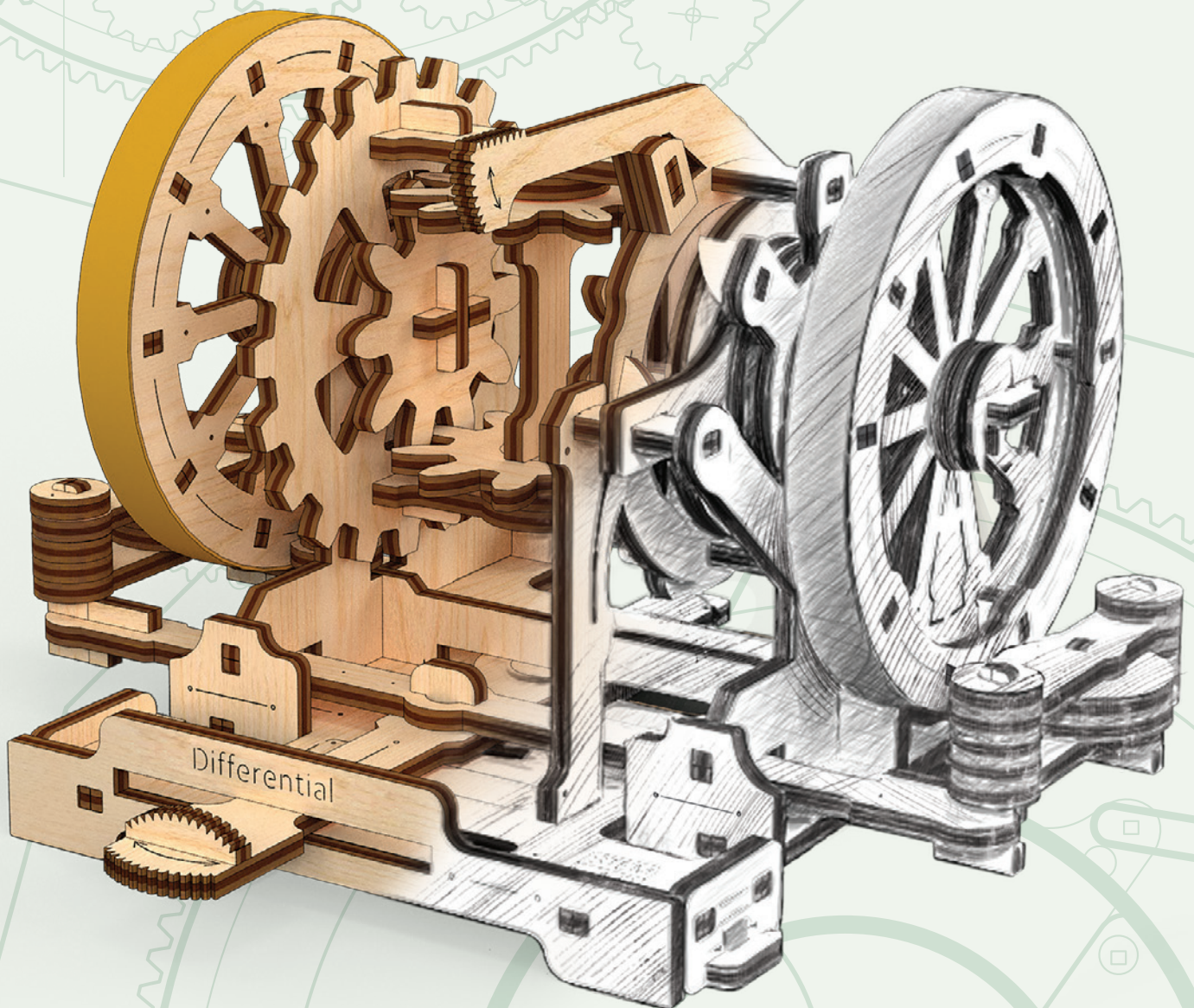


MAQUETTE MÉCANIQUE

LE DIFFÉRENTIEL

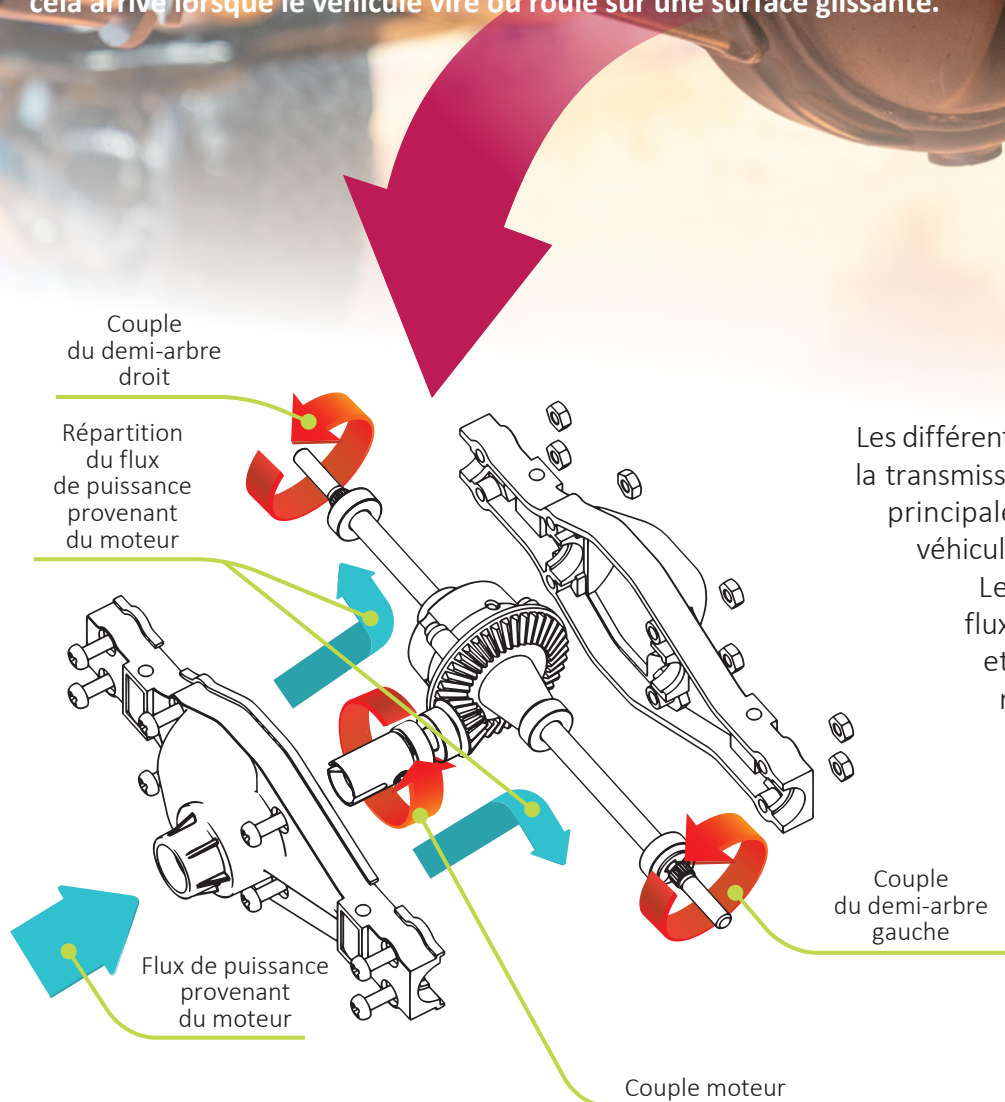


Le manuel du jeune ingénieur

§1 Introduction

Les différentiels sont principalement utilisés dans la transmission* des automobiles. Leur fonction principale consiste à faciliter la conduite du véhicule et à améliorer sa motricité.

Le différentiel transmet et divise le flux de puissance provenant du moteur et le couple** en deux flux qui sont répartis entre les roues d'un même essieu (ou les chenilles ou les hélices dans le cas d'autres types de véhicules). Cela permet aux roues de tourner à des vitesses différentes, ce qui augmente la stabilité du véhicule en réduisant le patinage des roues et l'usure des pneus, lorsqu'une des roues perd de l'adhérence au sol, comme cela arrive lorsque le véhicule vire ou roule sur une surface glissante.



Les différentiels sont principalement utilisés dans la transmission* des automobiles. Leur fonction principale consiste à faciliter la conduite du véhicule et à améliorer sa motricité.

Le différentiel transmet et divise le flux de puissance provenant du moteur et le couple** en deux flux qui sont répartis entre les roues d'un même essieu (ou les chenilles ou les hélices dans le cas d'autres types de véhicules). Cela permet aux roues de tourner à des vitesses différentes, ce qui augmente la stabilité du véhicule en réduisant le patinage des roues et l'usure des pneus, lorsqu'une des roues perd de l'adhérence au sol, comme cela arrive lorsque le véhicule vire ou roule sur une surface glissante.

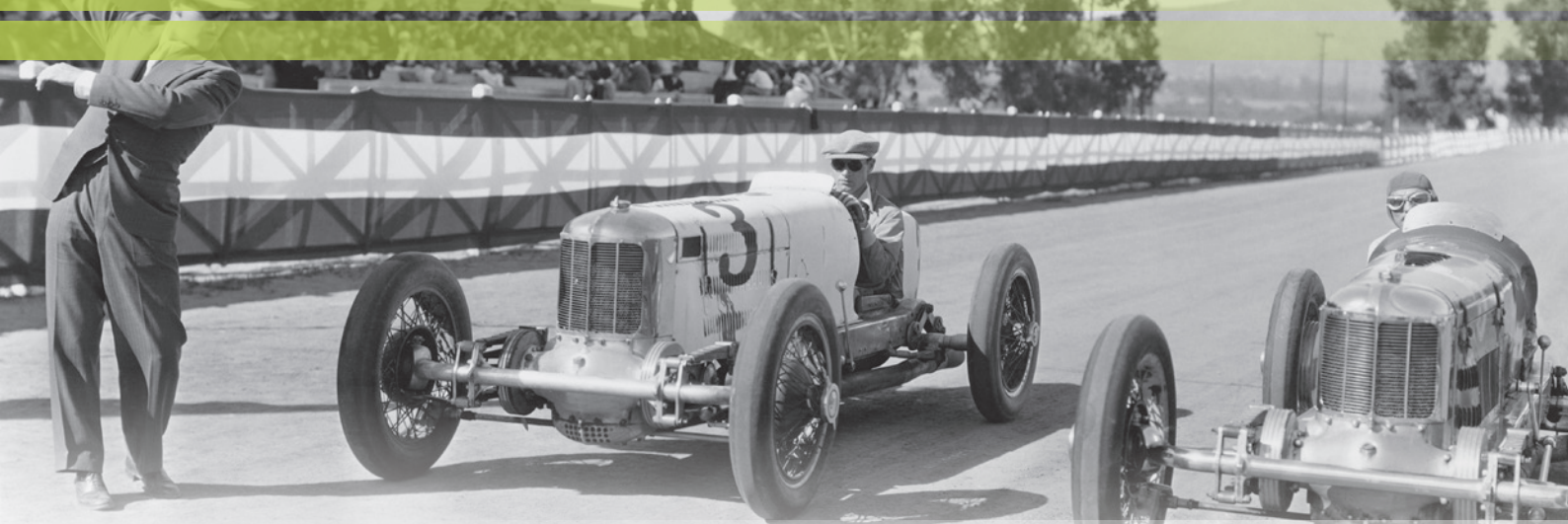
Vous allez apprendre maintenant, en détail, à quoi sert le différentiel, qui l'a inventé et quand, quel est son principe de fonctionnement, quand et comment on l'utilise de nos jours.

La maquette 3D « le Différentiel » vous aidera à mieux comprendre le fonctionnement de ce dispositif dans la pratique. En assemblant la maquette vous-même, vous allez élucider tous les mystères de ce dispositif crucial.

* Transmission (du latin transmissio) : Dans une voiture, c'est le système qui connecte le moteur aux roues motrices.

** Dans ce cas-ci, le couple est l'effet giratoire de la force sur les éléments et les pièces d'un mécanisme. Selon le Système international d'unités (SI), le moment d'une force (en l'occurrence, le couple) est mesuré en newtons-mètres (N·m).

§2 Un peu d'histoire



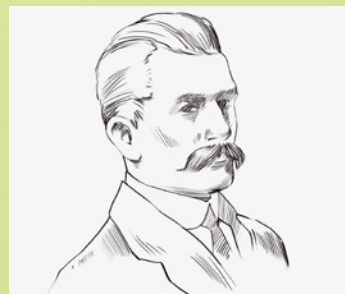
Les premières automobiles étaient bien moins complexes que les voitures modernes. Cependant, il devenait de plus en plus difficile de conduire un de ces ancêtres. Le patinage des roues dans les virages était un des principaux problèmes auxquels les conducteurs devaient faire face au début de l'ère de l'automobile. Dans les virages, les roues continuaient de tourner à la même vitesse tandis que la répartition du poids variait considérablement, ce qui limitait la vitesse et rendait la conduite du véhicule très difficile. Le différentiel apporta une solution adéquate à ce problème et permit la fabrication de voitures plus rapides et plus sûres.



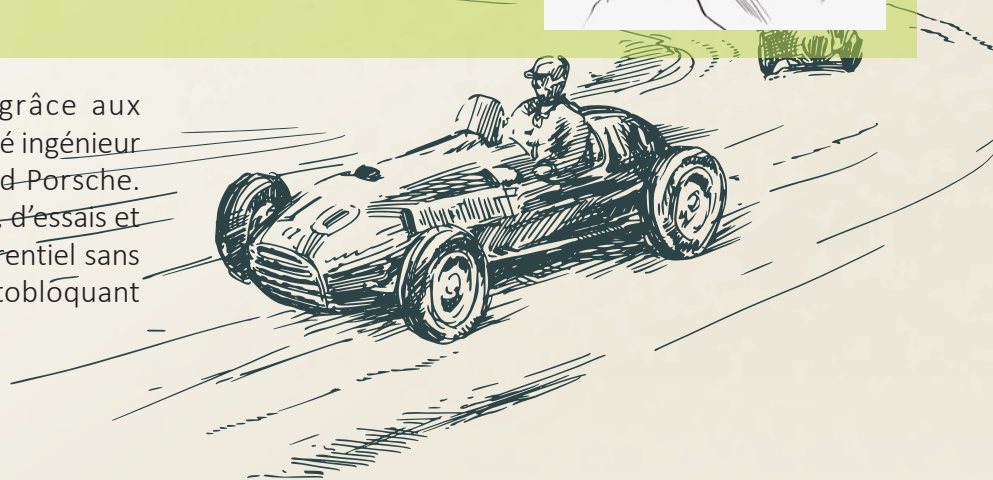
C'est l'ingénieur français Onesiphore Pecqueur qui inventa le différentiel pour automobile en 1825. Le mécanisme qu'il créa fonctionnait bien sur un sol dur et sec, mais il était inefficace sur des chaussées mouillées ou gelées. Il était évident que le système devait être amélioré.



Le système a évolué fortement grâce aux transformations intégrées par le renommé ingénieur automobile austro-allemand Ferdinand Porsche. Celui-ci consacra trois ans de recherches, d'essais et de retouches avant de produire un différentiel sans engrenage – le premier différentiel autobloquant automatique sensible à la vitesse.



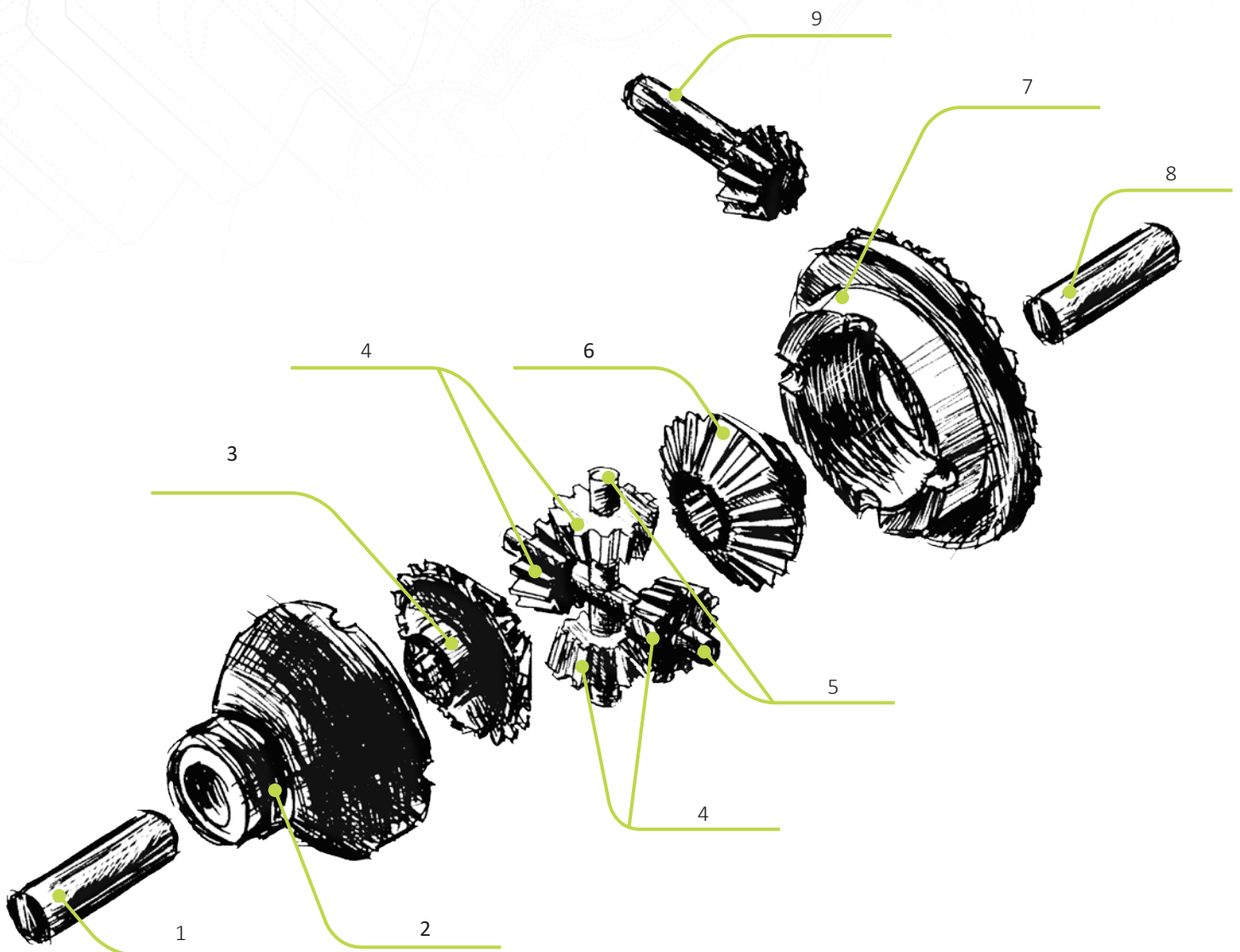
Le système a évolué fortement grâce aux transformations intégrées par le renommé ingénieur automobile austro-allemand Ferdinand Porsche. Celui-ci consacra trois ans de recherches, d'essais et de retouches avant de produire un différentiel sans engrenage – le premier différentiel autobloquant automatique sensible à la vitesse.



§3

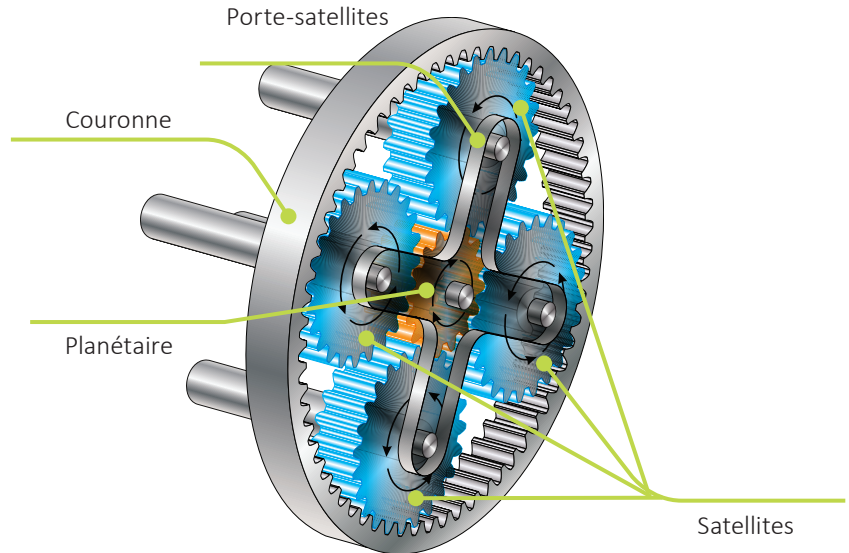
Description du mécanisme et de son fonctionnement

Le différentiel (du latin “Differentia” – différence) est un train d’engrenages et d’axes. Vue éclatée d’un différentiel à engrenage conique symétrique

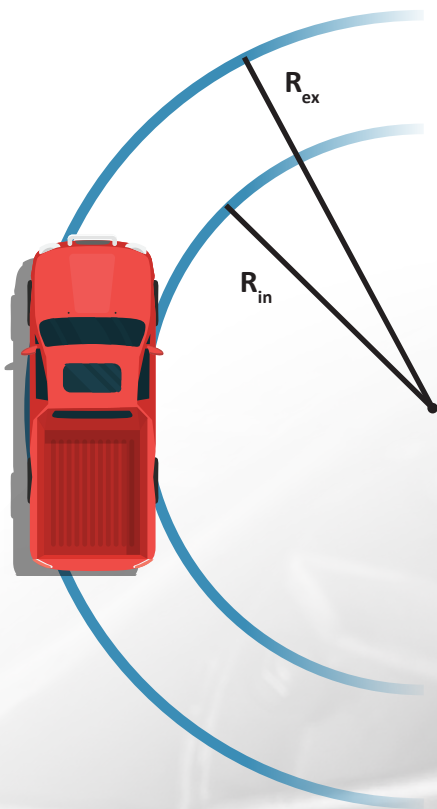


1- demi-arbre gauche; 2 – boîtier de différentiel ; 3 – planétaire ; 4 – satellites ; 5 – axes de satellites ; 6 planétaire ; 7 – coque de différentiel (y compris la couronne) ; 8 – demi-arbre droit ; 9 – pignon d’attaque.

Le système planétaire est l'élément de base de tout différentiel. Celui-ci est un train épicycloïdal classique, un engrenage mécanique à mouvement rotatoire qui, de par sa conception, est capable de modifier, accumuler et distribuer des vitesses angulaires* d'entrée et/ou un couple entre les satellites sur le même axe de rotation. Il comprend également la couronne, le porte-satellites et le pignon central ou « planétaire ».



Donc, le différentiel d'une automobile a trois fonctions principales : amener le couple moteur aux roues motrices ; assurer la vitesse angulaire individuelle de chaque roue ; servir de groupe réducteur conjointement avec le pignon d'attaque de l'arbre de transmission.



Comme vous pouvez le voir sur le schéma, dans un virage ou sur un sol raboteux, les roues motrices** de la voiture parcourent des distances différentes (à cause de la voie de l'automobile).

Le rayon de la trajectoire de la roue gauche diffère de celui de la roue droite (R_{ex} étant le rayon de la trajectoire extérieure et R_{in} le rayon de la trajectoire intérieure).

Dès lors, si les deux roues recevaient la même puissance (le même couple) du moteur, elles auraient en conséquence la même vitesse de rotation. Dans ces conditions, une des roues patinerait forcément. Toutefois, la présence d'un différentiel inter-roues permet de répartir la force provenant du moteur et de transmettre des vitesses de rotation différentes aux roues. Ainsi, chaque roue tournera, individuellement, à la vitesse requise en fonction de sa trajectoire.

* La vitesse angulaire est une quantité vectorielle qui caractérise la vitesse et le sens de rotation d'un corps solide (en l'occurrence, les pièces du mécanisme et les roues) par rapport au centre de rotation. Elle est représentée par la lettre grecque ω (omega) et son unité de mesure est le radian par seconde (rad/s). Nous allons examiner cette grandeur et d'autres plus en détail ci-dessous.

** Les roues motrices sont les roues qui reçoivent le couple produit par le moteur. Tant les roues arrière que les roues avant peuvent être motrices. Les véhicules à traction intégrale ont quatre roues motrices. Vous avez certainement déjà rencontré le symbole 4×4 .

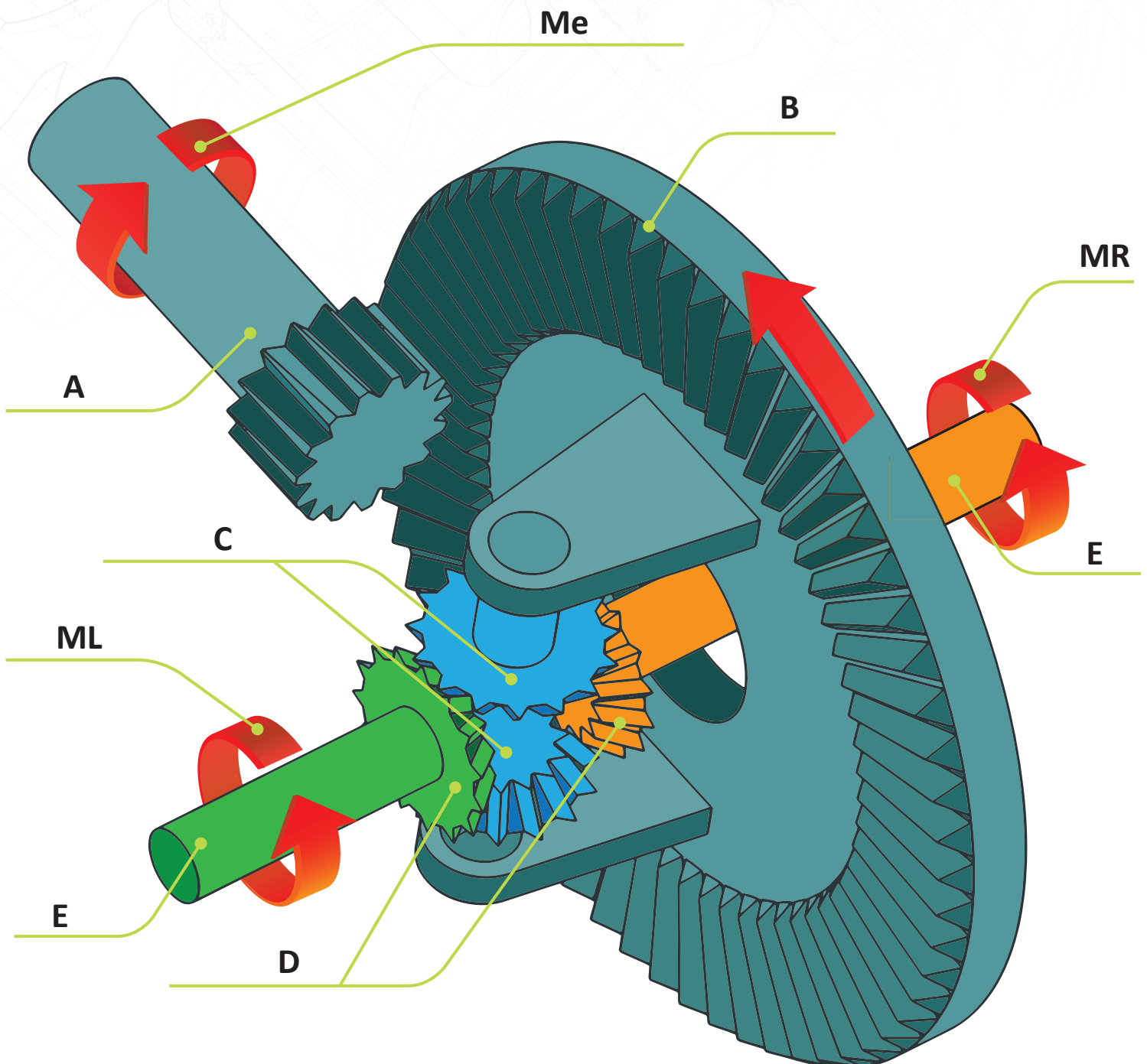
Fonctionnement :

Le couple (M_e) provenant du moteur est transmis par le pignon d'attaque (A) à la couronne (B) du différentiel.

Dans ce type de différentiel, la coquille de l'engrenage planétaire est la roue dentée (couronne) formant un boîtier rotatif.

Ce couple (M_e) est divisé en composantes gauche et droite, M_L et M_R , par les satellites (C) réciproquement indépendants, de sorte que chaque planétaire (D) solidaire de son arbre de roue (E) tournent à une vitesse angulaire différente de l'autre.

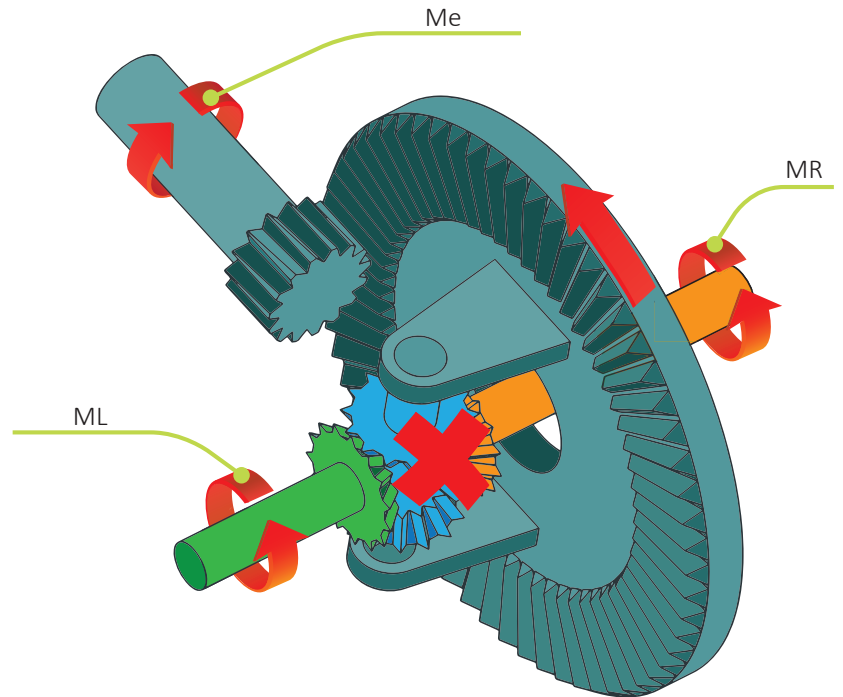
Par conséquent, comme mentionné ci-dessus, les roues du véhicule suivent librement leurs trajectoires respectives sans patiner.



Voyons ce que fait le différentiel lorsque la voiture roule en ligne droite et quand elle tourne.

Dans une ligne droite, les roues de l'auto parcourent la même distance. Et donc, les couples des roues gauche et droite **ML** et **MR** ainsi que les vitesses angulaires **ω_L** et **ω_R** sont identiques. **ML = MR** et **$\omega_L = \omega_R$** , respectivement.

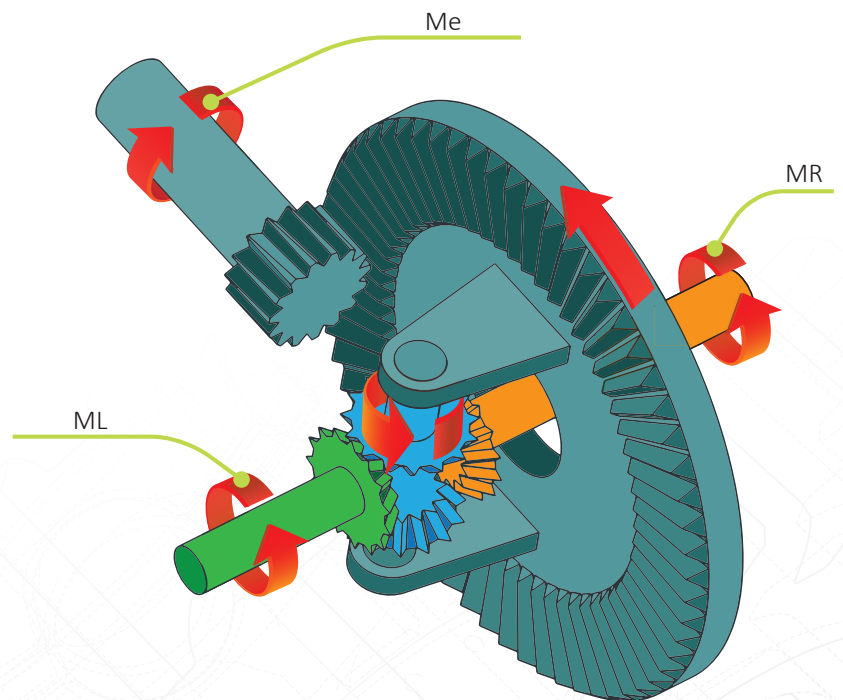
Le schéma montre que, dans une telle situation, la coque du différentiel avec la couronne et les satellites forment un tout solidaire (c'est-à-dire, les satellites ne tournent pas, parce qu'il n'y a pas de différence de rotation entre les roues gauche et droite).



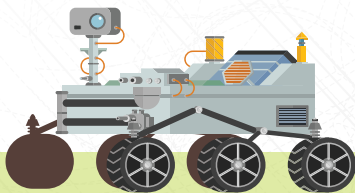
Fonctionnement du différentiel en ligne droite

La situation est tout autre dans les virages. Les roues de la voiture parcourent des distances différentes (à cause de la voie). Et donc, les couples des roues gauche et droite **ML** et **MR** ainsi que les vitesses angulaires **ω_L** et **ω_R** ne sont plus identiques. **ML \neq MR** et **$\omega_L \neq \omega_R$** .

Les satellites tournent autour de leurs axes et entraînent les planétaires, distribuant le couple moteur entre les demi-arbres de sorte que les roues gauche et droite tournent à des vitesses différentes.



Fonctionnement du différentiel dans un virage



L'industrie spatiale utilise des véhicules (lunaires et martiens) ayant beaucoup de roues qui sont toutes des roues motrices. C'est voulu pour assurer une meilleure motricité du véhicule.

Toutefois, il convient de rappeler qu'un différentiel agit efficacement pour autant que les roues motrices de l'automobile aient une bonne adhérence au sol, car si l'une des roues perd son potentiel d'adhérence – en tournant dans le vide ou sur du verglas – elle sera la seule à tourner et l'autre roue s'immobilisera. Pour empêcher que cela n'arrive, les ingénieurs ont mis au point des solutions de blocage du différentiel.

Il y a donc plusieurs types de différentiels :

Différentiel à blocage entièrement manuel. Le blocage positif est nécessaire pour améliorer la motricité en tout terrain. Le conducteur peut l'actionner en cas de besoin, en appuyant sur un bouton.



Différentiel autobloquant

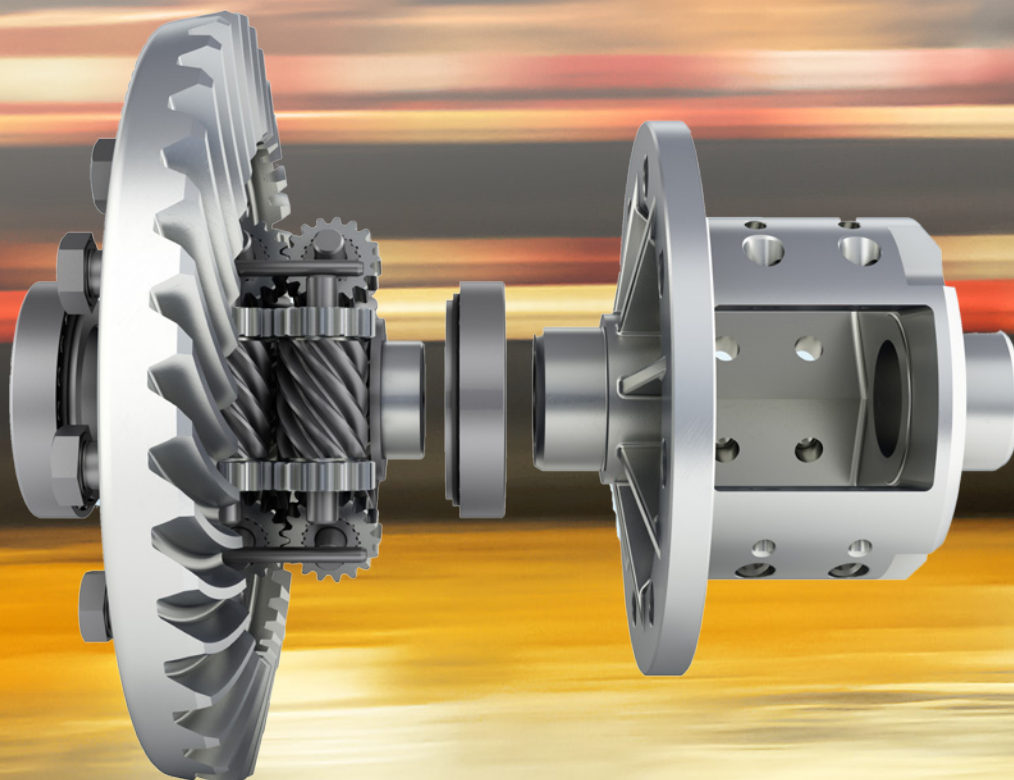
Visco-coupleur : Il s'agit d'un embrayage multidisque dans lequel le moment de transmission augmente à mesure que la différence de vitesse entre les arbres conducteurs et conduits s'accroît. On le monte sur des voitures à traction intégrale simplifiée et comme mécanisme de blocage du différentiel.

Ce type de montage améliore considérablement la motricité du véhicule. Le système autobloquant part du principe que certaines conditions de roulage tendent à bloquer le différentiel automatiquement. Quand la différence de charge entre les demi-arbres augmente de façon importante et continue, la pompe à huile du système est mise en marche. Les disques de l'embrayage commencent à se serrer et la vitesse des roues diminue, tandis que la charge sur les roues est répartie adéquatement si le véhicule dérape ou patine.

Il existe beaucoup de variantes de différentiels autobloquants pour voitures.

Dans certains différentiels, le blocage n'est pas provoqué par la différence des vitesses de rotation des arbres, comme dans un visco-coupleur, mais il a lieu en cas de déséquilibre du couple transmis aux arbres. Dès que le moment de force sur un arbre augmente, la paire de vis sans fin coince les roues dentées, bloquant l'engrenage différentiel ad hoc.

Dans d'autres différentiels, les rangées de satellites droite et gauche s'imbriquent dans les planétaires droit et gauche du demi-arbre et les satellites de différentes rangées s'engrènent l'un dans l'autre alternativement lorsqu'une roue est à la traîne. Le demi-arbre solidaire de ce système commence à tourner plus lentement que le boîtier du différentiel et entraîne son satellite qui fait tourner le satellite avec lequel il est engrené et ce dernier, à son tour, fait tourner son planétaire ; cela assure des rotations différentes des roues lorsque le véhicule vire.



Par ailleurs, certains modèles d'automobiles ne comportent aucun différentiel. Équiper la voiture d'un différentiel implique aussi une charge supplémentaire sur la transmission et une plus grande usure des pneus. Un véhicule à quatre roues, dont une ou deux motrices, peut fonctionner sans différentiel – par ex. les karts et les voitures de course à pont arrière conçues pour circuler sur des surfaces à faible adhérence.



Il existe aussi des différentiels inter-pont (ou centraux) qui distribuent le couple moteur entre les arbres de transmission dans des proportions de 50/50, 40/60, etc.



Il n'y a pas de différentiels sur les véhicules ferroviaires – locomotives diesel et électriques, automotrices et métros. Les tracteurs à deux roues, les machines allégeant le travail et les karts électriques dont les roues sont propulsées par un moteur individuel peuvent ne pas être équipés de différentiels.



§4

Leçons de physique et de mécanique de la maquette STEM « Le Différentiel »

Le différentiel est un système mécanique qui transmet le couple d'une seule source à deux actionneurs indépendants de sorte que leurs vitesses de rotation respectives puissent varier.

Le différentiel gère les grandeurs suivantes : la puissance de rotation (N), le couple (M) et la vitesse angulaire (ω).

Puissance : Valeur scalaire qui, dans la plupart des cas, est égale au taux de conversion, de transmission ou de consommation de l'énergie d'un système. On la décrit aussi comme le quotient du travail accompli par le temps employé à l'accomplir.

$$N = A/t$$

Dans le Système international d'unités (SI), **l'unité de mesure de puissance** est le watt (w), du nom de l'inventeur écossais du 18ème siècle James Watt.

La puissance est donnée par la formule :

$$N = F \cdot v \cdot \cos\alpha$$

Dans un mouvement rotatoire, on peut l'écrire :

$$N = M \cdot \omega,$$

où M désigne le couple; et ω la vitesse angulaire.

Couple : Aussi appelé « puissance de rotation », son unité de mesure SI est N·m. Parfois, on le nomme « moment d'un couple de forces ». Ce terme apparaît pour la première fois dans les études d'Archimède. Si la direction d'une force appliquée sur un levier est perpendiculaire à celui-ci, le moment de la force est défini comme étant le produit de cette force par la distance au centre de l'axe de rotation du levier. Dans le cas du moteur, c'est la force de rotation du vilebrequin.

Par exemple, une force de 3 N appliquée à un levier à une distance de 2 mètres de son centre de rotation produira le même couple qu'une force de 1 N exercée sur un levier à une distance de 6 mètres de son centre de rotation. Le moment de la force par rapport au point est défini comme un produit vectoriel :

$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}]$$

– où F désigne la force appliquée en un point et r le rayon vectoriel du point (si le centre de rotation se trouve à l'origine des coordonnées).

Vitesse angulaire : C'est la grandeur qui détermine la rapidité à laquelle la position angulaire (ϕ) ou l'orientation d'un objet change avec le temps. Elle est représentée par le symbole ω et sa formule est :

$$\omega = \frac{\phi}{t}$$

Par révolution, $\Delta\phi = 2\pi$ radians.

La vitesse angulaire a un rapport avec le temps de rotation et le nombre de révolutions par unité de temps. Elle est définie par :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{ou} \quad \omega = 2\pi\nu$$

L'unité SI de la vitesse angulaire (ω) est rad/s.

Dans la vie réelle, le rayon d'un virage n'est pas un nombre constant et c'est impossible d'assurer une traction uniforme parfaite. Si les roues tournaient à la même vitesse, la voiture entamant un virage glisserait et la trajectoire intérieure différerait de l'extérieure. Cette différence se calcule comme suit :

$$L_{in} = L_{ex} \cdot (1 - L \cdot \omega_z \cdot L_{ex})$$

avec :

L_{in} = trajectoire intérieure en mètres;

L_{ex} = trajectoire extérieure en mètres;

ω_z = vitesse angulaire dans un plan horizontal en rad/s;

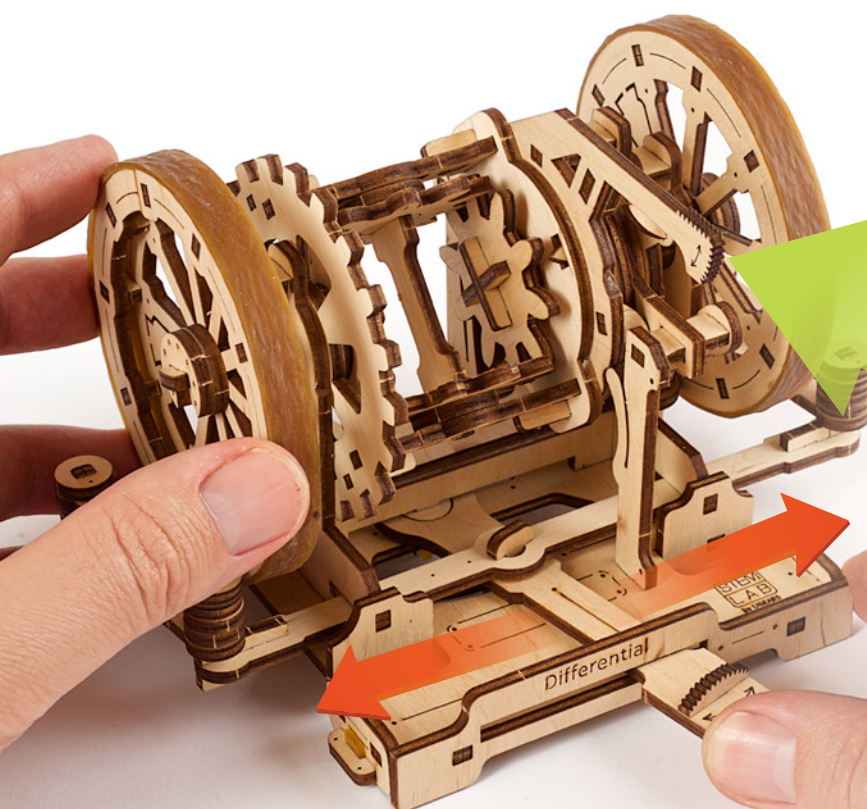
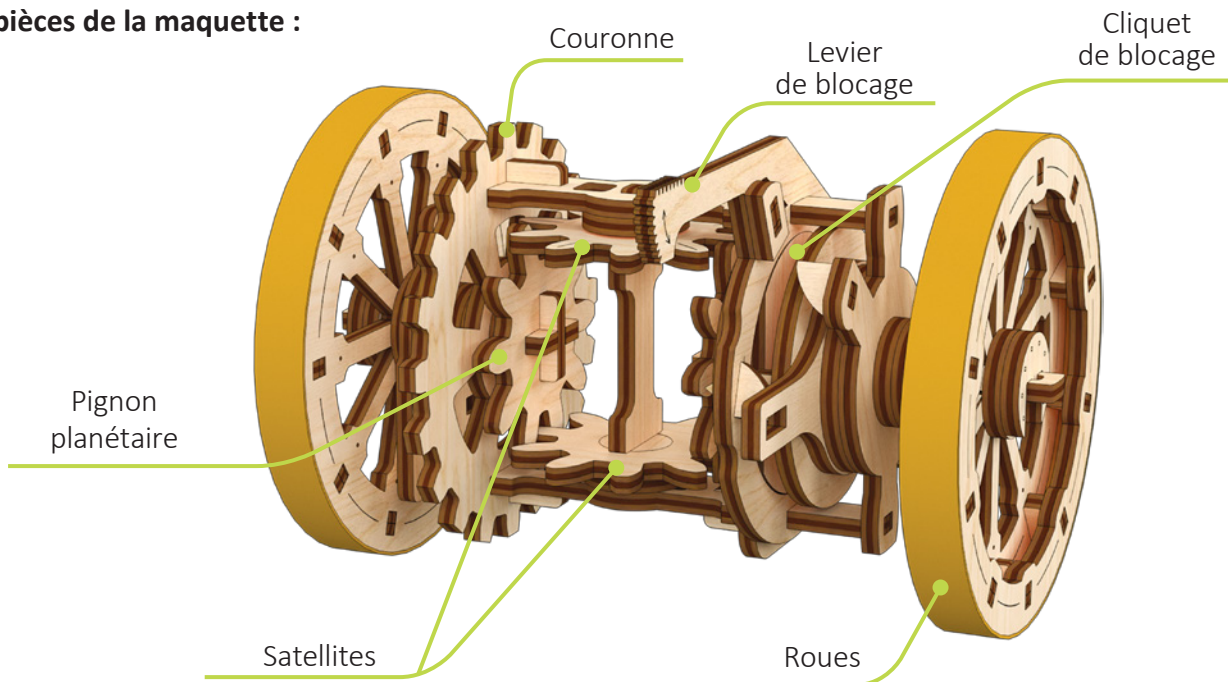
L = distance entre les roues en mètres.

§5

Conception technique et principe de fonctionnement

La maquette mécanique "le Différentiel" sert d'aide didactique pour expliquer le fonctionnement du système à l'aide d'un exemple réel. On y voit le fonctionnement des engrenages planétaires qui distribuent la charge depuis la couronne jusqu'aux demi-arbres.

Identifions les principales pièces de la maquette :



Il est possible de transmettre l'impulsion à l'une des roues ou de la bloquer à l'aide du levier. La maquette permet de démontrer, d'une façon facilement compréhensible, comment une roue reçoit un plus grand couple que l'autre lorsque la voiture prend un virage.



Avec le levier en position de blocage, l'énergie du moteur est répartie entre les roues à parts égales.

§6 Activités pratiques

Calcul de la vitesse de rotation, de la vitesse angulaire et de la vitesse linéaire

Différentiel : Mécanisme qui transmet le couple d'un moteur aux roues, contribue à empêcher le patinage des roues et facilite le fonctionnement de la transmission.

Objectifs : Étudier les méthodes de calcul de la vitesse de rotation ; calculer la vitesse de rotation d'un différentiel en fonction de sa vitesse linéaire ; développer la logique, les connaissances scientifiques et la pensée spatiale.

Matériel : Le Différentiel, un chronomètre, une règle, un bloc-notes et un stylo à bille.

Bases théoriques des activités :

Les activités consistent à calculer, par diverses méthodes, la vitesse de rotation d'un disque solidaire de l'arbre d'un différentiel en fonction de la vitesse linéaire à laquelle il se déplace. On obtient le mouvement rotatoire à partir de la rotation angulaire φ , la vitesse de rotation ω , la vitesse angulaire β et le temps t . La vitesse de rotation ω est la même pour tout point d'un objet tournant autour d'un axe. On définit la vitesse moyenne de rotation par :

$$\omega = \frac{\varphi}{t} (1)$$

La vitesse angulaire β est déterminée par la variation de la vitesse de rotation ω avec le temps. D'où la formule de la vitesse angulaire moyenne peut s'écrire :

$$\beta = \frac{\omega}{t} (2)$$

Préparation des activités :

Assemblez le Différentiel et placez-le sur une surface plane.

DÉROULEMENT DES ACTIVITÉS :

Activité 1 – Calcul de la rotation angulaire

1. Marquez un point sur la jante d'une roue avec un crayon.
2. Faites rouler le Différentiel sur une surface horizontale lisse et chronométrez le temps que la marque met pour décrire un cercle complet.
3. Calculez la vitesse de rotation à l'aide de la formule (1). Pour un tour complet, $\Delta \varphi = 2\pi = 2 \cdot 180^\circ = 360^\circ$
4. Répétez l'épreuve, mais en déplaçant le Différentiel à une autre vitesse.
5. Comparez les valeurs de la rotation angulaire et de la vitesse linéaire.

Activité 2 – Calcul de la vitesse de rotation

1. Comptez le nombre de tours que la marque fait en 10 secondes.
2. Calculez la fréquence de rotation en appliquant la formule :

$$v = \frac{N}{t}$$

3. Calculez la vitesse de rotation $\omega = 2\pi v$.
4. Répétez l'opération mais en faisant rouler le Différentiel à une autre vitesse.
5. Comparez vos résultats.

Activité 3 – Calcul de la vitesse angulaire

1. Calculez la vitesse angulaire sur base des données des Activités 1 et 2 (au besoin, refaites ces activités) et de la formule (2).
2. Établissez le rapport entre la vitesse angulaire et la vitesse linéaire du Différentiel.

Activité 4 – Calcul de la vitesse linéaire

1. A l'aide de la règle, mesurez le rayon de la roue (la distance entre la marque sur la jante et le centre de la roue).
2. Calculez la vitesse linéaire en tenant compte des données des Activités 1 et 2 (au besoin, refaites ces activités) et de la formule $v = R \cdot \omega$.
3. Vous pouvez aussi calculer l'accélération centripète en appliquant la formule : $a = \frac{v^2}{R}$.



Dans des situations réelles, le rayon de la roue n'est pas constant et c'est impossible d'assurer une traction uniforme parfaite. Si les roues tournaient à la même vitesse, la voiture entamant un virage glisserait et la trajectoire intérieure différerait de l'extérieure. Cette différence se calcule comme suit :

$$L_{in} = L_{ex} \cdot (1 - L \cdot \omega_z \cdot L_{ex})$$

avec :

- L_{in} = trajectoire intérieure en mètres;
- L_{ex} = trajectoire extérieure en mètres;
- ω_z = vitesse angulaire dans un plan horizontal en rad/s;
- L = distance entre les roues en mètres.

Activité 5 – Calcul de la différence de vitesse de rotation des roues d'un camion et de la différence entre les distances parcourues par les roues

Sachant que : le rayon de la trajectoire intérieure du véhicule est de 10 m ; le rayon de la trajectoire extérieure est de 11,6 m (puisque le véhicule a une voie de 1,6 m) ; les roues ont un diamètre de 72 cm.

CONCLUSIONS :

Au cours des activités avec le Différentiel, nous avons appris à calculer la vitesse linéaire, la vitesse de rotation et la vitesse angulaire.

Nous avons constaté que :

- la vitesse de rotation dépend de la vitesse linéaire ;
- plus la vitesse linéaire est élevée, plus la vitesse de rotation est élevée ;
- la vitesse de rotation et la vitesse angulaire sont directement proportionnelles.

TEST DE CONNAISSANCES

1. A qui impute-t-on le mérite des premières expérimentations d'un différentiel à glissement limité ?

- a) Onesiphore Pecqueur
- b) Ferdinand Porsche
- c) Volkswagen

2. Le différentiel fournit des vitesses de rotation différentes aux roues d'un même essieu dans le but :

- a) de réduire la vitesse ;
- b) de réduire le dérapage dans un virage ;
- c) d'augmenter le frottement.

3. Le différentiel évolué est conçu comme :

- a) un train d'engrenage
- b) un système planétaire
- c) une transmission automatique

4. Combien de différentiels y a-t-il sur les voitures à quatre roues motrices ?

- a) Deux
- b) Trois
- c) Six

5. Quels sont les éléments constitutifs d'un différentiel ?

- a) Le vilebrequin
- b) Des arbres et des engrenages
- c) Des actionneurs

6. Quel est le rapport entre la vitesse de rotation et la vitesse linéaire d'un différentiel ?

- a) Il n'y a aucun rapport.
- b) La vitesse de rotation augmente si la linéaire augmente.
- c) La vitesse de rotation diminue si la linéaire augmente.

7. Comment est le rapport de la vitesse angulaire à la vitesse linéaire d'un différentiel ?

- a) Inversement proportionnel
- b) Directement proportionnel
- c) Il n'y a pas de rapport.

8. Comment appelle-t-on le type de différentiel dans lequel le couple augmente à mesure que la différence de vitesses entre les arbres conduits et conducteur s'accroît ?

- a) Torsen
- b) Visco-coupleur
- c) Quaife

9. Quelles sont les grandeurs physiques gérées par le différentiel ?

- a) La gravité, le travail, le temps.
- c) La force de rotation, le couple, la vitesse angulaire.
- c) La fréquence d'oscillation, la friction, la vitesse linéaire.

10. Quelle est l'unité de mesure de la vitesse angulaire ?

- a) m/sec
- b) rad/sec
- c) m/rad

Félicitations ! Vous avez réussi !

Merci de nous avoir accompagnés dans cette aventure ; nous espérons que vous vous êtes amusé et que vous avez appris quelque chose.