

## **Dimensionnement du système hybride-air d'un véhicule automobile**



**Enseignant-responsable du projet :  
Didier VUILLAMY**

**Etudiants :**

**Benoît FOLOPPE  
Titouan RAFFIN**

**Luc-aël ANDRIEU  
Florian SERIE**

*Cette page est laissée intentionnellement vierge.*

---

Date de remise du rapport : **12/06/2016**

Référence du projet : **STPI/P6/2016 – 25**

Intitulé du projet : ***Dimensionnement du système hybride-air d'un véhicule automobile***

Type de projet : ***Bibliographique et dimensionnement***

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

***L'objectif de ce rapport est d'étudier la nouvelle technologie initiée par PSA qui est l'hybride-air. Il s'agit donc d'étudier ce système, d'en comprendre le fonctionnement, de le dimensionner et de le comparer aux autres systèmes écologiques déjà existants (voitures électriques, hybrides ....).***

Mots-clefs du projet (4 maxi) : **Hybride-air**

**Écologie**

**Propulsion**

## Table des matières

1.Introduction.....	6
2.Méthodologie / Organisation du travail.....	7
3.Travail réalisé et résultats.....	8
3.1.L'enjeu environnemental.....	8
3.2.Les principaux types de systèmes écologiques existants.....	9
3.2.1. La voiture électrique.....	9
3.2.2.Les voitures hybrides.....	10
3.3.Fonctionnement du système hybride air.....	11
3.4.Dimensionnement du systèmes hybride air.....	13
3.5.Comparaison du système hybride-air aux autres systèmes existants.....	20
4.Conclusions et perspectives.....	22
5.Bibliographie.....	23
6.Annexes.....	24
6.1.Documentation technique.....	24

## NOTATIONS, ACRONYMES

PSA : Peugeot Société Anonyme

## 1. INTRODUCTION

En deuxième année à l'INSA de Rouen, nous avons pu étudier le système hybride-air dans le cadre du projet de physique au quatrième semestre. Ce projet avait pour objectif d'étudier cette nouvelle technologie et de nous amener à travailler en équipe sur ce sujet pendant une durée plusieurs mois.

Aujourd'hui, plus d'un milliard de voitures parcourent les routes de la planète, l'industrie automobile tourne à plein régime et les ventes de véhicules neufs ne cessent d'augmenter. Par conséquent, la hausse d'émission de carbone n'en est plus que préoccupante. Depuis quelques années, tous les constructeurs automobiles se penchent sur la question environnementale. En effet, à l'heure actuelle il est important de protéger notre environnement et donc de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. C'est pourquoi beaucoup de constructeurs automobiles sortent de plus en plus de voitures avec de faibles consommations. Pour eux, l'objectif est de réduire la consommation d'un véhicule et de récupérer le plus d'énergie disponible au freinage. De plus, il y a ceux qui s'investissent activement dans des énergies dites « propres » comme, par exemple, Toyota, Peugeot et Renault. Ces trois constructeurs proposent dans leur gamme des voitures hybrides et électriques qui permettent soit de réduire considérablement les émissions de CO<sub>2</sub> (hybride) ou soit de supprimer complètement ces émissions (électrique). L'enjeu pour eux est de taille, il faut à la fois rester compétitif avec des prix attractifs mais aussi proposer un véhicule qui sache répondre aux attentes des futurs acheteurs, tout en polluant le moins. Ici, dans notre projet il est question du système air-hybride que PSA a développé. C'est un système qui reste très similaire à l'hybride « classique » qui utilise un moteur électrique et thermique sauf que ici on combine le moteur électrique à un moteur hydraulique qui est mis en marche grâce à de l'air comprimé. Il s'agit donc d'un système innovant et technologique que seul PSA développe pour l'instant et qui a déjà été présenté au grand public sans pour autant être commercialisé.

## 2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

L'organisation de notre projet s'est faite au fur et à mesure des séances de travaux dirigés de la manière suivante :

- Les trois premières semaines, nous nous sommes penchés sur le problème en lui-même, à savoir la manière dont fonctionne le système hybride Air, les enjeux écologiques et économiques dont il est question, ainsi que l'avancée technologique que ce projet pourrait apporter. De ce fait, nous avons mené de nombreuses recherches sur internet, contacté l'entreprise en charge du projet, afin de récolter le plus d'informations possible. De plus, il a été intéressant de comparer ce système innovant avec les systèmes hybrides déjà existants sur le marché afin de comprendre la particularité de ce projet. Nous voulions surtout comprendre la raison pour laquelle ce projet si intéressant n'avait pas été commercialisé ni lancé sur le marché par notre constructeur automobile français.

- Les trois semaines suivantes, nous nous sommes penchés (avec l'aide de notre professeur) sur la partie plus technique et scientifique du projet. En effet, derrière ce système que nous avons plus ou moins bien compris, se cachaient des contraintes en matière de thermodynamique, chimique et physique assez importantes (puissance nécessaire, couple à encaisser, durée de fonctionnement...). Nous avons donc tenté de modéliser le système en fixant des valeurs et en essayant de se mettre à la place des ingénieurs en charge du projet, afin de trouver des valeurs concernant le dimensionnement du moteur ainsi que celui de la pompe de manière à ce que le système puisse fonctionner dans les conditions optimales.

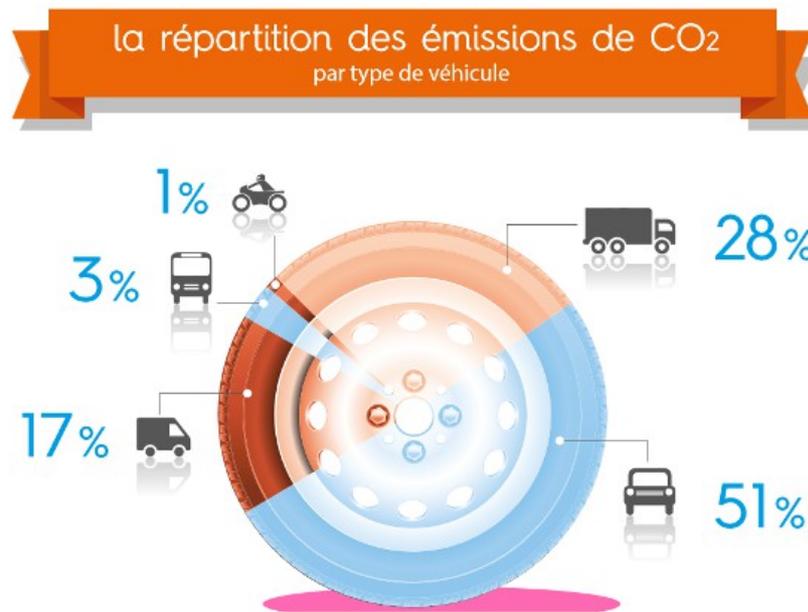
- Les dernières semaines, nous nous sommes concentrés sur l'organisation du travail dans la conception du rapport écrit ainsi que de la soutenance orale. Nous avons aussi continué à collecter les dernières informations scientifiques nécessaires pour compléter notre rapport.

Cette organisation peut paraître simple mais nous avons cependant rencontré quelques difficultés. En effet, le système étudié n'était pas forcément aisé à comprendre bien que nous sommes tous les quatre intéressés par le milieu automobile. Le système hybride air est un système innovant qui ne ressemble à aucun autre système hybride connu de nos jours, il nous a donc fallu beaucoup de séances pour bien comprendre le fonctionnement du système. La difficulté principale est apparue lorsque nous avons voulu dimensionner les différents organes du système. En effet, en sachant que nous étudions une pompe hydraulique, un moteur hydraulique ainsi que les deux réservoirs, nous n'avions aucune idée sur le type d'équipement utilisé par PSA ainsi que sur la manière de coupler la pompe en rotation et vice-versa pour le moteur. Nous avons dû déterminer leur taille approximative pour qu'ils puissent s'adapter à une voiture de taille standard. De plus ce système est en totale dépendance avec la vitesse du véhicule et la façon dont il est piloté il devient alors très compliqué de déterminer précisément l'autonomie du véhicule et sa vitesse de rechargement.

Enfin, nous sommes heureux d'avoir réussi à respecter les différents délais que nous nous sommes imposés au fil des séances, malgré les difficultés.

### 3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

#### 3.1. L'enjeu environnemental



Grâce à ce diagramme circulaire, nous pouvons clairement voir que le secteur des transports est un des principaux contributeurs en termes d'émissions de CO<sub>2</sub> et de pollution locale. Cela représente le quart de nos émissions, qui est en accroissement de 22% depuis 1990. A l'heure actuelle, le pétrole fournit aujourd'hui 98 % du carburant des transports. C'est une énergie qui contribue à la pollution dans l'air et qui émet des gaz à effet de serre. Les pays consommateurs fortement importateurs, comme la France, cherchent à développer des sources d'énergie alternatives et à réduire leur consommation et leurs importations pour réduire leur facture énergétique beaucoup trop lourde. En effet, les réserves de pétrole ne sont pas indéfinies, il s'agit donc de trouver une alternative au pétrole dans le cas où il n'y en aurait plus mais il s'agit aussi de lutter contre la pollution émise par nos véhicules thermiques pour pouvoir protéger notre planète. Ainsi, le développement des véhicules dit "propres" constitue donc une double opportunité : il contribue tout autant à la lutte contre le changement climatique qu'à la restructuration d'un secteur aujourd'hui en crise. Le développement de tel véhicules permettra aussi une croissance durable et génératrice d'emplois. Cela devrait générer en France une activité économique de 15 milliards d'euros en 2030 et contribuer au maintiens de l'emploi dans la filière automobile. De plus, cela permettra une réduction des importations de pétrole d'environ 4 mega-tonne équivalent pétrole et une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> d'environ 17,5 Millions de tonnes en 2020, ce qui représente une réduction de 3% de nos émissions de CO<sub>2</sub> par rapport à 2007.

Derrière la production de véhicules propres il y a donc de véritables enjeux, que ce soit des enjeux environnementaux ou des enjeux économiques. La protection de notre environnement nous concerne tous et nous devons redoubler d'innovations technologiques dans le domaine automobile pour pouvoir assurer notre futur.

## 3.2. Les principaux types de systèmes écologiques existants

### 3.2.1. La voiture électrique

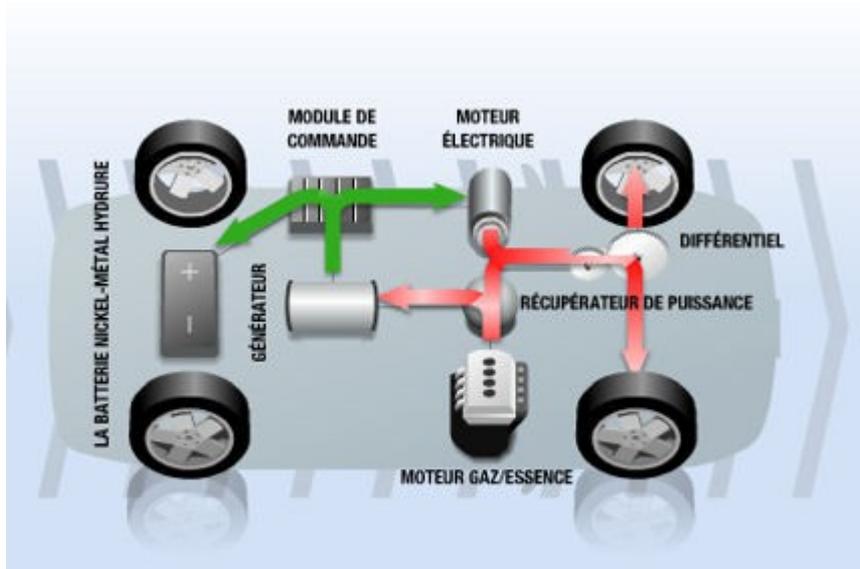


La voiture électrique a longtemps fait face aux autres *véhicules*, puisqu'en 1900, la majorité des voitures étaient propulsées par la force de l'électron. Cependant, la voiture électrique a vite perdu de sa vitesse face aux voitures à explosions industrialisées par Ford, à l'époque du pétrole bon marché et des préoccupations environnementales inexistantes. Peu importe les gaz d'échappement ; le bruit profond du moteur à explosion et les avancées technologiques de ce moteur ont fait de l'automobile un objet de désir, renvoyant une image de liberté, ce qui a séduit les Hommes. Ainsi, le 20<sup>ème</sup> siècle a vu triompher le modèle de l'automobile individuelle. Nos sociétés, nos villes et nos campagnes ont été transformées par la présence massive d'automobiles, si bien que le monde compte aujourd'hui près d'un milliard de voitures, principalement thermiques.

Cependant, aujourd'hui les véhicules électriques ne se font pas rare. En effet, beaucoup de constructeurs proposent à la vente des voitures avec des moteurs électriques et qui sont donc très écologiques. Certains même ne fabriquent que des véhicules 100 % électrique comme Tesla qui est la marque de référence dans ce domaine. Le système est très simple, la voiture a un moteur électrique qui remplace le moteur thermique, ce moteur est alimenté par une batterie au lithium. Il faut ici oublier les boîtes de vitesses (remplacées par un variateur), les passages à la pompe et le bruit du moteur. Les véhicules électriques peuvent être rechargés chez soi à l'aide d'une simple prise électrique ou alors dans des stations de rechargements dédiées aux voitures électriques. La voiture électrique présente beaucoup d'avantages. En effet, grâce à celle-ci nous pouvons effectuer des économies d'argent. Par exemple la voiture électrique coûte 2€ pour 100 kms parcourus (soit 5 à 7 fois moins cher qu'un véhicule thermique) et le moteur s'use très peu et a donc une durée de vie plus longue. De plus, il faut savoir qu' un

véhicule électrique est plus simple d'utilisation qu'un véhicule à moteur thermique : oubliez l'embrayage, la boîte de vitesses est automatique et sans vibration. C'est avant tout pour son utilisateur le plaisir retrouvé de conduire. Enfin, le plus avantageux avec ce type de véhicule c'est qu'on estime le rejet d'émissions de CO<sub>2</sub> à 9 tonnes sur l'ensemble de sa durée de vie contre 22 tonnes pour un véhicule thermique. Toutefois, la voiture électrique présente aussi pas mal d'inconvénients comme le temps de charge (8 heures en moyenne), le coût d'achat initial qui reste élevé même avec des aides de l'État (environ 20 000€ pour une citadine) et le silence d'une voiture électrique qui peut causer des accidents entre voitures et piétons.

### 3.2.2. Les voitures hybrides



Les véhicules hybrides sont des automobiles faisant appel à deux stockages d'énergie embarqués distincts. En effet, à bord d'une voiture on combine un moteur électrique avec un moteur thermique pour propulser le véhicule.

Le fonctionnement d'une voiture hybride est simple :

- lorsque que le véhicule est à l'arrêt, les deux moteurs sont eux aussi à l'arrêt
- au démarrage, le moteur électrique va assurer la mise en mouvement de la voiture jusqu'à une certaine vitesse (30 km/h voir 50 km/h, tout dépend du véhicule). Il s'agit un peu comme d'un système "start and stop" que l'on retrouve chez de nombreux constructeurs automobiles
- à une vitesse plus élevée ou lors d'une accélération demandée par le conducteur, le moteur thermique prend le relais pour assurer la demande du conducteur
- en cas de brutale accélération, les deux moteurs fonctionnent ensemble, ce qui permet d'avoir une meilleure puissance et un meilleur couple
- en phase de décélération (quand le conducteur laisse la voiture avancer sans agir), de descente ou de freinage, une partie de l'énergie cinétique est transformée par le

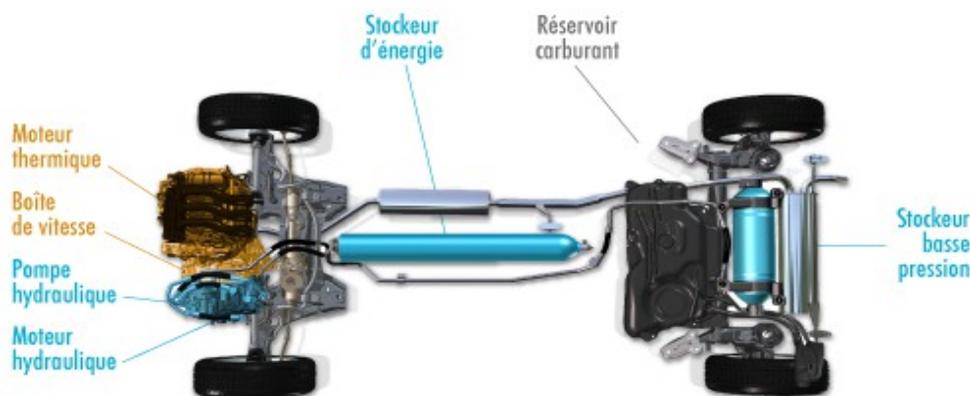
générateur en électricité pour recharger les batteries du moteur électrique. Ceci assure un meilleur frein moteur

La gestion de l'ensemble des composants est assurée par l'électronique embarquée dans la voiture. Cependant, le conducteur, s'il le souhaite, peut volontairement sélectionner le mode électrique seulement ou le mode thermique. Ainsi, la voiture ne se déplacera qu'à l'aide du moteur électrique ou du moteur thermique. Notons qu'avec le mode électrique, l'autonomie n'est que d'une vingtaine de kilomètres. Les constructeurs automobiles proposent aujourd'hui 2 types d'hybrides. En effet, nous avons les véhicules hybrides rechargeables qui se différencient des autres véhicules hybrides car les batteries ne se rechargent pas automatiquement. L'hybride rechargeable dispose d'une prise comme sur un véhicule électrique où l'utilisateur doit brancher son véhicule à une prise électrique pour que les batteries se rechargent. Les batteries ne se rechargent pas grâce à l'énergie cinétique.

De nos jours, le marché des véhicules hybrides est déjà conséquent, ceci est notamment dû au succès du modèle "Prius" de chez Toyota. En 2013, les ventes de voitures hybrides ont connu une forte progression en France, selon des chiffres publiés le 7/01/2014 par l'association Avere : elles ont quasiment doublé, atteignant 41 389 unités sur un peu moins de 1,8 million de voitures neuves écoulées dans l'Hexagone, soit 2,3 % du marché, dont 28 676 dotées d'une motorisation essence-électrique, principalement des Toyota japonaises, et 12 713 équipées d'une motorisation diesel-électrique (Peugeot et Citroën surtout, mais aussi Mercedes, Volvo...). « La France reste le leader des ventes de véhicules électriques et hybrides en Europe », selon cette association pour la promotion de véhicules propres, devant la Norvège et l'Allemagne. Notons que sur les neuf premiers mois de 2015, les ventes de voitures hybrides en France ont progressé de 41 %, à 43 554 unités.

### 3.3. Fonctionnement du système hybride air

Le groupe PSA Peugeot Citroën a choisi de développer une technologie alternative appelée Hybride-Air afin de palier au problème des émissions de CO<sub>2</sub>. Combinant un moteur thermique essence à un dispositif à air comprimé, le système est déjà opérationnel. En témoigne l'essai du prototype Peugeot 2008 Hybrid Air sur une vidéo publiée sur le site *L'Argus*.

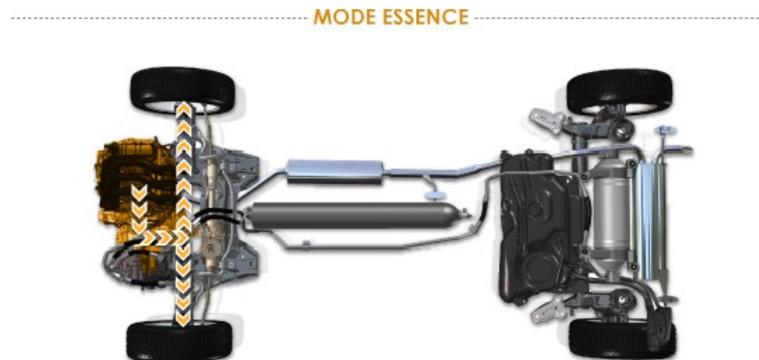


Le bloc propulsion est constitué d'un moteur thermique qui peut différer selon le modèle, et d'un moteur hydraulique. A l'instar d'un modèle hybride « conventionnel » où les deux moteurs thermique et électrique peuvent fonctionner de concert ou de façon autonome, les blocs essence et hydraulique se complètent parfaitement. Le système est constitué de 4 éléments principaux :

- une pompe hydraulique à cylindrée variable
- un moteur hydraulique
- un stockeur d'énergie (une bonbonne stockant de l'azote sous pression)
- un stockeur basse pression (un vase d'expansion contenant de l'huile)

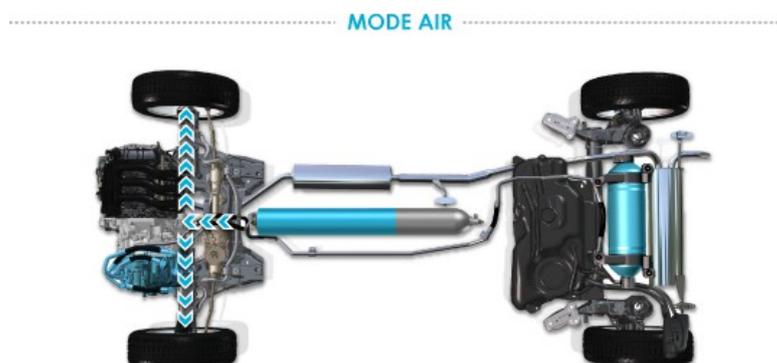
A chaque décélération ou freinage, le dispositif comprime l'azote dans le stockeur d'énergie. Cette énergie matérialisée par la pression contenue dans la bonbonne est ensuite restituée à la pompe hydraulique lors des phases d'accélération ou lors des reprises. De plus le moteur hydraulique peut entraîner à lui seul le véhicule en zone urbaine par exemple. Il existe trois modes de fonctionnement du système; il faut savoir que le véhicule choisit automatiquement le mode le plus adapté selon la situation.

Le mode essence :



Ce mode où seul le moteur thermique fonctionne est réservé en zone extra urbaine, le régime moteur est stable et cela entraîne une consommation stable d'essence.

Le mode air :



En ville, le fonctionnement du moteur hydraulique est suffisant jusqu'à ce que l'énergie stockée soit entièrement consommée, il n'y a donc aucun rejet de CO<sub>2</sub> dans ce mode de fonctionnement. Pour une vitesse maximale de 70 km/h, ce mode autorise l'arrêt complet du moteur thermique, ce qui favorise un confort acoustique pour les passagers. Cependant, l'autonomie est très limitée (seulement quelques kilomètres).

#### Le mode combiné :



Afin de répondre aux attentes du conducteur, le système hybride active automatiquement ce mode pour assurer une réponse convenable en termes d'accélération en zone urbaine et extra-urbaine. Comme la plupart des systèmes hybrides, les deux sources d'énergies se mettent en marche pour combiner le fonctionnement du moteur thermique à celui du moteur hydraulique. De plus, le stockeur d'énergie peut se recharger si la vitesse du véhicule est faible. Ce mode de conduite assure le dynamisme du véhicule.

### **3.4. Dimensionnement du systèmes hybride air**

*Dans toutes nos études nous avons considéré une voiture de masse 1500 kg roulant à 80 km/h. Notre but est de dimensionner les composants nécessaires au freinage complet du véhicule.*

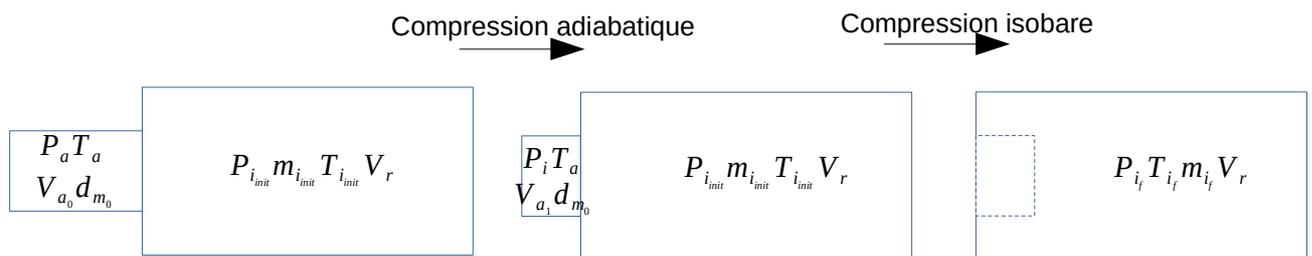
## Première étude : étude de la variation des constantes thermodynamiques dans les capacités.

(Ouvrir le fichier : étude de la variation des constantes thermodynamiques)

Nous avons réalisé dans un premier temps une approche théorique du sujet. Après avoir étudié les différents composants nécessaires à la réalisation d'un système hybride-air, nous nous sommes intéressés plus spécialement au fonctionnement de la pompe.

Situation et hypothèses de départ : on considère que l'on alimente de façon discrète le réservoir en lui injectant une masse  $dm_0$  d'air grâce à un compresseur volumétrique. On considère que c'est la ième injection et on cherche à connaître l'état final après l'injection. On fait l'hypothèse que l'air comprimé est stocké dans un réservoir d'un volume que l'on déterminera pendant l'étude. De plus, on supposera que l'air comprimé est récupéré dans l'air ambiant.

**Les données initiales :** (représentées en jaune dans le tableur)



**Les formules utilisées dans le tableur :**

Travail d'un compression adiabatique :

$$W_1 = - \int_{V_{a_0}}^{V_{a_1}} P dV = - \int_{V_{a_0}}^{V_{a_1}} P V^\gamma \frac{dV}{V^\gamma} = - P V^\gamma \int_{V_{a_0}}^{V_{a_1}} \frac{dV}{V^\gamma} = - P V^\gamma \left[ \frac{V^{-\gamma+1}}{-\gamma+1} \right]_{V_{a_0}}^{V_{a_1}} = \frac{P_i V_{a_1} - P_a V_{a_0}}{\gamma - 1}$$

Travail d'un compression isobare :

$$W_2 = -P \int_{V_r + V_{a_0}}^{V_r} dV = -P_i (V_r - (V_r + V_{a_0})) = P_i V_{a_1}$$

Bilan de l'énergie interne :

$$m_{i_f} c_v T_{i_f} = m_{i_{init}} c_v T_{i_{init}} + m_{air} c_v T_{air} + W_1 + W_2$$

$$\rightarrow T_{i_f} = \frac{1}{m_{i_f} c_v} (m_{i_{init}} c_v T_{i_{init}} + m_{air} c_v T_{air} + W_1 + W_2)$$

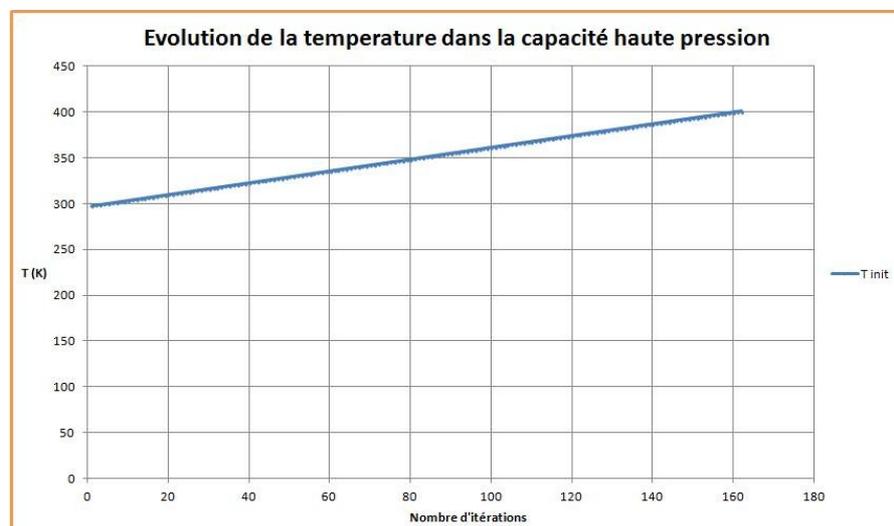
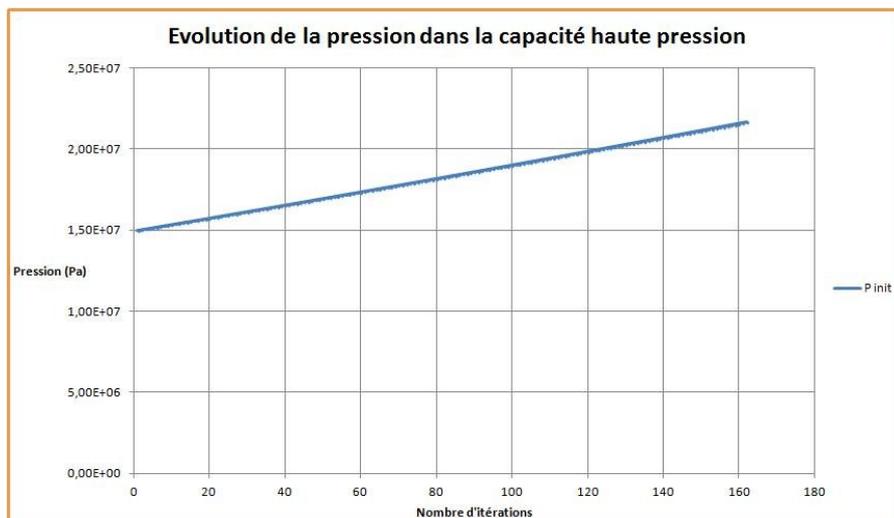
Enfin on retrouve  $P_{i_f}$  avec l'équation d'un gaz parfait  $P_{i_f} V_r = n_{i_f} R T_{i_f}$

Cependant dans les travaux de compression  $W_1 + W_2$  il faut retirer le travail de la pression ambiante.

$$W_{compresseur} = W_1 + W_2 - P_a V_{a_0} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} (P_i V_{a_1} - P_a V_{a_0})$$

### Observations :

On a pu remarquer que l'état initial avait une grande influence sur l'évolution de la pression et de la température dans la capacité haute pression. En effet si l'on considère qu'à l'état initial la pression dans le réservoir est faible (<50 bar), on aura une forte augmentation de la température dans la capacité haute pression. Au contraire si l'on a une haute pression, les variations de pression et température seront moins grandes.



**Conclusions :**

Notre voiture de 1500 kg roule à 80 km/h donc elle possède une énergie cinétique d'environ 370 kJ.

Grâce aux graphiques nous pouvons déterminer un ordre de grandeur sur le volume de la capacité haute pression. En effet, avec l'équation d'un gaz parfait

$PV = nRT$  on a  $V = \frac{nRT}{P}$ . En simulant plusieurs tailles de réservoir dans le

tableur, on a remarqué que pour des capacités supérieures à 30L les températures et pressions atteintes sont réalistes. Prenons comme exemple un réservoir de 30L, avec une température initiale de 298 K et à 220 bar, au bout de 12 itérations soit 370 kJ dissipé on aura une température de 304 K et une pression de 225 bar. De plus en faisant quelques recherches cela vient confirmer cette estimation d'environ 30L.

**Critiques sur l'étude :**

Dans notre étude nous avons fait l'hypothèse que l'on comprime de l'air. Or dans le système PSA la pompe envoie un fluide hydraulique dans la capacité haute pression qui ensuite comprime de l'azote. Cependant l'ordre de grandeur des résultats ne change pas. En effet on préfère utiliser de l'azote pour une utilisation à long terme. La seconde hypothèse de notre étude est l'arrivée de l'air. Dans notre modèle l'air comprimé provient de l'air ambiant. Dans le modèle de PSA, le fluide est stocké dans une capacité basse pression. Ceci modifie donc le travail du compresseur.

## **Deuxième modèle : Calcul du temps d'arrêt d'un véhicule en imposant un couple constant.**

*(ouvrir le fichier : Temps d'arrêt voiture couple constant)*

Dans cette deuxième étude nous nous sommes intéressés à un aspect plus pratique du projet : le temps d'arrêt du véhicule. En effet le principe de ce système est de récupérer le maximum d'énergie lors du freinage. Cependant il faut que le temps de freinage reste raisonnable sinon on sera obligé d'utiliser les freins normaux pour compléter le freinage. Forcément il faut éviter d'en arriver à cette solution car ce sera de l'énergie perdue. Ainsi dans un premier temps nous avons imaginé une solution technique : imposer un couple constant sur les roues afin de générer une puissance qui sera utilisée par la pompe.

**Données initiales :** *(représentées en jaune dans le tableur)*

$$V_0 = 80 \text{ km/h} \quad m_{\text{voiture}} = 1500 \text{ kg} \quad R_{\text{roue}} = 0,3 \text{ m} \quad \text{Couple} = 600 \text{ N.m}$$

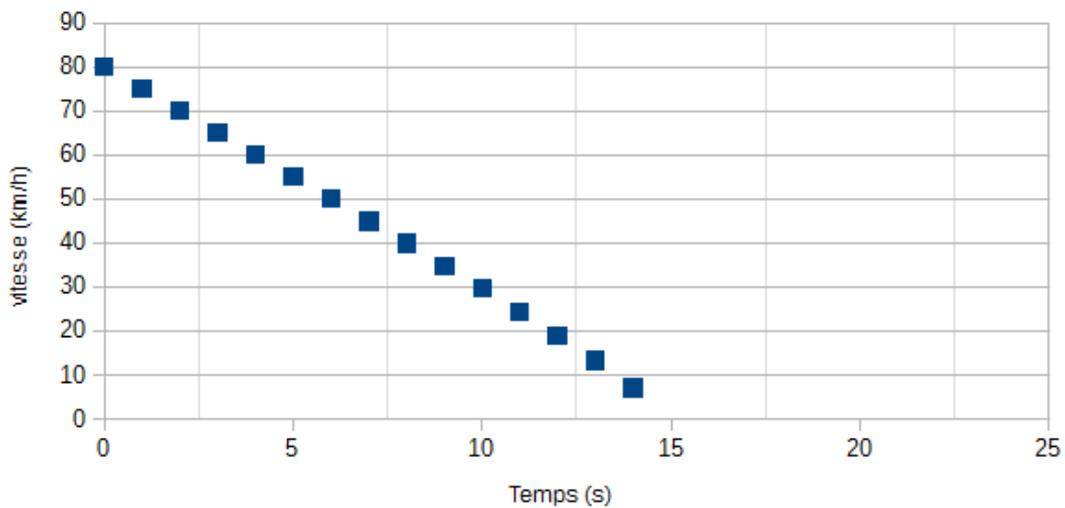
**Les formules utilisées dans le tableur :**

$$E_{c_{t+1}} = E_{c_t} - P_{dis_t} \times \Delta t = E_{c_t} - C \Omega_t \Delta t = E_{c_t} - C \frac{v_t}{R_{roue}} \Delta t = E_{c_t} - \frac{C}{R_{roue}} \sqrt{2 \frac{E_{c_t}}{m_{voiture}}} \Delta t$$

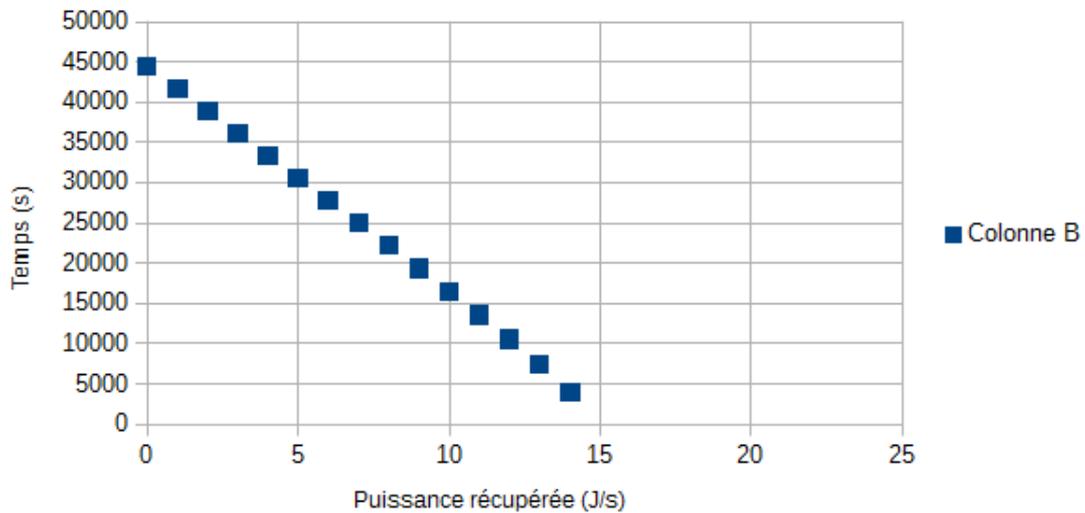
$$P_{dis_t} = C \Omega_t = C \frac{v_t}{R_{roue}} = \frac{C}{R_{roue}} \sqrt{2 \frac{E_{c_t}}{m_{voiture}}}$$

**Observations :**

Evolution de la vitesse en fonction du temps



Evolution de la puissance récupérée au freinage en fonction du temps



On remarque que la vitesse et la puissance diminuent de façon linéaire. En un maximum de 15 secondes la voiture sera à l'arrêt avec un couple de freinage de 600 N.m.

### Conclusions :

Le temps d'arrêt est raisonnable pour une décélération standard cependant il est beaucoup trop long pour un freinage d'urgence. Il devra donc être complété par un autre dispositif de freinage. Au début du freinage, la puissance récupérée est acceptable pour alimenter une pompe hydraulique mais devient trop faible par la suite. Nous avons envisagé un système semblable fonctionnant à puissance dissipée constante mais cela impose un variateur de couple, solution difficile à mettre en place.

### Critiques sur l'étude :

Ici nous avons supposé un couple constant, ce qui en réalité n'est pas exact. En effet le couple de freinage provient de la différence de pression entre les deux capacités. Donc plus le freinage dure, plus la différence de pression augmente et donc le couple augmente.

A ce stade du projet nous possédions désormais un ordre de grandeur sur le volume de la capacité haute pression, la pression dans celui-ci et enfin la puissance récupérée lors du freinage. A l'aide de ces deux derniers critères, pression et puissance nous avons essayé de trouver une pompe qui pourrait convenir à nos besoins. Nous avons finalement choisi le modèle D7960 de la marque HAWE HYDRAULIK. Plusieurs autres pompes auraient pu convenir mais avec le manque de caractéristiques requises nous devons faire un choix arbitraire. Cette pompe et surtout sa fiche documentaire avaient l'avantage de contenir les formules décrivant le calcul du débit et de la puissance.

## Dernière étude : Calcul du temps d'arrêt d'un véhicule grâce à la compression d'azote.

*(Ouvrir le fichier : Calcul du temps d'arrêt d'un véhicule grâce à la compression d'azote)*

Nous allons maintenant étudier de manière plus précise l'évolution du système de freinage. Le but reste le même que dans notre deuxième étude : connaître le temps d'arrêt de la voiture. Nous intégrons donc la pompe hydraulique choisie à notre système. On utilisera un multiplicateur de vitesse de rotation entre les roues et la pompe afin d'atteindre des vitesses plus élevées.

**Données initiales** : *(représentées en jaune dans le tableur)*

$V_0 = 80 \text{ km/h}$      $m_{\text{voiture}} = 1500 \text{ kg}$      $R_{\text{roue}} = 0,3 \text{ m}$      $\text{Cylindrée}_{\text{pompe}} = 43 \text{ cm}^3/\text{tr}$   
 $\eta_{\text{volumétrique}} = 0,9$      $\eta_{\text{total}} = 0,8$

Volume gaz capacité basse pression : 5L    Volume gaz capacité haute pression : 25L

Pression capacité basse pression : 1 bar Pression capacité haute pression : 150 bar  
 Multiplicateur de vitesse : x5

**Les formules utilisées dans le tableur :**

Les formules données dans la documentation de la pompe :

$$Q_t = \frac{\text{Cylindrée}_{pompe} \times n \times \eta_{\text{volumétrique}}}{1000} = \frac{\text{Cylindrée}_{pompe} \times \frac{\Omega \times 30}{\pi} \times \eta_{\text{volumétrique}}}{1000}$$

$$Q_t = \text{Cylindrée}_{pompe} \eta_{\text{volumétrique}} v_t \times \frac{30000}{R_{roue} \pi}$$

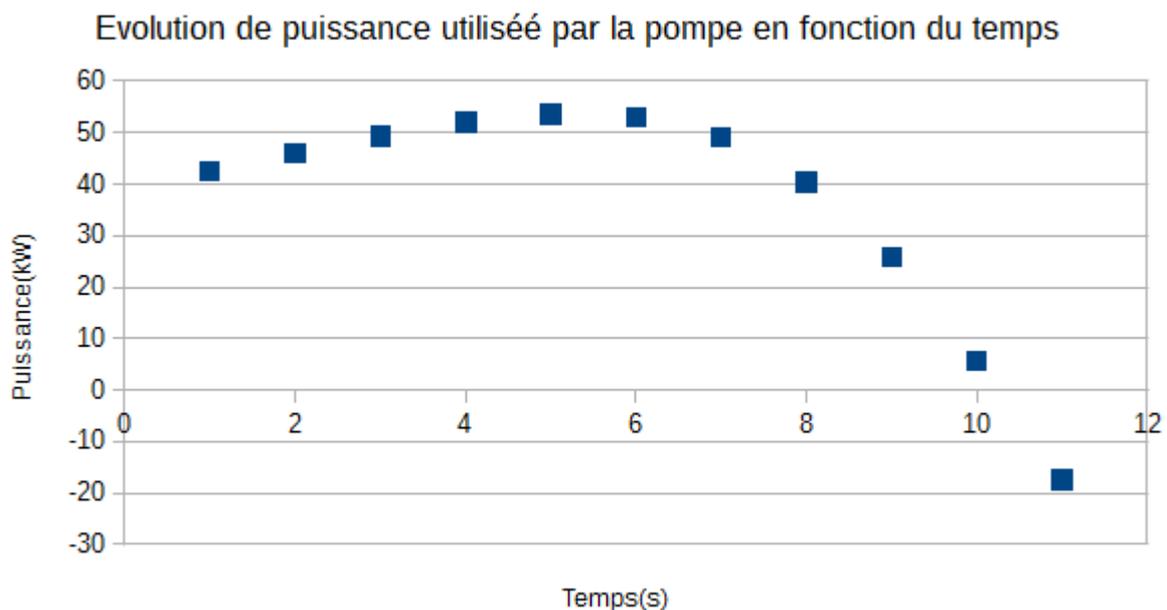
$$P_{dis_t} = \frac{Q_t \Delta P}{600 \times \eta_{total}} = \frac{Q_t (P_{HP_t} - P_{BP_t})}{600 \times \eta_{total}}$$

avec  $P_{BP_{t+1}} = P_{BP_t} \left( \frac{V_{gBP_t}}{V_{gBP_{t+1}}} \right)^y$  et  $P_{HP_{t+1}} = P_{HP_t} \left( \frac{V_{gHP_t}}{V_{gHP_{t+1}}} \right)^y$

Ainsi grâce à la relation entre puissance et énergie cinétique nous pouvons connaître l'évolution de la vitesse :

$$P_t = \frac{-dE_{c_t}}{dt} = m v_t \frac{dv_t}{dt} \quad \text{et donc} \quad \frac{dv_t}{dt} = \frac{P_t}{m v_t}$$

**Observations :**



Avec ce modèle on trouve un temps d'arrêt de 10 secondes. Le profil d'évolution de la puissance utilisée par la pompe est donc approximativement la puissance dissipée lors du freinage est totalement différent du modèle précédent. En revanche pour la vitesse les deux modèles sont assez proches.

### **Conclusions :**

Nous trouvons donc comme dans le premier modèle un temps d'arrêt acceptable. Cependant cette étude est à interpréter avec beaucoup de précautions. En effet la plupart des paramètres initiaux tels que les volumes de gaz, le volume et la pression dans la capacité base pression ainsi que les rendements volumétrique et total ne sont pas totalement justifiés. Or ce sont les paramètres initiaux qui vont déterminer le temps d'arrêt de la voiture.

Après la réalisation de ces trois études nous avons déterminé des grandeurs approximatives des composants permettant la récupération d'énergie au freinage par la compression de l'azote. Afin d'optimiser le système au maximum et ainsi augmenter son efficacité il faudrait ajuster le plus précisément possible les paramètres initiaux.

### **3.5. Comparaison du système hybride-air aux autres systèmes existants**

Si l'on compare le système PSA aux autres systèmes déjà existants (voitures électriques, hybrides et thermiques), on s'aperçoit que celui-ci présente de nombreux avantages. En effet, pour une Citroën C3 à moteur 3 cylindres essence développant 82 ch, nous avons une réduction de 32 g/km d'émission de CO<sub>2</sub> (on passe de 104 à 72 g/km). Nous avons donc un gain conséquent malgré une augmentation du poids d'environ 100 kg pour l'installation du système, soit autant qu'un système hybride électrique classique. Le système est installé sans compromis d'habitabilité ou de volume de coffre mais en supprimant la roue de secours dont l'emplacement est occupé par le vase d'expansion. Pour une voiture hybride de même dimension qu'une Citroën C3 avec une puissance équivalente, nous avons 79 g/km de rejet de CO<sub>2</sub>. Ainsi, il est clair que le système hybride-air a des émissions de CO<sub>2</sub> inférieures à un véhicule hybride classique. Cependant, il est logique que ce système ne peut rivaliser avec la voiture électrique sur le rejet de CO<sub>2</sub> puisque cette dernière ne produit pas d'émission de CO<sub>2</sub> car il n'y a pas de moteur thermique. Toutefois, PSA revendique que leur technologie est moitié moins chère qu'un système électrique de performances équivalentes. Ceci est notamment dû au fait que le système hybride-air est dépourvu de batteries au lithium.

En revanche, cette technologie ne peut stocker qu'une très faible quantité d'énergie, là où la batterie d'un modèle hybride en emmagasine 20 fois plus. L'énergie de chaque décélération doit donc être immédiatement réutilisée lors de l'accélération suivante. Pourtant, les ingénieurs PSA expliquent que cette faible capacité est suffisante pour que le moteur thermique soit coupé 80 % du temps en ville, permettant une réduction de consommation pouvant aller jusqu'à 45 % sur un parcours composé d'arrêts fréquents. Le gain est logiquement moins important sur route où le moteur thermique doit fonctionner tout le long du parcours. Toutefois,

l'architecture de la transmission à engrenage épicycloïdal brevetée par PSA permet de réduire encore la consommation d'environ 5 % dans ce contexte, en maintenant le moteur dans de meilleures zones de rendement qu'avec une transmission mécanique classique.

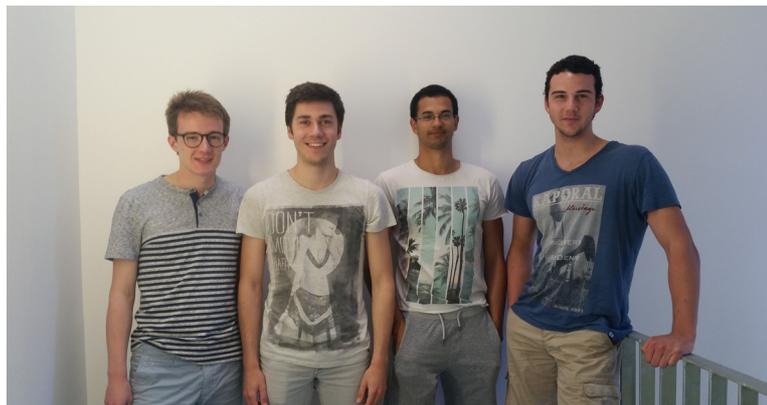
Enfin, les responsables du projet Hybrid Air promettent un agrément de conduite supérieur à celui proposé par les véhicules hybrides et électriques actuels. En effet, le système hybride-air peut instantanément ajouter ses 68 ch (50 kW) aux 82 ch du 3 cylindres essence, lorsque le besoin s'en fait sentir, mais durant quelques secondes seulement. De quoi garantir des reprises vigoureuses, mais brèves. Concernant le prix d'une voiture hybride-air, PSA annonce que la stratégie est de vendre la version 1.2 VTi 82 ch au tarif d'une version diesel boîte automatique, soit environ 18 000 €, bonus non compris. Le prix serait donc un atout quand on sait que le prix moyen d'un véhicule électrique est de 25 000€ et que celui-ci offre une autonomie réduite. Pour les voitures hybrides classiques, le prix tourne autour de 30 000€ pour une Toyota Prius. Le prix de cette technologie est donc un atout conséquent car il permettrait aux acheteurs de faire de réelles économies.

#### 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

En conclusion, nous pouvons dire que cet E.C. nous a permis de découvrir cette nouvelle technologie qui est l'hybride-air. Nous avons donc compris son fonctionnement, même si nous avons eu parfois du mal à cerner les choses, notamment sur le dimensionnement, car c'est un système tout nouveau qui n'est pas encore commercialisé. Il a donc été difficile de trouver des informations techniques dessus. Grâce à l'aide du professeur et à ces « mini-cours » pendant le TD nous avons appris de nouvelles choses. Durant ces semaines, nous avons su bien répartir notre travail pour que tout fonctionne correctement. Il a fallu faire beaucoup de recherches sur internet, il a donc fallu confronter différentes informations, trier et en sortir le plus important et le plus pertinent. Ceci n'a pas toujours été facile étant donné que parfois les sites se contredisaient. Il fallait donc avoir un certain recul par rapport à ce que l'on trouvait. De plus, sur le dimensionnement, il fallait toujours comparer nos résultats avec la réalité pour savoir si les résultats étaient cohérents. Toutefois, le professeur était toujours là pour nous apporter des solutions sur des questions que l'on se posait. Par exemple : comment fonctionne la transmission ?.

Concernant l'apport personnel de cet E.C. projet, nous pouvons dire que cela nous a permis de travailler en équipe. En effet, il a fallu nous organiser pour que le projet avance au fur et à mesure des séances. Les tâches devaient donc être réparties entre les différentes personnes du groupe. Les tâches étaient réparties aussi par rapport à ce que les personnes préféraient. Le sujet nous a donc très intéressé de par sa nouveauté et de par sa complexité. C'était la première fois que nous devions mener un tel travail, c'est à dire de mener à bien un projet en fonction de ce que nous disait le professeur. Ce qui a été très agréable aussi c'est le fait que l'on pouvait s'intéresser à ce que l'on voulait sur le système hybride-air car notre professeur était ouvert et proche de nous. Il répondait à toutes nos questions et l'on réfléchissait ensemble au projet. On ne s'est en aucun cas senti délaissé.

Nous avons répondu à pas mal de questions sur le système hybride-air notamment sur le « comment cela marche » et les dimensionnement de la pompe et du réservoir. Cependant pas mal de questions restent à résoudre notamment sur le modèle de pompe et moteur hydraulique utilisé. Nous ne savons pas non plus quelle type de transmission est utilisée. Nous avons essayé d'appeler PSA pour avoir ces informations mais ils ne pouvaient pas les divulguer. Pour la suite du projet il faudrait donc creuser encore plus le système mais ceci est difficile étant donné le peu d'informations.



*Illustration 1: De gauche à droite : Benoît Foloppe, Florian SERIE, Luc-aël ANDRIEU et Titouan Raffin*

## 5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] lien internet : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-enjeux-du-developpement-des.html> (valide à la date du 25/03/2016).
- [2] lien internet : <http://www.voiture-electrique-populaire.fr/enjeux> (valide à la date du 1/04/2016)
- [3] lien internet : <http://www.voiture-electrique-populaire.fr/enjeux/energie/environnement> (valide à la date du 1/04/2016)
- [4] lien internet : <http://avem.fr/index.php?page=veh> (valide à la date du 20/04/2016)
- [5] lien internet : <http://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-850-fonctionnement-des-voitures-hybrides-et-les-differents-systemes.php> (valide à la date du 20/04/2016)
- [6] lien internet : <http://www.psa-peugeot-citroen.com/fr/innovation-automobile/innovation-by-psa/hybrid-air-moteur-full-hybrid-essence> (valide à la date du 10/05/2016)
- [7] lien internet : <http://www.breezcar.com/actualites/article/peugeot-citroen-hybride-air-comprime-fonctionnement-video-1014> (valide à la date du 10/05/2016)
- [8] lien internet : <http://www.cnetfrance.fr/cartech/exclusif-le-systeme-psa-hybrid-air-a-la-loupe-39786527.htm> (valide à la date du 10/05/2016)

## 6. ANNEXES

### 6.1. Documentation technique

Documentation sur la pompe hydraulique (Fichier PDF)

**Tableurs :**

- Étude de la variation des constantes thermodynamiques(Fichier Exel)
- Temps d'arrêt voiture couple constant ( Fichier ODT)
- Calcul du temps d'arrêt d'un véhicule grâce a la compression d'azote (Fichier ODT)