

Mars

Comment mesurer la vitesse du vent sur mars?

Einsiedler David
Morawiec Benoît
Schlama Rémi

TPE Première S-SI
Lycée Jean Mermoz
2017-2018

Sommaire

Introduction	2
I. La mission Curiosity	2
1. Présentation de la mission	2-3
2. L'exploration de Mars.....	3-4
3. Les conditions météorologiques sur mars.....	5-7
II. Etude pratique : Réalisation de la maquette	7
1. La soufflerie	7
a. Le circuit PWM	8-9
b. Le tachymètre	10-11
2. L'anémomètre à fil chaud.....	12
a. Fonctionnement	12-14
b. Démarche expérimentale.....	15-17
Conclusion	18

Bibliographie

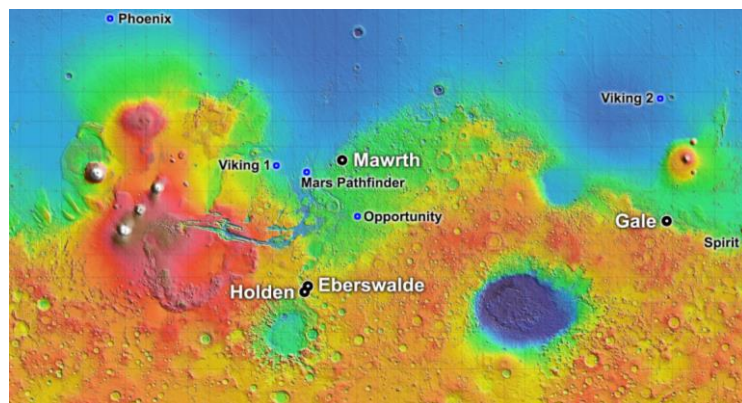
Introduction

«C'est un petit pas pour un homme, mais c'est un bond de géant pour l'humanité» Cette phrase célèbre a été prononcée par Neil Armstrong, premier homme à avoir posé le pied sur la lune le 21 juillet 1969. Depuis des décennies, la conquête de l'espace fait rêver les hommes et les projets sont multiples. Celui qui a retenu notre attention et qui a été une source d'inspiration pour nous est le Rover Curiosity utilisé par la NASA pour une mission sur Mars. Dans ce Rover se trouve notamment des capteurs météorologiques. Dans un premier temps, nous avons voulu en savoir plus sur cette mission et les conditions météorologiques sur Mars. Puis dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressés à la mesure de la vitesse du vent sur Mars. Pour cela, nous avons réalisé une maquette. Calculer la vitesse d'un fluide est souvent utilisé en mécanique des fluides. C'est une partie complexe de la mécanique étant donné que les liquides et les gaz ne sont pas comparables à des solides physiques. A travers ce TPE, nous avons voulu étudier le fonctionnement d'un anémomètre à fil chaud.

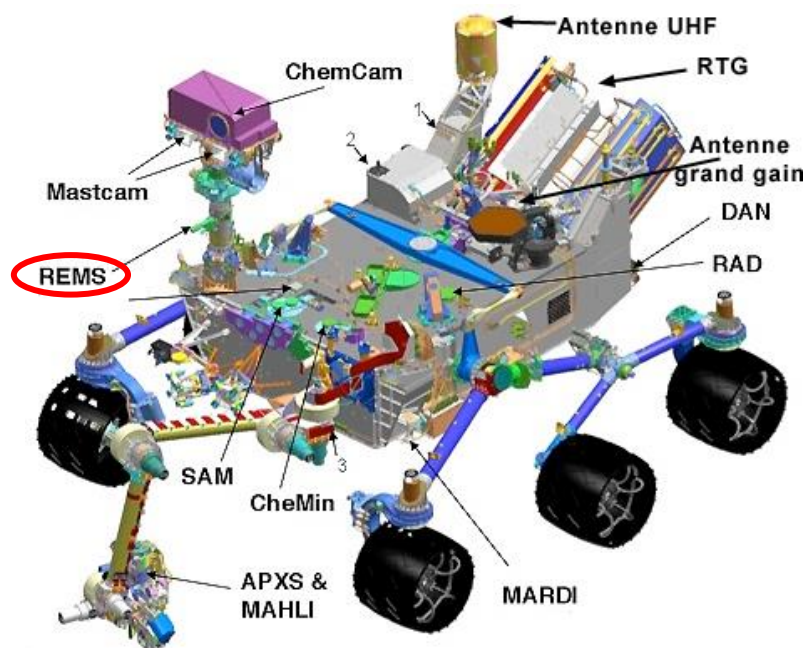
I. La mission Curiosity

1. Présentation de la mission

Curiosity est le rover, c'est à dire l'astromobile développée par Jet Propulsion Laboratory qui est une entreprise commune de la NASA et de Caltech (California Institute of technology), une université aux États-Unis. Le rover est conçu pour mener à bien la mission d'exploration Mars Science Laboratory. L'objectif principal de la mission est de tester l'habitabilité de la planète. Afin de mettre en œuvre ce projet, un atterrissage réussi est la condition *sine qua non* à l'aboutissement de celui-ci. Par conséquent, de nombreuses caractéristiques doivent être prises en compte. En effet, il doit permettre de réaliser une grande variété d'expériences et présenter un environnement géologique propice à la vie. C'est ainsi qu'un long temps de recherches se met en place. Tout d'abord, la NASA demande de l'aide auprès de la communauté scientifique internationale. Les propositions reçues sont examinées lors d'un premier congrès en juin 2006. Deux ans plus tard, en novembre 2008, 4 sites sont finalement retenus (Voir ci-dessous).

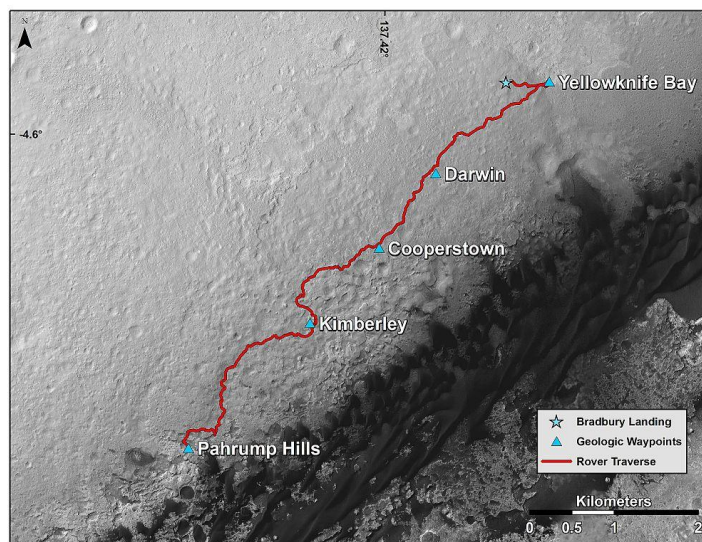


Chaque site présentant des avantages et des inconvénients, la décision n'est prise que 3 ans plus tard, le 22 juillet 2011. C'est le cratère Gale qui est retenu. La mission a pour but majeur d'examiner l'habitabilité de Mars. C'est dans ce but qu'un grand nombre d'analyses sont réalisées. Le rover est équipé de 10 instruments scientifiques créés grâce à une participation internationale au projet. Quatre instruments tentent de caractériser le climat sur Mars. C'est le cas du détecteur de particules énergétiques RAD, du détecteur de neutrons DAN, de la caméra de MARDI qui réalise des photographies de la zone environnante lors de l'atterrissage et de la station météorologique REMS. Voici la représentation du rover :



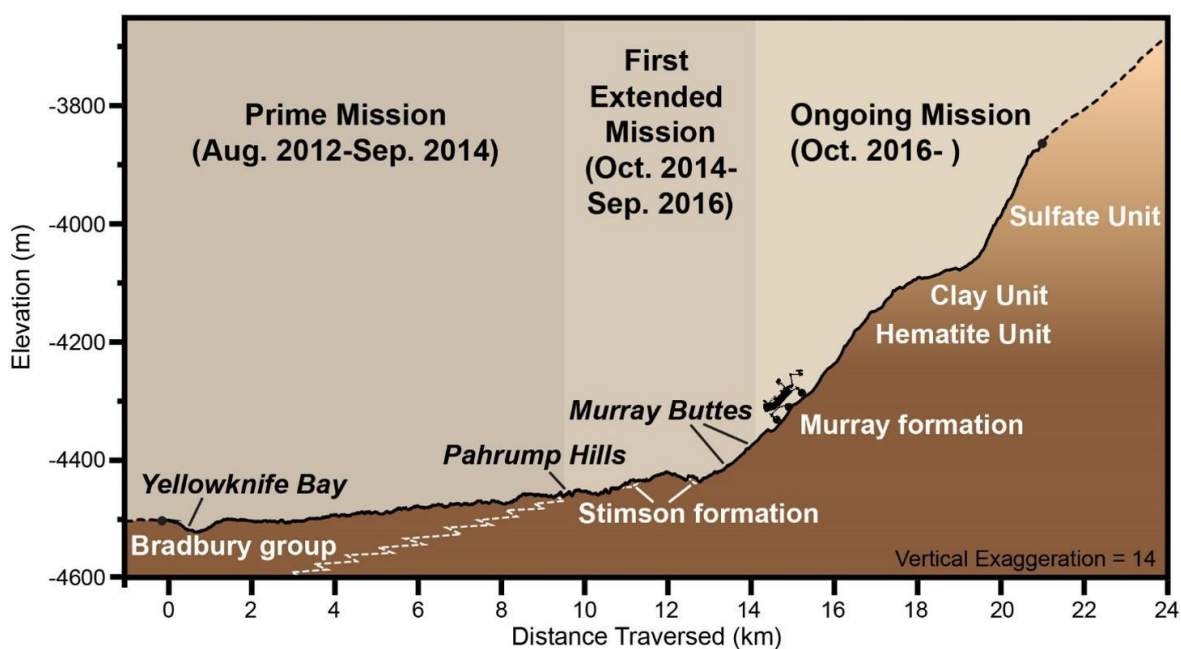
2. L'exploration de Mars

L'astromobile arrive dans le cratère Gale, le 6 août 2012. C'est alors que débute la première des 3 phases de la mission. Dans un premier temps, les instruments sont testés. Le 21 août, la NASA annonce la première contrainte. En effet, un des deux anémomètres de la station météorologique REMS a été endommagé lors de l'atterrissage et ne fonctionne plus. Fort heureusement, cela reste la seule dégradation lors de l'atterrissage. Lors de cette première phase, le rover parcourt 8 kilomètres en 15 mois et découvre ainsi les sites intéressants à étudier (Voici le chemin parcouru) :



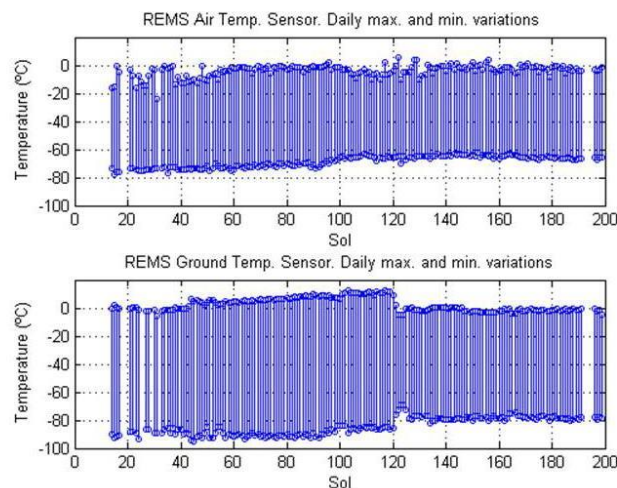
Lors de la deuxième phase, les objectifs de l'exploration scientifique prennent le dessus et le rover analyse en détail les sites jugés intéressants. Tout d'abord, il passe 6 mois à étudier en détails les Pahrump Hills. Les deux années suivantes, il continue son chemin passant par les dunes Bagnold, le plateau Naukluft, les Murray Buttes ou encore la dalle Old Soaker.

En mai 2017, c'est la 3ème phase qui débute. Le rover a désormais parcouru 16 kilomètres. L'astromobile a pour objectif d'atteindre des zones intéressantes sur le plan géologique telles que le Mont Sharp. Ces zones sont chargées d'hématite, d'argile ou encore de sulfate néanmoins elles restent compliquées d'accès. En effet, depuis le début de la mission le rover n'a jamais gravit des pentes d'une telle ampleur (Voir ci-dessous). Cette phase est toujours en cours...



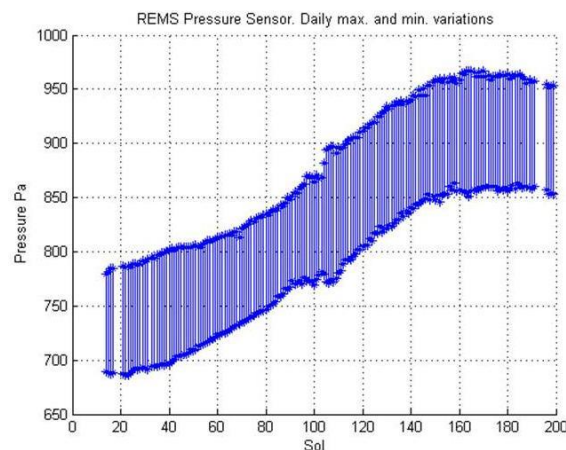
3. Les conditions météorologiques sur Mars

- La station météorologique REMS a effectué des mesures de la température et de l'humidité. Ce graphique ainsi que celui de la pression atmosphérique sont représentés en fonction du temps en Sol, c'est à dire en jour martien (environ 24 heures et 39 minutes) avec Sol 0 la date de l'atterrissage La température varie quotidiennement entre -80 ° et 0° Celsius. Les variations entre le jour et la nuit sont très importantes. La température moyenne sur mars est de -53° Celsius.



- Le vent est particulièrement important sur Mars. Il y en a presque quotidiennement et souvent il se forme des tempêtes de poussière. La vitesse du vent varie en fonction de la topographie et des saisons. Pendant les tempêtes de poussière ou lors des tempêtes hivernales les rafales atteignent les 150 km/h.

- La pression atmosphérique varie entre 650 et 950 Pa. L'atmosphère martienne est très ténue et la pression atmosphérique représente moins de 1 % de la pression atmosphérique terrestre au niveau de la mer (6 millibars pour mars contre 1013 millibars pour la terre).



La pression exercée par le vent est appelée pression dynamique.

Sa formule est la suivante :

$$Q = 0.5 \rho v^2$$

Avec

Q: pression exercée par le vent.

ρ : densité de l'air

V : vitesse du vent

Selon les rapports de la NASA, la densité de l'air sur Mars est de 0.02 Kg/m³ alors que sur Terre la densité de l'air est de 1.225 Kg/m³. Cette faible densité de l'air sur Mars par rapport à la densité de l'air sur Terre s'explique par une pression atmosphérique sur Mars 170 fois inférieure à celle sur Terre.

Prenons l'exemple d'un vent ayant une vitesse de 75 Km/h soit 20.833 m/s.

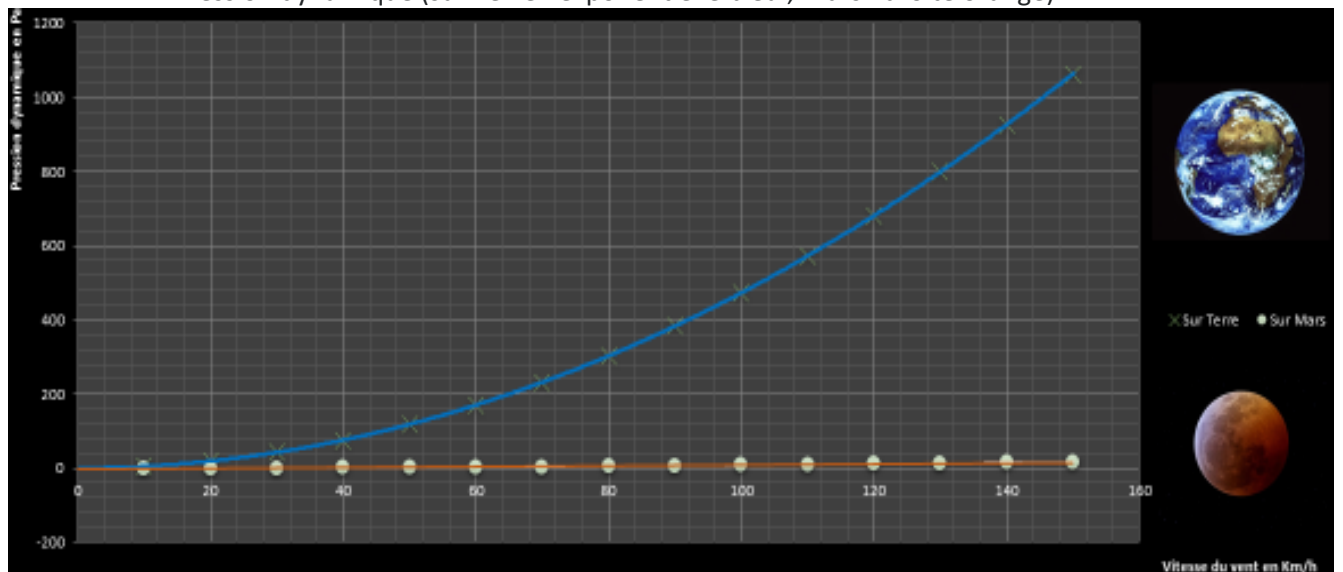
La pression du vent ayant une vitesse de 75 Km/h sur Terre serait :

$$qE = 0.5 (1.225) (20.833)^2 = 265.833 \text{ Pa}$$

Alors que sur Mars la pression du vent de même vitesse serait uniquement égale à :

$$qM = 0.5 (0.02) (20.833)^2 = 4.34 \text{ Pa}$$

Pression dynamique (sur Terre : exponentielle bleu ; Mars : droite orange)



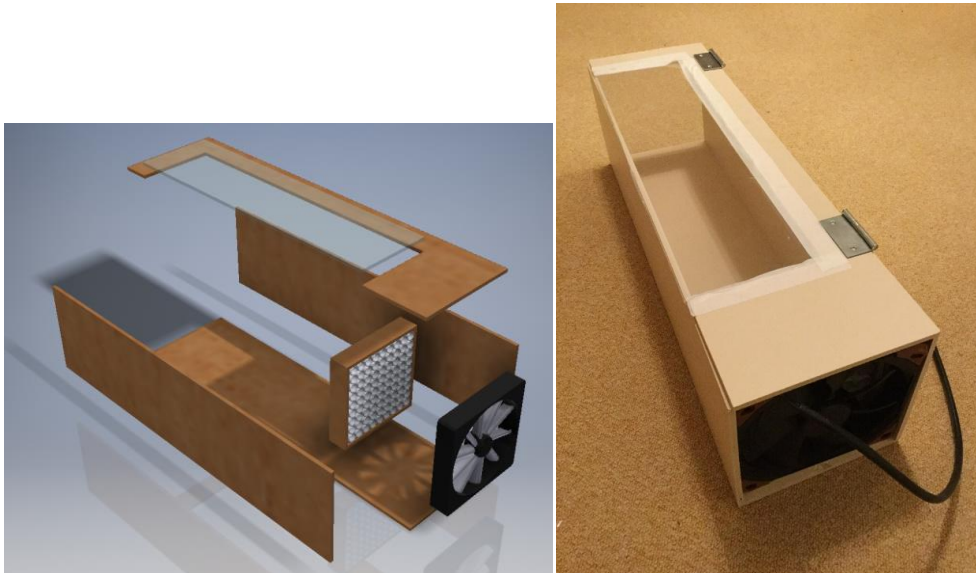
Cette différence s'explique par les conditions atmosphériques différentes.

Sur Mars la pression atmosphérique étant très faible, la vitesse du vent ne peut être mesurée grâce à un anémomètre à girouette. A bord du Rover Curiosity, il y a un anémomètre à fil chaud. Nous avons voulu étudier et comprendre le fonctionnement de ce type de matériel. Pour cela nous avons fabriqué une soufflerie, un tachymètre, un anémomètre à fil chaud et avons fait des mesures.

II. Etude pratique : Réalisation de la maquette

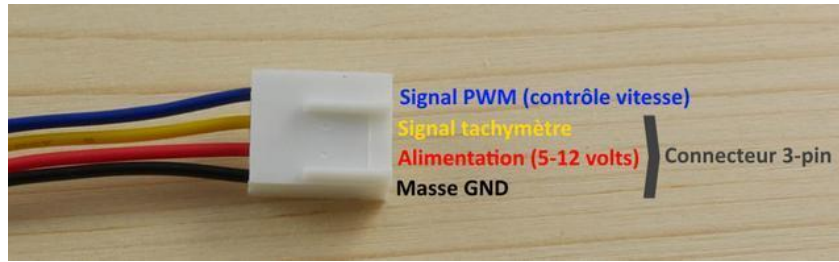
1. Soufflerie

Nous avons d'abord modélisé la soufflerie en trois dimensions et nous l'avons ensuite fabriquée. Les parois de la soufflerie sont composées d'un bois artificiel, permettant ainsi de garder une rigidité. Le couvercle est composé de deux parties : l'une est toujours le bois et la deuxième est une plaque de plexiglas, ce qui permet de visualiser le contenu de la boîte durant les expériences. Nous avons également ajouté des charnières pour faciliter l'ouverture. Le ventilateur se place au début du chemin de l'air afin d'assurer la meilleure aspiration possible. De plus, nous avons confectionné un système qui sert à « linéariser l'air » (tuyau de 2cm de long) sortant du ventilateur afin que l'air soit le plus droit possible durant son parcours et qu'il n'y ait pas de turbulences. Voici la soufflerie modélisée puis une image réelle, où l'on peut reconnaître tous les éléments.

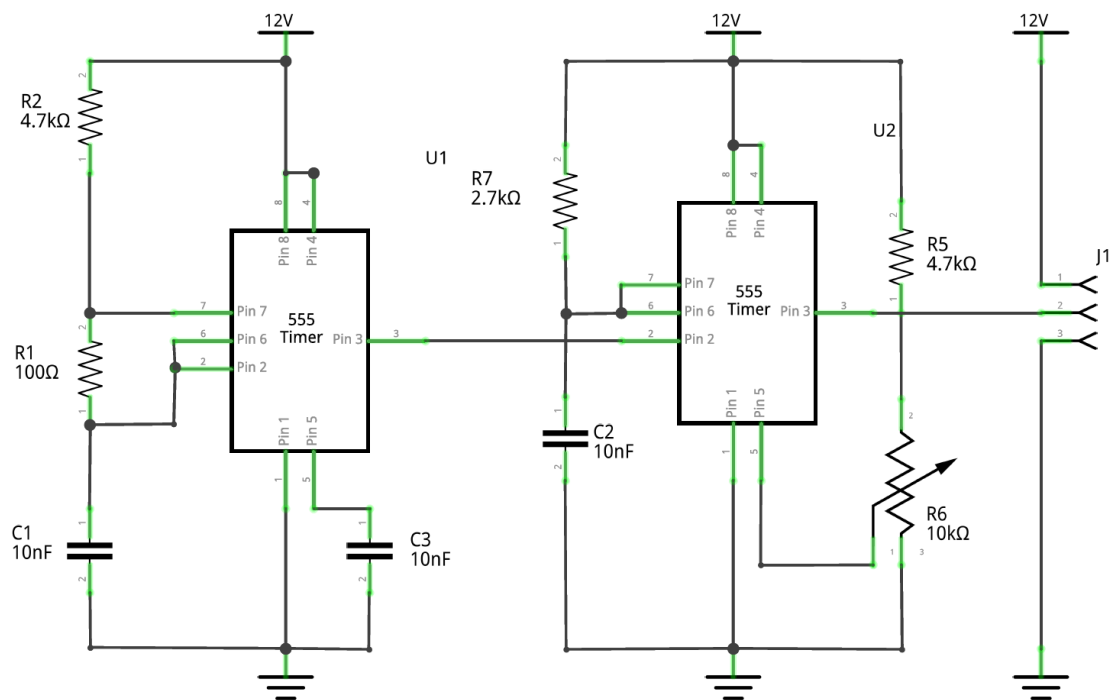


a. Circuit PWM (Pulse With Modulation)

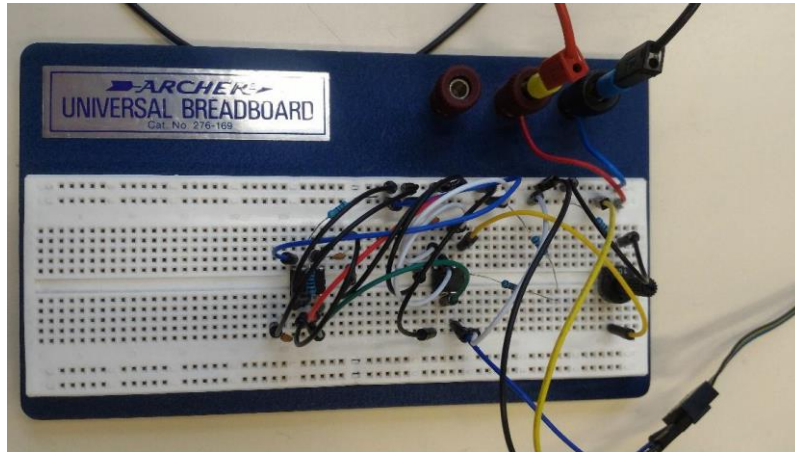
Pour envoyer l'air à une certaine vitesse, nous avons choisi d'utiliser un ventilateur de PC puisque la vitesse peut être réglée. On peut modifier la vitesse de rotation des pales mais aussi lire la fréquence que renvoie le ventilateur. La partie la plus longue dans ce projet a été la mise en place d'un circuit électronique renvoyant un signal PWM ainsi que la fabrication d'un tachymètre, permettant de lire une fréquence. Le ventilateur comporte 4 broches : une pour l'alimentation, une pour la masse, une pour l'entrée PWM et une pour la broche tachymètre. Voici un exemple de brochage possible.



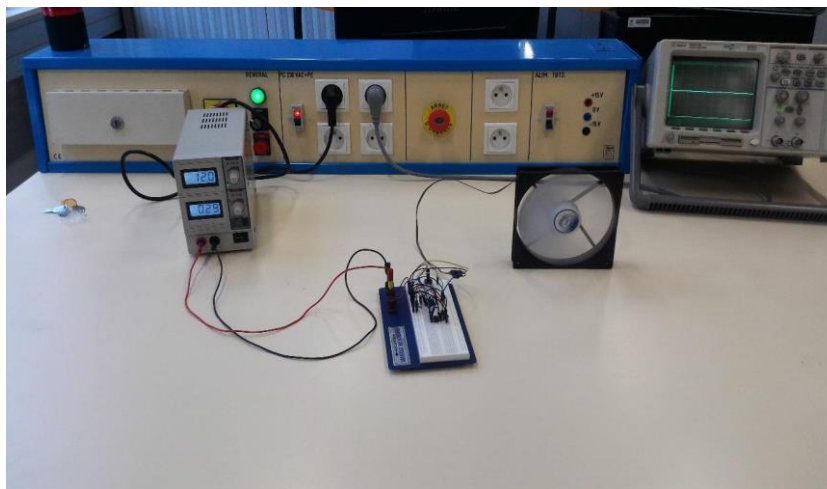
Tout d'abord, nous avons conçu un circuit comportant des minuteries ne555 afin d'envoyer un signal carré à la broche PWM du ventilateur. En effet, envoyer un signal avec l'Arduino n'a pas été possible car la fréquence voulue était au-delà des capacités de l'Arduino. Un circuit PWM – en anglais *Pulse With Modulation* – signifie en français modulation de largeur d'impulsion soit MLI. Le signal carré définit la vitesse de rotation voulue, on peut donc, en allongeant ou raccourcissant le signal, modifier la vitesse. Le circuit est composé d'un multivibrateur astable – communément appelé oscillateur –, ainsi que d'un multivibrateur monostable. Le multivibrateur astable sert d'horloge, il émet des impulsions à 26KHz. Le multivibrateur monostable, sert quant à lui à élargir l'impulsion reçue à une longueur définie par le potentiomètre. Le schéma ci-dessous représente le circuit PWM que nous avons monté.



Nous avons par la suite monté ce circuit, d'abord sur une plaque d'essais (voir ci-dessous) – afin de vérifier le bon fonctionnement des composants –, puis enfin sur une plaque cuivrée ou nous avons soudé la partie inférieure.

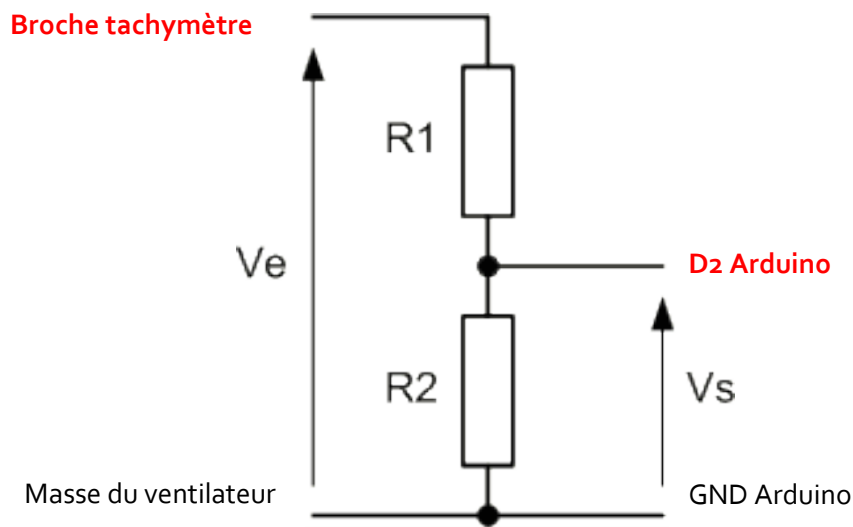


Après avoir lancé le courant électrique dans le circuit et branché le ventilateur, nous avons pu conclure que le circuit fonctionnait bien. En tournant le potentiomètre, la vitesse de rotation des pales du ventilateur diminuait ou augmentait (voir la photo ci-dessous). Nous aurions pu nous arrêter à ce stade pour directement créer l'anémomètre mais il aurait été imprécis d'étalonner un anémomètre sans connaître la réelle vitesse que renvoie le ventilateur. C'est pour cela qu'il a fallu confectionner un tachymètre, dont nous allons parler dans la prochaine partie.



b. Tachymètre

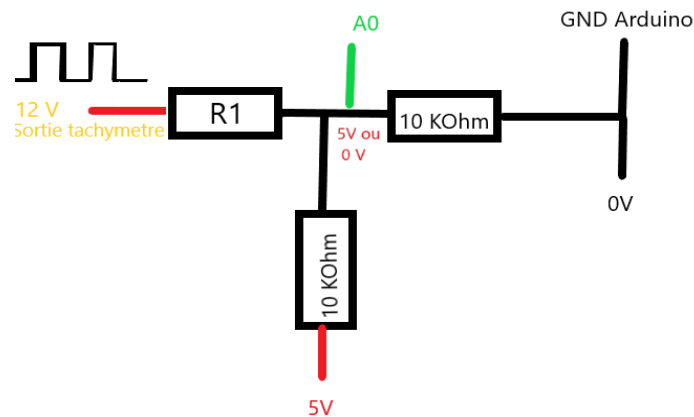
Comme dit précédemment, il est imprécis et erroné de ne pas utiliser la quatrième broche du ventilateur qui est le tachymètre. Cette broche va nous permettre de lire une fréquence envoyée par le ventilateur, laquelle définit la vitesse des pales. Cette partie de notre TPE fut la plus complexe en termes de connaissances. La lecture de la fréquence peut paraître simple, mais nous avons dû fabriquer un pont diviseur de tension ainsi qu'un circuit Arduino permettant de compter le nombre d'impulsions émises par le ventilateur. L'Arduino ne peut pas recevoir un courant extérieur, cela risque de la détériorer. C'est pour cela que nous avons dû mettre en place un pont diviseur de tension, qui, comme son nom l'indique, fait chuter la tension. Nous avons effectué les calculs permettant de transformer 12V ($U_2 = U_1 * R_2 / (R_2 + R_1)$), à la sortie du ventilateur, en 5V à la broche digitale de l'Arduino. Il en résulte que nous avons besoin de deux résistances, l'une de 14k Ω et l'autre de 10k Ω . On note que $R_1 = 14k$ et $R_2 = 10k$. Voici donc le schéma électrique de ce montage.



C'est ici que vient une erreur. En effet, nous avons essayé de mettre en place ce montage afin de lire la fréquence sur un oscilloscope, mais la fréquence ne variait pas comme prévu, même en modifiant la vitesse de rotation du ventilateur. C'est alors que nous avons compris que pour lire la fréquence envoyée à la sortie tachymètre, nous devons alimenter la broche avec 5V, ensuite mettre une résistance de 10 k Ω pour voir apparaître le signal carré composé de 0V puis de 5V. Ci-dessous sont présentés respectivement, le visuel sur oscilloscope du signal en sortie du montage erroné et du montage fonctionnant par la suite.



Le schéma ci-dessous représente le montage du circuit final pour le tachymètre. La broche nommée A0 est celle qui est reliée à l'Arduino (broche analogique). R1 est la même résistance que dans le pont diviseur de tension, elle vaut 14kΩ.



Enfin, nous avons programmé le code Arduino permettant de lire la fréquence reçue par le ventilateur. Dans ce code se trouve la fonction *pulseIn*, qui permet de connaître une fréquence, même si celle-ci est élevée. On renvoie les données collectées à l'ordinateur *via* le moniteur de série, dans lequel on voit apparaître les informations telles que la fréquence ou encore le nombre de rotation par minute. Voir le code ci-dessous.

```

1 //Mesure periode puis Hz puis rotation par minutes
2 const int PIN_SIGNAL = 2; //broche 2 (digitalread);
3 int frequences; //variable contenant la frequence
4 int rpm; //variable contenant la vitesse
5 int periode = 0;
6 void setup() {
7   Serial.begin(9600); //initialisation du moniteur de serie
8   pinMode(PIN_SIGNAL, INPUT);
9 }
10 void loop() {
11   int lowperiode = pulseIn(PIN_SIGNAL, LOW, 1000000);
12   if (lowperiode>0){
13
14     int highperiode = pulseIn(PIN_SIGNAL, HIGH, 1000000);
15     int periode = (((highperiode+lowperiode)));
16     float frequences = (1/(periode));
17     float rpm = ((frequences) * 60);
18     Serial.println("///*start : ");
19     Serial.println("lowperiode en microsecondes: ");
20     Serial.println(lowperiode);
21     Serial.println(" /");
22     Serial.println("highperiode en microsecondes: ");
23     Serial.println(highperiode);
24     Serial.println(" /");
25     Serial.println("periode en micro secondes: ");
26     Serial.println(periode);
27     Serial.println(" /");
28     Serial.println(" Hz:");
29     Serial.println(frequences);
30     Serial.println(" /");
31     Serial.println(" RPM:");
32     Serial.println(rpm);
33     Serial.println(" end*///");
34     Serial.println(" ");
35   }
36   else{
37     Serial.println("/nothing /// ");
38   }
39   delay(2000);
40 }

```

2. L'anémomètre à fil chaud

Comme évoqué au préalable un traditionnel anémomètre à girouette ne peut fonctionner sur Mars car la pression dynamique exercée par le vent est bien trop faible. Ainsi il nous a semblé intéressant d'étudier un autre système pouvant fonctionner sur mars. Pour cela nous avons tout d'abord étudié les caractéristiques du vent et plus particulièrement le refroidissement éolien. Ce phénomène est à l'origine de la température ressentie par le corps. Il a été mis en évidence par Paul Siple et son assistant Charles Passel. Ce phénomène est actuellement utilisé pour les prévisions météorologiques des pays nordiques, plus exposés aux basses températures. La formule donnée ci-dessous permet de prévoir la température ressentie par le corps avec V = vitesse du vent en Km/h, T =température ambiante en °C et finalement $T(\text{Fré})$ =température ressentie équivalente à des degrés Celsius.

$$T(\text{FRÉ}) = 13.12 + 0.6215 \cdot T - 11.37 \cdot V^{0.16} + 0.3965 \cdot T \cdot V^{0.16}$$

Ainsi sachant qu'il existait une relation entre la perte de chaleur d'un organisme à température supérieure à la température ambiante et la vitesse du vent et ayant observé le fonctionnement du module REMS du rover Curiosity, nous avons alors entrepris la création d'un système mesurant l'énergie thermique enlevée par le vent.

a. Fonctionnement

Notre objectif était de mesurer la vitesse du vent, à l'aide de l'énergie thermique enlevée par le vent. Notre anémomètre est constitué d'une résistance chauffée par effet Joule, de deux thermistances et d'un microcontrôleur arduino (centre de lecture et d'analyse des données). Tout d'abord, une résistance est chauffée par effet Joule. Ce phénomène permet à la résistance de convertir de l'énergie électrique en énergie thermique. Cette résistance dans notre montage pourra par la suite être assimilée à un radiateur. L'équation de même que l'illustration n°1 ci-dessous permettent de résumer ce phénomène.

$W_{\text{joule}} = R \cdot I_{\text{eff}}^2 \cdot t$

à résistance constante et pour un courant périodique ou continu

chaleur

énergie dissipée par effet Joule (joule)

résistance (ohm)

intensité efficace (ampère)

durée (seconde)

$P_{\text{joule}} = \frac{W_{\text{joule}}}{t}$

puissance dissipée par effet Joule (watt = joules/s)

Illustration n°1 : Effet Joules ou puissance dissipée

Ensuite, une thermistance (résistance thermique dont la résistance diminue lorsque la température croît) englobée de pâte thermique et réchauffée par une résistance permet de suivre l'évolution de la température, égale à 200°C en milieu non ventilé (non soumis à un écoulement de fluide, plus particulièrement le vent). Par ailleurs, une autre thermistance est disposée dans le système servant de référence.

Le schéma n°1, ci-dessous représente le montage électrique de l'anémomètre :

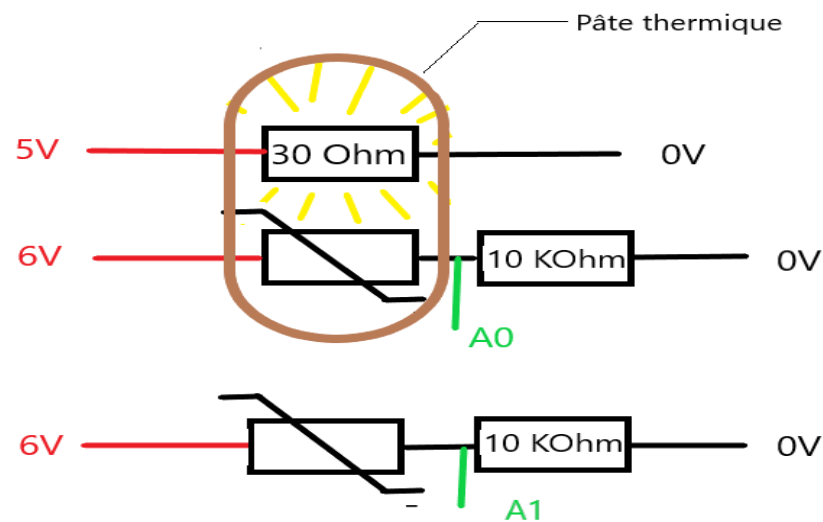


Schéma n°1 : circuit électrique de l'anémomètre

Pour finir, l'arduino à laquelle sont connectées les thermistances, permet de lire les valeurs de résistances significatives de la température. Dans notre cas, la mesure directe de la température n'est pas nécessaire. De plus pour parvenir à lire les valeurs de températures, il aura fallut passer par de nombreuses conversions : tout d'abord une valeur analogique, ensuite une valeur de tension, puis une valeur de résistance (jusque-là, relativement facile) pour arriver finalement à une valeur de température...Mais, la conversion d'une valeur de résistance à une valeur de température s'est avérée bien plus complexe car la thermistance varie de manière exponentielle (et non linéaire) avec la température. Par ailleurs le manque de précision qui aurait résulté de cette dernière conversion résistance-température, nous a semblé trop peu rigoureux.

L'ensemble des conversions sont les suivantes :

-Tout d'abord l'arduino lit une **Valeur analogique** (broche A0 et A1 sur le montage)

-Cette valeur est transposée en valeur de **Tension** par la relation

$$T = \text{Valeur analogique} (* 5/1024)$$

-Finalement le pont diviseur de tension (visible dans le montage électrique de l'anémomètre ou schéma n°1) nous a permis à l'aide des valeurs de tension d'en déduire les **valeurs de résistances** avec l'équation :

$$U2 = U1 * (R2 / (R2+R1)) \text{ et avons alors isolé } R1 :$$

$$R1 = (60\,000 / U2 (=tension \text{ lue par l'arduino})) - 10\,000$$

Le programme permettant la lecture des valeurs de résistance par l'arduino est le suivant :

```

anemometre_feb12a
const int thermistance_neutre = A0;
const int thermistance_anemometre = A1;

float value_thermoambiante = 0;
float value_thermoanemometre = 0;

float tension_thermoambiante = 0;
float tension_thermoanemometre = 0;

float resistance_neutre = 0;
float resistance_thermoanemometre = 0;

int ecart_resistif = 0;

int n = 1;

const int tension_alimentation = 6;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("/START: ");
  Serial.println("-----");
}

void loop() {
  float value_thermoambiante = analogRead(thermistance_neutre);
  float value_thermoanemometre = analogRead(thermistance_anemometre);

  float tension_thermoambiante = ((value_thermoambiante*5)/1024);
  float tension_thermoanemometre = ((value_thermoanemometre*5)/1024);

  int resistance_neutre = ((60000 - (10000*tension_thermoambiante))/tension_thermoambiante);
  int resistance_thermoanemometre = ((6000 - (10000*tension_thermoanemometre))/tension_thermoanemometre);

  int ecart_resistif = (resistance_thermoanemometre - resistance_neutre);
  Serial.println("nombre de mesures : ");
  Serial.print(n);
  Serial.println();
  Serial.println("tension n°1 (capteur de temperature ambiante) : ");
  Serial.println(tension_thermoambiante);
  Serial.println("tension n°2 (anemometre) : ");
  Serial.println(tension_thermoanemometre);
  Serial.println();
  Serial.println("Resistance_neutre : ");
  Serial.println(resistance_neutre);
  Serial.println("Resistance_thermique : ");
  Serial.println();
  Serial.println(resistance_thermoanemometre);
  Serial.println("Ecart résistifs : ");
  Serial.println(ecart_resistif);
  Serial.println();

  //float vitesse_vent = ( A^ ecart_resistif)+ B );]
  //Serial.print("vitesse du vent : ");
  //Serial.println(vitesse_vent);

  Serial.println(" END */ ");
  delay(1000);
  int n = n+1;
}

```

Déclaration des variables

Initialisation du moniteur série

Corps du programme :
lecture et conversion des
données

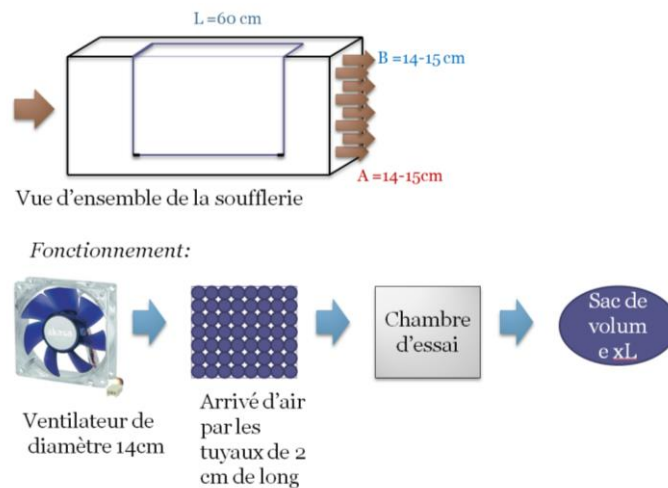
Compilation terminée

Illustration n°2 : Programme permettant à l'arduino la lecture des valeurs de thermistances

b. Démarche expérimentale

Une fois le montage et le programme fini, il s'agissait pour nous d'étalonner cet anémomètre. Pour étalonner l'anémomètre nous avons utilisé la soufflerie que nous avons conçue (dont la conception et la gestion est évoqué un peu plus haut) et d'un anémomètre, « certifié » servant de référence.

Nous connaissons les valeurs de vitesse du vent dans la soufflerie relative à la vitesse de rotation car nous en avons étudié le fonctionnement et réalisé une courbe d'analyse. Pour cela, nous avons utilisé un sac de grand volume que nous avons placé à la sortie de la soufflerie. Nous avons ensuite chronométré le temps nécessaire au remplissage du sac pour différentes vitesses de rotation du ventilateur. En procédant de la manière suivante :



Ensuite, nous avons calculé la vitesse du vent en un point quelconque de la soufflerie (le flux étant linéaire), à l'aide de l'équation ci-dessous :

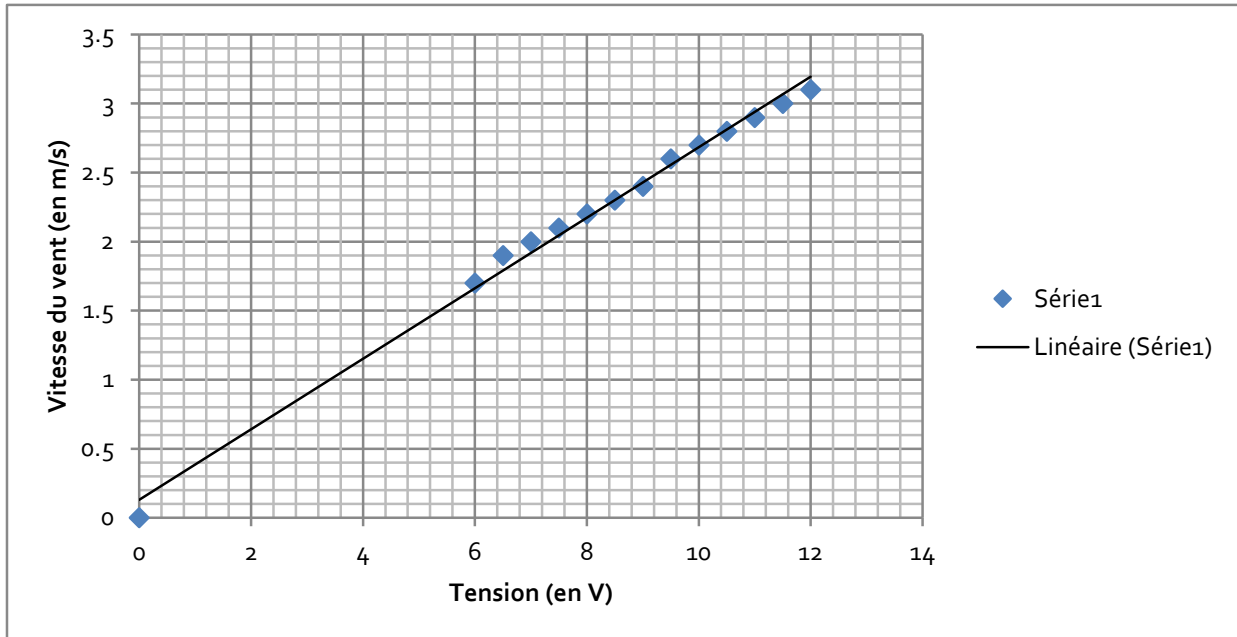
$$Q \text{ débit volumique} = V \text{ vitesse du fluide} * S \text{ section de passage}$$

$$Q \text{ débit volumique} = V \text{ vitesse du fluide} * (a \text{ coté} * b \text{ coté} - S \text{ Surface des tuyaux})$$

$$V \text{ du fluide} = Q \text{ débit volumique} / (a * b)$$

Equation n°1 : vitesse du vent dans la soufflerie

Il en a résulté le graphique suivant, nous permettant de connaître la vitesse du vent en fonction de la tension d'alimentation du ventilateur.

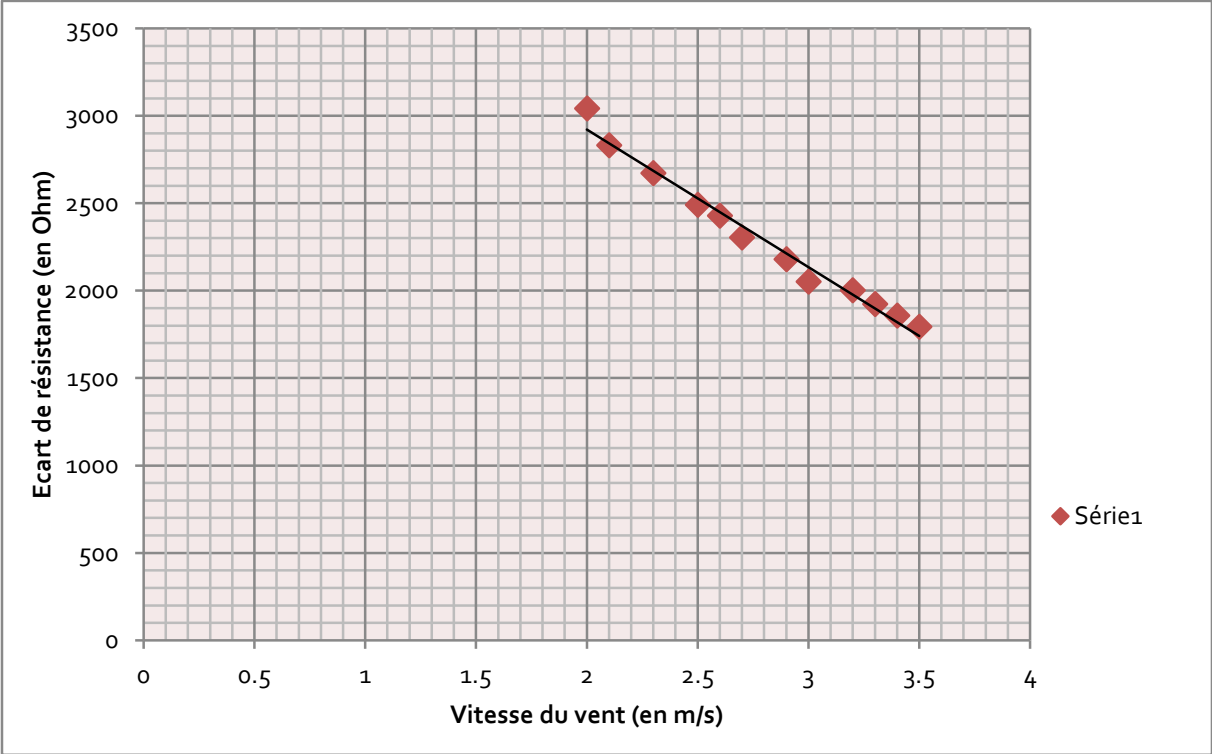


Cette courbe nous a permis, en plus de notre anémomètre certifié, d'étalonner notre anémomètre thermique. Nous avons placé notre anémomètre dans la soufflerie et étudié l'écart de résistances (synonymes d'écart de température) renvoyés sur un moniteur série, par le microcontrôleur arduino. Ces valeurs lues étaient celles de la thermistance à température ambiante et de la thermistance chauffée (par la résistance par effet joule). Ci-dessous vous pouvez voir un exemple de sortie sur le moniteur série.

```
nombre de mesures :  
7  
tension n1; capteur de temperature ambiante :  
0.00  
tension n2; anemometre :  
0.00  
  
Resistance neutre :  
0  
Resistance thermique :  
  
0.00  
Ecart resistifs :  
0  
  
END */
```

Illustration n°3 : Sortie sur le moniteur Série

Finalement nous avons mis en relation la vitesse du vent dans la soufflerie et les écarts de résistance.



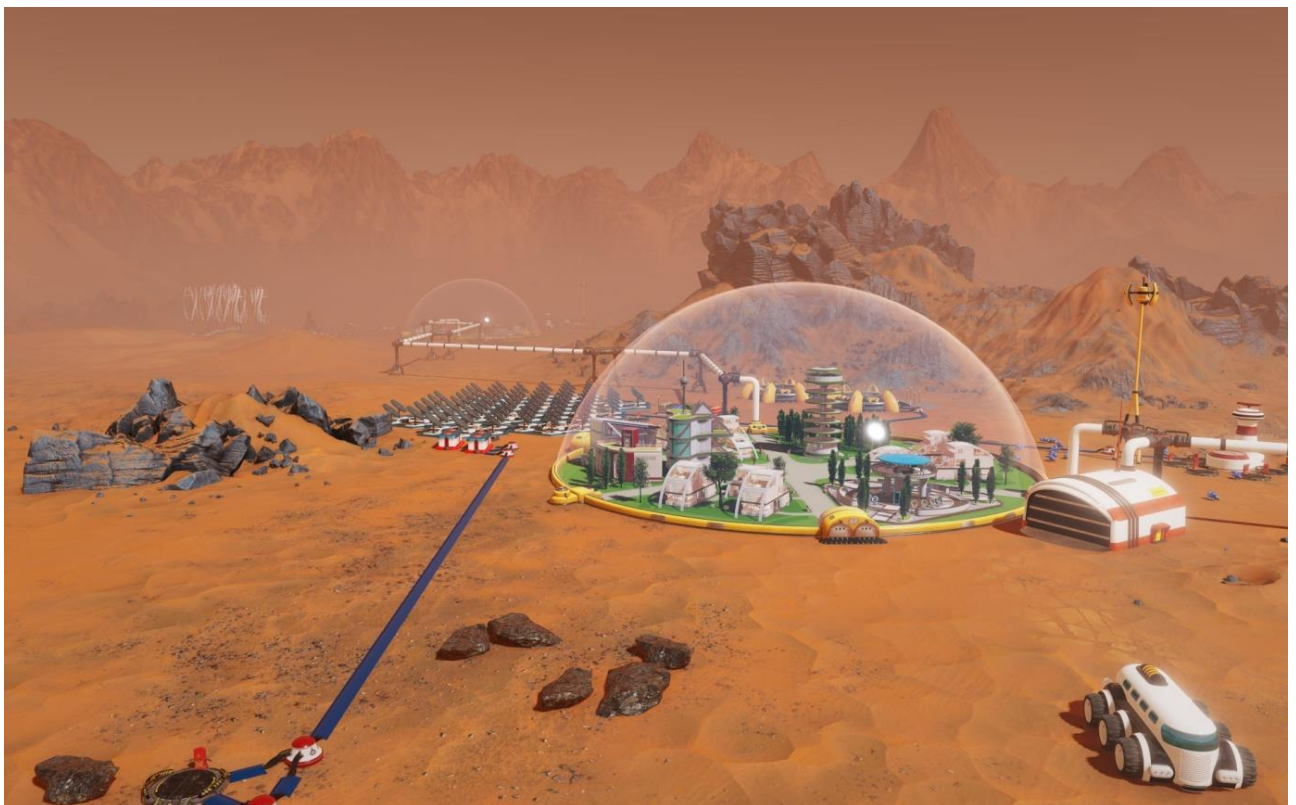
Le système final :



Conclusion

Sur Mars la pression atmosphérique étant très faible, c'est avec un anémomètre à fil chaud que l'on peut mesurer la vitesse du vent. Au travers de ce TPE, nous avons eu l'occasion d'aborder des notions de Sciences-Physiques et des Sciences de l'Ingénieur. L'étude et la conception de notre maquette, nous ont permis d'analyser et de comprendre la formation des vents, la mesure de leur vitesse grâce à un anémomètre à fil chaud et les conditions spécifiques sur Mars. Notre anémomètre pourrait fonctionner sur Mars mais il faudrait néanmoins utiliser des capteurs pouvant supporter des températures bien plus basses. La température moyenne sur Mars étant de -53° Celsius.

La vie sur Mars, c'est un beau rêve mais ce n'est pas pour demain...



Bibliographie

[Capteur de température :](#)

<http://catalogs.avx.com/NTC-Thermistors.pdf>

[Pont diviseur de tension:](#)

<https://goo.gl/CoLjqj>

<https://goo.gl/ba9AAW>

[https://fr.wikiversity.org/wiki/Loi de Kirchhoff/Pont diviseur de tension](https://fr.wikiversity.org/wiki/Loi_de_Kirchhoff/Pont_diviseur_de_tension)

[Fan speed reading :](#)

<https://playground.arduino.cc/Main/ReadingRPM>

<http://www.theorycircuit.com/reading-dc-fan-rpm-arduino/>

<https://goo.gl/8nqa8U>

[PWM input :](#)

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation de largeur d'impulsion](https://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation_de_largeur_d%27impulsion)

<http://www.f-legrand.fr/scidoc/docimg/sciphys/arduino/ondepwm/ondepwm.html>

<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM>

<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/SecretsOfArduinoPWM>

[Fan F14 :](#)

https://www.arctic.ac/eu_en/f14-pwm.html

[Other fan](#)

<https://noctua.at/fr/nf-a14-industrialppc-3000-pwm>

<https://www.carnetdumaker.net/articles/faire-un-tachymetre-avec-une-carte-arduino-genuino-pour-lire-la-vitesse-de-rotation-dun-ventilateur-de-pc/>

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Mars Science Laboratory](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mars_Science_Laboratory)

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Exploration de Mars par Curiosity](https://fr.wikipedia.org/wiki/Exploration_de_Mars_par_Curiosity)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Rover Environmental Monitoring Station](https://en.wikipedia.org/wiki/Rover_Environmental_Monitoring_Station)

<https://cab.inta-csic.es/remc/instrument-description/wind-sensor/?r=true>

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.459.7115&rep=rep1&type=pdf>

<https://msl-scicorner.jpl.nasa.gov/Instruments/REMS/>

[https://www.cps-jp.org/~mosir/pub/2015/2015-05-14/02_spiga/pub-web/spiga LMD InSight 05 2015 Japan.pdf](https://www.cps-jp.org/~mosir/pub/2015/2015-05-14/02_spiga/pub-web/spiga_LMD_InSight_05_2015_Japan.pdf)