



VST

Vacuum System Tool

Un outil de dimensionnement d'installations sous vide utilisant un moteur de calcul formel.

Jacques Faerber Fabrice Maingot de la Grassière Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strabourg 2012 – 2022

Version modOp: 220530a

2 / 48

Vacuum System Tool

Ce code est le résultat d'un long processus ayant débuté par un problème de dimensionnement d'une installation devant comporter 5 chambres et présentant un gradient de pression allant de 200 mb avec un flux conséquent (première chambre) à l'ultra haut vide en quasi statique (dernière chambre). La lassitude de tourner et retourner les équations en intervertissant données et inconnue (un tableur ne sait pas faire cela) m'a fait chercher de l'aide auprès de personnes plus au fait des outils existants. La réponse était simple : outil de calcul formel, permettant de manipuler les équations, sans avoir un degré d'abstraction trop poussé.

Ainsi à débuté un collaboration avec Fabrice, marquée par des pauses et des reprises selon nos disponibilités à chacun, jusqu'au jour à Romain a déboulé dans notre horizon, avec son enthousiasme communicatif !

Nous avons donc sorti de la poussière une ébauche de code déjà bien avancée, l'avons repris en main et rééprouvée, et la robustesse du travail déjà fait nous a poussé à en continuer le développement, en relation avec Romain et son « code frères » VTT (Vacuum Time Tool). Une fusion de codes a été envisagée, mais autant l'objectif de chacun que surtout les outils informatique utilisés ne le permettait pas. Pour autant, l'idée reste d'une refonte futur des codes en un outil unique...?

Grace aux nombreux échanges et au support du RT-Vide, nous approchons d'un code fonctionnel qui ne demande qu'à être testé, utilisé et amélioré.

Jacques, Fabrice, Romain 2012-2022

Table des matières

A)	Installation	5
,	1. Version du code et du mode d'emploi (modOp)	5
	2. Installation sous Linux :	5
B)	Philosophie de VST	7
Ć)	Pour commencer : un exemple de calcul « à la main »	9
D)	Utilisation de VST	11
,	1. Lancement de VST	11
	2. Première prise en main : quelques cas simples	11
	a) Optimisation des dimensions d'un tube (cylindrique, air à 20°C)	11
	b) La pression en fonction d'un flux et d'une vitesse de pompage connus	12
	c) Conductances en parallèle, en série	12
	3. Calcul d'un petit ensemble	13
	a) Démarche générale	13
	b) Étape 1 : Construction du schéma	13
	c) Étape 2 : Documenter les composants	13
	d) Étape 3 : Choisir et configurer les équations globales	14
	e) Étape 3 : Exécuter le calcul	14
	f) Étape 4 : Optimisation	14
	4. Aller plus loin : gaz et température	15
	a) Calcul à partir d'une conductance connue (air, 20°C)	15
	b) Correction dans une chaîne de composants et d'interactions	15
	5. Aller plus loin : Pim et modification d'équation	16
	6. Calcul d'un gros ensemble	16
E)	Guide de référence :	18
	1. La fenêtre Schema et ses outils	18
	2. Fenêtre composants	20
	a) Les outils de la fenêtre Components	20
	b) Les composants	22

3. Fenêtre équations	25
a) Les outils de la fenêtre Equations	25
b) Les équations par défaut	25
c) Les cadres d'équations	26
d) Syntaxe des équations pour Maxima	26
e) Modifications des éguations (généralités)	26
f) Composants sans éguation avec éguation !	27
g) Equation « General Equation »	27
h) Temps de descente en pression	27
F) Tubes courts, Conductances en série – Clarifications	28
1. Conductance du tube cylindrique de toute longueur : guelle équation ?	28
2. Faut-il compter un orifice initial ou pas ?	30
3. Conductances en série – Jusqu'où peut-on utiliser la loi d'0hm ?	30
a) End loss	30
b) Beaming	30
c) Qu'en conclure ?	31
d) Comment procéder avec VST	31
G) Formulaire de technologie du vide	33
1. Définitions	33
2. Domaines de vide – Détermination du régime d'écoulement	33
3. Formulaire	34
a) Équations dites "de comportement" (dans VST)	34
b) Équations de composants	34
4. Valeurs tabulées de J et α (selon proba. de Clausing)	36
5. Probabilité de transmission selon Clausing (W)	36
6. Taux de dégazage selon matériaux et état, et à différents temps	37
7. Conversion entre les unités les plus courantes en technologie du vide (source	
Pfeiffer Vacuum)	41
H) Bibliographie	42
I) Annexes	43
1. Pistes de développements	43
2. Bug et modifications en cours	44
3. Utilisation de VST sous windows	45
a) Linux en machine virtuelle <i>(opérationnel</i>)	45
b) Cyqwin (pas opérationnel à ce jour, bonnes volontés bienvenues !)	47

MODOP VST

A) Installation

1. Version du code et du mode d'emploi (modOp)

Code version :	2.0.1	Date	06/05/22
Version ModOp	220530	MàJ	а

La version du code est donnée dans son nom. La date de la dernière mise à jour et dans l'en-tête du fichier vst.tcl. Pour voir ces informations, entrer dans un terminal (avec le bon chemin) :

head -n 20 VST/vst.tcl

On lit alors entre autres laligne suivante :

FMdlG - 06/05/22 - version 2.0.1

La version du modOp est donnée dans le nom de fichier, en première de couverture et dans le tableau ci-dessus, au format YYMMDD, suivi de a, b ou c pour des révisions intermédiaires.

On n'abordera ici que l'installation de VST sous Linux.

Pour Windows, l'utilisation d'une machine virtuelle via Virtual Box fonctionne sans difficultés. En revanche, l'utilisation via Cygwin n'est à ce jour pas opérationnelle.

Si un familier de Cygwin trouve comment débloquer cela, nous sommes très intéressés.

Il n'y a aucune exigence particulière quand aux ressources de l'ordinateur. VST est très sobre, autant en mémoire qu'en calcul. Un vieux i3 ou i5 et un Linux minimal suffirons largement. En revanche, il est conseillé d'avoir un grand écran, voir deux écrans. Les fenêtres prennent vite beaucoup de place.

2. Installation sous Linux :

Vérifiez que les paquets nécessaires à LaTeX sont déjà installés Si oui, passez à la suite. Sinon, installer LaTeX¹.

Si LaTeX vient d'être installé, vérifier la présence ou ajouter : sudo apt-get² install texlive-latex-extra dvipng

```
Installer les paquets nécessaires à VST :
```

sudo apt-get install tcl tk expect maxima

Installer VST

Créer un répertoire dédié à VST là où on veut, et y dézipper l'archive dans un sous-répertoire.

Dans un terminal, aller à cet emplacement cd chemin/VST_n°version/

Vérifier s'il existe un script de démarrage ou un lien symbolique pointant vers VST/vst.tcl

Pour ce faire :

ls -l vst*

Le retour devrait être :

lrwxrwxrwx 1 jacques jacques 11 févr. 18 17:18 vst -> VST/vst.tcl
-rw-rw-r-- 1 jacques jacques 3498 févr. 18 17:18 vst_homepage.html

Le lien symbolique « vst » existe bien et est exécutable comme commande.

¹ Les paquets nécessaires pour LaTeX sont : texlive, cm-super (pack de polices), xdvi (pas pour Ubuntu), gv (pour lire et manipuler les .ps), spdf, kile (toujours en dernier).

² apt-get concerne un linux sur base Debian. Pour d'autres distributions, utiliser la commande equivalente correspondante.

Démarrer le code par :

Si le lien existe :

./vst

Si le lien « vst » n'existe, vérifier que le fichier VST/vst.tcl est exécutable,

ls -l VST/vst.tcl

La ligne doit contenir un ${\sf x}$ dans le premier groupe de caractères

```
-rwxr-xr-x 1 jacques jacques 28273 févr. 21 16:21 VST/vst.tcl
```

si non, le rendre exécutable

chmod u+x VST/vst.tcl

et démarrer le code par :

./VST/vst.tcl

Trois fenêtres s'ouvrent, empilées l'une sur l'autre. Ne pas fermer le terminal, évidement, mais en revanche on peut le réduire.

Script de démarrage

On peut faire un script de démarrage, qu'on place dans un répertoire connu du PATH de l'utilisateur (.bashrc). Le script pointera sur VST_version/VST/vst.tcl

On pourra alors lancer VST depuis n'importe quel endroit de l'arborescence, en appelant vst.sh ou le nom qu'on aura donné au script.

Ci-après un exemple de script.

```
#!/bin/sh
# usage: $0 vst.sh
cd ~/labo_vide/projet-VST_VTT/VST-codes/VST_2.0.1/
./VST/vst.tcl
```

Outils complémentaires

Il peut être utile d'installer de suite deux outils complémentaires.

Terminator est un terminal dont la fenêtre peut être divisée verticalement ou horizontalement autant qu'on veut, et qui permet de disposer de plusieurs terminaux dans une seule fenêtre. Quand on est amené à faire tourner plusieurs instances de VST en parallèle, cela permet de limiter le nombre de fenêtres ouvertes en même temps.

Zim est un éditeur de texte permettant de la mise en page (titres, gras, italique, etc.) tout en restant léger, et faisant les sauvegardes au format de texte ASCII. Il peut intégrer des images, des tableaux, des équations LaTeX, etc. C'est bien plus riche que vi ou vim et bien moins lourd que libreoffice.

Il est utile pour lire et annoter les exports de résultats de VST, tout en les organisant au fil des essais. C'est un outil très pratique, d'autant qu'on oubli vite fait ce qui a changé d'une simulation VST à l'autre et qu'il faut donc faire le log des tests au fil de leur avancement.

B) Philosophie de VST

VST est développé en suivant trois lignes directrices principales :

- L'installation sous vide étudiée est décrite par une série de composants, assemblés par des liens décrivant les relations entre eux. Chaque composant a une équation qui lui est propre et une série d'équations décrit les liens.
- Tout paramètre trouve sa place dans une de ces équations, et peut à tout moment passer du statut de donnée à

celui d'inconnue et réciproquement.

- Les équations sont modifiables (dans une certaine mesure)

On trouve donc deux grandes familles d'équations, la première décrivant ces « composants » sur la base des dimensions, du matériau utilisé et des traitements dont a fait l'objet, etc., la deuxième rassemblant tout ce qui qui permet le « fonctionnement » de l'installation.

On parlera donc d'« équations de composants » et d'« équations de comportement ». Seront aussi comptés comme composants des éléments « sans équations », basés sur des données externes, tel que pompes, vannes, pièges, etc.

L'utilisateur détermine au départ ce qui est « inconnue » mais peut à tout moment modifier ce choix pour optimiser une partie un l'ensemble ou explorer une tendance.

L'interface utilisateur comprend 3 fenêtres permanentes :

Le Schéma.

Les équations de composants, **Components**.

Les équations de comportement, **Equations**.

La fenêtre Schema sert à dessiner l'installation à l'aide de symboles représentant ses briques élémentaires. Ces briques sont une décomposition de la chaudronnerie en éléments de formes simples pour lesquels on dispose d'une équation analytique permettant de calculer ses caractéristiques « techno du vide ».

On trouvera deux groupes de composants :

Ceux décrit par des paramètres et une équation qui les relie. Tout se calcul à partir de n-1 valeurs à fournir (enceinte, tubes, coudes, etc.).

Ceux qui sont décrit par des données « constructeurs », comme les pompes ou les vannes, et qui n'ont pas a priori d'équation associée.

Certains composants peuvent être utilisés pour décrire autre chose que ce que leur nom d'origine indique. Ainsi, une enceinte peut être utilisée pour représenter une vanne d'introduction de gaz ou pour décrire le flux de gaz dégazé par une jauge Bayard-Alpert.

Les composants sont à considérer non comme les pièces mécaniques visibles, mais comme vus depuis les équations les décrivant. Ainsi une longue canalisation ayant coudée à un bout en une seule pièce mécanique devra être décrit comme la succession d'un composant "tube" et d'un composant "coude symétrique". Ce ne sont donc pas des représentations de type dessin industriel ou CAO de l'expérience, mais une description d'"élément de vide" à prendre en compte.

La fenêtre Components rassemble les équations de composants. Elle est vide au départ et se construit au fur et à mesure qu'on ajoute des COMPOSANTS dans le schéma. Chaque cadre de composant contient la liste de paramètres qui décrivent la brique en question et l'équation régissant les relations de ces paramètres entre eux. Il permet des calculs *locaux* sur le composant lui-même, dont le résultat peut être rendus accessible (ou pas) à des calculs *globaux*.

La liste des équations de composants disponible dans VST est donnée en E-2-c.

La fenêtre Equations regroupe et chaîne les équations "*de comportement*" que nous appellerons dans la suite aussi équations "*globales*", c'est à dire servant à décrire le système dans son ensemble et dans son fonctionnement.

Le cœur de la démarche est un échange permanent d'instructions et de données entre l'interface utilisateur et un outil de calcul formel, en l'occurrence Maxima³, qui permet de manipuler les équations et de basculer à tout moment n'importe quel paramètre du statut d'inconnue à celui de donnée et inversement.

L'approche d'optimisation d'un système de vide demande en général de jouer sur plusieurs paramètres de plusieurs composants. La démarche retenue dans VST permet de travailler chaque composant pour lui-même, puis de voir les effets cumulés sur l'ensemble et de procéder à des aller-retour entre le composant et les équations qui décrivent le fonctionnement global.

La liste des équations de comportement disponibles dans VST est donnée en E-3-c.

³ https://maxima.sourceforge.io/

La programmation est faite en TCL, l'utilitaire Expect gère les échange entre la partie TCL et Maxima, et Maxima est le moteur de calcul formel.

Le développement de VST a demandé un travail conséquent. Il comporte encore beaucoup d'imperfections et les idées d'améliorations ou de prolongements ne manquent pas. Mais nous en sommes arrivés à un point où il faut d'abord l'utiliser, pour faire ressortir ses vraies qualités et défauts, et pouvoir hiérarchiser les développements ultérieurs. On peut en arriver à butter sur des impossibilités informatiques, et se poser la question si une remise à plat est nécessaire. Mais est-elle utile ?

Quelques pistes d'améliorations et d'évolution du code sont données en annexe.

Nous comptons donc sur les retours des utilisateurs pour nous apporter un autre regard sur ce qui existe et ce qui manque⁴ !

Codes typographiques utilisés dans ce ModOp

Pour distinguer les fonctions et éléments de l'interface graphique de VST :

Lignes de commande dans un terminal	Police dédiée aux instructions dans le terminal.	
Nom des 3 fenêtres principales	On appelle « fenêtre » les 3 cadres principaux de VST: Schema , Components et Equations	
Nom des COMPOSANTS et des ÉQUATIONS	On appelle « cadre » les fenêtres individuelles de composants ou d'équations, comme VALVE ou PUMING_RATE	
Nom d'un BOUTON à cliquer ou cocher	Les boutons peuvent être des cases à cocher √ ou des points à sélectionner •; le nom peut changer selon leur état, comme MODIFY qui devient APPLY et retour	
Nom de <i>paramètre</i> des cadres des composants et équations	Le nom des <i>paramètres</i> suit une syntaxe de type : <initiale du="" paramètre="">_<initiale composant="" du=""><numéro création="" de=""> C_Tm1 est la Conductance du Tube (en régime) moléculaire 1</numéro></initiale></initiale>	

Symboles utilisés dans ce document

Р	Pression			
Q	Flux gazeux			
S	Vitesse de pompage			
С	Conductance			
d	Diamètre			
L	Longueur			
V	Volume			
А	Surface			
Т	Taux de dégazage			
α	Coefficient de Clausing			
J	Coefficient de l'équation du tube « tout régime »			

A propos des unités...

Le choix a été fait de privilégier les unités les plus couramment utilisés (beaucoup connaissent par cœur les équations analytiques en unité CGS) tout en proposant dans le code les unités SI. Certaines grandeurs sont encore exprimées dans la littérature en unités anciennes comme les taux de dégazage en Torr.l.s⁻¹.cm⁻² et nos collègues nord-américains pratiquent encore couramment le Torr et le micron de Hg !

⁴ Faire remonter toute suggestion ou doléance à F. Maingot de la Grassière, J. Faerber et V. Speisser.

C) Pour commencer : un exemple de calcul « à la main »

Présupposés :

VST considère comme composant tout ce qui peut être décrit en terme de source de gaz et/ou en terme de conductance

soit par une équations dépendant de ses dimensions géométriques et/ou de son matériau de construction,

soit par les résultats de mesures ou des données externes.

On trouvera comme source de gaz les surface des enceintes, des tubes, tout ce qui est embarqué, les moyens de mesures de la pression (jauge BA, RGA), une vanne d'intro de gaz, et le procédé pour lequel le bâti est conçu. En terme de conductances, on aura les tubes de toutes formes et dimensions placés sur le chemin d'évacuation des gaz, les vannes et pièges, les pompes elles-mêmes, etc.

Pour certains d'entre eux, la conductances sera fournie par le fabricant, pour d'autres on la calculera à la main, avec VST, VTT ou MolFlow :-) !

Pour illustrer la démarche, nous considérerons une situation simple avec les étapes d'un calcul « à la main ». On en fera la transposition à VST plus loin (exemple-01).

Calcul de la pression limite d'une installation.

Soit une enceinte sous vide avec son groupe de pompage. On aimerait connaître la pression de base qu'on peut attendre avec une pompe donnée, montée par l'intermédiaire de différents tronçons de canalisations et de vannes. On ne s'intéresse que à la partie en régime moléculaire, donc entre l'enceinte et la pompe turbo.

Schéma de l'installation :

L'ensemble est composé d'une enceinte **E**. On monte une vanne d'angle **V1** à une bride de l'enceinte, qui lui est soudée par un bout de tube **T1**.

Un tube **T2** relie la vanne à la pompe turbo-moléculaire **PTu**.

Un tombac **T3** relie la pompe turbo à la pompe primaire **PSc** de type scroll.

Bien évidement, dans la réalité, il faut des choses en plus pour que cela puisse vraiment fonctionner (by-pass, autres vannes, mesure, etc.). Mais on a là le minimum nécessaire pour calculer cette pression d'équilibre.

Que sait-on ?

La pompe est donnée pour une vitesse de pompage de S_PTu l/s sur l'azote (avec S pour Speed).

La vanne est donnée pour une conductance C_V1 l/s pour l'air. L'enceinte est en inox, a un volume de V_E l et une surface interne de A_E m^2 (avec A pour Aera, pour ne pas confondre Surface et Speed !).

Les joints sont tous en élastomère, en Viton même, c'est mieux que le néoprène, d'aire exposée au vide A_jts.

On connaît le diamètre et la longueur des deux bouts de tubes, qui sont en inox aussi, ainsi que le taux de dégazage de l'inox dans les conditions du calcul.

La *pression* est le résultat de l'*équilibre entre les flux de gaz entrant et le flux sortant*. Elle est définie par l'équation suivante, qu'on va souvent retrouver dans les calculs :

$$Q = P \cdot S_{eff}$$
 Avec P = pression (hPa), Q = flux gazeux (hPa.l.s⁻¹),
S = vitesse de pompage effective (ou efficace) (l/s)



Le *flux* est déterminé par le dégazage des parois de l'enceinte, tout ce qu'elle contient, la perméation à travers les joints non métalliques (néoprène, Viton, etc).

Le *dégazage des parois* est déterminée par leur surface et par le taux de dégazage, propre au matériau (inox, alu, cuivre, etc) et aux conditions de préparation de cette surface (nettoyage, état de surface, étuvage, etc).

La *perméation des joints* est déterminée pareillement par le matériau, son état de préparation et sa surface exposée au vide.

Les sources de gaz autres peuvent être la jauge Bayard-Alpert, le RGA, le procédé, les fuites, etc.

$$Q = T_{surf} \cdot A_{surf} + T_{perm} \cdot A_{vit} + Q_{JBA} + Q_{RGA} + Q_{process}$$
Avec T = taux de dégazage (hPa.l.s⁻¹.cm⁻²),
 A = surface exposée au vide (cm⁻²)

Dans une première approche, on néglige le dégazage des 2 tubes et de la vanne.

La vitesse de pompage effectivement disponible est le résultat de l'étranglement de la vitesse de pompage nominale de la pompe turbo par tout les obstacles (tubes, coudes, vannes et pièges) entre son orifice de pompage et le débouché des tubes dans l'enceinte.

Sur notre dessin, les éléments à prendre en compte sont (de l'enceinte vers la turbo, en suivant le trajet que les molécules doivent suivre pour être pompées) :

- Le premier tube **T1**, de diamètre D1 et de longueur L1.
- La vanne **V1** de conductance fournie par le constructeur.
- Le tube **T2** entre la vanne et la pompe, de diamètre D2 et de longueur L2.
- La pompe **PTu**, avec sa vitesse nominale, donnée par défaut pour l'azote.

La vitesse de pompage effective **Seff** et la « combinaison » de la vitesse de pompage de la pompe **SPtu** et de toutes ces « conductances » mise bout à bout. telle que :

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S_{Ptu}} + \frac{1}{C_{T1}} + \frac{1}{C_{V1}} + \frac{1}{C_{T2}} \qquad \text{Avec } C = \text{conductance (l.s-1),} \\ S_{Puu} = \text{vitesse de pompage de la turbo (l.s-1)}$$

Le formulaire en annexe recense les équations de calcul des conductances pour les principaux composants possibles : orifice, tube circulaire, coude, réduction, etc.

Les équations générales sont adaptées à tout profil de tube, à tout gaz et toute température. Dans la pratique on utilise des équations simplifiées pour des tubes circulaires, de l'air (ou l'azote) et à 20°C. On leur applique si nécessaire des corrections selon le gaz et/ou la température. VST n'intègre que cette dernière série d'équations, qui suffit dans la plupart des cas.

La conductance d'un tube cylindrique est par exemple :

$$C_t = 12.1 \cdot \frac{d^3}{l}$$
 Avec d = diamètre et l = longueur (cm)

A la main, le calcul de l'installation ci-dessus se fait en deux étapes : Dans la première étape :

- On calcule chaque conductance avec son équation : tube 1, tube 2 ;
- On calcul la vitesse de pompage effective : « somme » des conductances des tubes et de la vitesse de pompage de la turbo ;
- On calcul tout les flux de gaz : les parois, les joints. On peut ajouter la jauge Bayard-Alpert ou un RGA ; - On en tire la pression d'équilibre.

Ceci correspond à la situation « à l'équilibre », quasi stationnaire, et sur la base d'un taux de dégazage à « temps long » (> 100 h).

Dans la deuxième étape on examine les résultats et on localise les points sensibles qui limitent les performances attendues. Si la pression finale obtenue ne convient pas, on modifie un « truc » et on recommence. Si par exemple on se rend compte que le tube T2 initialement prévu est trop long et « mange » beaucoup de vitesse de pompage, on modifie sa longueur et on recalcule jusqu'à avoir trouvé le bon compromis. Après, il faudra convaincre le bureau d'étude, mais on quitte le calcul pour entrer dans le registre de la négociation...

A la main, cela demande déjà un peu de persévérance. Mais souvenons-nous que les accélérateurs des années 50-60 ont tous été calculés ainsi, avec les tables de log, la règles à calcul et la Curta !

Mais heureusement, VST est arrivé ! Il n'est plus nécessaire de refaire tout les calculs ;-) !

Si on se rend compte que le taux de dégazage n'est pas le bon, ou que la surface des joints est exagérée, "*il suffit de*" changer *la* valeur et d'actualiser les calculs.

Ou, partant de la pression souhaitée, on va pouvoir refaire le calcul à rebours sans tout ré-écrire. On change

d'inconnue, on indique la valeur cible souhaitée et on remonte aux valeurs « de base » à utiliser, ici la longueur à donner à ce fameux tube trop long, ou un diamètre, ou un taux de dégazage. Ou encore on se rend compte que la grosse turbo qu'on avait retenu est inutile, une plus petite suffirait largement !

D) Utilisation de VST

1. Lancement de VST

Depuis un terminal, démarrer VST. Pour ce faire, se déplacer par cd chemin jusqu'au répertoire où sont tout les fichiers du programme.

Lancer VST par la commande

```
./vst ou./VST/vst.tcl (v.A-2)
```

Trois fenêtres s'ouvrent :

VST-n°_de_version-Schema, avec des outils sur le coté gauche.

```
VST-n°_de_version-Equations.
```

```
VST-n°_de_version-Components.
```



Capture d'écran après ouverture : en arrière-plan le terminal avec en surbrillance les lignes de commande de démarrage de VST(hors script de démarrage) Devant le terminal, la fenêtres Schema avec en premier-plan, les fenêtres Components et Equations, petites car encore vide.

Une disposition de départ pratique est de mettre la fenêtre **Schema** en bas au milieu, la fenêtre **Components** en haut au milieu-droite et la fenêtre **Equations** en haut à gauche. Dès qu'on ajoute des composants ou des équations, ces deux fenêtres vont s'élargir notablement.

Une fois tous les composants placé, la fenêtre **Schema** ne servira plus que pour ajouter de nouveaux composants, pour la sauvegarde du projet et pour faire des exports des calculs.

On peut être amené à travailler sur des composants sans les équations aussi bien que sur des équations sans composants.

Le **terminal** peut être réduit. Il n'est utile que pour voir des retours d'erreurs. Encore faut-il les comprendre !

2. Première prise en main : quelques cas simples

a) Optimisation des dimensions d'un tube (cylindrique, air à 20°C)

Dans la fenêtre **Schema**, choisir le composant (**PIPE**)-MOLECULAR (clic-G), l'orienter comme on le souhaite à l'aide des boutons **H/V** et +/-, (un cadre au dessous des boutons prévisualise l'orientation du symbole) et le placer là où on veut dans la surface de dessin (double-clic G).

Une barre (symbole du tube) est dessinée à l'endroit choisi, le cadre correspondant s'ouvre dans la fenêtre **Components**

Dans ce cadre, vérifier que la conductance est en inconnue, c'est à dire marquée en début de ligne par le •. Entrer dans la colonne de droite le diamètre et la longueur. On peut prendre l'unité par défaut ou la changer (clic-G).

Cliquer COMPUTE, le coefficient de Clausing α est calculé et la valeur de la conductance s'affiche dans la ligne correspondante, en colonne de droite.

Optimiser ?

Quelle longueur L donner à un tube de 100 mm de diamètre pour avoir une conductance de 450 l/s ?

Pour optimiser, il ne suffit pas de changer d'inconnue. En effet, α dépendant du rapport L/d, on ne peut donc calculer la longueur ou le diamètre depuis la conductance que par une suite d'itérations. On procède donc en plusieurs étapes :

- choisir Length comme inconnue, entrer la conductance et le diamètre souhaités, COMPUTE :
 - une longueur est calculée mais α est resté à la valeur précédente
- mettre la conductance en inconnue, COMPUTE :
 - α est actualisé, une nouvelle conductance est affichée, différente de celle souhaitée
- remettre Length en inconnue et la valeur souhaitée pour C, et recommencer.

A chaque pas on approche, jusqu'à encadrer la valeur de conductance souhaitée. Trois itérations sont en général suffisantes.

A chaque fois qu'on change d'inconnue, l'équation est réécrite en conséquence.

Un tube **LONG** n'ayant pas de α pourra être optimisé en une seule opération (v. E-2-b les limites d'utilisation de ce composant).

b) La pression en fonction d'un flux et d'une vitesse de pompage connus

Dans la fenêtre **Equations**, choisir dans le menu l'équation **GAZEOUS FLOW**. Le cadre apparaît.

Sélectionner la pression comme inconnue (•).

Entrer dans le colonne de droite les valeurs de flux gazeux et de vitesse de pompage effective connues. Cliquer COMPUTE, la valeur de la pression s'affiche dans le champs correspondant.

Optimiser : *quel flux max est acceptable pour que la pression ne remonte pas plus haut que 2.10⁻⁵ mb ?*

Sélectionner le flux comme inconnue (•).

Entrer la vitesse de pompage effective (connue).

Entrer la pression voulue, dans notre exemple 2.10⁻⁵ mb.

Cliquer COMPUTE, la valeur de la flux s'affiche dans le champs correspondant.

La fenêtre **Schema** est inutile dans ce cas.

c) Conductances en parallèle, en série

Pour calculer la conductance résultante de plusieurs conductances en série ou en parallèle, on procède en deux étapes.

Première étape :

- Déclarer tout les composants nécessaire dans le schema.

- Les documenter chacun comme pour le tube ci-dessus. A chaque fois qu'un composant est documenté, faire COMPUTE et <.

Deuxième étape :

- Dans la fenêtre **Equations**, ouvrir l'équation dont on a besoin, **CONDUCTANCES_PARALLEL** ou **CONDUCTANCES_SERIAL**.

- Renommer les différentes conductances selon leur nom dans les composants correspondants.

S'il y a autant de composants que de lignes proposées par défaut, utiliser le bouton **RENAME** pour entrer les bons noms dans tout les champs.

S'il y a plus, ou moins, de paramètres que de lignes disponibles, il faut éditer l'équation (bouton MODIFY) pour y supprimer les paramètres en surnombre ou ajouter ceux pour lesquels les champs manqueraient. On ne peut ajouter que des paramètre dont le nom existe ailleurs. Valider par le même bouton qui a changé de nom et est devenu APPLY

Attention : bien respecter la syntaxe, la casse en particulier. On est sous Linux pas sous Windows, Zut et zut ne sont pas équivalents ! Si le bouton Apply génère un message d'erreur, c'est signe qu'il y a une incohérence avec la syntaxe qu'attend Maxima ! On ne pourra pas fermer l'équation tant que l'erreur n'est pas corrigée ! Si nécessaire, ré-écrire l'équation d'origine, qui est restée inchangée dans son cadre.

Chaque fois qu'on clique sur Apply, les champs de valeurs locales sont abondés de toutes les valeurs portant le même nom et existant ailleurs.

Quand on a tout saisie, cliquer sur COMPUTE, le résultat s'affiche en colonne de droite.

3. Calcul d'un petit ensemble

a) Démarche générale

On va assembler l'enceinte décrite précédemment (C), et on veut connaître la pression stabilisée à temps long. Le montage comporte une enceinte, un tube, une vanne d'angle, un deuxième tube et la pompe.

On rappelle que les composants au sens de VST peuvent être des éléments « mécaniques » définis, tels que enceinte, pompes ou vannes, etc, mais aussi des éléments mécaniquement décomposés en tronçons correspondant à une équation les décrivant. Ainsi :

- Pour monter une pompe sur une enceinte, celle-ci doit presque toujours comporter un tube court.
- Une canalisation longue terminée par un coude pourra être décrite comme la succession d'un tube suivi d'un coude symétrique, ou comme un tube asymétrique de longueur égale à la longueur développée.
- 2 tubes de même diamètre bout à bout seront comptés comme un seul tube de la somme des longueurs.

Pensez à regarder l'orientation du composant, en bas à gauche, et à l'orienter correctement avant de le placer. Une fois en place, on peut déplacer le symbole mais on ne peut plus le tourner. Une erreur d'orientation du symbole ne changera évidement rien aux calculs... !

b) Étape 1 : Construction du schéma.

Sélectionner le composant **CHAMBER** l'orienter et le placer où on veut par un double clic G. Lui ajouter un premier **PIPE_MOLECULAR**, une **ANGLE_VALVE**, un deuxième **PIPE_MOLECULAR** et une **PUMP**.

c) Étape 2 : Documenter les composants

Une fois le schéma prêt, on dimensionne les composants.

CHAMBER

Pour le premier composant, garder les noms de variables par défaut. Choisir l'inconnue (•), ici le flux gazeux. Choisir ses unités préférée.

Indiquer en colonne de droite la surface interne et le taux de dégazage.

COMPUTE et si le premier résultat tient la route, le valider par <. Toutes les valeurs sont copiées dans la colonne de gauche et deviennent disponibles pour les autres équations.

S'il y a plusieurs matériaux ayant des taux de dégazage différents, il faut créer autant de composants **CHAMBER** que de matériaux. Par exemple un premier pour l'enceinte en inox, un deuxième pour tout les joints élastomère, un troisième pour l'ensemble des parties en céramique, etc.

PIPES-MOLECULAR

(PIPE) MOLECULAR correspond à un tube circulaire de toute longueur en régime moléculaire (air, 20°C), avec le coefficient de Clausing pour la correction de la conductance quand L/d devient petit.

Pour le premier tube, garder les noms par défaut. Choisir l'inconnue (•), ici la conductance. Choisir ses unités préférées... Indiquer en colonne de droite la longueur L et le diamètre d

ANGLE_VALVE

Ce composant n'a pas d'équation associée. Les valeurs sont par défaut globales (composants et équations). Il faut décocher la ligne du paramètre pour pouvoir écrire.

La données principale est la conductance, qu'on cherche dans la documentation du constructeur.

PIPES-MOLECULAR

Paramétrer ce deuxième tube de la même manière que le premier.

Si les diamètres sont les mêmes, on peut renommer celui du deuxième tube avec le même nom que le premier, la valeur sera reportée.

PUMP

Ce composant n'a pas non plus d'équation associée. La données principale est la vitesse de pompage. La donnée Pmin indique le vide limite intrinsèque à la pompe, donnée par le constructeur et peut être nécessaire pour le calcul de la pression limite du système. Les autres données (diamètre, Pmax) permettent juste de visualiser la cohérence de montage avec les autres composants.

d) Étape 3 : Choisir et configurer les équations globales

Le choix des équations est la question qui effraye souvent celui qui n'est pas à l'aise dans les calculs. Si on est dans le doute, le mieux est de commencer par l'équation la plus générale, qui donne le flux gazeux Q en fonction de la pression P et de la vitesse de pompage effective S_{eff} :

$$Q = P \cdot S_{eff}$$

Identifier ensuite ce qu'on cherche, ce qu'on connaît et ce qu'on ne connaît pas. Les équations nécessaires vont ressortir une à une de cet inventaire. On se rendra peut-être compte après coup qu'on aurait pu faire plus directement, mais ce sera ça de gagné pour l'apprentissage de la démarche.

Dans notre exemple, il faut deux équations : l'équation ci-dessus, et celle du pompage effectif qui dépend de la pompe et des conductances.

Dans le menus en haut à gauche de la fenêtre **EQUATIONS**, on choisi **GASEOUS_FLOW** et **PUMPING_RATE**. Les cadres correspondants s'ouvrent.

On documente l'équation GASEOUS_FLOW.

Choisir la pression comme inconnue (•).

Mettre à jour les noms des paramètre par le bouton **RENAME** : donner le nom du flux de **CHAMBER** ; ne rien changer aux autres noms.

Quand on fait APPLY, la valeur du flux de **CHAMBER** (calculé précédemment et y apparaissant en colonne de gauche) est abondée, en globale (colonne de gauche) et en local (colonne de droite).

On documente l'équation PUMPING_RATE.

La démarche est similaire aux conductances en série ou en parallèle (D-2-c), sauf qu'on a des conductances et une vitesse de pompage en entrée, et une vitesse de pompage en sortie.

Choisir la vitesse de pompage comme inconnue (•).

Mettre à jour les noms des paramètre : renommer la vitesse de pompage effective du même nom que dans **GASEOUS_FLOW**, les conductances et la pompe selon leur noms dans les cadres de composants. Selon le nombre de clignes nécessaires, procéder comme en D-2-c.

e) Étape 3 : Exécuter le calcul

Si on a tout bien fait ;-), on a des valeurs numériques dans tout les champs sauf ceux des inconnues. Avant de continuer, il est prudent de vérifier si les bonnes valeurs sont aux bons endroits.

Si une ligne a deux valeurs différentes, cela signifie qu'un calcul local a été fait et n'a pas été rendu disponible au global.

Si une case en colonne de droite contient un zéro, cela signifie que la calcul local n'a pas été fait. Vérifier si c'est un oubli ou si c'est volontaire.

Cliquer le bouton **SOLVE** tout en haut. Les deux calculs sont exécutés dans l'ordre nécessaire et les résultats s'affichent dans les deux colonnes de chaque inconnue.

S'il n'y a que deux équations, on peut aussi :

- Faire un **COMPUTE** local de Seff, valider en globale (<); le Seff calculé est abondé à gauche dans l'équation de la pression.

- Puis dans le calcul de la pression, valider les valeurs vers la droite (>), faire un COMPUTE local de la pression.

Pour pouvoir utiliser SOLVE, il faut :

- Que tous les champs de gauche non déclarés en inconnue contiennent une valeur non nulle. Une inconnue peut être présente dans deux équations comme ici Seff, inconnue de **PUMPING_RATE** et donnée de valeur encore inconnue de **GASEOUS_FLOW**.

- Qu'il n'y ait aucun bouton MODIFY en mode d'édition. Si c'est le cas, rien ne répond.

- Il peut arriver qu'après une série de modifications (valeurs, nom de paramètre, équation) le bouton **SOLVE** ne réponde pas. Essayer alors de faire un calcul local avec transfert à gauche des valeurs sur chaque équation, et/ou éditer et appliquer sans modifications les équations concernées.

f) Étape 4 : Optimisation

Les résultat obtenu indique la pression d'équilibre pour le dimensionnement et le flux décrit. On peut maintenant aller plus loin et optimiser la configuration.

Repérer le « point faible » du système : un flux trop élevé, une conductance trop faible, etc.

Regarder dans le cadre de composant concerné ce qui pourrait être modifié, et optimiser par des calculs locaux en changeant d'inconnue. Ce changement d'inconnue ne perturbe pas les résultats globaux précédent. Quand cela semble bon, on valider (<), puis mettre tout à jours le calcul global par un SOLVE général

Continuer de la même manière sur un autre composant jusqu'à ce que le système soit stabilisé.

- Pour que ce tube de tel diamètre ait au moins telle conductance, quelle est la longueur max possible ?
- Pour limiter le flux de dégazage, quel est le taux de dégazage max acceptable ?
- ou quelle est la surface max de joints élastomère possible ? ou quel gain en pression de mettre des joints métalliques, etc.

4. Aller plus loin : gaz et température

Toutes les équations de composants sont sous la forme simplifiée pour l'air à 20°C. Si les conditions sont différentes, on dispose d'équations de correction de la conductance selon le gaz ou la température. Elles peuvent être utilisées de manière autonome ou trouver leur place dans une chaîne de calcul.

a) Calcul à partir d'une conductance connue (air, 20°C)

Connaissant la conductance pour l'air, pour avoir la valeur correspondante pour un autre gaz déclarer une équation **GAZ_CORRECTION** :

- Entrer le nom du gaz réel et sa masse molaire.
- Mettre en entrée le Seff ou le C connu pour l'air.
- COMPUTE.

Pour la température, la démarche est la même. On n'utilise pas la fenêtre **Schema** dans ce cas.

b) Correction dans une chaîne de composants et d'interactions

On a calculé le vide limite d'une installation pour l'air. On veut refaire le calcul pour un autre gaz (une autre température). On dispose donc des équations de la somme des conductances calculées pour l'air, des caractéristiques de la pompes pour l'air, du calcul de Seff et de l'équation du flux.

L'équation de correction de gaz ne concerne que les conductances. Pour estimer correctement Seff, il faut utiliser la vitesse de pompage de la pompe pour ce gaz donnée par le constructeur.⁵.

Dans la fenêtre S**chema**, ajouter une nouvelle pompe. Dans son cadre, indiquer sa vitesse de pompage pour le gaz concerné.

Dans la fenêtre **Equations**, ouvrir 3 nouvelles équations :**GASEOUS_FLOW**, **PUMPING_RATE**, et **GAZ_CORRECTION**

Dans **GAZ_CORRECTION** :

- Renommer l'entrée selon le nom de la somme des conductances déjà calculée ; la valeur est actualisée.
- Renommer la sortie « Seff_ nomGaz ».

- Entrer le nom et la masse molaire du gaz. Si ce gaz a déjà été indiqué dans **CHAMBER**, il suffit d'utiliser le même nom et la masse molaire sera mise à jour.

- COMPUTE + flèche vers la gauche <.

En utilisant <, on copie les valeurs de la colonne « valeurs locales » vers la colonne « valeurs globales » c'est à dire disponibles pour toutes les équations.

Dans **PUMPING_RATE**, renommer les paramètres :

- Seff_Fx garder le nom par défaut ; x = numéro de création de l'équation.
- Donner le nom de la conductance corrigée pour le nouveau gaz.
- Donner le nom de la deuxième pompe ; la valeur pour le gaz est actualisée.
- RENAME.
- Éditer l'équation (MODIFY) et y supprimer ce qui est inutile.
- COMPUTE + flèche vers la gauche <.

Dans GASEOUS_FLOW :

⁵ Si on ne dispose pas de cette donnée et pour avoir des ordres de grandeurs, on peut se baser sur une pompe de même type (diffusion, turbo, ionique), de même époque et de même vitesse de pompage nominale d'un autre fabricant.

- Mettre la pression en inconnue.
- Entrer la valeur du flux ou le renommer selon le composant **CHAMBER** existant.
- Renommer Seff selon le **PUMPING_RATE** ci-dessus.

Cliquer sur **SOLVE** les calculs s'enchaînent et le résultat s'affiche en colonne de gauche.

On a alors dans projet trois parties : la liste des composants, les calculs de comportement pour l'air et (sur la même base) les calculs pour un autre gaz. Il suffit de changer la masse molaire et d'actualiser, et on peut comparer différents gaz avec l'air. Une limitation est la connaissance des performances de la pompe pour le nouveau gaz.

Aux deux premières étapes, on aurait pu ne faire que <, et pas de COMPUTE. Du moment qu'il n'y a que les inconnues qui n'ont pas de valeur dans la colonne de gauche, SOLVE va enchaîner les calculs pour résoudre toutes les équations.

5. Aller plus loin : Plim et modification d'équation

Les équations peuvent être éditées et modifiées. Si par exemple on utilise une pompe à diffusion d'huile, le vide limite de la même pompe change selon l'huile utilisée (par exemple une Edwards EO4 chargée à la DC 704 ou à la Santovac 5). Un premier calcul ne prenant en compte que la vitesse de pompage nominale de la pompe donne par exemple un vide limite de 2.10⁻¹⁰ mb. Mais les spécifications nous disent qu'avec la DC704, le vide limite de la pompe est de 2.10⁻⁹ mb.

A la saisie des données, cette valeur a été entrée dans la description de la pompe sous « pmin_Px ».

Pour prendre en compte cette limite dans le calcul de la pression finale, il faut modifier l'équation du flux **GASEOUS_FLOW**. Pour se faire, sélectionner la pression comme inconnue, puis cliquer sur **MODIFY** de l'équation. Le champs de saisie passe en mode d'édition. Y ajouter, après la partie existante : « + pmin_Px » (en respectant la syntaxe du nom du paramètre dans **PUMP**), puis Apply.

Une ligne avec pmin_Px est ajoutée, avec dans les 2 colonnes la valeur donnée dans PUMP. L'équation devient :

$$P_F1 = \frac{Q_F1}{Seff_F1} + pmin_P1$$

Si on recalcule la pression à l'équilibre, on voit que la pression limite de la pompe prend le pas sur la pression théorique donnée par l'équilibre entre flux entrant et flux sortant et on a 2.10⁻⁹ mb. Il ne sert donc à rien d'optimiser la ligne de pompage, il faut changer de type d'huile !

6. Calcul d'un gros ensemble

VST est un code très léger, on peut sans risque démarrer plusieurs instances de VST simultanément. Il faut juste avoir un écran suffisamment grand pour ne pas mélanger les fenêtres, ou utiliser des bureaux (Linux) différents. Pour des calculs importants, comportant par exemple beaucoup de composants à dimensionner, il peut être judicieux de fractionner les questions et de les traiter par bouts, dans des run indépendants, couronnés par un run de synthèse.

- Un premier run va se concentrer sur toutes les sources de flux. Le composant **CHAMBER** peut aussi bien décrire une *enceinte* et son dégazage, ses *joints*, son *contenu*, une *vanne de fuite* d'entrée de gaz, un *procédé* ou encore le dégazage de *jauges Bayard-Alpert* et d'un *RGA*, d'une *vanne tiroir*.

On déclare donc autant de **CHAMBER** que de sources de gaz et on les documente avec la surface et le taux de dégazage, ou avec une valeur de flux connue.

Pour faire la somme des flux, on a deux solutions :

- Modifier l'équation correspondant à la chambre principale (Q_E1) en y ajoutant les noms des flux des autres cadres CHAMBER déclarés (+ Q_E2 + Q_E3, etc).

- Ou créer une équation de la somme de flux. On ouvre une **GENERAL EQUATION**. On édite le champs équation et on y écrit l'équation de la somme des flux. On garde le nom par défaut de ce qui sera le résultat, et on remplace les autres noms par défaut par ceux des flux des différents composants **CHAMBER** déclarés. Avec **APPLY**, toutes les lignes nécessaires sont actualisées et abondées des valeurs provenant des composants.

- Dans un deuxième run, on va déclarer toutes les canalisations, de l'enceinte à la pompe, mais sans cette dernière. On choisi donc l'équation **SERIAL_CONDUCTANCE**⁶.

- Enfin un troisième run n'aura pas de composants et utilisera les équations Gaseous **FLOW** et **PUMPING RATE**. On y introduit en colonne de droite les résultats obtenus dans les calculs précédents, soit la somme des flux de gaz, la somme des conductances et la vitesse de la pompe, on les passe en colonne de gauche (bouton <), puis on fait un **SOLVE** global.

⁶ Voir à ce sujet le chapitre F, Conductances en série

Il aurait été possible de calculer Seff à la deuxième étape, ce qui n'aurait nécessité que Gaseous_**FLOW** à la troisième, mais la première manière de procéder permet d'introduire plus simplement la correction de gaz, si nécessaire. Pour cela, on peut dédoubler les deux équations de la 3^{ième} étape, ajouter celle de correction du gaz, et paramétrer les équations pour le gaz en parallèle de celles pour l'air.

Sur la base des mêmes données en entrée, on obtient les résultats pour l'air et pour le gaz retenu, l'une au dessus de l'autre. Il faut renommer judicieusement les paramètres pour avoir des sources communes ou distinctes selon le paramètre.

E) Guide de référence :

Cette partie regroupe le maximum d'informations sur les outils et leur utilisation. Il y a donc certaines redites de ce qui a été présenté précédemment (mais en général plus détaillées) et/ou des renvois.

щ.		VST	2.0.0 - Schema	
<u>F</u> lle	Components	Equations	□ Grab □ Short Bend □ SmartDisplay	Help
Chamber Pump Opening Reduction Angle benc Valve AngleValve Pipes Molecular (long) Intermediat Laminar		E1	P1 T2	
Q			.fonc.c	

1. La fenêtre schema et ses outils

Barre du haut, de gauche à droite.

• Le menu FILE donne accès aux fonctions suivantes :

• SAVE et LOAD sauve et ouvre un projet. La sauvegarde enregistre la séquences des commandes tcl qui, à la ré-ouverture (LOAD), vont générer les objets correspondants. A la ré-ouverture, une limitation de la programmation fait que les cadres de composants et d'équations ne réapparaissent pas dans l'ordre dans lequel ils étaient placés au moment de la sauvegarde. Il est donc nécessaire de les redisposer dans l'ordre souhaité à l'aide des flèches de déplacement des cadres. Il peut être utile de faire une copie d'écran des 3 fenêtre, avec tout les composants et les équations repliés. On ne voit que les bandeaux avec les noms.

Dès qu'on a exporté le projet, le nom de générique des fenêtres (Schema, Components, Equations) dans le bandeau des fenêtre est remplacé par le nom du projet. En revanche, si on ré-exporte le projet, il faudra soit sélectionner le nom existant dans la fenêtre de sauvegarde et confirmer l'écrasement de l'ancie fichier, soit donner un nouveau nom.

• **EXPORT** sauve toutes les données et résultats des calculs d'un projet. Cette fonction génère un fichier texte contenant la liste de tout les composants et équations utilisés, avec pour chacun les noms des paramètres, l'équation locale, les valeur entrées et calculées.

Ci-dessous un extrait d'un fichier d'export. Le nom de composant ou d'équation est rappelé ainsi que l'équation elle-même. L'inconnue est précédée de *. La mise en forme actuelle du fichier est clairement perfectible ! Il est donc conseiller de l'ouvrir de suite et de le « nettoyer » et l'annoter.

Avant un export final, quelques précautions sont utiles :

- Eliminer du projet les composants qui n'ont pas servi et dont pense ne plus avoir besoin.

- Nommer d'un nom évident les équations qui n'ont pas servi (on ne peut à l'heure actuelle pas les éliminer du projet).

- Partout où c'est nécessaires, basculer les valeurs du local au global et inversement (boutons > et/ou <) pour éliminer des valeurs non significatives.

Il faut qu'à la relecture il soit clair si on doit lire la colonne locale (droite) ou globale (gauche) ou indifféremment l'une ou l'autre. Dans le doute un indice permettant de décider est la présence de « 0 » dans une colonne, qui indique qu'elle n'a pas été utilisée.

Une fois l'export effectué, pour rendre plus utilisable pour plus tard :

- L'ouvrir (éditeur de texte, vi, zim, etc) et le nettoyer de ce qui est inutile (composants et équations présents mais non utilisés).

- Remettre les composants et équations dans l'ordre souhaité. Mais le champs "Id xx" en première ligne donne le numéro de nomenclature (unique) de chaque composants ou équations et permet un reclassement selon l'ordre de création. Une solution pour conserver la mémoire du classement à l'utilisation est de réduire tout les composants et équations et de faire une copie d'écran. On ne voit alors que les bandeaux, avec la liste des noms dans l'ordre.

- Commenter les résultats.

En fin de simulation, on peut avoir beaucoup de fichiers d'export ; il peut être utile d'en fusionner certains, avec tout les commentaires qu'on pense utile.



Un outil complémentaire très utile est l'éditeur Zim⁷, éditeur de texte léger, permettant de la mise en page élaborée (gras, italiques, tableaux, image, équation LaTex etc) tout en sauvegardant en format texte. Chaque fichier d'export (au format txt) peut directement devenir une sous-page Zim, correspondant à une étape du projet global. Un fichier maître sera le log, qu'on documente au cours des calculs.

On pourra y inclure la copie d'écran avec l'ordre des cadres du projet.

• QUITTER le logiciel. C'est le chemin normal pour quitter le logiciel. Bien sur, un Crtl-C dans le terminal ou un kill -9 PID sont toujours possible ! Les croix des fenêtres sont inopérantes pour éviter le risque d'en fermer une accidentellement et de ne plus pouvoir la ré-ouvrir !

• Les boutons COMPONENTS et EQUATIONS permettent de faire passer à l'avant plan les fenêtres correspondantes.

• La case GRAB est une sécurité lors de la modification d'une équation. Il interdit de laisser l'équation non finalisée en attente d'un APPLY (risque de plantage de Maxima). Coché, on ne peut pas intervenir ailleurs que dans le champs d'une équation tant qu'elle est en mode Modify. On ne peut en particulier pas déplier ou replier un cadre ou utiliser les ascenseurs, ce qui peut être gênant quand on cherche le nom exacte d'un paramètre. Si on est à l'aise avec l'écriture des équations, on peut la laisse décochée par défaut.

• Le bouton SHORT BEND permet de choisir entre un petit dessin ou un grand dessin du coude.

• Le bouton SMART DIPLAY détermine le type d'affichage des équations. Il fait basculer de l'affichage des équations en ASCII à un affichage LaTeX, plus élégant. Il est conseillé de cocher cette case tant qu'on est en phase de prise en main du logiciel. La lecture des équations est facilitée et permet de gagner en confort le temps de mémoriser les équations. Une fois qu'on a le logiciel en mains, la lecture de l'écriture ASCII, est plus pratique identique à celle de la saisie lors d'une modification d'équation.

Toute nouvelle équation sera affichée en ASCII si la case est décochée, en LaTeX si elle est cochées. Si des équations sont déjà affichées et qu'on modifie l'affichage, tout nouvel élément suivra la modification, les autres

⁷ Zim : <u>www.zim-wiki.org/index.html</u> ; en.wikipedia.org/wiki/Zim_(software)

restant dans leur état. Pour les rafraîchir, il faut les revalider un à un par MODIFY/APPLY de l'équation, sans rien y changer, ou un RENAME/APPLY des paramètres, dans chaque cadre. On peut donc par moment avoir un mélange des deux affichages.

A noter que Maxima impose sa façon d'écrire les équations, optimisée pour le calcul, et qui n'est pas forcément l'écriture la plus familière, visuellement.

• Le bouton HELP propose l'accès à différentes sources documentaires. WEB PAGE : pointe sur la page web

de Fabrice Maingot de la Grassière. On y trouve des liens vers la documentation (ce manuel, quelques vidéos de prise en main, etc) et les coordonnées de contacts des auteurs.

Les vidéos faisant grossir l'archive du code ne sont pas automatiquement fournies avec lui. Pour que les liens soient fonctionnels, créer un sous-répertoire Docs/Videos/ et les y mettre. Si un lien symbolique brisé "videos" existe dans ce répertoire, le supprimer. On peut aussi mettre les vidéos ailleurs et reparamétrer le lien symbolique.

Le mode d'emploi (ce document) sera actualisé au fil des retours des utilisateurs. Si on dispose d'une nouvelle version, la copier dans VST_version/Docs/ et la renommer « user_manual.pdf » à la place de l'existant. Elle sera alors accessible directement par HELP/User_manual

Panneau de gauche

Le panneau de gauche comporte deux groupes de composants ainsi que les commandes pour orienter les symboles sur le schéma :

- Le groupe de boutons du haut regroupe les composants de bases : Chamber, Pump, Opening, Reduction, Angle_Bend, Valve et Angle_Valve.

- Le groupe du bas regroupe tout les tubes circulaires dans différentes configurations (régime, longueur).

- Tout en bas, deux boutons et une imagette permettent d'orienter les composants.

Pour ajouter un composant, on le sélectionne par simple-clic gauche (le bouton du composant devient orange) et on l'oriente comme on le désire. Il faut l'orienter *avant de le placer*. Une fois placé, on peut le déplacer mais plus le ré-orienter.

Le bouton V/H permet de le tourner d'un quart de tour. Le bouton +/- le fait basculer haut/bas. Le petit cadre sous ces boutons montre l'aspect et l'orientation du symbole du composant sélectionné.

On place alors le composant à l'endroit souhaité du canevas de travail par un double-clic gauche. Chaque fois qu'on ajoute un composant, le cadre de description correspondant s'ajoute dans la fenêtre **Components**.

Un double-clic droit sur le dessin d'un composant permet de l'effacer. Le cadre de composant correspondant est effacé en même temps de la fenêtre **Components**.

Les composants sont numérotés dans l'ordre de leur création. Leur nom est composé de l'initiale du type de composant suivi du n° d'ordre de création de ce composant. Ainsi E1 pour la première enceinte créée (E comme Chamber, n'est-ce pas ! ⁸)

L'effacement d'un composant ne libère pas son numéro, qui reste occupé jusqu'à fermeture et réouverture de VST.

On a intérêt à commencer le schémas sur le coté gauche du champs de dessin, pour pouvoir réduire la fenêtre depuis la droite par après. Des curseurs permettent de se déplacer dans le champs de dessin.

Il est possible de faire plusieurs dessins indépendants dans la même fenêtre, ou des variantes avec parties communes et parties propres. Ce sont les noms de paramètres dans les équations qui vont lier les composants entre eux pour le calcul, et pas les dessins. Ces derniers ne sont là que comme support et mémo, pour visualiser ce qu'on a introduit et vérifier facilement qu'on n'a rien oublié.

2. Fenêtre composants

a) Les outils de la fenêtre Components.

Exemple pour un coude à angle droit en régime moléculaire, BEND.

La copie d'écran ci-dessous montre la fenêtre **Components**, avec 5 composants déclarés, dont seul le composant BEND (rectangle orange) est visible en entier. Les cadres des 4 autres sont repliés, 3 au-dessus de BEND, 1 en dessous. Les encadrements en couleur de la copie d'écran sont là pour faciliter la compréhension de ce ModOp ; ils n'apparaissent pas dans le logiciel.

Le bandeau de titre de chaque cadre reste visible quand il est replié. On y trouve de gauche à droite :

⁸ Mais C est déjà pris par ... Conductance ! De même on aura T1 pour Tube1, avec T comme... Pipe, ou... Pression etc. Le mélange de l'anglais et du français (qui ferait rugir certains défenseurs de la francophonie) a dû être utilisé pour éviter les doublons prêtant à confusion comme Pressure et Pipe, Speed et Surface, etc. et ne pas avoir des noms à rallonge. J'ai bien pensé à l'Alsacien, mais on aurait traîné des sch, des ü et ä... !

- Deux FLÈCHES HAUT/BAS permettent de déplacer le cadre vers le haut ou vers le bas dans la fenêtre, pour les avoir dans l'ordre souhaité.

- Une case √ permet d'afficher ou de réduire le cadre.

- Le n° *de nomenclature*, figé, du cadre, suivi du nom en toutes lettres du *type* de composant (figé). Le n° *de nomenclature* est formé de l'initiale du type de composant et du n° d'ordre de création dans cette famille.

- Le *nom propre* du composant, modifiable par l'utilisateur à l'aide du bouton **RENAME** tout à droite. Quand on le clique, le champs d'écriture devient accessible, et le bouton change de nom et devient **APPLY**

Il est utile de renommer le composant de suite à sa création, mais on peut aussi placer tout les composants, les réduire et les renommer alors l'un après l'autre. Ce renommage sera une aide précieuse pour la lecture du fichier d'export d'un projet, ou lorsqu'on ouvre un projet pour continuer à y travailler. Il est bien sûr possible de renommer à tout moment.

				VST	2.0.0 - Co	mponents	
					COMP	ONENTS	
⊂ E1	CHAM	IBER	Chambe	erl			Rename
с ті	MPI	PE	Molecul	arl			Rename
Val	AVA	LVE	Angleva	lvel			Rename
₽ B1	BEN	ND	Angle be	endl			Rename
	PAF	AMETERS					
		K_T	12.1	l/s/cm²		C_B1 = K_T*D_B1^3/(L_B1+K_B*D_B1)*alpha_	Modify
		K_B	1.55	-	, 	3	
Conductance	۰	C_B1	23	2.99	l/s	D_B1 K_T alpha_B1 C B1 =	
Diameter	C	D_B1	10	50	mm	L_B1 + D_B1 K_B	
Axial length	0	L_B1	150	5000	mm		
f (L,D)	C	alpha_B1	0.875	1	-		
		Rename	>	<		Compute	
_ ⊤ T2	MPI	PE	Molecul	ar2			Rename

Le cadre comporte 2 grandes parties :

A droite, la zone encadrée en vert contient l'équation et ce qui s'y rapporte.

- En haut, le champs d'éditions de l'équation, avec son bouton d'entrée (MODIFY) et de validation (APPLY). Il permet de modifier l'équation. Voir plus loin pour cette opération.

- Le cadre central affiche l'équation, par défaut en ASCII et en syntaxe Maxima. Voir le bouton Smart_DISPLAY de la fenêtre S**chema** pour la gestion de l'affichage des équations.

- Le bouton **COMPUTE** exécute un calcul local, en utilisant les valeurs présentes dans le colonne de droite de l'encadré rouge. Le résultat s'affiche au même endroit, sur ligne du paramètre déclaré comme inconnue.

En haut à gauche, la zone encadrée **en violet** contient soit des constantes utilisées dans les équations (valeurs figées ; pas de nom ni de case à cocher en début de ligne), soit des informations sur le composant (modifiables ; nom, point • et case à cocher en début de ligne).

En bas à gauche, la zone encadrée **en rouge** regroupe les paramètres du composants et les champs de saisie des valeurs et d'affichage des résultats. De gauche à droite, on a :

- La colonne des noms de paramètres entrant dans l'équation.

Une colonne de cases à cocher, qui permet de sélectionner l'inconnue de l'équation. Par défaut, le paramètre le plus fréquemment recherché est sélectionné (flux gazeux, conductance, vitesse effective, etc.). Le point • est exclusif, il ne peut y avoir qu'une seule inconnue (alors que les coches à coches v sont indépendantes l'une de l'autre). Le changement d'inconnue provoque la ré-écriture de l'équation, de manière à toujours avoir l'inconnue à gauche du signe d'égalité.

- La colonne des noms symboliques des paramètres tel qu'utilisés dans les équations,.

- Deux colonne orange et grise avec des valeurs, expliquées ci-après.

- La colonne des unités.

Sous ces colonnes apparaissent 3 boutons, de gauche à droite :

-Le bouton **RENAME** permet de changer les noms de paramètres. Pendant la modification il est remplacé par un bouton **APPLY**. On peut ainsi donner le même nom aux diamètres de plusieurs composants (tubes, orifice, pompe). Le changement de la valeur à un endroit sera reportée dans tout les champs globaux de même nom ; le champs local reste inchangé tant qu'on ne valide pas avec les flèches⁹.

- Les *flèches* \geq *et* \leq en dessous des colonnes copient les valeurs de la colonne de gauche vers celle de droite ou réciproquement, soit du « global » (gauche) au « local » (droite) ou le contraire. On peut ainsi optimiser la valeur d'un paramètre par une série de calculs locaux (sans interférer avec les autres composants et équations), puis en basculer le résultat vers le global. Réciproquement on peut basculer une valeur issue d'un calcul global vers le local et là recalculer une autre valeur locale de ce composant (cas d'une optimisation).

- La *colonne de valeurs* (fond orangé) est donc « globale ». Son contenu est disponible et reconnu par tous les autres systèmes d'équations, du moment qu'il est fait appel au même nom de paramètre. On ne peut pas y écrire directement. Son contenu est abondé depuis la colonne de droite (fond gris claire) par la flèche vers la gauche <, ou par une autres équations ayant un paramètre de même nom.

- La *colonne de droite* (fond gris clair) est « locale ». Elle est associée au cadre vert et à l'équation qui y est affichée. C'est là qu'on saisi les données soit en écrivant dans le champs, soit en y transférant le contenu de la colonne de gauche (globale) par la flèche vers la droite >. C'est aussi là qu'apparaîtra le résultat d'un calcul local.

- Un clic_gauche sur les UNITÉS ouvre un menu qui permet de choisir l'unité souhaitée. Par défaut, on trouve les unités (historiquement) les plus habituelles (mm, l/s, hPa, etc), puis sont proposées les unités SI, puis d'autres moins courantes. Le mb est remplacé par le hPa, le Torr est au musée :-(sniff ! Au changement d'unité, une valeur dans le champs sera convertie dans la nouvelle unité.

b) Les composants

On distinguera deux familles de composants, ceux avec équation et ceux sans équation. Il seront décrit dans ce qui suit dans l'ordre du bandeau de la fenêtre **Schema**. Un tableau ci-dessous rappelle les symboles utilisés pour le dessin, l'équation de chaque composant et les paramètres à abonder.

• **CHAMBER** : Ce composant décrit en premier une enceinte avec toutes ses surfaces internes. Son équation donne le flux gazeux en fonction de la surface et du taux de dégazage dans les conditions de la simulation.

D'une manière plus générale, ce composant servira à décrire *toute source de gaz*, le dégazage, la perméation d'un matériaux, l'introduction d'un gaz de procédé, etc.

On peut préciser le nom du gaz et sa masse molaire. Pour ce faire, décocher le point et donner les initiales ou la formule chimique du gaz et sa masse molaire. La correction de la conductance en fonction du gaz est dans les équations générales et peut faire appel à cette donnée.

Si on veut inclure le flux de dégazage d'une jauge BA ou l'introduction d'un gaz de procédé, on entre juste la valeur dans colonne de droite de la ligne flux.

On ne fait alors pas de **COMPUTE**, les valeurs des autres champs n'ayant pas de signification. Cela produirait un résultat faux à la place de la valeur qu'on vient d'entrer, ou, si les autres champs sont vide, cela génère un message d'erreur.

• **PUMP** : Le composants pompe n'a pas d'équation associée. Les paramètres sont par défaut globaux. Il faut décocher la case pour pouvoir écrire. La données principale de **PUMP** est sa vitesse de pompage. Le Pmin correspond à la pression limite que peut faire la pompe (dans les conditions de la simulation). Pour l'utiliser, il est nécessaire de modifier l'équation du flux selon :

$$P = \frac{Q}{S_{eff}} + P_{lim}$$

Les autres données (diamètre, Pmax) permettent de visualiser la cohérence de montage avec les autres composants. Elles ont été inclues initialement pour permettre des tests automatiques, non implémentés à ce jour.

On peut faire un usage détourné de ce composants ou de certains de ses paramètres pour fournir des noms de paramètres lors de l'écriture d'une **GENERAL_EQUATION** (v. § E-3-f)

• **OPENING** : L'ouverture est dans son principe un tube de longueur nulle. Le paramètre principal de l'ouverture est sa conductance, liée à sa surface. On rappelle que la conductance d'une ouverture est la conductance maximale que peut atteindre un « tube » de même diamètre et de longueur tendant vers 0.

⁹ Si on veut redonner des noms différents, il faut respecter une procédure décrite plus loin.

• **RÉDUCTION** : le paramètre principal de la réduction est sa conductance, liée à la différence entre la surface bloquant le passage et celle libre au passage. Comme pour l'ouverture, on saisit les diamètres et la surface est calculée dans l'équation associée. D0_R1 est le grand diamètre, D_R1 le petit.

• **ANGLE_BEND** : le coude considéré est un coude à angle droit. Sa conductance est assimilée à celle d'un tube qui aurait une longueur plus grande d'un facteur 1,33 x le diamètre. On considère qu'une molécule ne peut en aucun cas traverser le coude sans se coller au moins une fois sur la parois.

On n'a pas fait la différence entre un coude à angle droit et coude en arc de cercle.

• VALVE, ANGLE VALVE : comme la pompe, les vannes n'ont pas d'équation associée. Leurs paramètres sont par défaut globaux. Le paramètre essentiel est évidement la conductance, à chercher dans la documentation du fabricant. Il est prudent de lire d'un œil critique les données constructeur et de comparer les valeurs fournies pour différentes vannes similaires. Des simulations MolFlow nous ont fait constater des écarts conséquents non expliqués. Erreur de typo du catalogue, approximation rapide dans le calcul, mesure de conductance réelle mal faite ? L'erreur constatée était tout de même d'un facteur 2.

• La famille des **PIPES** regroupe les tubes dans les différents régimes découlements.

En régime moléculaire

On dispose de 2 équations. Pour simplifier les explications, nous les considérerons dans l'ordre inverse de ce que propose le menu. Voir pour plus de détails la partie F-1.

• (PIPE) LONG (dans le menu), MPIPEL (dans le cadre) calcule la conductance du tube sur la base de l'équation de Knudsen (v. tableau ci-dessous). Cette équation n'est valable que si L/d > 20.

L'intérêt de disposer de cette équation est double. D'une part, si L/d > 20, elle permet d'optimiser en une seule opération, sans avoir besoin de faire d'itérations (v. § D-2-a). D'autre part, d'un point de vue conceptuel elle permet de calculer la conductance du tube court en l'associant à une ouverture (v. § F-1).

• (PIPE) MOLECULAR (dans le menu), MPIPE (dans le cadre) utilise la même équation que LONG, mais en incluant un coefficient qui a pour fonction de faire tendre la conductance calculée vers celle de l'orifice de même diamètre quand la longueur diminue. Sans cette correction, la conductance tendrait vers l'infini pour une longueur nulle. Pour plus de détails sur le coefficient dit de Clausing, voir en partie F-1. C'est l'équation de tube qu'on utilise le plus souvent.

Comme décrit au paragraphe D-2-a, comme le coefficient α dépend de L/d, l'optimisation des dimensions de ce composant demande une approche par itérations.

• Si on a un **conduit de forme non circulaire**, il existe des équations dites « section de tout profil » qui ne sont pas implémentées dans VST. Il faut donc calculer la conductance à part (MolFlow, mesures, calculs), et on peut l'intégrer de deux manières :

- Utiliser un tube long et entrer la valeur connue dans la ligne conductance en colonne de droite, puis la valider par la flèche vers la gauche. On ne remplit pas les autres champs et on ne fait pas de COMPUTE comme dans le cas de l'ajout d'un flux par une enceinte fictive.

- Utiliser un composant dit **JOKER**, c'est à dire un composant sans équation détournée de son usage initial, comme une vanne ou une pompe. Cette manière de faire évite le risque d'introduire une erreur par un COMPUTE « reflex » non désiré. Il faut juste se souvenir que le nom est trompeur.

Ceci peut aussi s'appliquer au soufflet (tombac). Un article (Krause et Wolff) donne une méthode pour en calculer la conductance selon ses diamètres et sa longueur. On la calculera à part et on en introduira le résultat comme cidessus.

En régimes visqueux laminaire et intermédiaire

• (PIPE) LAMINAR décrit, comme son nom l'indique, un tube en régime visqueux laminaire en fonction du diamètre, de la longueur et de la pression moyenne. Il convient de bien cerner les bornes de ce qu'on veut calculer pour choisir le Pmoy. Il est rappelé que cette équation n'est valable que si le régime d'écoulement est le même sur toute la longueur du tube et ne change pas pendant la variation de pression considérée.

Dans une situation de pompage avec une pompe primaire (palette, scroll), la pression stabilisée va dépendre de l'équilibre entre flux et vitesse de pompage, qui est déterminé par les caractéristiques de la pompe utilisée. Ceci est particulièrement critique dans le domaine où on passe du visqueux laminaire au régime intermédiaire. Il est donc utile de disposer de la courbe S=f(P) de la pompe, pour veiller à la validité de cette équation, ou à la nécessité d'utiliser celle pour le régime intermédiaire.

Un soufflet sera assimilé à un tube cylindrique. En cas de haut débit à pression élevée, le régime peut devenir turbulent et cette équation n'est alors plus valable. • (PIPE) INTERMEDIATE utilise l'équation initiale de Knudsen dite « tout régime », simplifiée pour l'air à 20°C (Delafosse et Mongaudin Eq 3.32 et 3.34). Elle est surtout intéressante dans le régime intermédiaire et il est nécessaire de la confronter en extrémité de domaine à celles du régime moléculaire et du régime visqueux laminaire.

Pour accommoder les différents régimes, elle utilise un coefficient J qui dépend du produit d*Pmoyen, indépendant de la longueur (équation ci-dessous). En régime moléculaire, J = 1; on retrouve l'équation du tube **LONG**

Attention : contrairement à l'équation du tube en régime laminaire, le Pmoyen est à introduire dans une case réservée sur les autres tubes aux constantes (et dans ces cas non modifiable). Il faut décocher pour entrer la valeur. Comme il est placé actuellement, on a tendance à l'oublier, ce qui peut fausser considérablement les résultats.

Composant (en français)	Nom (dans le code)	Symbole	Equation	Paramètres et Constantes
Enceinte /	CHAMBER	\forall	$Q = S \cdot Tau$	Flux de dégazage Surface interne Taux de dégazage
Pompe /	PUMP	\bigcirc	Pas d'équation	Diamètre nominal Vitesse de pompage Pression min Pression max
Ouverture /	OPENING		$C = 11.6 \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4}$	Conductance Diamètre Constante de correction pour l'air à 20°C
Réduction /	REDUCTION		$C = 11.6 \cdot A \cdot \frac{A0}{A0 - A}$	Conductance Grand diamètre Petit diamètre Constante de correction pour l'air à 20°C
Coude à angle /	ANGLE BEND		$C = 12.1 \cdot \frac{d^3}{l + 1.33 \cdot D} \cdot \alpha$	Conductance Diamètre Longueur (α) Constante de correction pour l'air à 20°C
Vanne (droite) –	VALVE	\boxtimes	Pas d'équation	Conductance Diamètre
Vanne d'angle /	ANGLEVALVE AVALVE	\triangleleft	Pas d'équation	Conductance Diamètre
Tube de toute longueur en régime moléculaire	(PIPES) MOLECULAR MPIPE		$C_t = 12.1 \cdot \frac{d^3}{l} \cdot \alpha$	Conductance Diamètre Longueur (α) Constante de correction pour l'air à 20°C
Tube long en régime moléculaire	(PIPE) LONG MPIPEL		$C_t = 12.1 \cdot \frac{d^3}{l}$	Conductance Diamètre Longueur Constante de correction pour l'air à 20°C
Tube tout régimes	(PIPE) INTERMEDIATE		$C = 12.1 \cdot \frac{d^3}{l} \cdot J$	Conductance Diamètre Longueur Pmoyen (J, f(d.Pmoy)) Constante de correction pour l'air à 20°C

Composant (en français)	Nom (dans le code)	Symbole	Equation	Paramètres et Constantes
Tube en régime laminaire	(PIPE) LAMINAR		$C = 182 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot P_{moy}$	Conductance Diamètre Longueur Pmoyen Constante de correction pour l'air à 20°C
J : coef. d'adaptation à tout régime		$J = \frac{1 + 271 \cdot I}{2}$	$\frac{D \cdot P_{moy} + 4790 \cdot (D \cdot P_{moy})^2}{1 + 316 \cdot D \cdot P_{moy}}$	Diamètre Pmoyen
Joker	JOKER	Ce composant n'existe pas en tant que tel. C'est le nom donné aux composant sans équation détournés de leur usage d'origine.		

3. Fenêtre équations

L'organisation générale est du point de vue visuel très similaire à la fenêtre **Components**, avec la même organisation entre le local et le global. On retrouve des bouts de fonctionnements identiques mais le fonctionnement général en est en revanche fondamentalement différent.

a) Les outils de la fenêtre Equations

De gauche à droite dans le bandeau supérieur :

• Le bouton **EQTYPE** ouvre un menu qui propose une liste d'équations. Le tableau ci-dessous passe en revue ces équations. La sélection d'une équation provoque l'ouverture du cadre correspondant.

• Le bouton **SOLVE** déclenche le calcul de toutes les équations globales ayant une inconnue non résolue, en utilisant exclusivement les valeurs globale (colonne de gauche).

• Le bouton SYSMAP à droite ouvre une fenêtre qui résume tout les paramètres globaux des équations de comportement¹⁰. Les paramètres sont présentés sous la forme d'un tableau, un + indique la présence du paramètre dans l'équation, un – son absence ; les inconnues sont en rouge, les données en noir.

Les valeurs sont abondées au fur et à mesure qu'on valide des calculs (<), ou lorsqu'on fait un SOLVE général. Cette fenêtre a aussi son bouton SOLVE.

b) Les équations par défaut

Le tableau ci-dessous recense les équations proposées. Ce sont les équations de base les plus utilisées. Si d'autres s'avèrent nécessaires, elles pourront être ajoutées dans une version ultérieure de VST.

GASEOUS FLOW	$Q = P \cdot S_{eff}$
PIPE FLOW (avec i : initiale et f : finale)	$Q = C \cdot (P_f - P_i)$
CONDUCTANCE (PARALLEL)	$C = C1 + C2 + C3 + \cdots$
CONDUCTANCE (SERIAL)	$\frac{1}{C} = \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} + \frac{1}{C3} + \cdots$
(EFFECTIVE) PUMPING RATE	$\frac{1}{Seff} = \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} + \frac{1}{C3} + \dots + \frac{1}{Sp}$
GAS CORRECTION	$C_{gaz} = C_{air} \cdot \sqrt{\frac{29}{M}}$

¹⁰ Étant au départ un outil de débogage, cette fenêtre a une ergonomie un peu spartiate et est incomplète. Elle a été conservé pour son intérêt pratique pour l'utilisateur, mais demanderait quelques améliorations (ajout des unités, lisibilité). Un outil similaire pour les composants en serait un prolongement utile.

TEMPÉRATURE CORRECTION	$C_T = C_{293} \cdot \sqrt{\frac{T}{293}}$
GENERAL EQUATION	Écriture d'une nouvelle équation

c) Les cadres d'équations

Les cadres d'équations ont la même organisation que ceux des composants, avec la partie locale à droite, et globale à gauche, les boutons de renommage et de calcul, les flèches de transfert, et la même possibilité d'un calcul local indépendant du global.

Chaque cadre d'équation comporte une case à cocher SOLVE qui permet d'intégrer ou non cette équation dans les calculs à exécuter par le bouton SOLVE.

Renommage des paramètres

Le renommage est l'étape importante qui va faire le chaînage entre équations et rapatrier les valeurs utiles des composants aux bons endroits. Il va de pair avec le choix des équations. Il permet de faire des calculs parallèles sur la base des mêmes données, par exemple en calculant une série de conductances pour deux gaz, ou les vitesses de pompage effectives respectives pour deux pompes différentes.

La démarche demande donc de bien faire l'inventaire de ce qu'on sait, de ce qu'on ne sait pas (et qu'on cherche) et de ce qui se calcul par ce qu'on sait en chaînant correctement les équations.

La gestion des noms est un peu différentes pour les composants que pour les équations. Si on renomme les diamètres de plusieurs **COMPOSANT** avec le même nom, on a une valeur unique, commune à tout ces champs. Inversement, on peut à tout moment revenir en arrière et renommer (par **RENAME**) n'importe lequel d'entre eux d'un nom différents et il redeviendra indépendant.

En revanche, dans les équations globales, pour revenir en arrière il faut éditer l'équation (MODIFY) et remplacer le nom du paramètre concerné par un nouveau nom. APPLY va alors modifier la ligne concernée sans interférer avec les autres équations.

d) Syntaxe des équations pour Maxima

La syntaxe utilisée pour les équations se trouve dans la documentation de Maxima. Pour les opérations de base, c'est une syntaxe assez commune aux langages de programmation.

e) Modifications des équations (généralités)

Toutes les équations, de composant et de comportement, sont modifiables, ceci dans deux but : changer les noms des paramètres, mais aussi modifier l'équation elle-même.

La possibilité de modifier les équations a été voulue dès le départ pour permettre à l'utilisateur de choisir des équations alternatives proposées dans la littérature. Une limitation est apparue au fil du développement. Dans une version du début, cela fonctionnait de manière très souple. Il suffisait d'écrire l'équation, et le bouton Apply générait toutes les lignes de paramètre nécessaires !

Mais les paramètres n'avaient alors pas d'unités ! On pouvait donc faire n'importe quoi du point de vue dimensionnel, ce qui obligeait à vérifier la cohérence à la main et n'était pas vraiment satisfaisant. L'implémentation des unités et du choix de l'unité a rigidifié le système et on ne peut plus simplement écrire l'équation dont on a envie.... Pour autant, et avec un peu de prudence, on peut faire beaucoup de choses.

Les contraintes actuelles sont :

- On ne peut utiliser *que des noms de paramètres existant déjà* dans la liste de noms d'un cadre de composant ou d'équation.

- La valeur numérique sera évidement la même partout où un même nom est utilisé.
- La valeur sera mise à jour partout, suite à sa modification dans n'importe lequel des champs concernés.
- Selon les noms de paramètres et l'équation « fabriquée », il peut apparaître des incohérences dans les unités affichée.

Pour modifier l'équation, cliquer sur Modify. On peut alors ajouter des paramètres et des opérateurs existant ailleurs. Si on veut y ajouter une constante, on peut mettre sa valeur numérique ou utiliser un nom d'un composant **JOKER**.

Quand on fait APPLY, les lignes de saisie sont actualisées, (ajoutées, supprimées), avec réinitialisation de toutes les valeurs. Après toute modification d'une équation, il faut faire un COMPUTE de toutes les équations en relation avec celle qui a été modifiée.

Si on a besoin de paramètre qui n'existent pas par défaut, on peut le générer par un composant **JOKER**, sans équation, comme **PUMP** ou **VALVE**

L'équation modifiée n'est disponible que pour le projet en cours. On peut la sauver comme un nouveau projet pour pouvoir la ré-utiliser. Il n'est pas exclu qu'il puisse apparaître des inconsistances au fil des sauvegardes successives de ce projet.

On veut par exemple faire une équation de tube court du type :

 $\frac{1}{C_t} = \frac{1}{Co} + \frac{1}{Ctl}$

Créer 1 ouverture et 2 tubes longs.

- Remplacer l'équation du deuxième tube par celle ci-dessus (avec les noms des conductances à chercher dans l'orifice et le premier tube).
- APPLY : le diamètre et la longueur du tube 2 deviennent des constantes, inutilisées, vu qu'elles n'existent plus dans l'équation.
- Renommer les diamètres du tube 1 et de l'orifice du même nom ; entrer les valeurs dans l'orifice et le premier tube .

COMPUTE partout, le deuxième tube en dernier.

Rappel : lorsqu'on modifie des équations, penser à l'état de la case à cocher **GRAB** de la fenêtre **schema**. On peut avoir besoin de déplier un cadre pour vérifier la syntaxe d'un nom, ce qui n'est pas possible si **GRAB** est cochée.

f) Composants sans équation... avec équation !

Les composants **PUMP** et **VALVE** n'ont par défaut pas d'équation. Mais rien n'empêche de leur en ajouter une ! Les lignes de saisies basculeront dans le même style d'affichage que les composants comme les tubes, avec deux colonnes et les flèches gauche et droite. L'opération est réversible, mais avec des bugs d'affichage possibles.

On peut ajouter une équation reliant la vitesse de pompage à la pression (attention de ne pas faire de boucle sans fin entre plusieurs équations !) ou détourner une pompe pour créer un composant manquant avec équation alternative à une déjà existante.

g) Equation « General Equation »

L'équation General_Equation est un cadre avec par défaut une équation « bidon » destinée à être modifiée en une nouvelle équation non proposée dans le menu. Elle fonctionne comme les modifications d'équations ci-dessus, et avec les mêmes présupposés et limites.

L'usage en est un peu délicat avec des risques de bloquer le système. Elle demande donc une certaine rigueur. Par défaut les paramètres existant n'ont pas d'unité. Ceux qu'on introduit par renommage ou ajout et qui existent ailleurs héritent de l'unité d'origine. Selon l'équation qu'on construit, il est possible que le résultat soit affiché sans unité.

Pour l'utiliser

- Déclarer tout les composants et équations sources des paramètres qu'on va utiliser.
- Paramétrer tout ces composants (renommage, saisies des valeurs).
- Ouvrir un cadre **GENERAL_EQUATION**.
- MODIFY de l'équation, saisie de l'équation avec les noms des paramètres définis précédemment, APPLY les champs apparaissent, avec les valeurs déjà existantes ou calculées ailleurs.

Si on a besoin d'un paramètre ou d'une constante non dispo dans un composant réel, utiliser un composant **JOKER**. La cohérence dimensionnelle risque alors d'être perdue.

Si l'on renomme les paramètres, les noms d'origine sont perdus. De même si on modifie l'équation, les paramètres supprimés sont aussi perdus. Il est donc prudent de conserver tout les paramètres existants au départ et de donner à ceux qui ne servent pas une valeur qui n'a pas d'effet lors d'un COMPUTE (0 ou 1 selon l'opération associée)

h) Temps de descente en pression

VST ne propose pas de calcul du temps de descente en pression, domaine où VTT est le maître ! Mais il est tout de même possible de faire des choses.

Pour cela, on décrit l'installation comme expliqué précédemment pour des conditions à l'équilibre, donc avec un flux de dégazage à temps long. Ce sera le dernier point de la courbe de descente en pression, à 100 h ou comme valeur d'asymptote.

Puis on modifie le taux de dégazage¹¹ en entrant sa valeur à 1 h, 3h, 6h, 12h, 24h, 48h etc. Pour cela il faut évidement disposer d'une valeur de départ fiable avec son coefficient de décroissance selon le temps. Pour chaque valeur on actualise l'équation du flux, et on note la pression calculée. On trace ainsi la descente en pression en fonction du temps.

C'est manuel et limité par le nombre de points qu'on est disposé à entrer, mais c'est possible ! Sur MolFlow, c'est la même démarche.

F) Tubes courts, Conductances en série – Clarifications

Si les équations analytiques décrivant les composants courants sont anciennes, il règne pourtant une certaine confusion sur LE composant de base qui est le tube cylindrique. Lors des échanges dans le Groupe de Travail « Calcul d'installations » du RTV, nous avons été confronté à ce petit désordre, chacun ayant sa méthode et son équation préférée. Ceci nous a amené à clarifier cette question et élucider certains points.

Si nous étions arrivés à certaines de ces conclusions il y a quelques années, VST aurait été développé un peu autrement !

Pour celui qui veut fouiller ce sujet, voir les articles de Steckelmacher, qui en particulier passe en revue les publications assez denses de l'époque (1909 – 1930 et +).

Pour un aperçu assez complet (quoique trop bref dans ses explications) le livre de O'Hanlon est le plus adapté.

Toute critiques, commentaires ou suggestions sur cette partie sont bienvenues.

1. Conductance du tube cylindrique de toute longueur : quelle équation ?

L'équation analytique initiale proposée par Knudsen (1909a) reste globalement valide à ce jour. Mais elle a plusieurs présupposés, souvent oubliés, voir ignorés :

- Le diamètre du tube est petit au regard de la longueur ; on parle de L/d > 20, voir > 100 selon les auteurs.

- Le tube relie *deux* récipients grands par rapport au diamètre du tube.

- La pression ne varie pas dans les 2 récipients pendant le temps considéré.

Le deuxième présupposé est souvent ignoré ou en tout cas n'est pas pris en compte avec toutes les conséquences qui en découlent. Nous y reviendront dans la partie 3.

L'équation proposée par Knudsen est :

$$C_t = rac{V_m}{4} \cdot rac{d^3}{l}$$
 (412) avec V_m : vitesse moyenne du gaz considéré

Ce qui donne pour l'air à 20°C (en unité CGS) la forme bien connue :

$$C_t = 12.1 \cdot \frac{d^3}{l}$$
 et en SI : $C_t = 121 \cdot \frac{d^3}{l}$

Mais cette équation n'est valide que pour un tube de rapport L/d > 20 (ou > 100 selon l'auteur). Quand la longueur du tube augmente, la conductance tend vers 4d/3L. Mais lorsqu'elle diminue, alors qu'elle devrait tendre vers la conductance d'une ouverture de même diamètre, à savoir :

$$C_{orifice} = 11.6 \cdot A$$
 (avec A, aire de l'orifice)

elle tend vers l'infini.

Pour corriger cette tendance, plusieurs solutions ont été proposées, la première¹³ étant d'associer en série la conductance de l'orifice et celle du tube long. A longueur courte, la conductance de l'orifice « bride » la tendance vers l'infini, à grande longueur, elle devient négligeable devant la poids du tube.

11 V. en annexe des listes de taux de dégazage pour différents matériaux, dans différentes conditions et à des séries de temps.

¹² Les numéros d'équations utilisés ici (provisoirement) renvoient au document du GT Calcul d'installation mentionné précédemment.

¹³ Première dans l'ordre considérée ici, pas forcément d'un point de vue historique.

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{Co} + \frac{1}{Ctl}$$

En 1932, Clausing a apporté un regard différent en introduisant la notion de probabilité de transmission à travers le tube. Son développement est très rigoureux (mais pas facile à suivre !) et a cela d'intéressant qu'il apporte un regard plus physique, rendant compte de la circulation à double sens des molécules. La conductance d'un tube devient le produit de celle de l'ouverture, valeur maximale possible, par la probabilité de transmission W à travers le tube. W est une fonction de (L et d), égale à 1 pour une ouverture seule, qui diminue quand L augmente :

$$C_t = C_o \cdot W$$

A noter que cette probabilité W de Clausing porte d'autres noms dans la littérature : K, K', α ou α' selon les auteurs.

Une troisième voie a été proposée, qui consiste à ajouter à l'équation analytique initiale de Knudsen un facteur correctif de tube court, valant 1 pour un long tube (L/d > 100) et tendant à faire converger la conductance du tube court vers celle de l'orifice. Deux variantes ont été proposées, l'une analytique, l'autre utilisant la probabilité de transmission selon Clausing¹⁴ et appelées toutes deux (abusivement pour la première) coefficient de Clausing, α ou α '.

La variante analytique détermine ce coefficient sur la base de l'égalité suivante :

$$C_t = 12.1 \cdot \frac{d^3}{l} \cdot \alpha = \frac{1}{\frac{1}{Co} + \frac{1}{Ctl}} \qquad \text{D'où on déduit } \alpha : \qquad \qquad \alpha_{anal} = \frac{1}{\frac{1}{1 + \frac{4d}{3l}}}$$

En suivant la même démarche mais en remplaçant le dernier terme par la combinaison de l'ouverture et de la probabilité de transmission de Clausing, on obtient :

$$C_t = 12.1 \cdot \frac{d^3}{l} \cdot \alpha = C_o \cdot W$$
 et a correspondant : $\alpha_{proba} \cong \frac{3l}{4d} \cdot W$

Nous disposons donc de 4 manières de calculer un tube de toute longueur :

(1):	$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{Co} + \frac{1}{Ctl}$
(6a) : (α analytique)	$C_t = 12.1 \cdot \frac{d^3}{l} \cdot \alpha$
(6b) : (α probabiliste)	$C_t = 12.1 \cdot \frac{d^3}{l} \cdot \alpha$
(9):	$C_t = C_o \cdot W$

La littérature et nos tests font ressortir qu'on serait plus exacte avec les équations utilisant la probabilité de transmission de Clausing (donc 6b et 9), en particulier dans le domaine $0.5 \le L/d \le 5$ (qui est le plus courant !).

Il est à noter :

- Que dans les valeurs de α (proba) données par Delafosse et Mongaudin, il y a une erreur pour L/d = 0,8, indiqué à 0,3 au lieu de 0,34. Cette faute de frappe a malheureusement été reproduite dans plusieurs ouvrages et dans les premières versions de VST. Pour vérifier si votre version de VST est juste, il suffit d'entrer un l et un d qui donnent L/d = 0,8 et de voir si α est bien de 0,34.

- Que dans la littérature la distinction entre probabilité de transmission et coefficient de Clausing n'est pas toujours très claire, ni la différence entre la manières de calculer ce coefficient.

VST propose par défaut :

¹⁴ Pour plus de détails, voir le CR du groupe de travail du RTV sur les calculs d'installations de 2021.

L'équation initiale de Knudsen du tube long (4).

L'équation modifiée pour toute longueur avec α basé sur la probabilité de Clausing (6b)¹⁵.

Si on a besoin de l'équation (9), on peut la construire en modifiant celle d'un orifice :

- **DÉCLARER UN COMPOSANT JOKER (PUMP, VALVE OU GENERAL_EQUATION)** et y renommer les paramètres.

- Créer un composant **OPENING**, en modifier l'équation en y ajoutant la multiplication par l'un des paramètre que l'on vient de créer.

L'équation est acceptée, une ligne de paramètre est ajoutée, où on peut y entrer la proba de Clausing correspondant au rapport L/d du tube, à chercher dans les tables (données en annexe).

2. Faut-il compter un orifice initial ou pas ?

Certains ouvrages indiquent que dans le calcul d'une ligne de pompage entre enceinte et pompe, il faut « commencer par un orifice,... (souvent oublié)... »¹⁶. Il n'est pas clair ce que l'auteur voulait dire par là, vu que dans les exemples qu'il donne dans les pages suivantes, il utilise l'équation (1) ci-dessus. Pris à la lettre, cette affirmation reviendrait à ajouter un orifice qui est déjà inclus dans l'hypothèse d'origine de Knudsen (éq. (1)), dans la démarche de Clausing (éq. (9)) et confirmé par des simulation de Monte-Carlo (MolFlow).

Notre conclusion sur ce point est qu'il s'agit là d'une formulation maladroite et que cet orifice ajouté viendrait en doublon avec celui déjà inclus dans toutes les équations de tube, avec pour effet de tirer vers un résultat plus pessimiste.

3. Conductances en série - Jusqu'où peut-on utiliser la loi d'0hm ?

L'analogie électrique est très universellement présentée comme *la* méthode de base pour le calcul d'associations de conductances en série et en parallèle. Un article de C. W. Oatley de 1957 pointe de manière assez fine sur une limite majeur de cette analogie¹⁷. Il fait remarquer que si cette analogie est globalement applicable à des conductances en parallèles, elle ne l'est plus du tout à des conductances en série. Le « flux » de gaz en régime moléculaire n'est en aucune manière comparable à la circulation d'électrons en courant continu dans un conducteur. Les électrons circulent tous dans le même sens, alors que le gaz circule lui dans les deux sens, avec juste un excédent dans l'un des deux sens qui va être compté comme le flux réel.

Cette analogie électrique néglige les deux point suivant :

a) End loss

Le modèle de Knudsen suppose que les molécules circulent dans l'enceinte amont de parois à parois jusqu'au moment où elle entrent dans l'orifice du tube. Les trajectoires entrant dans ce tube proviennent donc de toutes les directions (avec une majorité de la demi-sphère face à l'orifice). On peut dire que leur direction au passage du plan de l'orifice suit une distribution en cosinus par rapport à la normale à ce plan. L'équation du tube (long) qu'en a déduit Knudsen inclus donc l'orifice et suppose cette distribution des directions en entrée. En sortie de ce tube, on observe le même phénomène : les trajectoires vont se distribuer dans tout le récipient de sortie, selon une distribution en cosinus (en première approximation).

Dans le cas de 2 tubes mis bout à bout, Oatley fait remarquer que pour appliquer l'équation de Knudsen, il faut imaginer les 2 tubes séparés par une enceinte virtuelle où se *perdraient* les molécules sortant du premier tube ; pour continuer leur chemin, elles doivent à nouveau *trouver* l'orifice du second tube. La littérature appelle cet effet « end loss » (perte d'extrémité).

Si on met directement 2 tubes bout à bout, la situation est toute différente. A la jonction entre les deux tubes, ce qui sort du premier tube entre forcément dans le deuxième et peut même revenir en arrière dans le premier tube dès la prochaine trajectoire, ce que l'équation d'origine n'envisage pas. Ainsi, si on met les équations de plusieurs tubes bout à bout dans une somme des inverses, on ré-introduit à chaque tube (par l'équation) un orifice (que les molécules devraient trouver) qui n'existe pas dans la réalité.

Le résultat global aura tendance à être pessimiste et cela peut aller jusqu'à 40% d'écart.

b) Beaming

¹⁵ Comme indiqué en 2-b, le calcul de α dans VST se fait par interpolation linéaire sur 2 points sur le tableau de valeurs données par Delafosse et Mongaudin. Un gain en précision pourrait être obtenu en faisant un interpollation sur 4 ou 6 points, mais aussi en se basant sur une table des probabilités de Clausing et en recalculant α selon l'équation donnée ci-dessus.

¹⁶ Notions de base en technique du vide - G. Rommel - SVT 1995, p. 72, ainsi que des cours plus anciens de la SFV.

¹⁷ Nous ne pouvons que recommander la lecture de cet article, au moins les pages 1 à 3, ainsi qu'un échange de correspondance entre Steckelmacher et Oatley sur ce sujet dans les n° suivants de la même revue. Il présente ce qu'est le régime moléculaire d'une manière très parlante et dans un anglais bien écrit et très accessible. Les ref. sont données dans la bibliographie.

Parallèlement, au fur et à mesure que le rapport L/d devient grand, on constate qu'en sortie du tube la distribution des directions de trajectoire s'écarte nettement de la distribution en cosinus. Au fur et à mesure que la longueur du tube augmente, les trajectoires s'alignent de plus en plus sur l'axe du tube. Ceci fausse l'évaluation de l'entrée dans le tube suivant. On est dans la situation inverse du end loss. S'il y a une enceinte réelle de dimensions modérée entre les deux tubes alignés, la probabilité de passer directement d'un tube à l'autre devient d'autant plus grande que le premier tube est long.

C'est une situation à envisager, mais qui est moins critique que la précédente et qui ne participe que pour une plus faible part dans l'erreur totale.

c) Qu'en conclure ?

Oatley propose tout d'abord un calcul alternatif pour 2 tubes de même diamètre, qui est généralisable à n tubes. Dans la suite de l'article il envisage des situations plus compliquées (diamètres différents, pièges, etc).

L'équation pour deux tubes est de la forme : (avec W = proba de transmission)

me:
$$\frac{1}{W_0} = \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} - 1$$

 $\frac{1}{W_{1 \to n}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{W_i}\right) - (n-1)$

Et est généralisable à n tubes :

Haeffner propose une approche pour décrire une séquence de 3 tubes de diamètres nettement différents. O'Hanlon passe rapidement en revues ces deux approches.

Ces méthodes ne sont pas implémentées dans VST. L'utilisateur doit donc « penser » son installation et évaluer les limites des calculs que permet VST.

d) Comment procéder avec VST

Ci-après quelques lignes directrices pour minimiser les erreurs¹⁸ :

Calculs simples, sans se prendre la tête...

Si le besoin n'est que d'avoir une idée d'ordres de grandeur, de comparer des montages, d'optimiser une situation avec quelques composants, on peut continuer à faire la classique somme des inverses des conductances, mais en sachant que le résultat tendra à être pessimiste.

On peut améliorer les résultats en incluant les quelques ligne directrices ci-dessous :

Tubes de même diamètre : On compte systématiquement un seul tube de la somme des longueurs.

Tubes de diamètres voisins : La limites de la notion de diamètre voisin est a affiner par des simulations par Monte-Carlo pour fixer l'écart de diamètre limite acceptable (à venir !). Deux approches sont possibles.

- Compter un tube unique de longueur L1 + L2 et de diamètre moyen (D1 + D2)/2, plutôt que les deux tubes comme composants discrets successifs.

- Faire le calcul classique avec la somme des inverses avec les tubes comme ils sont, mais ne prendre en compte l'orifice que pour le premier tube (MPIPE). Les suivants seront calculés en tube long (LONG). Ceci n'est valable que si les tubes ont une certaine longueur. Si on a une suite de tubes courts (L/d < 1), il est prudent d'essayer plusieurs solutions et de comparer les résultats. On se rappelle que pour un diamètre donné, la conductance de l'orifice est la plus grande qu'on puisse avoir.

Composants qui aident : Tant qu'on enchaîne des composants qui de par leur géométrie interne ont tendance à redonner une distributions des direction de sortie en cosinus, on peut appliquer la somme des inverses. Ainsi, une vanne d'angle ré-introduit une sortie en cosinus, brise l'effet de beaming et permet d'attaquer directement une tube de longueur quelconque¹⁹. En revanche une vanne tiroir sera à assimiler à une tube court.

Les composants « favorables » sont : vanne d'angles, vanne à clapet (non papillon), tout piège ayant des chicanes. Les composants « défavorables » sont les successions de tubes, les vannes tiroirs, les vannes papillons.

Si le calcul selon la méthode de Oatley s'impose, il faut le faire hors VST et remplacer la succession de tubes concernée par un composant **JOKER** de VST comme une vanne, de conductance connue égale au résultat de ce

¹⁸ Des simulations avec MolFlow sont en cours pour préciser ces points.

¹⁹ En revanche, elle peut introduire une rétrodiffusion plus importante qu'un tube, dont on ne sait pas si la conductance donnée par le constructeur tient compte. Il y a une certaine opacité sur l'origine des conductances catalogue. Calcul Monté-Carlo, mesures ou ... extrapolation de la valeur de la version de vanne précédente ?

calcul.

L'alternative est de faire une simulation Monte-Carlo avec MolFlow et pareillement introduire le résultat dans VST par un composant **JOKER**.

G) Formulaire de technologie du vide.

Ce formulaire est appelé à évoluer, tant dans son contenu que dans sa forme.

1. Définitions

Les unités indiquées sont celles le plus couramment utilisées. Un mécaniciens aura du mal à donner des cotes en m, et les équations courantes sont connues par cœurs par beaucoup en CGS...Désolé ! Comme 1 mb = 1 hPa, il est judicieux d'utiliser le hPa pour être SI et en même temps retrouver les ordres de grandeur du mb et du Torr, plutôt que le Pa qui met le bazar de 2 ordres de grandeurs !

Symb.	Unité	Définition
t	S	Temps
Т	К	Température
Q	mb.l/s	Flux gazeux,
Р	mb, hPa	Pression, souvent en Torr (facteur 0,75 ou 1,33)
Plim	mb, hPa	Pression limite propre à une pompe
Pmoy	mb, hPa	Pression moyenne entre les bouts d'un tube en r. visqueux ; suppose de connaître Plim effectif.
S	l/s, m³/h	Débit-volume ou vitesse de pompage d'une pompe, d'une surface froide, etc.
Seff	l/s, m³/h	Vitesse de pompage résiduelle d'une pompe, à l'extrémité de conductances en séries
λ	m	Libre parcours moyen
Re		Nombre de Reynolds
d	mm	Diamètre de canalisation
L	mm	Longueur de canalisation
А	mm2	Aire (d'un orifice)
V	l, m3	Volume
С	l/s	Conductance
α:		Facteur de Clausing pour canalisation courtes en r. moléculaire
J		Facteur de correction en r. intermédiaire
D _m	m	Diamètre moléculaire
v	m/s	Vitesse d'écoulement (r. visqueux)
ρ		Densité
μ	poise	Coefficient de viscosité dynamique, en poise
n	m ⁻³	Densité moléculaire
τ ou q		Taux de dégazage
a		Coefficient de décroissance du taux de dégazage

2. Domaines de vide – Détermination du régime d'écoulement

Domaine de Vide	Nature de l'écoulement	Conditions
Vide primaire ou grossier (1013 à 1mb)	Turbulent Visqueux laminaire	$\begin{array}{ll} Q > 200.d \ ; & Re > 2200 \ (2400) \\ Q < 100.d \ ; & Re < 2200 \ (2400) \end{array}$
Vide primaire et moyen (1 à 10 ⁻³ mb)	Visqueux laminaire	$\lambda < d/100$; P.d > 6x10 ⁻¹
Vide moyen	Intermédiaire (de laminaire à moléculaire)	$d/100 < \lambda < d/2 6x10^{-1} > P.d > 1,3x10^{-2}$
Vide poussé (10 ⁻³ à 10 ⁻⁷ mb)	Moléculaire	$\lambda > d/2$ P.d < 1,3x10 ⁻²
Ultra Haut Vide	Moléculaire	$\lambda > d/2$

(<10 ⁻⁷ mb ou plutôt étuvage indisponsable)	$P.d < 1,3x10^{-2}$
muispensable)	

Avec : **Re** nombre de Reynolds, **Q** flux (mb. l/s), **P** pression moyenne (mb, ou Torr...), **d** diamètre du conduit (cm), λ libre parcourt moyen (cm) ; attention aux unités CGS

3. Formulaire

a) Équations dites "de comportement" (dans VST)

Grandeurs	Formule générale Unités CGS (+ Torr) (Delafosse- Mongaudin)	Formule simplifiée Air / 20°C Unités CGS (+ Torr) (Delafosse- Mongaudin)
Généralités		
Flux gazeux Q (hPa.l/s) selon P (hPa) et S (l/s)	Q = P*S (- Plim)	
Selon Seff	Q = P * Seff (- Plim)	
Selon somme des conductances	$Q = P^* \Sigma C (- Plim)$	
Selon différence de pression	Q = (P2-P1)*C (- Plim)	
Libre parcourt moyen (λ , dans l'unité de D)	$\lambda = 1/2^{1/2*} \pi * D_m^{2*} n$	$\lambda = 7E-3/P$
Nombre de Reynolds (sans dimension)	$\text{Re} = V^* \rho^* D/\mu$	
Conductances et vitesse (de pompage, débit- volume) efficace (effective)		
C, rég. laminaire (et intermédiaire ?)	C = Q/ (P2-P1)	
C, rég. moléculaire	C = Q/P	
Conductances en série, C en l/s	C = 1/(1/C1 + 1/C2 + 1/C +)	V. note à ce sujet en F-3
Conductances en parallèle	C = C1 + C2 + C3 +	
Vitesse de pompage effective, au débouché dans une enceinte	Seff = 1/(1/C1+1/C2++1/Spompe)	
Correction selon gaz et température		
Correction C selon gaz (r. moléculaire, M : masse molaire)	Cgaz = Cair * $\sqrt{(29/M)}$	
Correction C selon températures (r. moléculaire, T en K)	C(T) = C(293) * √ (T/293)	
Pression selon le temps P = f(t)		
Descente en pression en fonction du temps à tout r. (cas idéal, S supposé constant, Plim non pris en compte)		t = (V / S) * Ln (Pi/P) = 2,3*(V / S) * Log (Pi/P) Pi = pression initiale
Remontée de pression à flux constant	t = (P2-P1)*V/Q	
Evolution du taux de dégazage avec le temps	$\mathbf{q}_{\mathrm{t}} = \mathbf{q}_{\mathrm{i}} * \mathbf{t}^{-\mathrm{a}}$	

b) Équations de composants

Conductances	Formule générale Unités CGS (+ Torr) (Delafosse- Mongaudin)	Formule simplifiée Air / 20°C Unités CGS (+ Torr) (Delafosse- Mongaudin)
Orifice - r. moléculaire		C = 11.6*A
Tube cylindrique - tout régime		Trop grosse pour être copiée ici, voir DM Eq. 3.32
Tube cylindrique - r. laminaire		C = 182*Pmoy*D4/L

Conductances	Formule générale Unités CGS (+ Torr) (Delafosse- Mongaudin)	Formule simplifiée Air / 20°C Unités CGS (+ Torr) (Delafosse- Mongaudin)
Tube cylindrique - r. intermédiaire J selon Delafosse et Mongaudin 3.35 (voir aussi les valeurs tabulées)		C = 12,1*J*D ³ /L avec J = (1+271*D*Pmoy+4790*(D*Pm oy) ²) / (1+316*D*Pmoy)
Tube cylindrique long (L > 20*D), r. moléculaire	$C = Vm/4*D^3/L$	C = 12,1*D ³ /L
Tube cylindrique - r. moléculaire toute longueur, par association en série d'un tube long et d'un orifice. Alternative à ci-dessous, sans Clausing.		1/C = (1/11,6*A) + 1/(12,1*D ³ / L)
Tube cylindrique - r. moléculaire α , coefficient de Clausing, pour L < 20*D ; si L> 20*D, $\alpha = 1$		C = 12,1*(D ³ /L)* α α tabulé ou calculé, v. ci- dessous
α dit de Clausing, analytique		$\alpha = 1/(1+1,33*D/L)$
α de Clausing, proba. de trans.		$\alpha = (3*L/4*D)*W$
Tube cylindrique - r. moléculaire toute longueur, par association d'une ouverture et de la proba. de transmission. de Clausing		C = Co*W
Coude à angle - r. moléculaire, $L = L$ axiale		C = 12,1* α *D ³ /(L+1,33*D)
Coude arrondi (r. moléculaire)	Selon Pfeiffer	Chap. 2.1.7.8 Eq. 46
Réduction, Diaphragme (r. moléculaire)		C= 11,6*A*A0/(A0-A)
Réduction de canalisation conique (r. moléculaire)	Selon Pfeiffer	Chap. 2.1.7.5 Eq. 35
Ouverture de canalisation conique (r. moléculaire)	Selon Pfeiffer	Chap. 2.1.7.6 Eq. 38
Réduction de canalisation cylindrique (r. moléculaire)	Selon Pfeiffer	
Soufflet (r. moléculaire)	Selon Krause et Wolff	v. biblio.

4. Valeurs tabulées de J et α (selon proba. de Clausing)

J		
D*Pmoy	J	
<10-2	1	R. moléculaire
2*10 ⁻²	1,1	R. intermédiaire
4*10-2	1,4	
6*10 ⁻²	1,7	
8*10 ⁻²	2	
0,1	2,3	
0,2	3,8	
0,4	6,9	
0,6	9,9	R. laminaire
0,8	13	
1	16	
2	31	
4	62	
10	153	

α (Cl)			
L/d	α	L/d	α
0.05	0.036	4	0.7
0.08	0.055	6	0.77
0.1	0.068	8	0.81
0.2	0.13	10	0.84
0.4	0.21	20	0.91
0.6	0.28	40	0.95
0.8	0.3	60	0.97
1	0.38	80	0.98
2	0.54	100	1

5. Probabilité de transmission selon Clausing (W)

Calcul de De Marcus - Berman de l'intégrale de Clausing pour un tube circulaire selon L/d, et α correspondant, plus détaillé que ci-dessus à droite.

L/d	W, K, a	α	L/d	W, K, a	α	L/d	W, K, a	α
0,00	1,00000	0,00000	0,90	0,53898	0,36381	5,0	0,19099	0,71621
0,05	0,95240	0,03572	0,95	0,52625	0,37495	6,0	0,16596	0,74682
0,10	0,90922	0,06819	1,00	0,51423	0,38567	7,0	0,14684	0,77091
0,15	0,86993	0,09787	1,10	0,49185	0,40578	8,0	0,13175	0,79050
0,20	0,83408	0,12511	1,20	0,47149	0,42434	9,0	0,11951	0,80669
0,25	0,80127	0,15024	1,30	0,45289	0,44157	10,0	0,10938	0,82035
0,30	0,77115	0,17351	1,40	0,43581	0,45760	15,0	0,07699	0,86614
0,35	0,74341	0,19515	1,50	0,42006	0,47257	20,0	0,05949	0,89235
0,40	0,71779	0,21534	1,6	0,40548	0,48658	25,0	0,04851	0,90956
0,45	0,69404	0,23424	1,7	0,39195	0,49974	30,0	0,04097	0,92183
0,50	0,67198	0,25199	1,8	0,37935	0,51212	35,0	0,03546	0,93083
0,55	0,65143	0,26871	1,9	0,36759	0,52382	40,0	0,03127	0,93810
0,60	0,63223	0,28450	2,0	0,35658	0,53487	50,0	0,02529	0,94837
0,65	0,61425	0,29945	2,5	0,31054	0,58226	500,0	0,00265	0,99296
0,70	0,59737	0,31362	3,0	0,27546	0,61978	5000,0	0,00027	0,99911
0,75	0,58148	0,32708	3,5	0,24776	0,65037			
0,80	0,56655	0,33993	4,0	0,22530	0,67590	∞	4d/31	1
0,85	0,55236	0,35213	4,5	0,20669	0,69758			

6. Taux de dégazage selon matériaux et état, et à différents temps.

Le domaine des taux de dégazage est assez épineux, autant à cause de la grande dispersion des valeurs de la littérature que par la diversité des unités utilisées. Les pages suivantes donnent les taux de dégazage des matériaux les plus courants pour avoir une base de départ sous la main lors de simulations avec VST. Pour des situations plus pointues, il faudra chercher dans la littérature des valeurs correspondant plus exactement à la situation étudiée.

La dispersion des valeurs de la littérature provient pour l'essentiel de 3 facteurs : les conditions d'élaboration et la préparation du matériau avant fabrication des pièces (vacuum firing, par ex.), leur usinage et traitements, physique et/ou chimique avant mise en service, et la méthode de mesure du taux utilisée. A ceci s'ajoutent les décalages entre l'état de l'éprouvette de quelques cm² qui a servi à produire une valeur, et celui de l'installation de grande surface et de forme complexe à laquelle on veut l'appliquer. Un facteur décisif est l'écart très variables entre la surface géométrique (qu'on indique dans le code) et la surface réelle du matériau (qui peut être vu l'échelle atomique).

Le premier tableau donne des valeurs de base pour des conditions à l'équilibre, en général après un étuvage plus ou moins poussé. Il n'y a donc qu'une valeur, et on suppose qu'il n'y a plus d'évolution notable. Ces valeurs sont tirées de O'Hanlon ou de données du CERN* (Chiagatto). A noter que les valeurs de O'Hanlon proviennent de publications anciennes (Schram 1963, Dayton 1959).

Les tableaux suivant donnent des évolutions du taux en fonction du temps, pour permettre le calcul du temps de descente en pression. Il s'appliquent à des matériaux provenant de l'air et lors de leur mise sous vide.

Pour évaluer une descente en pression avec VST, il faut changer le (les) taux dans le(s) cadre(s) de type **CHAMBER**, recalculer toutes les équations en relation (SOLVE), et noter la pression obtenue dans un fichier texte ou un tableur. On peut alors tracer la courbe avec l'outil de tracé habituel (gnuplot, xmgrace, etc).

Un dernier tableau donne des valeurs de flux des Jauge Bayard-Alpert et RGA.

valears ac	buse, a l'equilible	uii etave (m	em)		
Matériau	Conditions	Taux	Matériau	Conditions	Taux mb
Inox 304	30 h @ 250°C	4,00E-11	Pyrex	24h @ 400°C	< 1,00E-14
Inox 316 L	2 h @ 800°C four sous vide	4,60E-12	Alumine	24h @ 400°C	< 1,00E-14
Inox*	Non étuvé, pompage 10 h	3,2E-10	Stéatite		4,00E-08
Inox*	24 h @150°C	3,2E-12			
Al	15 h @ 250°C	5,3E-12	Néoprène		
Al	20 h @ 100°C	5,3E-13	Viton A	12h @ 200°C	3,20E-10
6061 Aluminium	glow discharge, + 200°C	1,3E-13	Téflon		2,50E-07
Cu	20 h @ 100°C	1,46E-11			
Cu (OHFC)	24 h @ 100°C	2,9E-13			
Cu (OHFC)	24 h @ 250°C	1,18E-13			
Cu (OHFC)*	24 h @ 200°C	3,2E-14			
Dural					
Ti		2,20E-09			

Valeurs de base, à l'équilibre - Bâti étuvé (hPa.l/s/cm²)

	Materiau	Inox 304	Aluminum	Aluminum	Cuivre	Pyrex	Silicone	Viton	Neoprène
	Etat		3h à l'air	Anodisé		1 mois à l'air		Frais	
	alpha 1	6'0	I	6'0	1	6'0	1,07	0,8	0,8
	alpha 10	6'0	6'0	6'0		0,9	1,1		
	QI	1,80E-08	60-3E8'8	3,67E-07	1,33E-08	1,55E-09	9,31E-06	1,52E-06	3,99E-05
	Q10	1,96E-09	6,31E-10	4,28E-08		2,09E-10	2,26E-06		
t (h, j)	t, sec				Q(t) hPa.l/s/c	m²			
	1	3,79E-05	3,18E-05	5,82E-04	4,79E-05	2,45E-06	5,95E-02	1,06E-03	2,79E-02
ιh	3600	2,39E-08	8,83E-09	3,67E-07	1,33E-08	1,55E-09	9,31E-06	1,52E-06	3,99E-05
2 h	7200	1,23E-08	3,99E-09	1,92E-07	6,65E-09	8,47E-10	6,08E-06	8,71E-07	2,29E-05
6 h	21600	4,25E-09	1,13E-09	6,89E-08	2,22E-09	3,26E-10	3,09E-06	3,62E-07	9,52E-06
10 h	36000	2,60E-09	6,31E-10	4,28E-08	1,33E-09	2,09E-10	2,26E-06	2,40E-07	6,32E-06
12 h	43200	2,21E-09	5,36E-10	3,63E-08	1,11E-09	1,78E-10	1,85E-06	2,08E-07	5,47E-06
1 jour	86400	1,18E-09	2,87E-10	1,95E-08	5,54E-10	9,53E-11	8,63E-07	1,19E-07	3,14E-06
2	172800	6,34E-10	1,54E-10	1,04E-08	2,77E-10	5,11E-11	4,03E-07	6,85E-08	1,80E-06
3	259200	4,40E-10	1,07E-10	7,24E-09	1,85E-10	3,54E-11	2,58E-07	4,95E-08	1,30E-06
100 h	360000	3,27E-10	7,95E-11	5,39E-09	1,33E-10	2,64E-11	1,80E-07	3,81E-08	1,00E-06
5 j	432000	2,78E-10	6,75E-11	4,57E-09	1,11E-10	2,24E-11	1,47E-07	3,29E-08	8,66E-07
7 j	604800	2,05E-10	4,98E-11	3,38E-09	7,92E-11	1,65E-11	1,01E-07	2,51E-08	6,62E-07
200 h	720000	1,75E-10	4,26E-11	2,89E-09	6,65E-11	1,41E-11	8,38E-08	2,19E-08	5,76E-07

Évolutions du taux de dégazage en fonction du temps pour quelques matériaux de base

Les 2 premières valeurs sont calculées avec Q1 et α 1, celles en rouge avec les deux Q et les deux α , les suivantes avec Q10 et α 10.

Flux des Jauges Bayard-Alpert et RGA (hPa.l/s)

Jauge Bayard-Alpert (filaments W)	~ 10 ⁻⁹
Jauge Bayard-Alpert (filaments W thoriés)	$\sim 10^{-10}$
Residual gas analyzer (W filaments)	~ 10 ⁻⁸

Conversion des unités de taux de dégazage (Chiaggato – CERN – 2009)

A propos des unités du tableau ci-après :

Pa.m³.s.m⁻² = Pa.m.s⁻¹ = N.m⁻².m.s⁻¹ = W.m⁻²; molec = molécules ; mol = moles

 R	<u>Pam</u> s	Torr I s cm ²	mbar l s cm ²	molec s cm ²	<u>mol</u> s cm ²
Pa m s		7.5x10 ⁻⁴	10 ⁻³	2.5x10 ¹⁶	4.1x10 ⁻⁸
Torr I s cm ²	1330		1.33	3.3x10 ¹⁹	5.5x10 ⁻⁵
mbar l s cm ²	10-3	0.75		2.5x10 ¹⁹	4.1x10 ⁻⁵
molec s cm ²	10 ³	3x10 ⁻²⁰	4x10 ⁻²⁰		1.7x10 ⁻²⁴
mol s cm ²	2.4x10 ⁷	1.8x10 ⁴	2.4x10 ⁴	6.02x10 ²³	

7. Conversion entre les unités les plus courantes en technologie du vide (source Pfeiffer Vacuum)

Pression

									, PFEIFFER VACUUM		
	Pa N/m²	bar	mbar	µbar dyn/cm²	Torr mm Hg	micron μ, mTorr	atm	at	mm WS	psi lbf/inch²	psf lbf/ft ²
Pa	1	1 · 10 ⁻⁵	1 · 10 ⁻²	10	7.5 · 10 ⁻³	7.5	9.87 · 10 ⁻⁶	1.02 · 10 ⁻⁵	0.102	1.45 . 10-4	2.09 · 10 ⁻²
bar	1 · 10 ⁵	1	1.103	1.106	750	7.5 · 10 ⁵	0.987	1.02	1.02 - 104	14.5	2.09 · 10 ³
mbar	100	1 · 10 ⁻³	1	1000	0.75	750	9.87 · 10 ⁻⁴	1.02 · 10-3	10.2	1.45 . 10-2	2.09
µbar	0.1	1 - 10-6	1 · 10 ⁻³	1	7.5 - 10-4	0.75	9.87 · 10 ⁻⁷	1.02 · 10 ⁻⁶	1.02 · 10-2	1.45 · 10 ⁻⁵	2.09 · 10 ⁻³
Torr	1.33 · 10 ²	1.33 · 10 ⁻³	1.33	1330	1	1000	1.32 · 10 ⁻³	1.36 · 10 ⁻³	13.6	1.93 · 10 ⁻²	2.78
micron	0.133	1.33 · 10 ⁻⁶	1.33 · 10 ⁻³	1.33	1 · 10 ⁻³	1	1.32 · 10 ⁻⁶	1.36 · 10 ⁻⁶	1.36 · 10 ⁻²	1.93 · 10 ⁻⁵	2.78 · 10 ⁻³
atm	1.01 · 10 ⁵	1.013	1013	1.01 · 106	760	7.6 · 10 ⁵	1	1.03	1.03 - 104	14.7	2.12 . 103
at	9.81 - 104	0.981	981	9.81 · 10 ⁵	735.6	7.36 · 10 ⁵	0.968	1	1 - 104	14.2	2.04 · 10 ³
mm WS	9.81	9.81 10-5	9.81 · 10 ⁻²	98.1	7.36 · 10 ⁻²	73.6	9.68 · 10 ⁻⁵	1 · 10-4	1	1.42 · 10 ⁻³	0.204
psi	6.89 · 10 ³	6.89 · 10 ⁻²	68.9	6.89 · 10 ⁴	51.71	5.17 · 10 ⁴	6.8 · 10 ⁻²	7.02 - 10-2	702	1	144
psf	47.8	4.78 · 10 ⁻⁴	0.478	478	0.359	359	4.72 · 10 ⁻⁴	4.87 · 10 ⁻⁴	4.87	6.94 · 10 ⁻³	1

Flux gazeux et divers.

	Pa m³/s W	mbar I/s	Torr I/s	atm cm³/s	lusec	sccm	slm	Mol/s	°C	F
Pa m ³ /s	1	10	7.5	9.87	7.5 103	592	0.592	4.41 · 10-4	100	212
mbar l/s	0.1	1	0.75	0.987	750	59.2	5.92 · 10 ⁻²	4.41 · 10 ⁻⁵		
Torr I/s	0.133	1.33	1	1.32	1000	78.9	7.89 · 10 ⁻²	5.85 · 10 ⁻⁵	80	176
atm cm ³ /s	0.101	1.01	0.76	1	760	59.8	5.98 · 10 ⁻²	4.45 · 10 ⁻⁵	60	140
lusec	1.33 - 10-4	1.33 · 10-3	10-3	1.32 . 10-3	1	7.89 . 10-2	7.89 · 10 ⁻⁵	5.86 · 10 ⁻⁸		
sccm	1.69 -10 -3	1.69 · 10 -2	1.27 · 10 ⁻²	1.67 · 10 ⁻²	12.7	1	10 ⁻³	7.45 · 10 ⁻⁷	40	104
sim	1.69	16.9	12.7	16.7	1.27 . 104	1000	1	7.45 . 10-4	20	68
Mol/s	2.27 ·10 ³	2.27 · 10 ⁴	1.7 · 10 ⁴	2.24 - 104	1.7 - 107	1.34 · 10 ⁶	$1.34 \cdot 10^3$	1	20	
	cm	inch -	ft		к	°C		F	0	32
cm	1	0.394	0.033	к	1	K-27	3.15	9/5 K- 459.67	-20	4
inch	2.54	1	0.083	°C	°C+273.15	1		9/5 °C+32	10	10
ft	30.48	12	1	F	5/9 (F+459.67) 5/9 (F	-32)	1	-40	-40

Autres

$m^{3}/h = l/s * 0,27$	$l/s = m^3/h * 3,6$	
1 Torr = 0,76 hPa et	1 hPa = 1,33 Torr	Si on a besoin d'un ordre de grandeur, on peut "confondre" hPa et Torr.

H)Bibliographie

Ouvrages généraux ou en rapport directe avec le calcul des installations sous vide

O'Hanlon, J.F. - A User's Guide to Vacuum Technology (Second Ed.) - John Wiley & Sons – (1989) ; (Third Ed) John Wiley & Sons (2003) - 0-471-27052-0

Delafosse J Mongaudin G - Les Calculs de la Technique du Vide – SFITV - (1961)

Henry R. P. - Cours de Science et Technique du Vide – SFITV - (1961)

Dushman, S. and Lafferty, J.M. - *Scientific foundations of vacuum technique [Second Ed.]*- J. Wiley & Sons, (1962) - ISBN 0-471-17593-5

Hoffman, D.M., Singh, B. and Thomas, J.H., Eds. - *Handbook of Vacuum Science and Technology* - Academic Press – (1998) - 0-12-352065-7

Tubes en série, écoulement moléculaire (articles)

Clausing P. - The Flow of Highly Rarefied Gases through Tubes of Arbitrary Length - JVST 8, 636 - (1971) - https://doi.org/10.1116/1.1316379

Trad. de l'allemand de l'article de Clausing de Annalen der Physik 12, 961 (1932)

Oatley C W - The flow of gas through composite systems at very low pressures – 1957 - Br. J. Appl. Phys. 8 15

Remarques de Steckelmacher à Oatley et réponse : Oatley C W, Steckelmacher W - *The flow of gas at very low pressure* - 1957- Br. J. Appl. Phys. 8 495 10.1088/0508-3443/8/12/410 + 10.1088/0508-3443/8/12/411

Haeffer R. A. - Addition theorem for the resistance to flow of composite systems and it relationship with the pumping speed in the region of molecular flow - Vacuum Vol 30 Nr 6 1979

Steckelmacher W. - A review of the molecular flow conductance for systems of tubes and components and the measurement of pumping speed - Vacuum Vol 16, Is 11, (1966), p. 561-584 - https://doi.org/10.1016/0042-207X(66)91416-3

Steckelmacher W. - Knudsen flow 75 years on: the current state of the art for flow of rarefied gases in tubes and systems - 1986 Rep. Prog. Phys. 49 1083

Taux de dégazage (article)

Grinham Rebecca, Chew Andrew - *A Review of Outgassing and Methods for its Reduction* - Appl. Sci. Converg. Technol. 26(5): 95-109 (2017) - http://dx.doi.org/10.5757/ASCT.2017.26.5.95

Calcul de la conductance pour des composants spécifiques (articles)

Krause M., Wolf J. - Improved model for transmission probabilities of edge-welded bellows based on TPMC simulations - Vacuum 160 (2019) 402–409 - https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.11.049

Pfeiffer Vacuum – Description, Bases de calculs, Exemples d'utilisation, Caratctéristiques techniques des pompes turbo. PM 800 049 F (Intéressant pour les bases de calculs ; doit dater des années 1980 au vu des pompes turbo)

I) Annexes

1. Pistes de développements

Sortie des résultats :

La sortie des résultats pourraient être améliorer par un affichage sous forme d'un tableau récapitulant les composants, leur paramètres et les valeurs numériques. La manière de le faire n'est pas encore définie.

Une piste est de faire une simple extractions des données du fichier de sauvegarde, par un script shell (ou py, ou ce qu'on préfère).

Une autre piste est d'avoir un tableau équivalent à SysMap pour les composants (CompMap ?), et d'exporter SysMap et CompMap sous forme d'un fichier csv ou tsv.

Autres composant

Ajout d'un composant générique sans équation (de type pompe) s'appelant « **JOKER** », comportant une dizaine de paramètres virtuels correspondant aux différentes unités possibles, dont les noms peuvent être utilisés dans **GENERAL EQUATION**.

Possibilité pour l'utilisateur de créer un nouveau composant ou une nouvelle équation (plug-in ?).

Possibilité d'ajouter des flux au composant Chamber, pour éviter de devoir en multiplier le nombre, sous forme de flux fixé ou de surface*taux de dégazage.

Pour éviter de devoir ouvrir plusieurs composant Chamber, donner la possibilité d'ajouter plusieurs flux, soit sous forme d'une valeur, soit sous forme du produit Surface x Taux de dégazage (avec plusiurs champs Surfce et Taux).

Ajout de boutons

Ajout d'un bouton COMPUTE globale pour tout les composants (similaire à SAVE pour les équations).

Ajout d'une paire de boutons **>** et **<** dans la barre haute des fenêtres et agissants simultanément pour tout les cadres **COMPONENTS** ou **EQUATIONS** existants.

Ajout d'un bouton « **RESET NAMES** » pour rappeler les noms d'origine de la fenêtre à sa création. Permettrait de renommer sans bouleverser tout.

Configuration, personnalisation

Possibilité de configurer les valeurs par défaut à l'ouverture d'un nouveau projet, par un tableau (fichier texte).

Interface graphique

Optimiser la hauteur des fenêtres, pour pouvoir en avoir plus ouverte en même temps. Ajouter une option d'affichage ou non de l'équation ? Permettrait de gagner pas mal de place.

Le tableau SysMap demanderait une refonte pour le rendre plus facile à lire.

Il lui manque les unités. Il ne comporte que les n° d'équations et pas les noms et ne prend donc pas en compte les renommages.

Ajouter un bandeau au haut de la fenêtre Équations, qui contiendrait un tableau compact avec juste les inconnues des cadres existants. Permettrait de voir d'un coup d'œil l'ensemble des résultats et ce qui est déjà calculé ou ne l'est pas encore (sans ouvrir SysMap).

Ergonomie à l'usage

Possibilité d'écrire dans des champs comme le nom de composant en cliquant dans le champs et de valider par CR (ne pas devoir reprendre la sourie. On peut garder le bouton Apply, mais le CR serait une alternative acceptée.

Au renommage et à la modification des équations, affichage d'un menu déroulant avec le noms des paramètres existants (il peut être très long...).

Une modification d fond serait de faire le chaînage par la schéma, en reliant les symboles entre eux à la sourie, tel que les outils de programmation visuelle. Un tel système avait été implémenté au départ, puis abandonné car trop complexe par rapport à d'autres développement plus nécessaires. Cela demanderait une ré-écriture assez conséquente du code.

Nouvelles options

Meccano de tests logiques configurable pour afficher des alertes sur les résultats de calculs. Par exemple : pression obtenue incohérente avec le régime d'écoulement utilisé, ou inférieur au Plim de la pompe, ou incohérence de diamètre de tubes en l'absence d'une réduction.

2. Bug et modifications en cours

Cette partie est un fourre-tout pour le débogage et le développement, appelé à disparaître !

Bug connus

Lors de la manipulation des équations, des résultats négatifs peuvent être produit. Faut-il imposer des sorties en valeur absolue. => préciser les situations.

Développements en cours

Modification de l'équation Q = C*(Pi-Pf) ; actuellement elle est écrite dans le menu en (Ti-Tf).

3. Utilisation de VST sous windows

Le code tcl est utilisable sous Windows et Maxima existe en version Windows, mais nous n'avons pas trouvé de version Windows de expect. On ne peut donc pas transporter le code directement. Si quelqu'un connaît une source de expect, nous sommes intéressés !

Les deux alternatives possibles sont :

- installer une machine virtuelle linux via Virtualbox (opérationnel),
- utiliser Cygwin (émulateur linux dans Windows, pas opérationnel à ce jour).

a) Linux en machine virtuelle (opérationnel)

L'installation d'une machine virtuelle linux permet d'avoir un vrai environnement linux complet, totalement indépendant dans son fonctionnement interne du système Windows, et en parallèle avec l'environnement Windows, si celui-ci est indispensable simultanément. Les performances des PC actuels supportent cela sans difficultés, et VST ne demande qu'un linux minimal et est lui-même très sobre en ressources.

Installer Virtual Box et un linux invité

Aller sur VirtualBox (https://www.virtualbox.org/) et télécharger le VirtualBox x.x.x platform packages (testé en 2020 avec version pour win 64 bit : 6.1.4).

En parallèle télécharger l'image iso de la distribution linux souhaité. Les explications ci-après ont été testées avec une Debian 10 Buster. VST n'étant pas gourmand et ne nécessitant qu'un terminal pour démarrer, on peut prendre une distribution légère comme lubuntu ou mint-mate.

Les liens suivant peuvent servir de guides pour installer VirtualBox et la distribution linux.

Le premier lien détaille bien l'installation de VB, quoique sur une version un peu ancienne. Certaine étapes sont plus détaillées dans des versions plus récentes.

https://openclassrooms.com/fr/courses/43538-reprenez-le-controle-a-laide-de-linux/37630-installez-linux-dans-une-machine-virtuelle

Le deuxième lien détaille plus l'installation de la distribution linux.

https://www.faistesbalises.net/os/16/tuto-installer-debian-sous-virtualbox-en-s-affranchissant-des-additionsinvite.html

Attention, l'auteur de ce dernier lien vise un serveur web et pas une machine de travail. On le suit donc jusqu'à la rubrique « Configuration du réseau ». Un peu avant, à la fenêtre « Sélection des logiciels », il faut choisir un environnement de bureau (gnome, Mate XFCE, etc), et ne pas continuer comme lui.

Configurer linux

Une fois le linux installé, on le redémarre et on ouvre une session du user qu'on a créé pendant l'installation. On aura besoin de l'explorateur de fichiers, d'un terminal et éventuellement d'un navigateur web pour chercher de l'aide. L'essentiel des opérations va se faire dans un terminal.

Il faut dans l'ordre :

Donner des droits root à ce user.

pour qu'il puisse installer les paquets nécessaires sans devoir se logger en root. Le deuxième lien indique comment donner ces droits. Il y a plusieurs manières, une recherche sur internet sur « linux, droit sudo » donnera des info.

Modifier la liste des sources de paquets Debian (dans le cas d'une Debian. Ce sera similaire pour une autre distri.).

Elles se trouve dans /etc/apt/source.list. Il y a normalement les lignes correspondant à l'image iso qui sont actives (sans # en premier caractère de ligne) et d'autres lignes ressemblantes, qui ont # en début de ligne (le # signifiant qu'elles ne doivent pas être exécutées).

On ajoute donc un # devant les sources iso, et on enlève les # devant les autres lignes de chemin de dépôts qui devraient y être par défaut. Voir sur le net pour les détails propres à votre distribution.

Voilà un exemple de ce qu'on doit avoir à la fin. On peut mettre d'autres dépôts selon où on est situé (ressources locales CNRS ou université, plus proches ? Mais est-ce que la distance a là un grande importance ;-) ?).

Debian Buster, dépôt principal deb http://deb.debian.org/debian/ buster main deb-src http://deb.debian.org/debian/ buster main # Debian Buster, mises à jour de sécurité

Debian Buster, mises à jour de sécurité deb http://deb.debian.org/debian-security/ buster/updates main deb-src http://deb.debian.org/debian-security/ buster/updates main

Debian Buster, mises à jour "volatiles"
deb http://deb.debian.org/debian/ buster-updates main
deb-src http://deb.debian.org/debian/ buster-updates main
#ajouter les ligenes commentées de la vraie VM.

Mettre à jour la base de donnée des paquets installés :

sudo apt-get update

Installer les paquets nécessaires à VST.

Les paquets à installer sont : tcl, tk, expect, maxima, texlive-latex-extra, dvipng,

Dans un terminal, entrer :

sudo apt-get install tcl
sudo apt-get install tk
sudo apt-get install expect
etc

On peut tout mettre l'un derrière l'autre dans la même ligne de commande, mais si on n'a pas l'habitude de linux, il est plus prudent de les faire un à un. S'il y a un problème, on le voit de suite sans devoir éplucher des pages de lignes barbares de retour des commandes.

sudo apt-get install tcl tk expect maxima texlive-latex-extra dvipng

Installer le code de VST

Pour cela, il faut le rapatrier dans la machine virtuelle linux. Il faut donc qu'elle puisse échanger avec le monde extérieur !

Première solution : l'accès réseau s'installe tout seul et fonctionnent bien sans rien faire, on peux passer par un cloud ou le mail (le code n'est pas gros).

Une solution plus élégante est de permettre à l'Hôte (Win) et à l'invité (Linux) de s'échanger des données, par un dossier partagé à monter de chaque coté. Sur le plus long terme, c'est la solution incontournable.

On est sensé avoir accès aux ports usb (pas essayé), et accessoirement pouvoir partager le copier/coller (pour le moment cela ne fonctionne pas).

Pour le reste de l'installation linux et le démarrage, se reporter aux instructions pour linux, en début de ce document.

Installation d'un dossier partagé (entre l'hôte Windows et le l'invité Linux).

Les liens ci-après ont été bien utiles mais il a fallu piquer dans chacun des trois pour y arriver. Malgré quelques retours d'injures, ça fonctionne !

https://www.seeyar.fr/partage-dossier-virtualbox/ https://www.linuxtricks.fr/wiki/installer-les-additions-invite-virtualbox-dans-debian https://doc.ubuntu-fr.org/virtualbox_additions_invite

Démarrer Virtual Box

Dans Configuration/ Dossiers partagés

Créer un dossier qui servira de point de montage Windows, par exemple sur Bureau/Partage_W Valider la case Montage auto

Dans notre cas laisser les droits en read/write (ce ne serait pas forcément le cas pour un invité winXP sur un hôte win10, à cause des passages possibles de covid et similaires). Mais sur ce plan, linux...

Démarrer la machine virtuelle (linux, invité) et installer les « Additions invitées ». Pour ce faire :

Vérifier que les paquet *build-essential* et *dkms* sont là, sinon, les installer (sudo apt-get install etc.) Créer un dossier comme point de montage coté linux invité, par exemple Partage_L

Dans le menu Virtual Box de la machine invitée (barre en haut de la fenêtre de la VM) :

Périphérique/Insérer l'image CD Additions invitées

J'ai eu un retour d'erreur, et pourtant cela a fonctionné (était déjà monté?)

Dans le terminal :

cd /media/cdrom0/

Un ls doit montrer la présence d'une série de fichiers dont le nom commencer par VBLinuxAdditions...

```
sudo sh VboxLinuxAdditions.run
```

Il se passe des choses ; j'ai eu des retours d'erreurs... et pourtant ! Dans le terminal :

mount

Sort la liste de ce qui est monté ou disponible au montage. Dans les dernières lignes, on doit reconnaître *vboxsf* et le nom du répertoire crée coté Windows.

sudo mount -t vboxsf Partage_W home/user/chemin/Partage_L/

S'il n'y a pas de retour particulier, on doit pouvoir y lire et écrire depuis chaque OS et donc y mettre le code VST depuis Windows et le récupérer depuis Linux.

b) Cygwin (pas opérationnel à ce jour, bonnes volontés bienvenues !)

Ce qui suit n'est donné là qu'à titre d'information pour quelqu'un qui voudrait trouver la solution !

Solution intégrée à Windows, Cygwin a l'avantage de permettre les passage directes des applications linux à l'environnement windows. Mais en revanche, ce n'est pas un vrai environnement linux, avec les outils et démarches propres à ce système.

Windows n'étant toujours pas capable, malgré son age, de distinguer une majuscules d'une minuscules (!), il faut renommer le *fichier* vst en vstexec, pour le différencier du *répertoire* VST/.

1 - Télécharger Cygwin (<u>https://www.cygwin.com/</u>) en cliquant sur le lien <u>setup-x86_64.exe</u>

2 – Installer Cygwin :

2a		« Choose A Download Source » :	cocher « Install from Internet »
2b		« Select Root Instal Directory » :	Choisir le chemin d'installation » Cocher « All Users »
2c		« Select Local Package Directory » :	choisir le dossier « Téléchargement »
2e		« Selecte Your Internet Connection » :	laisser le choix par défaut « Use System Proxy Settings »
2e		« Choose A Download Site » :	choisir « http://cygwin.mirror.constant.com » (2 ^{ème} choix)
2f		« Select Package » :	
	2f1	Dans le menu déroulant « View »,	choisir « Full »
	2f2	Dans la cellule de recherche (« Search ») :	rentrer « xinit »
	2f3	2 lignes apparaissent : « xinit » et « xinit-debuginfo ».	Pour ces deux lignes, à la colonne « New », cliquer sur la flèche vers le bas et sélectionner les dernières versions à installer
	2f4		Faire de même avec la recherche « tcl-tk » (3 éléments)
	2f5		Faire de même avec la recherche « expect » (5 éléments)
	2f6		Faire de même avec la recherche « maxima » (8 éléments)
2g		Le téléchargement commence	
2h		« Create Icons » :	Cocher les deux choix
2j		Finaliser l'installation	

2k Dans le dossier « Téléchargement » vous pouvez supprimer le fichier de téléchargement qui s'est crée pour l'installation de cygwin (« http%3a%2f%2fcygwin.mirror.constant.com%2f »)

3 – Lancer Cygwin :

3a	Avant de lancer Cygwin, dans le menu Démarrer, selectionner le dossier « Cygwin-X » et cliquer sur « X-win Server » (pas de modification apparente)
3b	Lancer le terminal de Cygwin
3c	Rentrer la commande « export DISPLAY=:0.0 », puis « Enter » (pas de modification apparente)
3d	Se déplacer dans le dossier d'installation de VST (Exemple : « Cd C:Users/Romain/Desktop/ VST_1.7 »). ATTENTION : le chemin ne doit pas comporter d'espace !!! Pour revenir en arrière dans l'arborescence : « Cd »
3e	Dans le dossier de VST : Rentrer la commande « ./vst » ou « ./vst.tcl » ou tout autre nom ayant « vst_XXX.tcl », « vst_XXX », à voir selon les versions

VST s'ouvre.

Dans l'état actuel, vst démarre, mais génère des bugs d'affichage et n'arrive pas à faire de calculs. L'origine du problème n'est pas encore très claire. La procédure d'installation ci-dessus semble correcte (vu que VST démarre), le non-fonctionnement de VST pourrait provenir de l'équivalent de Expect.

Pour fermer VST et Cygwin, dans le terminal cygwin :

Faire la combinaison « ctrl + c » : VST se referme Rentrer la commande « exit », puis « enter » : cygwin se referme

ATTENTION

- Si on vient de redémarrer l'ordinateur, repartir à l'3.

- Si on quitte puis relance cygwin, repartir à l' 3c

- Si vous avez déjà installé Cygwin, mais que vous avez oublié des paquets, il est possible d'installer les paquets manquants sans ré-installer cygwin :

- Relancer l'exécutable d'installation (« setup-x86_64.exe »)

- Refaire toute l' 2, les choix faits aux s 2a à 2e sont déjà pré-remplies, avec les s manquantes (2f2 à 2f6 selon les cas)

- Refermer cygwin, et repartir à l' 3