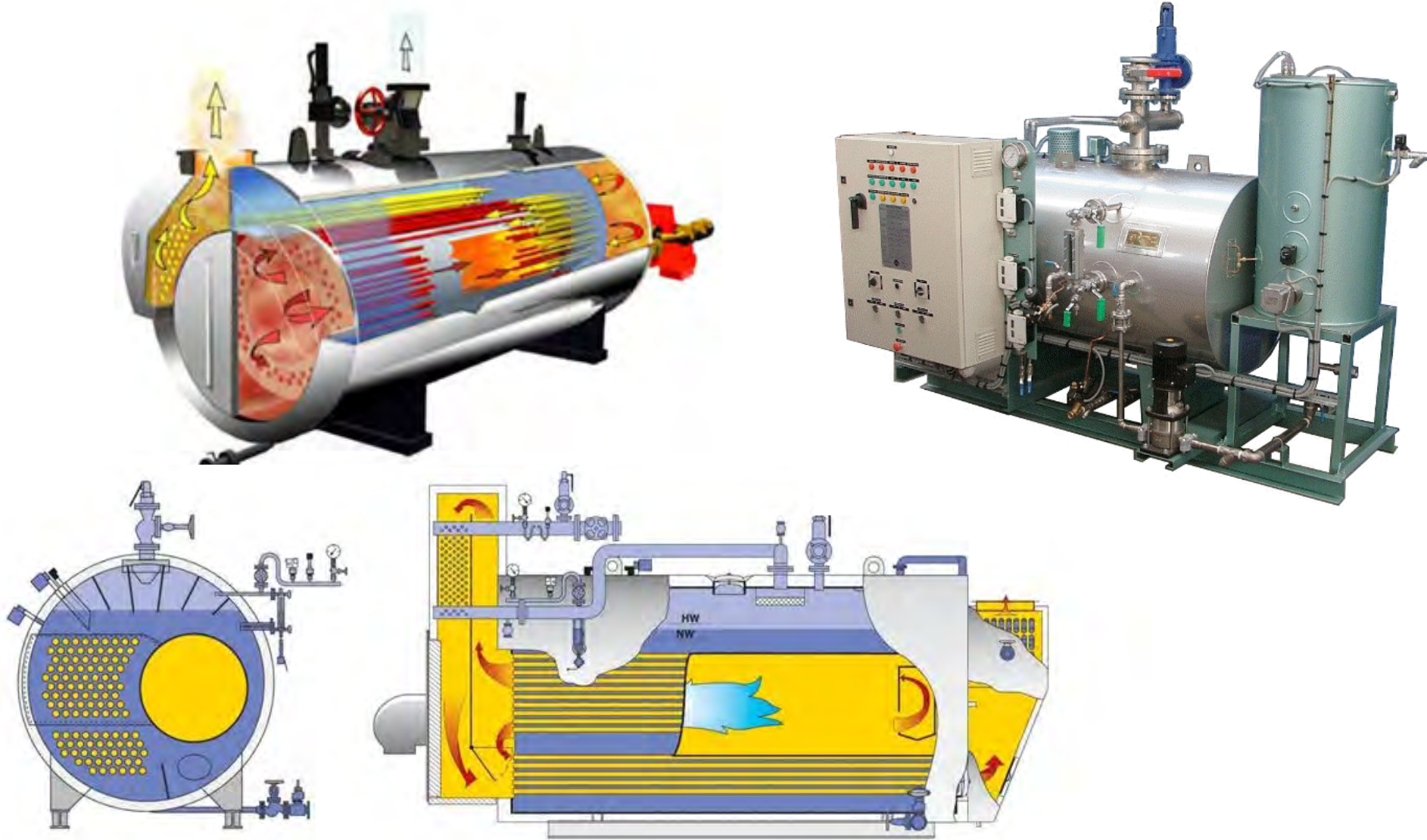
## Chaudière électrique

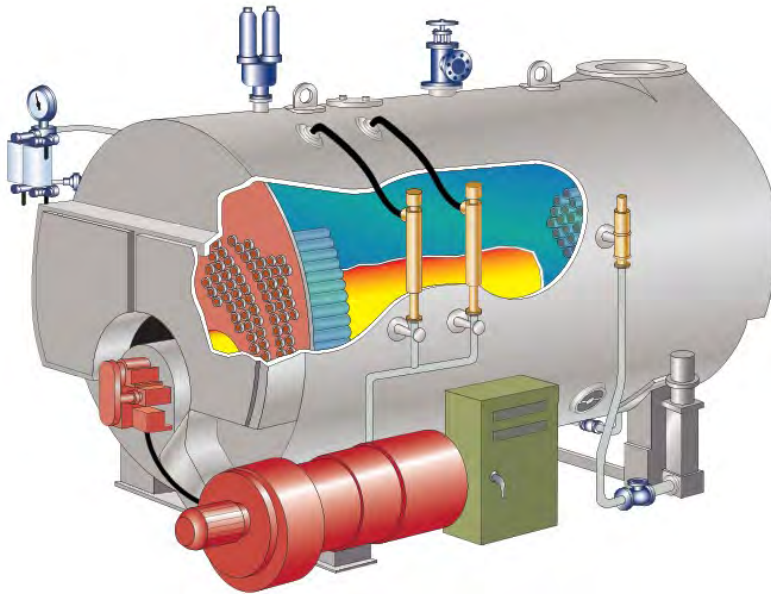


Chaudière à thermoplongeurs (Doc. Alfa-Laval).

- Rendement très élevé
- Uniquement de la vapeur saturée.

# Module 5.1.2: Chaudières thermiques multitubulaires (1)





IVAR 3-PASS STEAM BOILER

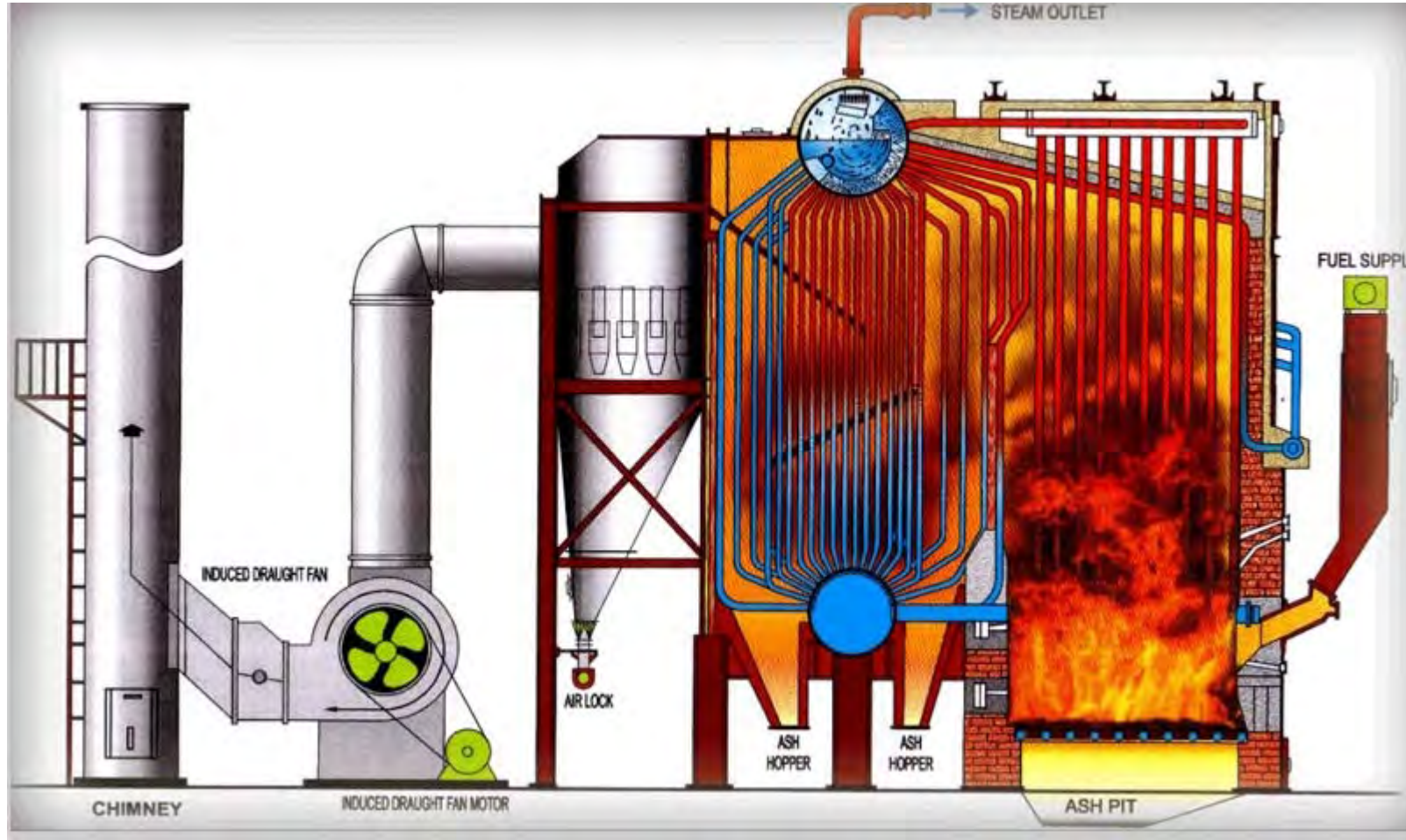


Durée 2'59"

Source: <https://boilersinfo.com/fire-tube-boiler/>



# Module 5.1.2: Chaudières type fours





# Module 5.1.2: Les générateurs

Le principal avantage des générateurs sur les chaudières est de pouvoir s'adapter rapidement à la demande de vapeur.



Source: <https://ural-power.info/en/diesel-steam-generator/>

# Module 5.1.2: Comparaison

	Chaudières	Générateurs
Avantages	Stabilité de production	Très faible inertie
	Robustesse , durée de vie	Compact et léger
	Très bon rendement > 95 %	Absence du risque d'explosion, peu de stock de vapeur
	Moins sensible à la qualité de l'eau	Possibilité de fonctionnement sans surveillance
	Large gamme de travail (modulation)	
	Bruit faible	
Inconvénients	Grande inertie au démarrage	Moins robuste, mais maintenance plus facile
	Poids et masse d'eau élevées, encombrement	Plus sensible à la qualité de l'eau
	Risque théorique d'explosion, grande quantité de vapeur stockée	Niveau de bruit plus élevé
	Pertes dues à l'inertie	Durée de vie réduite car fonctionnement moins stable

# Module 5.1.2 : Considérations de sécurité

Les opérations de production de vapeur sont dangereuses car elles travaillent à haute température et haute pression, il convient donc de :

- Contrôler les soupapes et disques de rupture
- Contrôler les éléments d'isolation interne et externe
- Former les personnes aux équipements
- Maintenance préventive
- Contrôle du niveau de bruit
- Inspection des installations et de leur connections
- Nettoyer régulièrement
- Vérifier les système de système de sécurité (alarmes et arrêts d'urgence)

## Module 5.1.3

### **5.1 L'utilisation de la vapeur**

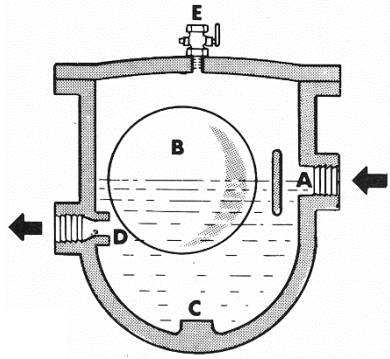
#### **5.1.3 Les purgeurs**

Fonction : Laisser passer le condensat et retenir la vapeur

Il existe 3 types de purgeurs principaux:

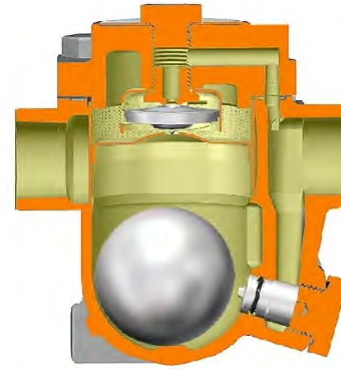
- Mécaniques (différence de densité)
- Thermostatiques (différence de température)
- Thermodynamiques (différence de vitesse)

## A flotteur libre

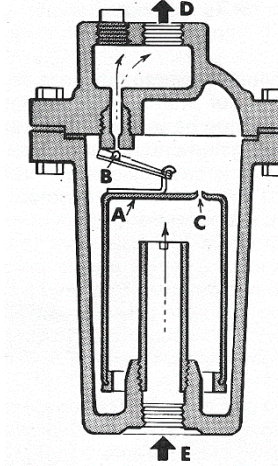


- Entretien minimum.
- Pannes minimums.
- Selon construction, orifice D bouché par B avant que le condensat ne s'écoule.
- Etanchéité difficile entre B et D.

## A flotteur inversé ouvert

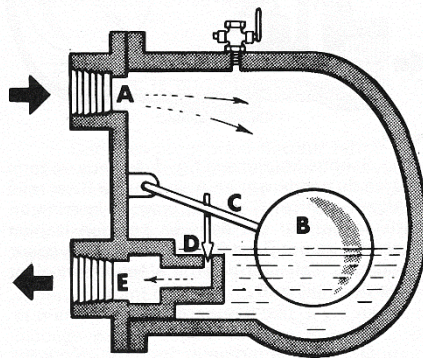


Copyright TLV CO., LTD.

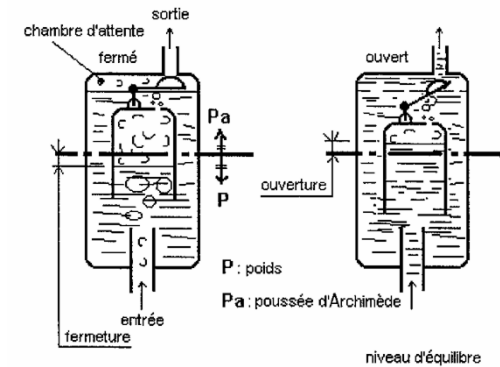


- Résiste aux coups de bélier.
- Mécanique robuste.
- Purge d'air problématique.
- Minimum d'eau au fond est nécessaire.
- Sensible au gel.

## A flotteur fermé



- Adaptation aux fluctuations de T et P.
- Utilisé lors de régulation de T.
- Sensible au gel.
- Pas d'utilisation avec vapeur surchauffée.
- Sensible aux coups de bélier.

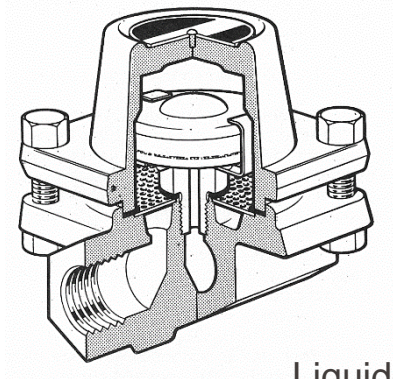


Figures: Spirax Sarco, cours vapeur



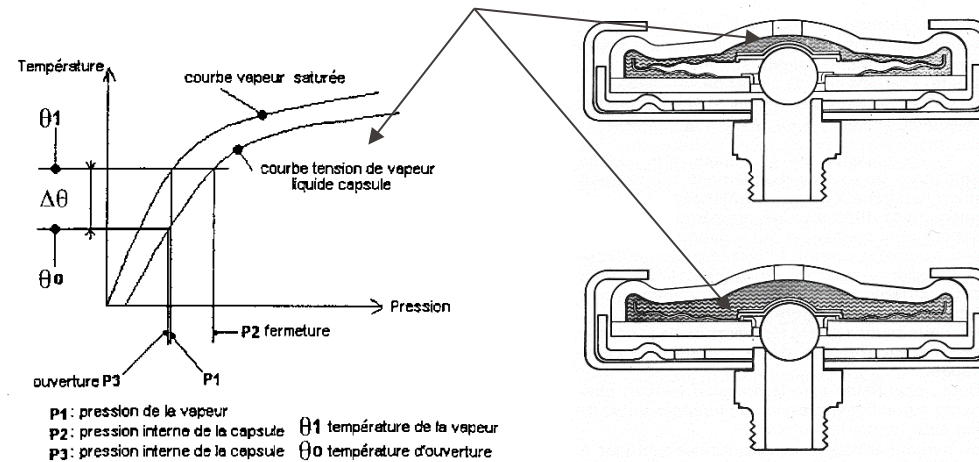
# Module 5.1.3: 2. Les purgeurs thermostatiques

A pression équilibrée (capsule ou soufflet)

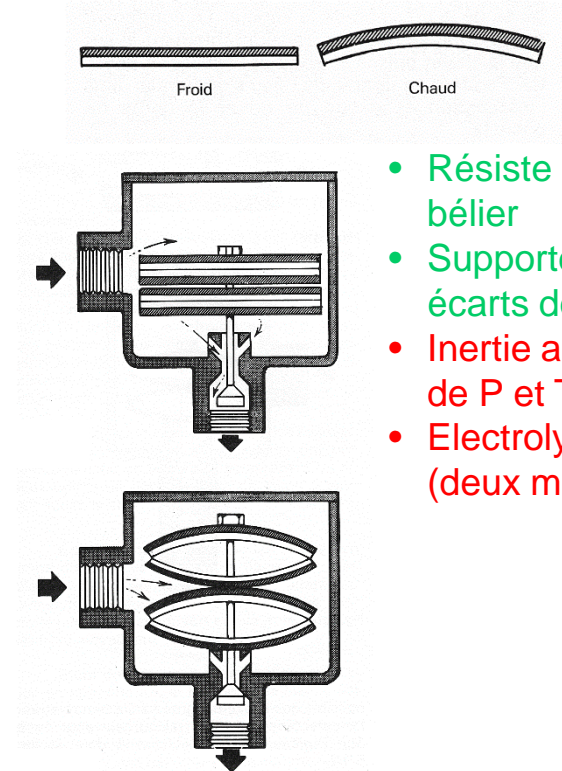


- Résiste aux coups de bélier.
- Encombrement faible.
- Débits de condensats limités.
- Sensible au gel.

Liquide (alcools)



Biméalliques



- Résiste aux coups de bélier
- Supporte de grands écarts de P et T.
- Inertie aux changements de P et T.
- Electrolyse possible (deux métaux).

# Module 5.1.3: 3. Les purgeurs thermodynamiques

Les purgeurs thermodynamiques fonctionnent grâce aux différences de propriétés physiques entre la vapeur et le condensat.

Un disque réagissant aux différences de pression pilote l'ouverture ou la fermeture du purgeur.



## purgeur thermodynamique

### purgeur thermodynamique à disque

#### Construction :

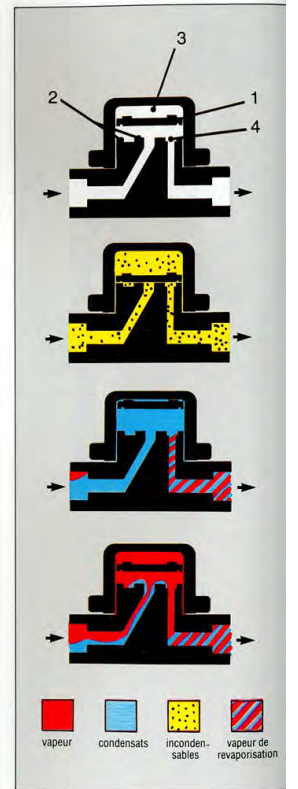
- 1 disque (faisant office d'obturateur)
- 2 sièges
- 3 chambre de pression
- 4 orifice d'évacuation

#### Fonctionnement :

La prédominance alternée des pressions sur chacune des faces du disque provoquent les mouvements d'ouverture et de fermeture du disque.

#### DÉMARRAGE

- le purgeur est vide de condensats ; le disque repose sur les sièges.
- l'arrivée d'air et d'incondensables soulève le disque puis le bloque en position fermée (l'air agit de la même façon que la vapeur en régime établi).
- à l'arrivée des condensats, le disque ne s'ouvre que lorsque l'air est évacué (sinon l'air le bloque).



Source: Spirax Sarco  
Durée 1'23"

Figures: Purge de condensats, Tec&Doc



## Module 5.1.4

### **5.1 L'utilisation de la vapeur**

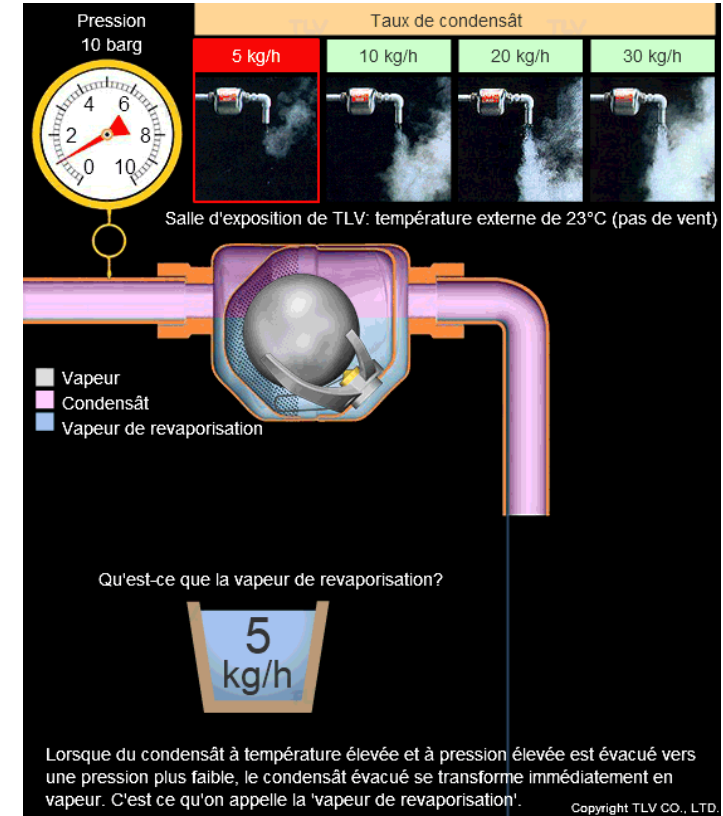
#### **5.1.4 La revaporisation**

Le terme «vapeur **flash**», aussi appelé «vapeur de **revaporisation**», désigne la vapeur formée lorsque du condensat chaud subit une chute de pression.

Qu'arrive-t-il donc lorsque du condensat à pression élevée maintenu à une température de 184 °C, par exemple, est évacué à l'air?

Le condensat contient trop d'énergie (enthalpie) pour demeurer complètement liquide. Pour contrebalancer ce surplus d'énergie, une partie des molécules d'eau absorbe cet excès d'énergie sous forme d'énergie latente et devient de la vapeur. Ceci a pour effet de réduire la température du condensat jusqu'au point de saturation de l'eau (100 °C lorsqu'évacué à l'air).

C'est le phénomène d'évaporation flash ou revaporisation.

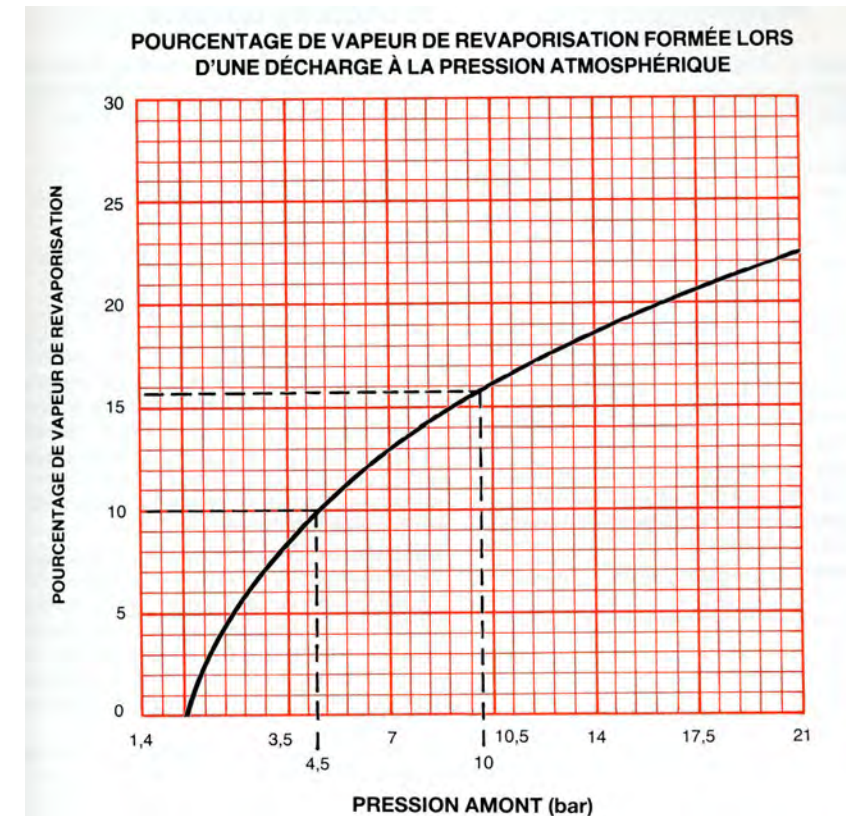
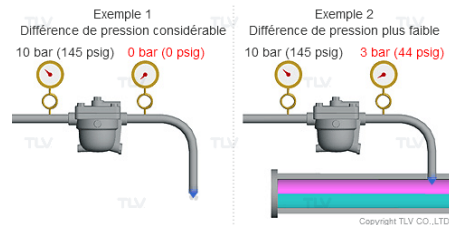


# Module 5.1.4: La revaporisation (2)

Lorsque les condensats traversent le clapet d'un purgeur, leur pression chute très rapidement accompagnée d'une chute de température. Cette chute s'accompagne d'un apport calorifique équivalent aux condensats détendus. En aval du purgeur les condensats se revaporisent en consommant les calories disponibles.

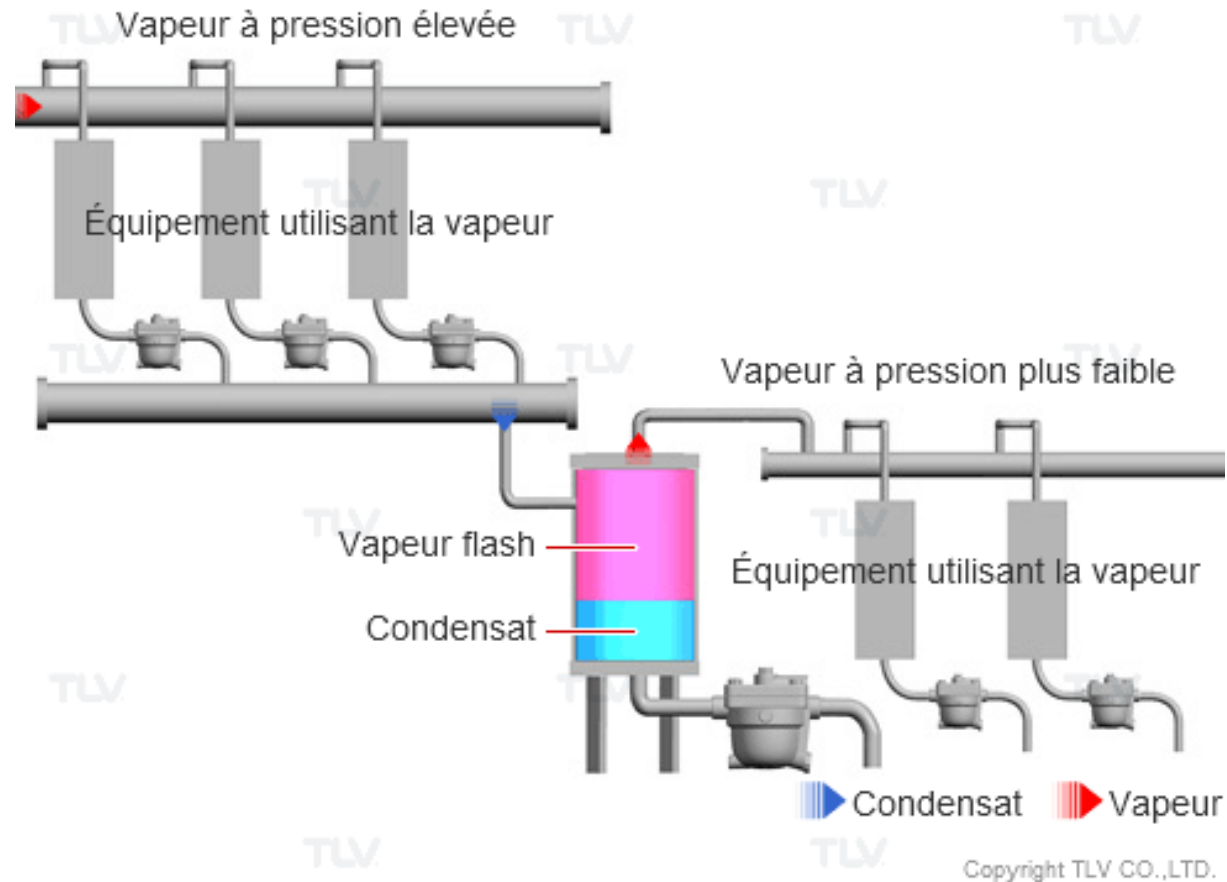
La fraction massique de condensats revaporisés peut s'estimer à l'aide du bilan suivant (enthalpie spécifique = chaleur sensible, am: amont du purgeur, av: aval du purgeur):

$$w_{rev} = \frac{\Delta \text{Enthalpie spécifique de l'eau saturée (amont-aval)}}{\Delta H_{v,av}}$$



# Module 5.1.4: La revaporisation (3)

Exemple d'un système de récupération de vapeur flash



## Module 5.1.5

### **5.1 L'utilisation de la vapeur**

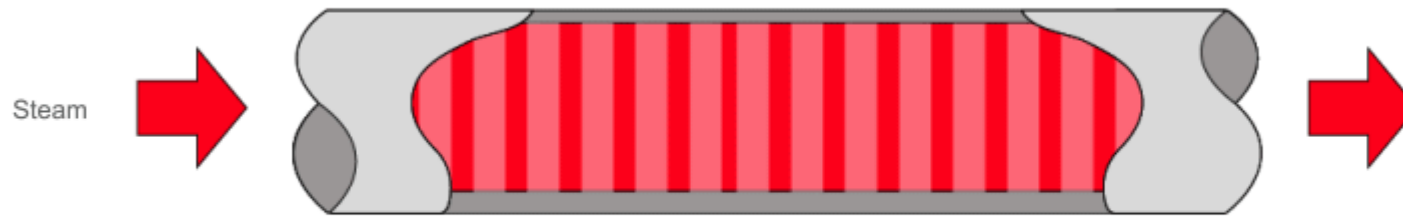
#### **5.1.5 Aspects techniques**



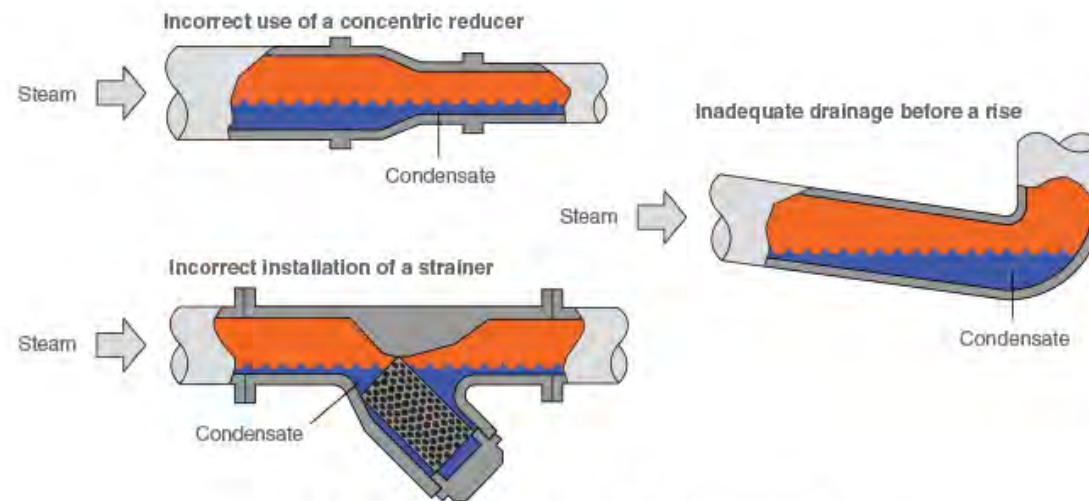
# Module 5.1.5: Le coup de bélier (1)

Les coups de bélier qui surviennent dans les circuits de vapeur ou de récupération de condensat sont généralement classés en deux catégories:

- causés par des masses de condensat heurtant les tuyaux, etc. à grande vitesse
- causés par la condensation subite de vapeur, ce qui produit de grosses vagues de condensat qui se heurtent les unes contre les autres



Formation d'une masse de condensat



Sources potentielles de coup de bélier (waterhammer)

Source: <https://www.spiraxsarco.com>

# Module 5.1.5: Le coup de bélier (2) – les dégâts

Les coups de bélier provoquent un changement brusque de pression pouvant atteindre plus de 100 bars.

Le choc créé peut faire violemment trembler les conduites, l'équipement et l'encaissement des machines, ce qui pourrait endommager non seulement les joints d'étanchéité, mais aussi les brides et les vannes elles-mêmes.



Exemple de conduites endommagées par des coups de bélier

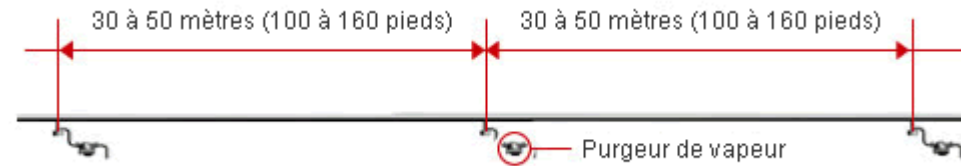


Copyright TLV Co., LTD.

Durée 21''

# Module 5.1.5: Positionnement des purgeurs (1)

Les conduites de transport de vapeur ont pour rôle de fournir de la vapeur de qualité aux procédés et appareils de la manière la plus fiable possible. Il est donc important d'évacuer le condensat rapidement et efficacement des tuyaux à l'aide de purgeurs de vapeur installés à des endroits d'évacuation de condensat bien choisis.



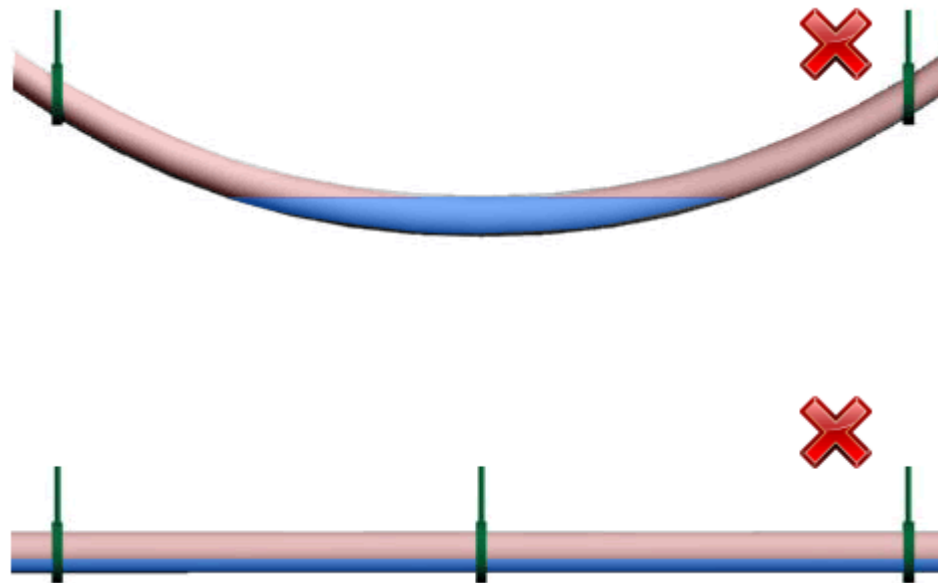
1. Un purgeur doit être installé au minimum à des intervalles ne dépassant pas 30 à 50 mètres.

# Module 5.1.5: Positionnement des purgeurs (2)

2. Un purgeur de vapeur devra être installé directement en **amont de détendeurs-régulateurs de pression et de vannes de régulation** afin d'empêcher l'accumulation de condensat lorsque la vanne est fermée.
3. Un purgeur de vapeur devra être installé directement en **amont de vannes manuelles fermées** un certain temps afin d'empêcher l'accumulation de condensat qui pourrait être transporté à grande vitesse à travers les tuyauteries lorsque la vanne est ouverte de nouveau.
4. Un purgeur devra être installé à **la base de sections de tuyauterie verticales** puisque le condensat a tendance à s'y accumuler à cause de la gravité et du changement de direction de la tuyauterie.

Si les supports ou points fixes sont disposés trop loin l'un de l'autre, la tuyauterie pourrait se déformer sous l'effet de son propre poids. Ce genre de problème peut occasionner une accumulation de condensat à certains endroits de la tuyauterie même si elle est inclinée. Il est donc important:

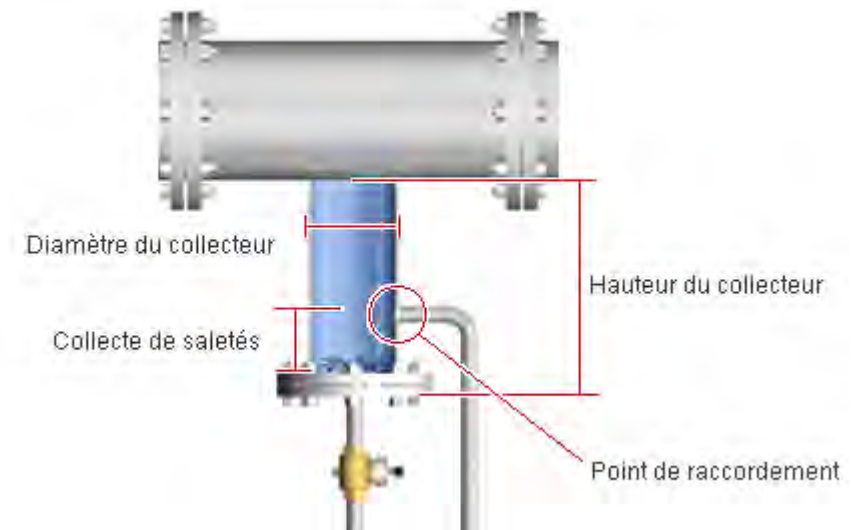
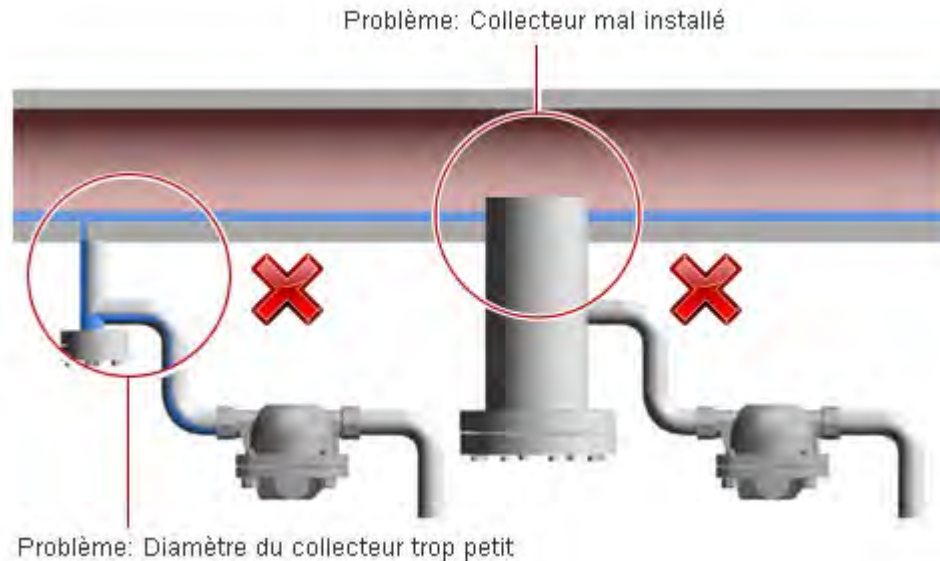
- d'installer les supports/points fixes à des **intervalles rapprochés**
- **d'incliner la tuyauterie** de manière à ce qu'elle forme un angle d'au moins un centième (1:100).





# Module 5.1.5: Dimensionnement des collecteurs de condensat

Souvent l'embouchure est trop petite pour collecter le condensat, empêchant sa bonne évacuation.



Les tuyauteries se remplissent d'air lorsque le système n'est pas en marche. Lorsque le système est remis en route, il est important de bien évacuer cet air qui s'accumule à la fin des conduites.

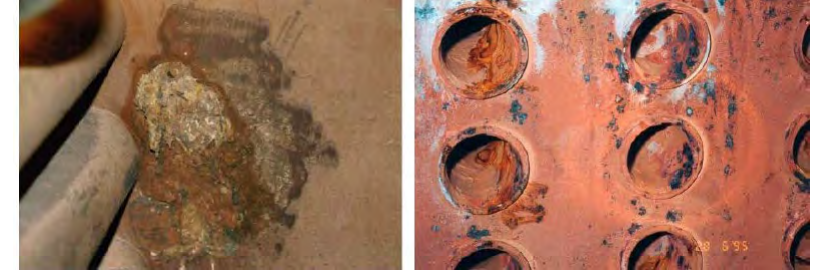
1. Il est important d'installer un évent d'air au bout des conduites de vapeur pour éviter que l'air reste pris à l'intérieur des conduites.
2. L'installation d'un collecteur de condensat à la fin d'une conduite vise à recueillir le condensat en un seul endroit et à empêcher son accumulation à l'intérieur de la conduite elle-même.

## Module 5.1.6

### **5.1 L'utilisation de la vapeur**

#### **5.1.6 La qualité de l'eau**

- Gaz dissous:  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2 \rightarrow$  corrosion



Corrosion oxygène

- Sels dissous: les principaux sont les bicarbonates, sulfates, chlorures et nitrates de calcium et magnésium (et silicium)  $\rightarrow$  former des tartres dans les chaudières.



Formation de tartre

- Solides en suspensions: particules organiques ou minérales en suspension (sable, roche, ...) pouvant former des boues. Peuvent être éliminées par filtration.

# Module 5.1.6: Tableau des principales impuretés

Nom	Symbole	Nom commun	Effets
Carbonate de Calcium	$\text{CaCO}_3$	Roche calcaire	Tartre mou
Bicarbonate de Calcium	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$		Tartre mou
Sulfate de calcium	$\text{CaSO}_4$	Gypse, plâtre de Paris	Tartre dur
Chlorure de calcium	$\text{CaCl}_2$		Corrosion
Carbonate de magnésium	$\text{MgCO}_3$	Magnésie	Tartre mou
Sulfate de magnésium	$\text{MgSO}_4$	Sel anhydre d'Epsom	Corrosion
Bicarbonate de magnésium	$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$		Tartre, corrosion
Chlorure de magnésium	$\text{MgCl}_2$	Sel de Nigari	Corrosion
Chlorure de sodium	$\text{NaCl}$	Sel de cuisine	Electrolyse
Carbonate de sodium	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	Cristaux de soude, soude calcinée	Alcalinité
Bicarbonate de sodium	$\text{NaHCO}_3$	Levure chimique	Mousse
Hydroxyde de sodium	$\text{NaOH}$	Soude caustique	Alcalinité, fragilisation
Sulfate de sodium	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	Sel sec	Alcalinité
Dioxyde de silicium	$\text{SiO}_2$	Silice	Tartre dur



Le TH (titre hydrotimétrique) appelé dureté de l'eau, représente la teneur en **calcium et magnésium** dans l'eau:

- Le TH est exprimé en °f (degré français).
- $1^\circ\text{f} = ([\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}])$  en  $10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$ 
  - = 4 mg/l de  $\text{Ca}^{2+}$  ou 2.4 mg/l de  $\text{Mg}^{2+}$
  - = 10 ppm de  $\text{CaCO}_3$

Tableau de correspondance  
entre les diverses unités étrangères et françaises

		Degré français	Degré anglais	Degré allemand	Degré américain	Milliéqui-valent
Degré français	°f	1	0,70	0,56	0,58	0,2
Degré anglais	°Clark	1,43	1	0,80	0,83	0,286
Degré allemand	°DH	1,79	1,25	1	1,04	0,358
Degré américain	ppm	1,72	1,2	0,96	1	0,34
Milliéqui-valent	mEq	5	3,5	2,8	2,9	1

Source: <https://www.monthey.ch/N1578/informations-sur-l-eau-potable.html>

Dureté de l'eau*				
TH	0 à 8 °f	8 à 15 °f	15 à 30 °f	+ de 30 °f
	Eau très douce	Eau douce	Eau moyennement dure	Eau très dure

\* Procédés de traitement des eaux à l'intérieur des bâtiments individuels ou collectifs.  
CSTB Éditions, collection Guide Pratique - juin 2011

Source: <https://uae.fr/le-traitement-de-leau-de-a-a-z/>

Le but du traitement de l'eau est de:

- Minimiser les corrosions dans la chaudière, les réseaux de vapeur et de condensats
- Eviter la formation de tartre dans la chaudière
- Minimiser la formation de mousse et l'entraînement d'eau afin de garantir une qualité de vapeur optimale.

Afin de ne pas dépasser une concentration en solide (**TDS**=total dissolved solids) donné par le fabricant de la chaudière → déconcentrer.

- Remplacer une partie de l'eau de la chaudière par de l'eau faiblement chargée ou adoucie.
- Une TDS trop élevée → détérioration de la chaudière ainsi que la formation de mousse (primage).

**TDS en partie par million (PPM)**



**ECHELLE DE GRADUATION DE LA QUALITEE DE L'EAU EN PPM**