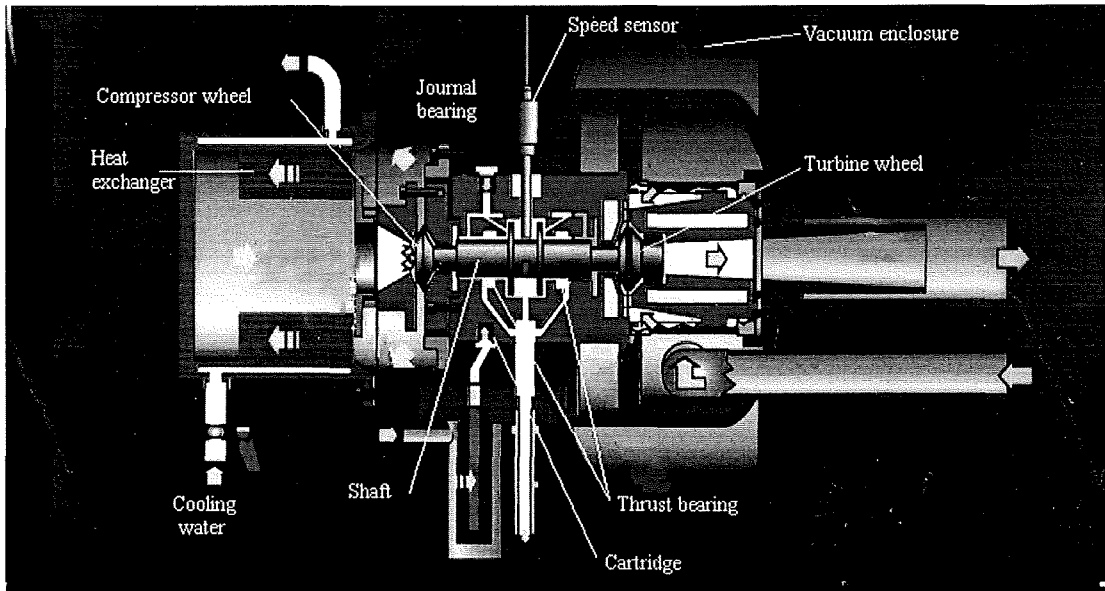




Standard de Calcul

Prédimensionnement de Turbine



Fonctionne avec GASPAK.

This document is property of "L'AIR LIQUIDE" 75, quai d'Orsay, 75321 PARIS. It is strictly confidential and can not be reproduced nor given away without the written consent of "L'AIR LIQUIDE".

Ce document est la propriété de L'AIR LIQUIDE, 75, quai d'Orsay, 75321 PARIS. Il est remis à titre strictement confidentiel. Il ne peut être reproduit, ni communiqué sans son autorisation expresse.

<u>Cryo-Ingénierie</u>		<u>Date : Juillet 2001</u>
<u>Vérificateurs</u> <i>Pierre Briend</i> <i>Véronique Grabié</i>		<u>Diffusion :</u> <u>Air Liquide DTA</u> CRYG
<u>Auteur</u> <i>Eric Fauve</i>		PRET

Sommaire

1	PRÉSENTATION GÉNÉRALE	3
1.1	INTRODUCTION	3
1.1.1	<i>Turbine Idéale</i>	3
1.1.2	<i>Turbine Réelle</i>	3
1.2	LES FONCTIONS DU STANDARD	3
2	UTILISATION	4
2.1	DIMENSIONNEMENT	4
2.1.1	<i>Les Entrées</i>	4
2.1.2	<i>Les Résultats</i>	4
2.2	FONCTIONNEMENT	5
2.2.1	<i>Les Entrées</i>	5
2.2.2	<i>Les Résultats</i>	5
3	LES PARAMÈTRES DE LA TURBINE	6
3.1	GÉNÉRALITÉS	6
3.2	LA TURBINE	6
3.3	LA ROUE	6
4	PREDIMENSIONNEMENT DE LA TURBINE	7
4.1	LE PARAMÈTRE X :	7
4.2	PREMIÈRE APPROCHE DE LA TURBINE :	7
5	LE RENDEMENT	8
5.1	LE RENDEMENT HYDRAULIQUE	8
5.2	LES ENTRÉES DE CHALEUR	9
5.3	LE RENDEMENT TOTAL	9
6	LE DÉBIT DE FUITE	10
7	LE DÉBIT UTILITÉ	11
8	LE CODE	12
8.1	LES VARIABLES	12
8.2	L'ALGORITHME	13
8.2.1	<i>Dimensionnement</i>	13
8.2.2	<i>Fonctionnement</i>	13
8.3	LE VISUAL BASIC	14

This document is property of "L'AIR LIQUIDE" 75, quai d'Orsay, 75321 PARIS. It is strictly confidential and can not be reproduced nor given away without the written consent of "L'AIR LIQUIDE".

Ce document est la propriété de L'AIR LIQUIDE, 75, quai d'Orsay, 75321 PARIS. Il est remis à titre strictement confidentiel. Il ne peut être reproduit, ni communiqué sans son autorisation expresse.

1 PRESENTATION GENERALE

1.1 INTRODUCTION

1.1.1 Turbine Idéale

Une Turbine Permet de réaliser une détente isentropique. Contrairement à une détente classique de Joule Thomson (Détente Isenthalpique à travers une Vanne), du travail est extrait du fluide, ce qui permet d'abaisser son enthalpie.

Pour extraire le travail, une roue récupère l'énergie du débit de fluide à refroidir. Cette roue entraîne un compresseur qui fait circuler un débit de fluide à travers un frein. Le fluide détendu à travers le frein s'échauffe. Un circuit de refroidissement à eau vient extraire la puissance dissipée.

Le fluide comprimé s'échauffe.

La chute de température est d'autant plus importante que l'enthalpie baisse. Un gaz parfait ne subit d'abaissement de sa température au passage d'une JT alors qu'il refroidit par une turbine. Pour être refroidi par une détente JT le gaz doit se trouver sous sa courbe d'inversion de JT (Fonction de la pression et de la température). Au-dessus de la température d'inversion de Joule Thomson (40K pour l'Hélium), les gaz réels sont réchauffés par une détente Isenthalpique.

JTIC : Joule Thomson Inversion Curve

- Sous la JTIC $(\partial T / \partial P)_h < 0$
- Au-dessus de la JTIC $(\partial T / \partial P)_h > 0$

1.1.2 Turbine Réelle

La turbine Idéale représente une détente réversible et adiabatique (sans échanges de chaleur avec l'extérieur). En réalité, les entrées de chaleur ne sont pas négligeables, tout le débit n'est pas entièrement détendu par la roue et la roue n'extrait pas toute l'énergie qu'elle pourrait évacuer. Les turbines ont donc un rendement Isentropique.

On a : DHs chute d'enthalpie Isentropique, DH chute enthalpique Réelle :

$DH = \eta * DHs$ avec η rendement Isentropique de la turbine.

1.2 LES FONCTIONS DU STANDARD

Ce standard comporte deux parties : Une partie de **Dimensionnement**, qui permet de choisir une turbine en connaissant le cas design et une partie **Fonctionnement** qui permet d'évaluer les performances d'une turbine dans un cas données.

Les deux programmes fonctionnent suivant le même principe. Les entrées à fournir par l'utilisateur sont signalées en jaune pâle, les sorties sont indiquées en vert pâle.

Les calculs effectués par les programmes permettent d'estimer les performances des turbines. **Les résultats apportés par ces programmes ne sont donnés qu'à titre indicatif.**

2 UTILISATION

2.1 DIMENSIONNEMENT

Il permet en connaissant les conditions nominales de fonctionnement de choisir une turbine. Il indique les différentes possibilités de turbine et de roue accompagnée de ses caractéristiques dans le cas design étudié.

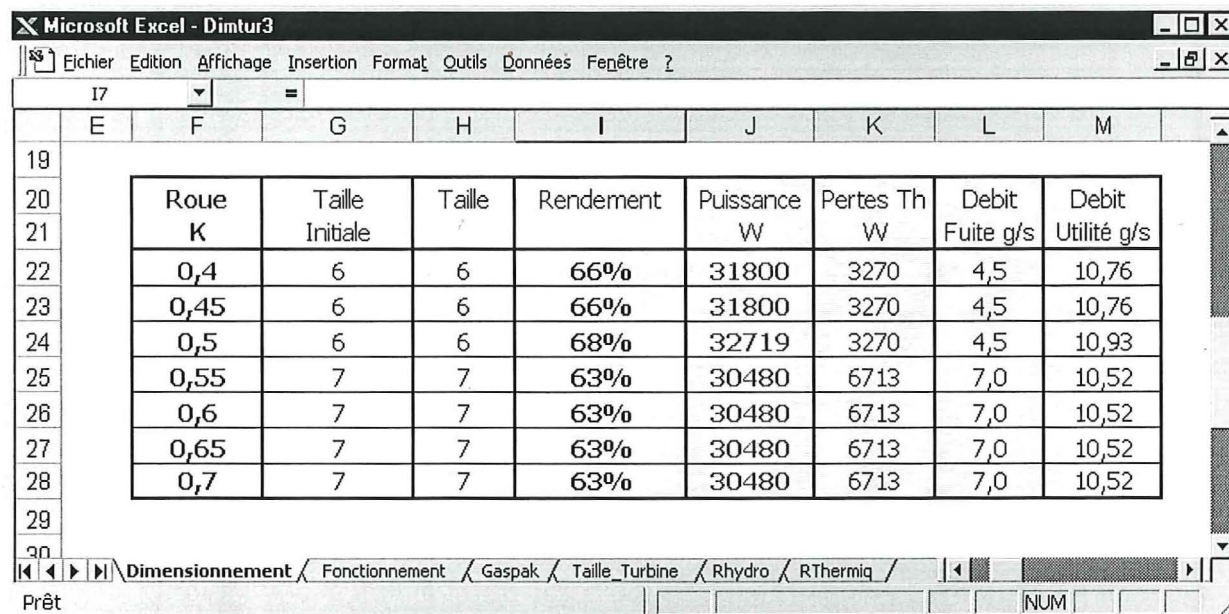
2.1.1 Les Entrées

- | | |
|---|-------------|
| ➤ Fluide : Menu déroulant | Fluide |
| ➤ Type de Roue : Fermée ou Ouverte : Bouton d'Option | Roue O/F |
| ➤ Conditions d'entrée Turbine : Pression et Température | P, T entrée |
| ➤ Pression de Sortie Turbine | P sortie |
| ➤ Le Débit Massique | Débit |

Les unités à utiliser^{es} sont signalées. On utilise autant que possible les USI afin d'éviter les erreurs de conversion.

2.1.2 Les Résultats

Le Bouton *Size* permet de lancer les calculs. Le Programme renvoie plusieurs propositions de turbine. Pour chaque paramètre K (=Diamètre Intérieure/Diamètre extérieur) de la roue, il propose une turbine. Il indique : **Le Rendement de la turbine, La Puissance Extraite et le Débit Utilité.**



Microsoft Excel - Dimtur3

Roue K	Taille Initiale	Taille	Rendement	Puissance W	Pertes Th W	Debit Fuite g/s	Debit Utilité g/s
0,4	6	6	66%	31800	3270	4,5	10,76
0,45	6	6	66%	31800	3270	4,5	10,76
0,5	6	6	68%	32719	3270	4,5	10,93
0,55	7	7	63%	30480	6713	7,0	10,52
0,6	7	7	63%	30480	6713	7,0	10,52
0,65	7	7	63%	30480	6713	7,0	10,52
0,7	7	7	63%	30480	6713	7,0	10,52

Dimensionnement / Fonctionnement / Gaspak / Taille_Turbine / Rhydro / RThermiq / Prêt



2.2 FONCTIONNEMENT

Il permet d'évaluer les performances d'une turbine sur une installation. On peut observer les variations du rendement de la turbine en fonction des paramètres d'entrée.

2.2.1 Les Entrées

- Conditions Amont : P et T entrée
- La pression Avale : P sortie
- Le Débit : Débit
- Les caractéristiques de la roue : O/F et K
- La Taille de la turbine : N° Turbine

2.2.2 Les Résultats

Le programme lancé à partir du bouton de commande renvoie le **rendement et la puissance** extraite par la turbine. Ils permettent d'estimer le comportement de la turbine hors du cas design.

This document is property of "AIR LIQUIDE", 75, quai d'Orsay, 75321 PARIS. It is strictly confidential and can not be reproduced nor given away without the written consent of "AIR LIQUIDE".

Ce document est la propriété de "AIR LIQUIDE", 75, quai d'Orsay, 75321 PARIS. Il est remis à titre strictement confidentiel. Il ne peut être reproduit, ni communiqué sans son autorisation expresse.

	A	B	C	D	E	F
1	Fluide	Helium				
2						
3						
4	Débit	0,03	kg/s			
5	P entrée	1400000	Pa		Turbine	TC3
6	T Entrée	62	K			
7	S Entrée	17859	J/g/K		Roue	0,55
8	H Entrée	324159	J/kg		Fermée?	<input checked="" type="checkbox"/> FERMEE
9						
10						
11	P Sortie	560000	Pa		Rendement	76%
12	T Sortie	47,7	K		Puissance	2294 W
13	H Sortie Idéale	223126	J/kg			
14	H Sortie Réelle	247703	J/kg		Rendement Hydro	88%
15	DHs	101033	J/kg		Rendement Thermique	91%
16					Pertes Par fuite	121 W
17					Entrée de Chaleur	120 W
18						

3 LES PARAMETRES DE LA TURBINE

3.1 GENERALITES

Il existe actuellement cinq différentes tailles de turbines adaptées à des puissances différentes. Ces turbines, de TC3 à TC7 sont fabriquées par CGEN (Cryo-Génération) à Sassenage.

La turbine TC est adaptée à la Puissance à évacuer, et la roue équipant la turbine est adaptée au process (Conditions nominales de fonctionnement).

3.2 LA TURBINE

Turbines	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7
Puissance [kW]	0,4 - 4	0,5 - 10	0,7 - 40	6,5 - 115	10 - 160

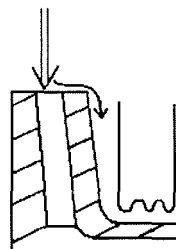
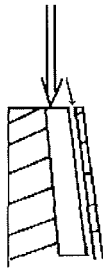
Tableau sur « Taille_Turbine », Pmin et PMax

Pour une même catégorie de turbine, la roue installée dépend de l'utilisation. C'est à dire que **deux TC7 peuvent être équipées de roues différentes.**

3.3 LA ROUE

La Roue est adaptée au process. Elle est caractérisée par :

- ✓ Son type : **OUVERTE** ou **FERMEE**
- ✓ **K = Diamètre Intérieure / Diamètre Extérieur**

Turbine Fermée	Turbine Ouverte
 <ul style="list-style-type: none"> ➤ Débit de Fuite Limité ➤ Limitée en Puissance 	 <ul style="list-style-type: none"> ➤ Débit de Fuite plus Important ➤ Puissances plus élevées

4 PREDIMENSIONNEMENT DE LA TURBINE

4.1 LE PARAMETRE X :

X est le paramètre qui va permettre une première approche de la turbine à employer. Il dépend du débit volumique et de la chute enthalpique.

- Q= Débit Volumique en m³/s
- DHs = Chute Enthalpique Théorique j/kg

$$X = \frac{\sqrt[2]{Q}}{\sqrt[4]{DHs}}$$

4.2 PREMIERE APPROCHE DE LA TURBINE :

On appelle *Size* le réel approchant le numéro de la turbine à utiliser. X est la variable définie ci-dessus et K est un paramètre de la roue.

- K = Diamètre Intérieur / Diamètre Extérieure

On a : $Size = f(K) * X.$

On discrétise la fonction $f(K)$:

K	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
f(K)	751.9	653.6	568.2	520.8	490.2	445.1	401.6

Tableau sur « Taille_Turbine » : Constante

On retrouve ensuite le numéro de la fonction grâce à une routine :

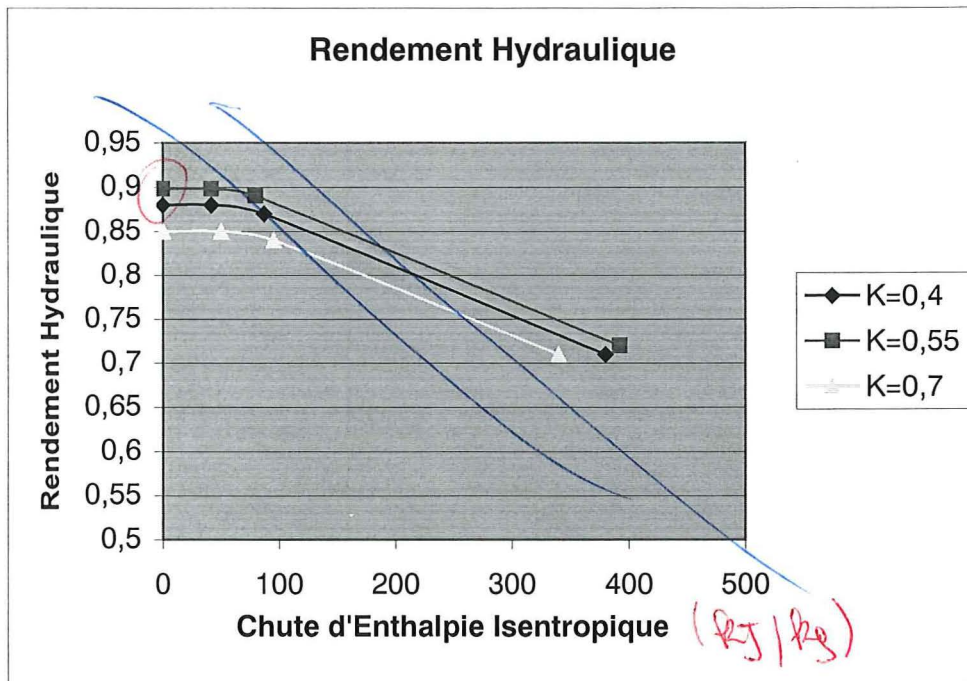
Turbine	Turbine 2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	Turbine 8
Size	>0	>1.8	>2.7	>3.75	>5.2	>7.4	>11

Tableau sur « Taille_Turbine » : >Taille

Cette première approximation donne la « *Taille Initiale* » de la turbine : point de départ des itérations. On a pour chaque K une taille initiale propre.

5 LE RENDEMENT

5.1 LE RENDEMENT HYDRAULIQUE



DHs : chute enthalpique isentropique que le fluide subirait si la détente était idéale.

K : Paramètre de la roue = Diamètre intérieur / Diamètre Extérieur

On considère que le rendement hydraulique d'une turbine dépend de **K**, paramètre de la roue et de **DHs** chute enthalpique.

Pour chaque **K**, on considère deux zones. En dessous de 65000 j/kg, on considère le rendement constant. On considère au-delà une zone linéaire. **DHs** est considérée en USI : j/kg.

~~DHs > 650000 j/kg~~

$R_{hydro} = C1 - C2 * DHs$

DHs < 65000 j/kg

$R_{hydro} = C0$

K	C0	C1	C2 (*10 ⁻⁷)
0,40	0.89	0.8829	5.07
0,45	0.89	0.8829	5.07
0,50	0.89	0.9029	5.07
0,55	0.89	0.9289	5.22
0,60	0.865	0.9289	5.22
0,65	0.865	0.9289	5.22
0,70	0.865	0.9289	5.22

Tableau sur « Rhydro », Rendement Hydro Calcul

5.2 LES ENTREES DE CHALEUR

Les entrées de chaleur sont considérées comme constante, quel que soit la température, ou autres conditions. Elles dépendent simplement de la turbine employé.

Turbine	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7
Entrées de Chaleur [W]	120	135	250	370	575

Tableau sur « Rthermiq », Entrées de Chaleur

On en déduit le rendement thermique :

Rhydro = Rendement Hydraulique

EC = Entrées de Chaleur

Q = le débit Massique

DHs = La chute enthalpique isentropique

$$\text{Rendement Thermique} = RTh = 1 - \left(\frac{EC}{Q} * \frac{1}{RHydro * DHs} \right)$$

5.3 LE RENDEMENT TOTAL

On vient de calculer le rendement Thermique ainsi que le rendement Hydraulique. On obtient en les multipliant le rendement global. Ce rendement est minoré par un coefficient 0,95. On a alors :

$$\boxed{\text{Rendement} = R = RThermiq * RHydro} \approx 0,95.$$

6 LE DEBIT DE FUITE

Le calcul du débit de fuite utilise la formule de STODOLA. Toutes les pressions sont exprimées en *Pascal*.

Le dessin montre une turbine, son arbre et les labyrinthes destinés à limiter les fuites. On appelle P la pression entrée turbine, P1 la pression à l'entrée du 1^{er} labyrinthe, P2 la pression de la chambre intermédiaire et P3 la pression sortie de la turbine.

On pose : $P1 = \sqrt{P0 * P2}$ et $P3 = P1 - 5000$

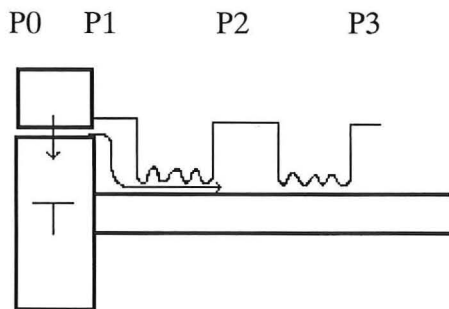
T0 = Température Amont

R = 8.31 constante de Boltzmann,

M = Masse molaire du fluide considéré

S = surface de Passage

Z = Nombre de dent des labyrinthe



STODOLA nous donne :

$$Q_{fuite} = \frac{S}{\sqrt{Z}} * \sqrt{\frac{M}{R * T0}} * (P1^2 - P3^2)$$

Turbine	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7
Paramètre = $\frac{S}{\sqrt{Z}} * 10^7$	3.77	4.83	5.53	8.38	13.1

Tableau sur « Rthermiq », S/Z^0.5

7 LE DEBIT UTILITE S

Les turbines sont à paliers. Les turbines Air Liquide sont à palier statique. L'axe est porté par un coussin de gaz sous pression injecté au niveau des paliers. Le débit utilité est très bien connu sur les installation S Hélium. On en déduit par analogie le autre débit utilité nécessaire pour les autres fluides.

En USI :

Air Liquide a déjà déterminé pour l'Hélium

P = Puissance Extraite en Watt

Q_{He} = Q utilité Hélium, Débit Massique en kg/s

Pour l'Hélium, on a : $Q_{He} = 5 \cdot 10^{-3} + P \cdot 1,8 \cdot 10^{-7}$

Pour les autres gaz, on a le rapport :

M_f = Masse Molaire du fluide considéré

M_{He} = Masse Molaire de l'Hélium

Q_f = Débit utilité du fluide considéré

γ_f = Gamma du fluide Considéré

γ_{He} = Gamma de l'Hélium

On obtient la Relation :
$$\frac{Q_f}{Q_{He}} = \sqrt{\frac{\gamma_f \cdot (\gamma_{He} + 1)}{\gamma_{He} \cdot (\gamma_f + 1)}} \times \frac{M_{He}}{M_f}$$

8 LE CODE

8.1 LES VARIABLES

Les Variables sont toujours en USI !

<i>DebHe</i>	Débit Utilité de l'Hélium
<i>Débit</i>	Débit
<i>DebUtil</i>	Débit Utilité du gaz considéré
<i>DHs</i>	Chute Enthalpique Idéale DHs
<i>Fuite</i>	Perte par fuite en W
<i>Gamma</i>	Cp/Cv gaz considéré (1.4 diatomique, 1.66 Monoatomique)
<i>GammaHe</i>	Cp/Cv Hélium (voisin de 1.66)
<i>HeatLeak</i>	Entrées de Chaleur
<i>K</i>	Paramètre turbine : Dint / Dext
<i>M</i>	Masse molaire du gaz considéré
<i>Mhe</i>	Masse Molaire de l'Hélium
<i>Para()</i>	Donne Paramètre = $S/Z^{0.5}$ en fonction de turbine
<i>Parametre</i>	$S/Z^{0.5}$ Paramètre turbine pour La formule de STODOLA
<i>PTi</i>	i de 0 à 3, Pressions pour la formule de STODOLA
<i>Q</i>	Débit Volumique
<i>Qfuite</i>	Débit fuite Massique kg/s STODOLA
<i>R</i>	Rendement (Attention constante de Boltzmann !)
<i>Rhydro</i>	Rendement Hydraulique
<i>Rth</i>	Rendement Thermique
<i>Size</i>	N° de Turbine en Réel
<i>Turb()</i>	Donne N°Turbine en fonction de Size
<i>X</i>	$Q^{0.5}/DHs^{0.25}$ dépend de la configuration

8.2 L'ALGORITHME

8.2.1 Dimensionnement

Pour chaque K, On fait : (Les flèches sont détaillés dans les rubriques précédentes)

➤ (K et DHs)→Rhydro

➤ (Q et DHs)→X

X→Size

Size→Turbine

☺ Turbine→HeatLeak

☹ (Turbine et DHs)→PerteFuite

➤ (Q et DHs et Rhydro et HeatLeak et PerteFuite)→Rthermiq

➤ (Rhydro et Rthermiq)→Rendement

➤ (Rendement et DHs)→Puissance

➤ Si Pmin<Puissance<Pmax, Turbine OK, Sinon Turbine Supérieure et retour ☺

8.2.2 Fonctionnement

➤ (K et DHs)→Rhydro

➤ Turbine→HeatLeak

➤ (Turbine et DHs)→PerteFuite

➤ (Q et DHs et Rhydro et HeatLeak et PerteFuite)→Rthermiq

➤ (Rhydro et Rthermiq)→Rendement

(Rendement et DHs)→Puissance

➤ Si PMin<Puissance<Pmax, OK, Sinon, Message Avertissement !

Ce document est la propriété de L'AIR LIQUIDE, 75, quai d'Orsay, 75321 PARIS.
Il est remis à titre strictement confidentiel. Il ne peut être reproduit, ni communiqué
sans son autorisation expresse.

This document is property of "L'AIR LIQUIDE" 75, quai d'Orsay, 75321 PARIS. It is
strictly confidential and can not be reproduced nor given away without the written
consent of "L'AIR LIQUIDE".

8.3 LE VISUAL BASIC

