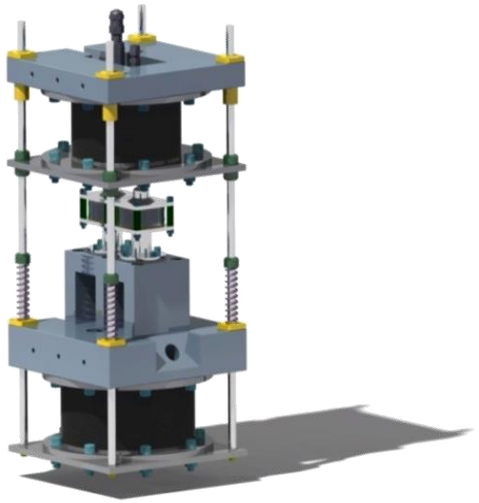
PROJET IndEHo



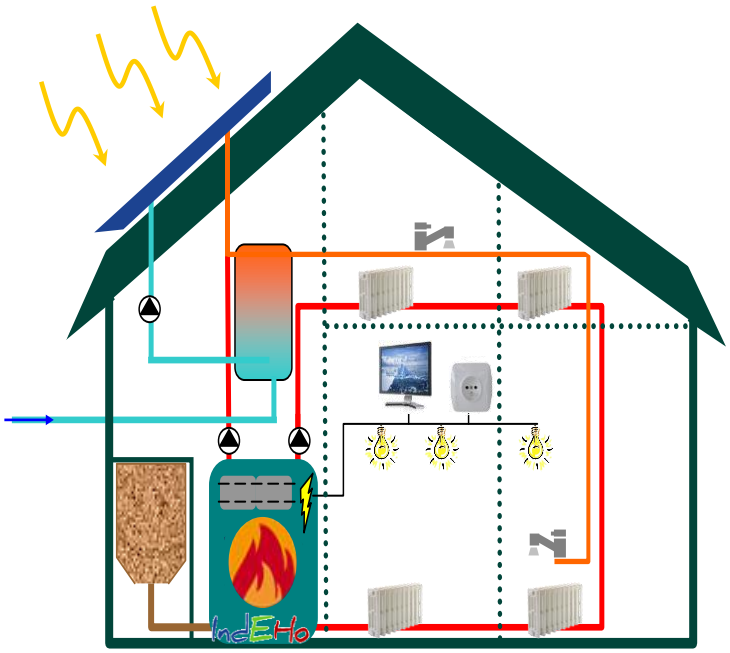
Système de micro-cogénération à cylindrée variable

T. Cartigny, M. Mille, M. Doubs
ASSYSTEM - FEMTO-ST Energie

Naissance du projet IndEHo (2008)

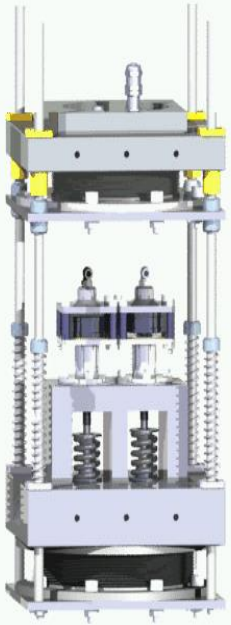
Nécessité d'apporter des solution pour rendre une habitation autonome en énergie par :

- **Une valorisation des énergies renouvelables**
- **La récupération de chaleur perdue**
- **Une production électrique décentralisée**
- **Une adaptation de la production d'énergie à la demande**



IndEHo, une solution innovante

Moteur à air chaud fonctionnant selon le cycle de Joule / Ericsson :



Un nombre de pièce **réduit**

Energie thermique disponible	Energie en sortie
18 kW	**3,3 kW électriques** **13 kW thermiques**

Ratio électrique sur chaleur : **25%**

Une **cylindrée variable** permet de conserver un rendement optimum quelque soit la puissance fournie et/ou à la demande de puissance de l'utilisateur

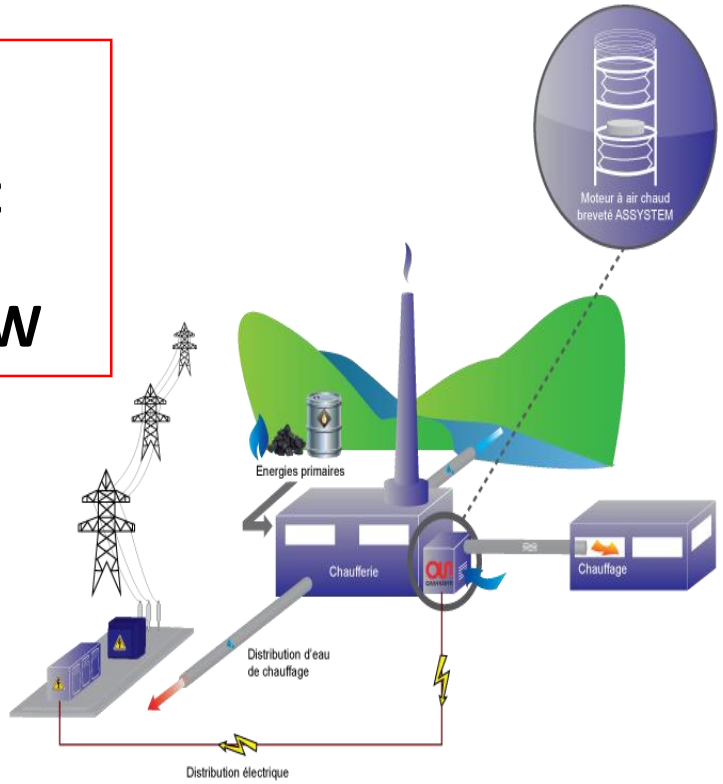
Une solution adaptable à l'industrie

Valoriser la chaleur fatale dans le domaine de l'industrie :

<u>Quelques chiffres:</u>

Température des fumées **150 - 800 °C**

Gamme de puissance: **1 kW à 1 MW**



Etude du concept

Validation du concept

Fabrication

Etude marché

Partenariats

Essais Sous-ensembles

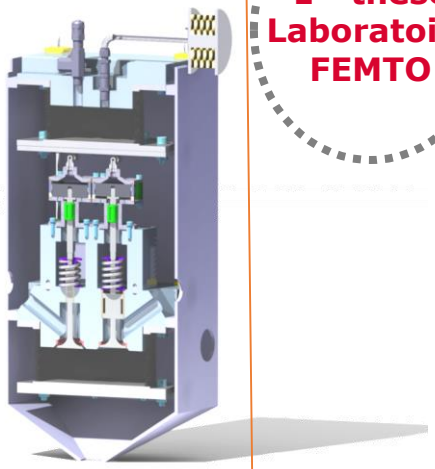
Confrontation Numérique - Expérimentale

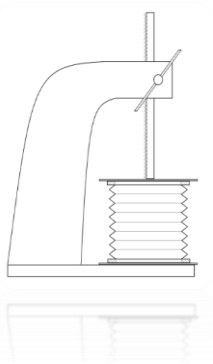
Essais Prototype complet

Partenariat UTBM

Dépôt du Brevet

1er thèse Laboratoire FEMTO





Essais sur enceinte de détente

2ème thèse Laboratoire FEMTO

Nov. 2008
Modélisations mathématiques

Mars 2011
Machine thermique à amplitude variable

Nov. 2011
Usinage puis assemblage prototype

2012
Etude de marché
Projet COGELEC
ADEME / TOTAL

2013
Etude sur les soufflets métalliques

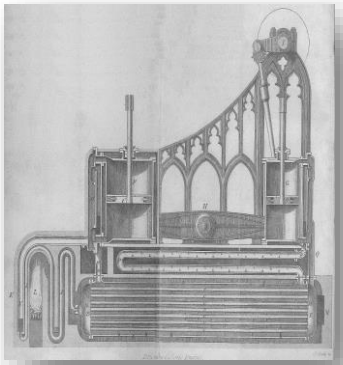
2014
Modélisation numérique et étude des soupapes

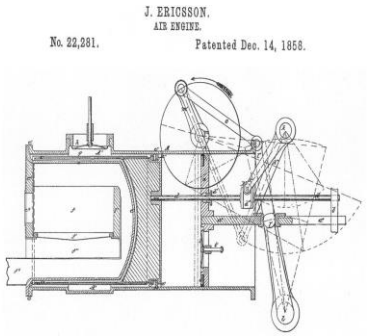
2015-2017
Réalisation d'un démonstrateur complet

John Ericsson 1803 - 1889

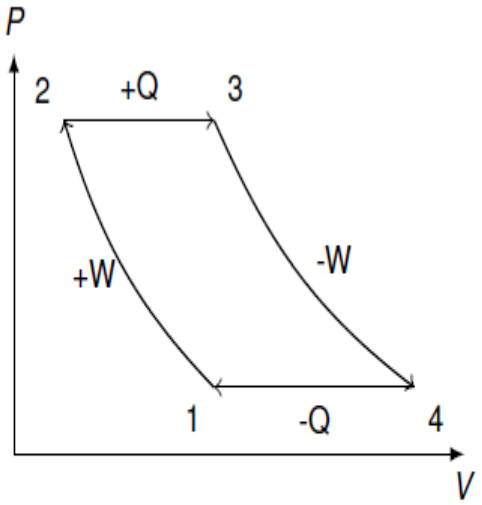
→ Plusieurs inventions (premier cuirassier, propulsion à hélice...)

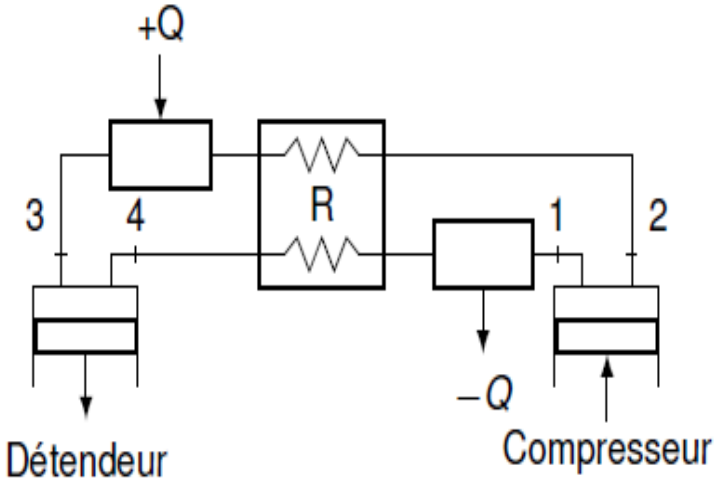
→ Travaux sur différentes familles de moteurs à air chaud (Joule, Ericsson, Stirling...)





Cycle Ericsson : Théorique





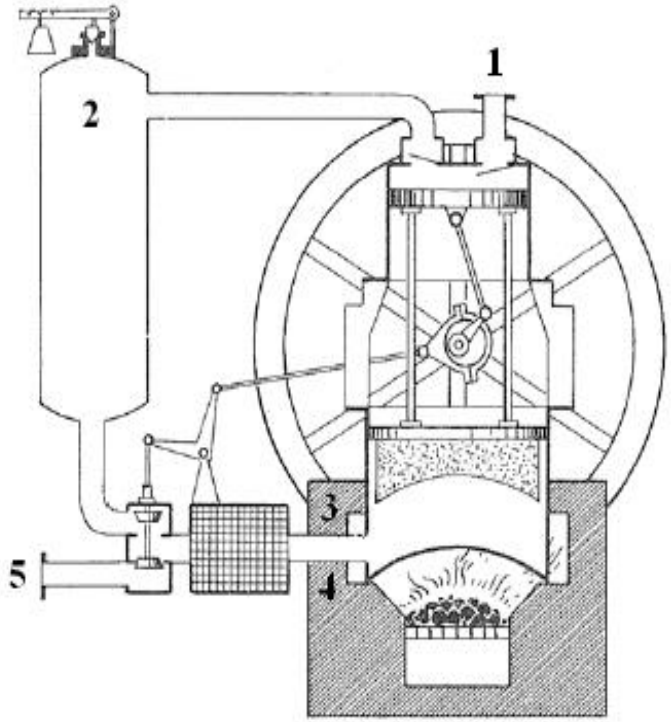
$1 \rightarrow 2$ Compression isotherme

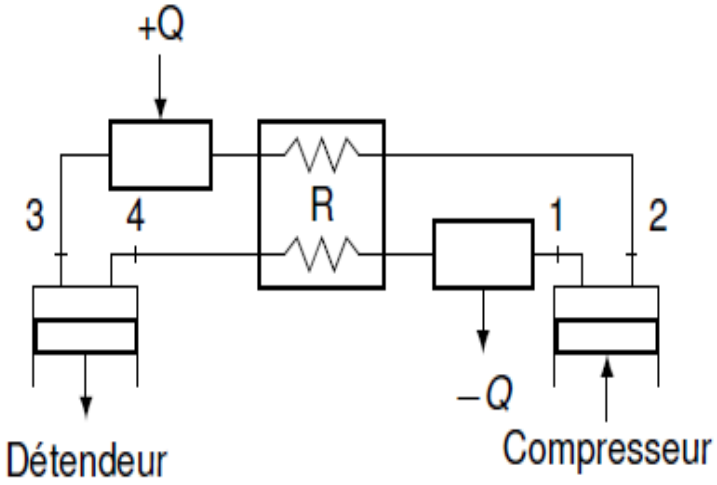
$2 \rightarrow 3$ Chauffage isobare

$3 \rightarrow 4$ Détente isotherme

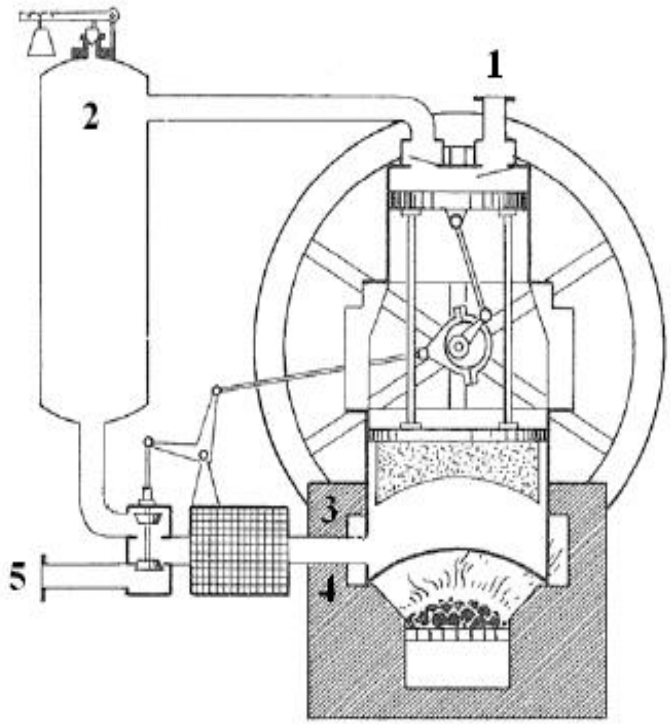
$4 \rightarrow 1$ Refroidissement isobare

Cycle Ericsson : Machine de 1851





Cycle Ericsson : M1851



- Deux exemplaires et un double pou
- $\emptyset_{dét}$ 1504mm, $\emptyset_{comp}$ 1240mm avec

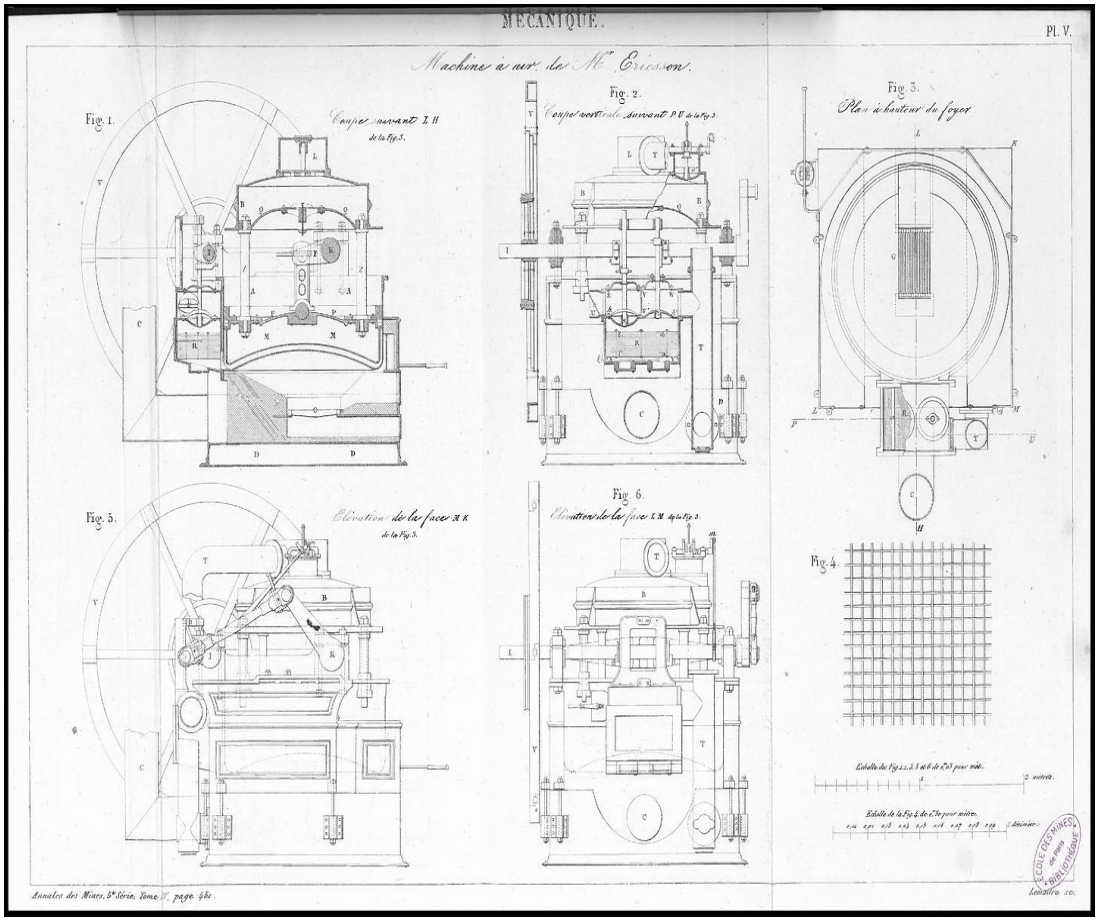
- $\theta_{\zeta(comp\ adm)}$ = 85,5 °C
- $\theta_{\xi(foyer)}$ = 343 °C
- $\theta_{\alpha(dét\ adm)}$ = 244 °C
- P_G = 1,4 à 1,65 atm

- Entre 30 et 50 tours par minute
- Puissance entre 2kW et 3 kW
- Rendement minimum 2,45%

Fermeture soupape admission entre 6

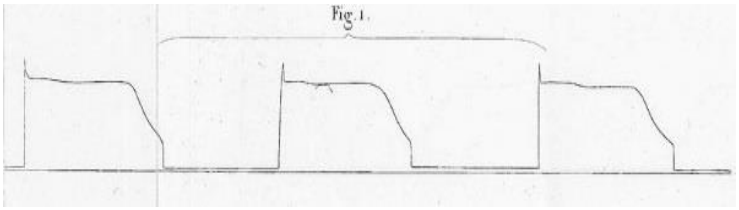
Appleton's mechanics' magazine and engineers' journal. New York : D. Appleton & Co., 1851.

Rapport d'essais sur le moteur par M. Combes du 15 au 9 aout 1853

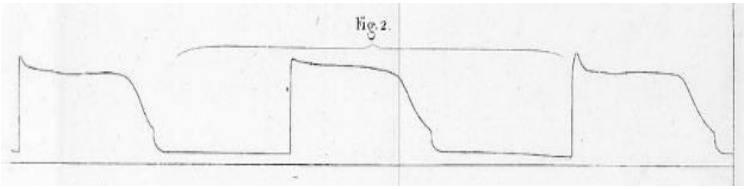


Les toiles métalliques disposées en paquet, comme dans la machine d'Ericsson, semblent devoir remplacer avec avantage les appareils à chauffer l'air dont on fait usage, depuis plusieurs années, dans un grand nombre d'ateliers métallurgiques et particulièrement d'usines à fer.

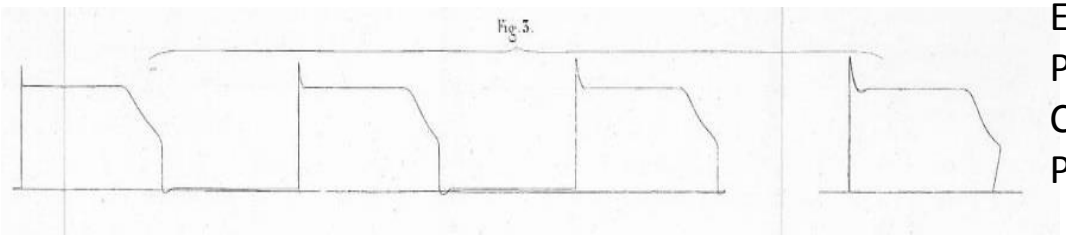
Essais du 15 juillet 1853 de 14h à 17h30
par M. Combes



Essai à 14h20
Pression de 1,4 à 1,5 atm avec 40 tr/min
Couple : 20 kg à 1,05m soit 206 N.m
Puissance de 0,86 kW



Essai à 15h50
Pression de 1,39 à 1,52 atm avec 47 tr/min
Couple : 15 kg à 2m soit 294 N.m
Puissance de 1,45 kW



Essai à 17h
Pression de 1,48 à 1,58 atm avec 36,5 tr/min
Couple : 30 kg à 2m soit 588,4 N.m
Puissance de 2,24 kW

Couple limite (arrêt) : 35 kg à 2m

Essais du 15 juillet 1853 de 14h à 17h30
par M. Combes

Les fuites d'air extrêmement fortes qui avaient lieu dans la machine du Havre, pour peu que la pression devînt un peu supérieure à celle de l'atmosphère extérieure, sont l'effet de vices de construction dont quelques-uns pourront être facilement évités; d'autres fuites, telles que celles qui ont lieu entre les parois du cylindre travaillant et la garniture du piston moteur, ne pourront être supprimées qu'au moyen de dispositions particulières, qui ne paraissent pas avoir été encore réalisées.

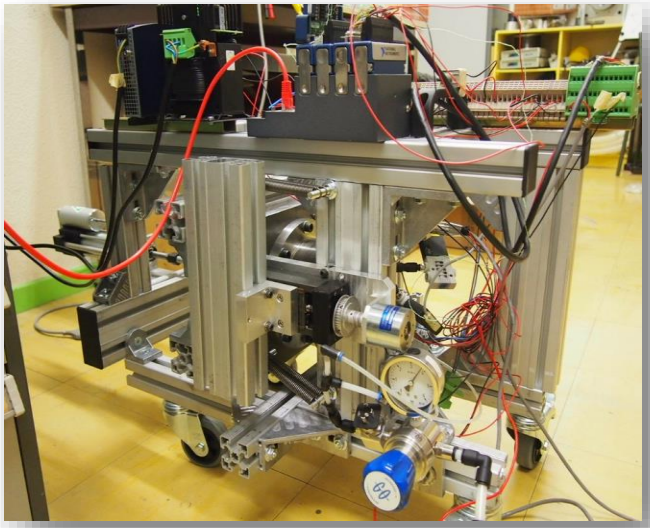
Essai à 14h20
Pression de 1,4 à 1,5 atm avec 40 tr/min
Couple : 20 kg à 1,05m soit 206 N.m
Puissance de 0,86 kW

Essai à 15h50
Pression de 1,39 à 1,52 atm avec 47 tr/min
Couple : 15 kg à 2m soit 294 N.m
Puissance de 1,45 kW

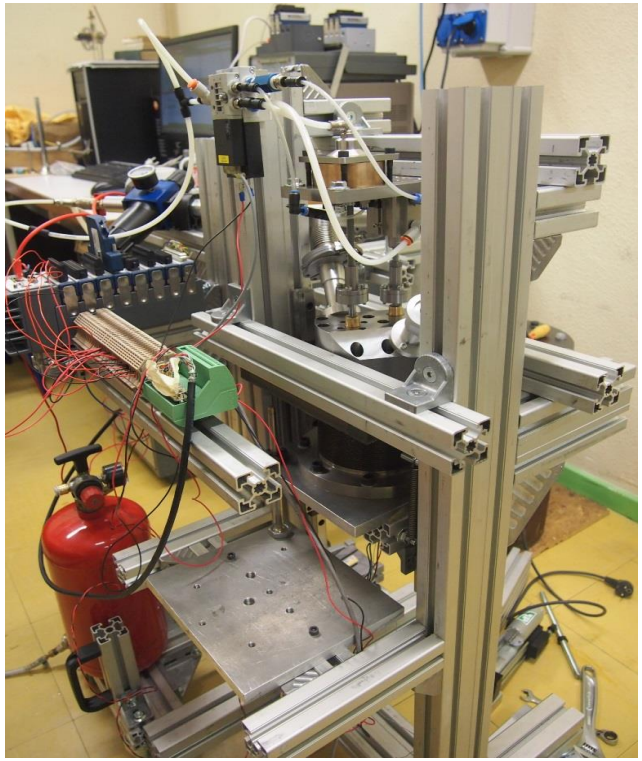
Essai à 17h
Pression de 1,48 à 1,58 atm avec 36,5 tr/min
Couple : 30 kg à 2m soit 588,4 N.m
Puissance de 2,24 kW

Couple limite (arrêt) : 35 kg à 2m

Nouvelle étape dans l'évolution du sous-ensemble

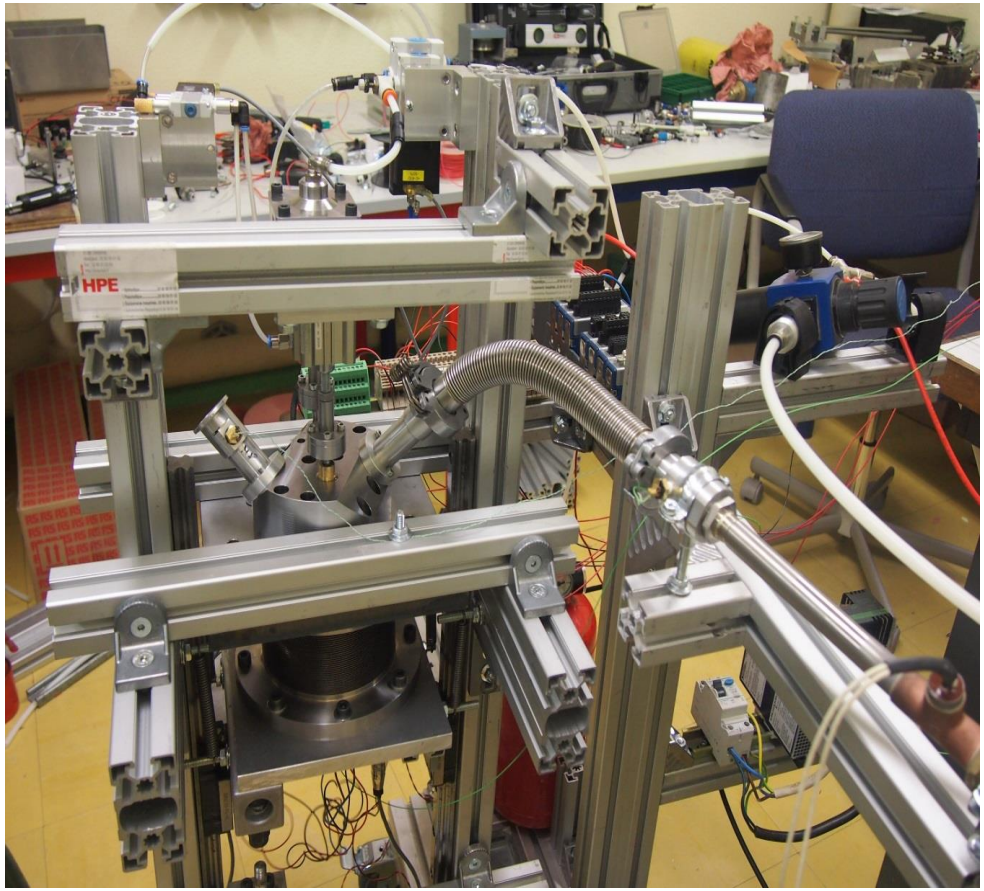


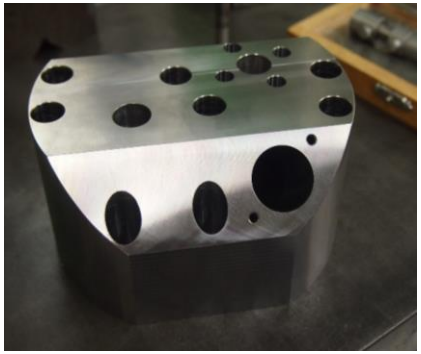
Gen 2.0 (2013 - 2014)

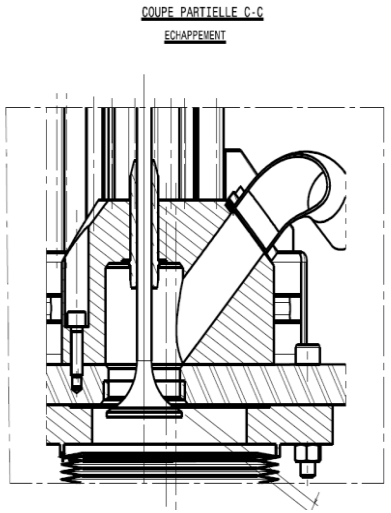


Gen 2.1 (2015)

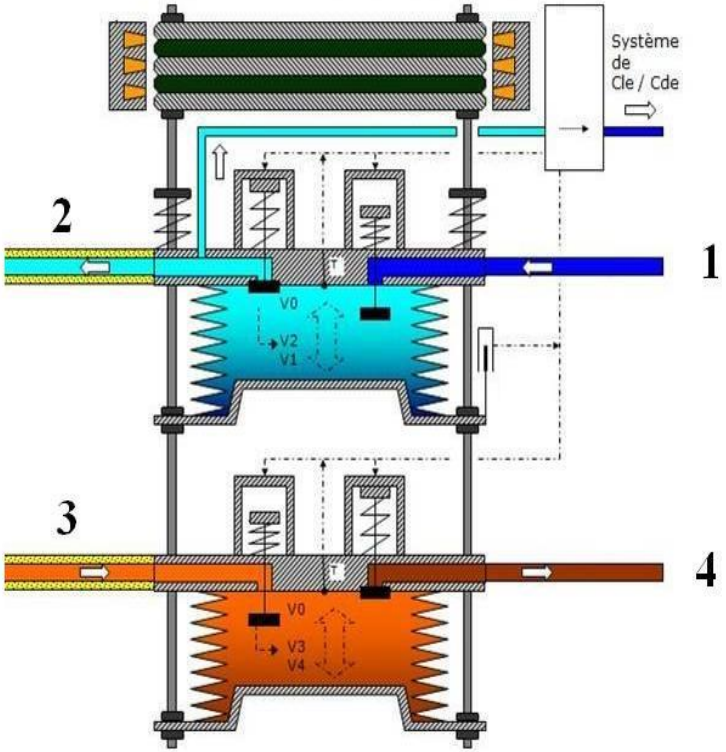
Nouvelle étape : améliorations

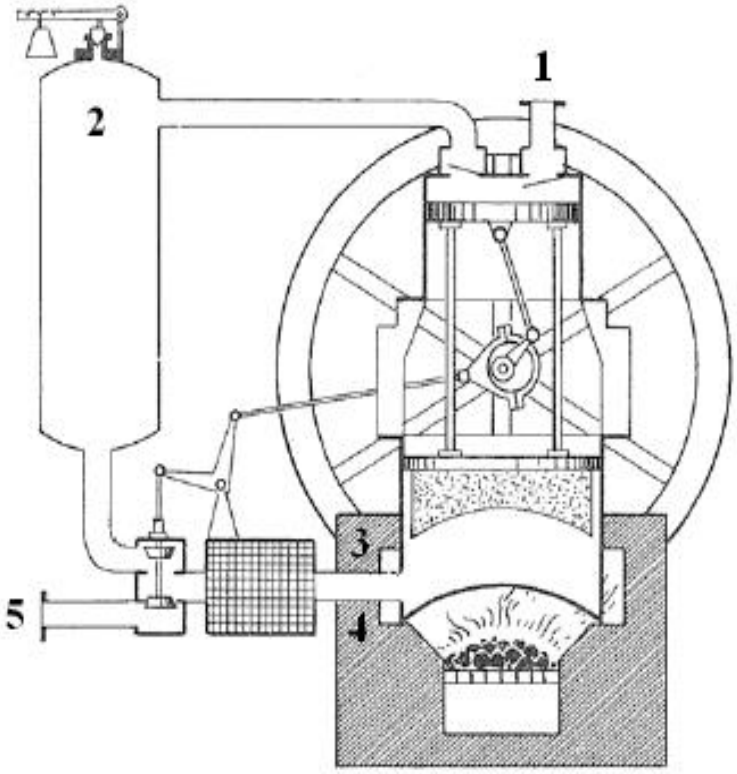




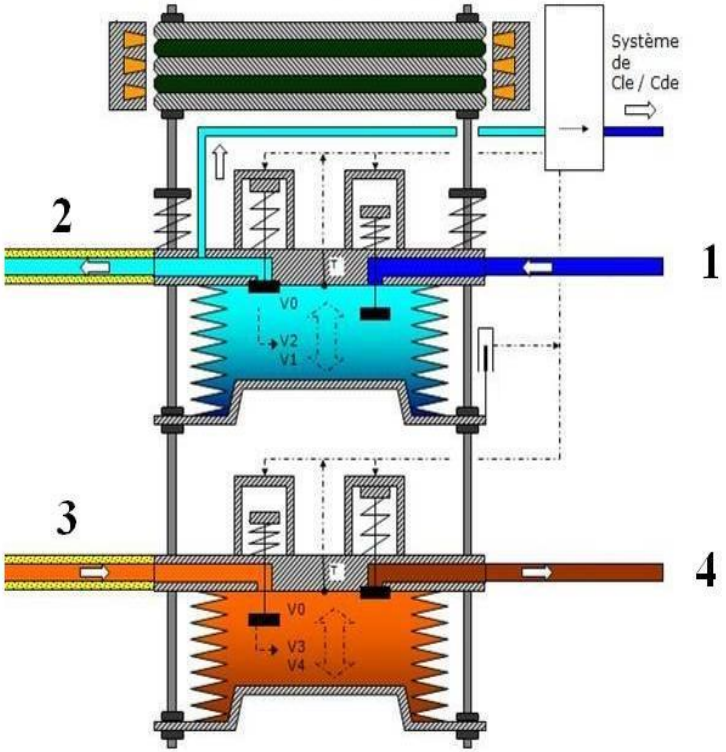


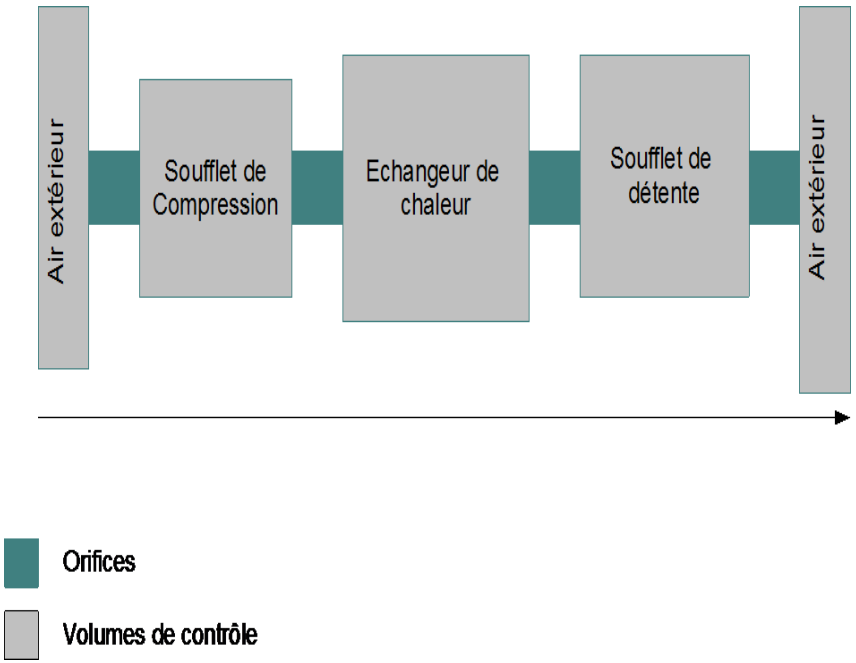
Modélisation moteur à cylindrée variable



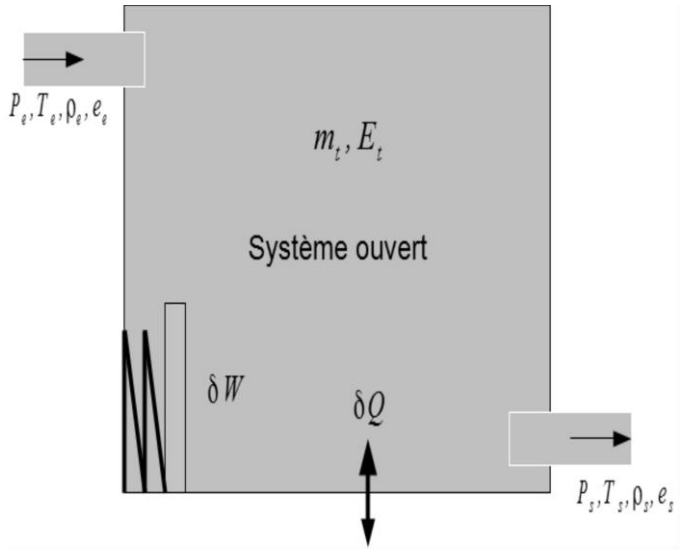


Modélisation moteur à cylindrée variable



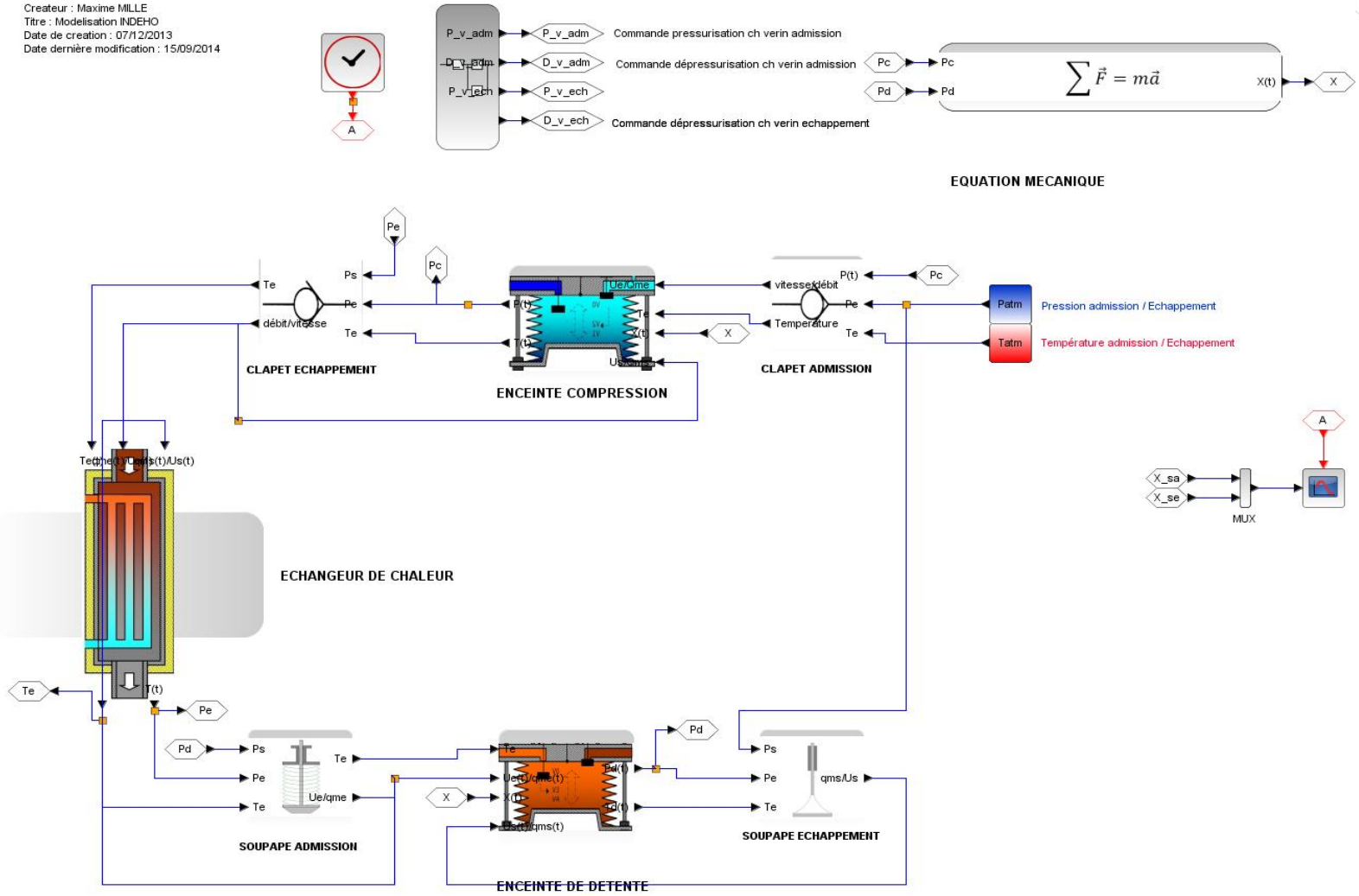


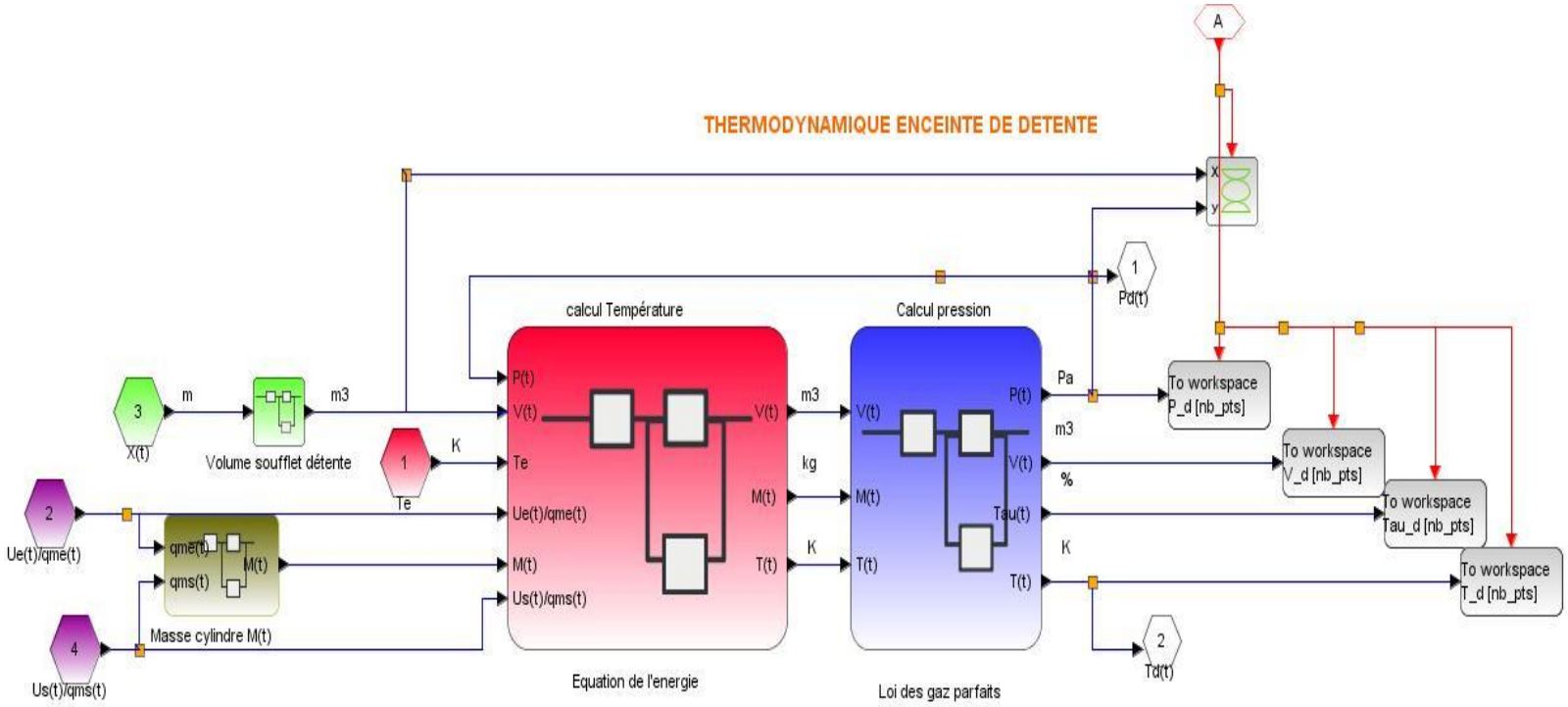
Hypothèses générales du modèle



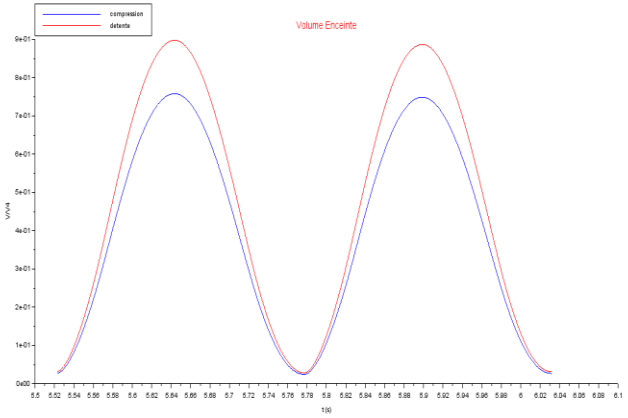
Exemple de sous système

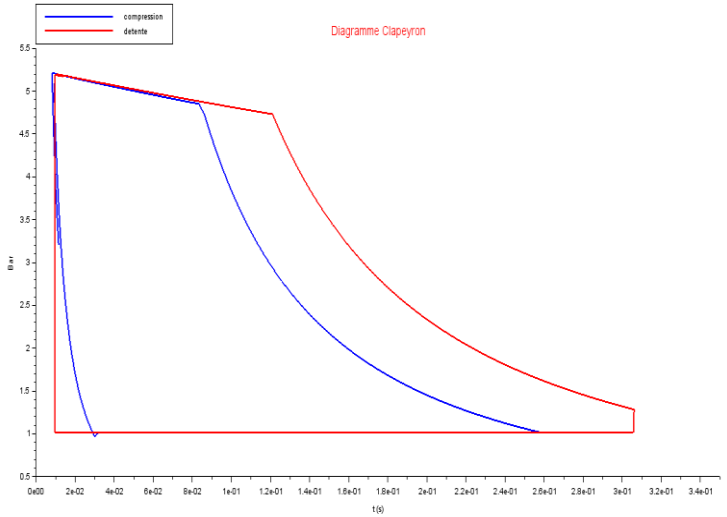
- Uniformité de la pression et de la température
- Fluide considéré comme un gaz parfait
- Propriétés du gaz (enthalpie, énergie interne), modélisées selon une évolution polynomiale de la température et de la pression
- Choix du transfert de chaleur avec les parois
- Equilibre Thermodynamique atteint pour chaque point de calcul
- Les capacités calorifiques à volume/pression constante du fluide sont constantes


Createur : Maxime MILLE
Titre : Modelisation INDEHO
Date de creation : 07/12/2013
Date dernière modification : 15/09/2014
P_v_adm
D_v_adm
P_v_ech
D_v_ech
Commande pressurisation ch verin admission
Commande dépressurisation ch verin admission
Commande dépressurisation ch verin echappement
Pc
Pd
X(t)
X
A
EQUATION MECANIQUE
Pe
Ps
Te
débit/vitesse
CLAPET ECHAPPEMENT
ENCEINTE COMPRESSION
vitesse/débit
Température
P(t)
CLAPET ADMISSION
Patm
Tatm
Pression admission / Echappement
Température admission / Echappement
X_sa
X_se
MUX
ECHANGEUR DE CHALEUR
SOUPAPE ADMISSION
SOUPAPE ECHAPPEMENT
ENCEINTE DE DETENTE
Ue/qme
qms/Us

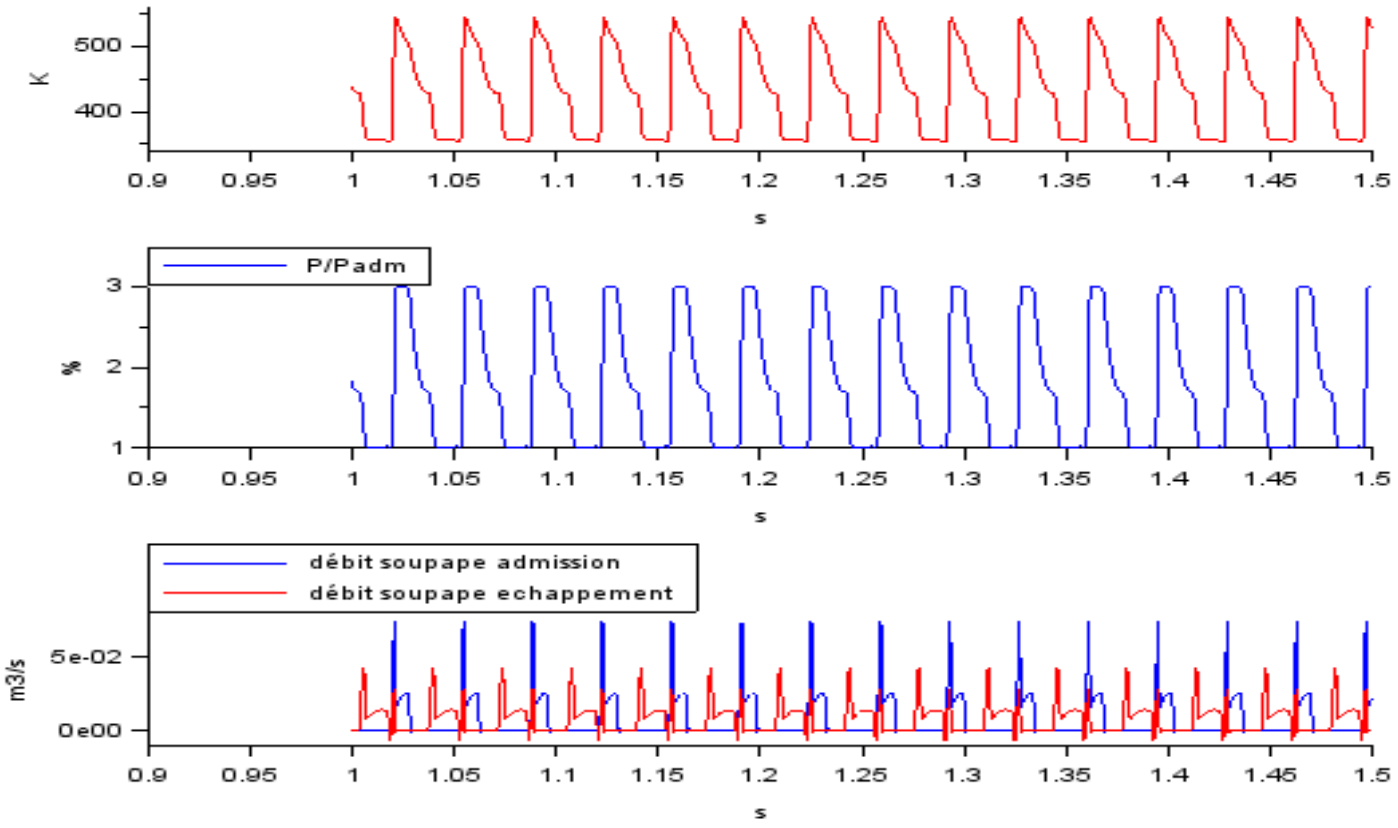

THERMODYNAMIQUE ENCEINTE DE DETENTE
A
X
Y
1
Pd(t)
calcul Température
Calcul pression
3
X(t)
m
m3
Volume soufflet détente
1
Te
K
2
Ue(t)/qme(t)
qme(t)
qms(t)
M(t)
Masse cylindre M(t)
4
Us(t)/qms(t)
P(t)
V(t)
Te
Ue(t)/qme(t)
M(t)
Us(t)/qms(t)
m3
kg
K
Pa
%
Tau(t)
T(t)
Equation de l'energie
Loi des gaz parfaits
To workspace
P_d [nb_pts]
To workspace
V_d [nb_pts]
To workspace
Tau_d [nb_pts]
To workspace
T_d [nb_pts]
2
Td(t)

Résultats obtenus moteur complet

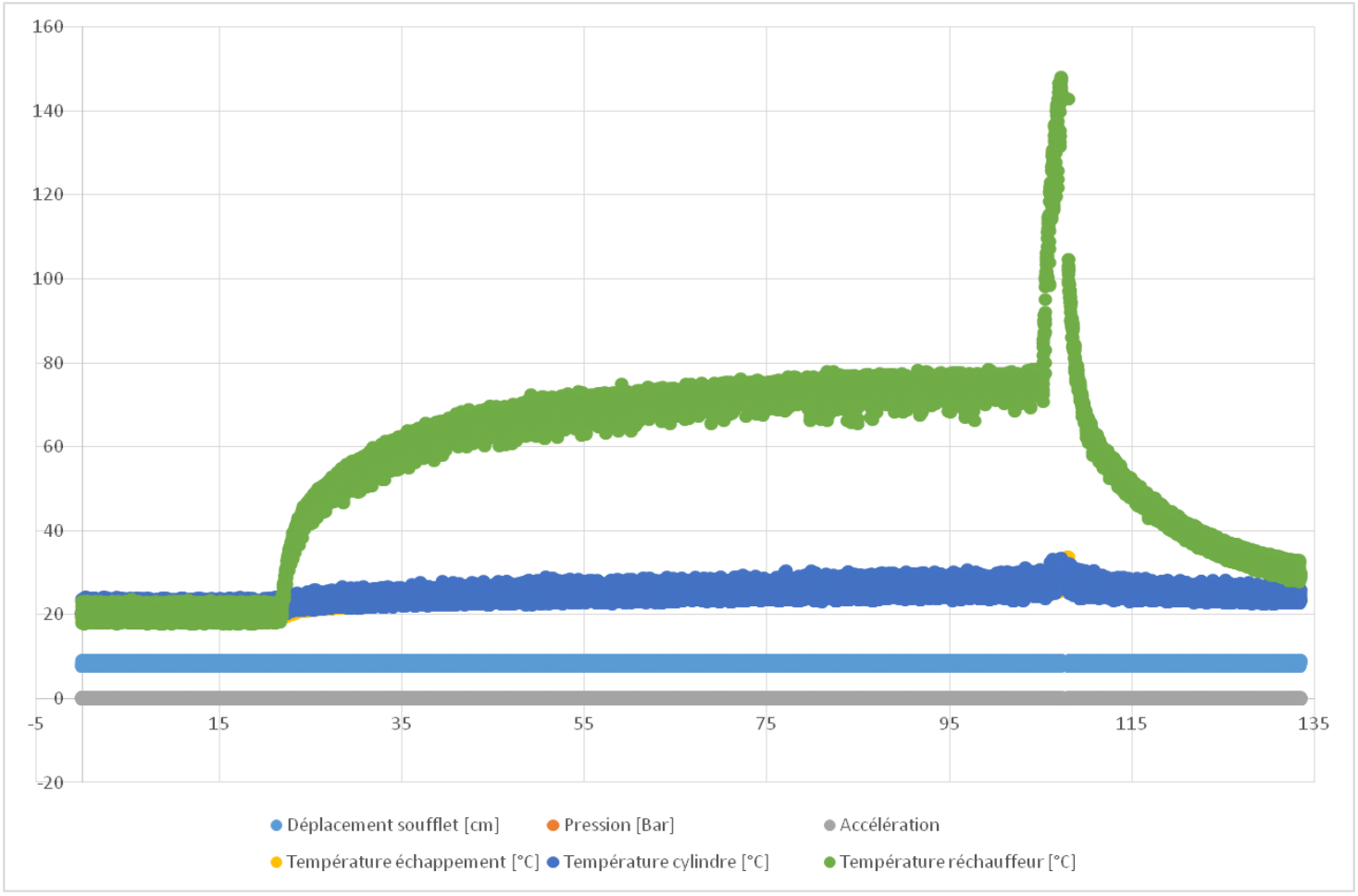




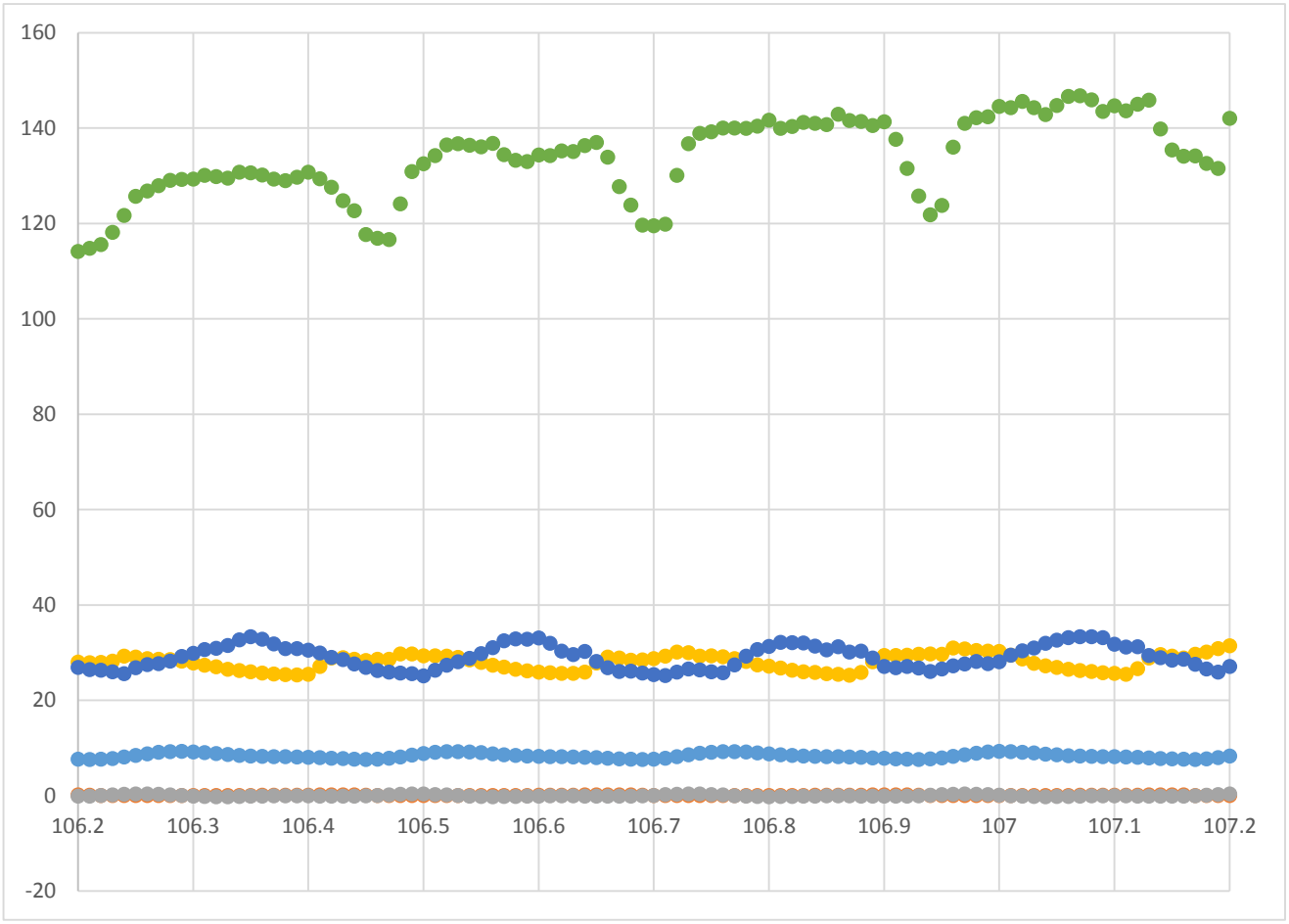
Résultats obtenus enceinte de détente



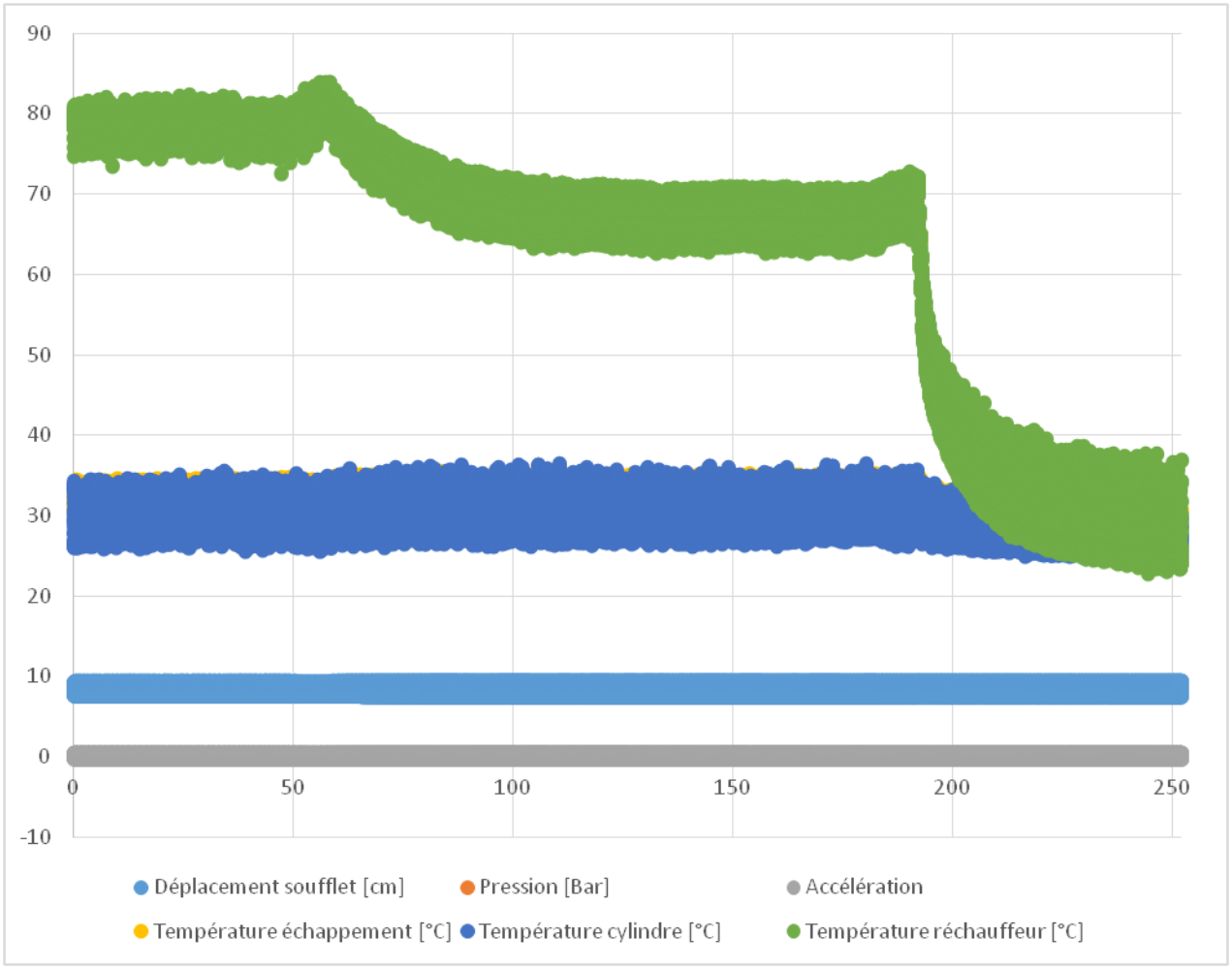
Résultats obtenus par la Gen 2.1



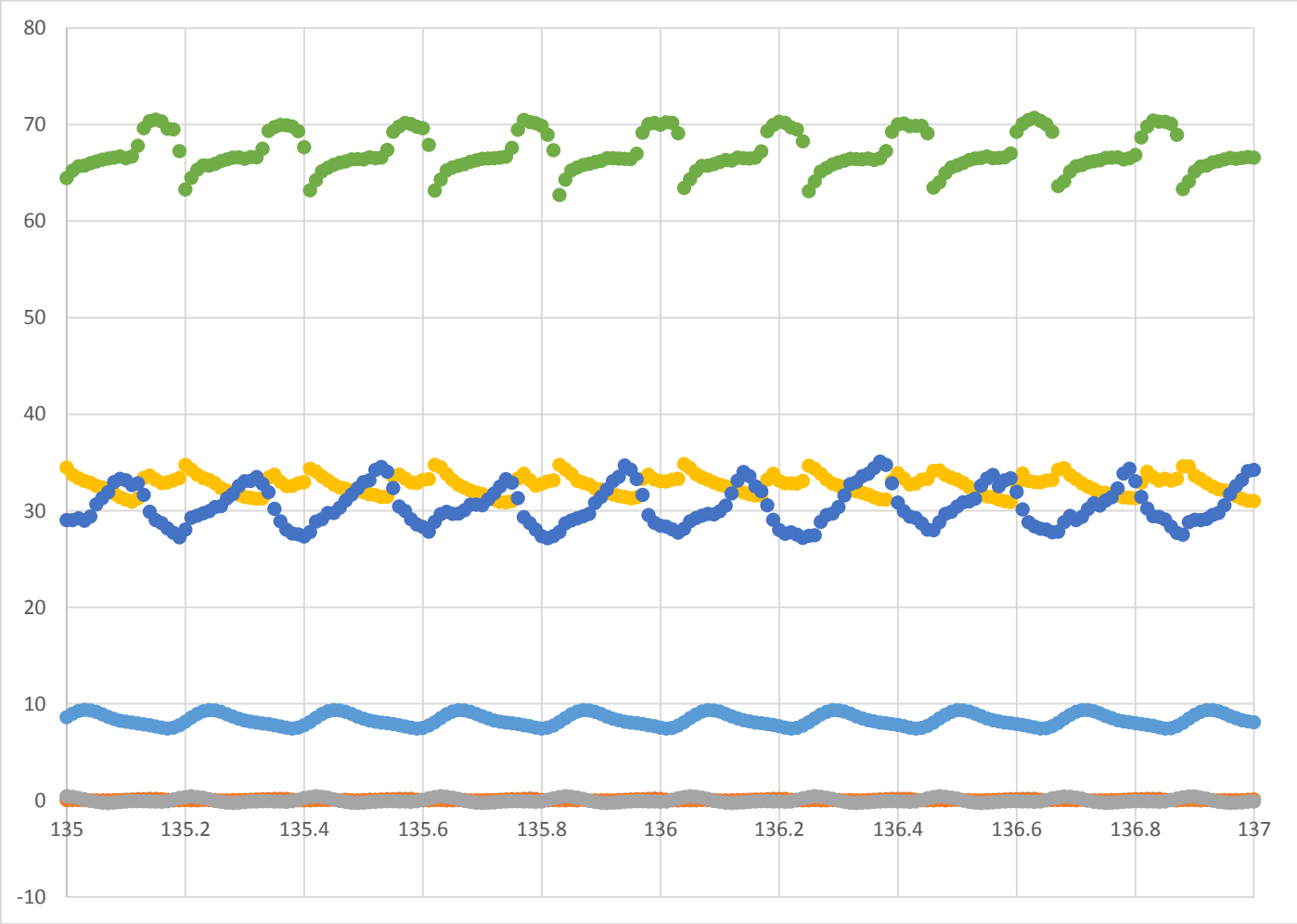
Résultats obtenus par la Gen 2.1



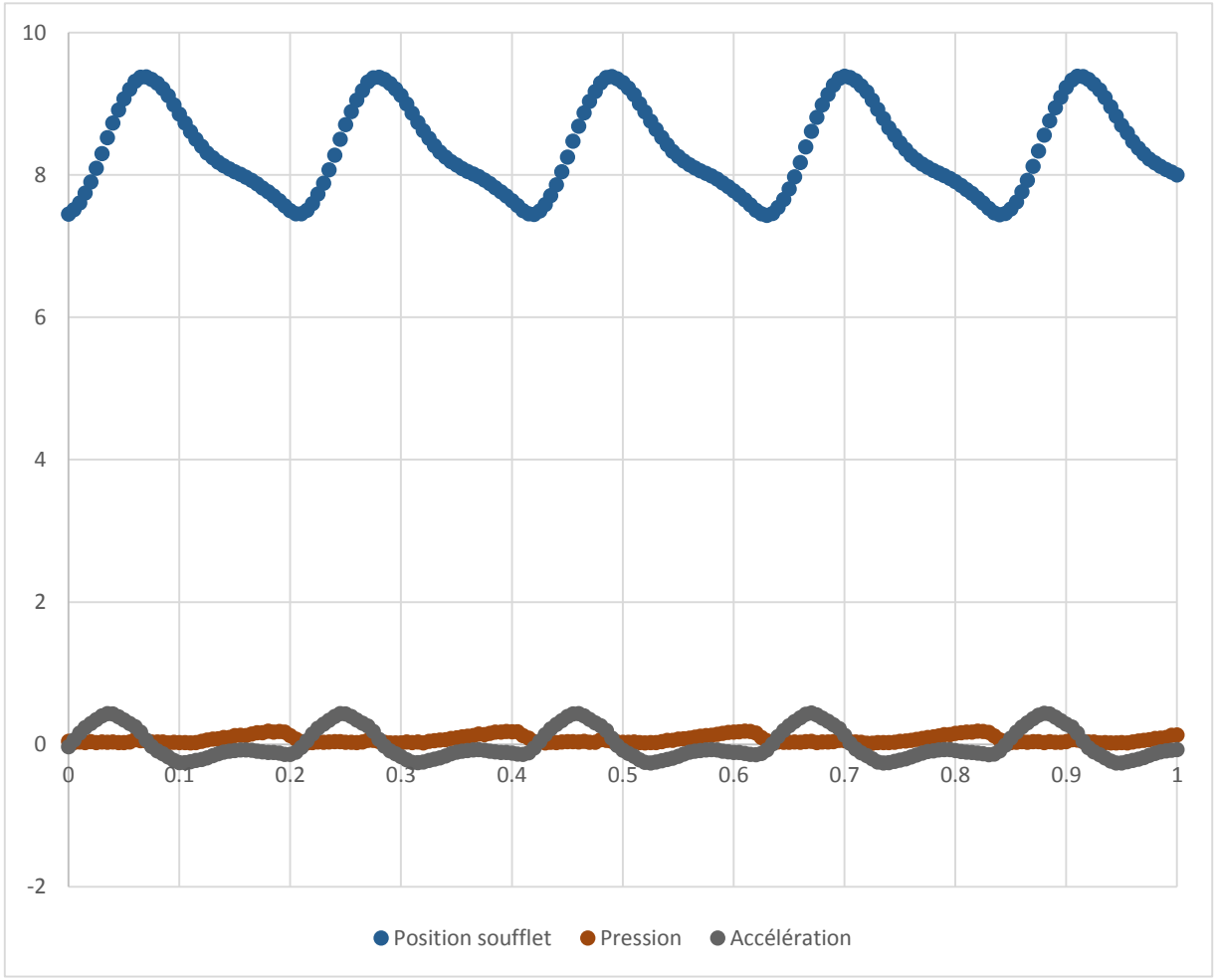
Résultats obtenus par la Gen 2.1

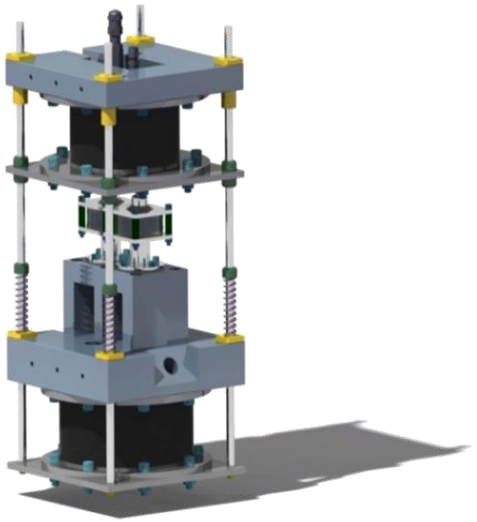


Résultats obtenus par la Gen 2.1



Résultats obtenus par la Gen 2.1



Questions

Contact :
mathieu.doubs@femto-st.fr