

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



[www.cea.fr](http://www.cea.fr)

# SAFETY IN CRYOGENICS RESERVOIR IN ACCIDENTAL SITUATION

E.ERCOLANI, JM.PONCET, A.GAUTHIER, R.VALLCORBA

Presented by E.ERCOLANI



3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> October 2019  
Minatec Grenoble

- Brief introduction about tanks in accidental situation
  
- Theoretical works of the CEA/DSBT in this field:
  - Article TI « Safety in cryogenics »
  - Main differences between the TI article and the standard ISO 21013-3
  - Sizing software designed by DSBT
  - European Standard CEN-TC268 WG6  
**Helium cryostats — Protection against excessive pressure**
  
- Experimental work of the DSBT:
  - Quantification of the heat flux in supercritical helium during a brutal loss of vacuum

## Expected phenomenon:

**Pressure rise and explosion of the tank or enclosure (see both!). 1 litre of cryogenic fluid  $\sim$  800 litres at normal P and T gas**

### Impact :

**Physical and material damage !**



Expansion work, provided during the explosion of a tank of 10L from 17 bar to 1 bar = **5,2 g of TNT**

At 2 metres overpressure of 0,15 bar, destruction of the eardrums, windows, doors.....

**ABSOLUT NECESSITY TO EQUIP THE FACILITIES AGAINST OVERPRESSURE AND TO SIZE CORRECTLY THE SAFETY DEVICES**

# Article TI « Safety in cryogenics BE 9814 » edited in April 2015

**17 pages, 3 chapters, written by CEA/Inac/Irfu and edited by « Les Techniques de l'Ingénieur T.I »**  
<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/securite-par-secteur-d-activite-et-par-technologie-42159210/securite-en-cryogenie-be9814>

## Structure of the article:

### 1. Conventional safety in cryogenics and operation

### 2. Accidental heat inputs

#### 2.1 Objective

#### 2.2 Systems to be protected

#### 2.3 Accident situations and heat inputs

### 3. Method for sizing the safety device

A useful guide for the implementation of cryogenic safety in operation phase and in any situation causing accidental overpressure  
**English version available**

**Sécurité en cryogénie**

par **Eric ERCOLANI**  
 Ingénieur-chef du Service de calcul et conception cryogéniques  
 Service des basses températures, Institut nanosciences et cryogénie, CEA Grenoble

**Philippe GULLY**  
 Ingénieur-chef  
 Service des basses températures, Institut nanosciences et cryogénie, CEA Grenoble

**Jean-Marc PONCET**  
 Ingénieur, adjoint au chef du Service des basses températures  
 Service des basses températures, Institut nanosciences et cryogénie, CEA Grenoble

**Chantal MEURIS**  
 Ingénieur-chef  
 Ingénierie et gestion des risques, de cryogénie et de magnétisme, Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers, CEA Saclay

et **Laurent MIQUET**  
 Ingénieur sécurité  
 Institut nanosciences et cryogénie, CEA Grenoble

1.	<b>Sécurité conventionnelle en cryogénie et en exploitation</b>	BE 9 814 - 3
1.1	Stockage, manipulation, manutention	— 3
1.2	Explosion	— 3
1.3	Brûlures	— 4
1.4	Autre	— 4
<b>2. Entrées de chaleur accidentelles</b>		— 5
2.1	Incendie	— 5
2.2	Systèmes à protéger	— 5
2.3	Situations accidentelles et entrées de chaleur	— 5
<b>3. Méthode de dimensionnement de l'organe de sécurité</b>		— 9
3.1	Présentation	— 9
3.2	Définitions	— 10
3.3	Débit de décharge de l'organe protégeant un réservoir ou un circuit	— 11
3.4	Calcul de la pression dans l'organigramme pour une pression à vide	— 14
3.5	Enthalpie massique et pression en amont de l'organe de sécurité	— 14
3.6	Pression en aval de l'organe de sécurité	— 15
3.7	Section minimale de passage de l'organe de sécurité	— 15
3.8	Recommendations	— 16
<b>4. Conclusion</b>		— 17
Pour en savoir plus		Doc. BE 9 814

Périodique : avril 2015 - Ce document a été délivré pour le compte du 720003354 - sous codice : 132 106 11727

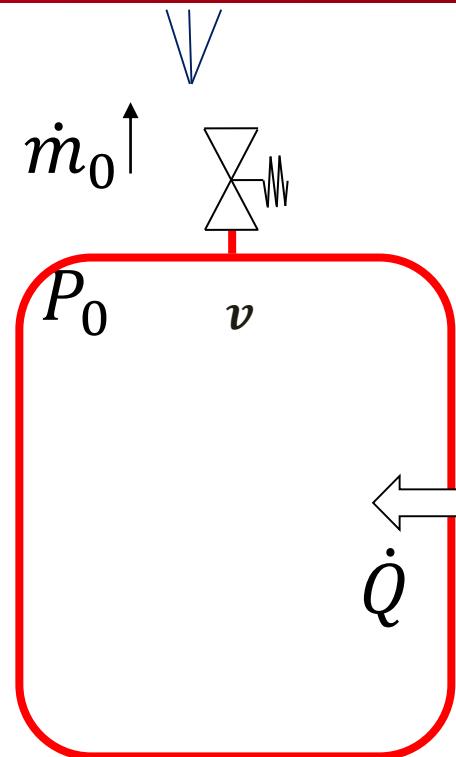
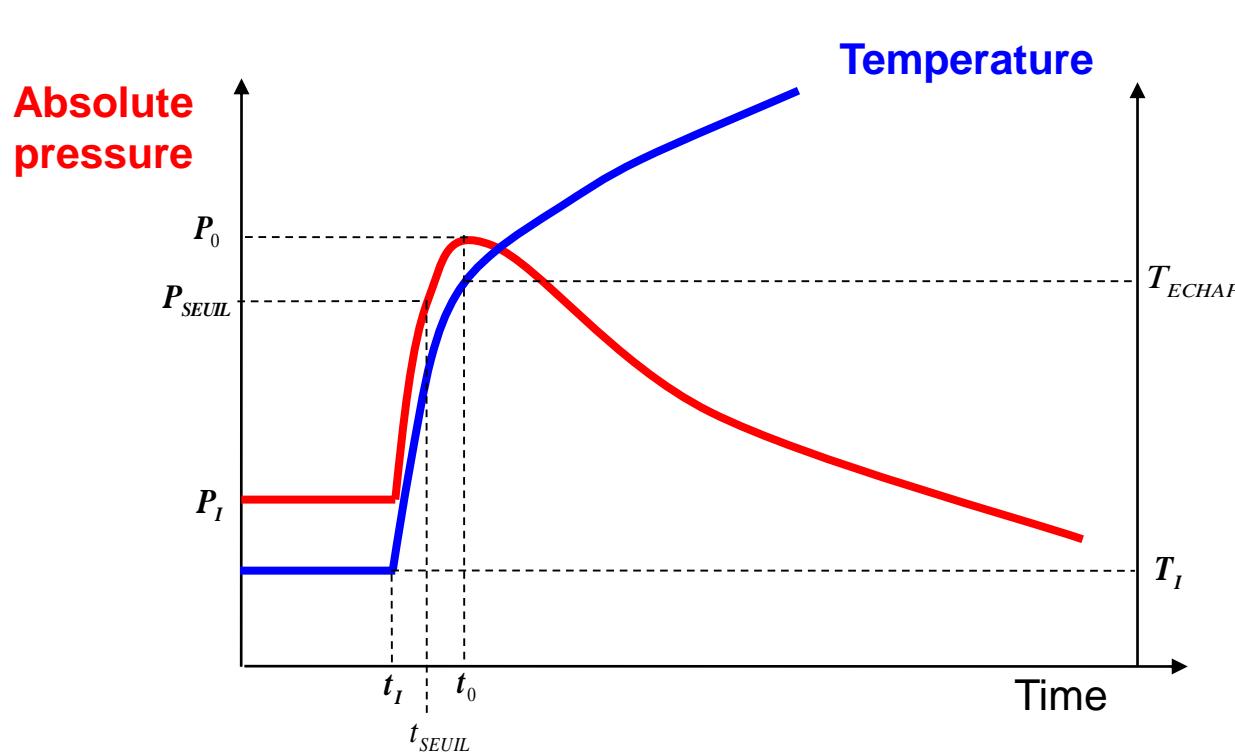
BE 9 814 - 4 - 2015

Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

BE 9 814 - 1

*Les dangers de la cryogénie sont principalement liés à la présence de fluides à l'état liquide et à basse température dans des réservoirs ou des tuyauteries. Ces systèmes contiennent une quantité de fluide qui, réchauffée à température ambiante, occupe un volume très supérieur. À titre d'exemple un seul litre d'hélium liquide occupe environ 780 L à 300 K et pression atmosphérique. Ces dangers, tels que l'anoxie, l'explosion et les brûlures, existent en exploitation dans différentes situations (stockage et manipulation de fluides cryogéniques). Les situations accidentelles qui conduisent à des entrées de chaleur accidentelles provoquent une montée de pression souvent très rapide des appareils constituant le système. Les systèmes doivent être équipés d'un organe de sécurité (soufflage, clapet ou disque de rupture) afin de limiter la surpression. En l'absence d'organes de sécurité, l'appareil sous pression peut*

# The fundamental parameters to determine the cross section A of the safety device



First thermodynamic law for an open system:

$$d(m_0 u) - h dm_0 = \dot{Q} dt$$

$$\dot{m}_0 = \frac{\dot{Q}}{v \left( \frac{\partial h}{\partial v} \right)_{P_0}}$$

$$\dot{Q}$$

- Loss of insulating vacuum
- Leak of cryogenic fluid
- Quench
- Power failure .....

$$A = f(P_0, \dot{m}_0(\dot{Q}))$$

Thermodynamic quality:

$$x = \frac{v - v_{lsat0}}{v_{vsat0} - v_{lsat0}}$$

Enthalpy of mixture

$$h = x \cdot h_{vsat0} + (1 - x) \cdot h_{lsat0}$$

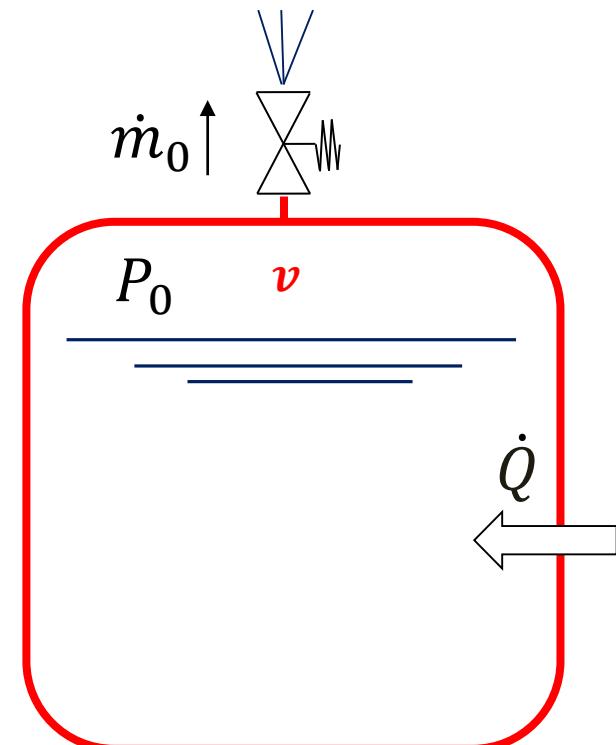
$$v \left( \frac{\partial h}{\partial v} \right)_{P_0} = v \cdot \left( \frac{L_{P_0}}{v_{vsat0} - v_{lsat0}} \right)$$

$L_{P_0} = h_{vsat0} - h_{lsat0}$ : Latent heat at  $P_0$

$v_{lsat0}$       } Specific volume of liquid and vapour at  
 $v_{vsat0}$       } saturation pressure  $P_0$

Mass flow rate:

$$\dot{m}_0 = \frac{\dot{Q}}{v \left( \frac{\partial h}{\partial v} \right)_{P_0}}$$

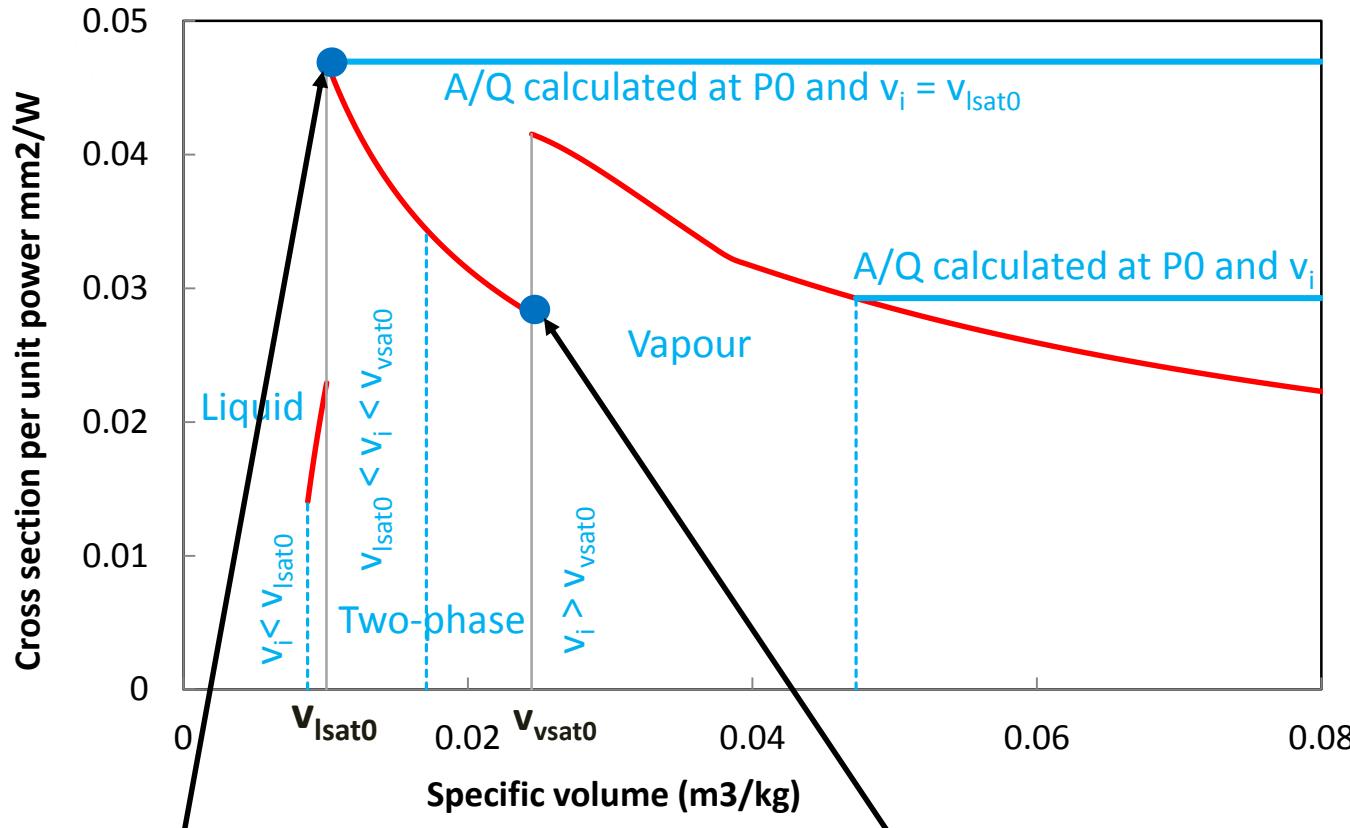


Choose of  $v$  ?

# Discharge of LHe tank at subcritical pressure

( $P_0 = 2 \text{ bars} < P_C$ )

A sufficient cross section of the safety device to ensure the limitation of pressure at  $P_0$  during the entire transient discharge



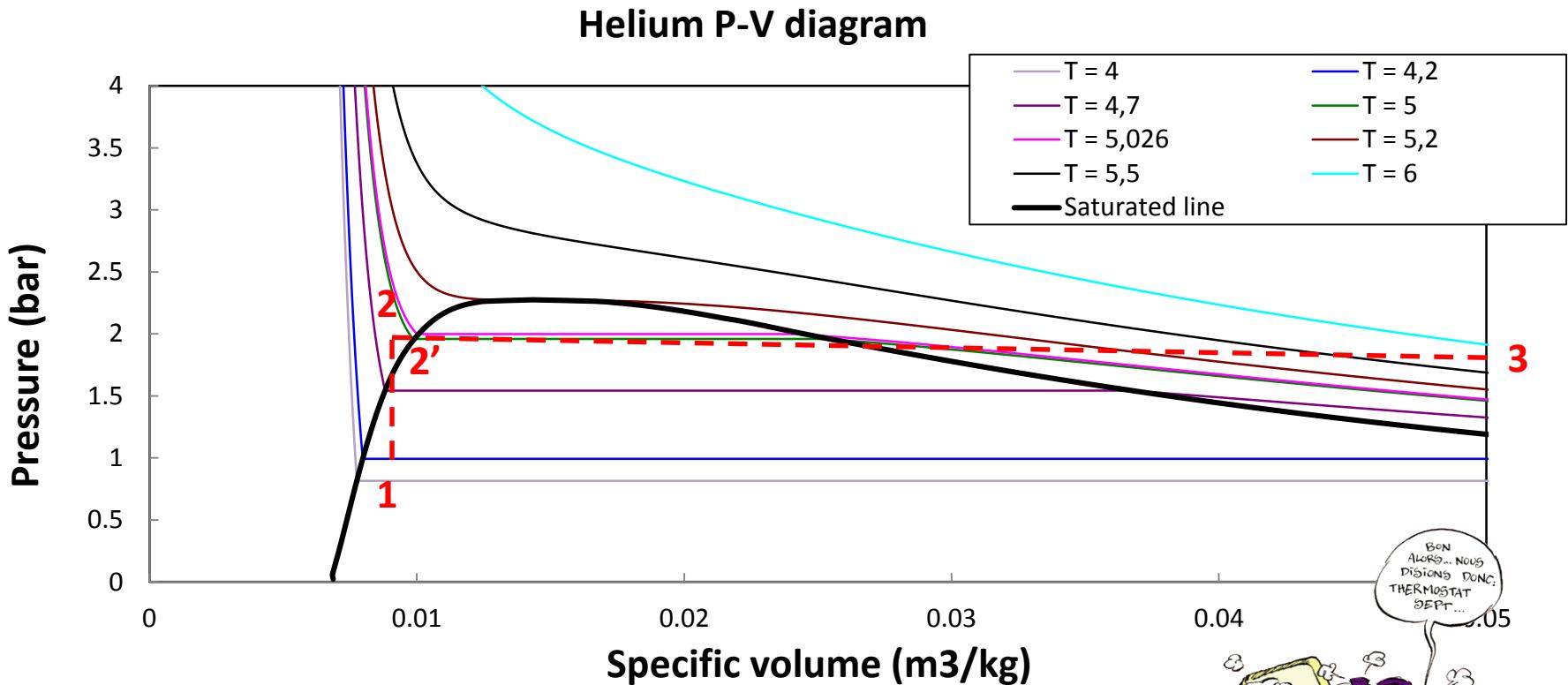
Proposition CEA-DSBT Article TI

$$\dot{m}_0 = \frac{\dot{Q}}{v_{lsat0}} \left( \frac{v_{vsat0} - v_{lsat0}}{h_{lv0}} \right)$$

Standard ISO 21013-3

$$\dot{m}_0 = \frac{\dot{Q}}{v_{vsat0}} \left( \frac{v_{vsat0} - v_{lsat0}}{h_{lv0}} \right)$$

# Discharge of LHe tank at subcritical pressure ( $P_0 = 2 \text{ bars} < P_C$ )



1: tank filled to 90% at atmospheric pressure

Accidental situation:

1-2: isochoric transformation until the discharge pressure  $P_0$  at 2 bar

2: tank with subcooled liquid

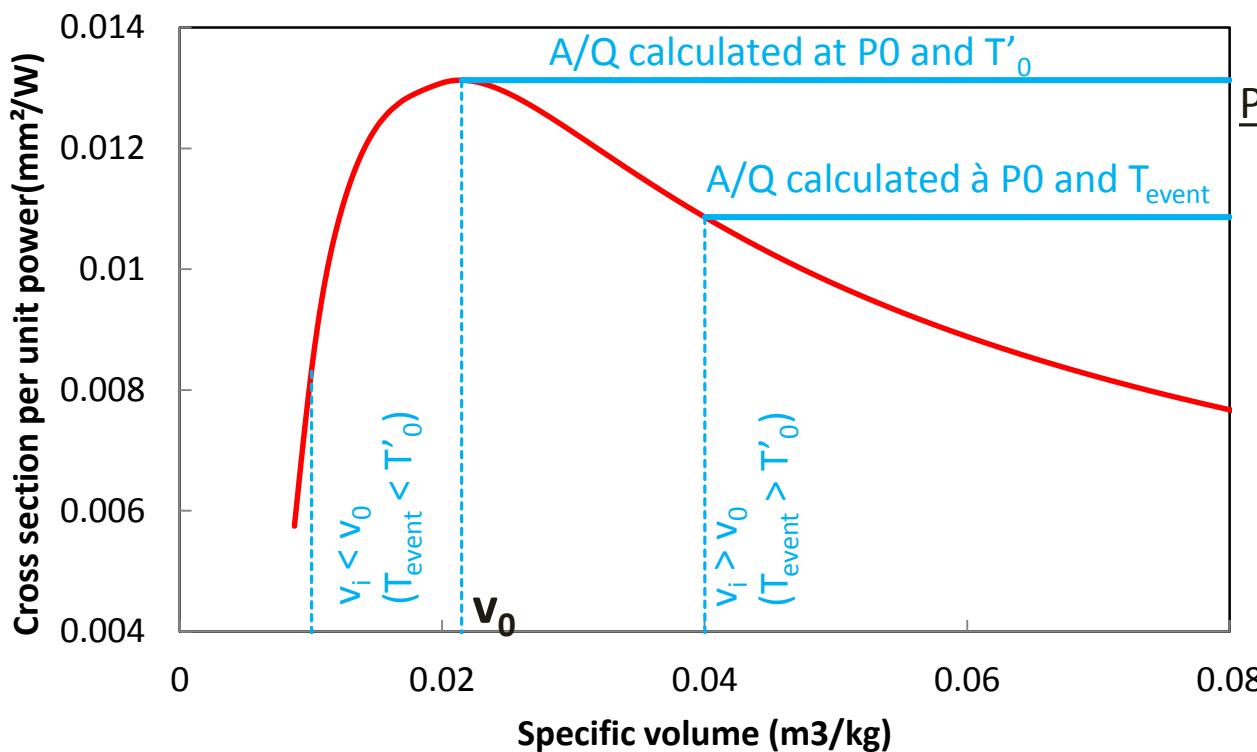
2': tank with liquid at saturation

2'-3: discharge at isobaric pressure  $P_0$  (subcooled liquid, two phase fluid, vapour)

Standard ISO 21013-3

$h' = v \left( \frac{\partial h}{\partial v} \right)_{P_0, T'_0}$  Cross section is maximum when the function  $\frac{\sqrt{v}}{v \left( \frac{\partial h}{\partial v} \right)_{P_0}}$  is maximum

This corresponds for a particular temperature  $T'_0$  and a specific volume  $v_0$



Proposition CEA DSBT Article TI

$$T_{event} = T(v_i, P_0)$$

$v_i$ , initial specific volume

$$T = \max(T_{echap}, T'_0)$$

$$\text{or } v = \max(v_i, v_0)$$

Calculation of the minimum cross section A of the safety relief device:

$$A = \frac{\dot{m}}{G_{throat} \times K_d}$$

$\dot{m}$  Mass flow rate to discharge in kg/s

$G_{throat}$  Maximum mass flux in kg/m<sup>2</sup>.s

$$G_{throat} = \rho_{throat} \times \sqrt{2 \times (h_1 - h_{throat})}$$

Discharge coefficient, depends on the geometry  
 $K_d$  of the safety relief device and thermodynamic  
state of the fluid at upstream

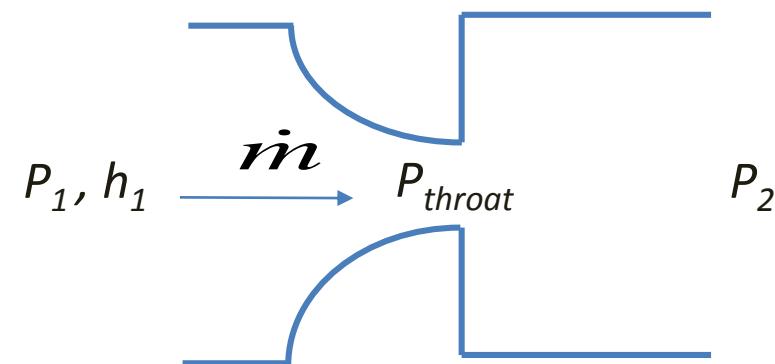
## ISENTROPIC EXPANSION OF FLOW IN SAFETY DEVICE CONSIDERED AS SHORT NOZZLE

$G_{throat}$  Maximum mass flux in kg/m<sup>2</sup>.s

$h_1$  Mass enthalpy upstream of the safety device J/kg

$P_{throat} > P_2$  sonic flow  $V_{throat} = V_{sound}$

$P_{throat} = P_2$  sub-sonic flow  $V_{throat} < V_{sound}$

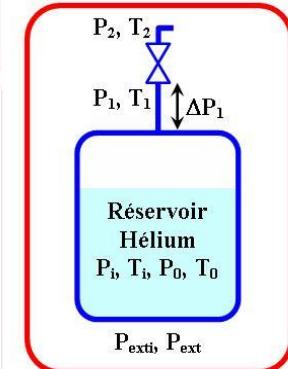
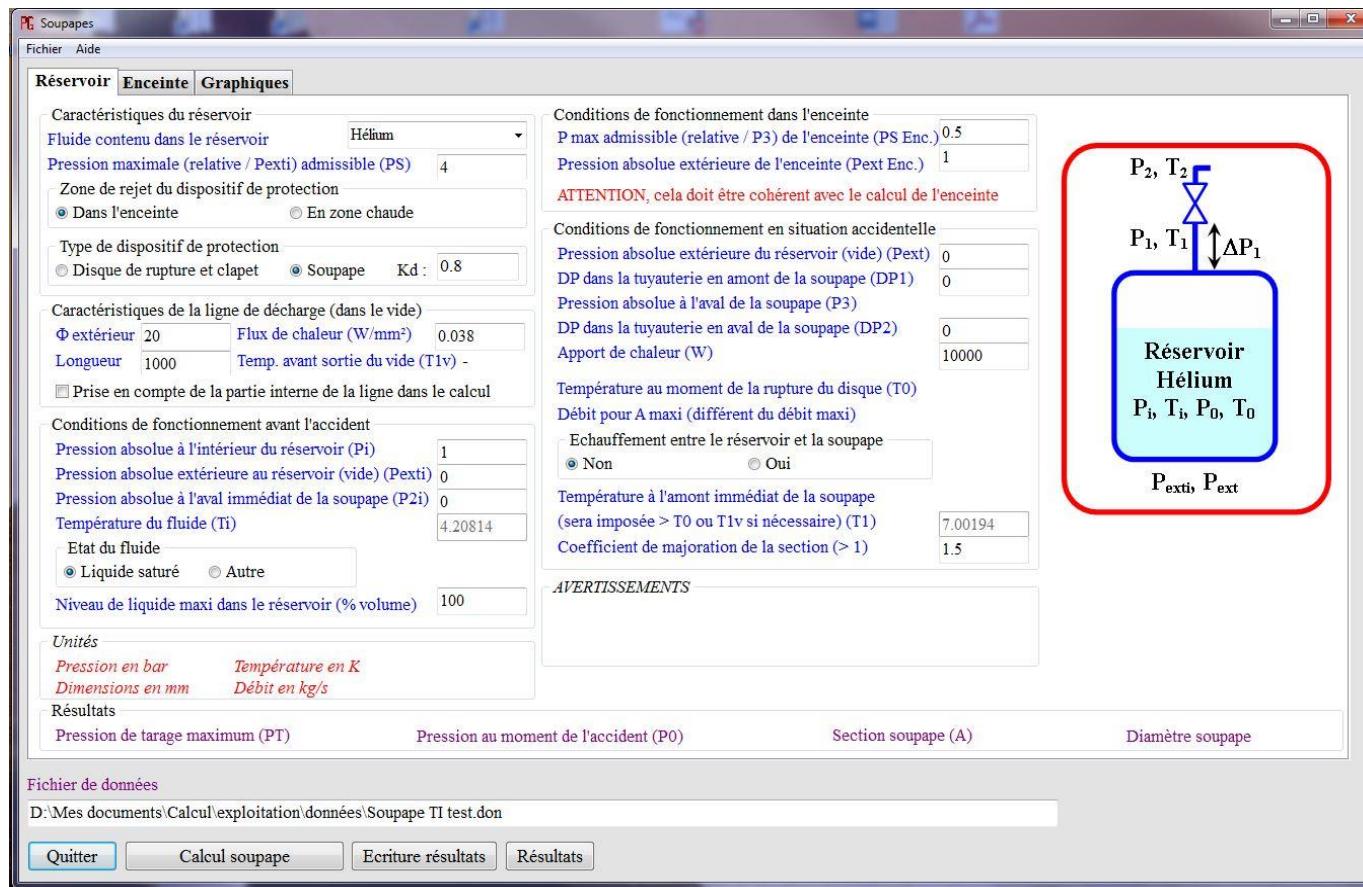


## Generic model

- Valid for all thermodynamic states of the fluid upstream of the safety device
- Takes into account the possible phase change of the fluid during the expansion

After the accidental analysis (risk assessment) performed by the designer.....

- A sizing software according to the article « Safety in cryogenics » to avoid errors
- Interface « user friendly »



Calculation results to be  
inserted in the safety  
documentation of the  
cryogenic facility

Gaz utilisé	:	Hélium
Type de système à protéger	:	RESERVOIR
Zone de rejet du dispositif de protection	:	Dans l'enceinte
Type de dispositif de protection	:	Disque de rupture
Pression maximale admissible (PS)	:	4
Conditions de fonctionnement avant l'accident		
Pression abs. dans le réservoir (Pi)	:	1
Pression abs. extérieure au réservoir (Pexti)	:	0
Pres. abs. à l'aval immédiat de la soupape (P2i)	:	0
Température du fluide (Ti)	:	4,20814
Niveau de liquide MAXIMUM (% du volume)	:	100
Conditions de fonctionnement en situation accidentelle		
Pression abs. extérieure au réservoir (Pext)	:	0
DP dans la tuyauterie amont de la soupape (DP1)	:	0,1
ATTENTION : DP tuyauterie amont (DP1) > 3% de PT	:	0,1 > 0,075
DP dans la tuyauterie aval de la soupape (DP2)	:	0
Apports de chaleur (W)	:	10000
Echauffement entre le réservoir et la soupape	:	Non
Température du réservoir (T0)	:	6,96703
Température amont immédiat de la soupape (T1)	:	6,96703
Pression de tarage maximum (PT)	:	2,5
Pression abs. dans le réservoir (P0)	:	4,4
Pres. abs. à l'amont immédiat de la soupape (P1)	:	4,3
Pres. abs. à l'aval immédiat de la soupape (P2)	:	1,55
Débit (m)	:	0,41423
Dimensions de la soupape et grandeurs servant au calcul		
Coefficient de décharge de l'organe (Kd)	:	0,8
Coefficient de majoration de la section	:	1,5
Section de l'organe de sécurité (A)	:	222,318
Diamètre de la soupape (D)	:	16,8245

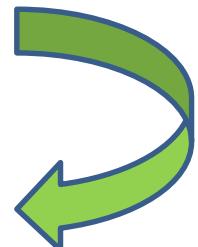
- European Standard CEN-TC268 WG6 for the protection of the helium cryostats against excessive pressure

Organisations contributing:



Publication of the Standard planned for 2020

- H2020 AMICI project coordinator CEA-IRFU  
Accelerator and Magnet Infrastructure for Cooperation and Innovation



Workpackage 5.4: Harmonization- Standardisation Activities on Safety of Liquid helium cryostat

## 1. The calculation of the mass flow rate $\dot{m}_0$ during a subcritical discharge at a pressure $P_0$

ISO 21013-3: Monophasic **vapor** discharge at saturation at the pressure  $P_0$

→ TI: Monophasic **liquid** discharge at saturation at the pressure  $P_0$

## 2. The calculation of the cross section A

ISO 21013-3: Equation of compressible single phase fluid **without change phase during the expansion in the safety device**

→ TI: Homogeneous equilibrium model G

# Quantification of heat flux in supercritical helium

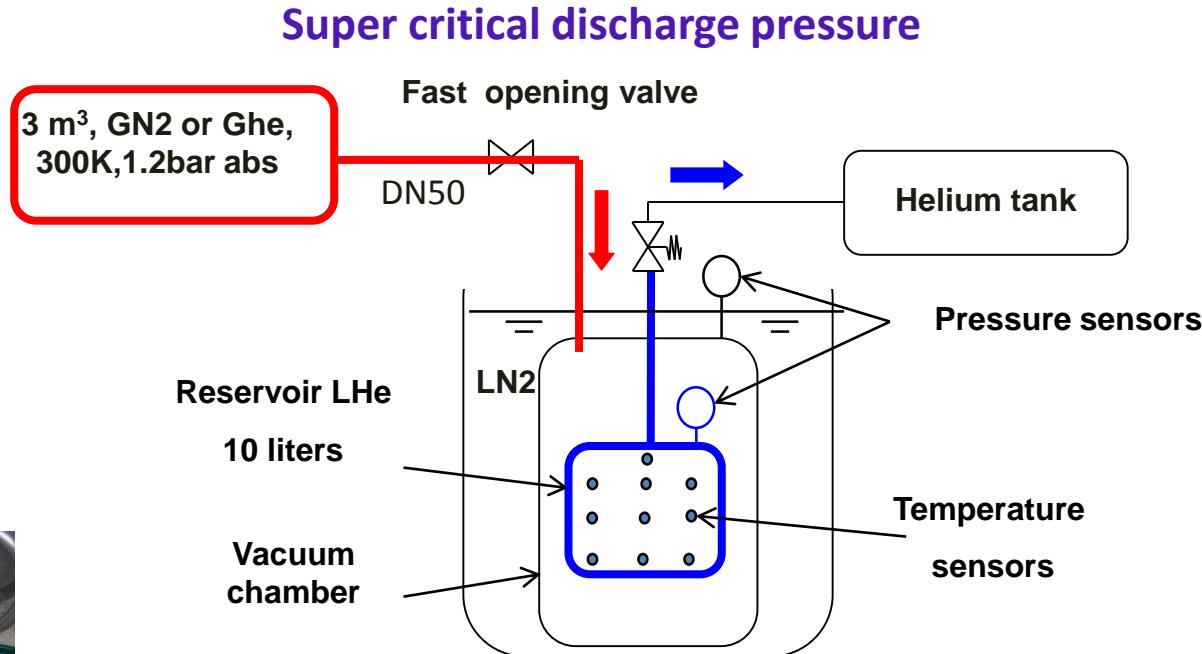
## Loss of vacuum vessel



Reservoir LHe  
without MLI



Reservoir LHe  
with MLI



### Test parameters:

- Initial mass inventory of the reservoir
- Nature of the gas responsible (GN<sub>2</sub>, GHe, Air) for the loss of vacuum
- Number of layers of MLI

## ➤ Loss of vacuum with GN<sub>2</sub>

Heat Flux: **1,85 W/cm<sup>2</sup>** (KIT: **1,4 W/cm<sup>2</sup>**, comparison to the Safety Seminar organised by CERN in September 2016)

Lehman's tests in 1980 in film ebullition at atmospheric pressure: **3,8 W/cm<sup>2</sup>**

Remark: mechanically size the systems He to be protected for the maximum possible pressure (> 2,2 bars) to minimize the size of the safety device.

Even more in a restricted environment...

## ➤ Loss of vacuum with air

Heat flux: **2W/cm<sup>2</sup>** close value with GN2, condensation of steam water

## ➤ Loss of vacuum with GHe

Heat Flux: **0,15W/cm<sup>2</sup>**, much lower value, no condensation on the outside of the tank

# Experimental results

## Tank with multi layers isolation

The heat flux depends on:

- the type of super isolation
- of the number of layers
- **the installation ....influence of the operator**



Difficulty in providing some reproducible values. It's risky to give values.

Thank you for your attention

