

Investigations dans la grotte de Nichet. Calestienne.

Fromelennes pointe de Givet Document d'étude préalable



Fédération Française
de spéléologie

9 Février 2019

Version 1/1

Relevés Tp : Jean-Luc CARON (LUC) - Luc FRANCOIS (LUC)
Désob. : Éric BURDO (SCA) - Pascal PSAELENS (SCD) - Franck MACIEJAK (LUC) - Jean-Marie SOULIEZ (SCD)

Essai d'étude des répartitions des masses volumiques d'air dans la cavité de Nichet par résolution d'équations des gaz parfaits

La **masse volumique de l'air** ρ (*rho*) détermine la masse d'air qui est contenue dans un mètre cube. Elle se mesure en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3). À une altitude donnée, l'air subit une pression induite par la masse de la colonne d'air située au-dessus. La masse volumique de l'air est faible ($1,225\text{kg}/\text{m}^3$ au niveau de la mer à 15°C) comparée à celle de l'eau ($998\text{kg}/\text{m}^3$ à 20°C).

Masse volumique de l'air

La masse volumique de l'air est donnée par la formule des mélanges des gaz parfaits avec la constante spécifique d'un mélange de deux gaz en prenant en compte celle de l'air humide, la température virtuelle (1) et la teneur en eau (humidité spécifique) :

$$\rho = \frac{1 - 0,3783 H_r \rho_{sat}(t)}{\frac{R_s T}{\rho_{atm}}} \cdot \rho_{atm}$$

Avec : T en Kelvins = $t + 273,15 \text{ K}$ (2)

$$R_s = 287,058 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \text{ (3)}$$

$\rho_{sat}(t)$ = Pression de saturation de la vapeur en fonction de la température (4) donnée sur le tableau en annexe.

(1) La température virtuelle est la température qu'aurait de l'air sec qui posséderait la même masse volumique et la même pression que l'air humide. L'air atmosphérique est de l'air humide : il est composé d'air sec ainsi que de vapeur d'eau.

(2) Le zéro absolu est la température la plus basse qui puisse exister. Il correspond à la limite basse de l'échelle de température thermodynamique, soit l'état dans lequel l'enthalpie et l'entropie d'un gaz parfait atteint sa valeur minimale.

(3) constante spécifique de l'air sec qui est le produit du nombre d'Avogadro (N_A) et de la constante de Boltzmann (k_B). Ce produit vaut $8,314\,462\,1 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ avec une incertitude de $7,5 \times 10^{-6} \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$$R_s = \frac{R}{M_{air}} = \frac{8,3144621 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}{0,0289644 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}} = 287,058 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Constante spécifique de l'air dont l'humidité relative est H_r

$$1 - \frac{R_s}{R_v} = 1 - \frac{287,058 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}{461,7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} = 0,3783$$

(4) La pression de vapeur saturante est liée à la tendance des molécules à passer de l'état liquide (ou solide) à l'état gazeux : une substance possédant une pression de vapeur saturante élevée (vis-à-vis de la pression atmosphérique) à température ambiante est dite volatile. La pression de vapeur saturante d'une substance augmente de façon non-linéaire avec la température selon la relation de Clapeyron.

L'enthalpie est une quantité reliée à l'énergie d'un système thermodynamique. Elle comprend l'énergie interne du système, à laquelle est ajouté le produit de la pression par le volume.

L'entropie peut être la grandeur physique thermodynamique qui permet de mesurer la partie inutilisable de l'énergie contenue dans un système. Autrement dit, cette partie de l'énergie ne peut pas être utilisée pour produire un travail.

Nécessité du calcul de la masse volumique de l'air et transposition sur tableur :

Ci-après, la transposition de levés Hygrométriques et de températures sèches (sans variation de pression atmosphérique 1013hp) sur tableur pour calculer la masse volumique de l'air indique que sur une même isotherme, on peut trouver une masse volumique différente selon la variation de l'humidité relative.

Par exemple, les calculs sur tableur ci-dessus indiquent qu'une isotherme à 11°C (lignes 4 et 5) peut avoir des masses volumiques différentes par abaissement de leur humidité relative, à savoir :

- Ligne 4 - 22% d'humidité – Hr 1,2406 Kg/m³,
- Ligne 5 - 5% d'humidité – Hr 1,2416 Kg/m³.

A contrario, une température plus élevée passant de 10 à 11°C (lignes 3 et 4) peut avoir une masse volumique identique.

Ts (°C)	T (K)	Pat (Pa)	P sat(Pa)	Hr	ρ (Kg/m3)
10	283,15	101300	1228	0,99	$= (1 - 0,3783 * E9 * D9 / C9) * C9 / (287,058 * B9)$

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2	Ts (°C)	T (K)	Pat (Pa)	P sat(Pa)	Hr	ρ (Kg/m3)	
3	10	283,15	101300	1228	0,99	1,2406	
4	11	284,15	101300	1312	0,22	1,2406	
5	11	284,15	101300	1312	0,05	1,2416	

Les relevés de températures sèches et d'hygrométrie dans les différents niveaux de galeries devraient permettre dans un premier temps de calculer la répartition des masses d'air dans la cavité puis une approche sur les mouvements convectifs ou advectifs* et de stratification d'air dans la grotte de Nichet ainsi que sur l'influence des fluides calporteurs* ou réfrigérants* résultant des infiltrations d'eau participant au cycle thermodynamique .

***Convection** : déplacement d'une masse d'air dans le sens ascendant (galerie verticale)

Un fluide comme l'air a des propriétés de masse volumique qui évoluent en fonction de sa température et de son humidité. Lorsqu'un gradient de masse volumique s'installe, le fluide peut se mettre spontanément en mouvement à condition que la différence de masse volumique soit suffisante. Le seuil à partir duquel la convection se produit est déterminé par une valeur critique d'un nombre sans dimension appelé nombre de Rayleigh et noté Ra :

$$Ra = \frac{\text{poussée d'Archimède}}{\text{Dissipation}} = \frac{\rho g \alpha \Delta T d^3}{\kappa \eta}$$

dont :

- ρ : la masse volumique du fluide, en kilogrammes par mètre cube (kg/m³, kg·m⁻³),
- g : la force de gravité, en mètres par seconde au carré (m/s², m·s⁻²),
- α : le coefficient d'expansion thermique (inverse de kelvin, K⁻¹), La dilatation thermique est l'expansion à pression constante du volume d'un corps occasionné par son réchauffement, généralement imperceptible. Dans le cas d'un gaz, il y a dilatation à pression constante ou maintien du volume et augmentation de la pression lorsque la température augmente,
- ΔT : la différence de température entre le haut et le bas de la couche, en kelvin (K),
- κ : la diffusivité thermique, en mètres carrés par seconde (m²/s, m²·s⁻¹) Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur (conductivité thermique) et de sa capacité à accumuler la chaleur (capacité thermique),
- η : la viscosité dynamique du fluide, en pascals secondes (Pa·s) pouvant se définir comme la résistance à l'écoulement d'une matière.
- d : l'épaisseur de la couche, en mètres (m).

***Advection** : déplacement d'une masse d'air transverse à la **Convection** (galeries obliques ou horizontales).

*Un **fluide caloporteur** est un fluide apportant de la chaleur dans le milieu souterrain

*Un **fluide réfrigérant** est un fluide abaissant la température du milieu souterrain.

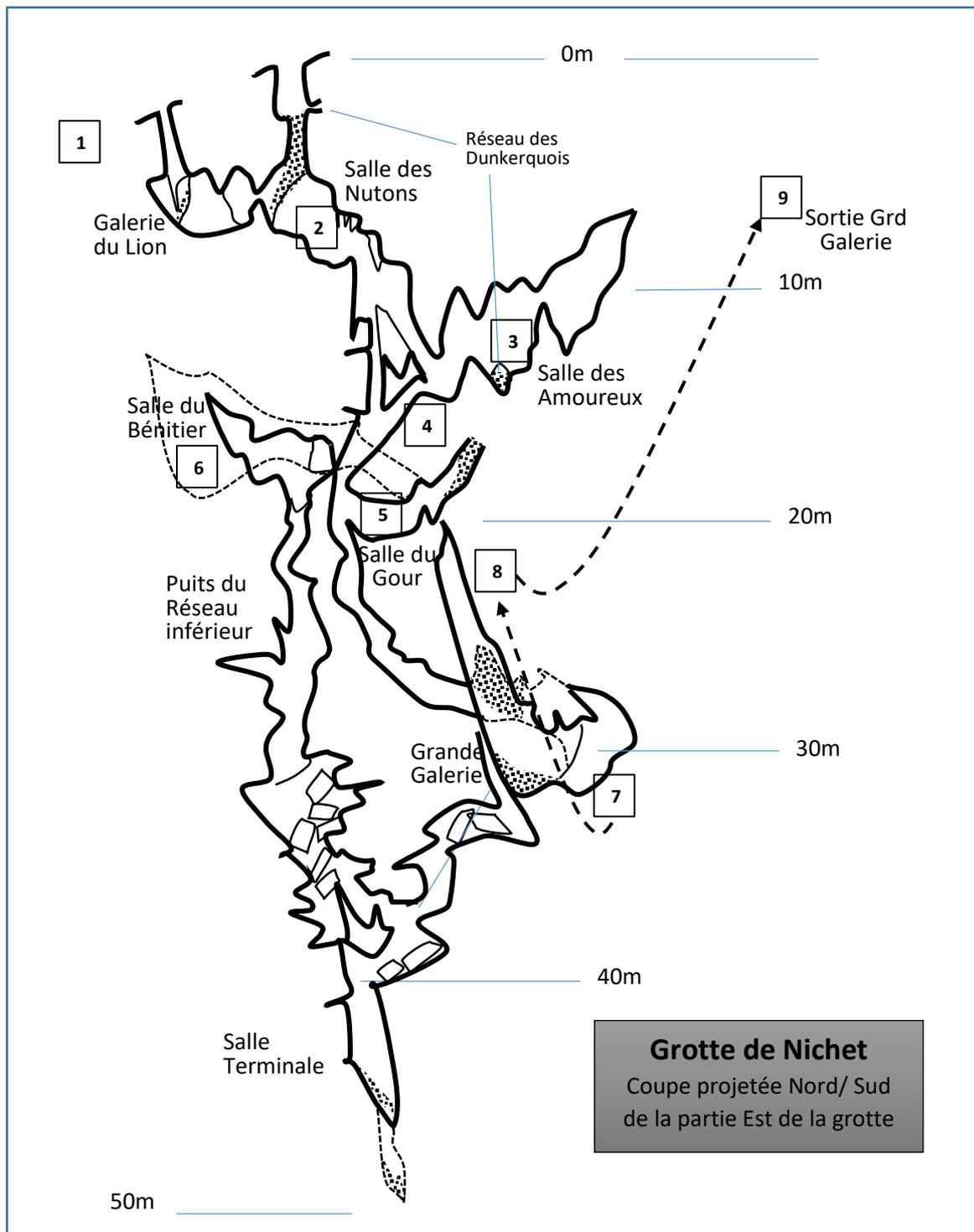
Ces fluides permettent la mise en œuvre d'un cycle thermodynamique faisant varier le taux d'humidité relative de l'air. C'est ainsi que varie la masse volumique du milieu ambiant du milieu confiné à la fois en modifiant la température et l'humidité.

Relevé de température et d'hygrométrie dans la cavité

Les relevés par temps pluvieux et à température externe basse produisant des apports par infiltration d'eau faisant effet de fluide réfrigérant refroidissant la cavité sont les suivants :

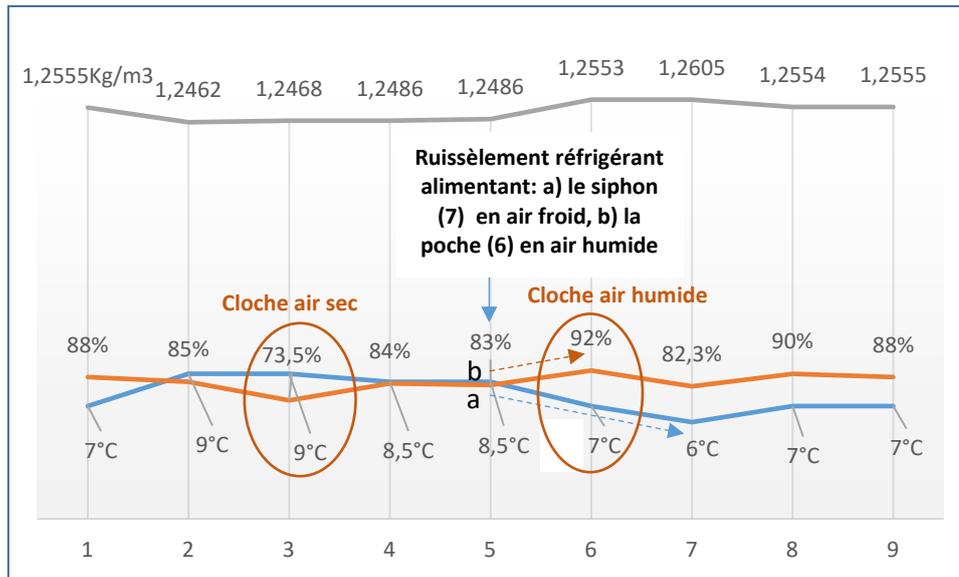
Ts (°C)	T (K)	Pat (Pa)	P sat(Pa)	Hr	ρ (Kg/m3)	station
7	280,15	101300	1002	0,88	1,2555	1)externe
9	282,15	101300	1148,1	0,85	1,2462	2)salle Nutons
9	282,15	101300	1148,1	0,735	1,2468	3)salle Amoureux
8,5	281,65	101300	1109,9	0,84	1,2486	4)intermédiaire
8,5	281,65	101300	1109,9	0,83	1,2486	5)salle des gour
7	280,15	101300	1002	0,92	1,2553	6) salle benitier
6	279,15	101300	935,3	0,823	1,2605	7)Grd galerie bas
7	280,15	101300	1002	0,9	1,2554	8)Grd galerieintermédiaire
7	280,15	101300	1002	0,88	1,2555	9)Grd galerie haut

Position des stations sur la coupe de la cavité



Répartition des masses volumiques de l'air dans les galeries de la grotte

En se référant au graphe ci-dessous, on remarque en premier lieu qu'à la station 7 (au bas de la grande galerie) la masse volumique de l'air est la plus élevée soit $1,2605\text{Kg/m}^3$, inversement la température sèche et basse soit 6°C ; ce qui correspond à siphon froid situé au point le plus bas.



Concernant les stations 2 à 5, la masse volumique fluctue peu, la fouchette est comprise entre $1,2462$ et $1,2486\text{Kg/m}^3$ avec des températures comprises entre $8,5^\circ$ et 9°C mais avec une hygrométrie faible à la station 3 (Salle des Amoureux) $73,5\%$. La zone correspond plutôt à un régime d'advection à plusieurs niveaux et de brassages avec des cloches hautes d'air aux stations 6 et 3. Les infiltrations d'eau froide (1°C) au niveau de la station de la salle des Gours (5) doivent jouer un rôle de fluide réfrigérant. La station 6 correspond à une cloche où l'air humide (92%) s'accumule.

Pour les stations 8 et 9, le régime de strate est bien établi avec :

- une strate de masse volumique importante au niveau du siphon froid,
- une strate haute en équilibre avec la masse extérieure,
- une strate intermédiaire de température identique à l'extérieure mais plus humide qui s'accumule en voûte de la grande galerie.

A noter qu'en d'autres périodes, un courant d'air circule au niveau du siphon froid ce qui doit provoquer un régime de convection dans la grande galerie.

Conclusion

la cavité a un profil en forme de « V » et le point bas (7) forme un siphon d'air froid en période de pluies froide (1°C), de température extérieure à 7°C et d'humidité relative à 88% . La station 5 est marquée par des ruissèlements importants (fluide réfrigérant 1°C en hiver) et doit alimenter d'une part, le siphon en air froid par un échange à contre courant et d'autre part, la cloche de station 5 en humidité convective. La branche des stations 4,3,2 est constituée de salles et d'un dédale cahotique. Cette branche est propice à une forte résistance convective bien que l'échange thermique soit favorisé par le fluide de ruissèlement en station 5 et que la surface d'échange matérialisée par les parois soit plus importante. Finalement, il semblerait que le dédale de galeries favorise le brassage d'air ambiant par convections et advections croisées lentes ce qui maintient sa masse volumique dans une fouchette plus réduite.

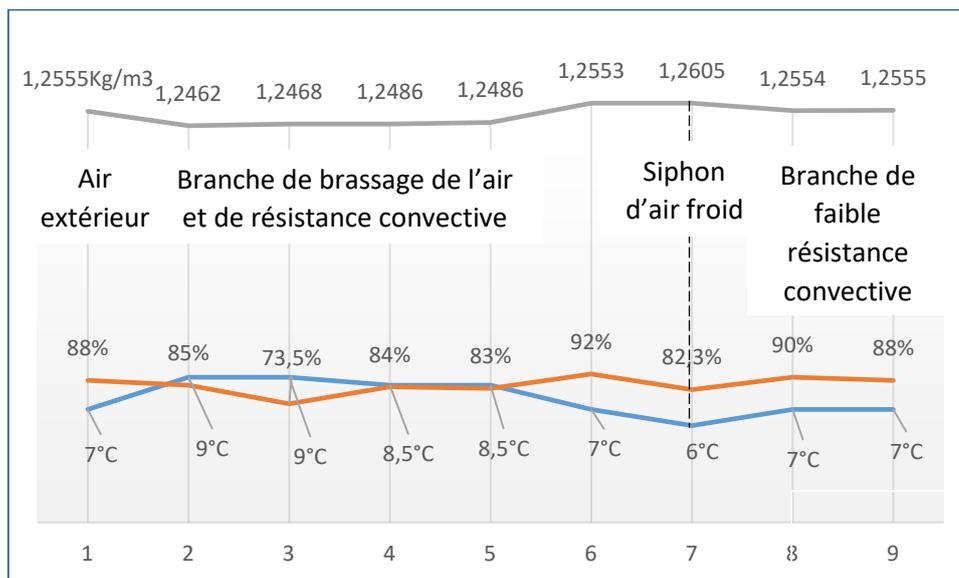
A noter que la résistance de convection thermique est donnée par : $R_{cv} = \frac{1}{hS}$ (en kelvin par watt)

Dont:

- h est le coefficient de convection thermique ou coefficient d'échanges superficiels en watts par mètre carré-kelvin ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$),
- S est la surface de convection en mètre carré (m^2),
- R_{cv} est la résistance thermique de convection en kelvin par watt (K/W) transports de chaleur et le cas échéant des transferts d'humidité.

La branche de la grande galerie est en contact plus direct avec l'extérieur et en d'autres périodes un courant d'air souffle au bas de la grande Galerie. L'air de cette branche doit passer à des phases extrêmes de stratification et de convection lorsque que l'air du siphon, en période estivale, est réchauffé par les infiltrations du fluide devenant caloporteur. L'air ambiant entre les stations 5 à 6 se réchauffe progressivement l'air froid du siphon jusqu'à établir un courant d'air en direction de la grande galerie dont le profil offre moins de résistance thermique de convection.

D'autres mesures restent à établir avec des conditions extérieures différentes pour vérifier les hypothèses et pour essayer de mieux comprendre les déplacements des masses d'air dans la cavité en fonction des fluides d'infiltration caloporteurs ou réfrigérants en différentes saisons. Nous essaierons également de nous équiper d'un baromètre pour prendre en compte la variable pression atmosphérique. Surtout, si le courant d'air souffle en station 7 ; nous pourrions éventuellement y vérifier l'effet déprimogène (théorème de Bernoulli et Venturi) produit par le courant d'air. Les concentrations de dioxyde de carbone, s'il est présent dans la cavité, serait également à prendre en compte.



Arletty se pose-t-elle aussi des questions sur la pression atmosphérique ? (réponse dans notre prochain numéro de nos aventures dans la grotte de Nichet)



Bibliographie

B. LISMONDE - 2002 - Climatologie du monde souterrain. Tome 2 Aérologie des systèmes karstiques

Annexes

Pression de saturation de la vapeur d'eau en fonction de la température

Température en degrés Celsius t	Pression de saturation de la vapeur d'eau en hPa $p_{sat}(t)$	Température en degrés Celsius t	Pression de saturation de la vapeur d'eau en hPa $p_{sat}(t)$
-60	0.001	24	29.83
-40	0.13	25	31.67
-20	1.03	26	33.6
-18	1.5	27	35.64
-15	1.9	28	37.8
-12	2.4	29	40.05
-10	2.6	30	42.43
-9	3	31	44.92
-7	3.7	32	47.55
-4	4.6	33	50.3
-1	5.6	34	53.19
0	6.11	35	56.23
2	7.06	36	59.41
4	8.13	37	62.75
6	9.35	38	66.25
8	10.73	39	69.92
10	12.28	40	73.75
11	13.12	41	77.78
12	14.02	42	81.99
13	14.97	43	86.39
14	15.98	44	91.01
15	17.05	45	95.83
16	18.18	46	100.86
17	19.37	47	106.12
18	20.63	48	111.60
19	21.97	49	117.35
20	23.38	50	123.34
21	24.87		
22	26.43		
23	28.09		

II. PRESSION DE SATURATION (EAU) EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

Température [°C]	Pr. de vapeur saturante [Pa]	Température [°C]	Pr. de vapeur saturante [Pa]	Température [°C]	Pr. de vapeur saturante [Pa]	Température [°C]	Pr. de vapeur saturante [Pa]
-29	42,17	-9	283,93	11	1312,7	31	4495,9
-28	46,73	-8	309,98	12	1402,6	32	4758,5
-27	51,74	-7	338,19	13	1497,8	33	5034,3
-26	57,25	-6	368,74	14	1598,75	34	5323,9
-25	63,29	-5	401,76	15	1705,5	35	5627,8
-24	69,91	-4	437,47	16	1818,4	36	5946,6
-23	77,16	-3	476,06	17	1938,0	37	6281,0
-22	85,10	-2	517,72	18	2064,3	38	6631,5
-21	93,78	-1	562,67	19	2197,8	39	6998,7
-20	103,26	0	611,15	20	2338,8	40	7383,5
-19	113,62	1	657,1	21	2487,7	41	7786,3
-18	124,92	2	706,0	22	2644,8	42	8208,0
-17	137,25	3	758,0	23	2810,4	43	8649,2
-16	150,68	4	813,5	24	2985,1	44	9110,7
-15	165,30	5	872,5	25	3169,2	45	9593,2
-14	181,22	6	935,3	26	3363,1	46	10097,6
-13	198,52	7	1002,0	27	3567,3	47	10624,6
-12	217,32	8	1072,8	28	3782,2	48	11175,1
-11	237,74	9	1148,1	29	4008,3	49	11750,0
-10	259,90	10	1228,0	30	4246,0	50	12349,9

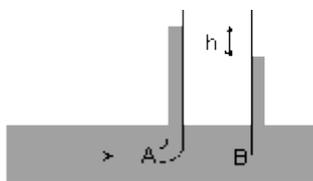
MASSE VOLUMIQUE en kg/m³ d'air humide : C'est la masse d'un m³ d'air humide La pression du mélange (air sec + vapeur d'eau) est égale à la somme des pressions qu'aurait chacun des constituants s'il était seul à occuper le volume de l'ensemble. Donc dans un m³ d'air humide, on retrouve la somme des masses de constituants, c'est la somme des masse volumiques de l'air sec et de la vapeur d'eau, aux pressions partielles et températures désignées.

Masse volumique de l'air sous 1013 mbar

- Ts = Température sèche en °C
- Hr = Humidité relative

Ts	100% Hr	90% Hr	80% Hr	70% Hr	60% Hr	50% Hr	40% Hr	30% Hr	20% Hr	10% Hr	1% Hr
-10 °C	1,340	1,340	1,340	1,340	1,341	1,341	1,341	1,341	1,341	1,341	1,341
-9 °C	1,335	1,335	1,335	1,335	1,335	1,336	1,336	1,336	1,336	1,336	1,336
-8 °C	1,330	1,330	1,330	1,330	1,330	1,330	1,331	1,331	1,331	1,331	1,331
-7 °C	1,324	1,325	1,325	1,325	1,325	1,325	1,326	1,326	1,326	1,326	1,326
-6 °C	1,319	1,320	1,320	1,320	1,320	1,320	1,321	1,321	1,321	1,321	1,321
-5 °C	1,314	1,314	1,315	1,315	1,315	1,315	1,316	1,316	1,316	1,316	1,316
-4 °C	1,309	1,309	1,310	1,310	1,310	1,310	1,311	1,311	1,311	1,311	1,311
-3 °C	1,304	1,304	1,305	1,305	1,305	1,305	1,306	1,306	1,306	1,306	1,307
-2 °C	1,299	1,299	1,300	1,300	1,300	1,301	1,301	1,301	1,301	1,302	1,302
-1 °C	1,294	1,295	1,295	1,295	1,295	1,296	1,296	1,296	1,296	1,297	1,297
0 °C	1,289	1,290	1,290	1,290	1,290	1,291	1,291	1,291	1,292	1,292	1,292
1 °C	1,284	1,285	1,285	1,285	1,286	1,286	1,286	1,287	1,287	1,287	1,288
2 °C	1,279	1,280	1,280	1,281	1,281	1,281	1,282	1,282	1,282	1,283	1,283
3 °C	1,275	1,275	1,275	1,276	1,276	1,276	1,277	1,277	1,277	1,278	1,278
4 °C	1,270	1,270	1,271	1,271	1,271	1,272	1,272	1,272	1,273	1,273	1,274
5 °C	1,265	1,265	1,266	1,266	1,267	1,267	1,267	1,268	1,268	1,269	1,269
6 °C	1,260	1,261	1,261	1,261	1,262	1,262	1,263	1,263	1,264	1,264	1,264
7 °C	1,255	1,256	1,256	1,257	1,257	1,258	1,258	1,259	1,259	1,260	1,260
8 °C	1,250	1,251	1,251	1,252	1,252	1,253	1,253	1,254	1,254	1,255	1,255
9 °C	1,246	1,246	1,247	1,247	1,248	1,248	1,249	1,249	1,250	1,251	1,251
10 °C	1,241	1,241	1,242	1,243	1,243	1,244	1,244	1,245	1,245	1,246	1,247
11 °C	1,236	1,237	1,237	1,238	1,239	1,239	1,240	1,240	1,241	1,242	1,242
12 °C	1,231	1,232	1,233	1,233	1,234	1,235	1,235	1,236	1,237	1,237	1,238
13 °C	1,227	1,227	1,228	1,229	1,229	1,230	1,231	1,231	1,232	1,233	1,234
14 °C	1,222	1,223	1,223	1,224	1,225	1,226	1,226	1,227	1,228	1,229	1,229

Les équations de BERNOUILLI et de VENTURI doivent apporter des éléments sur la formation d'un courant d'air par une diminution de section de la galerie produisant l'augmentation de vitesse (courant d'air) et la dépression (galerie déprimogènes)



Tube de pitot

On considère un liquide en écoulement permanent dans une galerie et deux tubes plongeant dans le liquide, l'un débouchant en A ; face au courant, et l'autre en B, le long des lignes de courant, les deux extrémités étant à la même hauteur. Au point B, le liquide a la même vitesse v que dans la canalisation et la pression est la même que celle du liquide $p_B = p$.

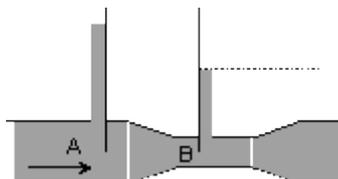
En A, point d'arrêt, la vitesse est nulle et la pression est p_A .

D'après le théorème de Bernoulli,

$$p_B + \frac{1}{2} \rho v^2 = p_A \quad \frac{1}{2} \rho v^2 = \rho g h$$

En mesurant la dénivellation h du liquide dans les deux tubes, on peut en déduire la vitesse v d'écoulement du fluide.

Phénomène de Venturi



Un conduit de section principale S_A subit un étranglement en B où sa section est S_B . La vitesse d'un fluide augmente dans l'étranglement, donc sa pression y diminue : $v_B > v_A$; $p_B < p_A$

Le théorème de Bernoulli s'écrit ici :

$$p_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 = p_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2 = p_C + \frac{1}{2} \rho v_C^2$$

D'après l'équation de continuité, $v_B S_B = v_A S_A = q_v$ et $v_B > v_A$ donc $p_A > p_B$

$$p_A - p_B = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{1}{S_B^2} - \frac{1}{S_A^2} \right) q^2 = k q^2$$

La différence de pression aux bornes aux extrémités du tube de Venturi est proportionnelle au carré du débit ; application à la mesure des débits (organes déprimogènes).