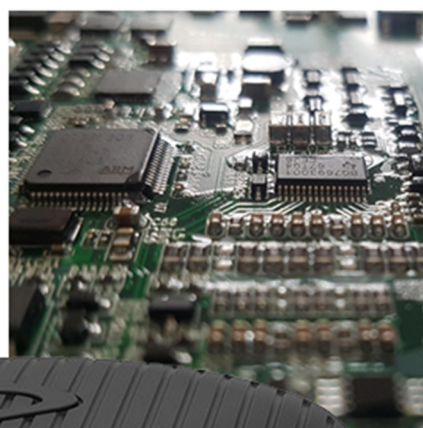


Mallette Segway Drift

 DOSSIER TECHNIQUE



DRIFT W1



"Sauf accord de notre part, toute reproduction partielle ou totale des documents et contenus liés à ce produit est formellement interdite."



SOMMAIRE

Préambule	3
QU'EST-CE QU'UN GYROPATIN	4
L'ARCHITECTURE EXTERNE	4
LES CARACTERISTIQUES TECHNIQUES D'UN GYROPATIN	4
DU GYROSKATE à l'HOVERSHOES, une histoire d'évolutions :	5
LA DESCRIPTION FONCTIONNELLE SYSML	8
L'ARCHITECTURE INTERNE :	11
LA MISE EN EQUATION	12
LA CENTRALE INERTIELLE POUR MESURER L'INCLINAISON	13
LE MOTEUR ROUE ET SA VARIATION DE VITESSE	18
LE MODELE MULTIPHYSIQUE	Erreur ! Signet non défini.
LE MODELE NUMERIQUE	Erreur ! Signet non défini.



Préambule



Ce pack et sa mallette sont destinés à un usage éducatif uniquement



La clef USB qui vous est fournie comporte toujours les dernières mises à jour. Cependant et avec le temps, nous leur apportons des évolutions. Pour être tenu au courant et les recevoir GRATUITEMENT, vous pouvez nous en faire la demande par mail ou par téléphone, en nous communiquant votre code client et la référence de votre produit.



Pour tout problème et afin de traiter votre demande au plus vite, il est préférable d'indiquer immédiatement la raison de votre appel, soit lié au matériel, soit lié à la pédagogie.

Pour des problèmes d'ordre technique liés au matériel, vous pouvez contacter notre SAV au 04.77.54.14.44

Pour des problèmes d'ordre pédagogique, vous pouvez contacter notre service technique au 04.77.54.86.00 ou au 04.77.54.08.82

Dans le cas d'un retour matériel, joindre la fiche de retour téléchargeable sur notre site Internet et nous renvoyer le produit dans son emballage d'origine. Dans le cas où vous n'auriez plus cet emballage, merci de le conditionner de telle manière qu'il ne puisse pas subir de dégradation jusqu'à son arrivée dans nos locaux (vous pouvez vous renseigner auprès de notre SAV pour convenir du type d'emballage).

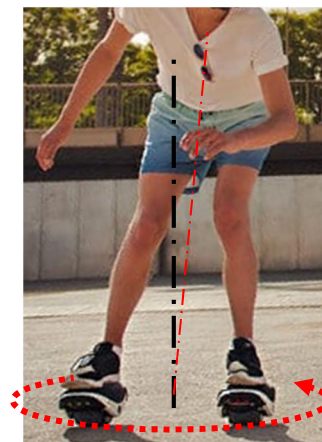


QU'EST-CE QU'UN GYROPATIN

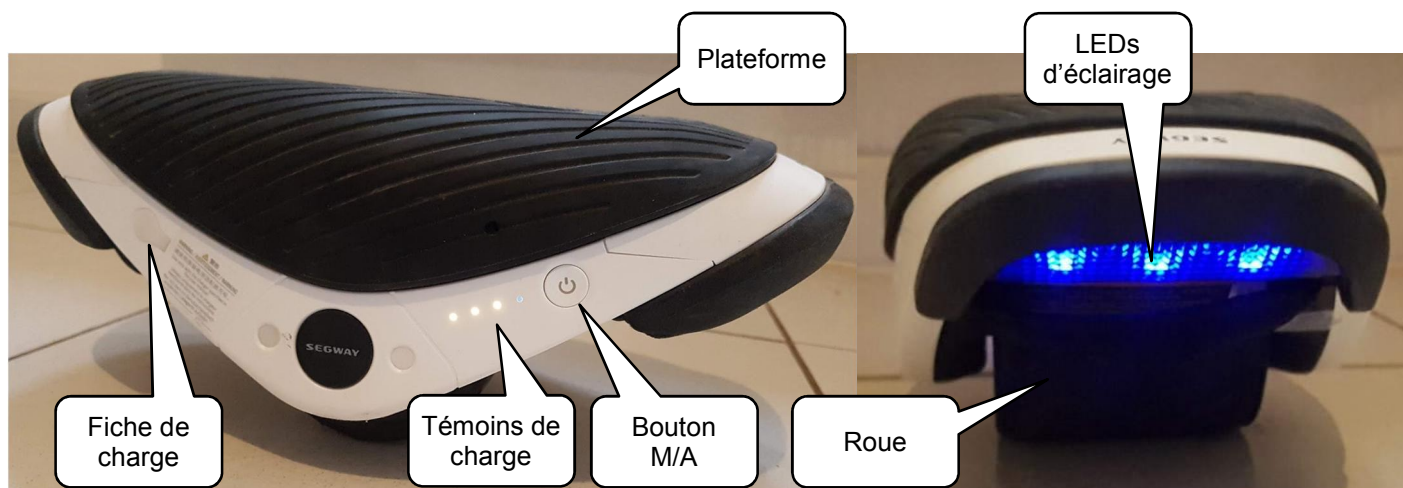
Un GyroPatin ou hovershoes est un patin à roulettes (roller) à une seule roue motorisée et autostabilisée. Comme pour un patin à roulettes les Drifts s'utilisent par paire, un pour chaque pied. L'utilisation est très intuitive bien que non exempte de risque et la stabilisation très performante permet de maintenir l'utilisateur en position normalement verticale.

Pour contrôler le mouvement, l'utilisateur doit :

- Se pencher en avant pour avancer ; ou freiner pendant une marche arrière
- Se pencher en arrière pour reculer ; ou freiner pendant une marche avant
- La prise de virage se fait assez naturellement en penchant différemment chacun des 2 patins.



L'ARCHITECTURE EXTERNE



LES CARACTERISTIQUES TECHNIQUES D'UN GYROPATIN

- Batterie : 22,2V 2000mAh 44.4Wh
- Masse : 3,5 Kg
- V_{max} : 12 km/h
- Puissance : 37,5 W
- Autonomie : 45 minutes
- $Pente_{max}$: 10°
- $Charge_{max}$: 50 Kg (pour un patin, 100 Kg pour les 2)
- ϕ_{roues} : 89 mm
- Temps de charge : 2 à 3h (alim DC : 25V 1.5 A)
- Autonomie : 45 minutes
- Moteurs : Type Brushless (14 Poles)
- Puissance : 37,5 W
- Dimensions : 291 x 162 x 121



DU GYROSKATE à l'HOVERSHOES, une histoire d'évolutions :

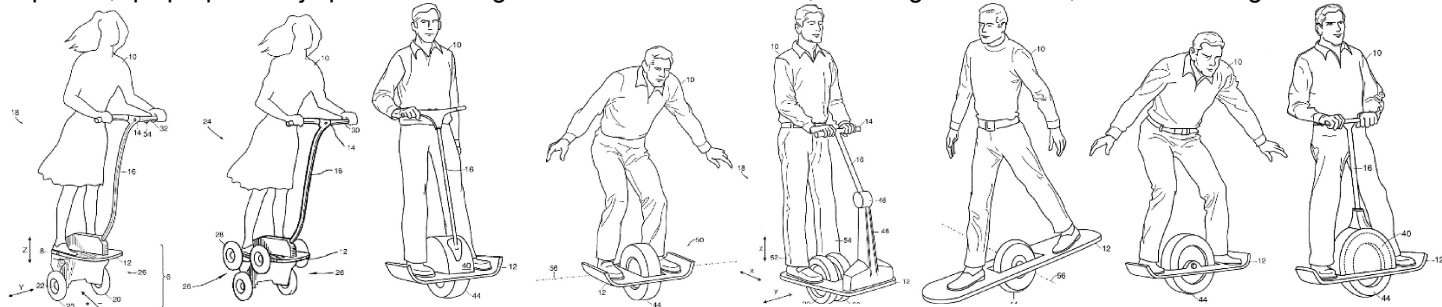
L'ORIGINE DES GYROSKATES

Les gyroskates et les hovershoes ne sont pas nés du jour au lendemain, sortis de l'imagination d'un inventeur fou mais sont plus précisément le résultat d'une évolution de moyens de transports personnels et sont issus de plusieurs sources d'inspirations et d'innovations scientifiques et technologiques.

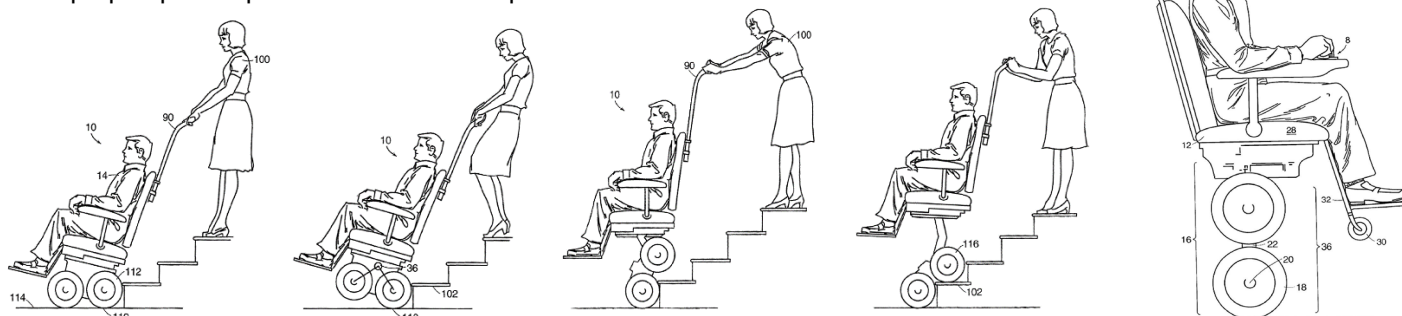
Nous vous présentons ici une explication non exhaustive des sources probables qui ont permis l'émergence de ces systèmes technologiques modernes.

Une recherche sur les bases de données de l'**INPI** permet de retrouver les origines des premiers brevets d'inventions qui parlent de d'auto-équilibrage (« self-balancing » ou « stable self-equilibrium ») de véhicule, de transporteurs personnels ou autre « Hoverboard ».

L'Inventeur du **Segway®** Dean Kamen dépose son premier brevet en 1993 correspondant à un engin motorisé auto-équilibré, qui propose déjà plusieurs designs sur une ou deux roues, de designs différents, avec ou sans guidon.



La légende dit que son inspiration viendrait de l'observation de la difficulté du franchissement d'un trottoir par une personne en fauteuil roulant. A ce propos on retrouve un autre brevet de la même époque qui évoque un fauteuil roulant permettant de franchir des escaliers.



LA NECESSITE DE L'EQUILIBRE



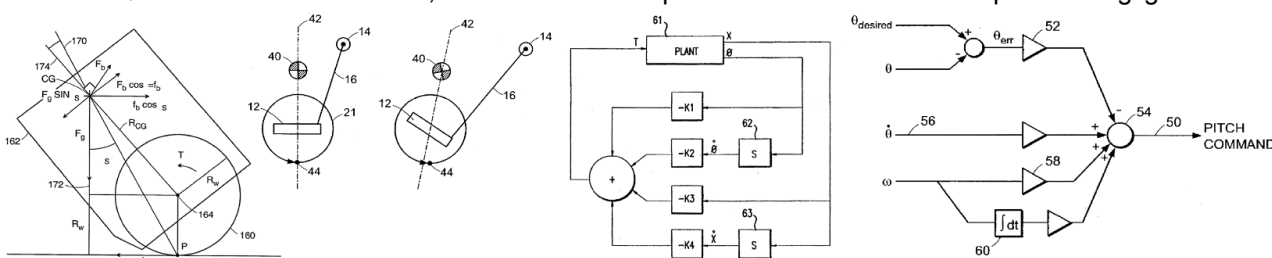
A la manière d'un monocycle, le principe de fonctionnement nécessite de maintenir un équilibre avant / arrière qui requière un temps de réaction très rapide et une sensibilité à l'inclinaison des plus précise.

Là où un être humain est capable du mieux, une machine nécessitera des performances optimales pour atteindre un niveau de stabilité acceptable.

L'invention de Dean Kamen mentionne déjà en 1993 le principe de l'**asservissement**, de la **stabilisation gyroscopique** d'un « **pendule inversé** ».

Cet asservissement nécessite d'une part de connaître précisément l'inclinaison de la plateforme à stabiliser mais aussi le déplacement de cette plateforme par rapport au sol.

Quant à sa mise en œuvre, elle demande une puissance de calcul numérique non négligeable.



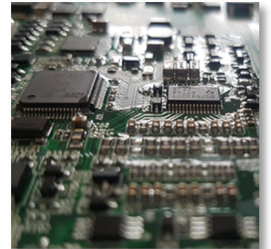


UN CONCENTRE DE SCIENCES ET DE TECHNOLOGIES

L'émergence de ce type de produit a donc pu être envisageable grâce aux innovations technologiques incrémentales autant en matière d'électronique embarquée, de motorisation électrique que de stockage de l'énergie électrique.

On peut citer par exemple :

- L'accroissement progressif de la puissance de calcul des microprocesseurs qui a permis une régulation de l'asservissement suffisamment rapide pour ce type d'application.
- La conception et la miniaturisation des microsystèmes électromécaniques (mems) a permis de développer des composants permettant une acquisition précise des inclinaisons.
- Le développement de systèmes de pilotage des moteurs « numériques » (BLDC) a permis leur expansion rapide.
- Enfin les améliorations des accumulateurs électriques a permis de proposer des produits ayant une autonomie de moins en moins contraignante...





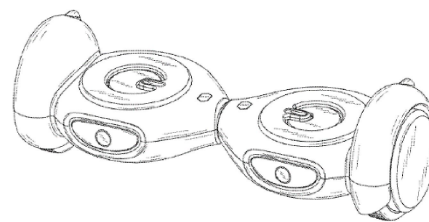
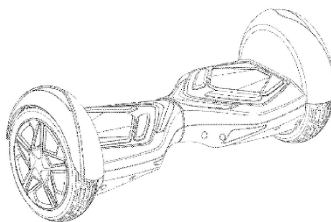
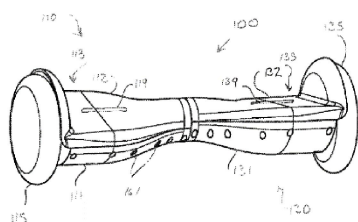
LA GUERRE DES BREVETS

Les premiers Segways sont présentés et commercialisés à partir de 2001 mais le terme générique « [Gyropode](#) » n'apparaît qu'en 2007.

Il faut attendre 2014 pour voir apparaître les premiers « [Gyroskates](#) » qui sont en réalité des « mini » gyropodes sans guidon.

Le premier brevet fut déposé par Shane Chen aux USA en 2012 puis commercialisé sous le nom de Hovertrax.

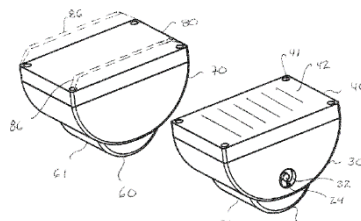
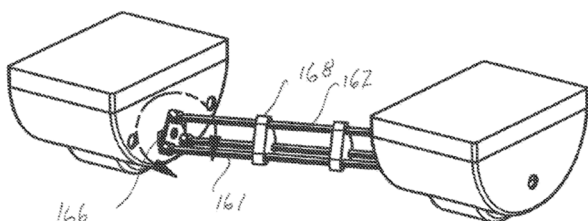
Mais les copies venues de chine ont rapidement eu plus de succès que l'original et une guerre des brevets fait rage depuis.



Les gyroskates sont donc commercialisés depuis, sous différentes marques, modèles, couleurs, options...

Les évolutions de ces transporteurs iront bon train ensuite en passant par la [Gyroroue](#) depuis 2005 et les dernières innovations de cette année 2019, viennent des « gyro-patins » appelées aussi hovershoes qui se présentent sous la forme de 2 « mini » plates formes autonomes qui accueillent chacune un pied de l'utilisateur.

Pour cette évolution aussi plusieurs brevets ont été déposés et 3 produits concurrents sont actuellement sur le marché qui rivalisent avec le modèle DRIFT de la marque Ninebot Segway.





LA DESCRIPTION FONCTIONNELLE SYSML

DIAGRAMME DE CAS D'UTILISATION.

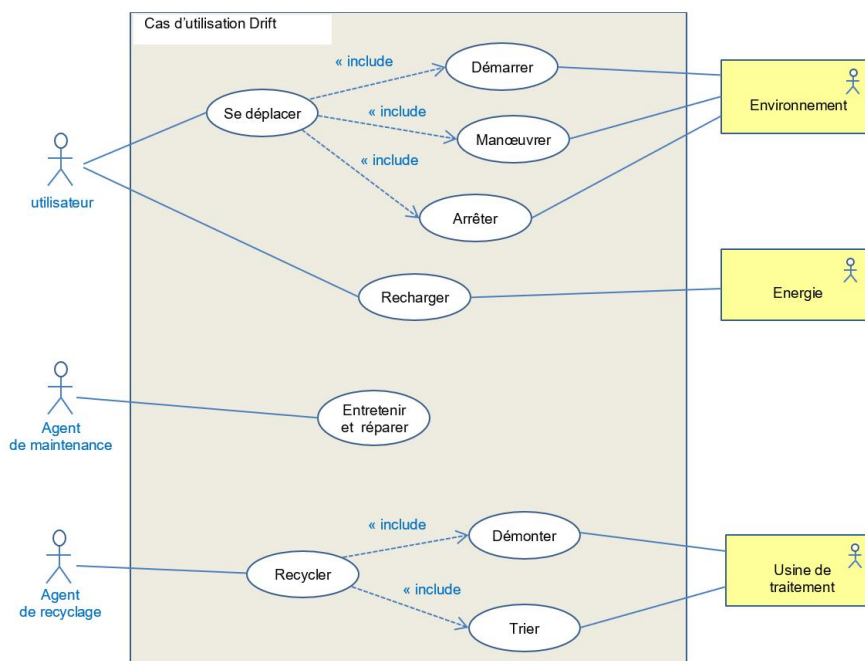


DIAGRAMME DE CONTEXTE

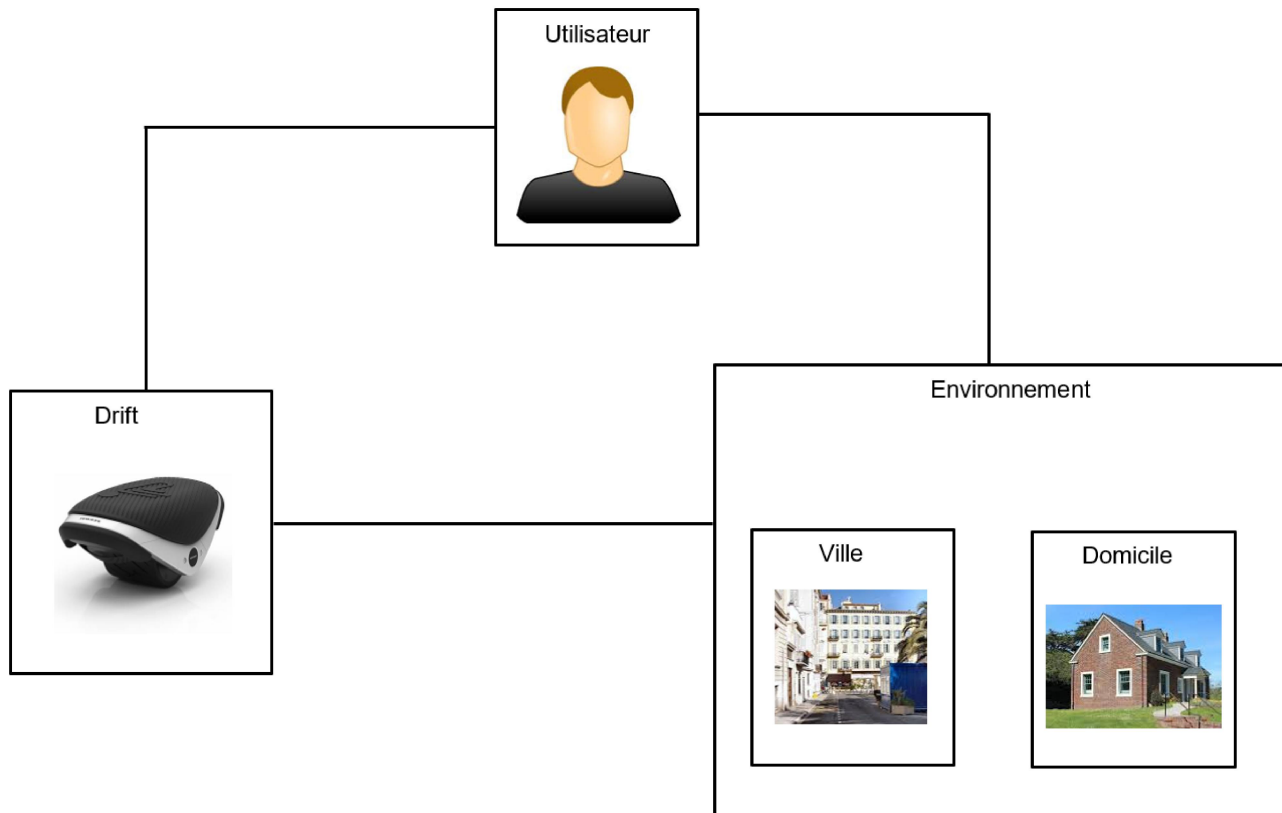




DIAGRAMME DES EXIGENCES

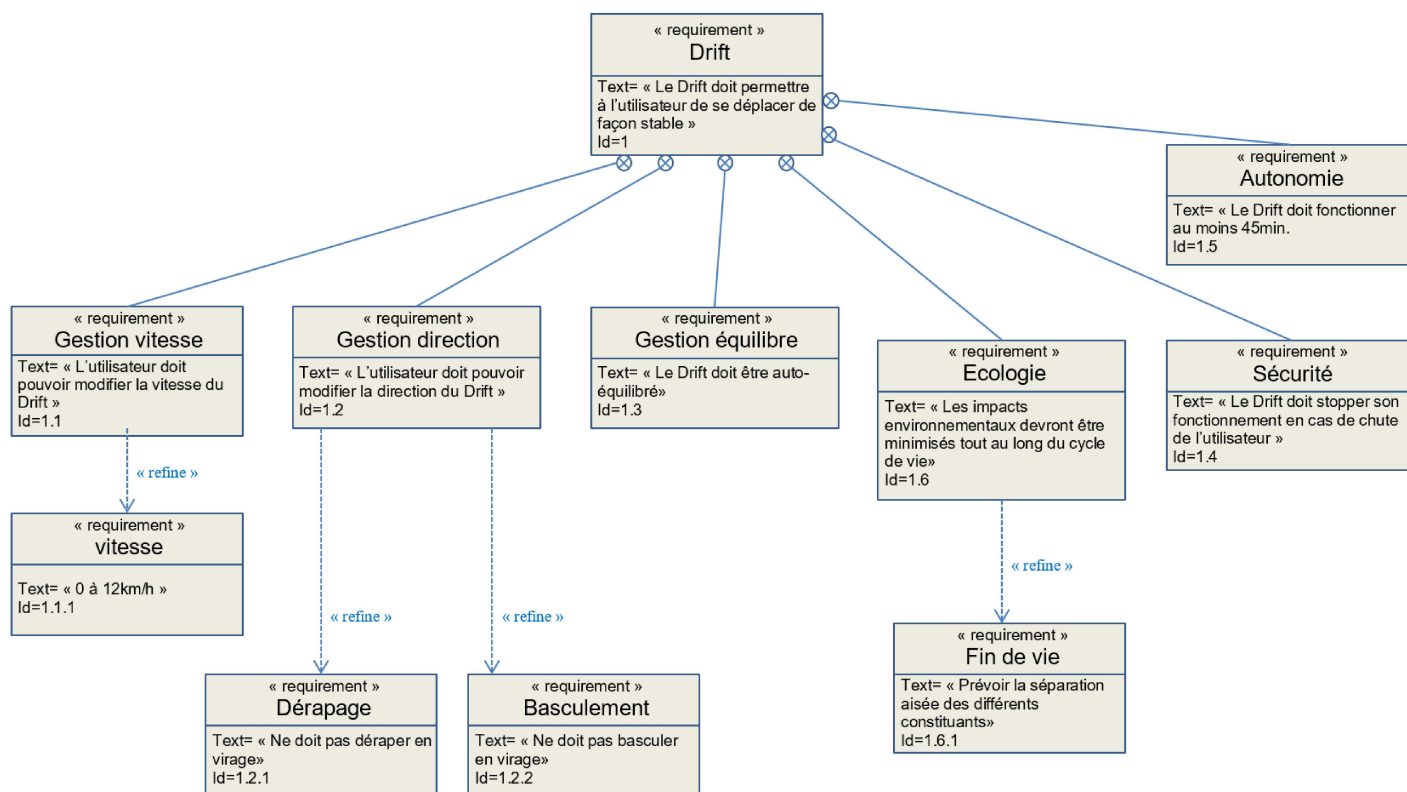


DIAGRAMME DE BLOCS

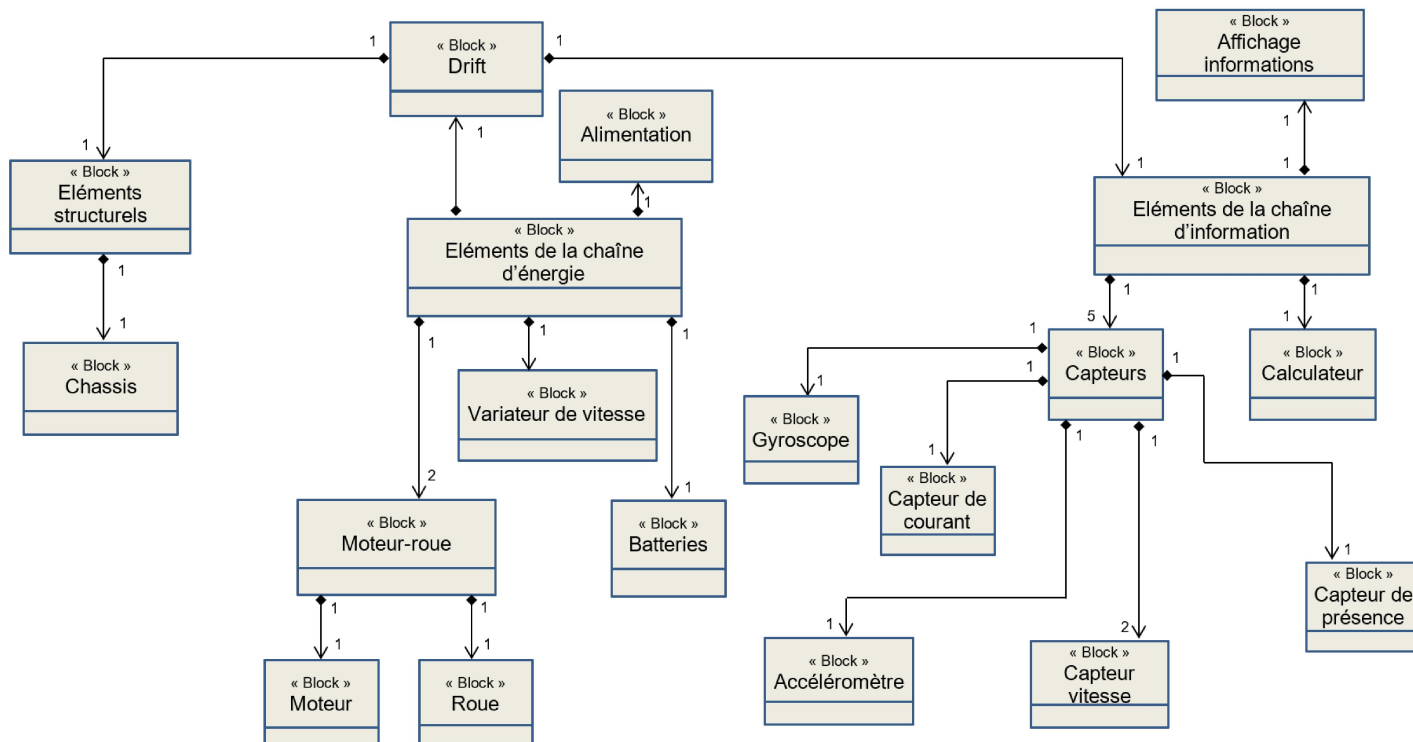




DIAGRAMME DE BLOCS DE LA CHAÎNE D'ÉNERGIE

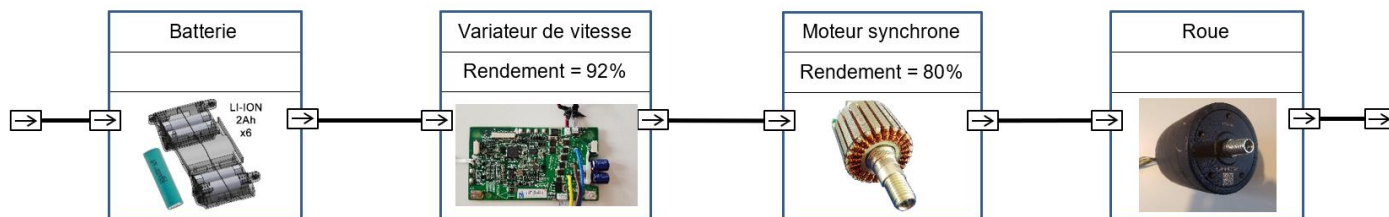
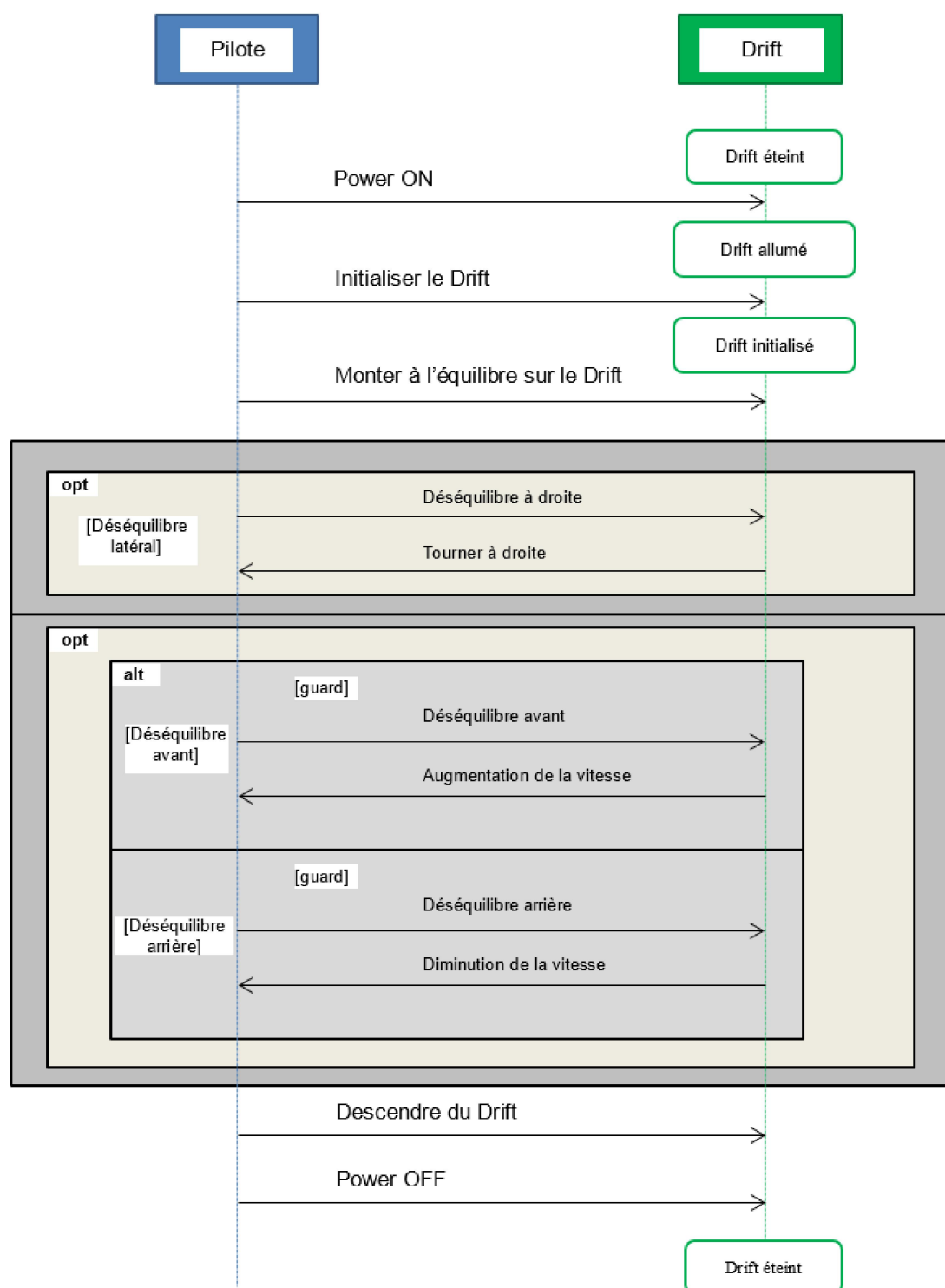


DIAGRAMME DE SEQUENCE « SE DEPLACER ».





L'ARCHITECTURE INTERNE :

Un module Drift est relativement simple et tout s'articule autour d'un châssis central qui intègre un module composé de 6 accus au Li-ion et un circuit intégré principal.

La roue s'intègre au centre du châssis.

LE CIRCUIT IMPRIME PRINCIPAL

Appelé aussi carte de contrôle ou carte mère il est relativement complexe de par la multiplicité des composants utilisés.

Cependant il peut être décomposé en plusieurs fonctions techniques :

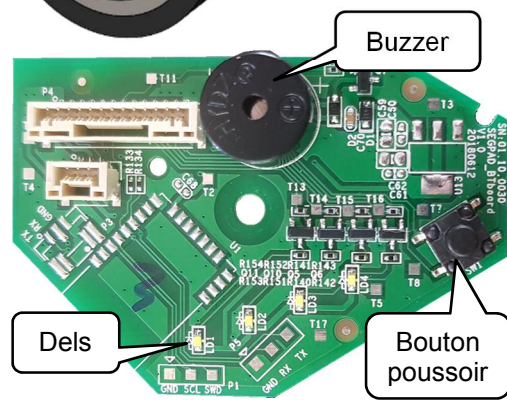
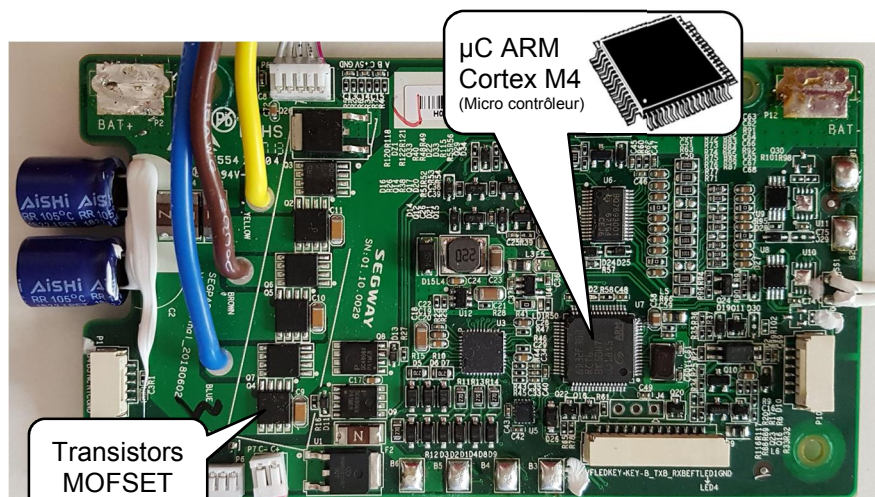
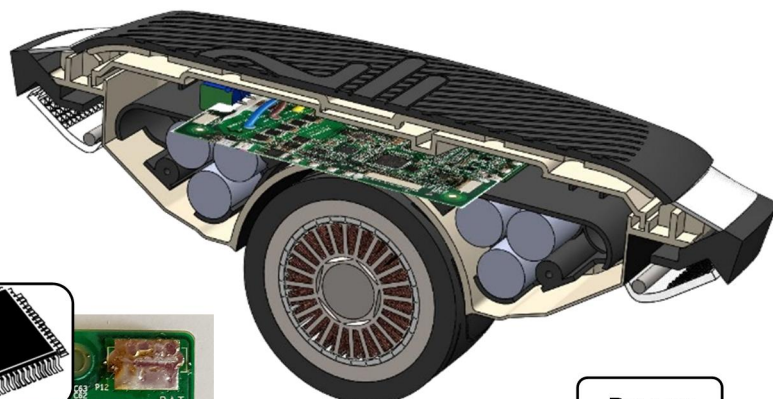
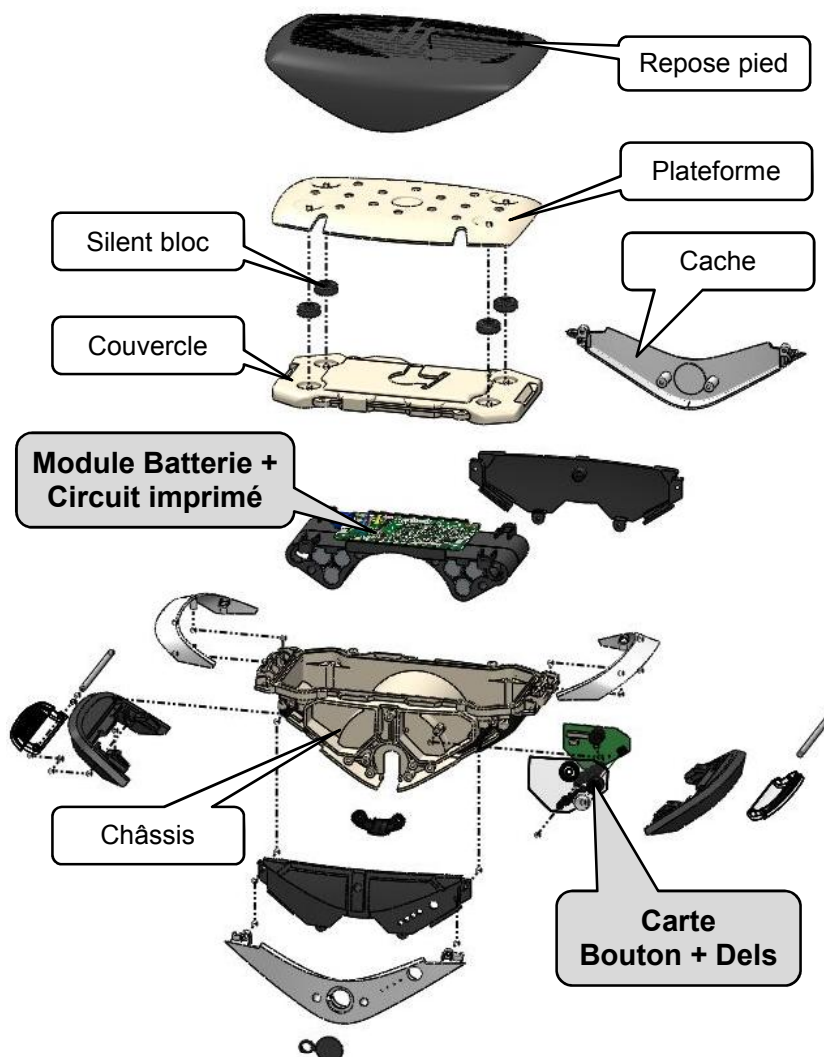
- TRAITER les informations venant des capteurs
- REGULER l'énergie envoyée aux moteurs
- GERER la recharge de la batterie

Le cerveau de la carte est un micro-contrôleur ARM GD32F303 de chez GigaDevice® 32 bits qui peut fonctionner à 120 MHz et dispose de nombreuses entrées / sorties de différents types (digitales, analogiques ou numériques).

La régulation des moteurs est assurée par l'intermédiaire de Transistors MOSFETs directement intégrés à cette carte (voir paragraphe concernant le moteur roue).

La gestion de la batterie est contrôlée par des circuits intégrés spécialisés (non détaillés dans ce dossier).

La communication avec l'utilisateur passe par un circuit intégré séparé qui intègre un bouton M/A, 4 témoins lumineux de charge ainsi qu'un buzzer.





LA MISE EN EQUATION

DEFINITION GEOMETRIQUE DE L'INCLINAISON

Du fait même de son architecture, la plateforme du transporteur personnel est instable et à tendance à s'incliner naturellement autour de l'axe de rotation de la roue, on parle de tangage.

On appelle l'angle de tangage θ , l'angle d'inclinaison d'avant en arrière de la plateforme (donc de la centrale inertielle) par rapport au sol.

Sur sol plat, le Roulis est nul.

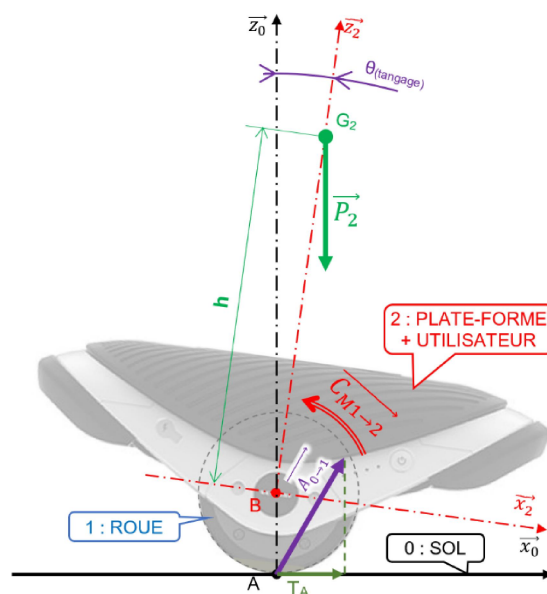


EQUATION MECANIQUE DU COUPLE MOTEUR

La modélisation d'un gyropode ou d'un DRIFT peut se simplifier sous la forme suivante :

- 0 : Sol
- 1 : Roue
- 2 : Ensemble Plateforme + utilisateur (considéré comme indéformable)
- m : masse de l'ensemble 2
- θ : angle de tangage du drift
- h : hauteur du centre de gravité avec l'utilisateur
- J_2 : Moment d'inertie de l'ensemble 2 autour de l'axe (B, $\vec{y}$). $J_2 = m \cdot h^2$
- α : angle de rotation propre de la roue
- R : rayon de la roue
- $\vec{C}_{M1 \rightarrow 2}$: Couple moteur (de la roue sur la plateforme)

En appliquant le théorème du moment dynamique autour de l'axe (B, $\vec{y}$), il est possible de démontrer que le couple moteur peut s'exprimer de manière simplifiée en fonction de :



- L'accélération angulaire $\ddot{\theta}$ d'inclinaison.
- L'angle d'inclinaison θ .
- L'accélération angulaire propre $\ddot{\alpha}$ (que l'on peut aussi noter $\dot{\Omega}$) de la roue.

$$\|\vec{C}_{M1 \rightarrow 2}\| = \underbrace{m \cdot h \cdot R \cdot \dot{\Omega}}_{\text{Fonction de l'accélération propre de rotation de la roue}} - \underbrace{m \cdot h^2 \cdot \ddot{\theta}}_{\text{Fonction de l'accélération d'inclinaison de l'ensemble}} - \underbrace{m \cdot h \cdot g \cdot \theta}_{\text{Fonction de l'inclinaison}}$$

EQUATION ELECTRIQUE DE LA TENSION DU MOTEUR

$$U_M = \frac{R_M}{K_C} (\cdot h \cdot R \cdot \dot{\Omega} - m \cdot h^2 \cdot \ddot{\theta} - m \cdot h \cdot g \cdot \gamma) + K_V \cdot \Omega$$

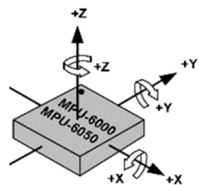
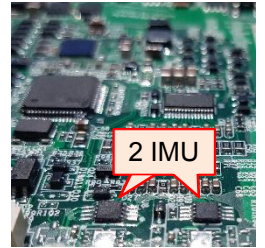
Avec : R_M : résistance de l'induit ; K_C : constante de couple du moteur, K_V : constante de couple vitesse et Ω : vitesse de rotation de la roue

Pour plus d'information voir le document « mise en équation »



LA CENTRALE INERTIELLE POUR MESURER L'INCLINAISON

Pour la détection de l'inclinaison, la carte électronique du DRIFT possède nécessairement au moins une centrale inertielle. L'ingénierie inverse n'a pas permis de définir le modèle de la centrale et 2 composants de la carte semblent dédiés à cette fonction. Il s'agit certainement de 2 centrales inertielles différentes redondantes afin de parfaire la sécurité en cas d'incident sur l'une d'elle.



Une centrale inertielle possède en réalité 2 capteurs distincts :

- Un accéléromètre qui permet de mesurer, en temps réel, les accélérations sur les 3 axes X, Y et Z.
- Un gyromètre qui permet de mesurer, en temps réel, les vitesses angulaires autour de chaque axe X, Y ou Z.

La mesure de l'inclinaison peut se faire avec l'un ou l'autre des capteurs par des méthodes différentes, chacun ayant des avantages et des inconvénients.

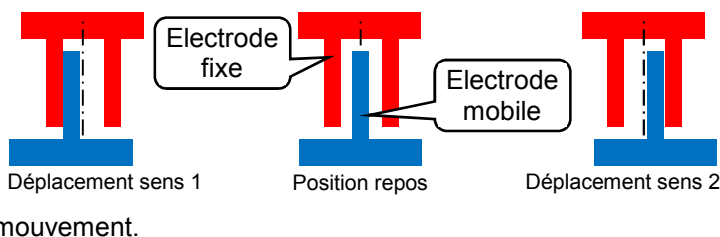
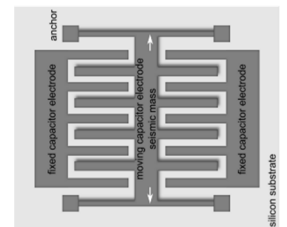
Pour optimiser la détection de l'inclinaison, il convient ensuite de fusionner les données des 2 capteurs.

Les explications ci-dessous présentent succinctement les méthodes de calcul de l'angle d'inclinaison d'une plateforme intégrant ce type de capteur.

COMMENT FONCTIONNE UNE CENTRALE INERTIELLE

Les circuits intégrés sont de type MEMS : microsystèmes électromécaniques, composants miniaturisés fabriqués à base de matériaux semi-conducteurs qui mesurent des déplacements de pièces mécaniques à une échelle micrométrique (10^{-3} mm).

Les mems sont composés généralement de 2 parties souvent en forme de peignes entremêlés dont l'une est fixe et l'autre peut se déplacer de manière élastique par rapport à la partie fixe.



Les « doigts » des peignes sont en réalité des électrodes électriques dont la variation de « capacitance » évolue en fonction de la distance entre les électrodes.

Pour l'accélération le principe repose sur la mesure du déplacement de l'électrode mobile lors d'une mise en mouvement.

En effet on peut considérer le peigne mobile comme une masse montée sur ressort :

Lors d'une accélération suivant un axe, l'inertie propre de l'électrode mobile fait qu'elle a tendance à rester dans sa position, si bien que :

- Pour une accélération positive le déplacement mesuré est négatif.
- Pour une accélération négative le déplacement mesuré est positif.

La mesure repose sur les lois de la dynamique (2^{ème} loi de Newton) :

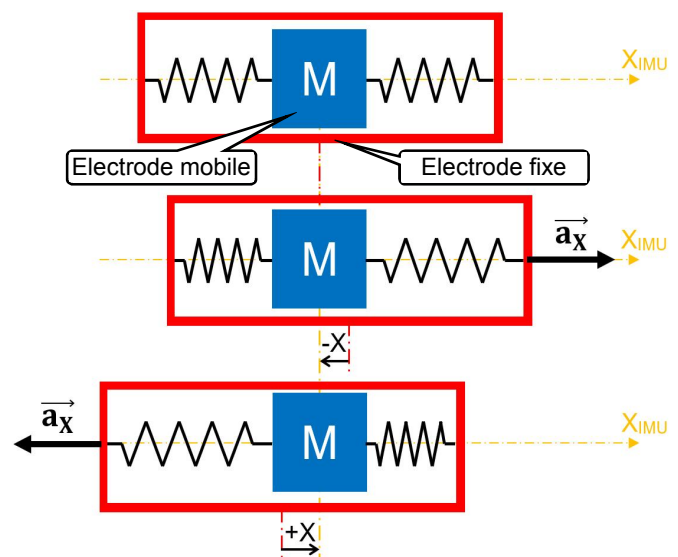
$$\sum \vec{F}_{\text{Ext}} = m \cdot \vec{a}$$

Pour un axe horizontal : $-F_{\text{RESSORT}} = m \cdot a_x$

Avec $F_{\text{RESSORT}} = K \cdot x$; K : raideur du ressort et m : masse

L'accélération est donc bien fonction du déplacement et de la raideur K du ressort :

$$a_x = \frac{-K \cdot x}{m}$$



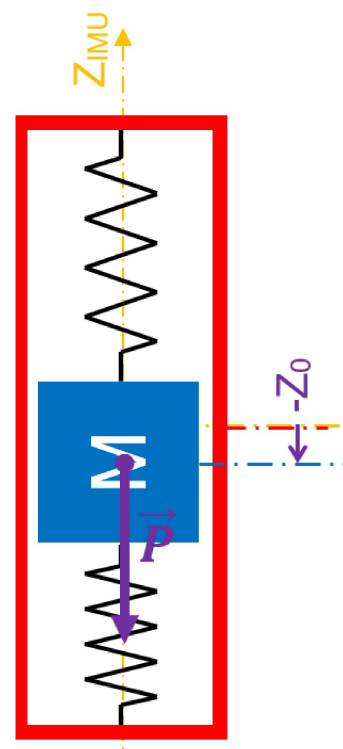


Pour l'accélération verticale, la gravité vient « perturber » la mesure puisque l'électrode mobile est naturellement décalée vers le bas au repos.

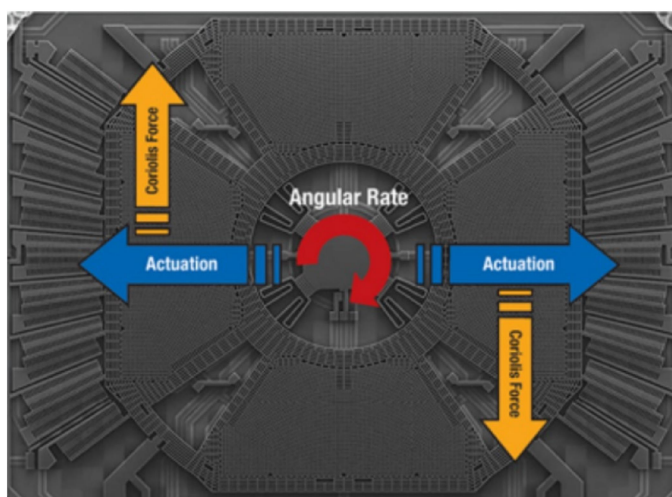
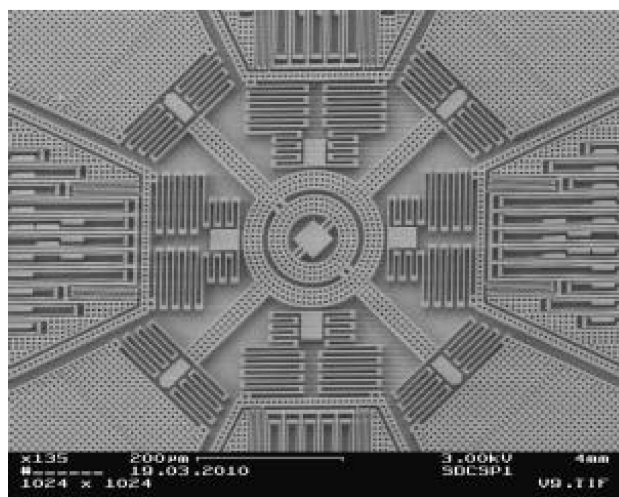
Ce décalage négatif Z_0 induit une valeur de mesure de l'accélération verticale POSITIVE correspondant à la valeur de l'accélération gravitationnelle.

C'est pour cette raison, qu'au repos, l'accéléromètre renvoie toujours une valeur d'1g (9.81 m/s²), **POSITIVE** et purement verticale.

Et c'est aussi grâce à ce phénomène qu'il est possible de retrouver des angles d'inclinaisons du capteur en Statique.



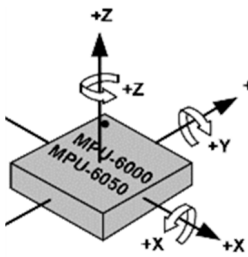
Pour le gyromètre le principe est un peu différent puisque la mesure de la vitesse de rotation est engendrée par des phénomènes vibratoires particuliers décrits par la « force de Coriolis » qui sont beaucoup plus complexes à comprendre et à analyser en pré-bac.



Agrandissement de l'élément sensible de la partie gyromètre d'une centrale inertielle (taille inférieure au mm)



CALCUL DE L'INCLINAISON AVEC L'ACCELEROMETRE



L'accéléromètre fournit 3 valeurs brutes correspondant aux composantes de l'accélération suivant les 3 axes du capteur qui peuvent être converties en m/s² ou en g en connaissant la sensibilité du capteur.

On peut définir les 3 composantes d'accélération dans le repère de la centrale.

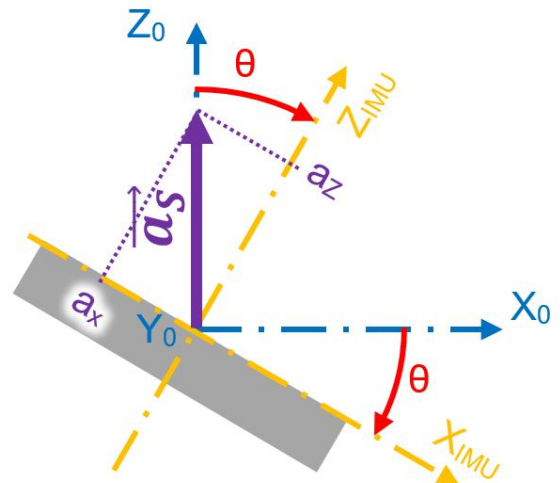
$$\overrightarrow{a_{IMU}} \begin{pmatrix} a_X \\ a_Y \\ a_Z \end{pmatrix} \quad \text{ou} \quad \overrightarrow{a_{IMU}} = a_X \cdot \overrightarrow{X_{IMU}} + a_Y \cdot \overrightarrow{Y_{IMU}} + a_Z \cdot \overrightarrow{Z_{IMU}}$$

En statique, de par son architecture le capteur mesure une accélération $\overrightarrow{a_s}$, image de l'accélération gravitationnelle donc verticale mais de composante positive.

Elle peut se définir dans le repère lié à la terre :

$$\overrightarrow{a_s} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ +\|\vec{g}\| \end{pmatrix} \quad \text{ou} \quad \overrightarrow{a_s} = +\|\vec{g}\| \cdot \overrightarrow{Z_0}$$

Lorsque le capteur est parfaitement horizontal, seule la composante a_Z mesure l'opposée de la gravité (1g), les composantes a_X et a_Y sont alors nulles.



Quand le capteur s'incline, les composantes sont modifiées si bien qu'il devient possible de les utiliser pour en déduire l'inclinaison du capteur.

L'expression algébrique des composantes sont les suivantes :

$$a_X = -\|\vec{g}\| \cdot \sin \theta \quad \text{et} \quad a_Z = \|\vec{g}\| \cdot \cos \theta$$

Il est donc possible de définir 2 équations différentes de l'angle θ :

$$\theta = \arcsin\left(\frac{a_X}{\|\vec{g}\|}\right)$$

ou

$$\theta = \arccos\left(\frac{-a_Z}{\|\vec{g}\|}\right)$$

Pour information, $\|\vec{g}\| = 1$ mais peut aussi se calculer avec $\|\vec{g}\| = \sqrt{a_X^2 + a_Y^2 + a_Z^2}$

Il est aussi possible de calculer l'angle avec l'arc tangente en combinant les 2 équations ce qui est souvent préférable pour des questions de validités des calculs :

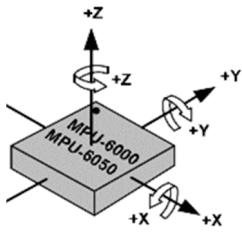
$$\frac{\sin \theta}{\cos \theta} = -\frac{a_X}{a_Z} = \tan \alpha$$

$$\theta = \arctan\left(-\frac{a_X}{a_Z}\right)$$

Le calcul de l'angle est alors facilement intégrable dans la programmation.



CALCUL DE L'INCLINAISON AVEC LE GYROMETRE



Le gyromètre fournit 3 valeurs brutes correspondant aux vitesses de rotation angulaires autour des 3 axes du capteur qui peuvent être converties en deg/s connaissant la sensibilité du capteur.

Dans notre cas seule la vitesse de rotation ω_Y autour de l'axe Y sera utile et il convient de pouvoir calculer l'angle θ à partir de cette vitesse.

Par définition la vitesse instantanée $\omega_Z(t)$ est la dérivée de la variation angulaire $\theta(t)$ sur un intervalle de temps.

Connaissant cette vitesse de rotation entre 2 instants t_0 et t_1 , il est donc possible de calculer la variation angulaire $\varphi_{0 \rightarrow 1}$:

$$\omega_Y(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \rightarrow \theta_{0 \rightarrow 1} = \int_{t_0}^{t_1} \omega_Y(t) \cdot dt$$

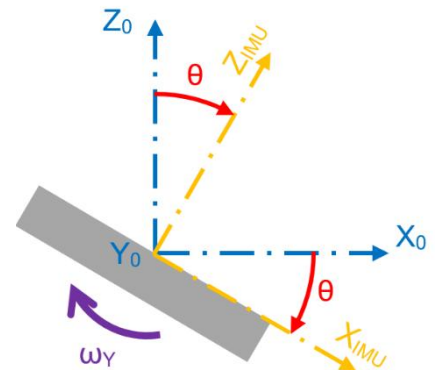
Pour le calcul il est donc important de définir un intervalle de temps $\Delta t = (t_1 - t_0)$ relativement petit pour que la vitesse n'ait pas le temps de trop varier dans cet intervalle.

Pour une application numérique, le calcul intégral peut être simplifié par un calcul de somme des variations angulaires au cours du temps :

$$\theta = \sum \omega_Y \cdot \Delta t$$

ou

$$\theta = \theta + \omega_Y \cdot \Delta t$$





FUSION DES MESURES ANGULAIRES

Chaque valeur d'angle calculée à partir de l'accéléromètre ou du gyromètre présente des inconvénients qu'il conviendra de découvrir dans les activités dédiées.

La mesure d'orientation d'un objet à partir de valeurs "imprécises" ou « bruitées » est connue sous le nom de "Problème de WAHBA" depuis les années 60. De nombreux travaux de recherche ont permis de mettre au point différents algorithmes pour tenter d'y répondre.

Parmi les plus connus, on trouve les méthodes de TRIAD, la q-Method, les algorithmes QUEST ou FQA...

La plus utilisée reste tout de même celle du FILTRE DE KALMAN dont il existe plusieurs variantes mais nécessitent un traitement numérique assez « lourd ».

Tous ces algorithmes possèdent des degrés de complexités importants et sont difficilement compatibles avec une utilisation dans un microcontrôleur aux performances limitées.

Plus récemment, Sebastien Madgwick a mis à disposition un travail de recherche « [An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays](#) » que l'on retrouve sous le nom [d'algorithme AHRS de Madgwick](#) proposé sous la forme d'une bibliothèque Arduino sur le site Github.

AHRS qui signifie Attitude Heading Reference System est l'acronyme anglais décrivant les centrales inertielles modernes utilisées pour le contrôle d'orientation utilisés pour les drones, l'aviation, les satellites mais aussi les gyropodes.

Pour la fusion des données il existe aussi un filtre simplifié appelé "COMPLEMENTAIRE" qui fusionne les 2 angles par le calcul suivant :

$$\theta_{fusionné} = K \cdot \theta_{gyromètre} + (1 - K) \cdot \theta_{accéléromètre}$$

Dans la bibliographie, il est souvent conseillé d'utiliser un coefficient α compris entre 96% et 99%.

Ce calcul correspond théoriquement à un filtrage fréquentiel numérique de type RIF ([Filtre à réponse impulsionnelle finie](#)) de premier ordre.

En effet ce type de filtrage numérique échantillonné peut se calculer à chaque échantillon n par une équation d'ordre N avec des coefficients de gains k_i .

$$\theta_n = k_0 \cdot \theta_{mesuré} + k_1 \cdot \theta_{n-1} + k_2 \cdot \theta_{n-2} + \dots + k_N \cdot \theta_{n-N}$$

L'application de la formule du gain complémentaire correspondrait donc à un filtrage numérique d'ordre 1 où ne sont prises en compte que les valeurs mesurées pour l'échantillon n et pas les valeurs précédentes !

Il s'agit donc d'un filtre numérique très simplifié de type **PASSE HAUT** pour le gyromètre et de type **PASSE BAS** pour l'accéléromètre dont les 2 fréquences de coupure sont identiques.

Le coefficient α peut être défini par la formule suivante : $\alpha = \frac{\tau}{\tau + \Delta t}$ donnant une valeur entre 0 et 1.

$$\Delta t : \text{période d'échantillonnage } \Delta t = \frac{1}{f_{ech}}$$

$$\tau : \text{Constante de temps du filtre } \tau = \frac{1}{2\pi f_c} \quad \text{avec } f_c : \text{fréquence de coupure}$$

La fréquence de coupure doit être inférieure à celle du bruit de l'accéléromètre.

Il est aussi possible de calculer le coefficient α à partir des fréquences : $\alpha = \frac{f_{ech}}{f_{ech} + 2\pi f_c}$

Exemples :

- Avec une fréquence d'échantillonnage $f_{ech} = 50$ Hz et une fréquence de coupure $f_c = 0,5$ Hz, $\alpha = 0,94$ (94%).
- Avec une fréquence d'échantillonnage $f_{ech} = 250$ Hz et une fréquence de coupure $f_c = 0,5$ Hz, $\alpha = 0,987$ (99%).



LE MOTEUR ROUE ET SA VARIATION DE VITESSE

Chaque plateforme est équipée d'un moteur roue dont le Stator (partie fixe) est lié à la plateforme et le rotor est lié au pneumatique.

Ce type de moteur appelé parfois moteur numérique pour le grand public est en réalité une **MACHINE SYNCHRONE** ou moteur BLDC (BrushLess Direct Current - moteur sans balai à commande en créneau).

Contrairement aux moteurs à courant continu, c'est le stator qui est bobiné et le rotor qui est équipé d'aimants permanents.

Dans les moteurs roues, le stator est au centre et le rotor en périphérie.

Les 24 bobines du stator sont réparties angulairement et montées en séries de 3 bobines.

Le rotor quant à lui, possède 28 aimants permanents montés en opposition et en alternance correspondant à **14 paires de pôle**.

Comme dans tout moteur le but étant d'utiliser les principes électromagnétiques pour créer un **couple** entre le stator et le rotor suffisant pour entrainer le moteur et une charge.

La distribution (ou modulation) de l'énergie au moteur doit être régulée précisément pour contrôler sa vitesse.

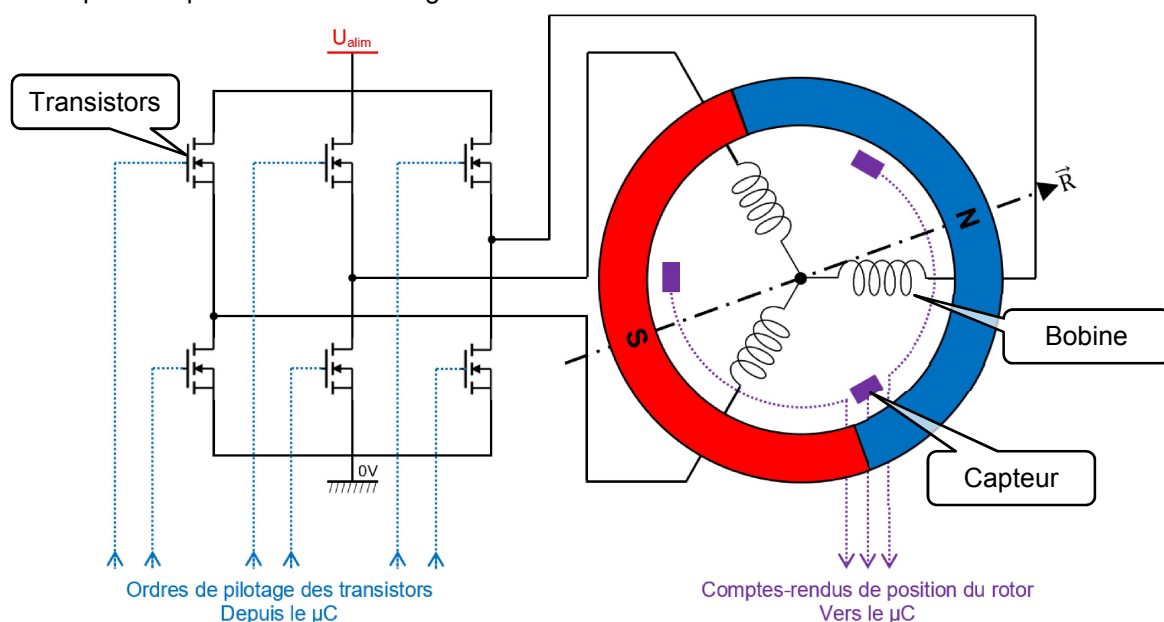
C'est le microcontrôleur qui se charge d'envoyer les ordres à 6 transistors de puissance (MOSFET) qui sont directement intégrés au circuit imprimé principal.

Pour finir le moteur est aussi équipé de 3 capteurs à effet hall qui servent à détecter les champs magnétiques permanents des aimants du rotor et qui renvoient en temps réel des comptes rendus au microcontrôleur.



LE PRINCIPE SIMPLIFIE DE FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR BLDC

Le principe de fonctionnement peut être décrit assez simplement en limitant le stator à 3 bobines réparties à 120° et le rotor à une seule paire de pôle comme sur la figure ci-dessous.



Les 3 bobines sont reliées en « étoile » ce qui « couple » naturellement 2 bobines en série entre chaque phase qui sont elles-mêmes reliées à un couple de transistors alimentés par la batterie.

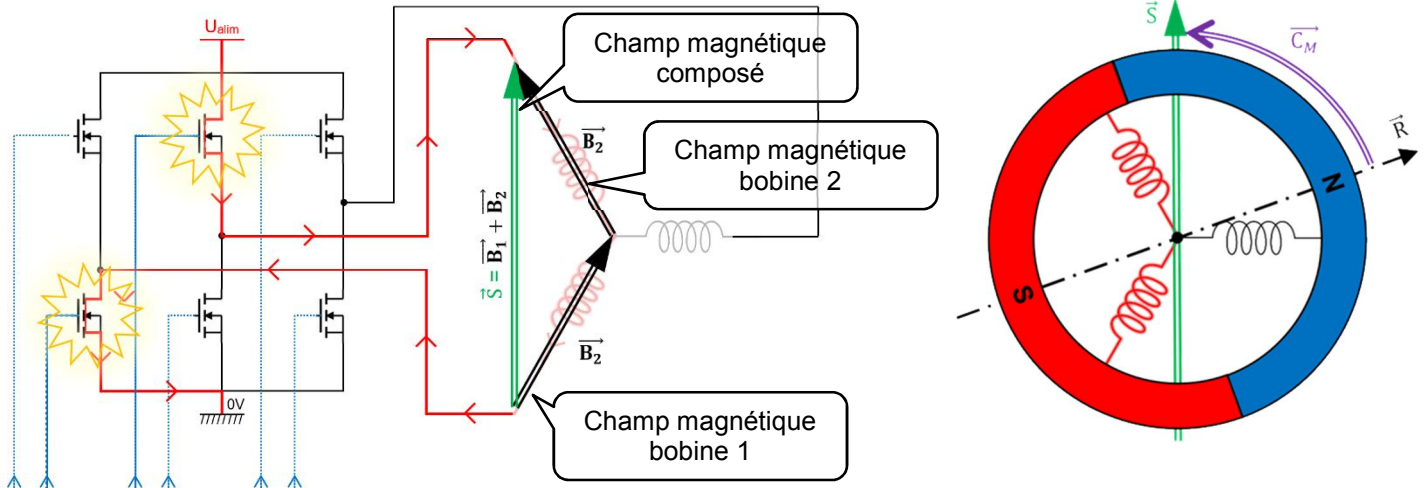


Les transistors ne sont passant (saturés) qu'à la réception d'un ordre venant du micro-contrôleur.

LE CHAMP TOURNANT

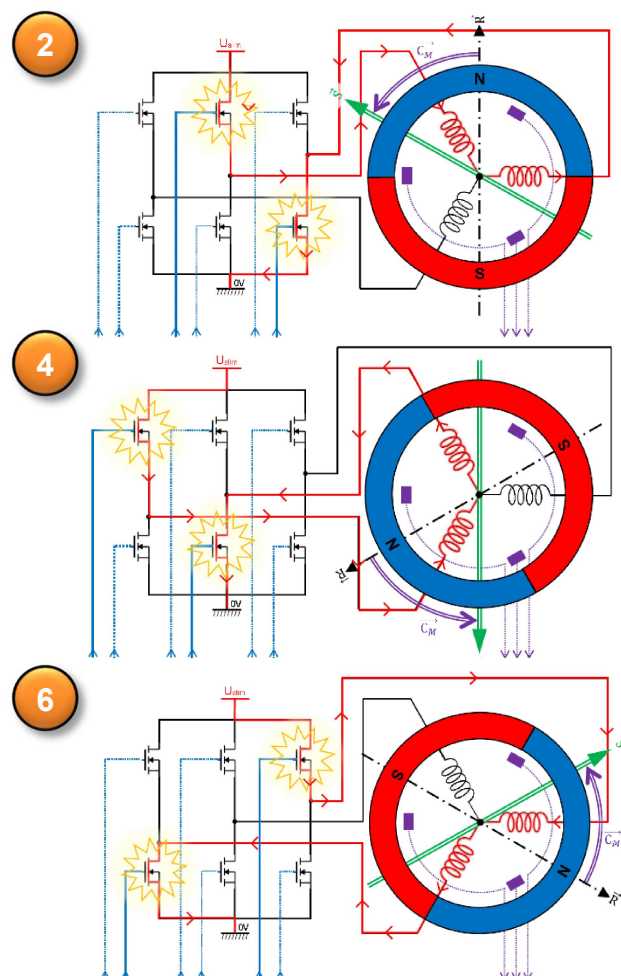
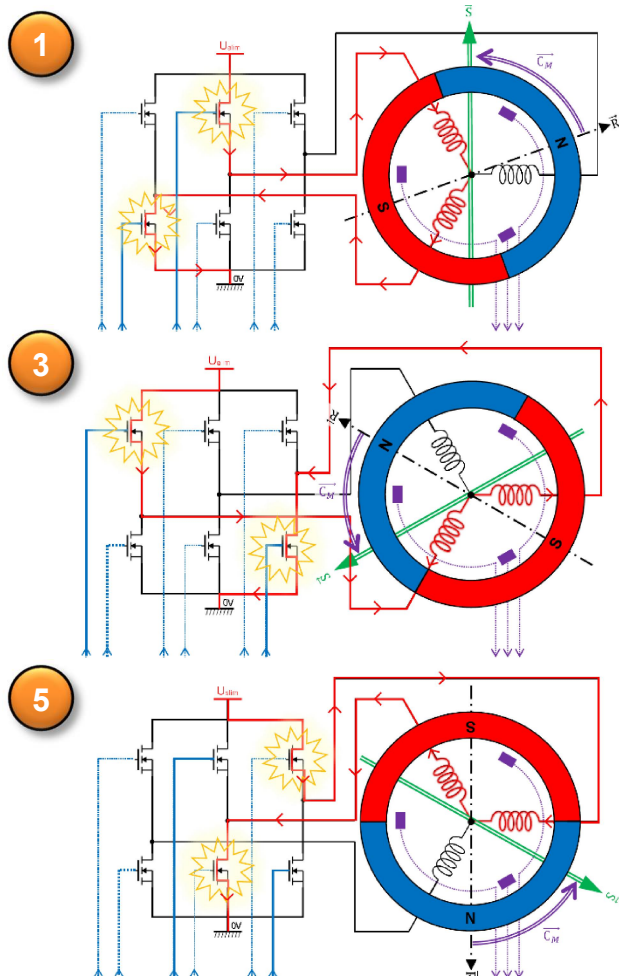
Le principe de pilotage du moteur repose sur l'alimentation alternative des bobines afin de créer un CHAMP MAGNETIQUE TOURNANT.

Lorsque l'alimentation est connectée à 2 des phases, le champ magnétique du stator $\vec{S}$ créé est donc une composition des champs de chaque bobine $\vec{B}_1$ et $\vec{B}_2$.



Le décalage angulaire entre le champ électromagnétique du rotor $\vec{S}$ et le champ magnétique permanent du rotor $\vec{R}$ créé donc un couple moteur $\vec{C}_m$ qui entraine ce dernier.

La difficulté réside dans le pilotage séquentiel d'un couple de transistors dans un ordre bien précis pour que la rotation du champ soit régulière et dans le bon sens.





PILOTAGE MLI (SIGNAL SINUSOIDAL A FREQUENCE VARIABLE)

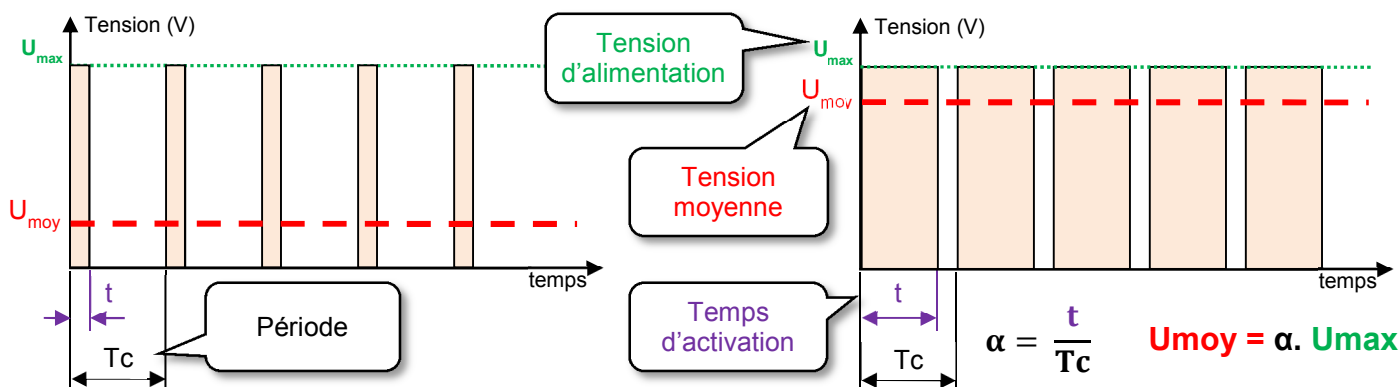
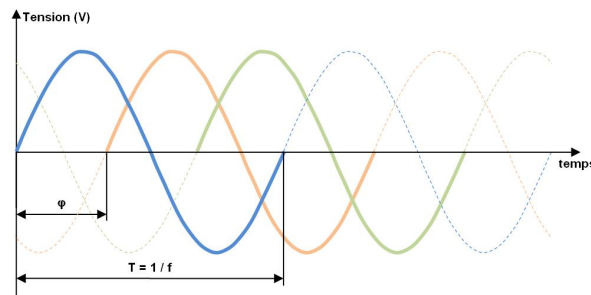
Le principe présenté précédemment est très largement simplifié.

En effet la commutation sur uniquement 6 phases par tours ne permet pas un pilotage précis et présente un risque important de **décrochage** pour lequel le rotor ne pourra plus suivre le champ tournant et restera donc bloqué.

Un moteur synchrone, est un moteur « triphasé », et devrait donc être piloté avec un courant triphasé sinusoïdal.

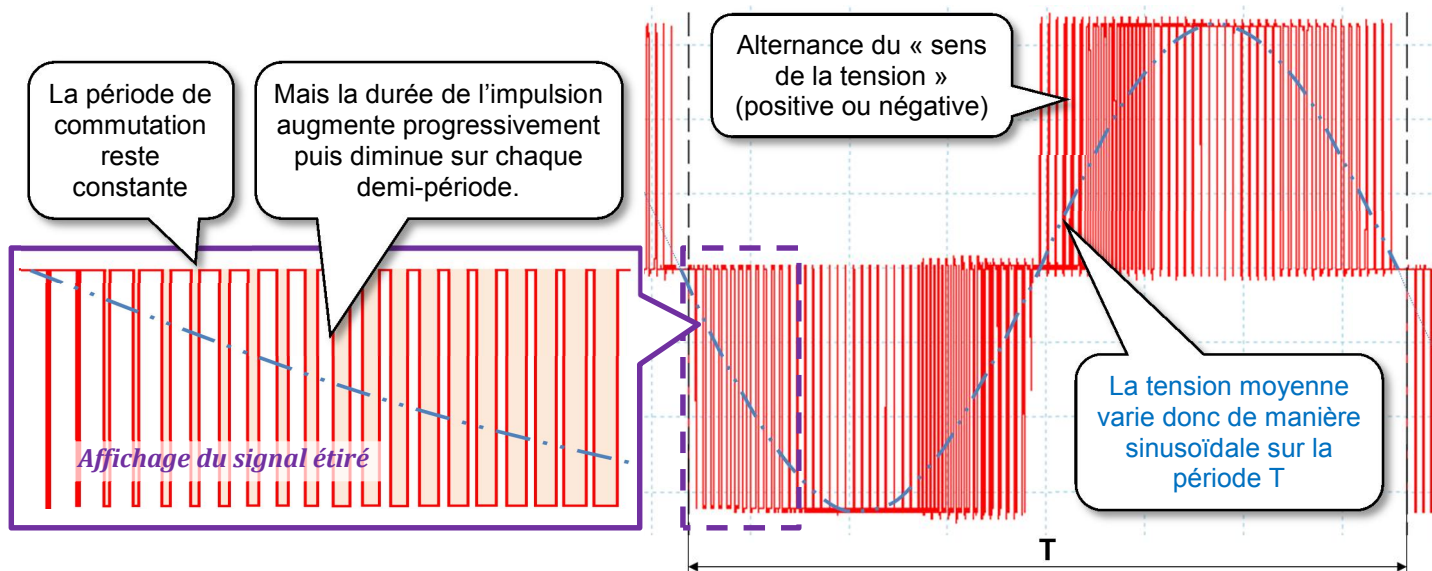
Le problème vient de la difficulté de générer un courant triphasé à **fréquence variable** puisque c'est cette fréquence qui va agir sur la vitesse de rotation de la roue.

La solution consiste à utiliser un signal de MODULATION DE LARGEUR D'IMPLUSION qui est un signal TOUT OU RIEN périodique (rectangulaire) dont le temps d'activation est variable sur la période du signal.



Ce type de signal fait varier la tension moyenne en fonction du rapport cyclique α et un microcontrôleur est capable de générer très facilement ce genre de signal.

Pour recréer une tension sinusoïdale, il faut faire varier en permanence la largeur d'impulsion afin que la tension moyenne suive ce type de variation. Et d'inverser la polarité toutes les demi-périodes afin d'avoir une tension alternative.



Ce type de signal est maintenant généralisé dans tous les variateurs de moteurs Synchrones ou Asynchrones mais aussi pour de nombreuses autres applications comme les onduleurs.

Pour autant sa génération n'est pas simple et ne fera pas l'objet d'étude dans cette mallette.



NECESSITE D'UN ASSERVISSEMENT DE LA VITESSE DU MOTEUR

En conclusion, le pilotage d'un moteur BLDC nécessite que le microcontrôleur génère 3 signaux MLI, de largeur d'impulsion variant en permanence, et déphasés du 1/3 de la période.

Le tout doit être synchronisé précisément pour l'activation des 6 transistors, avec une fréquence nécessairement variable afin de contrôler en temps réel la vitesse du moteur...

Mais la difficulté augmente encore aux vues des problèmes de décrochage, surtout en cas de forts couples.

Une solution courante consiste à implanter des capteurs à effet hall pour ajuster précisément les signaux envoyés en fonction de la position ou de la vitesse de la roue.

Les capteurs sont intégrés par 3, répartis angulairement à intervalle régulier et détectent le champ magnétique des aimants du stator. Chaque capteur génère donc un signal périodique carré dont la fréquence est proportionnelle à la fréquence de rotation de la roue.

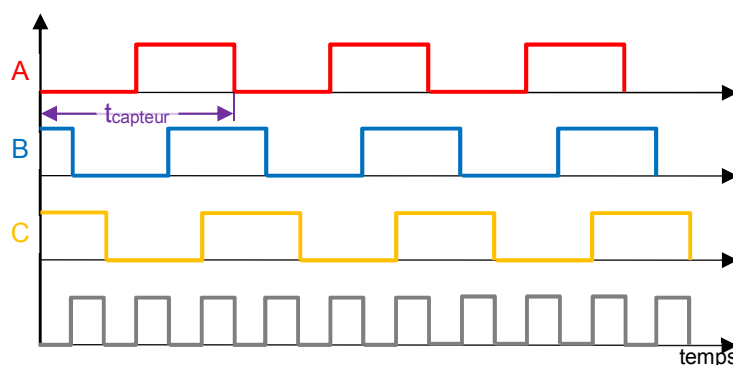
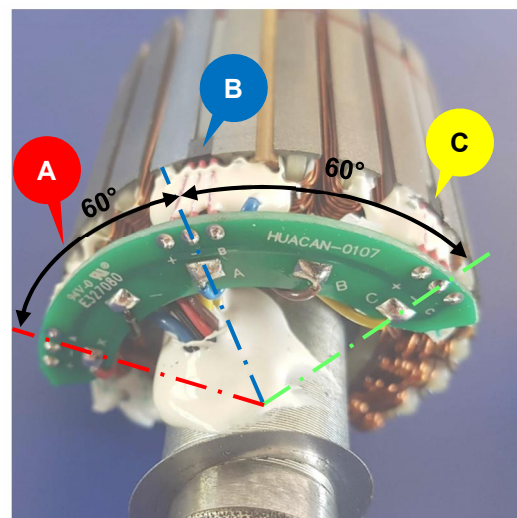
Chaque capteur sera « activé » puis « désactivé » à chaque changement de polarité d'un aimant qui passe à proximité.

Avec un rotor à 14 paires de pôles, un capteur produira donc un signal de 30 changements d'état par tour ce qui permet de calculer aisément la fréquence propre de la roue connaissant la fréquence de changement d'état d'un capteur.

De plus, du fait de l'écartement angulaire de 60°, les 3 capteurs seront nécessairement activés successivement les 3 signaux sont donc déphasés ce qui permet de vérifier, en plus, le sens de rotation du rotor.

En utilisant la combinaison des 3 capteurs il est aussi possible d'augmenter la sensibilité du codage de la rotation pour une meilleure précision.

C'est donc grâce à ces capteurs de position que le microcontrôleur pourra asservir le moteur en vitesse (voire en position) pour parfaire le pilotage du moteur.



POUR EN SAVOIR PLUS SUR LES MOTEURS BLDC

Les recueils de connaissances et la bibliographie concernant les machines synchrones et les moteurs brushless est dense. Pour approfondir les connaissances sur ces moteurs nous proposons aussi la lecture de ces documents :

MDP moteur : [Technologie Brushless \(BDLC\)](#)

FARNELL : [Moteur DC sans balais](#)

EDUSCOL : [Présentation du moteur brushless](#)