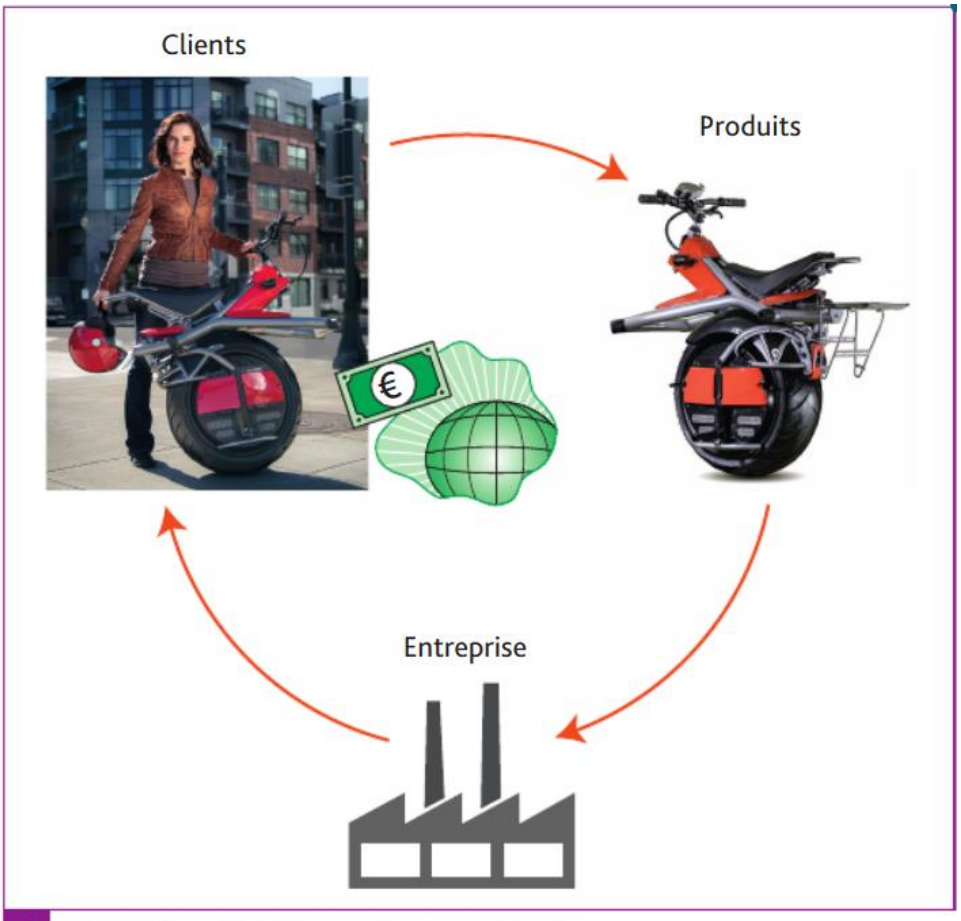
FICHE 1 : L'Ingénierie Système

Pour se *développer* et survivre, une **entreprise** doit vendre ses **produits**. Le client achète le produit si celui-ci répond à un besoin et qu'il le satisfait [document 1].



1 Relations client–produit–entreprise.

I. L'entreprise :

L'entreprise est une association de personnes mettant en commun des ressources (intellectuelles, matérielles et financières) dans le but de concevoir, réaliser, commercialiser et suivre un produit (ou un service) pour un client.

II. Le client :

Le client est au centre de la démarche de conception qui a pour objectif de le satisfaire (**processus de satisfaction du client**), non de concevoir un produit.

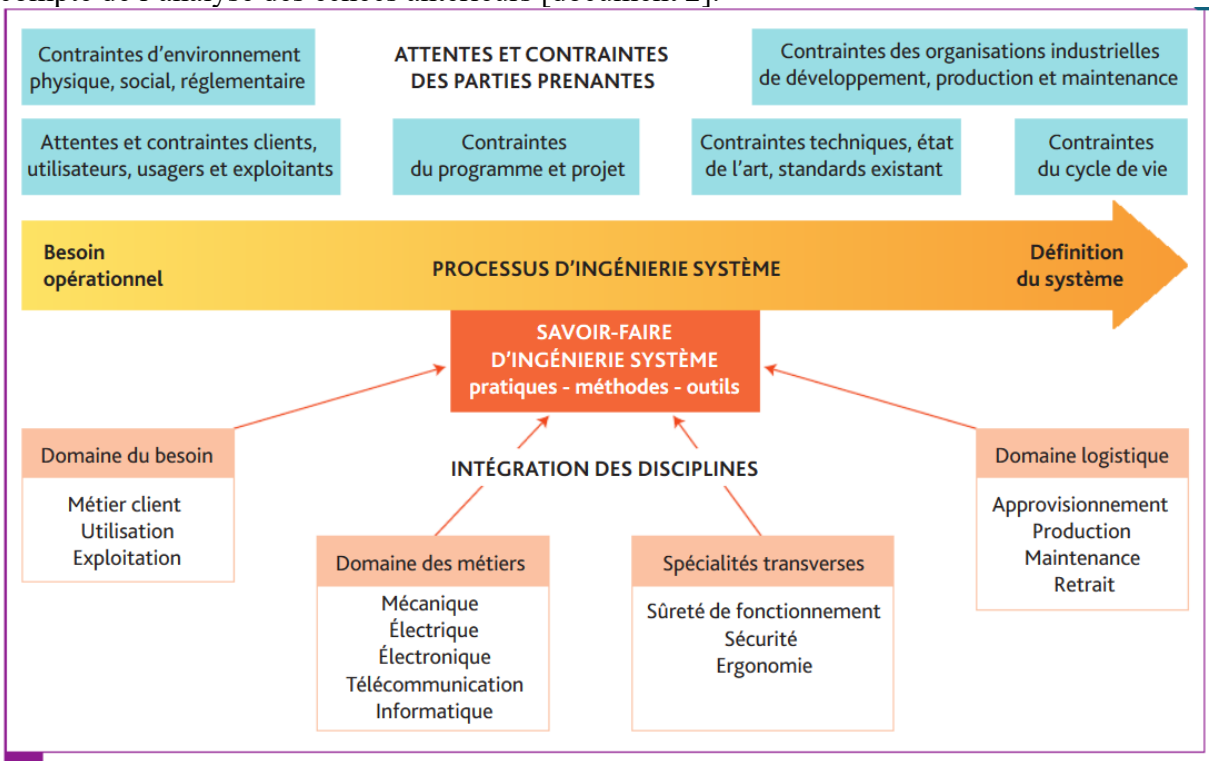
Il est primordial pour une entreprise d'identifier les besoins du client. À ce stade, les ingénieurs de l'entreprise mettent en œuvre des méthodes qui permettent de s'assurer que le client achètera le produit.

III. Le produit :

Le produit répond au besoin du client. Le produit n'est qu'un moyen de satisfaire le client.
Définitions :
• le **produit** est ce qui est **fourni au client pour répondre à un besoin** ;
• le **besoin** est la **nécessité ou le désir éprouvé par un client**.

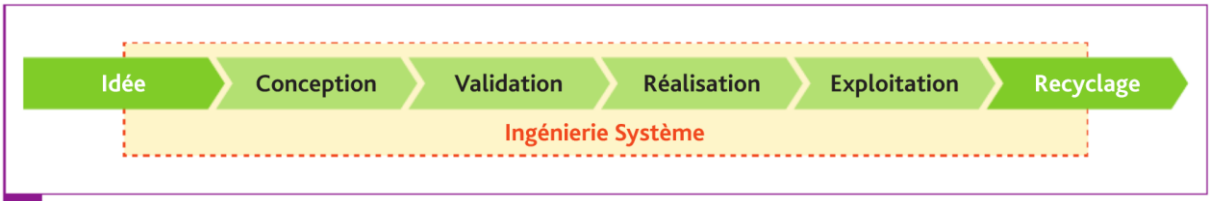
Ressources

Afin de modéliser les attentes du client, il est donc important de bien cerner le besoin en termes d'exigences auxquelles le produit doit répondre. L'Ingénierie Système (IS) permet de formaliser et d'appréhender la conception ou l'évolution de produits avec succès en tenant compte de l'analyse des échecs antérieurs [document 2].



2 Processus d'Ingénierie Système.

Il est nécessaire d'avoir un outil numérique unique d'un bout à l'autre de la chaîne de production pour des raisons de performance et de compétitivité [document 3].



3 Cycle de vie d'un produit.

L'Ingénierie Système ne remet pas en cause l'organisation traditionnelle d'une conception mais apporte des outils et méthodes plus performants et adaptés. La réussite réside toujours dans la performance de réponse au besoin.

L'expression et la spécification des besoins permettent donc de répondre à des questions :
- la **finalité** : pourquoi veut-on faire ça ?
- la **mission** : qu'est-ce qu'on doit faire ?
- les **parties prenantes** : qui est concerné/impacté ?
- le **contexte** : quelles sont les frontières du système ?
- les **utilisations** : quels services sont attendus ?
- les **scénarios** : comment cela s'envisage-t-il ?
- les **ressources** : quelles sont les ressources pour répondre à tout cela ?

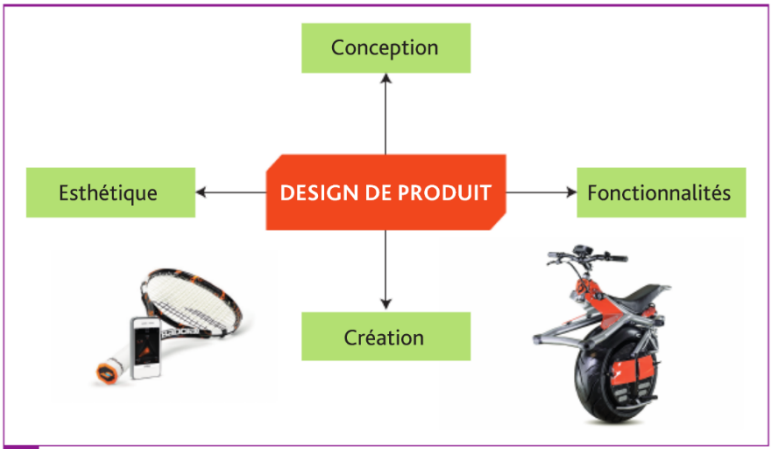
L'ensemble des diagrammes SysML obtenus (diagrammes d'exigences et de cas d'utilisation en particulier) durant ce processus constitue le **cahier des charges**.

Ressources

FICHE 2 : Design, architecture, innovation et ergonomie

I. Le design :

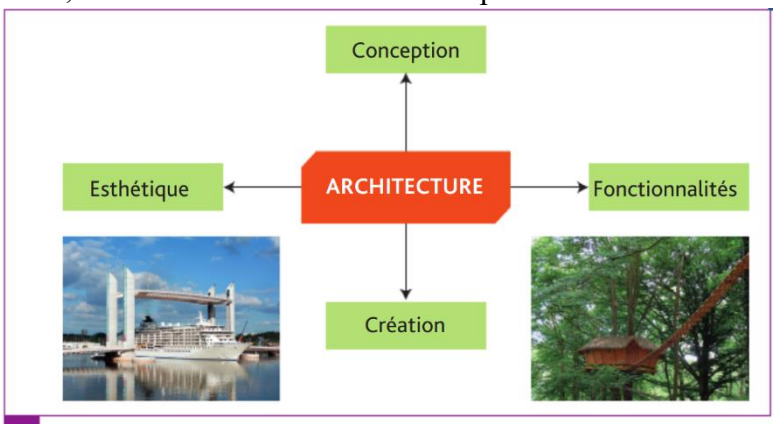
Souvent associé à l'innovation, le design de produit industriel, autrefois appelé en français « esthétique industrielle », est une discipline créative qui consiste à concevoir des produits ou des ouvrages grâce à un travail sur la forme, l'esthétique et l'ergonomie. Il évolue au travers des procédés, des matériaux et des technologies [document 4].



4 Domaine d'application du design de produit.

II. L'architecture :

L'architecture permet de concevoir des habitats, des aménagements urbains, des ouvrages d'art spécifiques dans des cadres réglementaires, avec une démarche d'écoconception et de développement durable. L'architecte conçoit les formes et les volumes, intervient sur le choix des matériaux et des produits utilisés pour la réalisation et peut « réintervenir » dans le cadre d'une réhabilitation en fin de cycle de vie de l'ouvrage. Chaque réalisation architecturale est un prototype unique. L'impact visuel dans le site d'implantation demeure souvent un élément majeur [document 5].



5 Domaine d'application de l'architecture.

III. L'innovation :

Une entreprise doit innover pour renforcer son image de marque, pour s'imposer par rapport à ses concurrents et conquérir de nouveaux clients.

On entend par innovation la commercialisation d'un produit nouveau ou plus performant dans le but de fournir au consommateur des services objectivement nouveaux ou améliorés.

Les innovations proviennent d'études de marchés, de remontées de problèmes, d'avancées technologiques, d'une tendance sociétale et plus généralement d'une activité de veille sociale, technologique et commerciale.

On distingue deux grands types d'innovation :

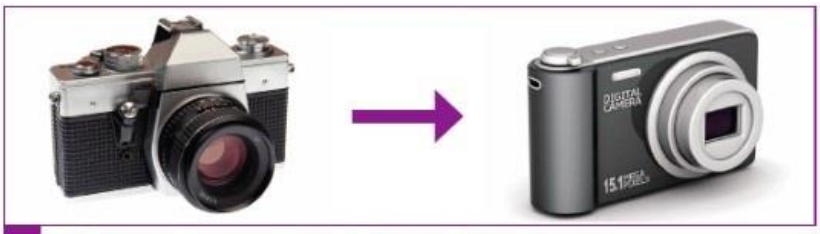
• l'innovation incrémentale qui est une évolution du produit. Elle ne perturbe ni les habitudes clients ni les compétences de l'entreprise en matière de technologie [document 6] ;

• l'innovation de rupture (ou radicale) qui modifie profondément les conditions d'utilisation par les clients ou qui s'accompagne d'un bouleversement technologique [documents 7 et 8].

L'innovation est au cœur du développement économique, de la réussite et de la pérennité des entreprises. La protection industrielle devient alors cruciale pour assurer l'exclusivité de cette innovation.

Ressources

6 Évolution de deux produits au cours du temps.



7 De l'appareil argentique à l'appareil numérique.

8 Évolution technologique dans l'autonomie des tâches ménagères.

IV. L'ergonomie

L'ergonomie est un terme sous lequel nous exprimons la relation de l'utilisateur avec le milieu extérieur et son rapport à l'objet ou au système. Dans la vie quotidienne, cette relation entre l'utilisateur et l'objet s'intègre dans divers contextes, nous parlons d'ergonomie :

- Informatique : ergonomie des interfaces Homme–Machine ;
- Industrielle : ergonomie du poste de travail et de l'outillage ;
- Des bâtiments : ergonomie du confort acoustique et visuel ;
- Urbaine : ergonomie d'intégration du handicap dans la mobilité ;
- De transport : ergonomie et confort du passager.

La science de l'ergonomie définit alors trois dimensions :

• **l'ergonomie physique** qui travaille sur les caractéristiques anatomiques et anthropométriques de l'Homme avec son activité physique en relation avec le milieu extérieur ;

• **l'ergonomie cognitive** qui concerne les processus mentaux (perception, mémoire, raisonnement et langage) et les réponses motrices (prise de décision). C'est la performance de la réponse à l'interaction Homme–Machine ;

• **l'ergonomie organisationnelle** qui recouvre l'optimisation de la gestion des ressources humaines, des rythmes de travail, du travail de groupe et des relations sociales

Ressources

FICHE 3 : Créativité et protection des innovations

Une entreprise a la nécessité d'innover pour permettre à ses clients d'utiliser des produits exclusifs et répondre à leurs besoins. Pour l'entreprise, cette stratégie couplée à une stratégie de propriété industrielle lui permet de bénéficier d'une bonne notoriété favorisant la vente de ses produits et donc de faire des bénéfices pour réinvestir dans l'innovation.
La propriété intellectuelle se divise en deux branches :
• la **propriété littéraire et artistique** ;
• la **propriété industrielle**, qui comprend notamment les brevets d'invention, les marques, les dessins et modèles industriels

I. Qu'est-ce qu'un brevet ?

Base Brevet de l'INPI :

https://bases-brevets.inpi.fr/fr/accueil.html

Un brevet protège une innovation technique, c'est-à-dire un produit ou un procédé qui apporte une solution technique nouvelle à un problème technique donné. Il est protégé 20 ans à compter de la date de dépôt et à condition de payer les annuités. Il garantit à son propriétaire un monopole d'exploitation ainsi que le pouvoir d'interdire toute utilisation sans son autorisation en poursuivant par exemple les contrefacteurs en justice [document 9].
En France, brevets, marques, dessins et modèles se déposent à **l'INPI (Institut national de la propriété industrielle)**.
Via l'INPI, un déposant peut étendre la protection à d'autres pays : le brevet européen auprès de l'Office Européen des Brevets (OEB) et le brevet international auprès de l'Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI).
Les numéros des brevets :
- commencent par FR pour la France ;
- commencent par EP pour l'Europe ;
- commencent par WO pour l'ensemble des autres pays.

Attention, on ne peut pas protéger une idée par un brevet ! Seuls les moyens techniques mis en œuvre pour la concrétiser le seront.

inpi
Brevet d'invention
Certificat d'utilité - Certificat d'addition
COPIE OFFICIELLE
Le directeur général de l'Institut de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielledéposée à l'Institut.
Fait à Paris, le

9 Une attestation de brevet d'invention.

II. Qu'est-ce qu'une marque ?

Base Marques françaises de l'INPI :

https://bases-marques.inpi.fr/

Au sens de la propriété industrielle, la marque est un « signe » servant à distinguer précisément produits ou services de ceux des concurrents [document 10].
Une marque peut prendre différentes formes telles qu'un mot, un nom, un slogan, des chiffres, des lettres, un dessin, un logo ou un son. Une marque est protégée sur le territoire français pour 10 ans et renouvelable indéfiniment.

10 Exemples de logos de marques automobiles.

Ressources

III. Qu'est-ce qu'un dessin et modèle ?

Les créations esthétiques (dessin ou modèle industriel) se rapportent à **l'aspect visuel d'un produit**, contrairement au brevet qui se rapporte aux aspects techniques et fonctionnels. La protection est valable pour une durée maximale de 25 ans. Le **dessin** (élément bidimensionnel) ou **modèle** (élément tridimensionnel) industriel constitue l'aspect ornemental et esthétique du produit. Les éléments graphiques des créations (logos, formes…) peuvent éventuellement être protégés par un dépôt de marque.

En France, le dépôt de dessins et modèles s'inscrit dans un cadre juridique privilégié, grâce à la théorie dite de « l'unité de l'art ». Le droit d'auteur n'exige aucune formalité de dépôt, il suffit au créateur de prouver l'antériorité de sa conception. Parmi ces moyens de preuves, il est possible d'utiliser une « enveloppe Soleau » ou encore le dépôt de dessins et modèles. L'enveloppe Soleau est un produit de l'INPI qui, sans être un titre de propriété industrielle, permet de dater de façon certaine sa création et de s'identifier comme auteur.

Base de modèles français de l'INPI :

http://bases-modeles.inpi.fr/

L'avantage de déposer un dessin ou un modèle est d'obtenir cette double protection : le droit d'auteur et la propriété industrielle. En outre, il permet d'envisager plus facilement d'étendre la protection à l'étranger [document 11].

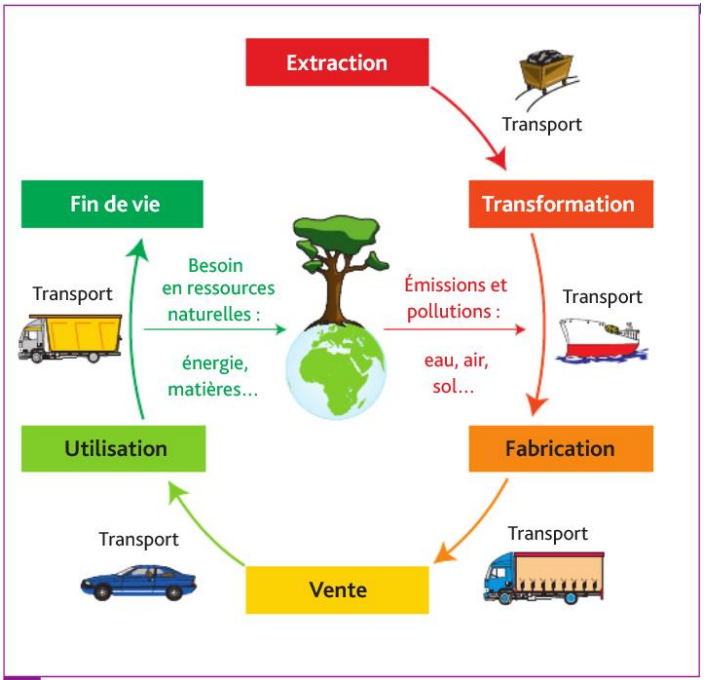
Référence du modèle : 20114377 - 001
Numéro d'enregistrement : 20114377
Date de dépôt : 2011-09-13
Lieu de dépot : INPI PARIS
Date de fin de validité : 2016-09-13
Objet : Tricycle Trimix
Déposant : DIEDRE DESIGN, SARL 38 rue Remilly 78000 VERSAILLES FR (SIREN 323912972)
Mandataire : DIEDRE DESIGN 38 rue Remilly 78000 VERSAILLES FR

11 Extrait de dépôt de design : Tricycle Trimix.

Ressources

FICHE 4 : Analyse du cycle de vie (ACV)

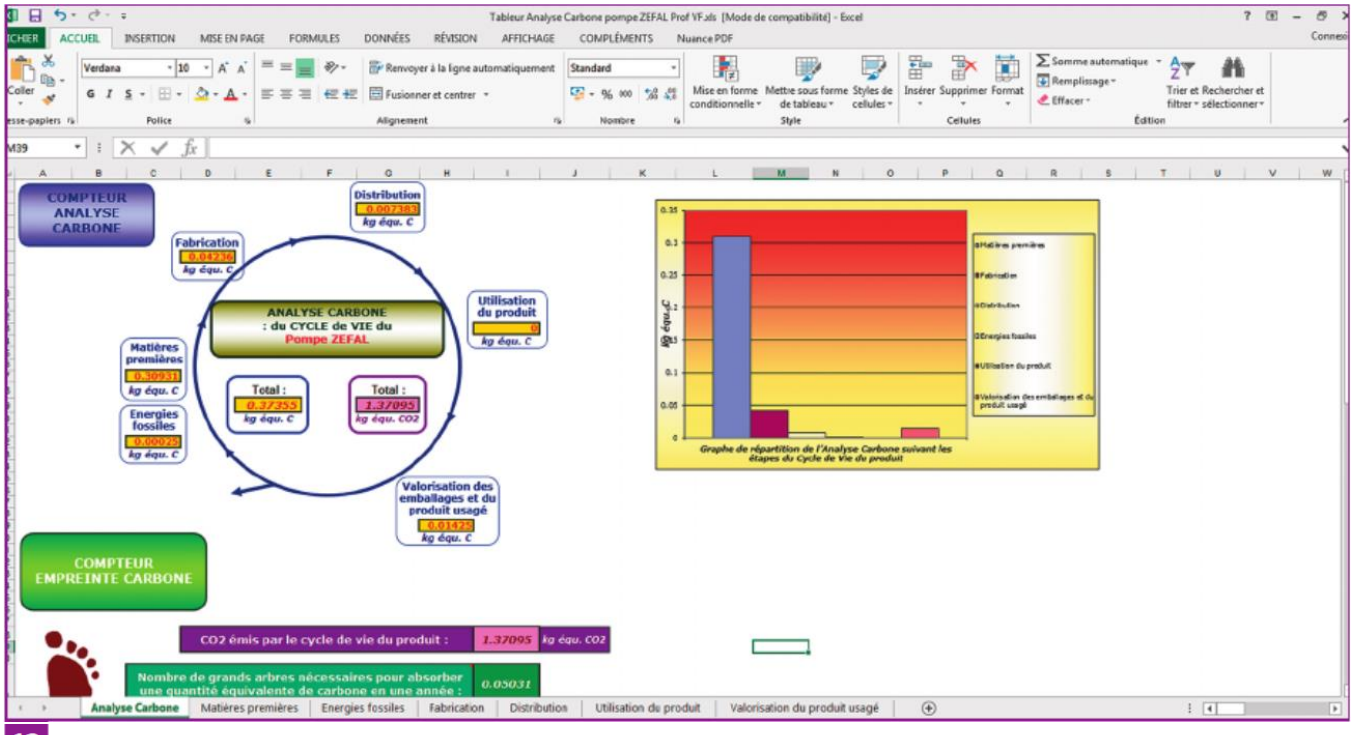
Lors d'une démarche d'écoconception, il faut garder à l'esprit que tout produit a besoin de matière et d'énergie pour être fabriqué, emballé et transporté. Tout emballage ou produit deviendra un jour un déchet. Il n'existe donc pas de produit « zéro impact environnemental ». C'est pour cette raison que le cycle de vie du produit sera toujours pris en considération [document 12]. La démarche d'écoconception n'a de sens que si elle est intégrée dans une démarche globale de conception. Les outils d'analyse de la valeur et de créativité doivent être utilisés en parallèle pour répondre efficacement aux besoins énoncés. Les systèmes au cours de leur cycle de vie ne vont pas impacter de la même manière l'environnement. Nous pouvons les classer en plusieurs catégories suivant leur influence :



12 Cycle de vie du produit.

- non consommateur d'énergie ou passif dans la phase d'utilisation ;
- consommateur d'énergie ou actif dans la phase d'utilisation ;
- éphémère ou dit jetable pour les phases d'utilisation courtes.

Bilan Carbone® est une marque déposée par l'ADEME (Agence de l'Environnement Et de la Maîtrise de l'Énergie). C'est un outil, un tableur élaboré pour réaliser le bilan carbone d'un produit [document 13].



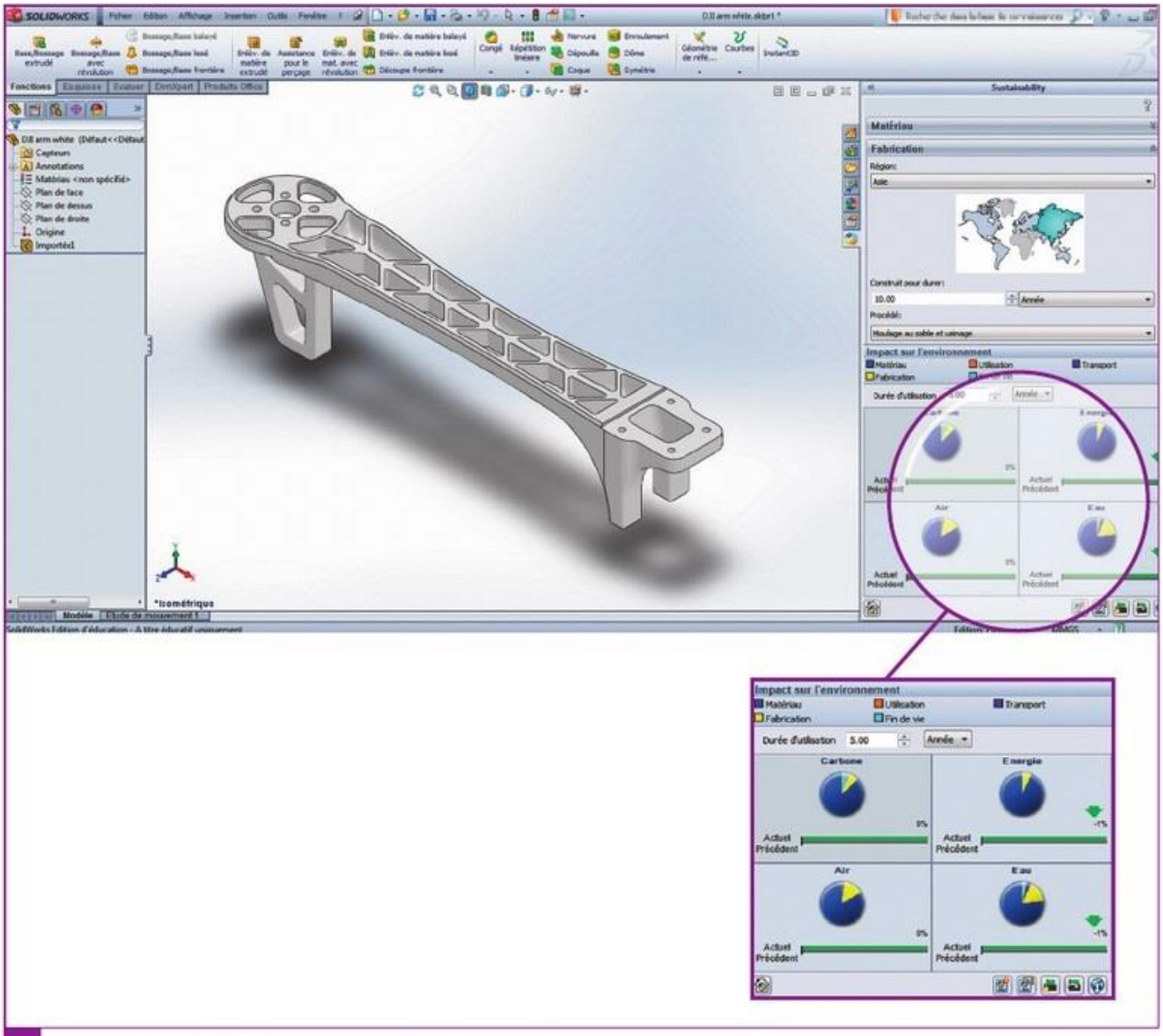
13 Page de synthèse du Bilan Carbone®.

Ressources

SolidWorks Sustainability est un module intégré au logiciel de modélisation 3D SolidWorks [document 14].

À partir d'un modèle numérique 3D, le logiciel est capable d'établir un bilan de l'impact environnemental en termes de bilan carbone, consommation des ressources naturelles en eau, air… L'exemple donné [document 15] représente le bras de liaison entre le bloc propulseur et le châssis d'un drone. En fonction du matériau, des process de production, du mode de transport… le logiciel donne un bilan de l'impact environnemental. Ce bilan évolue selon les changements de paramètres, mettant en relief les gains qu'apporte un changement de matériau ou de lieu de fabrication par exemple.

14 Logo de SolidWorks Sustainability.



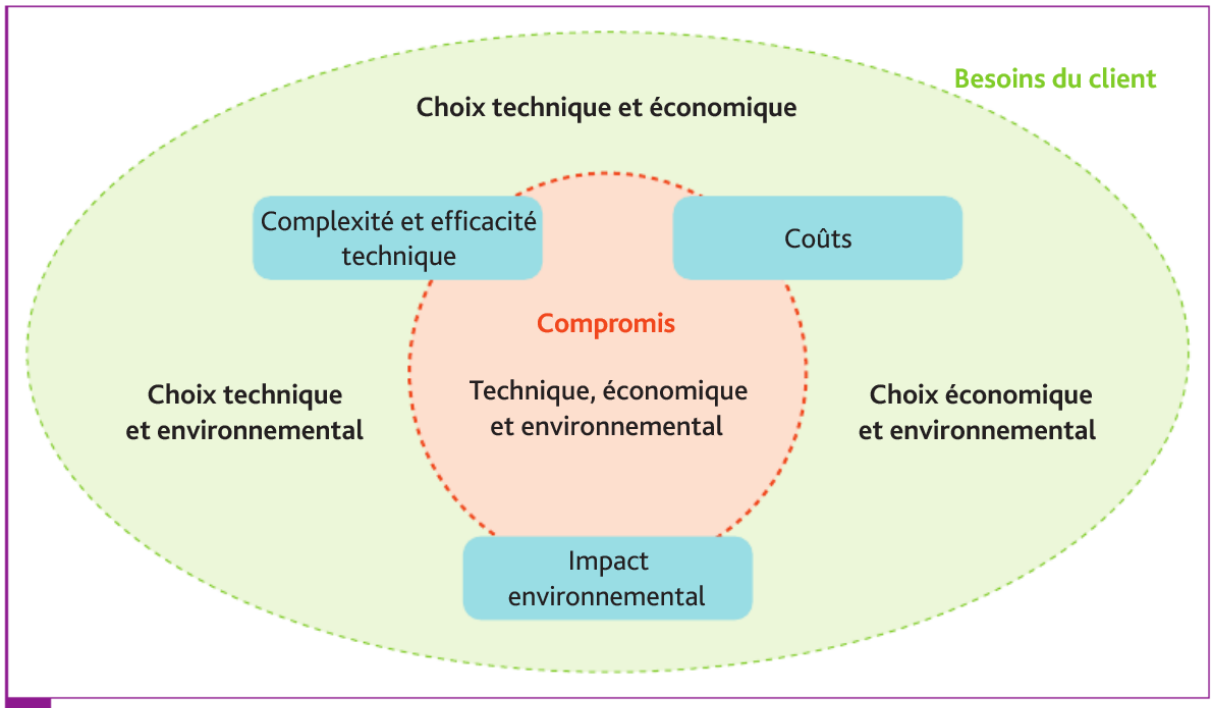
15 SolidWorks et le module intégré Sustainability.

Ressources

FICHE 5 : Compromis Complexité–efficacité–coût

I. Problématique :

Le **compromis complexité–efficacité–coût** est un enjeu majeur dans le développement de nouveaux produits ou dans l'amélioration de l'existant. Il nécessite la mise en œuvre d'outils pertinents au sein d'une démarche structurée. L'objectif est la mise en relation des besoins du client par les fonctions techniques du système, les coûts et les impacts environnementaux [document 16].



16 Définition des compromis techniques, économiques et environnementaux.

Le compromis est un juste équilibre entre les différents choix techniques, économiques et environnementaux.
Nous devons nous doter de méthodes et outils structurés pour répondre au compromis.
Plusieurs choix sont possibles.

Exemple de démarche structurée visant à optimiser l'efficacité technique

La méthode **6 sigma** de Motorola permet d'atteindre la satisfaction du client en optimisant les processus de conception et de réalisation, sans freiner la créativité suivant le principe DMAIC : Définir – Mesurer – Analyser – Améliorer (Improved) – Contrôler [document 17].

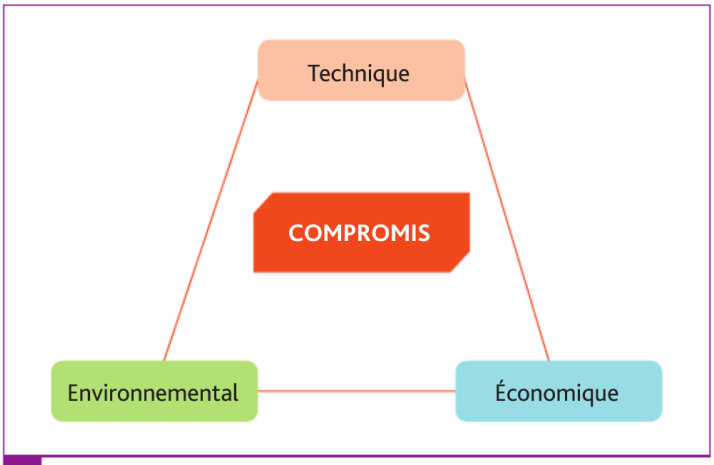
Dans les méthodes plus abordables en STI2D, nous pouvons établir des critères de comparaison par indice (indice technique, économique, environnemental). Pour être plus précis, nous pouvons aussi étudier le rapport fonction technique/coût avec la méthode de conception à coût objectif.

17 Principe de la démarche structurée par Motorola.

Ressources

II. Critères de comparaison par indice :

La comparaison de différentes solutions ou systèmes techniques ayant la même recherche de satisfaction d'un besoin nécessite la mise en place de critères de comparaison.
À partir de données sur un produit, nous pouvons calculer des indices techniques, économiques et environnementaux [document 18]. Ainsi, nous pouvons mettre en place des critères de comparaison compromis :
• technique ⇔ économique ;
• technique ⇔ environnemental ;
• économique ⇔ environnemental ;
ou bien :
• technique ⇔ économique ⇔ environnemental.



18 Compromis entre les trois critères.

Exemple de calcul d'un indice technique
Pour comparer les performances d'une tablette numérique et faire un choix d'efficacité technique, nous pouvons créer un indice technique qui se définit avec la taille de l'écran (en pouces) et la capacité mémoire (en Go). Définissons cette valeur d'indice technique comme étant le produit des valeurs « Taille écran » et « Capacité mémoire »

$$\text{Indice technique} = \text{Taille écran} \times \text{Capacité mémoire}$$

Taille : pouce
Capacité : Go

La manière de déterminer ces indices et de les calculer peut influer sur le critère de comparaison. Par exemple, un indice technique portant sur le design est toujours subjectif. L'utilisation de ces critères s'est généralisée dans différents secteurs d'activité (industrie, pharmacie, banque, services…). Les associations de consommateurs utilisent ces critères afin d'évaluer des produits ou services (voitures, téléphones, banques, transports…).

III. Relations « coût–fonctions » et « fonctions–impact environnemental »

À partir du coût d'un produit, nous pouvons déterminer le coût d'une fonction et donc vérifier si les coûts de chaque fonction sont en adéquation avec leur importance dans le système. De la même manière, pour chaque fonction et son impact sur l'environnement, nous pouvons établir des relations dans une démarche de développement durable.
Pour cette méthode, trois objectifs sont possibles :

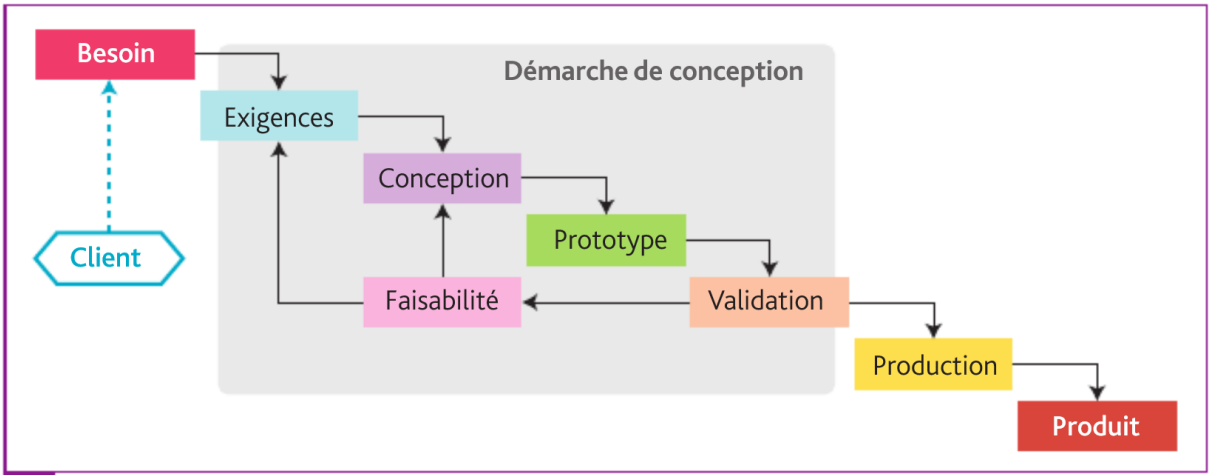
- Améliorer la qualité du produit par des fonctions techniques adaptées au besoin ;
- Réduire les coûts, en optimisant la conception et la production ;
- Réduire les impacts environnementaux.

Exemple de méthode structurée, Design To Cost (conception à coût objectif (CCO))
Cette méthode permet de mettre en relation le coût d'une fonction et son poids dans le système étudié.
Cette recherche permet à l'industriel de déterminer sur quelle fonction il pourrait agir pour faire évoluer le produit.

Ressources

FICHE 6 : Les étapes de la conception industrielle

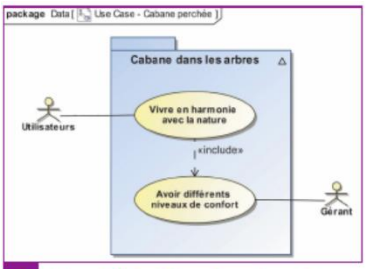
Concevoir un produit, c'est répondre aux attentes et besoins de futurs clients. Des outils normalisés et des démarches structurées permettent de formaliser et d'organiser la démarche de conception [document 1].



1 Organisation dans la démarche de conception.

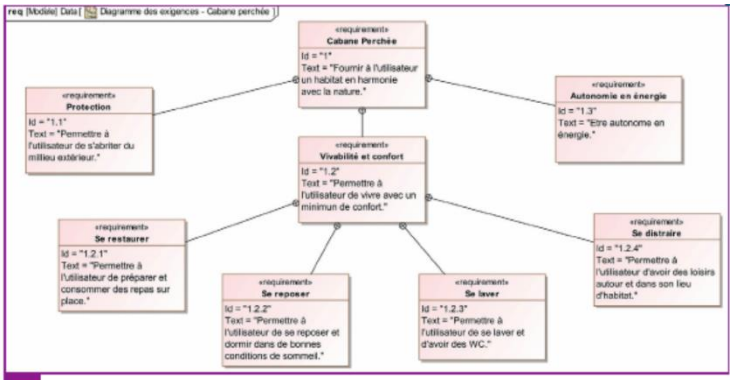
I. Le besoin du client dans la démarche de conception

Le besoin client est « ce qui est nécessaire à l'utilisateur ou désiré par lui » (norme NF EN 1325-1).
Le concepteur identifie **les besoins du client** après une étude de marché. Ces besoins sont structurés en langage SysML par **le diagramme des cas d'utilisation** [document 2].
Les besoins sont ensuite **définis sous forme d'exigences**, toujours structurées en langage SysML par **le diagramme des exigences** [document 3]. Dans la démarche de conception, une exigence est la description de ce qu'un système doit faire pour répondre au besoin du client.



2 Identification des besoins : le diagramme des cas d'utilisation.

Les exigences du futur produit sont traduites sous forme de **fonctions de service** (fonctions principales et fonctions contraintes à assurer), sans référence aux solutions techniques. La rédaction est formulée précisément dans un document nommé **cahier des charges fonctionnel (CdCf)** suivant la norme AFNOR NF X50-151 [document 4].
Le cahier des charges fonctionnel d'un produit est un document (le **contrat**) établi entre le client (le **demandeur**) et l'entreprise (le **concepteur**). Le CdCf est donc un document contractuel qui engage la responsabilité des deux parties.



3 Traduction du besoin sous forme d'exigences : le diagramme des exigences.

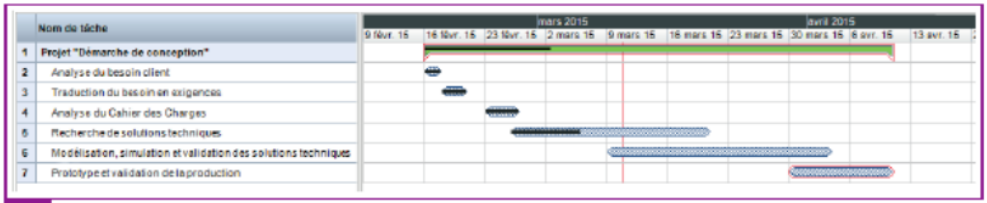
II. La planification des exigences :

L'objectif de cette étape est de recenser les différents acteurs et les exigences du projet pour mettre en évidence le chemin critique, les voies d'améliorations possibles et les stratégies de conception. Par exemple, cette étape permet de définir les moyens mis en œuvre (financiers, humains, techniques…). On utilise souvent un diagramme temporel, dit diagramme de Gantt [document 5].

Ressources

Exigences	Critères d'appréciation	Niveaux d'appréciation requis	Degré de flexibilité
Redécouvrir la nature	Accueillir les utilisateurs dans un ou plusieurs arbres Offrir à ses utilisateurs des points de vue sur l'environnement naturel	Pas d'autres habitations en vue directe depuis chaque cabane	Intangible
Être perchée dans les arbres	Hauteur par rapport au sol	Entre 3 et 30 m	+/– 2 m
Garantir la sécurité	Résistance des matériaux utilisés Résistance des liaisons entre les différents éléments constructifs Protéger les utilisateurs des chutes	Respect des normes Eurocodes en rapport avec le matériau utilisé pour la structure	Intangible

4 Traduction de fonctions de service : le cahier des charges fonctionnel.



5 Planification des étapes de conception et de réalisation.

III. Les différentes étapes clés de la démarche de conception

a) Étude de faisabilité ou conception préliminaire

Avant la phase de conception préliminaire, l'étude de faisabilité définit l'architecture du produit (matériaux, énergies, informations).

Pendant la phase de conception préliminaire, l'étude de faisabilité sert à **évaluer** si l'entreprise est capable de **réaliser techniquement** le produit et chacune des solutions envisagées, tout en respectant les coûts et délais prévus dans le CdCf et la planification.

b) Étude de conception détaillée

En utilisant toutes **les ressources humaines et techniques** de l'entreprise, c'est-à-dire tous les corps de métiers intervenant sur **le projet pluritechnique**, cette étape permet de :

- Rechercher des solutions, des modélisations et simulations (virtuelles et multiphysiques) ;
- Réaliser des notices de calcul, expérimentation, analyse, comparaison et choix de solutions.

Tout ceci dans le respect absolu du cahier des charges et du critère économique [Fiche 5]. C'est aussi lors de cette étape importante du projet que l'analyse du cycle de vie (ACV) du produit doit **optimiser son impact environnemental**.

c) Réalisation de prototype(s)

Le modèle numérique permet de réduire les temps d'étude et de validation des solutions sans passer obligatoirement par la réalisation **d'un prototype**, bien que cette étape reste obligatoire pour certains produits devant passer une certification (par exemple en aéronautique).

Le prototypage est la **fabrication unitaire** d'une pièce ou d'un système complet servant à **valider les modèles et les solutions retenus**.

Un prototype permet de tester le fonctionnement de tout ou partie du produit, vérifier la résistance, la fiabilité, la longévité… ou encore de vérifier l'intégration d'un sous-ensemble dans le produit complet.

Ressources

d) Phase de validation ou de qualification

La **phase de validation ou de qualification** est la **validation des solutions** retenues après corrections et tests exhaustifs sur des prototypes réussis **en conformité avec les besoins exprimés** dans le cahier des charges fonctionnel.

Nous parlons de **qualification** lorsque **le produit doit être certifié** par rapport à une norme

e) Phase de production

La phase de production est la fabrication en série du produit (les procédés utilisés diffèrent de ceux utilisés en prototypage).

Remarques :

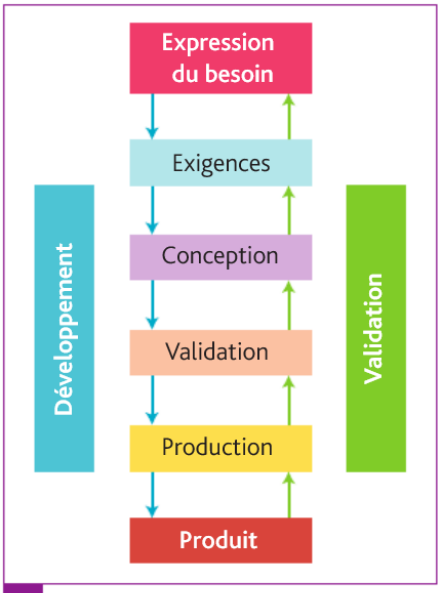
- Le produit industriel n'est pas figé en fin de conception. Il évolue toujours en cours de vie : améliorations, ajout de fonctions, évolutions du design et des matériaux…
- En génie civil, la fabrication en série est rare, hormis quelques maisons préfabriquées (en kit ou modulaires). Chaque construction est différente et constitue donc un prototype. Cela accroît le risque de défauts de fabrication.
- L'expérience, le savoir-faire et l'adaptation des intervenants tout au long de la chaîne limitent les défauts constatés

IV. Les différents cycles de développement

a) Le cycle en cascade

Le **cycle en cascade** est un héritage de **l'industrie du BTP** (son principe : on ne peut pas construire les murs ou la toiture avant les fondations). Les étapes sont réalisées les unes après les autres, **la validation s'effectuant partiellement à chaque étape.** La validation complète est réalisée à la fin de la phase de production [document 6].

Inconvénient : les défauts sont décelés tardivement, peuvent entraîner des modifications plus importantes donc beaucoup plus coûteuses.

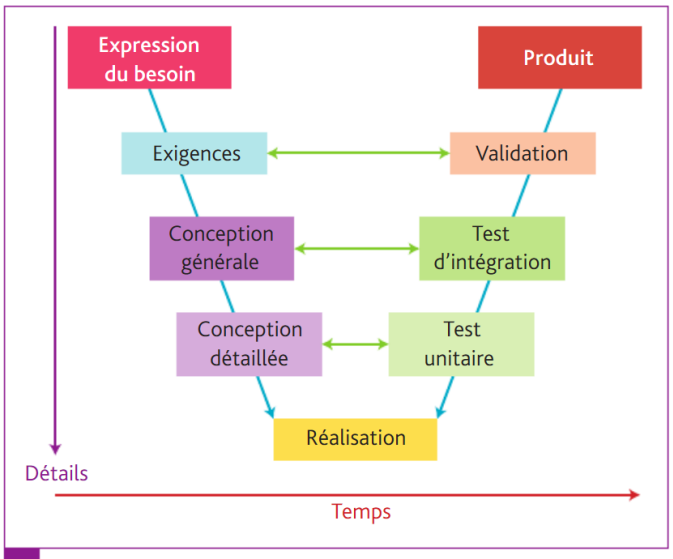


6 Cycle en cascade hérité de l'industrie du BTP.

b) Le cycle en V

Le cycle en V a été imaginé pour pallier au manque de réactivité du cycle en cascade. Ce modèle est **une amélioration du modèle en cascade** qui permet, en cas d'anomalie, de limiter le retour aux étapes précédentes [document 7]. Les phases de la partie montante doivent renvoyer de l'information sur les phases en vis-à-vis lorsque des défauts sont détectés afin d'améliorer le produit. De plus, le cycle en V met en évidence la nécessité **d'anticiper et de préparer** dans les étapes descendantes les « attendus » des futures étapes montantes : par exemple, les attendus des tests de validation sont définis lors des exigences.

Le cycle en V est devenu un standard de l'industrie du développement de logiciels et de la gestion de projet depuis les années 1980.



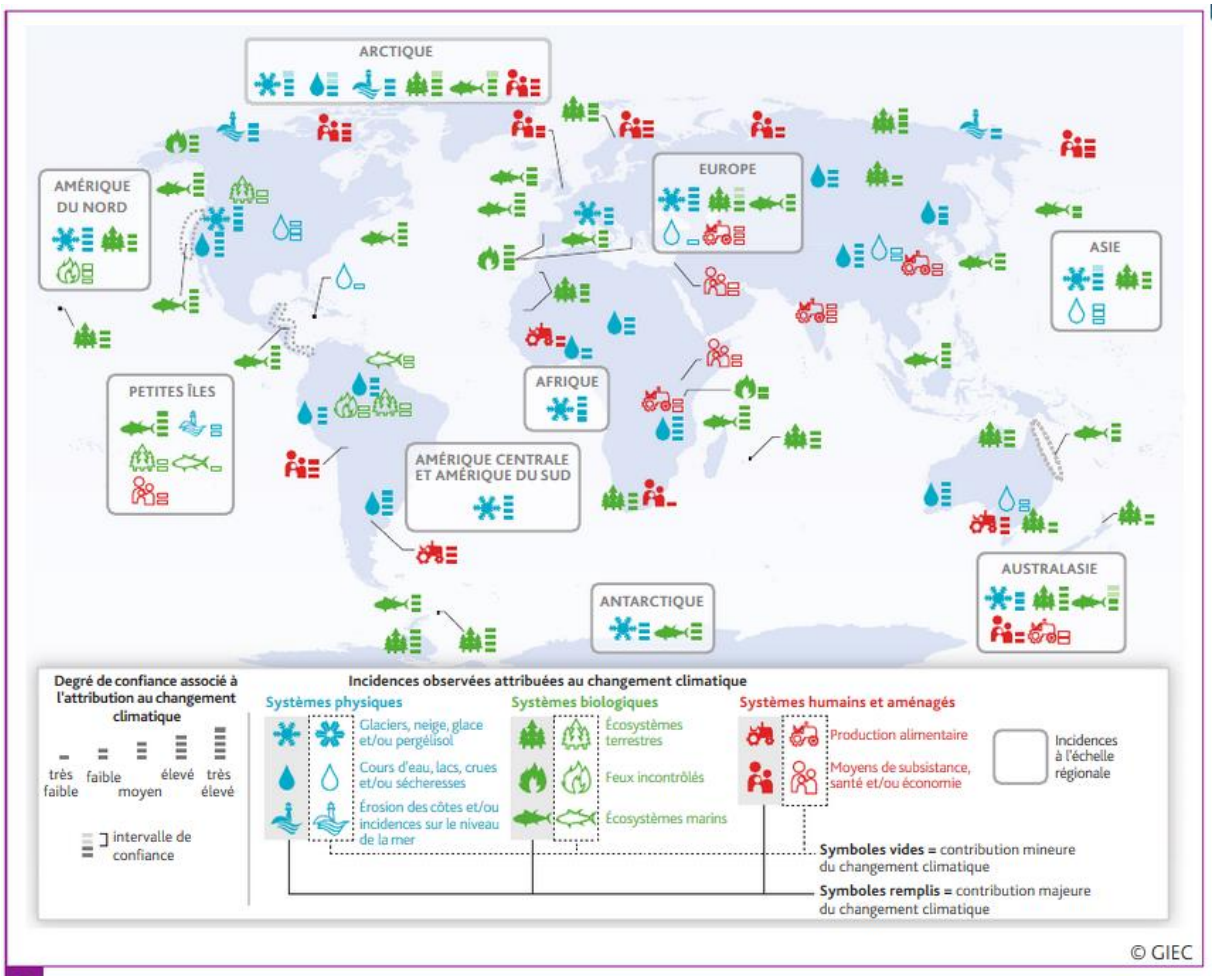
7 Cycle en V hérité du cycle en cascade.

Ressources

FICHE 7 : Impacts environnementaux de l'activité humaine

I. Dans quel état est la planète ?

Depuis le début de l'utilisation de la machine à vapeur puis de l'électricité comme énergie d'industrialisation, la planète a été impactée de manière exponentielle. En un siècle, l'activité humaine a bouleversé l'environnement, en grande partie à cause de nos modes de vie et nos choix énergétiques. L'impact des activités humaines et les rejets de polluants associés deviennent problématiques et menacent l'avenir de l'humanité. Les dégâts sur l'environnement sont souvent irrémédiables et les dérèglements climatiques ont des conséquences sur la faune, la flore mais aussi sur les êtres humains dans leur vie quotidienne [document 8].

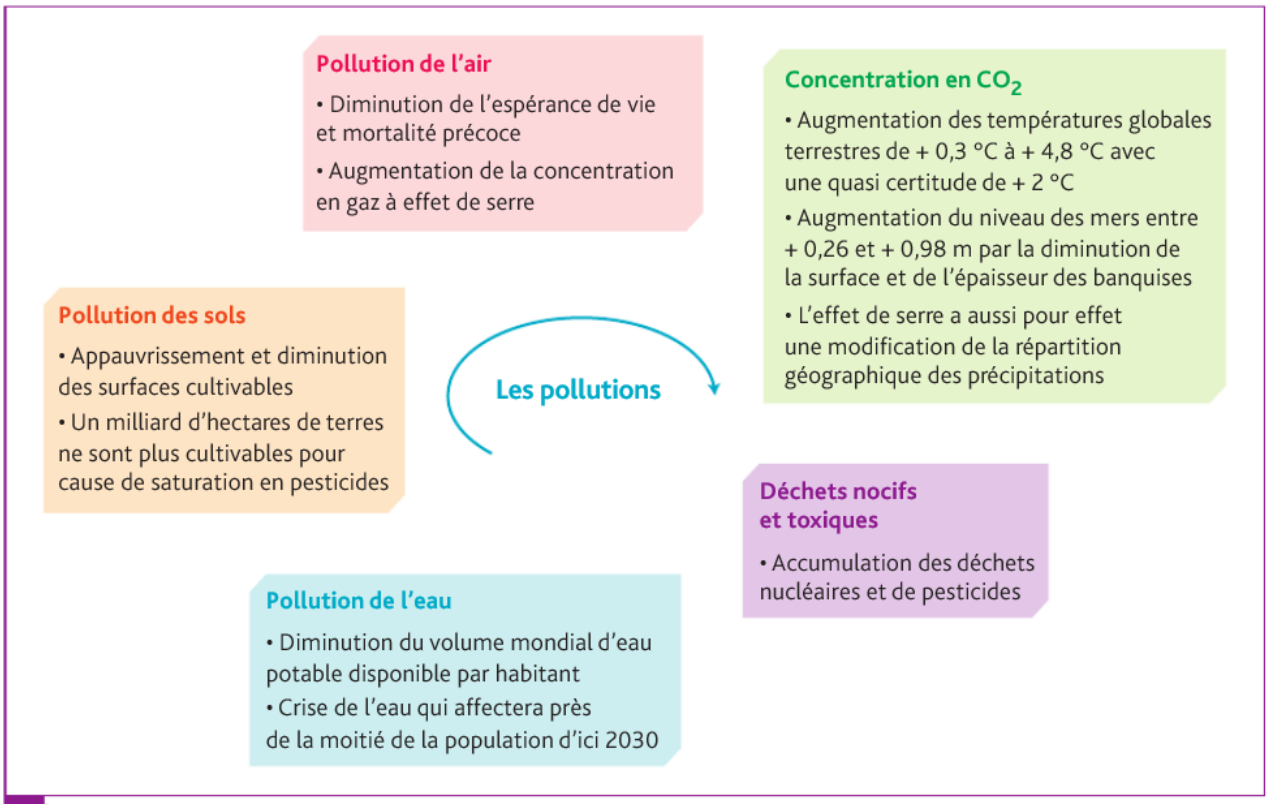


8 Impacts de l'activité humaine sur la planète.

Ressources

II. Les pollutions :

Les pollutions proviennent de l'activité de l'Homme. Elles ont différentes formes mais elles agissent toutes sur les éléments vitaux que sont l'air, l'eau et les sols de notre planète [document 9].



9 Impact des pollutions humaines sur la planète.

III. L'épuisement des ressources :

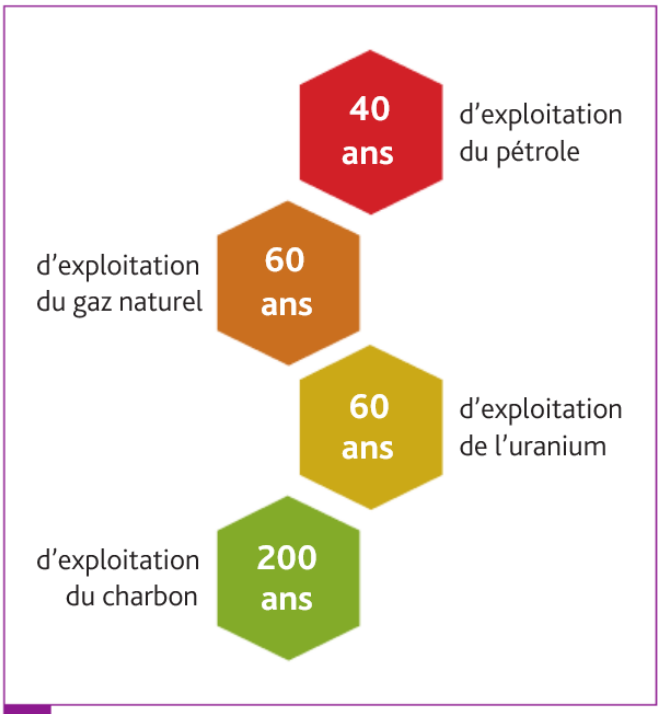
a) Épuisement des réserves en énergies

En 2007, en tenant compte de la consommation annuelle de cette année-là, il restait, comme gisements facilement exploitables, entre 40 et 200 ans de ressources en énergies non renouvelables [document 10].

b) Pénuries futures en métaux rares

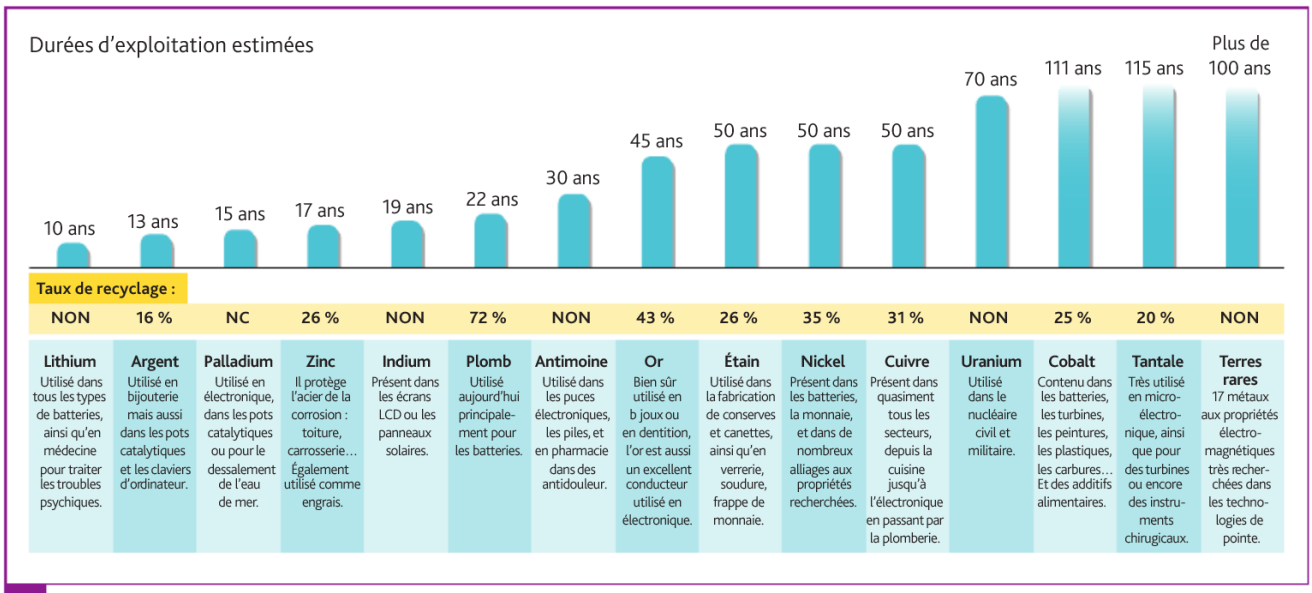
Les cours des minerais s'envolent sur les métaux rares (antimoine, gallium, niobium, germanium, tantale…). Ces métaux sont très utilisés dans des secteurs technologiques de pointe et stratégiques (batterie, moteur synchrone, laser, LED…).

Très peu de pays ont la main mise (Chine, Chili, République Démocratique du Congo, Russie…) sur ces métaux d'avenir. Cela entraîne des guerres économiques et militaires [document 11].



10 Ressources disponibles en énergies non renouvelables.

Ressources



11 Les métaux en voie d'extinction et leur utilisation.

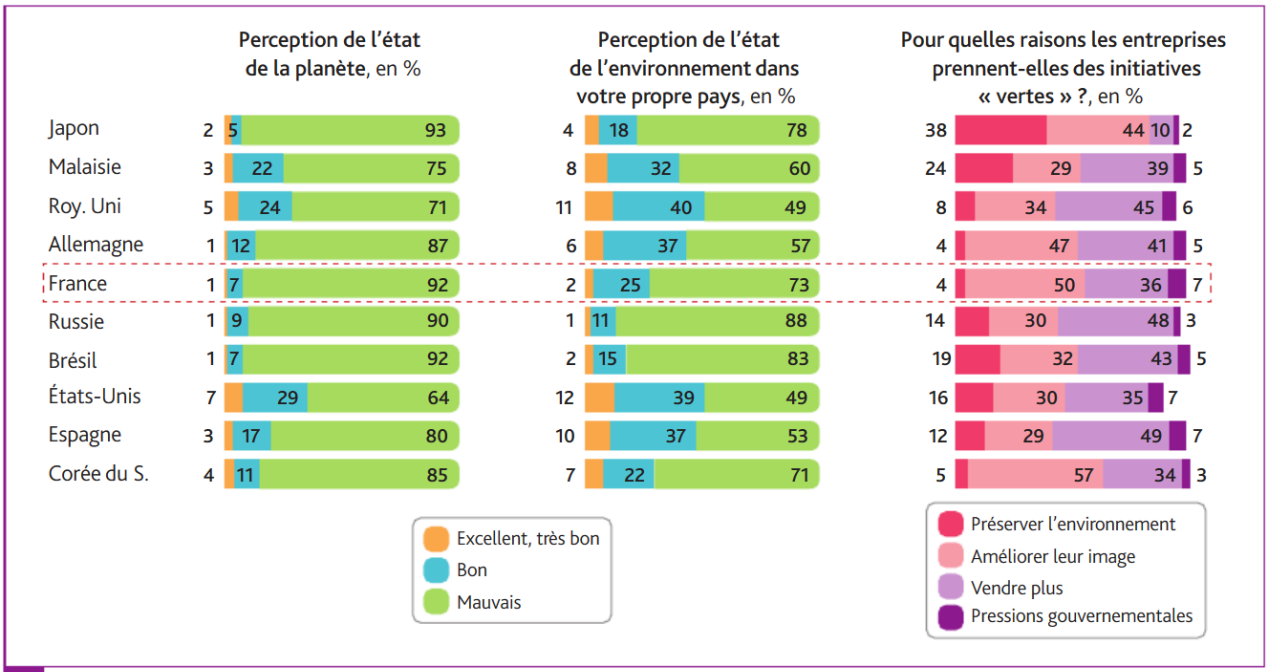
IV. La diminution de la biodiversité

Une espèce animale ou une plante disparaît toutes les 20 minutes, soit environ 26 000 espèces disparues chaque année. **Près d'un quart des espèces animales et végétales pourrait disparaître d'ici le milieu du XXIe siècle en raison des activités humaines** :

- Disparition des habitats naturels (forêts, récifs coralliens…) ;
- Surexploitation, pollutions industrielles et agricoles ;
- Introduction d'espèces invasives dans des milieux déjà fragiles ;
- Modifications rapides du climat.
-

Sans **prise de conscience globale, d'actions « initiatives vertes »**, de développement de **l'écoconception** et du **développement durable**, les risques sont importants [document 12].

Ressources

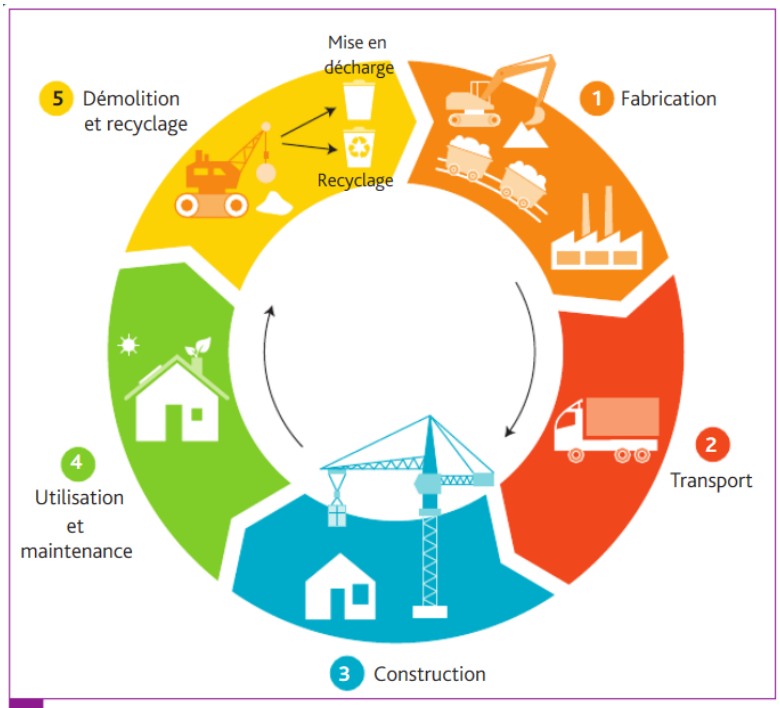


12 Prise de conscience de l'impact de l'activité de l'Homme sur la planète.

FICHE 8 : Cycle de vie et impacts environnementaux

I. Qu'est-ce que le cycle de vie et l'ACV ?

Lors de la conception d'un produit, il ne faut pas se limiter à étudier les impacts environnementaux en phase d'utilisation. Le concepteur d'un produit est tenu de prendre en compte dans le cahier des charges toutes les phases : de l'extraction des matières premières, en passant par la fabrication, les transports, l'utilisation, et jusqu'au traitement final des déchets



13 Cycle de vie d'un bâtiment.

On distingue :

• **le cycle de vie** qui est l'ensemble des étapes de vie du produit [document 13] ;

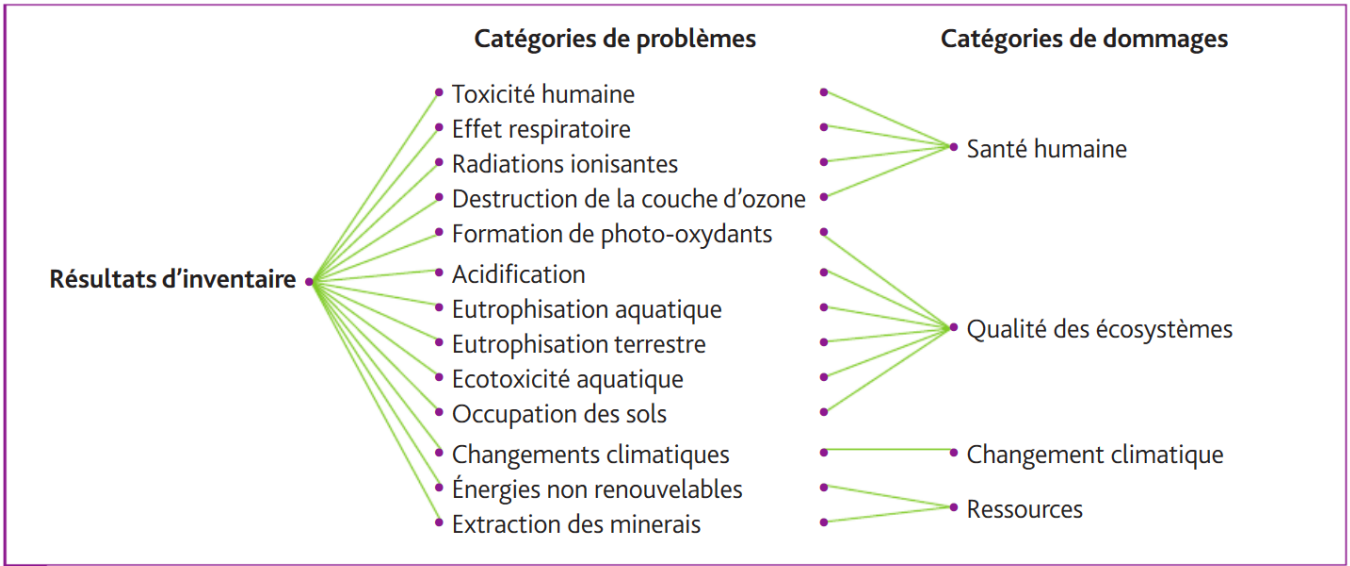
• **l'Analyse du Cycle de Vie (ACV)** qui permet de quantifier les impacts environnementaux d'un produit tout au long de son cycle de vie.

L'ACV consiste à réaliser un bilan des consommations d'énergies, des ressources naturelles et des émissions dans l'environnement à chaque étape du cycle de vie. Ces éléments sont ensuite :

• soit directement exploités (consommation d'eau, consommation d'énergie) ;

• soit traduits en indicateurs d'impacts potentiels sur l'environnement (potentiel de réchauffement climatique, eutrophisation de l'eau…).

L'ACV va permettre de quantifier d'autres impacts environnementaux qui sont définis dans diverses méthodes comme la méthode IMPACT 2002+ [document 14].



14 Impacts environnementaux de la méthode IMPACT 2002+.

Ressources

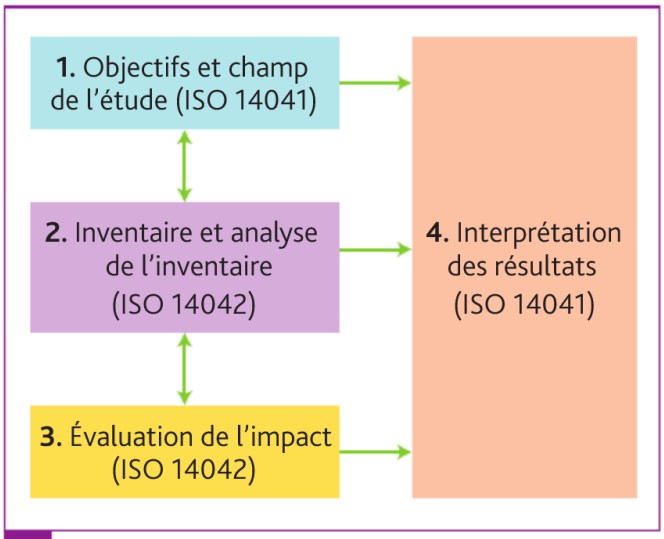
Cette ACV se fait en 4 étapes selon la définition des normes ISO [document 15].

1. La définition des objectifs de l'analyse et du périmètre de l'étude.

2. L'inventaire des émissions et des extractions : flux de matières et d'énergies durant le cycle de vie.

3. L'analyse de l'impact à partir des flux précédemment évalués.

4. L'interprétation tout au long de l'étude des résultats.



15 Principe général de l'ACV.

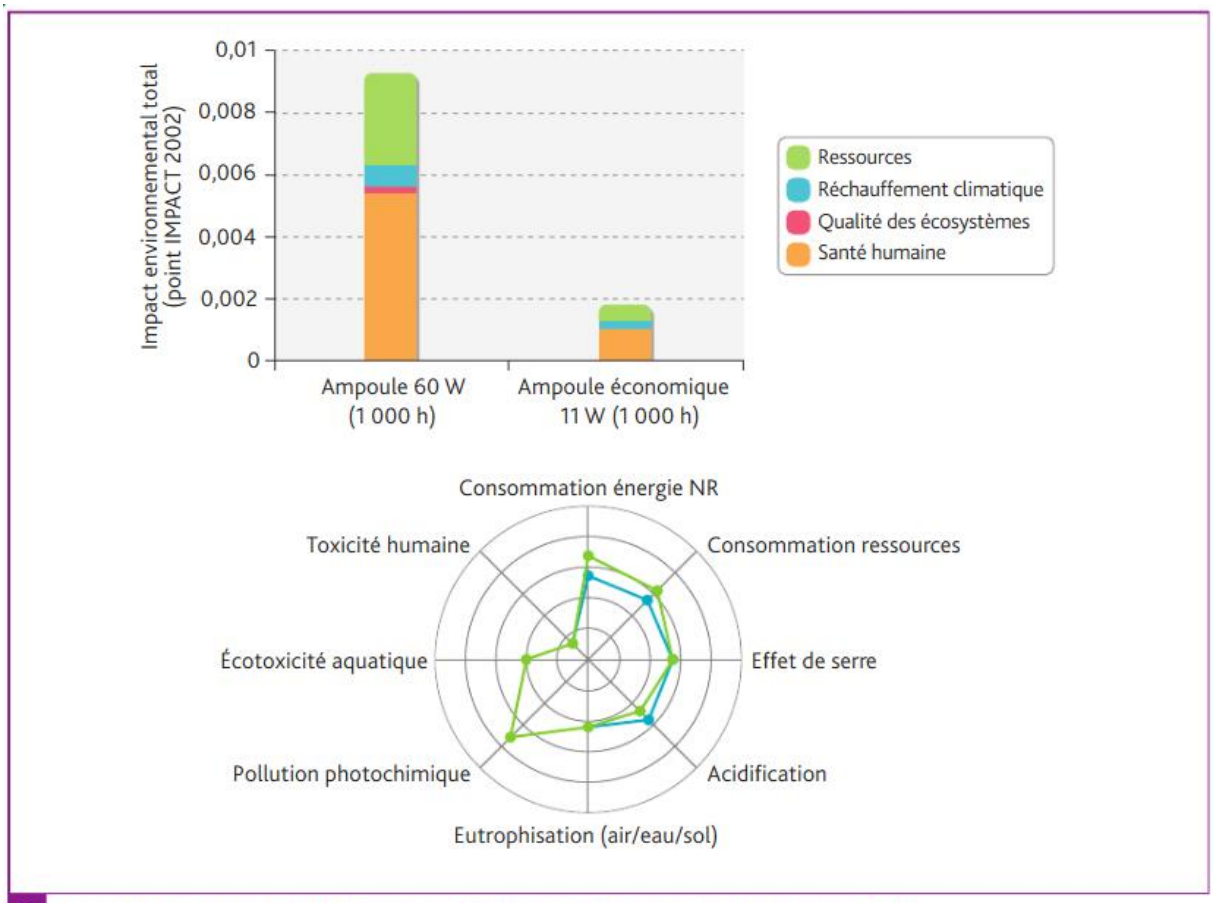
a) Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle (UF) est la grandeur quantifiant la fonction principale du système. Par exemple, une UF peut être : « Chauffer une cabane en bois de 40 m^2 à proximité de Carcassonne à toute saison durant la durée de vie de l'ouvrage ».

La définition « unité fonctionnelle » implique de considérer en général les trois éléments suivants :

- **La fonctionnalité attendue** (chauffer une cabane de 40 m^2) ;
- **La durée du service** rendu durant toute la vie de l'ouvrage (15 ans) ;
- **La qualité attendue** (chauffage assuré à toute saison).

L'analyse ACV permet donc de comparer deux produits, mais il faut toutefois que **l'unité fonctionnelle** soit identique [document 16].



16 Exemples de représentations graphiques des impacts basés sur une ACV.

Ressources

b) Les substances de référence

Un impact environnemental peut être dû à plusieurs **substances**. On aura donc **une substance de référence pour chaque impact** [document 17].

XIII. Les indicateurs selon P 01-020-3			
	Indicateur	**Informations complémentaires**	**Unité**
Ressources	Consommation de ressources énergétiques non renouvelables	Consommation de ressources énergétiques renouvelables	kW·h équivalent pétrole
	Consommation de ressources énergétiques non renouvelables, épuisables	Consommation de ressources non énergétiques non renouvelables, non épuisables	kg
		Consommation de ressources énergétiques renouvelables	kg
	Consommation totale de l'eau	Consommation d'eau potable	m^3
	Consommation de foncier	–	m^2
	Biodiversité	–	–
Air	Pollution de l'air	–	m^3 air
	Changement climatique	–	kg éq. CO_2
	Acidification atmosphérique	–	kg éq. SO_2
	Formation d'ozone photochimique	–	kg éq. C_2H_4
Eau	Pollution de l'eau	–	m^3
	Eutrophisation	–	kg éq. PO_4^{2-}
Déchets	Dangereux	Déchets valorisés	t
	Non dangereux		t
	Inerte		t
	Radioactif		t

17 Impact environnemental et substances de référence.

c) Les unités utilisées pour l'énergie

Pour parler et quantifier l'énergie, on utilise de nombreuses unités de mesure [document 18].

Exemple pour les gaz à effet de serre (GES) : le g équivalent CO_2 avec 1 g de méthane (CH_4) correspond à 23 g de CO_2.

Préfixes utilisés dans le Système international d'unités :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Pr%C3%A9fixes_du_Syst%C3%A8me_international_d%27unit%C3%A9s

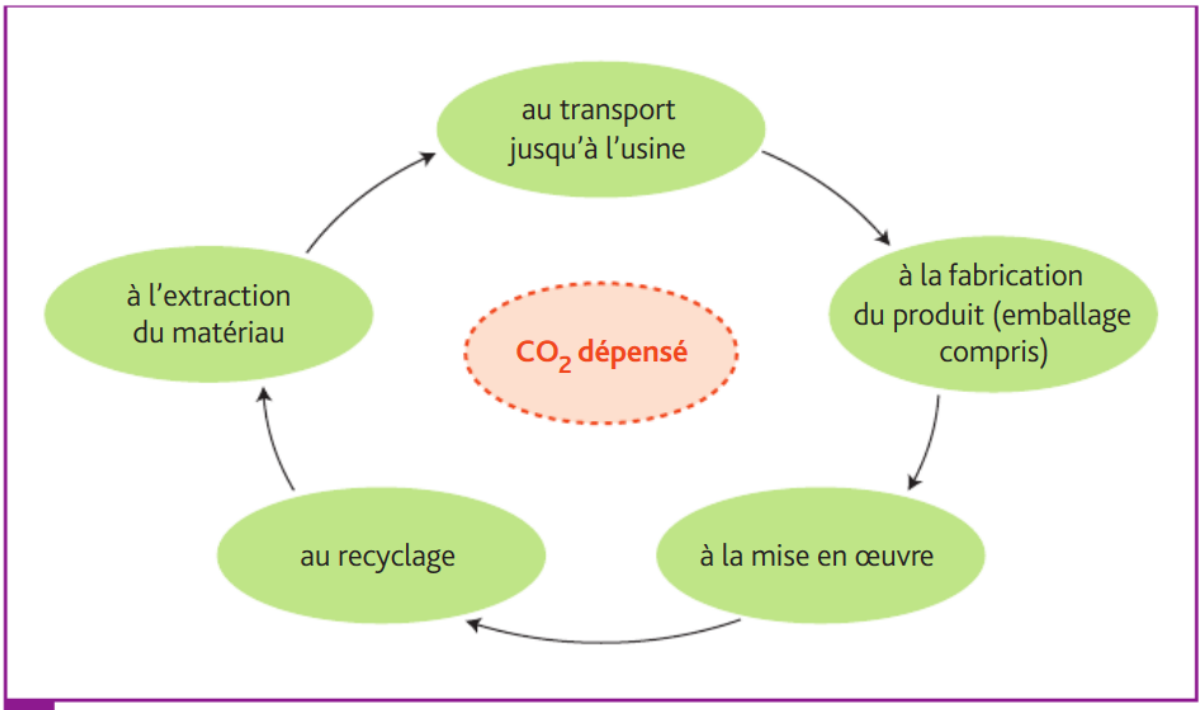
1 … équivaut à :	GJ	tep	MBtu	kW·h	m^3 de gaz	Baril de pétrole
GJ	1	0,0238	0,945	278	23,89	0,1751
tep	41,855	1	39,68	11 628	1 000	7,33
MBtu	1,0551	0,0252	1	293,1	25,2	0,185
kW·h	0,0036	$0{,}086 \cdot 10^{-3}$	$3{,}412 \cdot 10^{-3}$	1	0,086	$630{,}4 \cdot 10^{-6}$
m^3 de gaz	0,041855	10^{-3}	0,03968	11,628	1	$7{,}33 \cdot 10^{-3}$
baril de pétrole	5,7	0,1364	5,4	1 580	136,4	1

18 Conversions entre différentes unités d'énergie.

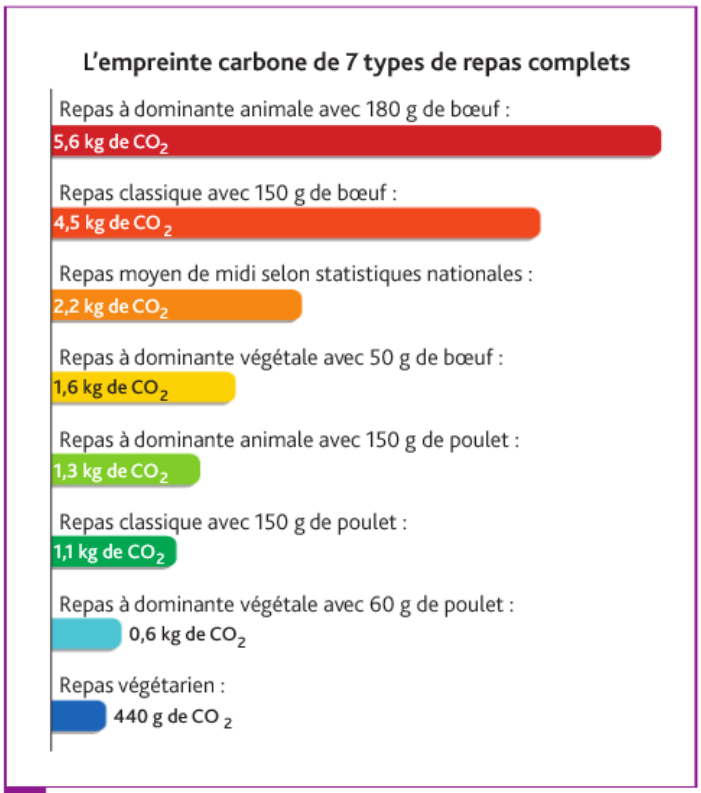
II. Qu'est-ce qu'un bilan carbone ?

Les calculs d'une ACV ou d'un bilan carbone reposent sur des approches similaires. La différence est que le bilan carbone comptabilise uniquement les émissions de CO_2 engendrées par l'activité tout au long de son cycle de vie [documents 19 et 20].

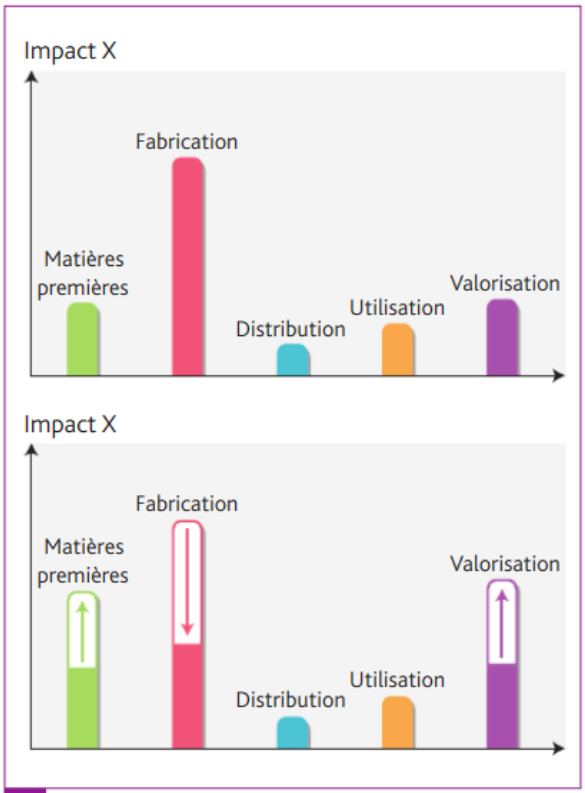
Un bilan carbone est intéressant parce qu'il est rapide et simple à interpréter (critère unique) mais engendre parfois des conclusions hâtives et surtout des transferts d'impact [document 21]. En effet, un produit peut voir son bilan carbone réduit de 15 % mais son impact écotoxique peut augmenter de 50 % par exemple.



19 Cycle pris en compte pour un bilan carbone.



20 Exemple de bilan carbone.



21 Illustration d'un transfert de pollution.

Ressources

FICHE 9 : Qu'est-ce que l'écoconception ?

L'écoconception est une notion évolutive dont **l'AFNOR** (**A**gence **F**rançaise de **NOR**malisation) a donné une définition en 2004, puis l'a complétée en 2013 :

- « L'écoconception consiste à intégrer l'environnement dès la conception d'un produit ou d'un service, et ce lors de toutes les étapes de **son cycle de vie** » (AFNOR, 2004) ;
- « Cette approche, dès l'amont d'un processus de conception, vise à trouver le meilleur équilibre entre les exigences environnementales, sociales, techniques et économiques dans la conception et le développement de produits » (NF X 30-264).

Quels sont les outils pour un technicien, un ingénieur pour mener à bien cette écoconception ? Comment mener un projet d'écoconception

I. Quelles sont les pistes de travail de l'écoconception ?

a) Définir l'objectif de l'étude du produit.

- Est-ce **l'amélioration** d'un produit existant en améliorant ses qualités environnementales ?
- Est-ce **la conception** d'un nouveau produit ou une rupture avec ce qui existe ? (Exemple du passage de l'ampoule incandescente à la technologie LED qui est une innovation de rupture).

b) Analyser et prévoir le cycle de vie du futur produit.

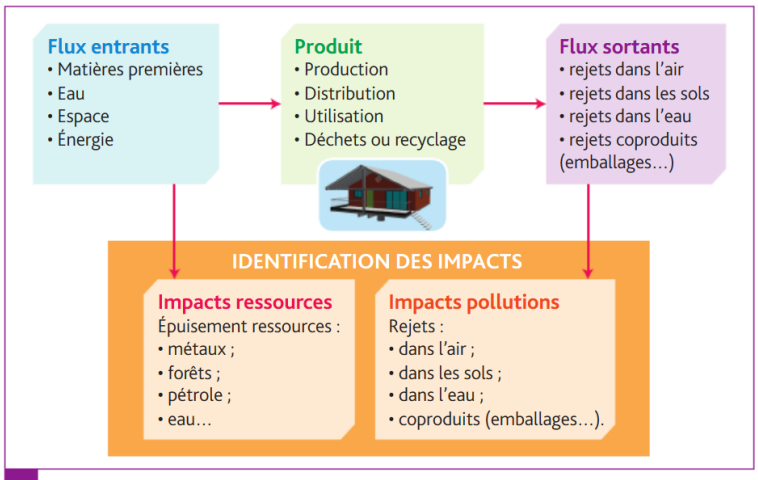
- Il s'agit ici d'évaluer le service rendu par le produit dans sa phase d'utilisation.
- Lister et définir les étapes du cycle de vie du produit et de ses composants.

c) Réaliser une étude environnementale [doc22].

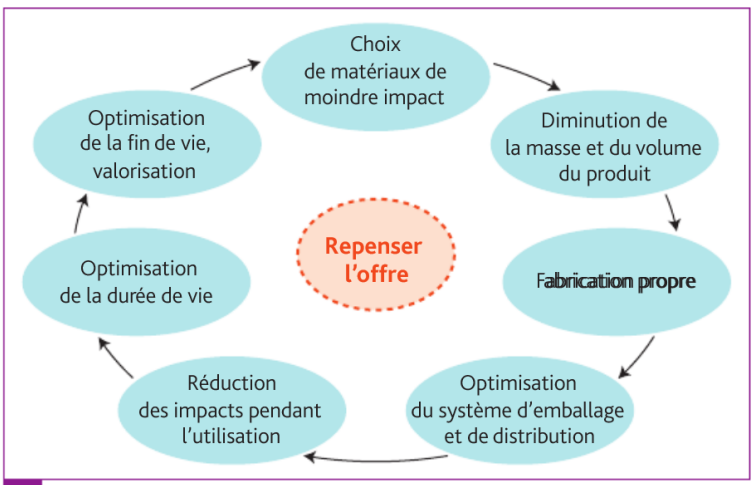
- Dresser un état des lieux des flux entrants et sortants (matières premières, air, eau, énergie, sites et sols, odeurs, bruit, déchets).
- Évaluer les impacts sur l'environnement.

d) Rechercher des pistes d'amélioration.

Il faut **repenser l'offre** (le produit) et travailler sur tous **les paramètres influant sur les impacts environnementaux** : les choix de matériaux, les masses des produits, les procédés de fabrication et de distribution [doc23].



22 Schéma des flux et des impacts dans une étude environnementale.



23 Repenser l'offre dans une démarche d'écoconception.

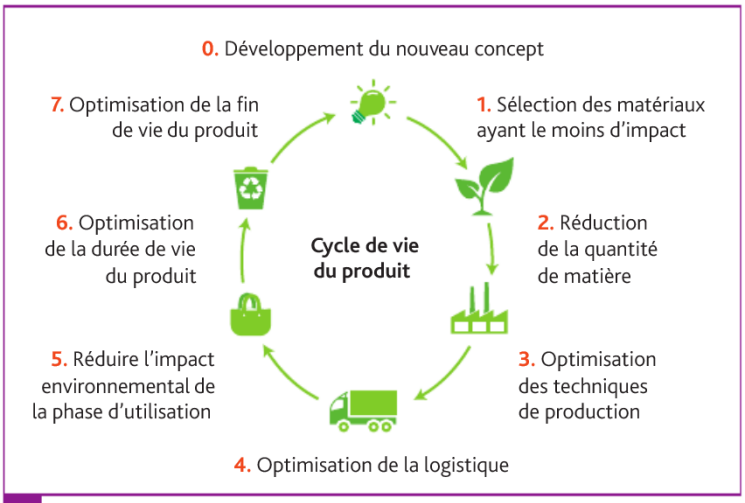
Ressources

II. Quels sont les outils disponibles pour faire de l'écoconception ?

a) Les axes d'améliorations possibles.

Un des premiers outils disponibles pour faire de l'écoconception est **la roue de Brezet** [document 24]. Cette approche aide à la définition d'une stratégie d'écoconception par le choix d'axes d'amélioration du produit. Elle donne **une liste des solutions et stratégies à l'écoconcepteur** en tenant compte de l'ensemble du cycle de vie d'un produit. Il reste donc à imaginer et étudier des solutions pertinentes et applicables au produit.

Les 8 points de la roue de Brezet donnent des pistes de travail concrètes pour les concepteurs [document 25].



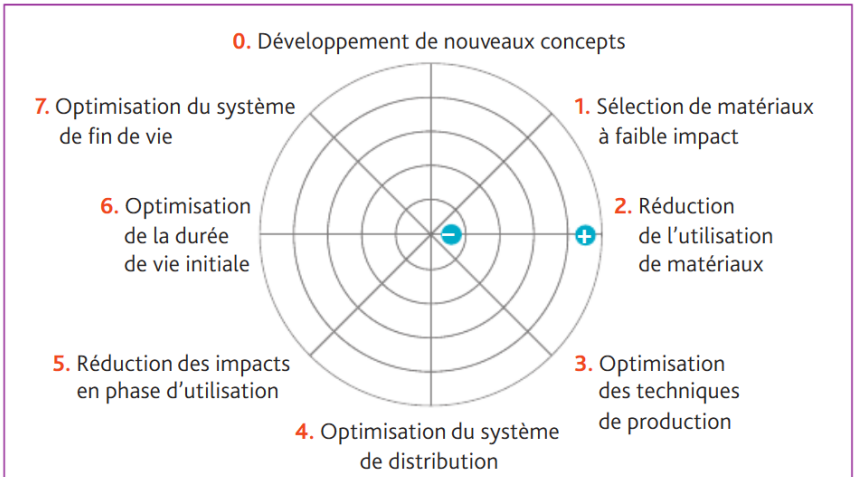
24 La roue de Brezet : outil d'aide à l'écoconception.

0. Développer de nouveaux concepts Repenser la façon de fournir le service. Dématérialisation. Utilisation partagée. Intégration de nouvelles fonctions. Optimisation fonctionnelle du produit. Biomimétisme.	**4. Optimiser la logistique** Emballages réduits. Emballages adaptés. Emballages moins polluants. Emballages réutilisables/recyclables. Modes de transport. Logistique optimisée, approvisionnements locaux.
1. Sélectionner des matériaux à moindre impact Matériaux moins toxiques. Matériaux renouvelables. Matériaux recyclés. Matériaux recyclables. Matériaux à contenu énergétique moindre. Matériaux naturels.	**5. Réduire l'impact de la phase d'utilisation** Diminuer la consommation d'énergie. Utiliser de l'énergie moins polluante/renouvelable. Réduire la consommation de consommables. Consommables moins polluants. Réduire la production de déchets. Minimiser les pertes et les gaspillages.
2. Réduire l'utilisation des matériaux Réduction en masse. Réduction en volume. (Re)design des pièces pour optimiser la fonction. Rationalisation/diversité.	**6. Optimiser la durée de vie du produit** Durabilité et fiabilité du produit. Faciliter la maintenance et l'évolution. Structure modulaire. Penser au design (effets de mode, renouvellement). Renforcer le lien produit/utilisateur.
3. Optimiser les techniques de production *Best Available Technologies*. Réduire les étapes de production. Diminuer la consommation d'énergie. Choisir des technologies propres. Réduire les déchets. Diminuer l'utilisation de consommables. Choisir des consommables moins polluants.	**7. Optimiser la fin de vie** Remise à niveau/refabrication. Réutilisation/*upcycling*. Recyclage *closed-loop*. Désassemblage facilité. Biodégradation. Incinération moins polluante.

25 Les 8 points de la roue de Brezet.

Ressources

En fin d'étude, on peut visualiser l'impact et le résultat de l'étude grâce à une roue araignée synthétisant les résultats suivant les axes d'améliorations [document 26].



26 Résultat des améliorations suivant les axes de la roue de Brezet.

b) La modélisation en écoconception

La démarche d'écoconception est basée sur **une modélisation**, souvent effectuée à l'aide de logiciels spécialisés. La modélisation permet d'identifier les impacts du produit ou du service sur différents **indicateurs environnementaux** (réchauffement climatique, impacts sur l'eau, sur l'air, utilisation des ressources non renouvelables…). À l'aide des résultats de cette modélisation, on peut identifier les étapes du cycle de vie du produit où il sera possible de définir des **axes d'optimisation qui permettront de réduire les impacts du produit**.

En réalité, la plupart **des produits écoconçus** le sont par des améliorations de l'existant car il est souvent plus facile d'identifier l'ensemble des données d'un produit existant que d'identifier ses impacts avant même sa production.

Afin de réduire les impacts environnementaux, les critères qui sont le plus souvent pris en compte sont :

- L'utilisation de matériaux plus écologiques ou matériaux recyclés ;
- L'optimisation de l'emballage : diminution de la taille et de la masse ;
- L'optimisation du transport : limitation des distances parcourues, limitation du transport aérien…

Le choix d'un matériau pour l'écoconception s'effectue au regard de plusieurs critères suivant la durée de vie envisagée du produit [document 27].

Ressources

Stratégie de choix de matériaux en éco-conception				
		Durée de vie du produit		
		Courte	Moyenne	Longue
1 – Matériaux à faibles impacts environnementaux				
	Circuit court de distribution			
	Renouvelable			
	Non toxique			
	Eco-efficient			
2 – Durée de vie des matériaux				
	Durabilité			
	Recyclable			
	Biodégradable			
	Récupération d'énergie			
	Enfouissement			
3 – Éthique				
	Fournisseurs disposant d'un système de management de l'environnement			

27 Stratégie de choix des matériaux suivant la durée de vie du produit.

c) Évaluation de la performance environnementale d'un système

La **matrice MET (matériaux, énergie, toxicité)** permet d'évaluer la performance environnementale d'un système, de façon qualitative et simplifiée.

L'évaluation est réalisée sur le cycle de vie du produit et se focalise sur trois critères : les matériaux, l'énergie et la toxicité. Cette matrice se remplit en **équipe pluridisciplinaire**, de sorte que toutes les connaissances et expertises internes soient mobilisées [document 28].

Phase de cycle de vie	Matériau	Énergie	Toxicité
Production des matériaux	Identification et quantification des matériaux composant le système	Évaluation de la consommation énergétique engendrée par la production de ces matériaux, par leur transformation ou encore leur acheminement jusqu'au site de production ou d'assemblage	Identification des matériaux potentiellement toxiques mais également les déchets générés pendant les phases d'extraction et de transformation
Production	Identification des matériaux auxiliaires requis pour la production	Évaluation des consommations énergétiques liées à la production	Identification des déchets produits pendant la phase de production
Distribution	Identification des matériaux requis pour le conditionnement	Évaluation des consommations liées au conditionnement et au transport jusqu'au détaillant	Identification et quantification des émissions liées aux consommations. Identification des déchets d'emballage
Utilisation	Identification des matériaux liés à l'utilisation tels que les consommables ou encore la maintenance	Évaluation de la consommation en phase d'utilisation	Identification et quantification de la production de déchets liée à l'utilisation et la maintenance
Fin de vie	Identification des matériaux nécessaires à la gestion de la fin de vie du produit	Consommation énergétique requise pour la gestion de la fin de vie du produit	Identification et quantification des déchets générés pendant la phase de fin de vie (y compris les matériaux réutilisés ou recyclés)

28 Évaluer la performance environnementale d'après la matrice MET.

Ressources

FICHE 10 : Efficacité énergétique d'un système

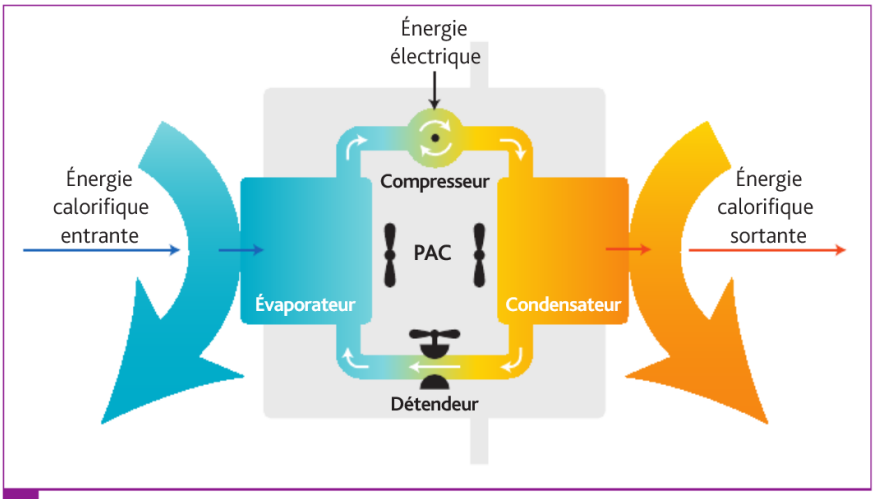
L'efficacité énergétique, ou **efficience énergétique**, consiste à réduire les consommations d'énergie, à service rendu égal, et dans une stratégie de développement durable.

L'efficacité énergétique d'un système est définie comme le rapport entre l'énergie utile sortante et l'énergie fournie entrante

$$\text{Efficacité énergétique} = \frac{\text{énergie utile en sortie}}{\text{énergie fournie en entrée}}$$

L'efficacité énergétique d'un système **est souvent confondue avec la notion de rendement.** Le rendement d'un système est le rapport d'une puissance utile sortante et une puissance absorbée entrante. C'est un rapport inférieur à 1.

Sous cette simplicité de définition se cache la subtilité de son utilisation dans la définition du système et de ses frontières. Les données d'entrées et de sorties peuvent changer le rapport.



29 Notion d'efficacité énergétique d'une pompe à chaleur.

Par exemple, le **coefficient de performance**, ou **COP**, d'une pompe à chaleur est une notion d'efficacité énergétique (le COP est défini comme le quotient de la chaleur produite par l'énergie consommée).

La subtilité du système est de **prélever la chaleur présente dans les éléments de l'environnement proche de l'habitation** (air, eau, sol) et de la restituer sous forme de chaleur dans l'habitat, mais ce système fonctionne aussi par apport supplémentaire d'énergie électrique.

Lorsque l'on calcule l'efficacité énergétique cela donne un rapport supérieur à 1 [document 29]. Lorsque nous observons la consommation énergétique de chaque pays et de la planète, nous comprenons mieux les enjeux de l'efficacité énergétique des systèmes [document 30].

Ce sont les pays en voie de développement qui sont les plus énergivores.

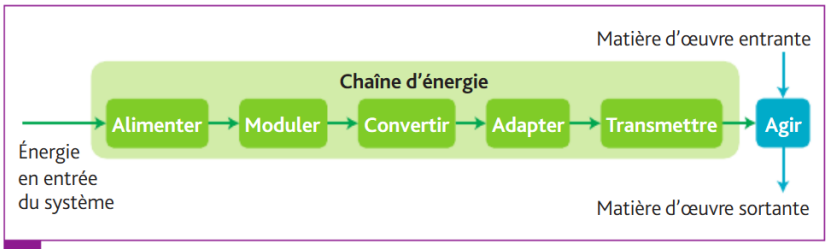
30 Consommation des pays industrialisés.

Ressources

FICHE 11 : Chaîne d'énergie et chaîne d'information

I. Chaîne d'énergie

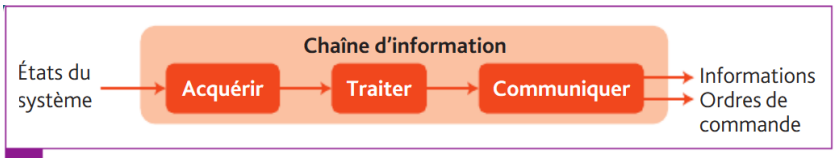
La chaîne d'énergie représente les différents composants d'un système relatifs à l'énergie en précisant leurs fonctions [document 1].



1 Diagramme de la chaîne d'énergie.

II. Chaîne d'information

La chaîne d'information représente les différents composants d'un système relatifs à l'information en précisant leurs fonctions [document 2].



2 Diagramme de la chaîne d'information.

À chaque fonction du diagramme de la chaîne d'énergie ou de la chaîne d'information, on peut associer un ou plusieurs constituants matériels :

- ACQUÉRIR : les capteurs ou les détecteurs ;
- TRAITER : l'unité de traitement (automate programmable, microcontrôleur, microprocesseur…) ;
- COMMUNIQUER : l'interface Homme-machine (voyant, avertisseur sonore, émetteur Bluetooth®, liaison bus CAN…) ;
- ALIMENTER : les sources d'énergie ;
- MODULER : les modulateurs d'énergie (relais, hacheur, onduleur, redresseur, distributeur pneumatique ou hydraulique…) ;
- CONVERTIR : les convertisseurs d'énergie (machines électriques, vérins pneumatique et hydraulique…) ;
- ADAPTER : les adaptateurs d'énergie (transformateur, réducteur de vitesse, engrenages, poulies-courroie, vis-écrou, bielle-manivelle…) ;
- TRANSMETTRE : les transmetteurs d'énergie ;
- AGIR : l'effecteur (pâles d'un ventilateur, roues d'un véhicule…).

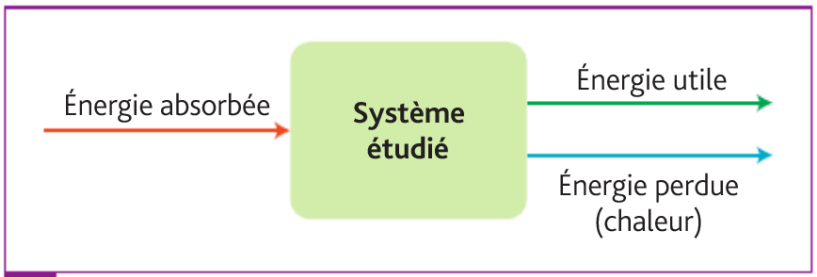
Cette description d'un système sous forme de chaîne d'énergie et chaîne d'information est particulièrement bien adaptée pour représenter les fonctions associées à chaque composant, et pour décrire les flux d'énergie entre composants. Il est cependant parfois nécessaire d'adapter ce formalisme au système étudié et de nouvelles fonctions peuvent apparaître telles que STOCKER, CODER, RESTITUER…

III. Rendement de tout ou partie d'une chaîne d'énergie

Lorsqu'un système convertit, adapte ou transmet de l'énergie, une partie de l'énergie absorbée est convertie en une forme d'énergie généralement non utilisable : la chaleur [document 3].

Le rendement d'un constituant ou d'une chaîne d'énergie est défini comme le rapport :

$$\eta = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie absorbée}}$$



3 Pertes d'énergie dans un système.

Ressources

FICHE 12 : L'énergie

I. Les formes d'énergie

L'énergie est une grandeur physique qui peut prendre différentes formes.

- Énergie fluidique : liée au mouvement d'un fluide (énergie pneumatique : air ; énergie hydraulique : fluide).
- **Énergie mécanique** : liée au travail d'une force ou d'un couple.
- **Énergie cinétique** : liée à un solide ou un ensemble de solides en mouvement.
- **Énergie potentielle** : liée à un solide ou un ensemble de solides en interaction, ou à l'interaction entre charges électriques, ou à la gravitation.
- **Énergie électrique** : peut être fournie par des piles, des accumulateurs, des alternateurs.
- **Énergie rayonnante** : produite par exemple par le rayonnement solaire.
- **Énergie thermique** : se traduit par la chaleur d'un solide.
- **Énergie chimique** : elle apparaît lors d'une transformation chimique.
- **Énergie nucléaire** : contenue dans les noyaux des atomes.

II. Définition de l'énergie

L'énergie E absorbée ou fournie par un système entre deux instants t1 et t2 , absorbant ou produisant une puissance P(t), est définie par :

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P(t) \times dt$$

E : énergie absorbée (ou fournie) (J)
$P(t)$: puissance absorbée (ou produite) (W)

Il n'y a qu'une seule unité d'énergie, c'est le joule. En fonction de la nature de l'énergie utilisée, des unités équivalentes s'avèrent souvent pratiques. On trouve par exemple selon les domaines :

- **le watt × heure (W·h)**, qui vaut 3 600 joules, souvent utilisé en électricité ;
- **la calorie (cal)**, qui vaut 4,185 joules, souvent utilisée en énergie thermique et pour qualifier l'apport énergétique des aliments.
-

Dans le cas où la puissance P(t) est constante sur la durée t2 – t1, égale à P et exprimée en watt (W), alors la définition se simplifie :

$$E = P \times (t_2 - t_1)$$

- Si la durée t2– t1 est exprimée en seconde, l'énergie correspondante est exprimée en J.
- Si la durée t2– t1 est exprimée en heure, l'énergie correspondante est exprimée en W·h.

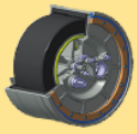
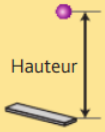
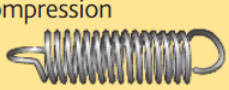
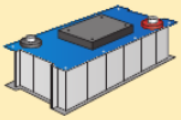
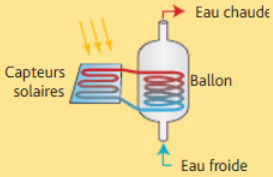
1Wh = 3600W = 3600J

1cal = 4,185J

Ressources

FICHE 13 : Fonction stockage de l'énergie

Le stockage d'une énergie consiste à utiliser un « réservoir » dans le but d'emmagasiner de l'énergie qui sera utilisée ultérieurement.

Forme de l'énergie stockée	Descriptif	Exemple	Grandeur caractéristique de l'élément de stockage	Grandeur physique	Expression de l'énergie stockée
Mécanique	Cinétique de translation	Véhicule en translation	m : masse (kg)	v : vitesse linéaire ($m \times s^{-1}$)	$\frac{1}{2} \times m \times v^2$
	Cinétique de rotation	Volant d'inertie 	J : moment d'inertie ($kg \times m^2$)	ω : vitesse angulaire ($rad \times s^{-1}$)	$\frac{1}{2} \times J \times \omega^2$
	Potentielle de pesanteur	Solide en hauteur 	m : masse (kg)	h : hauteur (m)	$m \times g \times h$
	Potentielle élastique	Ressort de traction-compression 	k : raideur ($N \times m^{-1}$)	x : variation de longueur (m)	$\frac{1}{2} \times k \times x^2$
		Ressort de torsion	k : raideur ($N \times m \times rad^{-1}$)	α : variation angulaire (rad)	$\frac{1}{2} \times k \times \alpha^2$
Électrique	Électro-statique	Condensateur ou supercondensateur 	C : capacité (F)	U : tension (V)	$\frac{1}{2} \times C \times U^2$
	Électro-magnétique	Inductance	L : inductance (H)	I : intensité du courant (A)	$\frac{1}{2} \times L \times I^2$
	Électro-chimique	Batterie ou Pile	Q : capacité (A·h)	U : tension (V)	$Q \times U$
Thermique		Chauffe-eau solaire 	m : masse (kg) c : capacité thermique massique ($J \times kg^{-1} \times K^{-1}$)	$\Delta\theta$: variation de température (°C ou K)	$m \times c \times \Delta\theta$

Ressources

FICHE 14 : Fonctions adaptateurs et convertisseurs d'énergie

I. L'adaptateur d'énergie

L'adaptateur d'énergie est un dispositif qui permet d'adapter l'énergie à l'usage que l'on en fait. La nature de l'énergie en entrée et en sortie de l'adaptateur est la même

	Transformateur électrique	Réducteur de vitesse	Levier	Pignon-Crémaillère
Énergie en entrée	Électrique (U_e, I_e)	Mécanique de rotation	Mécanique de rotation	Mécanique de rotation
Énergie en sortie	Électrique (U_s, I_s)	Mécanique de rotation	Mécanique de rotation	Mécanique de translation

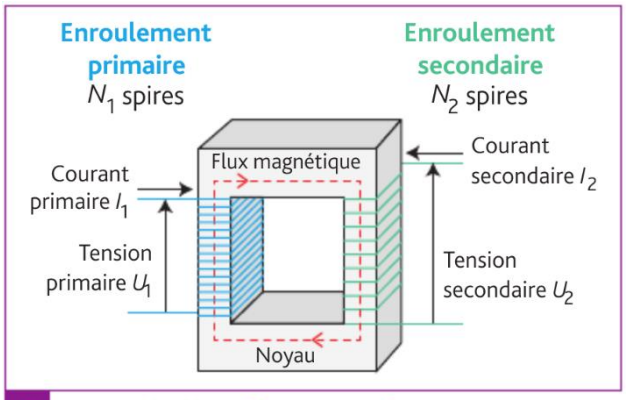
II. Le transformateur

Un transformateur est considéré comme un « adaptateur » alternatif-alternatif. Il transforme au primaire l'énergie électrique en énergie magnétique, qui est elle-même transformée au secondaire en énergie électrique [document 4].

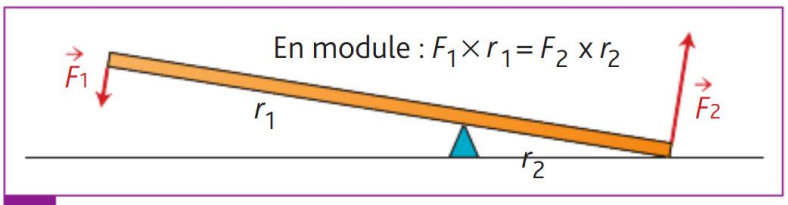
Si l'on considère le transformateur parfait (sans perte d'énergie), le rapport du nombre de spires secondaires N2 sur le nombre de spires primaires N1 détermine le rapport de transformation du transformateur, noté :

$$m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

L'équivalent mécanique du transformateur est le levier [document 5].



4 Description d'un transformateur monophasé.



5 Analogie mécanique du transformateur.

III. Le convertisseur d'énergie

Un convertisseur d'énergie est un dispositif qui permet de passer d'une forme d'énergie à une autre.

	Machine électrique	Pompe hydraulique	Vérin hydraulique	Vérin pneumatique	Panneau solaire	Pile à hydrogène
Énergie absorbée	Électrique	Mécanique	Fluidique	Pneumatique	Rayonnante (solaire)	Chimique
Énergie fournie	Mécanique	Fluidique	Mécanique	Mécanique	Électrique	Électrique

IV. Le convertisseur électromécanique d'énergie

Une machine électrique est un convertisseur électromécanique réversible qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique ou vice-versa.

En fonctionnement générateur, la machine est un convertisseur électromécanique qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

En fonctionnement moteur, la machine électrique est un convertisseur électromécanique qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique.

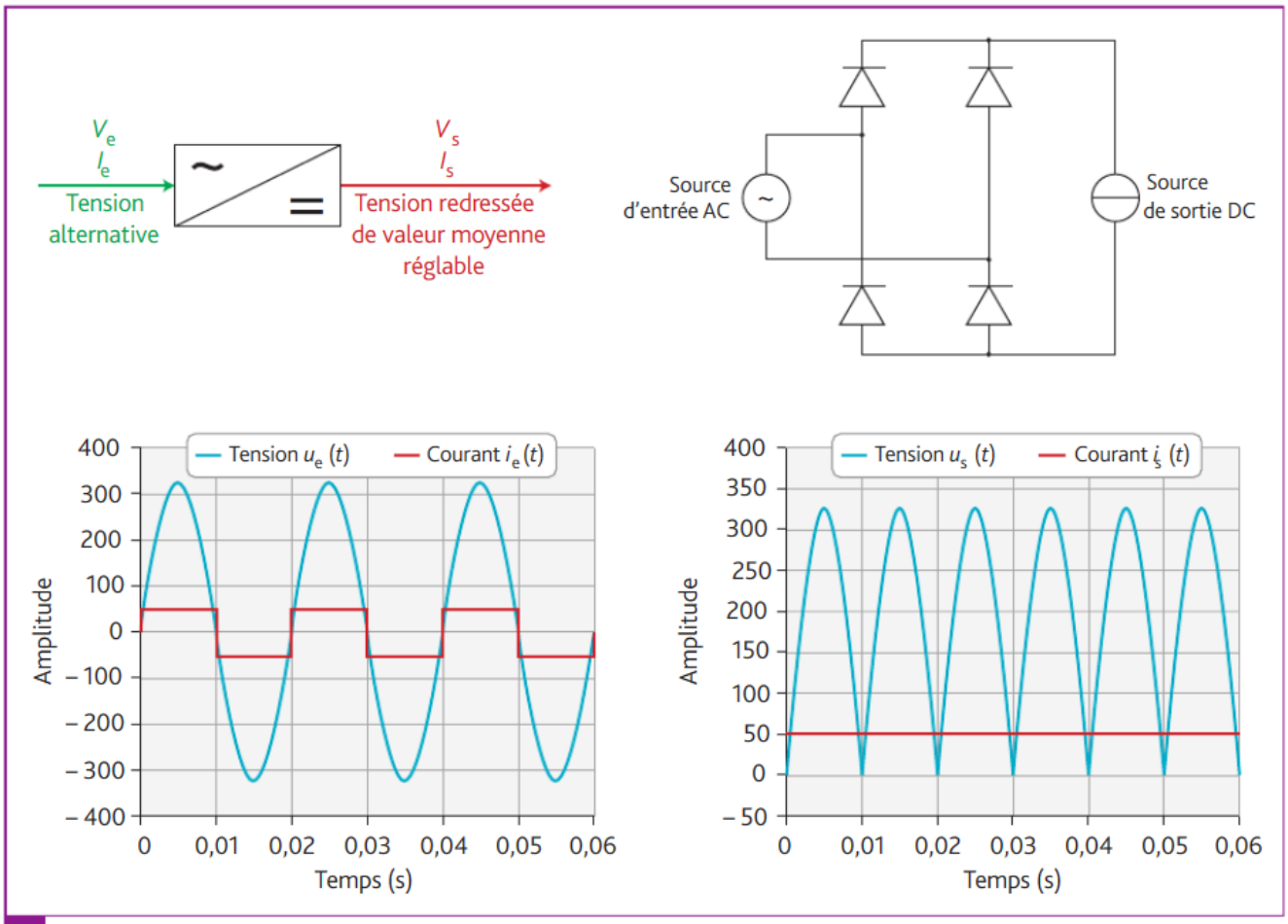
Ressources

FICHE 15 : Fonctions des modulateurs d'énergie électrique

Afin de moduler l'énergie électrique aux besoins, il existe plusieurs solutions technologiques.

Fonction	Nature des grandeurs d'entrée	Nature des grandeurs de sortie	Modulateur	Nom du modulateur
Adapter la fréquence	Alternative	Continue	Modulateur AC-DC	Redresseur
	Continue	Alternative	Modulateur DC-AC	Onduleur
Adapter la tension	Alternative	Alternative	Modulateur AC-AC	Gradateur
	Continue	Continue	Modulateur DC-DC	Hacheur

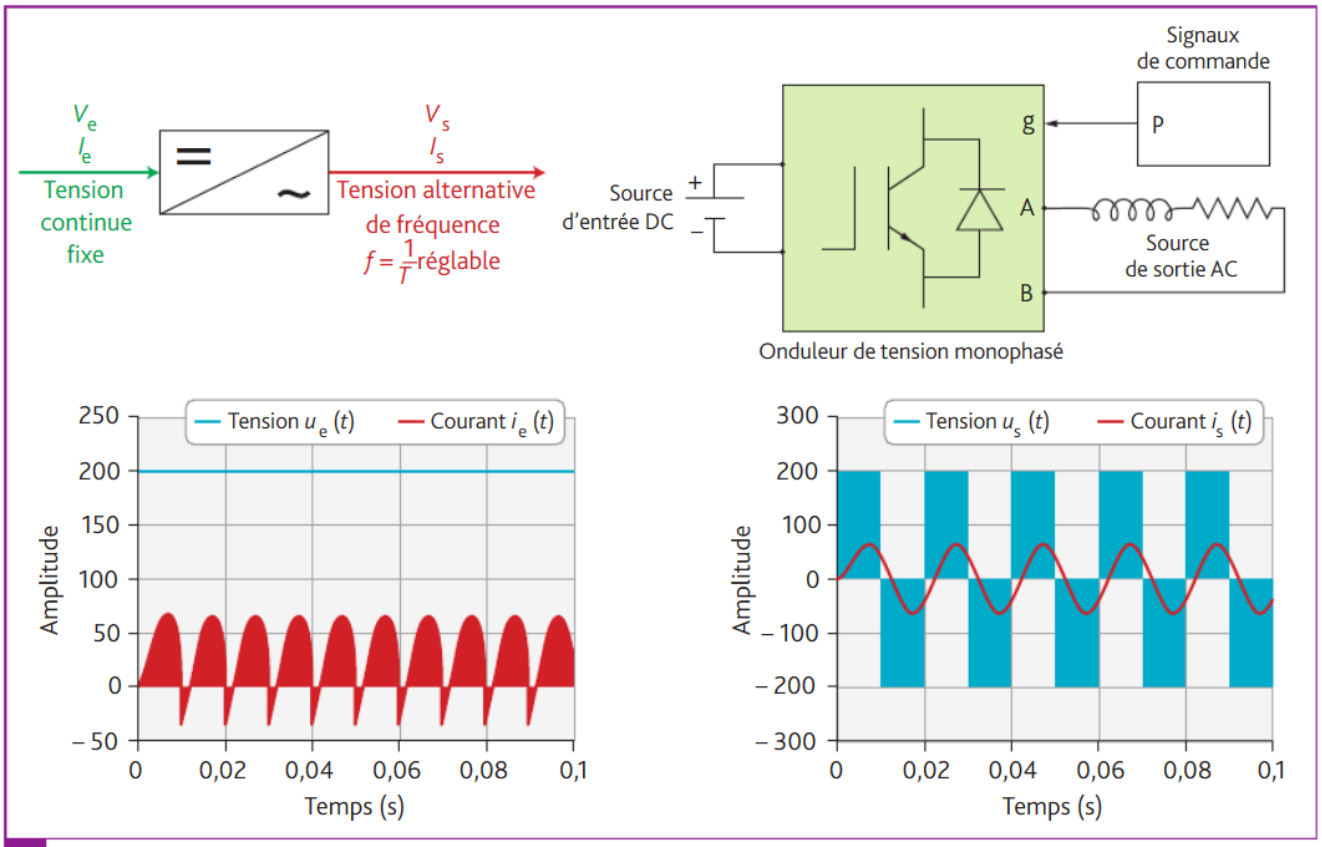
I. Modulation alternatif (AC) – continu (DC) : famille des redresseurs



6 Schéma de principe, exemples de montage redresseur et signaux associés.

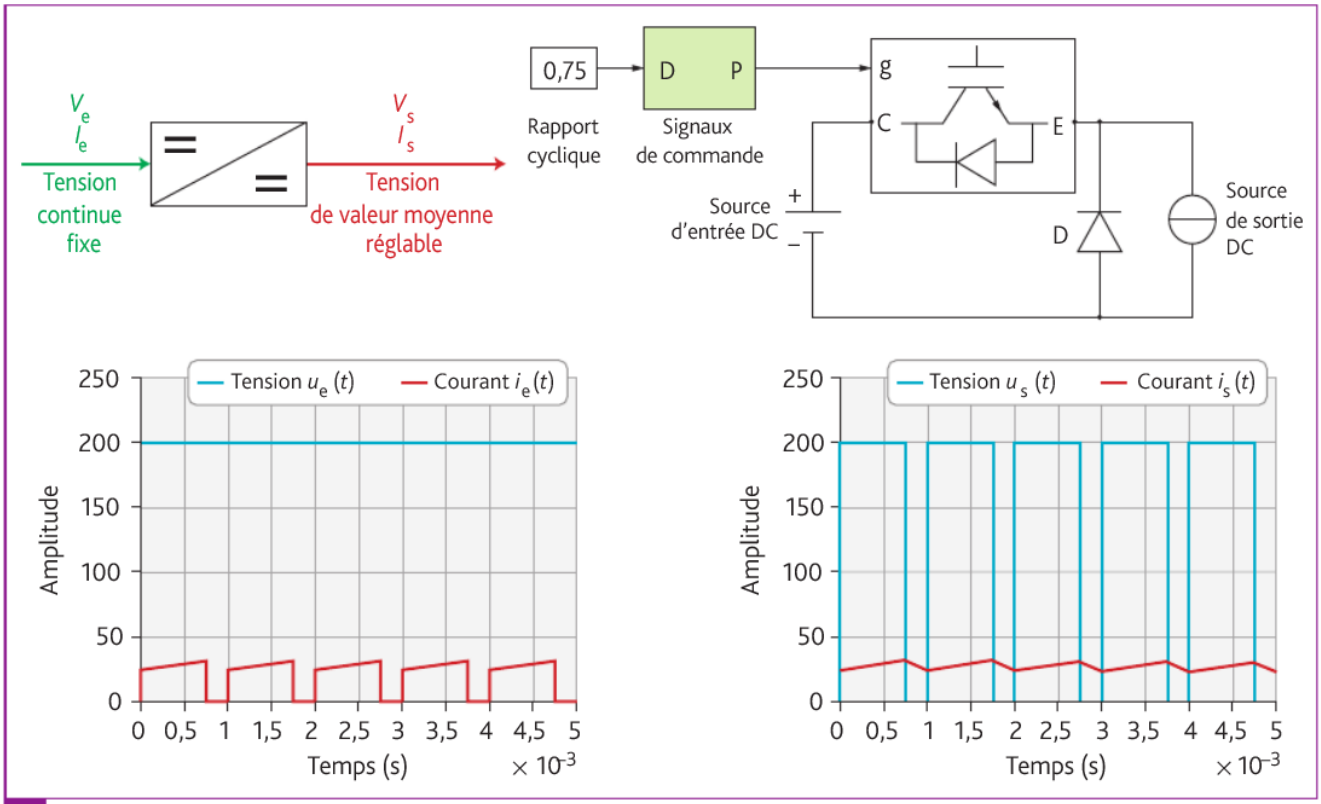
Ressources

II. Modulation continu (DC) – alternatif (AC) : famille des onduleurs de tension



7 Schéma de principe, exemples de montage onduleur de tension et signaux associés.

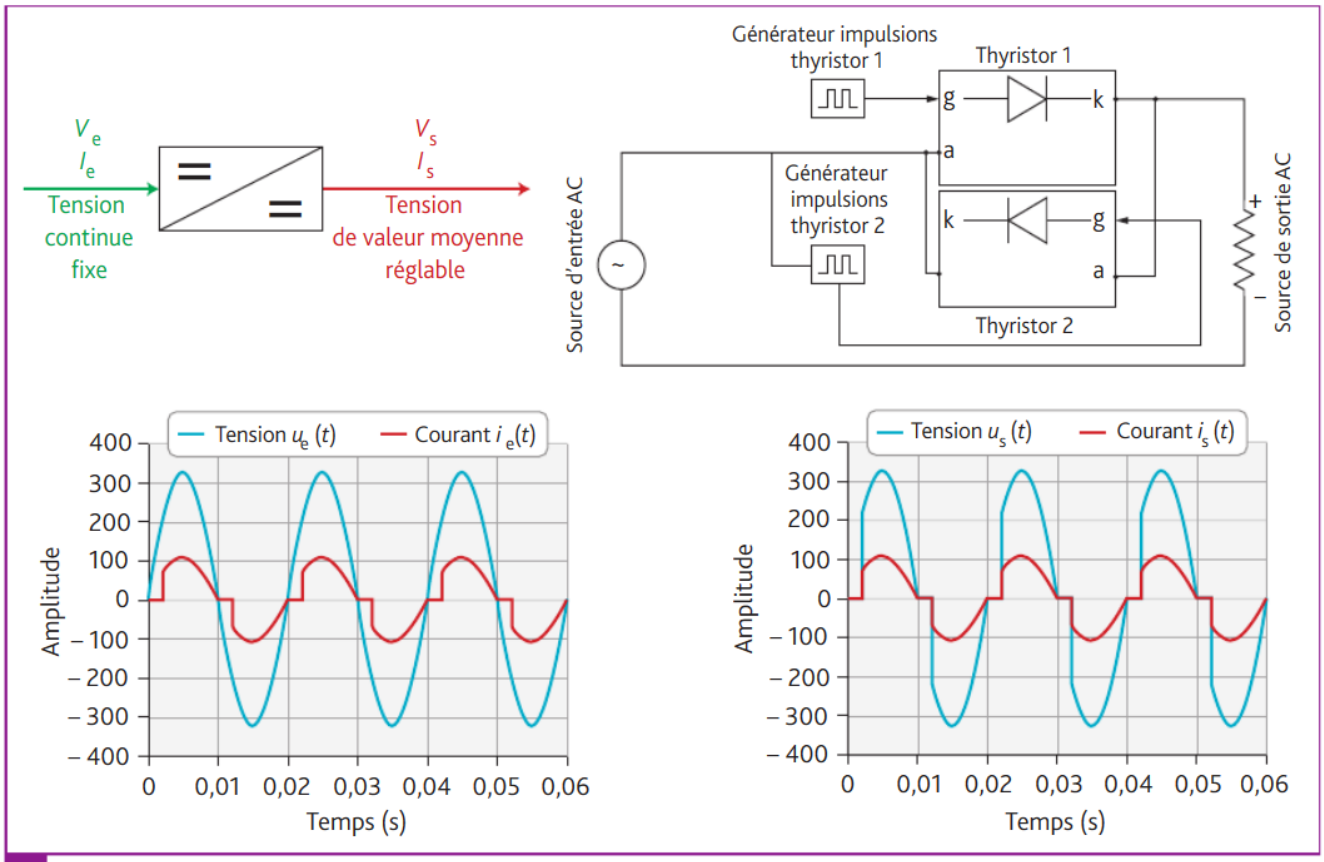
III. Modulation continu (DC) – continu (DC) : famille des hacheurs :



8 Schéma de principe, exemples de montage hacheur (1 quadrant) et signaux associés.

Ressources

IV. Modulation alternatif (AC) – alternatif (AC) : famille des gradateurs



9 Schéma de principe, exemples de montage gradateur et signaux associés.

V. Association de machines électriques avec des modulateurs d'énergie

Lorsqu'une variation de vitesse est nécessaire (en fonction de l'application), un modulateur d'énergie (appelé très souvent variateur de vitesse) est associé à l'actionneur. C'est le modulateur d'énergie qui agit sur les grandeurs électriques d'alimentation de l'actionneur afin de faire varier la vitesse en fonction d'un signal de commande (consigne de vitesse).

Machines…	Illustration	Grandeur influente	Modulateur d'énergie associé
à courant continu		Tension d'alimentation de l'induit	Hacheur
asynchrone triphasée		Fréquence des grandeurs électriques	Onduleur
synchrone triphasée		Fréquence des grandeurs électriques	Onduleur

Ressources

FICHE 16 : Association machine – charge mécanique

Les machines électriques ou thermiques sont toujours associées à une charge mécanique. Cette charge est la partie mécanique (ensemble des composants réalisant les fonctions **ADAPTER**, **TRANSMETTRE** et **AGIR** de la chaîne d'énergie) qui doit être entraînée en rotation ou en translation par la machine.

I. Notion de couple et d'effort résistant

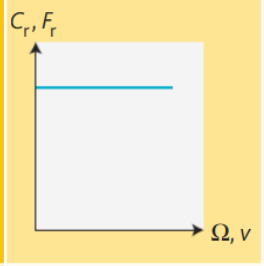
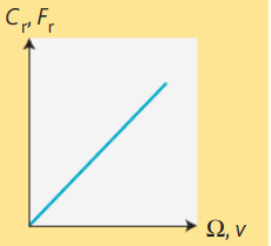
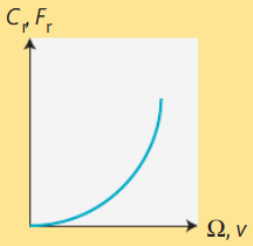
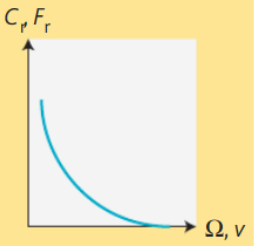
La mise en mouvement de cette charge mécanique s'oppose au mouvement souhaité de la machine. On parle de couple résistant, noté C_r, et d'effort résistant, noté F_r ; les grandeurs physiques s'opposant au mouvement d'entraînement de la machine, respectivement pour un mouvement de rotation et pour un mouvement de translation.

La caractéristique mécanique de la charge définit les besoins mécaniques de la machine entraînée :

$C_r = g(\Omega)$ ou $F_r = g(v)$

C_r : couple résistant (N·m)
F_R : effort résistant (N)
Ω : vitesse angulaire de la machine (rad·s^{-1})
v : vitesse linéaire de la machine (m·s^{-1})

Il existe essentiellement quatre types de caractéristique mécanique.

Couple ou effort résistant	Couple ou effort constant	Couple ou effort proportionnel à la vitesse (angulaire ou linéaire)	Couple ou effort parabolique	Couple ou effort hyperbolique
	C_r = constant F_r = constant	$C_r = k \times \Omega$; $F_r = k \times v$	$C_r = k \times \Omega^2$; $F_r = k \times v^2$	$C_r = \frac{k}{\Omega}$; $F_r = \frac{k}{v}$
				
Exemple de charges mécaniques	Levage	Agitateurs, mélangeurs	Pompes, ventilateurs, compresseurs	Enrouleurs, dérouleurs

II. Notion de quadrant de fonctionnement

De nombreuses applications nécessitent des mouvements de sens opposés (levage, enrouleur-dérouleur…). Il est donc nécessaire d'inverser le sens de rotation ou de translation de la machine électrique. De plus, généralement pour augmenter la cadence de production, un temps d'arrêt du mouvement court est souhaité (plus court que celui obtenu naturellement). Il est donc nécessaire que la machine fournisse un couple ou un effort de freinage (couple ou effort fourni par la machine électrique négatif).

Ces divers fonctionnements sont caractérisés par la notion de **quadrant de fonctionnement.**

Elle caractérise les possibilités de l'association « modulateur + machine + charge mécanique » en termes de « réversibilité » du sens de transfert de l'énergie.

Ressources

La puissance absorbée P par la machine s'écrit :

• pour un mouvement de rotation $P(t) = C(t) \times \Omega(t)$;

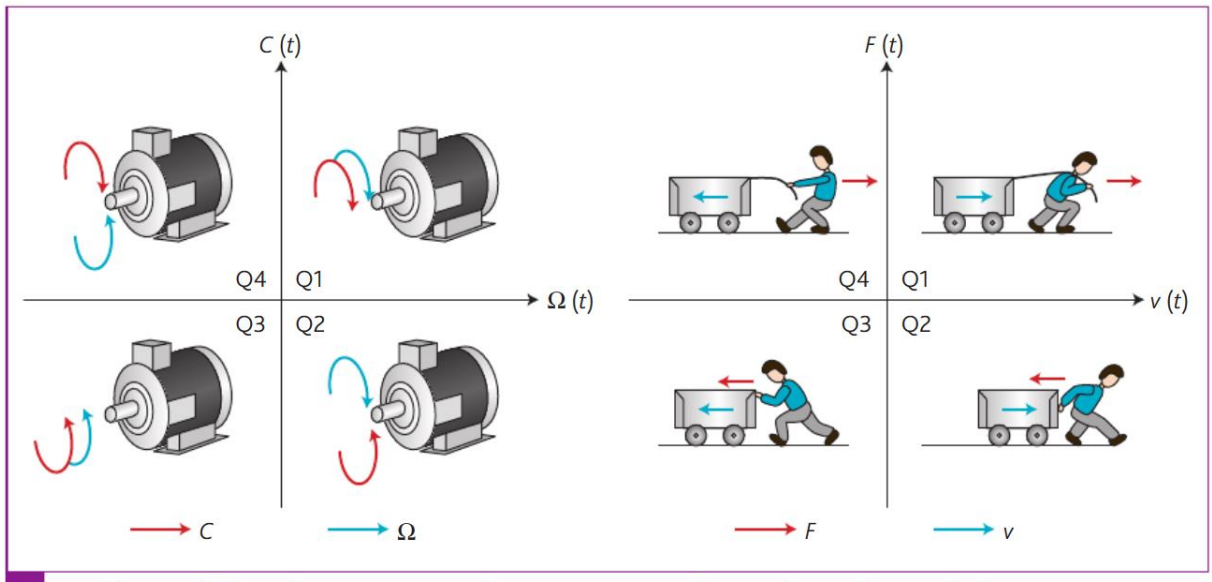
• pour un mouvement de translation $P(t) = F(t) \times v(t)$.

Les **quadrants 1 et 3** correspondent à un fonctionnement **moteur** de la machine car la puissance absorbée

P est positive. Le sens de transfert d'énergie est donc dirigé du réservoir d'énergie vers la charge mécanique [document 10].

Les **quadrants 2 et 4** correspondent à un fonctionnement **générateur** de la machine car la puissance absorbée P est négative. Le sens de transfert d'énergie est donc dirigé de la charge mécanique vers le réservoir d'énergie [document 10].

Les sens possibles de transfert de l'énergie sont bien évidemment conditionnés par l'ensemble des éléments entre le réservoir d'énergie et la charge mécanique (notion d'irréversibilité).



10 Quadrants de fonctionnement pour les mouvements de rotation et de translation.

III. Notion de réversibilité

Le transfert d'énergie dans un élément (composant ou constituant) est dit **réversible** si le sens de transfert de l'énergie est bidirectionnel, et irréversible si le sens de transfert est unidirectionnel.

Exemples d'éléments autorisant la réversibilité du sens de transfert de l'énergie :

- Machines électriques (MCC, MS, MAS) ;
- Réducteurs de vitesse à engrenages ou à train épicycloïdal ;
- Système bielle-manivelle ;
- Modulateur DC-DC 2 ou 4 quadrants ;
- Batterie d'accumulateurs, supercondensateur…

Exemples d'éléments n'autorisant pas la réversibilité du sens de transfert de l'énergie :

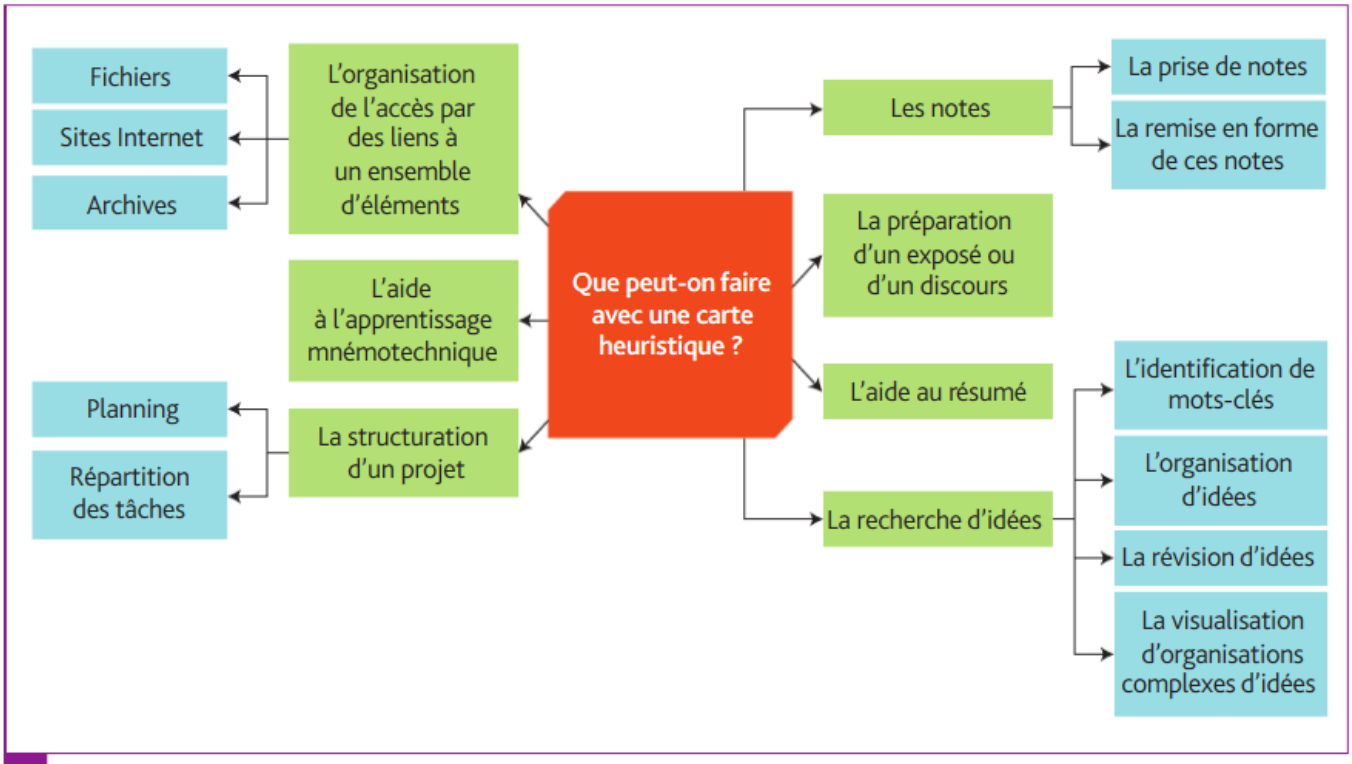
- Système vis-écrou, roue et vis sans fin (sous certaines conditions d'adhérence entre les matériaux) ;
- Modulateur DC-DC 1 quadrant, modulateur AC-DC à diodes.

Ressources

FICHE 17 : La carte heuristique ou carte mentale

La carte heuristique ou carte mentale permet de formaliser des idées en reprenant le cheminement de la pensée.

- Que peut-on faire avec une carte heuristique [document 1] ?
- La prise de notes.
- La remise en forme de ces notes.
- La préparation d'un exposé, d'un discours.
- Le résultat d'un brainstorming.
- L'aide au résumé.
- La structuration du projet.
- La révision et la clarification d'idées.
- L'identification des mots-clés.
- La visualisation d'organisations complexes d'idées.
- L'aide à l'apprentissage mnémotechnique.
- L'organisation de l'accès (par des liens) à un ensemble de fichiers…



1 Les possibilités de la carte heuristique expliquées sous forme… de carte heuristique.

Très libres, les représentations graphiques peuvent être faites à main levée ou via l'informatique. Elles permettent de libérer la créativité de l'utilisateur en le laissant libre de son expression graphique.

- Les bulles permettent de représenter une idée principale et ses dérivées.
- Les couleurs permettent de donner une hiérarchie dans les différentes thématiques.
- Les images et les croquis permettent d'illustrer des propos

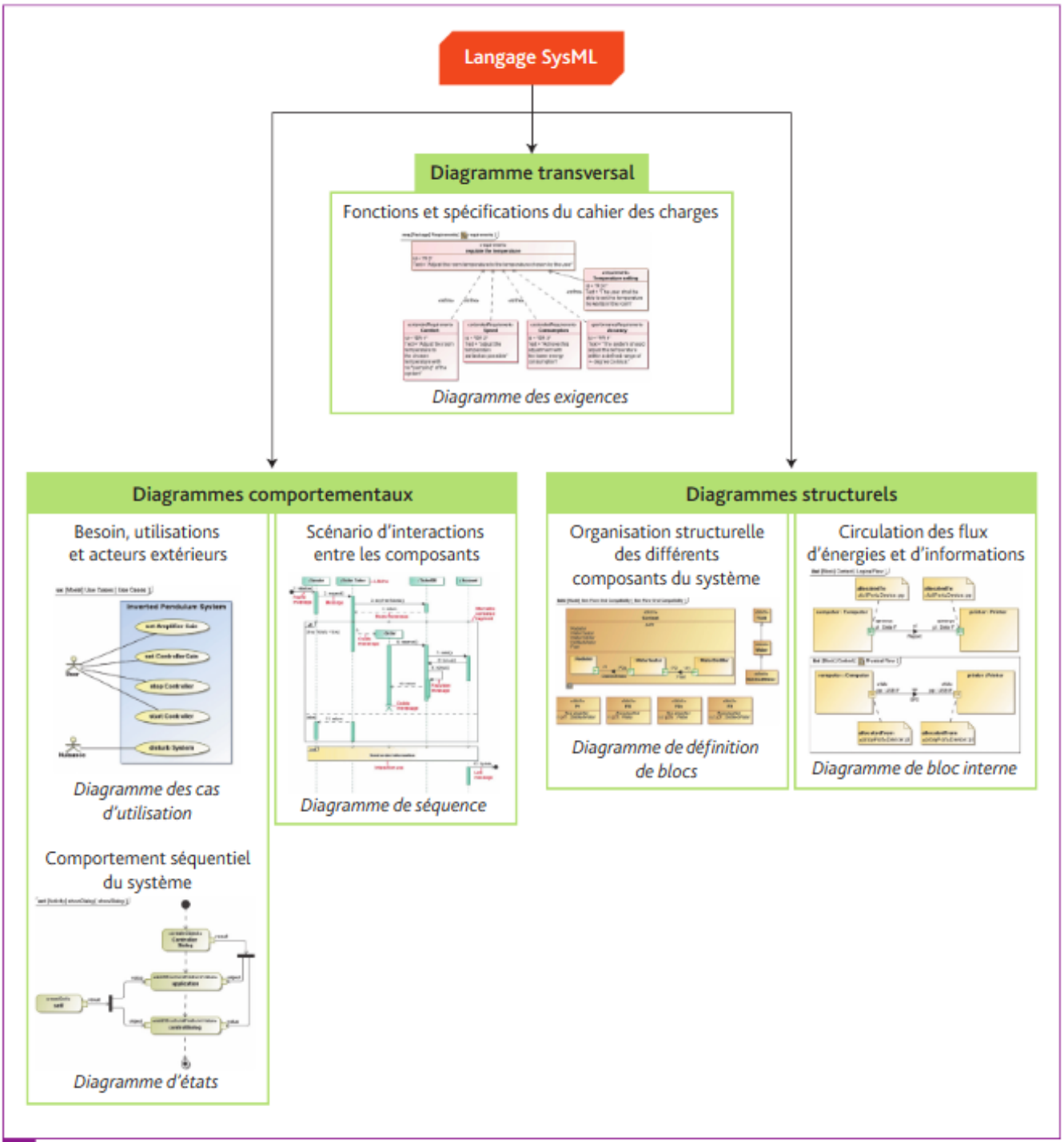
Ressources

FICHE 18 : *Le langage SysML*

La formation en STI2D propose une initiation à la démarche et aux outils de l'ingénieur. Actuellement, les systèmes techniques présentent une grande complexité et sont conçus par un groupe d'experts de spécialités différentes. De ce fait, il est primordial d'utiliser un unique langage graphique commun à tous les spécialistes afin d'avoir une vision globale et locale du système grâce à une interface logicielle. Ce langage graphique de modélisation des systèmes utilisé est SysML (Systems Modeling Language).

Ce langage permet de décrire un système du point de vue [document 2] :

- Comportemental ;
- Structurel ;
- Transversal



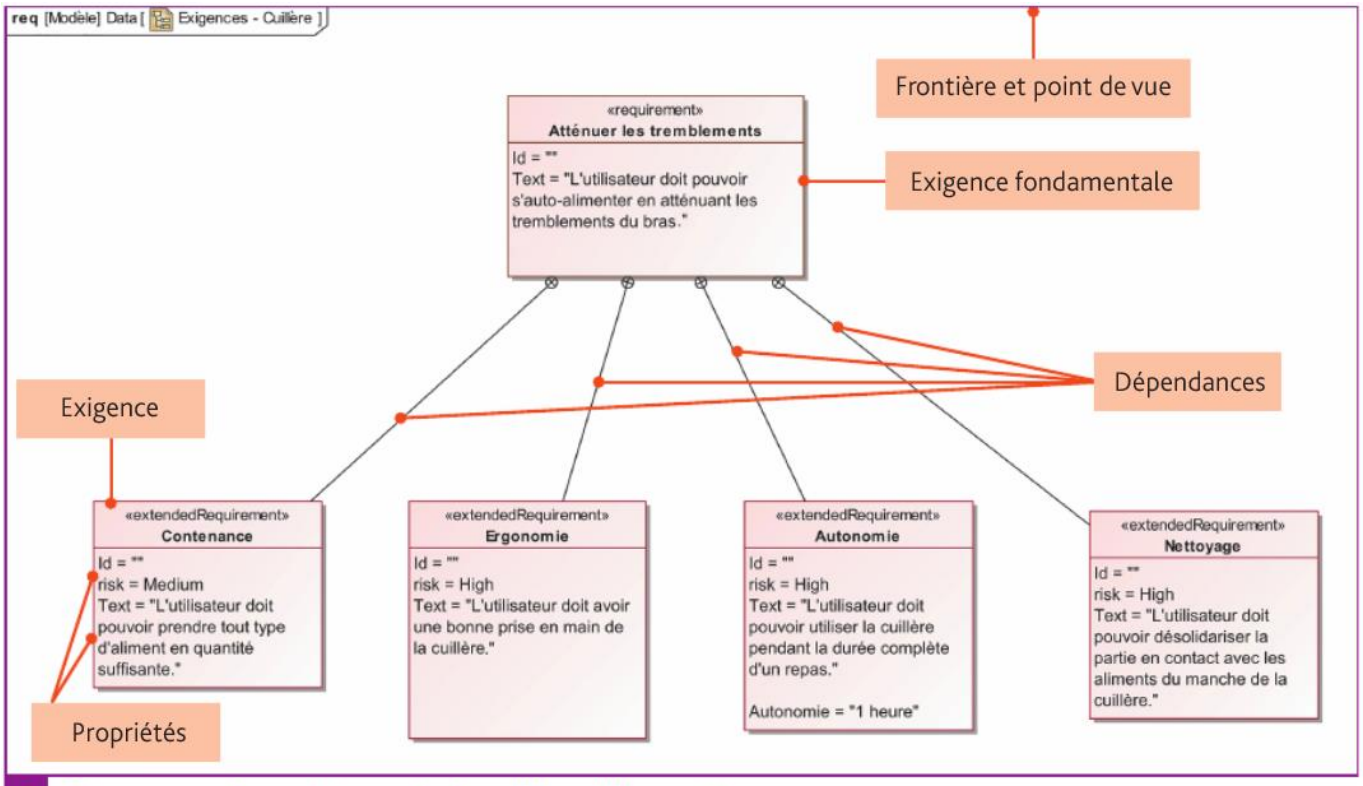
2 Positionnement des diagrammes dans le langage SysML.

Ressources

I. Le diagramme des exigences

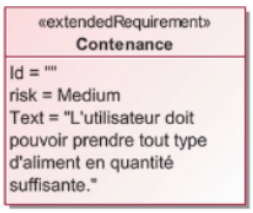
Le diagramme des exigences est un diagramme transversal. Il décrit ce que doit réaliser le système ainsi que les contraintes qu'il doit satisfaire. Ce diagramme doit être le plus simple possible. Il n'est pas nécessaire de lister toutes les exigences.

L'exemple ci-dessous reprend les éléments graphiques de la cuillère [documents 3 et 4].



3 Diagramme des exigences de la cuillère Liftware®.

Exigence

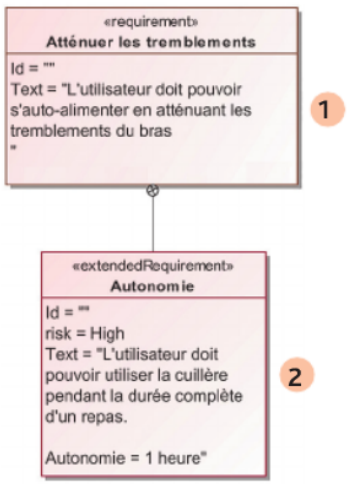


Une **exigence** permet de spécifier une capacité ou une contrainte qui doit être satisfaite par un système. Elle peut spécifier une fonction à réaliser ou une condition de performance, de fiabilité, de sécurité…

Les exigences représentent le contrat (cahier des charges fonctionnel) entre le client et les concepteurs du système.

Il est courant de définir d'autres propriétés quantifiées ou non afin d'être précis sur les fonctions à remplir par le système.

Dépendance



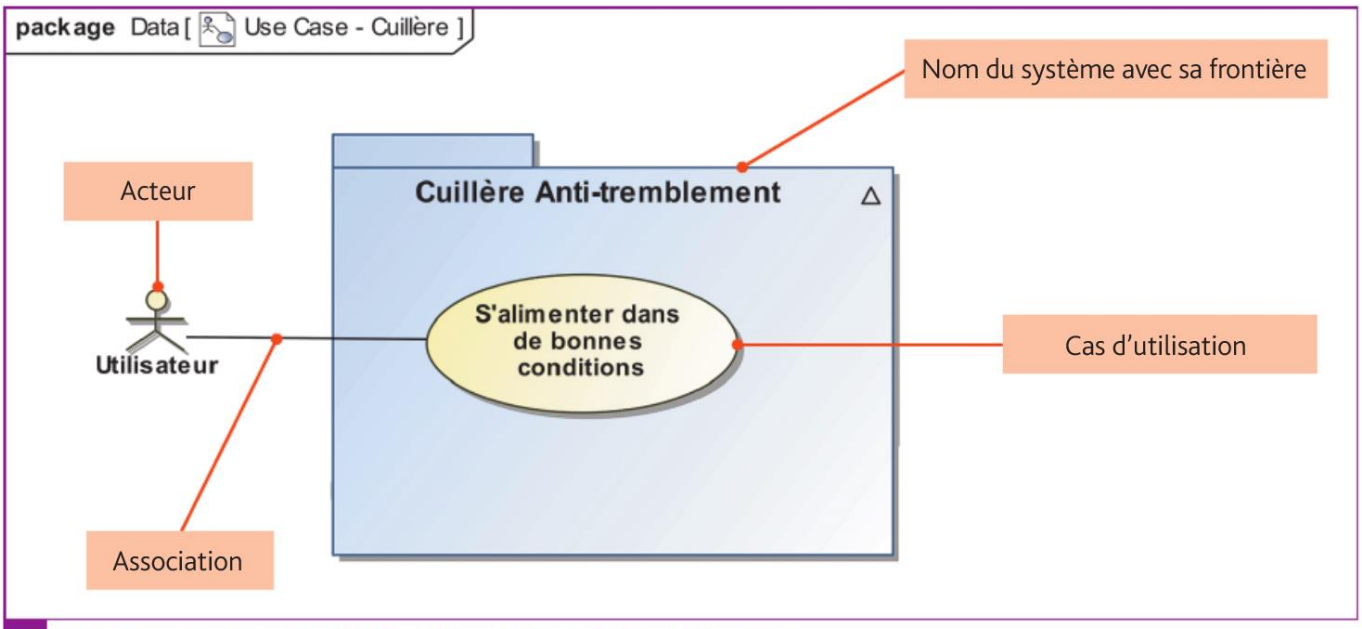
Dans le langage SysML, on appelle « **contenance** » (« *confinement* ») la décomposition d'une exigence composite 1 en plusieurs exigences unitaires 2, plus faciles ensuite à tracer vis-à-vis de l'architecture ou des tests.

4 Interprétation des éléments graphiques d'un diagramme des exigences.

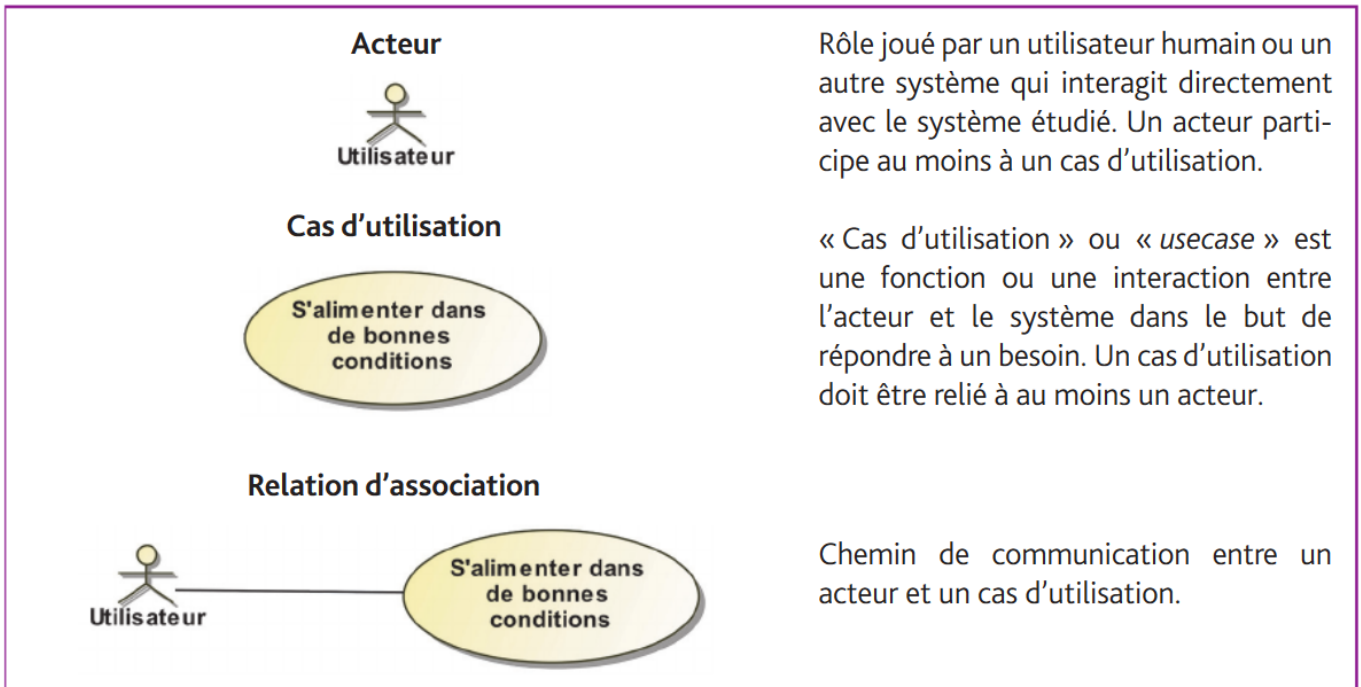
Ressources

II. Le diagramme des cas d'utilisation

Le diagramme des cas d'utilisation est un diagramme comportemental. Il décrit les fonctionnalités du système en identifiant les services rendus. Autrement dit, les fonctionnalités d'un système sont des cas d'utilisation qui correspondent à des services rendus par le système [documents 5 et 6].



5 Diagramme des cas d'utilisation de la cuillère Liftware®.

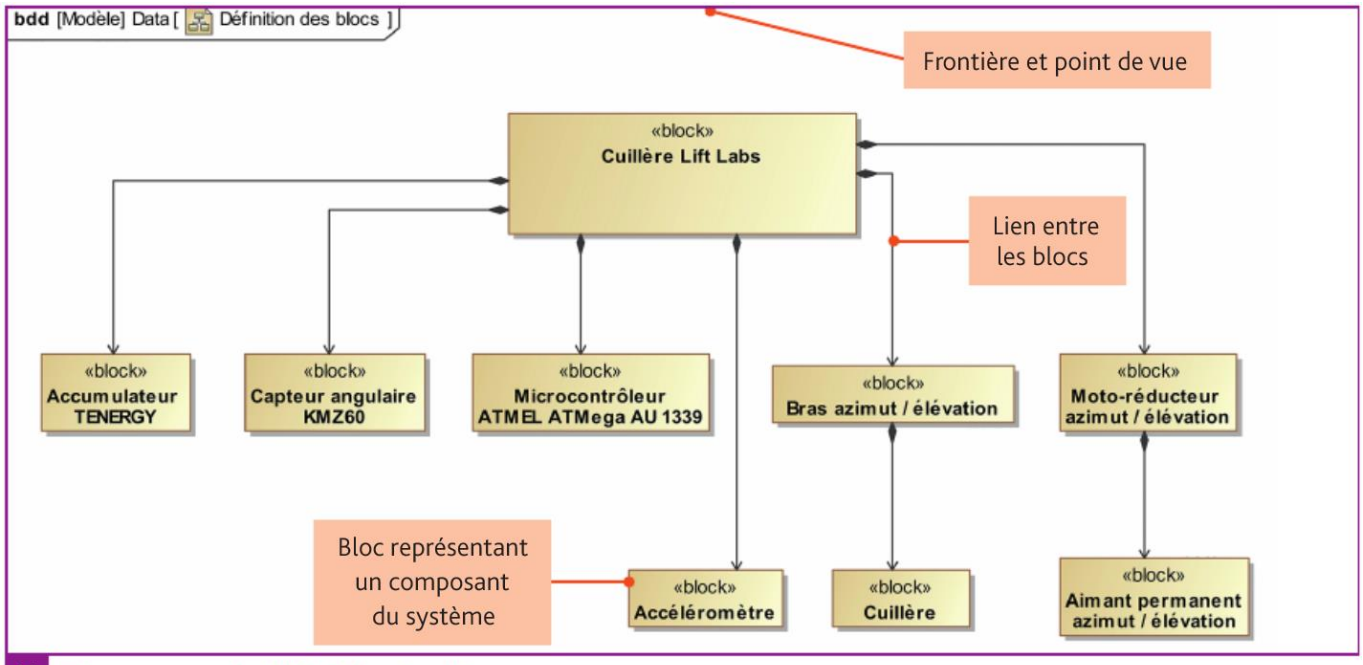


6 Interprétation des éléments graphiques d'un diagramme des cas d'utilisation.

Ressources

III. Le diagramme de définition des blocs :

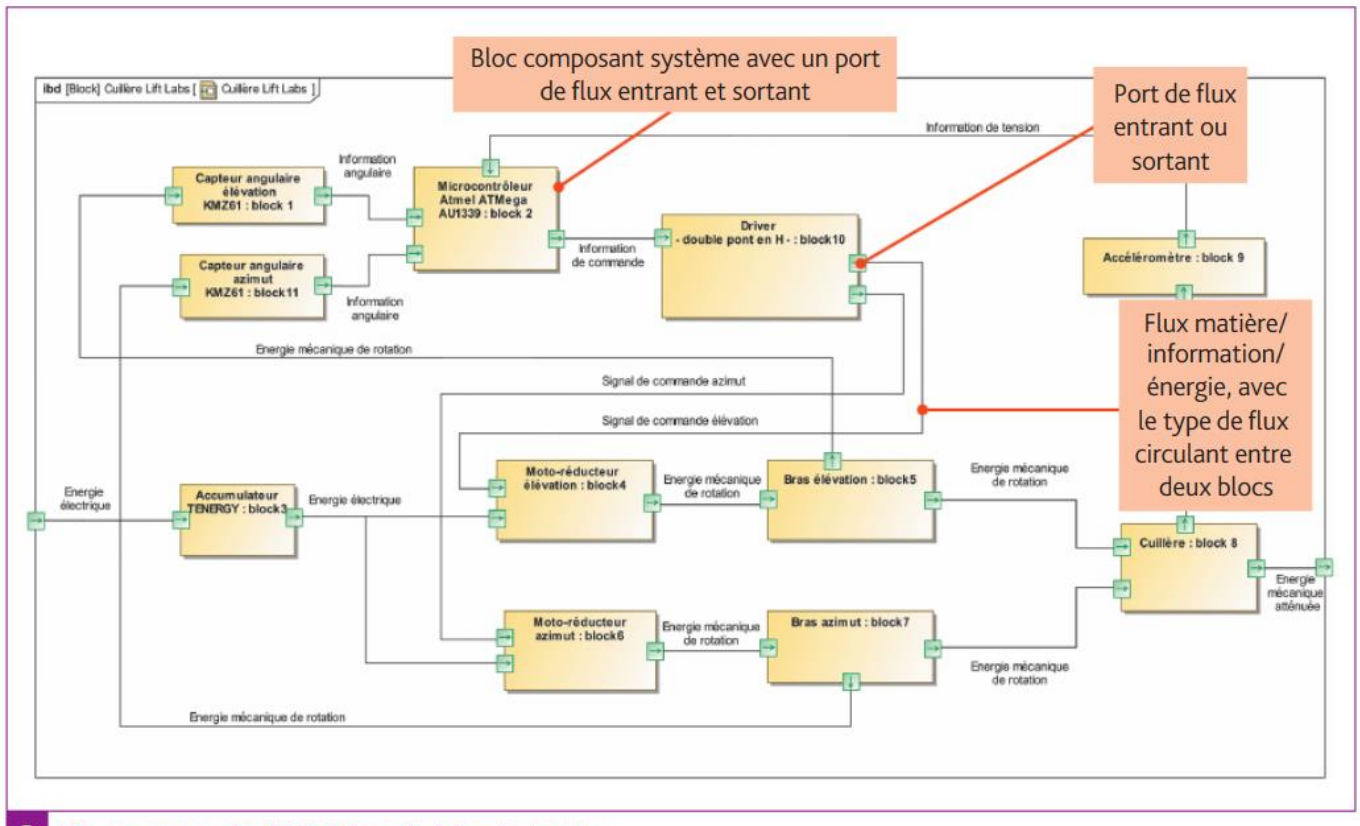
Le diagramme de définition des blocs est un diagramme structurel. Il décrit le système d'un point de vue « composant » et représente les liens entre les blocs de même niveau [document 7].



7 Diagramme de définition des blocs.

IV. Le diagramme de définition de bloc interne :

Le diagramme de définition de bloc interne est un diagramme structurel. Il décrit les échanges matière – énergie – information entre les blocs de même niveau grâce aux ports de flux [document 8].

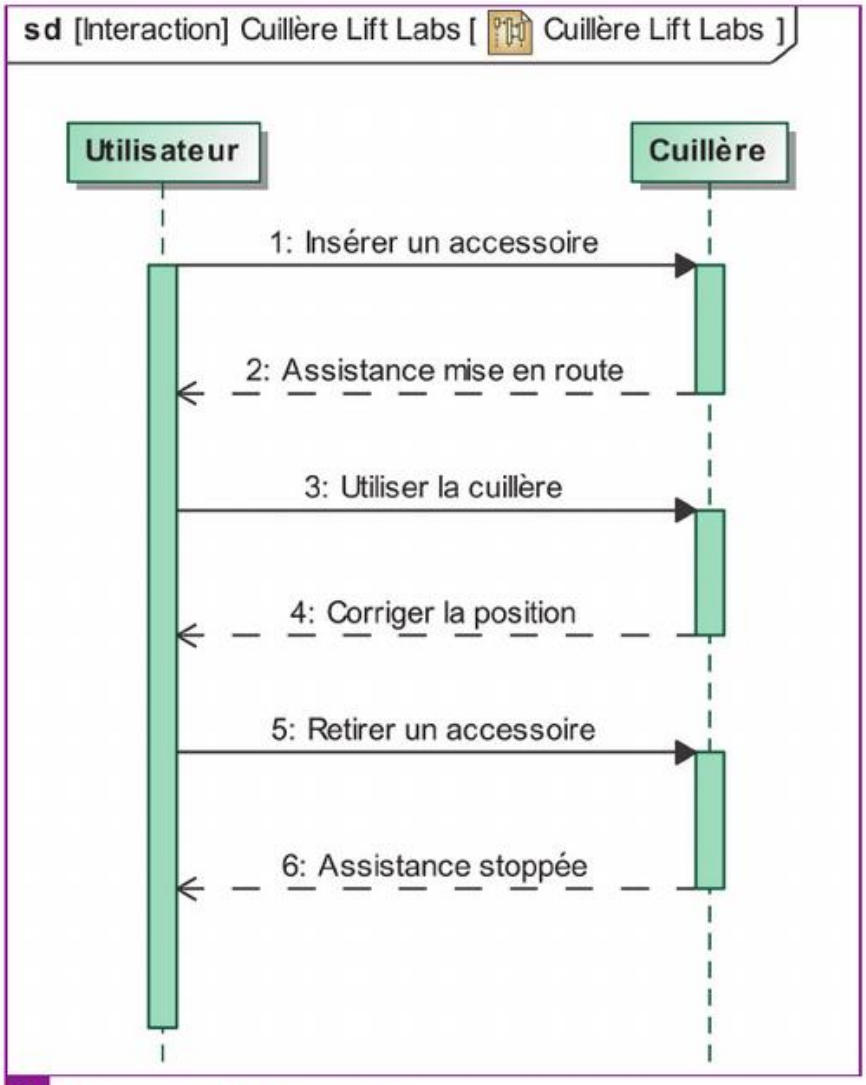


8 Diagramme de définition de bloc interne.

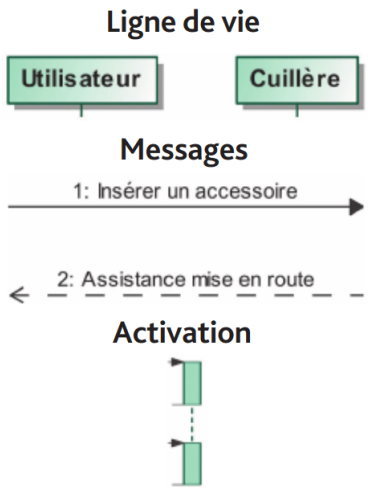
Ressources

V. Le diagramme de séquence :

Le diagramme de séquence est un diagramme comportemental. Il décrit les scénarios correspondant aux cas d'utilisation et répond à la question « comment est réalisé ce cas d'utilisation ? ». Le diagramme de séquence montre les interactions entre les différents éléments d'un point de vue séquentiel [documents 9 et 10].



9 Diagramme de séquence.



Ligne de vie (nom et type).

Message unidirectionnel entre les lignes de vie qui déclenche une activité chez l'utilisateur. La réception d'un message provoque un événement dans la cuillère.

Les bandes verticales le long d'une ligne de vie représentent les périodes d'activation.

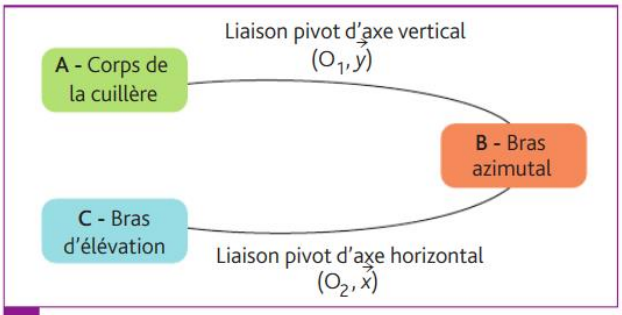
10 Interprétation des éléments graphiques d'un diagramme de séquence.

Ressources

FICHE 19 : *Graphe des liaisons et schéma cinématique*

I. Le graphe des liaisons :

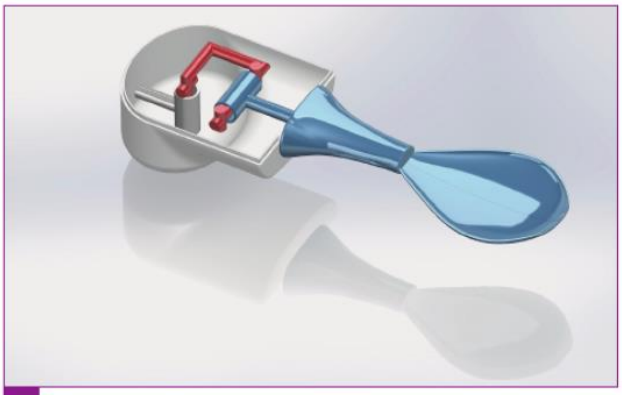
Le graphe des liaisons est une figure qui synthétise les groupes cinématiquement liés et les liaisons entre ces groupes [document 11].



11 Graphe des liaisons de la cuillère Liftware®.

II. Le schéma cinématique :

Le schéma cinématique est une représentation du graphe des liaisons au moyen des symboles des liaisons normalisées [document 12]. Le schéma cinématique d'un système est une figure spatiale ou plane qui permet de mener des études théoriques (géométriques, cinématiques, statiques).
En phase de conception, le schéma cinématique permet de définir le fonctionnement attendu sans toutefois limiter le concepteur sur les formes et dimensions à concevoir.
En rétro-ingénierie, il permet de comprendre le fonctionnement d'un système.



12 Schéma cinématique de la cuillère Liftware®.

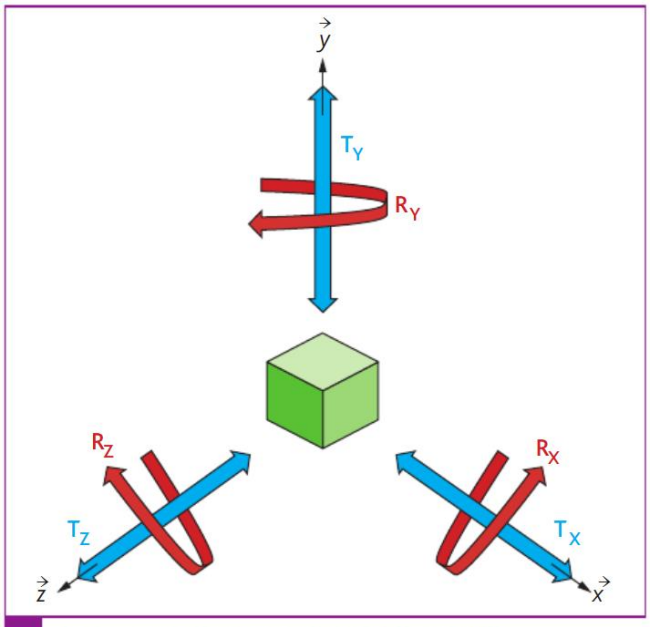
III. Degrés de liberté d'un système :

Le déplacement d'un solide libre dans l'espace, est la combinaison d'une translation de direction quelconque et de sa rotation autour d'un point.

Dans un repère orthonormé direct R(O;$\vec{x}$,$\vec{y}$,$\vec{z}$), le déplacement d'un solide peut se décomposer

dans un ordre quelconque **en 6 déplacements** élémentaires qui sont [document 13] :

- une rotation Rx autour d'un axe parallèle à (O, $\vec{x}$)
- une rotation Ry autour d'un axe parallèle à (O, $\vec{y}$)
- une rotation Rz autour d'un axe parallèle à (O, $\vec{z}$)
- une translation Tx dans la direction de (O, $\vec{x}$)
- une translation Ty dans la direction de (O, $\vec{y}$)
- une translation Tz dans la direction de (O, $\vec{z}$)



13 Mouvements élémentaires d'un solide.

Un degré de liberté est un mouvement élémentaire possible (rotation ou translation) suivant un axe privilégié et par rapport à un repère donné. Il existe donc 6 degrés de liberté indépendants possibles pour le mouvement d'un solide 1 par rapport à un solide 2 dans un repère R(O;$\vec{x}$,$\vec{y}$,$\vec{z}$).

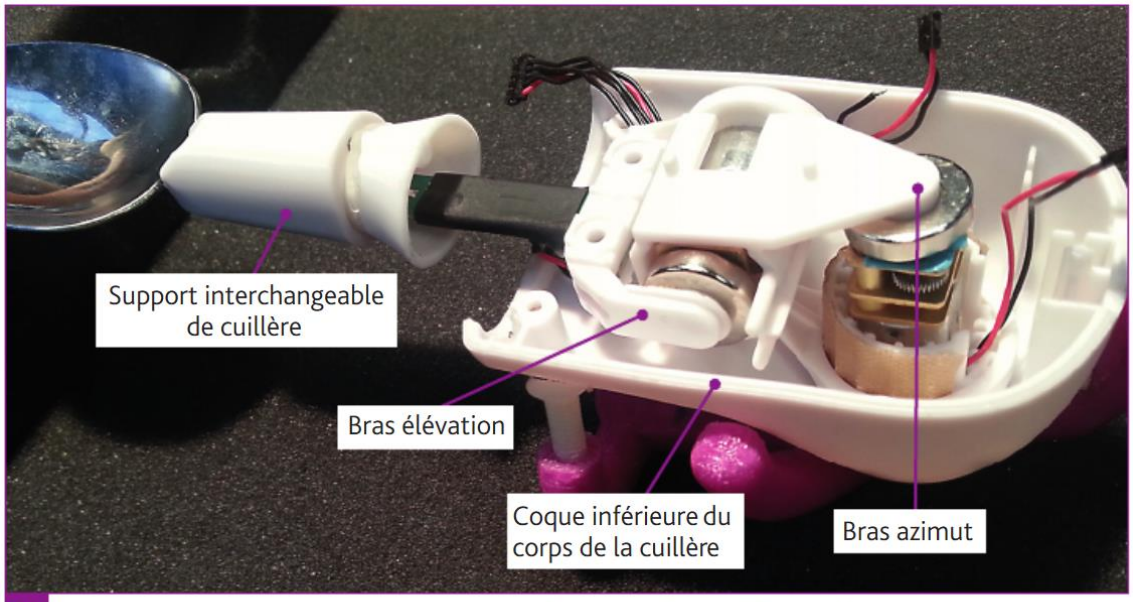
Ressources

IV. Groupe cinématiquement lié :

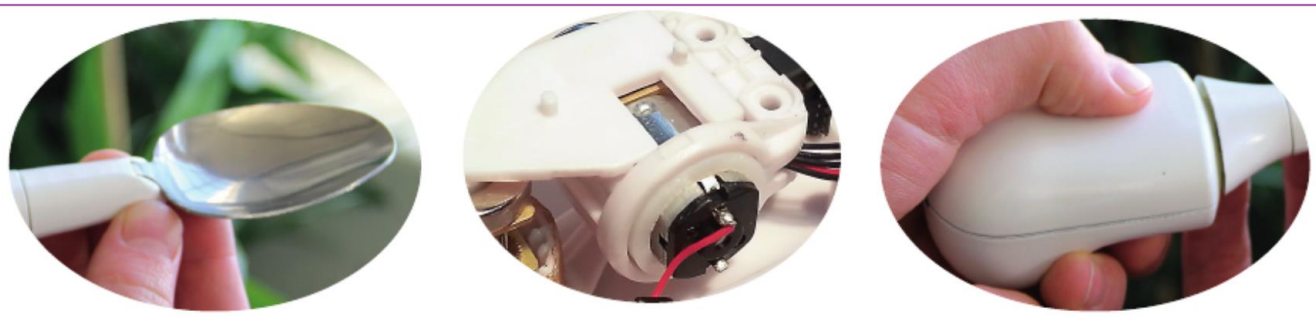
Un groupe cinématiquement lié est un ensemble de solides pour lesquels il n'existe pas de mouvement relatif entre eux [documents 14, 15 et 16]. Il est parfois appelé « classe d'équivalence cinématique »

Les normes :

Les symboles de liaisons sont normalisés dans le document Norme NF EN 23952/ISO 3952-1, disponible sur le site Internet de l'AFNOR (Association Française de Normalisation)



14 Quatre groupes cinématiquement liés pour la cuillère Liftware®.

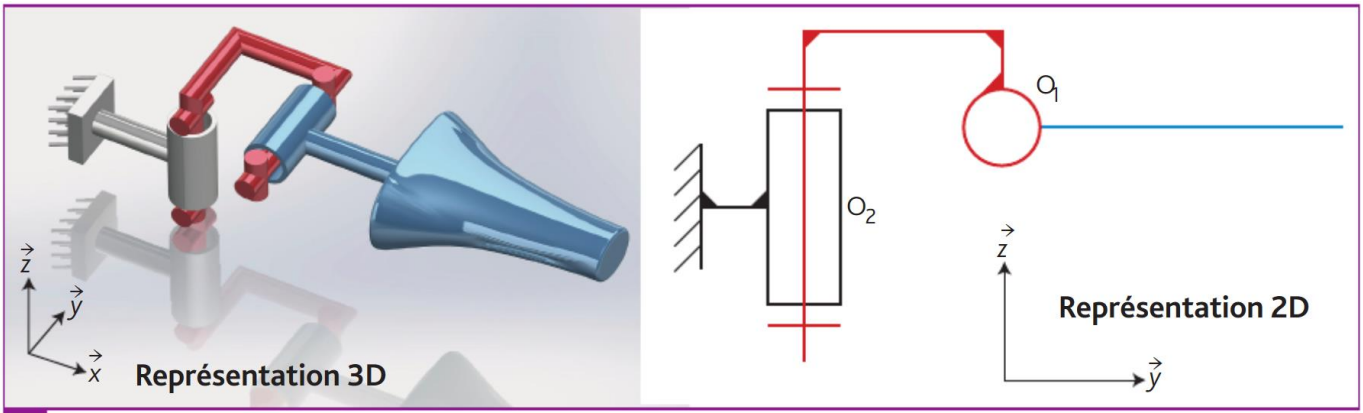


A = {corps de la cuillère}

B = {bras azimut}

C = {bras élévation ; support interchangeable}

15 Définition des groupes cinématiquement liés.



16 Schémas cinématiques en 3D et 2D.

Ressources

FICHE 20 : *Représentation des installations fluidiques et thermiques*

I. Principaux composants d'une installation solaire thermique

Voici les principaux éléments de représentation d'une installation thermique [doc 17] :

❶ Les capteurs solaires transforment le rayonnement solaire en chaleur grâce à un absorbeur (un corps noir caractérisé par des propriétés d'absorption très élevées et d'émissivité très basses). L'absorbeur transfère la chaleur à un fluide caloporteur circulant au travers de chacun des capteurs solaires.

❷ Le circuit primaire, rempli d'un fluide caloporteur, achemine l'énergie thermique depuis les capteurs solaires vers le(s) ballon(s) de stockage.

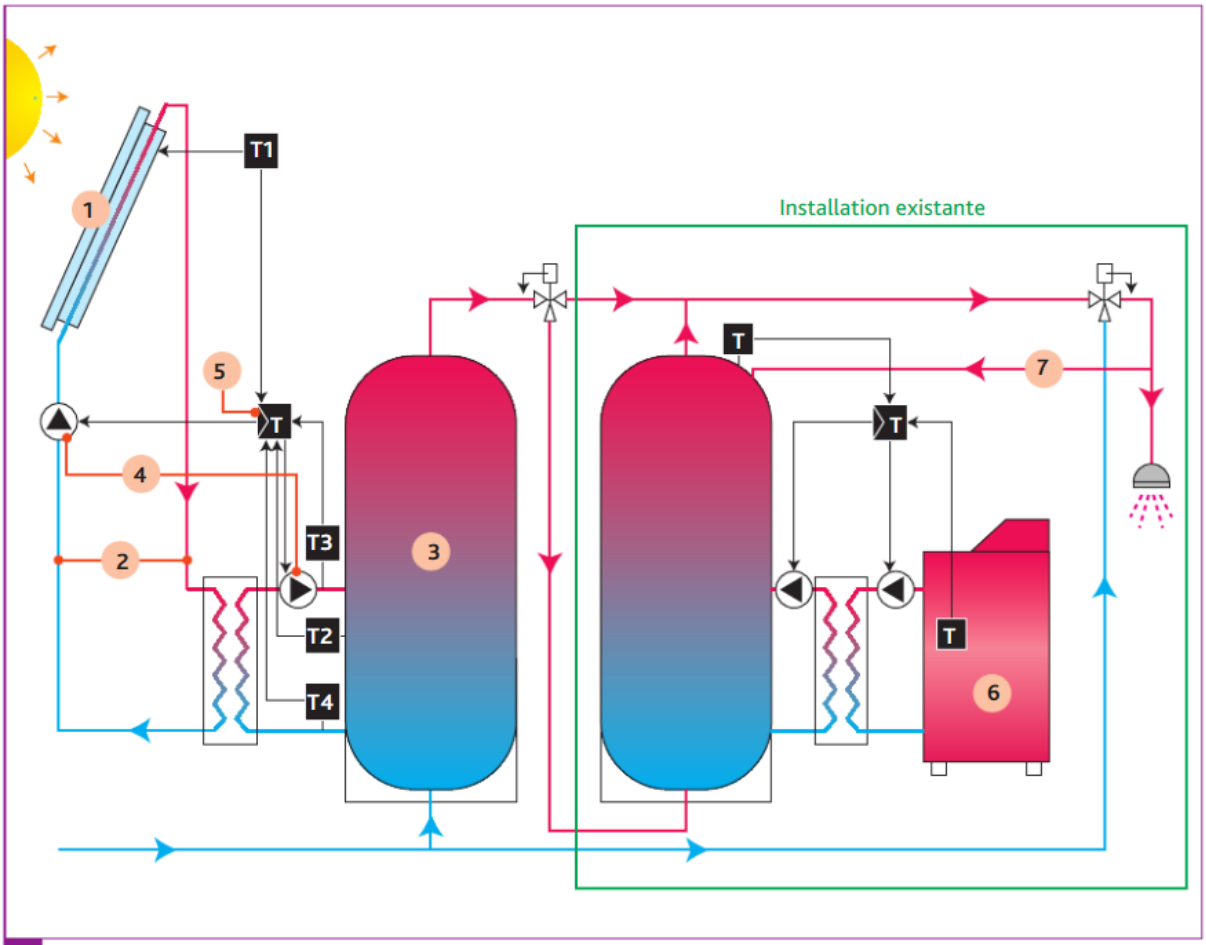
❸ Le(s) ballon(s) de stockage accumule(nt) l'eau chaude produite lorsqu'il n'y a pas de puisage.

❹ Les circulateurs entrent en action lorsque la différence de température entre le capteur T1 et le capteur T2 en fon de ballon dépasse quelques degrés et s'arrêtent lorsque la différence de température entre les capteurs à la sortie T3 et l'entrée de l'échangeur T4 devient négligeable.

❺ Le dispositif de régulation électronique commande le fonctionnement du système selon les conditions d'ensoleillement et la consommation en eau chaude.

❻ Une source d'énergie d'appoint porte l'eau préchauffée à la température souhaitée, quelles que soient les conditions d'ensoleillement.

❼ Boucle de distribution de l'eau chaude.

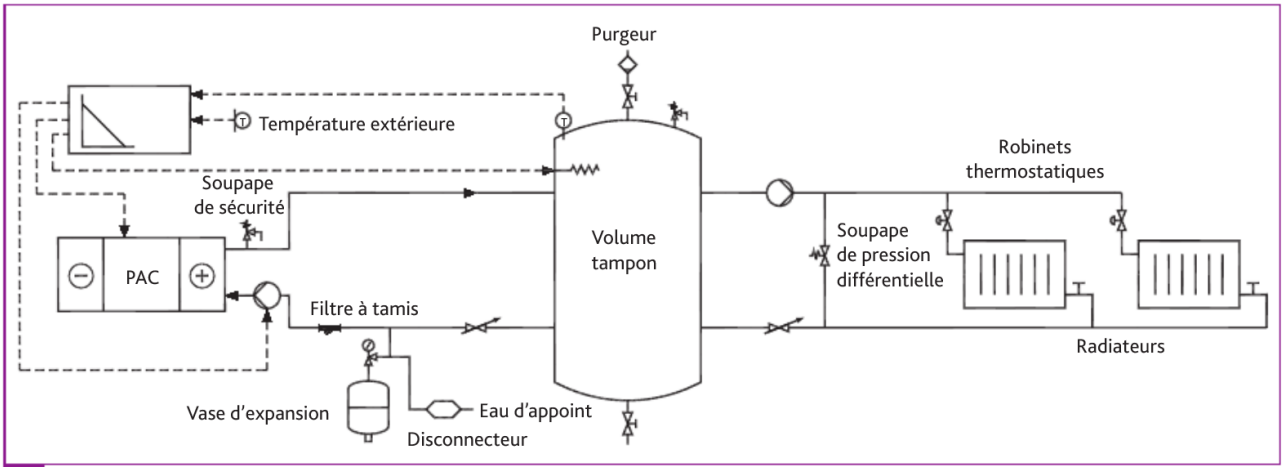


17 Principaux composants d'une installation solaire thermique.

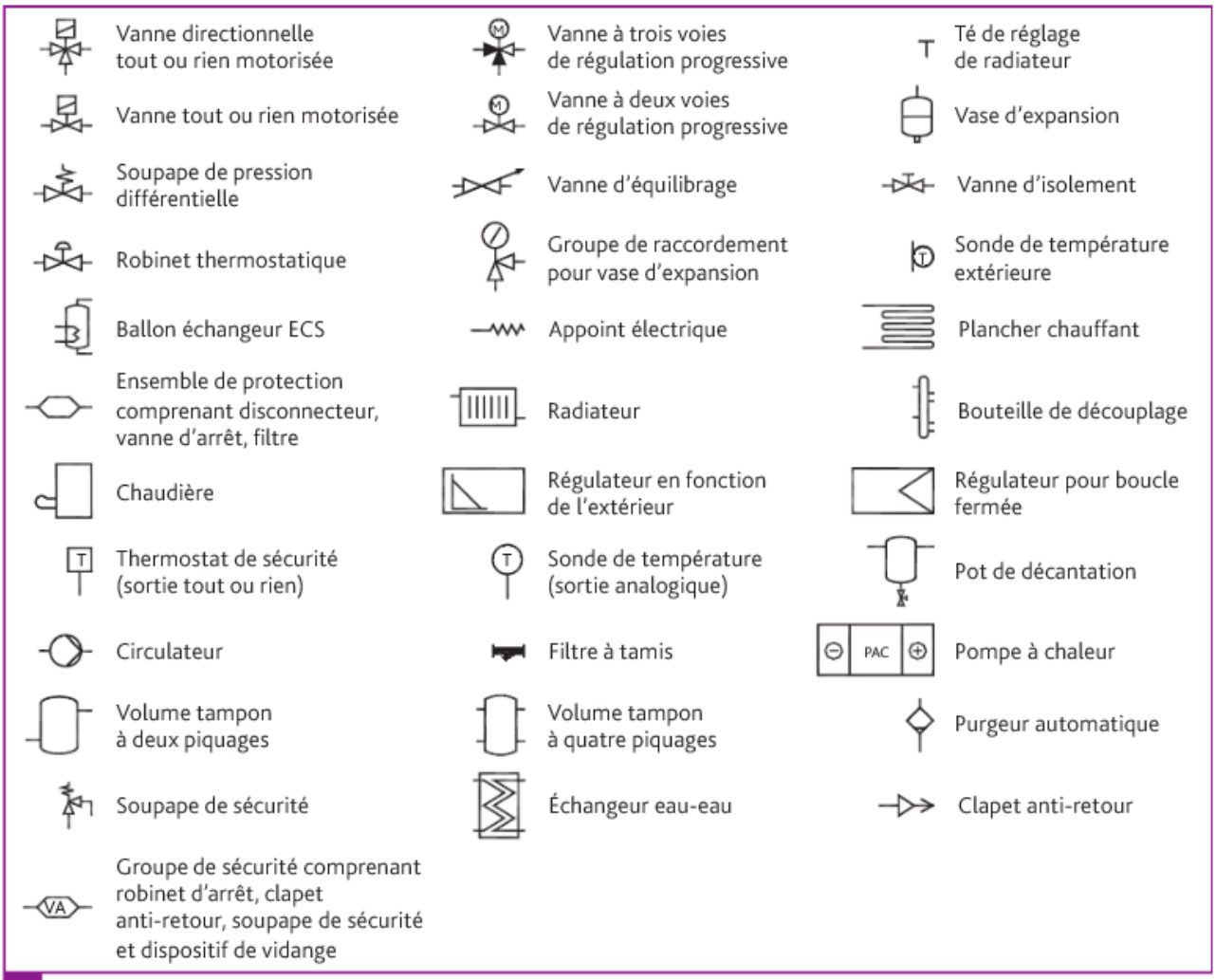
Ressources

II. Alimentation d'un circuit de radiateurs à l'aide d'une PAC

Le document ci-dessous [document 18] est un schéma de principe, il ne comporte pas tous les équipements nécessaires. Certains accessoires peuvent être intégrés directement dans la pompe à chaleur (en particulier le circulateur)



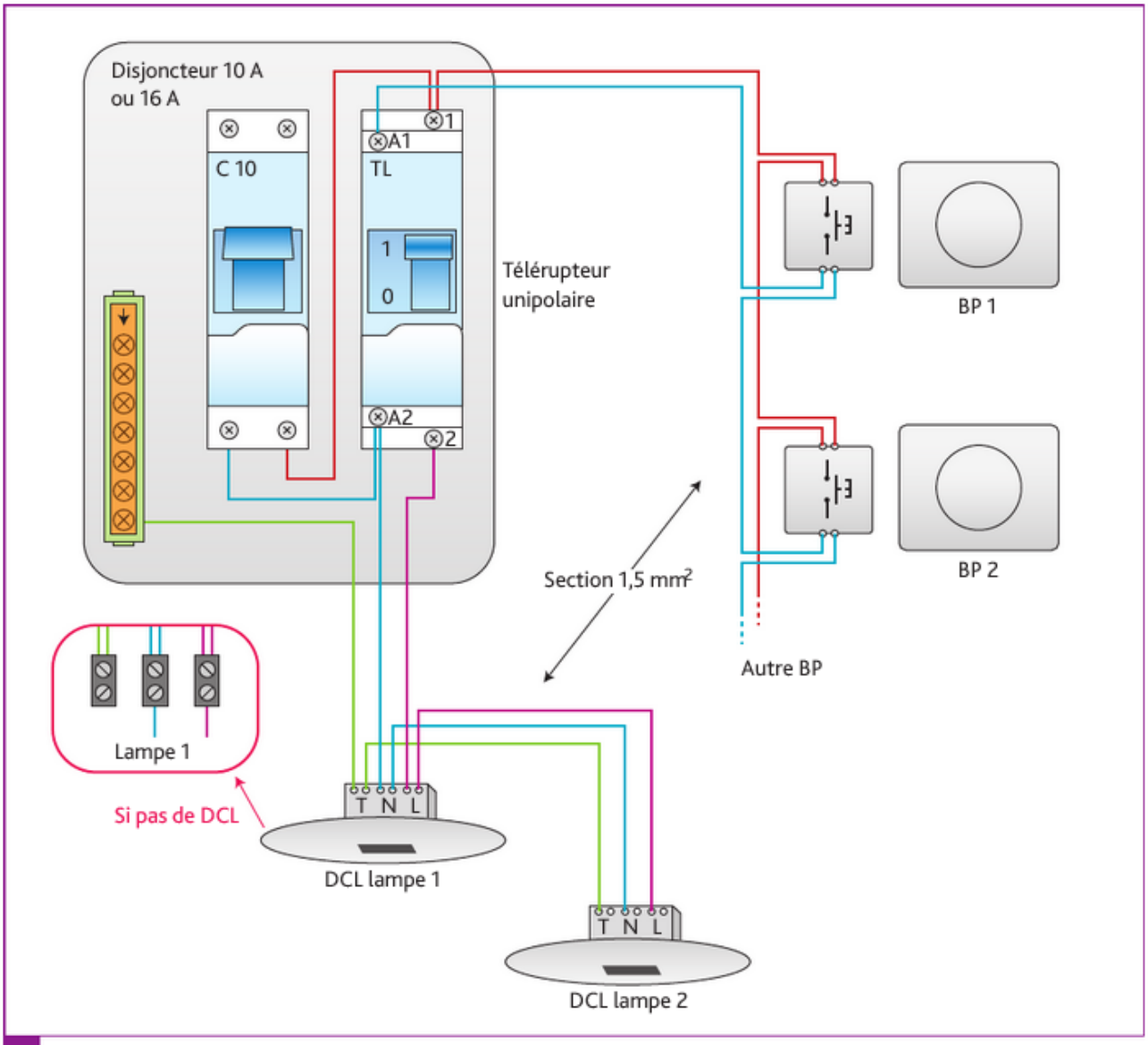
18 Représentation schématique d'une alimentation d'un circuit de radiateurs à l'aide d'une PAC.



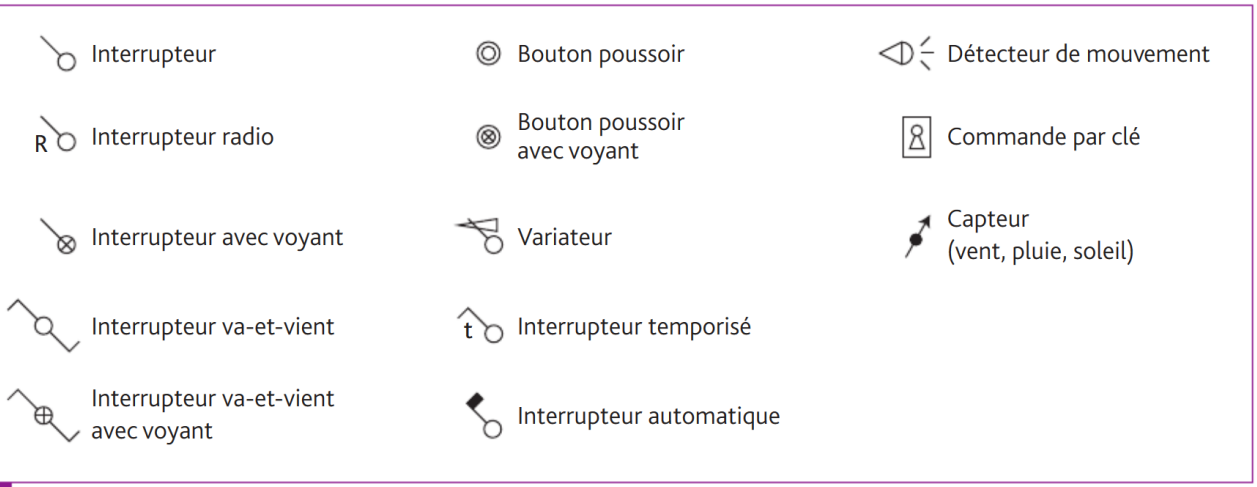
19 Principaux symboles normalisés de représentation des schémas fluidiques et thermiques.

Ressources

FICHE 21 : *Éléments de représentation des installations électriques*

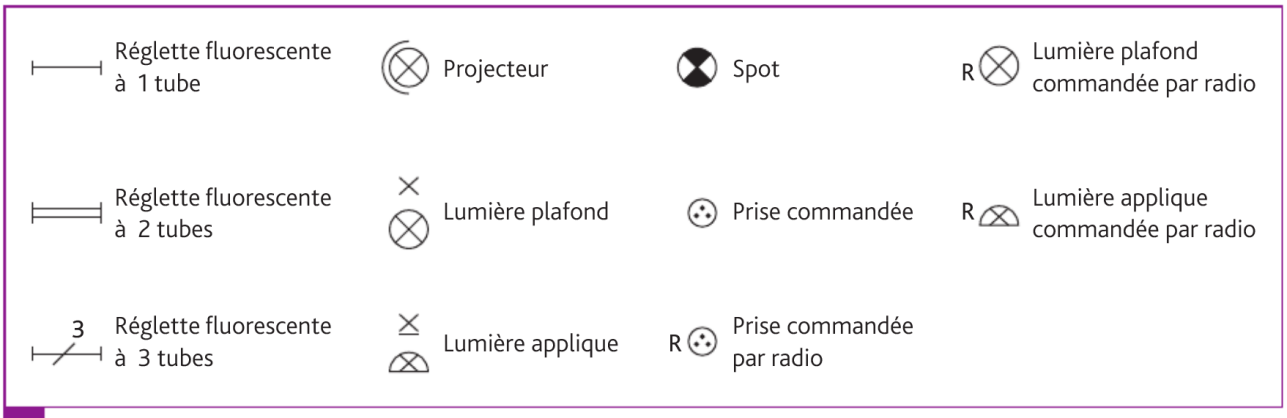


20 Schéma de câblage d'un va-et-vient par télérupteur.

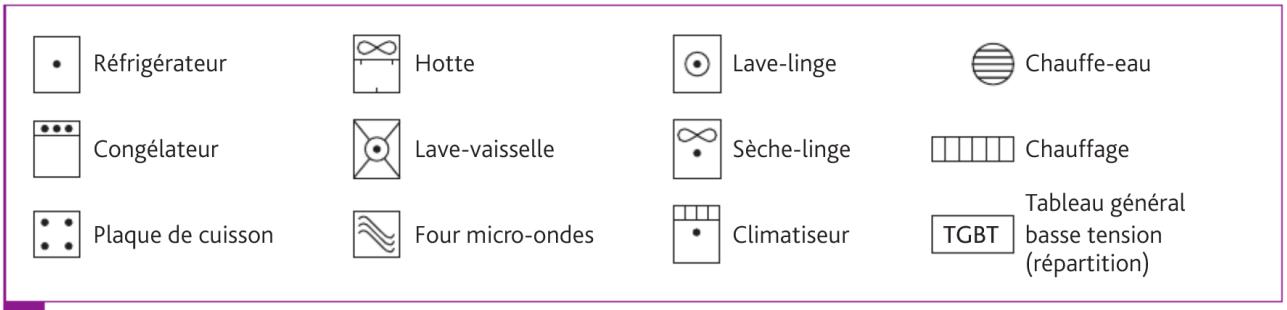


21 Symboles électriques des commandes.

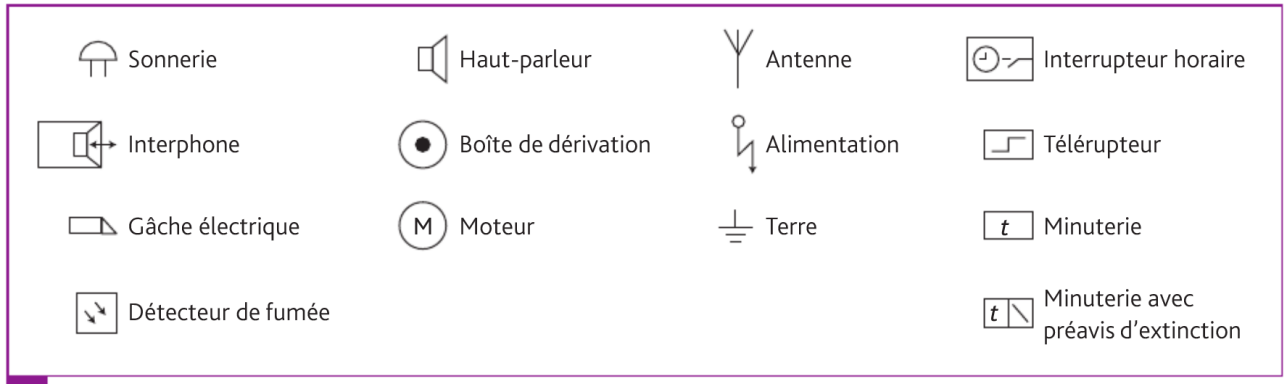
Ressources



22 **Symboles électriques des éclairages.**



23 **Symboles électriques des équipements et des circuits spécialisés.**

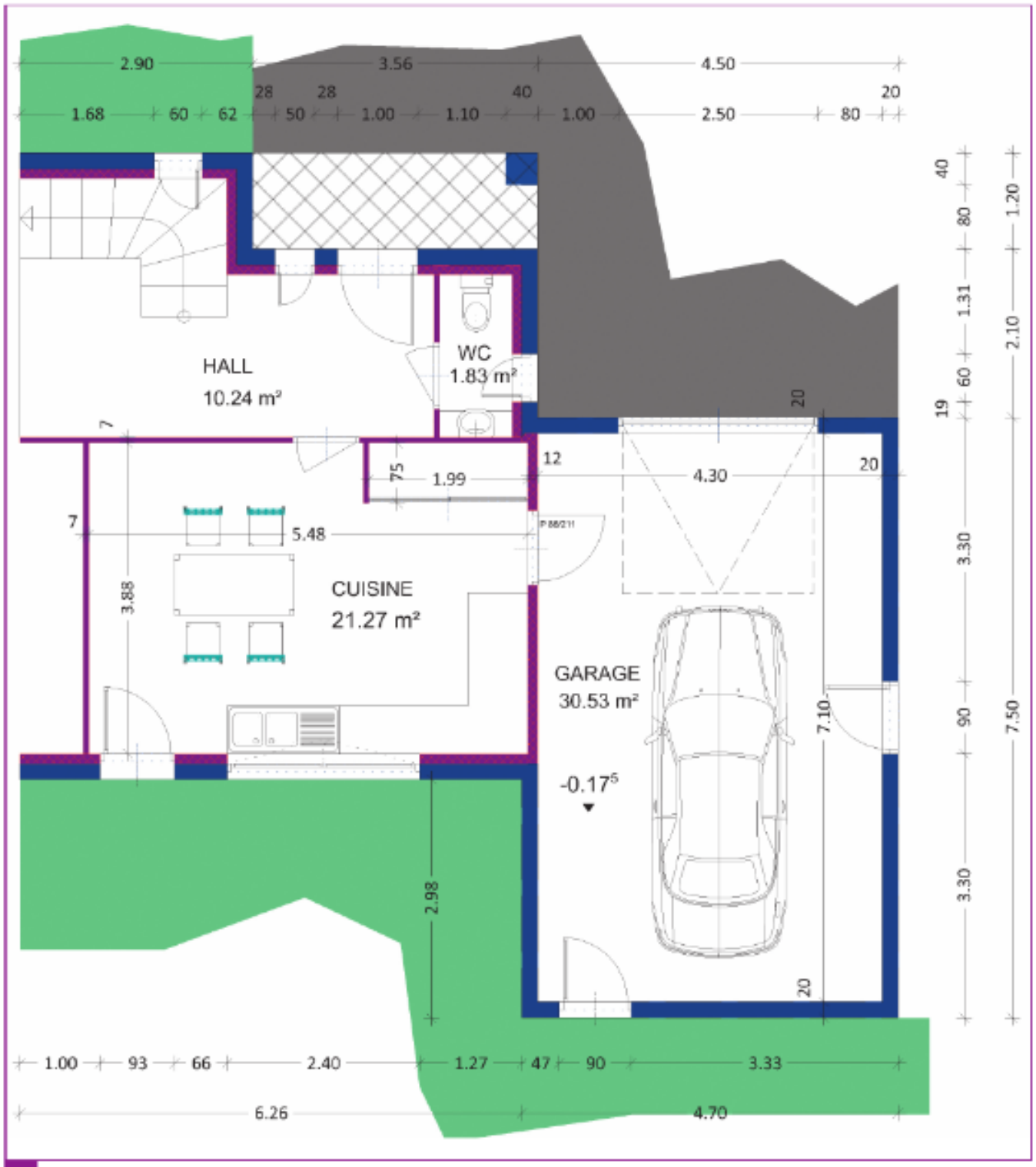


24 **Symboles électriques divers.**

Ressources

FICHE 22 : *Éléments de représentation dans le bâtiment*

À partir des modèles volumiques, il est possible d'obtenir des plans spécifiques à chaque corps de métier, nommés plans d'exécution. Dans le milieu du bâtiment, le plan d'exécution est destiné au chef de chantier pour l'organisation de la réalisation [document 25].



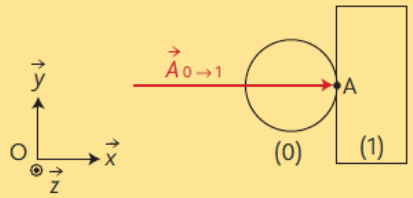
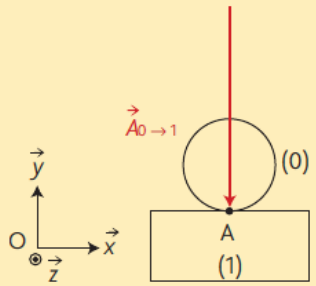
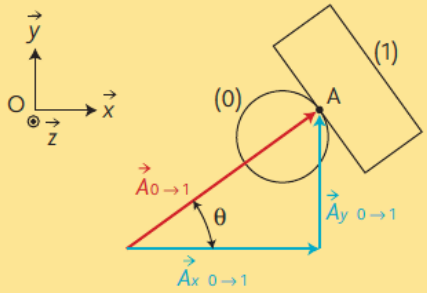
25 Détail d'un plan d'exécution d'une partie d'une maison individuelle.

Ressources

FICHE 23 : Actions mécaniques

Les actions de contact ou les actions à distance (par exemple le poids) sont modélisées par des forces. Les forces sont représentées par une simple flèche. Elles sont exprimées en Newton (N). Elles sont notées $\overrightarrow{F_{A0\to1}}$ ou $\overrightarrow{A_{0\to1}}$. Cette notation se lit « force au point A exercée par le solide 0 sur le solide 1 ».

I. Actions mécaniques de contact concentrées en un point

Représentation graphique de la force de (0) sur (1)	Vecteur de la force de (0) sur (1) dans le repère $(O,\vec{x},\vec{y})$	Torseur en A de (0) sur (1) dans le repère $(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})$
	$\vec{A}_{0\to1}=\begin{vmatrix} A_{x0\to1} \\ 0 \end{vmatrix}$	$\{T_{0\to1}\}=\begin{Bmatrix} A_{x0\to1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{A(\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$
	$\vec{A}_{0\to1}=\begin{vmatrix} 0 \\ -A_{y\,0\to1} \end{vmatrix}$	$\{T_{0\to1}\}=\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ -A_{y0\to1} & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{A(\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$
	$\vec{A}_{0\to1}=\begin{vmatrix} A_{x\,0\to1} \\ A_{y\,0\to1} \end{vmatrix}$ Les composantes sont : $A_{x\,0\to1}=A_{0\to1}\cdot\cos\theta$ $A_{y\,0\to1}=A_{0\to1}\cdot\sin\theta$ La norme vaut : $\left\|\vec{A}_{0\to1}\right\|=\sqrt{A^2_{x\,0\to1}+A^2_{y\,0\to1}}$	$\{T_{0\to1}\}=\begin{Bmatrix} A_{x0\to1} & 0 \\ A_{y0\to1} & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{A(\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$

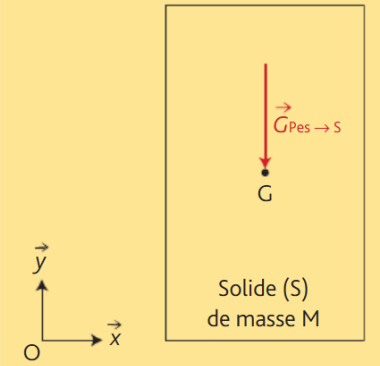
Ressources

II. Actions mécaniques à distance dues à la pesanteur :

Le poids d'un solide peut être représenté par une force $\overrightarrow{G_{pes \to S}}$ appelée poids, dont le point d'application est le centre de gravité du solide, la direction est verticale vers le bas et l'intensité est :

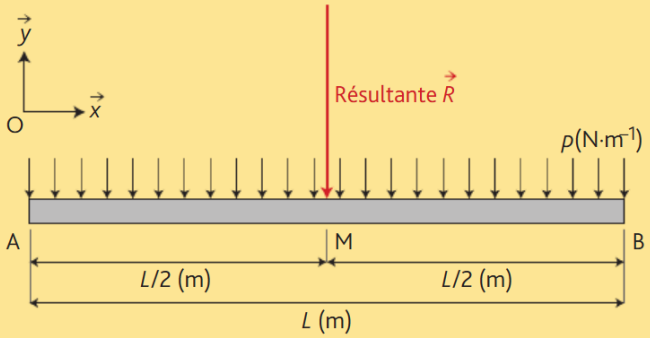
$$\left\| \vec{G}_{Pes \to S} \right\| = M \times g$$

$\left\| \vec{G}_{Pes \to S} \right\|$: norme du vecteur poids (N)
M : masse du solide (kg)
g : accélération de la pesanteur ($m \cdot s^{-2}$)

Représentation graphique du poids sur le solide (S)	Vecteur du poids dans le repère $(O, \vec{x}, \vec{y})$	Torseur en G du poids dans le repère $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$
	$\vec{G}_{Pes \to S} = \begin{vcases} 0 \\ -M \times g \end{vcases}$	$\{T_{Pes \to S}\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ -M \times g & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{G \left(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}\right)}$

III. Actions mécaniques réparties sur une ligne ou charge linéique :

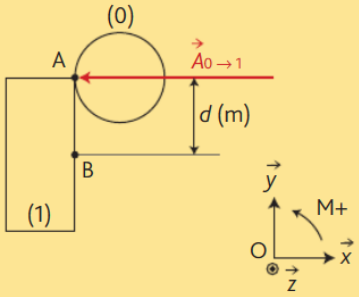
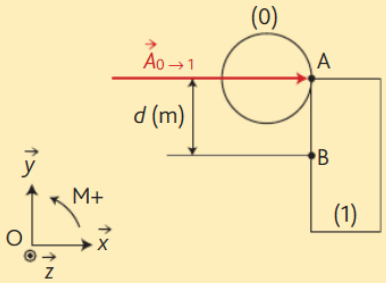
Il est parfois nécessaire de modéliser les actions mécaniques par des charges linéiques, comme par exemple les actions de pesanteur sur une poutre ou l'action d'un cylindre sur un plan.

Représentation graphique de la charge linéique p ($N \cdot m^{-1}$) et de sa résultante $\vec{R}$	Torseur en M de la résultante R dans le repère $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$
 $\left\| \vec{R} \right\| = p \times L = R$ R : résultante de la charge linéique (N) p : charge linéique ($N \cdot m^{-1}$) L : longueur de la poutre (m)	$\{T_R\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ -R & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{M \left(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}\right)}$ Le point M est le milieu de [AB].

Ressources

IV. Moment d'une force au point B

Le moment d'une force mesure l'effet d'une force à causer un couple mécanique. On parle alors du moment d'un couple. Les moments sont représentés par une double-flèche. Ils sont exprimés en Newton·mètre (N·m) et sont notés $\overrightarrow{M_{B,A_{0\to1}}}$. Cette notation se lit « moment au point B de l'effort exercé en A par le solide 0 sur le solide 1 ».

Valeur algébrique du moment au point B de la force $\vec{A}_{0\to1}$	Torseur en B de (0) sur (1) dans le repère $(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})$
 $M_{B,\vec{A}_{0\to1}} = +\left\|\vec{A}_{0\to1}\right\| \times d$	$\{T_{0\to1}\} = \begin{Bmatrix} -A_{x0\to1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & +\left\|\vec{A}_{0\to1}\right\| \times d \end{Bmatrix}_{B,(\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$
 $M_{B,\vec{A}_{0\to1}} = -\left\|\vec{A}_{0\to1}\right\| \times d$	$\{T_{0\to1}\} = \begin{Bmatrix} A_{x0\to1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\left\|\vec{A}_{0\to1}\right\| \times d \end{Bmatrix}_{B,(\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$

La valeur algébrique du moment $\overrightarrow{M_{B,A_{0\to1}}}$ est égale au produit de $\overrightarrow{\|A_{0\to1}\|}$ par le bras de levier d. Si $\overrightarrow{\|A_{0\to1}\|}$ fait tourner le solide autour du point B dans le sens trigonométrique, le moment est dit positif. Dans le cas contraire le moment est dit négatif.

$\vec{M}_{B,\vec{A}_{0\to1}}$

$\vec{M}_{B,\vec{A}_{0\to1}}$: valeur algébrique du moment au point B de la force au point A exercée par le solide 0 sur le solide 1 (N·m)

$\left\|\vec{A}_{0\to1}\right\|$: norme de la force au point A exercée par le solide 0 sur le solide 1 (N)

d : bras de levier (distance entre A et B) (m)

Ressources

FICHE 24 : Principe fondamental de la statique

La statique étudie les **actions mécaniques** exercées sur des **solides indéformables** et en **équilibre**.

I. Isolement d'un solide ou d'un ensemble de solides

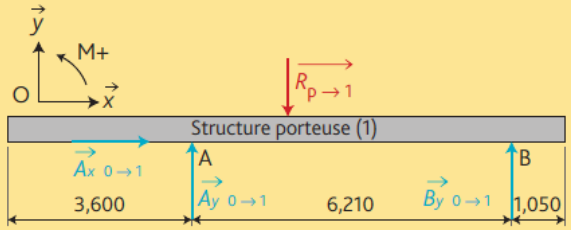
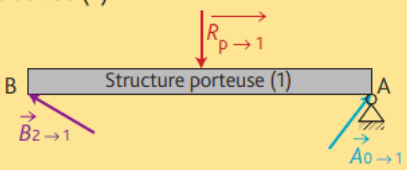
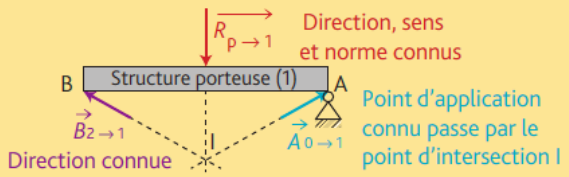
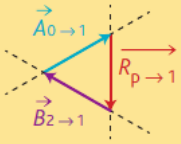
Un mécanisme est composé d'un ensemble de solides en liaisons entre eux. Isoler un solide ou un ensemble de solides consiste à virtuellement enlever tous les solides du mécanisme autres que ceux de l'isolement, et à les **remplacer** par des actions mécaniques.

II. Principe fondamental de la statique (PFS):

Le PFS est un cas particulier du PFD (vitesse constante ou nulle) et s'écrit sous la forme suivante : $\sum \overrightarrow{\text{Actions mécaniques extérieures}} = \vec{0}$

Cette relation se décompose en :

- Théorème de la résultante statique : $\sum \overrightarrow{F_{ext \to S}} = \vec{0}$
- Théorème du moment statique au point A : $\sum \overrightarrow{M_{A,F_{ext \to S}}} = \vec{0}$

Approche analytique	Approche graphique Solide soumis à 3 forces concourantes
Isoler le solide (1). 	**Isoler** le solide (1). 
Faire l'inventaire des actions mécaniques extérieures : $\vec{R}_{p\to1}$; $\vec{A}_{x\ 0\to1}$; $\vec{A}_{y\ 0\to1}$; $\vec{B}_{y\ 0\to1}$	**Faire** l'inventaire des actions mécaniques extérieures : $\vec{R}_{p\to1}$; $\vec{A}_{0\to1}$; $\vec{B}_{2\to1}$
Appliquer le PFS. Théorème de la résultante statique : $\sum \vec{F}_{ext\to1} = \vec{0}$ Sur x : $A_{x\,0\to1} = 0$ Sur y : $A_{y\,0\to1} + B_{y\,0\to1} - R_{p\to1} = 0$ Théorème du moment statique au point A : $\sum \vec{M}_{A,F_{ext\to1}} = \vec{0}$ $\vec{M}_{A,A_{y\,0\to1}} + \vec{M}_{A,B_{y\,0\to1}} + \vec{M}_{A,R_{p\to1}} = 0$ **Déterminer** les composantes inconnues.	**Déterminer** le point d'intersection des 3 forces.  **Tracer** le « dynamique » des forces.  $\sum \vec{F}_{ext\to1} = \vec{0}$ **Déterminer** graphiquement la norme des forces.

Ressources

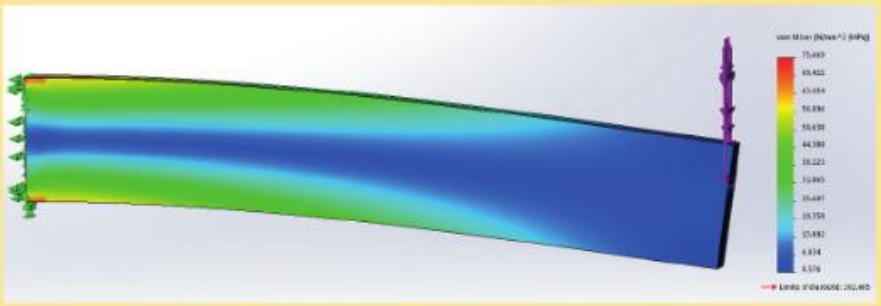
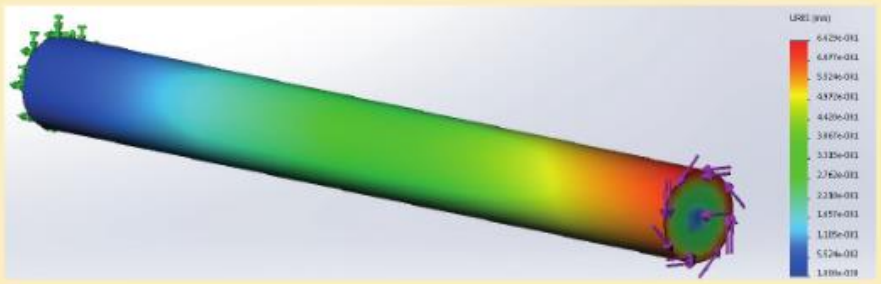
FICHE 25 : Résistance des Matériaux

La Résistance des Matériaux (RdM) étudie comment les solides se comportent sous l'action des charges qui les sollicitent. En RdM, les hypothèses d'étude sont que le matériau est :

- Homogène, identique en tout point du solide ;
- Isotrope, mêmes caractéristiques dans toutes les directions ;
- Elastique, les déformations sont proportionnelles aux efforts appliqués.

On assimile le solide étudié à une poutre, c'est-à-dire que sa longueur est grande par rapport aux dimensions des sections droites, et avec des sections droites constantes.

I. Les sollicitations :

Sollicitation	Exemple	Actions mécaniques
Traction	Tracé des contraintes : contraintes de traction uniforme	Effort normal N (+)
Compression	Tracé des contraintes : contraintes de traction uniforme	Effort normal N (–)
Flexion simple	Tracé des contraintes : contraintes de traction en partie supérieure et de compression en partie inférieure 	Moment de flexion M_f
Torsion	Tracé des déplacements 	Moment de torsion M_T

Ressources

II. Les contraintes :

Les sollicitations appliquées à un solide engendrent des contraintes dans le matériau. La contrainte est équivalente à une pression exercée dans le matériau. L'unité est en Nm^{-2} appelé également le Pascal (Pa). Nous utiliserons plus souvent le $MPa=10^6Pa$ ou les Nmm^{-2}.

Contraintes de traction ou de compression

L'effort normal N de traction ou de compression engendre des contraintes normales qui valent :

$$\sigma = \frac{N}{A}$$

σ : contrainte normale (Pa)
N : effort normal de traction ou de compression appliqué sur la section (N)
A : aire de la section sollicitée (m^2)

III. Déformations du matériau :

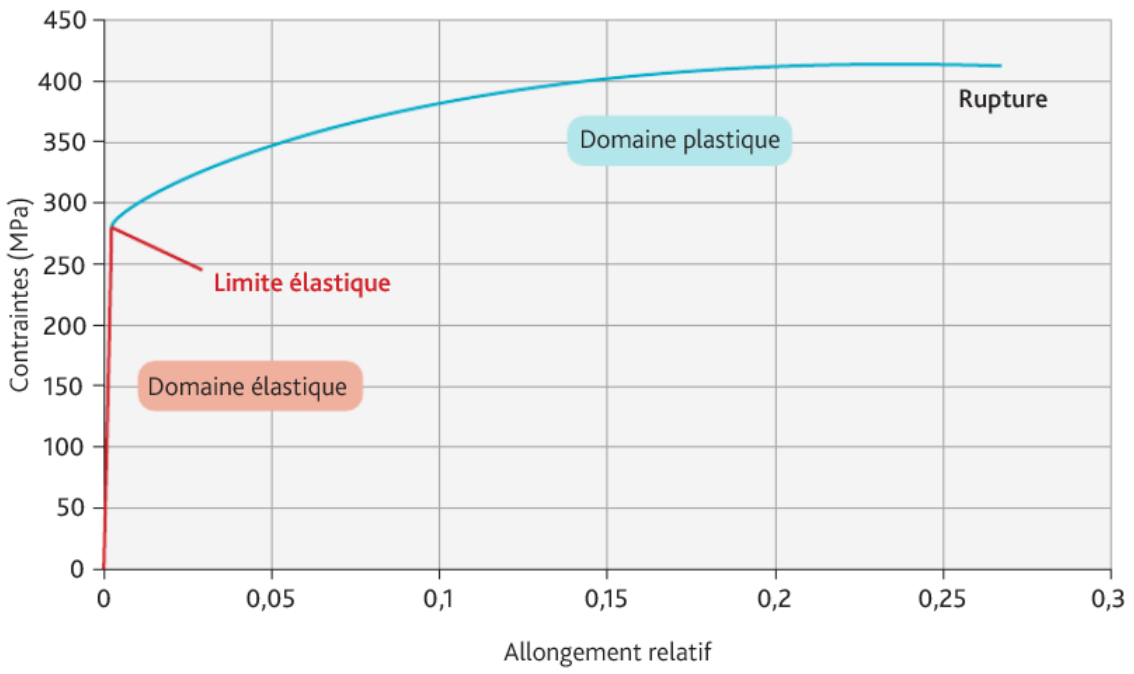
Pour tous les matériaux, les efforts vont engendrer des déformations, comme ici pour un essai de traction sur un fil en acier de diamètre 1 mm [document 1].

À partir de la courbe des résultats de l'essai de traction, on détermine la force exercée sur le fil à la fin de la zone élastique. Cette force permettra de calculer la contrainte à la limite élastique pour le fil en acier testé :

$$\sigma_e = \frac{N}{A}$$

$$\sigma_e = \frac{220}{\pi \times (0{,}5 \cdot 10^{-3})^2} = 280{,}1 MPa$$

σ_e : contrainte normale à la limite élastique (Pa)
N : effort normal de traction à la limite élastique (N)
A : aire de la section sollicitée (m^2)



1 Résultat expérimental de l'essai de traction sur un fil en acier de 1 mm de diamètre.

Ressources

IV. Domaine élastique :

L'essai de traction montre que, dans la zone élastique, l'effort normal est proportionnel à l'allongement du fil ΔL. C'est la loi de Hooke :

$$\sigma = \frac{N}{A} = E \times \frac{\Delta L}{L}$$

σ : contrainte normale (Pa)
N : effort de traction (N)
A : aire de la section sollicitée en traction (m^2)
E : module d'élasticité ou module de Young du matériau (Pa)
ΔL : allongement du fil testé (m)
L : longueur initiale du fil testé (m)

V. Coefficient de sécurité :

- Pour qu'une structure puisse supporter en toute sécurité les actions mécaniques qui la sollicitent, il suffit qu'elle puisse résister à des charges plus élevées. La sécurité est obtenue si le matériau, caractérisé par sa limite élastique σ_e, reste dans le domaine élastique.
- On définit le coefficient de sécurité CS qui doit être supérieur à 1 :

$$CS = \frac{\text{Limite élastique du matériau}}{\text{Contrainte maximale dans le solide}} = \frac{\sigma_e}{\sigma} \geqslant 1$$

VI. Contraintes de flexion :

Les actions sur la travée levante engendrent une sollicitation en flexion [document 2].

La sollicitation en flexion engendre des contraintes de flexion dont les valeurs se calculent avec les formules suivantes :

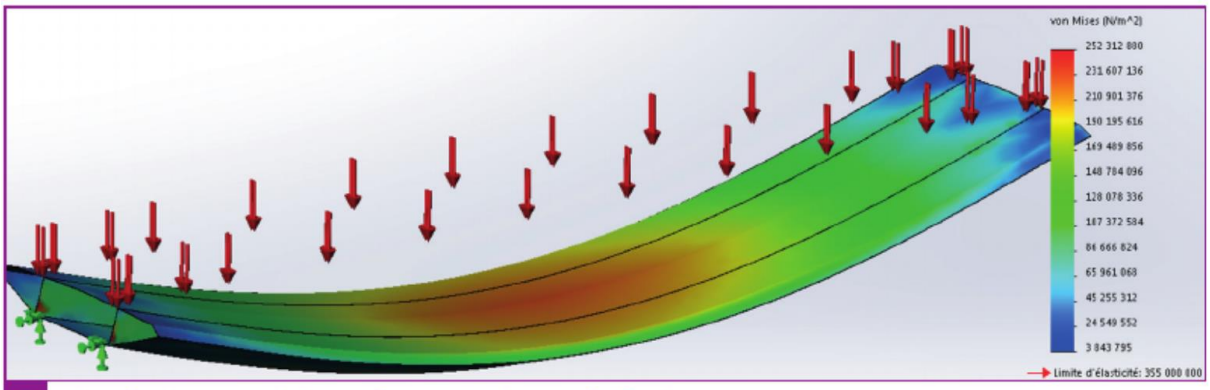
$$\sigma_{sup} = \frac{M}{I_x} \times y_{sup} \text{ et } \sigma_{inf} = \frac{M}{I_x} \times y_{inf}$$

σ_{sup} et σ_{inf} : contraintes normales de flexion (Pa)
M : moment de flexion (N·m)
I_x : moment quadratique (m^4)
y_{sup} et y_{inf} : distances entre le centre de gravité de la section et les fibres supérieures et inférieures (m) [document 4]

Dans le cas d'une poutre sur deux appuis avec une charge linéique uniformément répartie, le moment de flexion maximal se trouve au milieu de la poutre et vaut [document 3] :

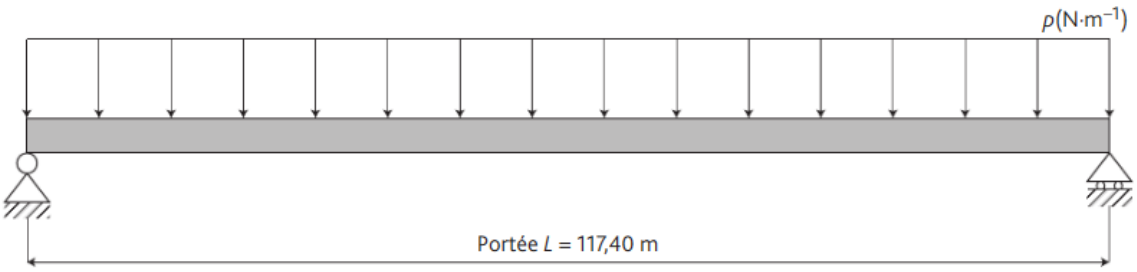
$$M = \frac{p \times L^2}{8}$$

M : moment de flexion maximal (N·m)
p : charge linéique ($N \cdot m^{-1}$)
L : portée de la poutre entre les deux appuis (m)

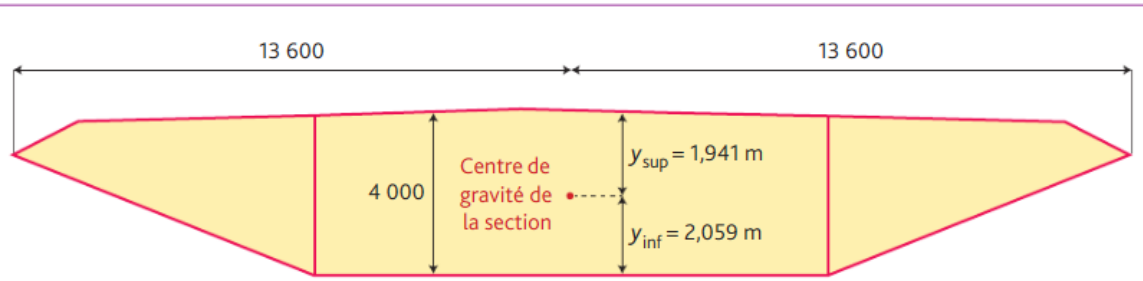


2 Simulation numérique des contraintes de flexion.

Ressources



3 Schéma de la poutre sur deux appuis simples avec une charge linéique uniformément répartie.



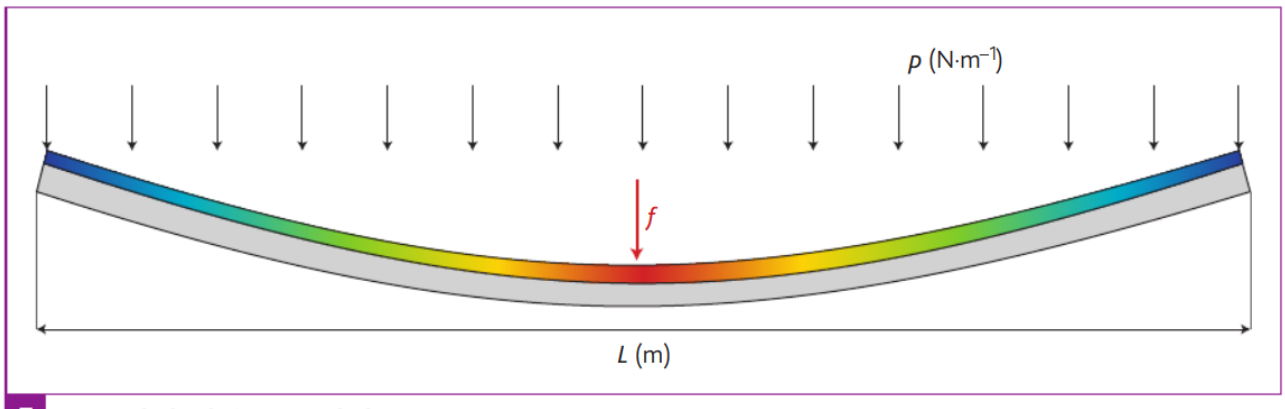
4 Exemple avec la position du centre de gravité de la section de la travée du pont Chaban-Delmas.

VII. Déplacements des structures :

En utilisant la formule théorique issue de la « résistance des matériaux », le déplacement (ou flèche) au milieu d'une poutre sur deux appuis simples distants de L et soumise à une charge linéique uniforme ρ vaut [document 5] :

$$f = \frac{5 \times p \times L^4}{384 \times E \times I_x}$$

f : flèche (m)
p : charge linéique uniforme agissant sur la poutre (N·m^{-1})
L : portée de la poutre (m)
E : module d'élasticité du matériau (Pa)
I_x : moment quadratique de la section de la poutre (m^4)



5 Tracé de la déformée de la poutre.

Ressources

FICHE 26 : Transfert de charges

Les actions de contact ou les actions à distance (par exemple le poids) sont modélisées par des forces. Les forces sont représentées par une simple flèche. Elles sont exprimées en Newton (N). Elles sont notées $\overrightarrow{F_{A0\to1}}$ ou $\overrightarrow{A_{0\to1}}$. Cette notation se lit « force au point A exercée par le solide 0 sur le solide 1 ».

I. Action de la gravité

Les structures porteuses des constructions pèsent lourd, et leur poids exerce des actions mécaniques importantes sur la structure elle-même et sur le sol qui la supporte. Le poids d'une structure s'exerce en permanence, c'est pourquoi on le nomme la **charge permanente**.

On évalue le **poids de chaque élément de la structure** à partir des masses élémentaires des constituants :

- Masse d'un élément = masse volumique ($kg \cdot m^{-3}$) × volume de l'élément ;
- Masse d'un élément = masse surfacique ($kg \cdot m^{-2}$) × surface de l'élément ;
- Masse d'un élément = masse linéique ($kg \cdot m^{-1}$) × longueur de l'élément.

L'action mécanique de la pesanteur des éléments de la structure est évaluée à partir de la constante gravitationnelle :

$P = m \cdot g$

P : poids d'un élément (N)
m : masse de l'élément (kg)
$g = 9{,}81$: constante gravitationnelle ($m \cdot s^{-2}$)

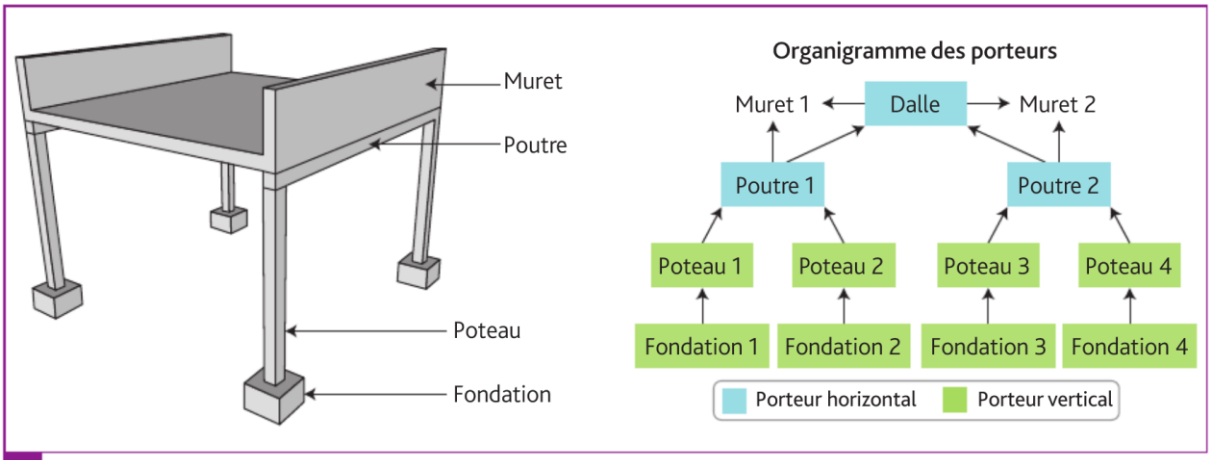
II. Les charges verticales dans la structure

L'analyse de la structure nécessite d'évaluer comment les charges sont transmises d'un composant à un autre. La pesanteur est une action mécanique verticale descendante. Il est possible d'évaluer le transfert de charges verticales par l'analyse des porteurs.

Le premier porteur de la chaîne est la fondation. On peut ainsi identifier une chaîne structurelle dont le premier élément est la fondation et le dernier est celui qui ne porte rien. Cette chaîne structurelle est représentée par l'organigramme des porteurs. À titre d'exemple, on donne l'organigramme des porteurs pour une structure simple d'une dalle posée sur 4 poteaux [document 6].

III. Surface d'influence

Très souvent, les ouvrages de construction sont composés de dalles (plancher) qui reposent sur un ou plusieurs porteurs (poteaux, murs…). Il est donc nécessaire de déterminer la charge transmise par une dalle aux porteurs. Cette charge transmise dépend de la disposition des porteurs sous la dalle. La surface portée par chaque porteur est nommée surface d'influence, c'est la surface que la dalle reporte sur chaque porteur [document 7].

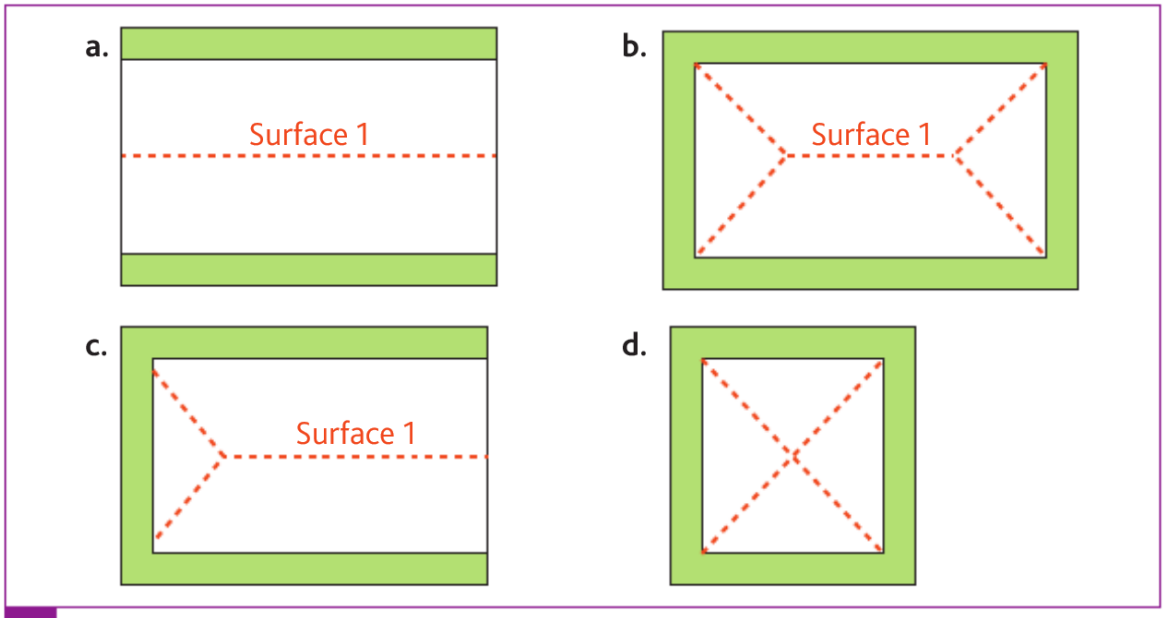


6 Organigramme des porteurs pour descente de charges.

Ressources

Lorsque la dalle est portée par deux porteurs, on considère que chaque porteur en supporte la moitié (a.).

Lorsque la dalle est portée par plus de deux porteurs, on définit des surfaces d'influence à partir d'une ligne de répartition tracée avec un angle à 45 degrés (b., c. et d.).



7 Exemples de surfaces d'influence.

IV. Dimensionnement d'une fondation superficielle

Pour déterminer une fondation superficielle, on utilise la contrainte de calcul q (contrainte verticale pouvant être mobilisée sous la fondation sans danger de tassement et de rupture).

L'aire de la fondation superficielle devra satisfaire la relation suivante :

$$A \geq \frac{V_d}{q}$$

q : contrainte de calcul du sol (Pa)
V_d : charge verticale agissante de calcul (ELU) de la fondation sur le sol (N)
A : aire de la surface de la fondation en contact avec le sol (m^2)

Pour obtenir la charge agissante de calcul aux ELU, les actions permanentes sont multipliées par 1,35 et les actions variables par 1,5.

La contrainte de calcul du sol est déterminée à partir d'essais de mécanique des sols ou déduite de l'expérience. On pourra prendre comme valeur celle du [document 8].

Nature du sol	q (MPa)
Roches peu fissurées, saines, non désagrégées, de stratification favorable	0,75 à 4,5
Terrain non cohérent à bonne compacité	0,35 à 0,75
Terrain non cohérent à moyenne compacité	0,20 à 0,40
Argile	0,03 à 0,30

Nature du sol	q (MPa)
Limon de plateaux	0,15 à 0,30
Terre à meulière	0,30 à 0,45
Marne verte, argile	0,07 à 0,45
Alluvions anciens, sables et graviers	0,60 à 0,90
Sables de Beauchamp	0,75 à 1,00
Craie	0,90 à 1,00
Marne + caillasse	0,75 à 1,50
Calcaire grossier	1,80 à 4,50

8 Contraintes de calcul de quelques sols.

Ressources

FICHE 27 : Cinématique

I. Vitesse angulaire d'un solide en rotation :

La vitesse angulaire est exprimée telle que :

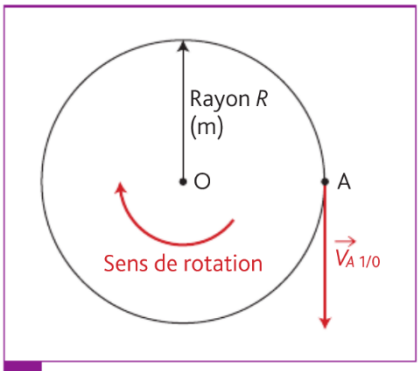
$$\omega_{S/0} = N_{S/0} \times \frac{2\pi}{60}$$

$\omega_{S/O}$: vitesse angulaire (rad·s^{-1})
N : fréquence de rotation (tr·min^{-1})

II. Relation entre la vitesse linéaire et la vitesse angulaire :

$$\left\| \vec{V}_{A\,1/0} \right\| = R \times \left\| \vec{\omega}_{1/0} \right\|$$

$\left\| \vec{V}_{A\,1/0} \right\|$: norme du vecteur vitesse linéaire en A (m·s^{-1})
R : rayon de la roue (m)
$\left\| \vec{\omega}_{1/0} \right\|$: vitesse angulaire (rad·s^{-1})



9 Vitesse angulaire et linéaire d'un solide en rotation.

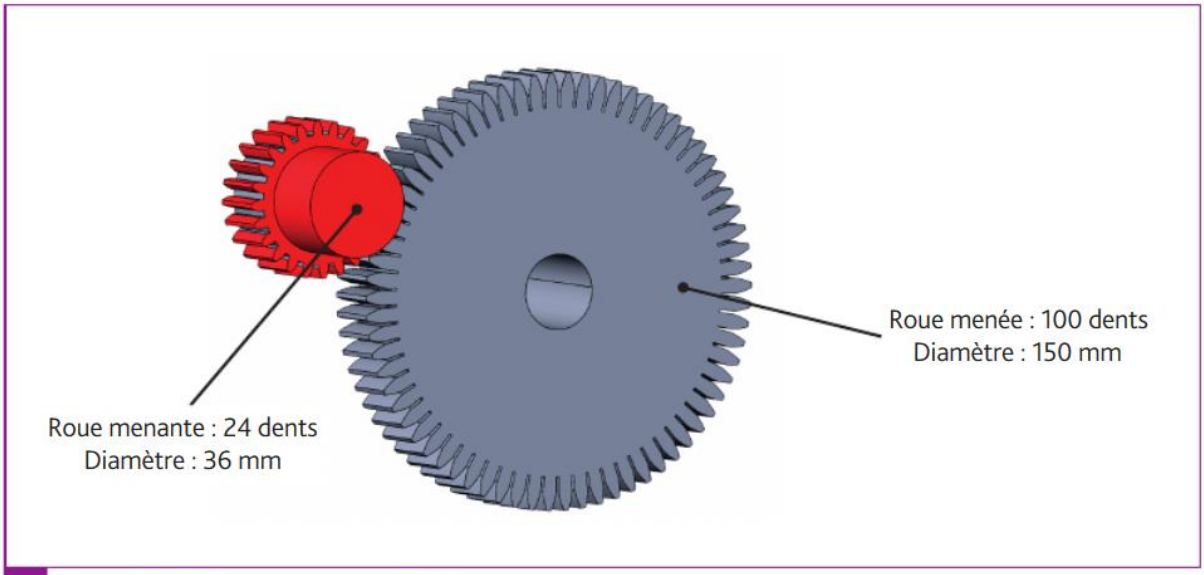
III. Réducteur de vitesse

Il est nécessaire d'adapter la vitesse angulaire et le couple d'un moteur à l'usage que l'on en fait. Pour cela, on peut utiliser un système qui permet de réduire la vitesse angulaire et d'augmenter le couple [document 10].

Le coefficient de réduction de la vitesse vaut :

$$k = \frac{\omega_{sortie}}{\omega_{moteur}} = (-1)^n \times \frac{D_{1a}}{D_{1b}} = (-1)^n \times \frac{Z_{1a}}{Z_{1b}}$$

k : coefficient de réduction de la vitesse
ω_{sortie} : vitesse angulaire de sortie (rad·s^{-1})
ω_{moteur} : vitesse angulaire d'entrée (rad·s^{-1})
n : nombre de contacts extérieurs
D_{1a} : diamètre de la roue menante 1a
D_{1b} : diamètre de la roue menée 1b
Z_{1a} : nombre de dents de la roue menante
Z_{1b} : nombre de dents de la roue menée



10 Exemple d'un engrenage droit.

Ressources

FICHE 28 : Puissance

I. Puissance développée par une force :

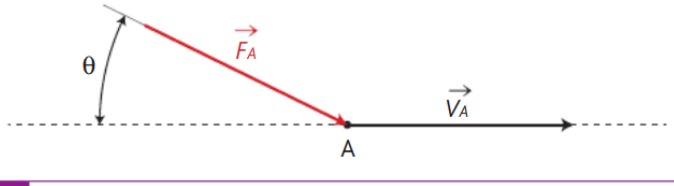
La puissance instantanée P développée par une force $\vec{F}$ dont le point d'application A se déplace à la vitesse $\vec{V}$ est égale à :

$$P = \vec{F} \cdot \vec{V} = F \cdot V \cdot \cos\theta$$

P : puissance instantanée (W)
F : force (N)
V : vitesse linéaire ($m \cdot s^{-1}$)
θ : angle (rad)

Cas particulier :

- si $\theta = 0 \Rightarrow \cos(\theta) = 1 \Rightarrow P = F \times V$
- si $\theta = \pm\frac{\pi}{2} \Rightarrow \cos(\theta) = 0 \Rightarrow P = 0$



11 Puissance développée par une force.

$$\omega_{S/0} = N_{S/0} \times \frac{2\pi}{60}$$

$\omega_{S/O}$: vitesse angulaire ($rad \cdot s^{-1}$)
N : fréquence de rotation ($tr \cdot min^{-1}$)

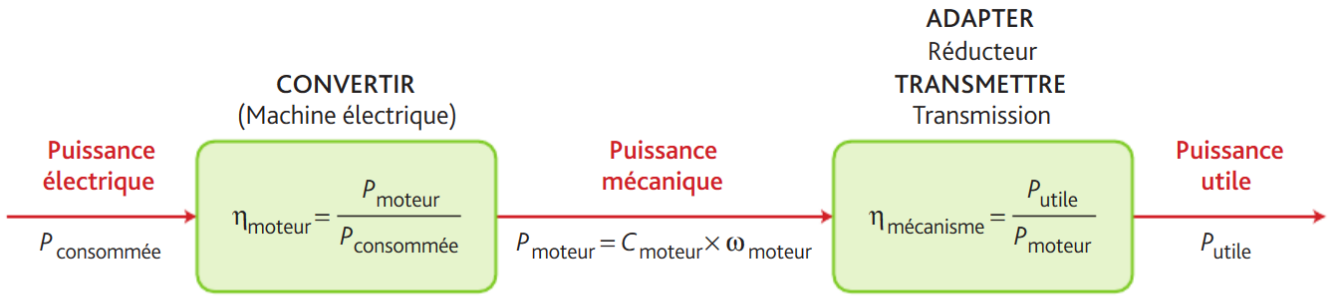
II. Puissance développée par un couple :

La puissance développée par un couple C tournant à la vitesse angulaire ω est égale à :

$$P = C \times \omega$$

P : puissance développée (W)
C : couple (N·m)
ω : vitesse angulaire ($rad \cdot s^{-1}$)

III. Rendement η d'un système composé d'un moteur électrique, d'un réducteur et d'une transmission



$$\eta = \eta_{moteur} \times \eta_{mécanisme} = \frac{P_{utile}}{P_{consommée}}$$

η : rendement global
η_{moteur} : rendement du moteur
$\eta_{mécanisme}$: rendement du mécanisme
P_{utile} : puissance utile (W)
$P_{consommée}$: puissance consommée (W)

Ressources

FICHE 29 : *Liaisons entre les solides*

Lors de la conception d'un système, on est amené à assembler plusieurs composants entre eux. Il faut ainsi concevoir des liaisons entre les différents solides du système.

Les exigences techniques souhaitées lors de la conception d'une liaison peuvent être :

- de permettre le déplacement et/ou la rotation d'un solide (0) par rapport à un solide (1)
- de transmettre des efforts et/ou des couples d'un solide (0) sur un solide (1).

Les déplacements, ou plus précisément les vitesses d'un solide (0) par rapport à un solide (1), peuvent être composées de vitesses angulaires :

$$\vec{\Omega}_{0/1} = \left\{ \begin{array}{l} \Omega_{x\,0/1} \\ \Omega_{y\,0/1} \\ \Omega_{z\,0/1} \end{array} \right\}_{(\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$$

et de vitesses linéaires :

$$\vec{V}_{A\,0/1} = \left\{ \begin{array}{l} V_{x\,0/1} \\ V_{y\,0/1} \\ V_{z\,0/1} \end{array} \right\}_{(A,\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$$

Ces vitesses peuvent se noter sous la forme d'un torseur cinématique :

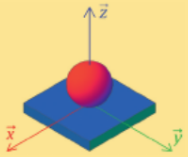
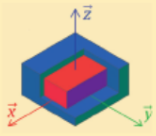
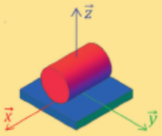
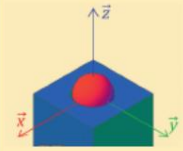
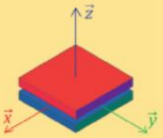
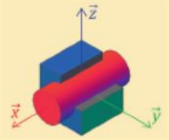
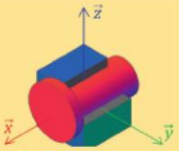
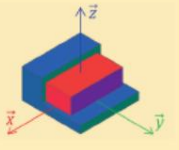
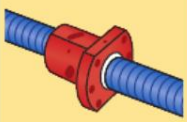
$$\{V_{0/1}\} = \begin{matrix} \\ A \end{matrix} \left\{ \begin{array}{ll} \Omega_{x\,0/1} & V_{x\,0/1} \\ \Omega_{y\,0/1} & V_{y\,0/1} \\ \Omega_{z\,0/1} & V_{z\,0/1} \end{array} \right\}_{(\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$$

qui représentera les degrés de liberté admissibles du solide (0) par rapport au solide (1) au point A qui est le centre de la liaison.

En fonction des degrés de liberté bloqués par la liaison retenue lors de la conception, il sera possible de transmettre un ensemble de forces du solide (0) sur le solide (1) qui se note sous la forme du torseur des actions mécaniques transmissibles au point A de (0) sur (1) dans le repère $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$.

$$\{T_{0\to1}\} = \begin{matrix} \\ A \end{matrix} \left\{ \begin{array}{ll} R_{x\,0\to1} & M_{x\,0\to1} \\ R_{y\,0\to1} & M_{y\,0\to1} \\ R_{z0\to1} & M_{z0\to1} \end{array} \right\}_{(\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$$

Ressources

Dénomination des liaisons entre deux solides	Descriptif de la liaison entre le solide rouge (0) et le solide bleu (1)	Torseur cinématique en A du solide (0) par rapport au solide (1)	Torseur des actions mécaniques en A du solide (0) sur le solide (1)
Ponctuelle ou sphère-plan de normale $\vec{z}$		$\{V_{0/1}\} = \begin{Bmatrix} \Omega_{x0/1} & V_{x0/1} \\ \Omega_{y0/1} & V_{y0/1} \\ \Omega_{z0/1} & 0 \end{Bmatrix}_{A (\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$	$\{T_{0\to1}\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ R_{z0\to1} & 0 \end{Bmatrix}_{A (\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$
Encastrement		$\{V_{0/1}\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{A (\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$	$\{T_{0\to1}\} = \begin{Bmatrix} R_{x0\to1} & M_{x0\to1} \\ R_{y0\to1} & M_{y0\to1} \\ R_{z0\to1} & M_{z0\to1} \end{Bmatrix}_{A (\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$
Linéaire rectiligne de normale $\vec{z}$ et de droite de contact $(A,\vec{x})$		$\{V_{0/1}\} = \begin{Bmatrix} \Omega_{x0/1} & V_{x0/1} \\ 0 & V_{y0/1} \\ \Omega_{z0/1} & 0 \end{Bmatrix}_{A (\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$	$\{T_{0\to1}\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & M_{y0\to1} \\ R_{z0\to1} & 0 \end{Bmatrix}_{A (\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$
Rotule ou sphérique de centre A		$\{V_{0/1}\} = \begin{Bmatrix} \Omega_{x0/1} & 0 \\ \Omega_{y0/1} & 0 \\ \Omega_{z0/1} & 0 \end{Bmatrix}_{A (\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$	$\{T_{0\to1}\} = \begin{Bmatrix} R_{x0\to1} & 0 \\ R_{y0\to1} & 0 \\ R_{z0\to1} & 0 \end{Bmatrix}_{A (\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$
Appui-plan de normale $\vec{z}$		$\{V_{0/1}\} = \begin{Bmatrix} 0 & V_{x0\to1} \\ 0 & V_{y0\to1} \\ \Omega_{z0/1} & 0 \end{Bmatrix}_{A (\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$	$\{T_{0\to1}\} = \begin{Bmatrix} 0 & M_{x0\to1} \\ 0 & M_{y0\to1} \\ R_{z0\to1} & 0 \end{Bmatrix}_{A (\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$
Pivot glissant d'axe $(A,\vec{x})$		$\{V_{0/1}\} = \begin{Bmatrix} \Omega_{x0/1} & V_{x0/1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{A (\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$	$\{T_{0\to1}\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ R_{y0\to1} & M_{y0\to1} \\ R_{z0\to1} & M_{z0\to1} \end{Bmatrix}_{A (\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$
Pivot d'axe $(A,\vec{x})$		$\{V_{0/1}\} = \begin{Bmatrix} \Omega_{x0/1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{A (\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$	$\{T_{0\to1}\} = \begin{Bmatrix} R_{x0\to1} & 0 \\ R_{y0\to1} & M_{y0\to1} \\ R_{z0\to1} & M_{z0\to1} \end{Bmatrix}_{A (\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$
Glissière de direction $(A,\vec{x})$		$\{V_{0/1}\} = \begin{Bmatrix} 0 & V_{x0/1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{A (\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$	$\{T_{0\to1}\} = \begin{Bmatrix} 0 & M_{y0\to1} \\ R_{y0\to1} & M_{y0\to1} \\ R_{z0\to1} & M_{z0\to1} \end{Bmatrix}_{A (\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$
Hélicoïdale de direction $(A,\vec{x})$		$\{V_{0/1}\} = \begin{Bmatrix} \Omega_{x0/1} & V_{x0/1} = \lambda\Omega_x \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{A (\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$ *La translation est liée à la rotation par le pas p tel que* $\lambda = \frac{p}{2\pi}$.	$\{T_{0\to1}\} = \begin{Bmatrix} R_{x0\to1} & M_{x0\to1} = \lambda R_{x0\to1} \\ R_{y0\to1} & M_{y0\to1} \\ R_{z0\to1} & M_{z0\to1} \end{Bmatrix}_{A (\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$

Ressources

FICHE 30 : *Les énergies renouvelables*

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables fournies par le **soleil**, le **vent**, la **chaleur de la Terre**, les **chutes d'eau**, les **marées** ou encore la **croissance des végétaux**. Leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir.

I. Le solaire photovoltaïque :

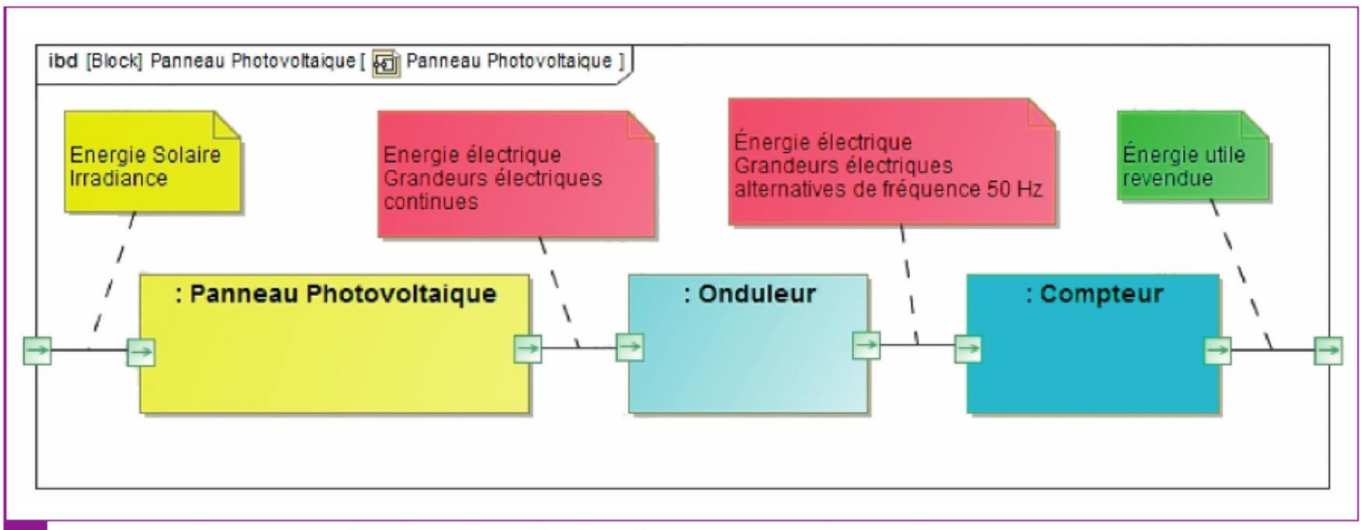
L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité [document 1]. Cette conversion se produit au sein de matériaux « semi-conducteurs », qui ont comme propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. Dans le cas du photovoltaïque, cette énergie est apportée par les photons ; les composants de la lumière, qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant le courant électrique.

La puissance du soleil reçue à la surface de la terre en l'absence de nuages (ou irradiance) est de l'ordre de 1000 W·m^{-2}. Les rendements des panneaux photovoltaïques varient de 5 % à 30 % suivant la technologie utilisée.

1 Champ photovoltaïque d'Avignonet-Lauragais.

Comment fonctionne une installation solaire ? Trois éléments permettent de récupérer l'énergie transmise par le soleil, de la transformer en électricité puis de la distribuer à l'ensemble des clients connectés au réseau [document 2] :

- Les panneaux solaires convertissent la lumière en courant électrique continu.
- L'onduleur transforme l'électricité obtenue en courant alternatif compatible avec le réseau.
- Le compteur mesure la quantité de courant injectée dans le réseau.



2 Organisation matérielle d'une installation de panneaux photovoltaïques.

Ressources

II. Les éoliennes :

Une éolienne est constituée d'un **rotor**, d'un **système de transmission mécanique directe ou à multiplicateur** et de circuits de gestion du courant (régulateur, onduleur… selon le type de machine). L'ensemble se trouve dans la nacelle posée sur **le mât**, ou **la tour**, de l'éolienne [document 3]. Le vent fait tourner les pales qui entraînent le générateur électrique, d'où l'appellation aérogénérateur pour désigner les éoliennes qui produisent de l'électricité.

3 Site éolien d'Avignonet-Lauragais.

Le courant électrique produit est rendu compatible avec le réseau de distribution qui le reçoit. Tous les éléments d'un aérogénérateur font appel à ce que la technologie offre aujourd'hui de mieux. Ainsi, les pales ont des profils et des matériaux issus de l'aéronautique.

Quant aux parties électriques, leur rendement avoisine souvent 100 %, les pertes étant plutôt d'origine mécanique (frottements, rendements des engrenages, etc.) [document 4].

La puissance **cinétique du vent** coupant un disque de surface S est :

$$P_{cin} = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V^3$$

P_{cin} : puissance cinétique du vent (W)
ρ : masse volumique du fluide (1,2 $kg \cdot m^{-3}$ pour l'air)
S : surface du disque (m^2)
V : vitesse du fluide ($m \cdot s^{-1}$)

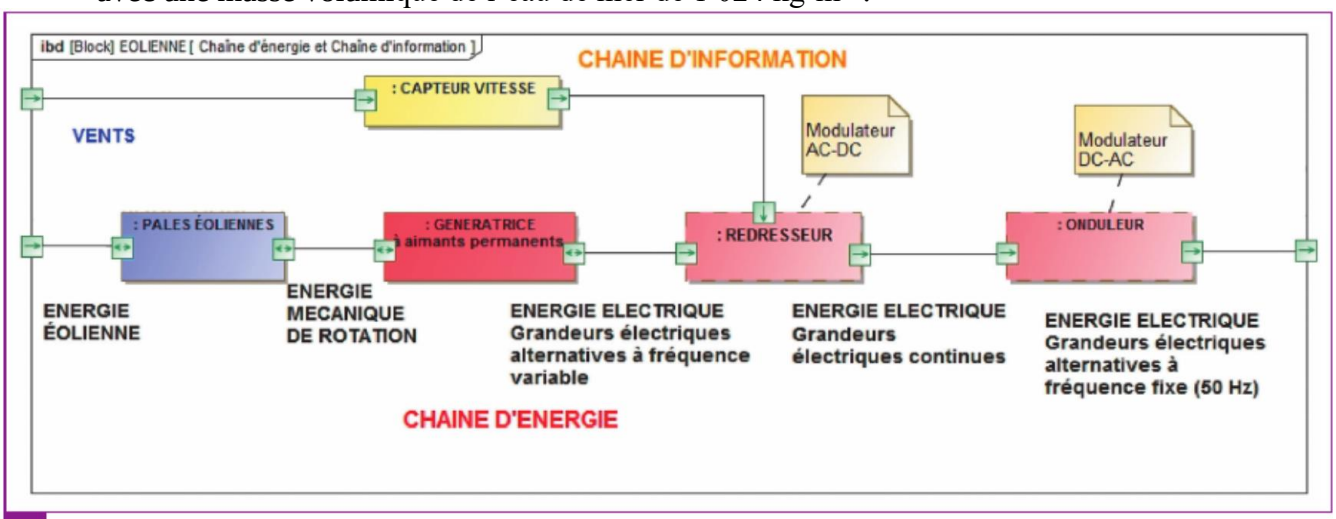
Il est impossible de récupérer toute la puissance. La puissance maximale récupérable P est donnée par la loi de Betz :

$$P_{récupérable} = \frac{16}{27} \times P_{cin}$$

Les aérogénérateurs sont équipés de machines électriques qui offrent un bon rendement, puisqu'elles sont en mesure de transformer en électricité 25 à 45 % de l'énergie du vent.

Remarques

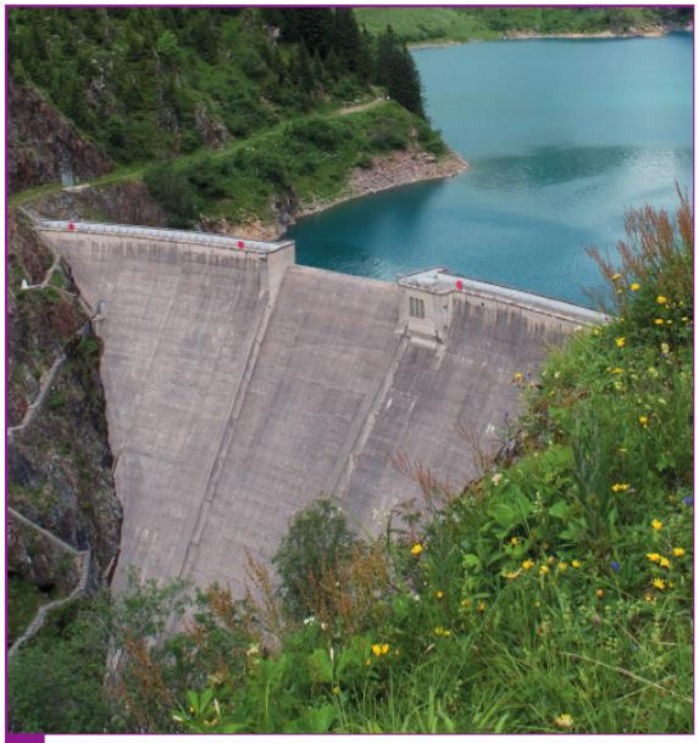
- La puissance hydraulique d'une hydrolienne est donnée avec la même formule mais avec une masse volumique de l'eau de mer de 1 024 $kg \cdot m^{-3}$.



4 Organisation matérielle d'une installation éolienne.

Ressources

- La puissance d'une éolienne terrestre peut aller jusqu'à 3 MW. Elle varie de 4 à 6 MW pour les éoliennes en mer. Une éolienne tourne lorsque la vitesse du vent s'établit entre 15 et 90 $km \cdot h^{-1}$, vitesse au-delà de laquelle l'éolienne s'arrête automatiquement pour des raisons de sécurité. L'énergie électrique ainsi produite est acheminée par un câble électrique souterrain jusqu'au poste de livraison EDF.



5 Barrage de la Gittaz (Savoie).

III. L'hydraulique :

Comme les ancestrales roues à aubes entraînées par le débit d'un cours d'eau, les turbines des **centrales hydroélectriques** sont activées par la force de l'eau. **L'hydroélectricité** est produite dans des usines appelées **centrales hydrauliques**, qui fonctionnent le plus souvent en association avec un barrage en dérivant l'écoulement naturel de l'eau [document 5].

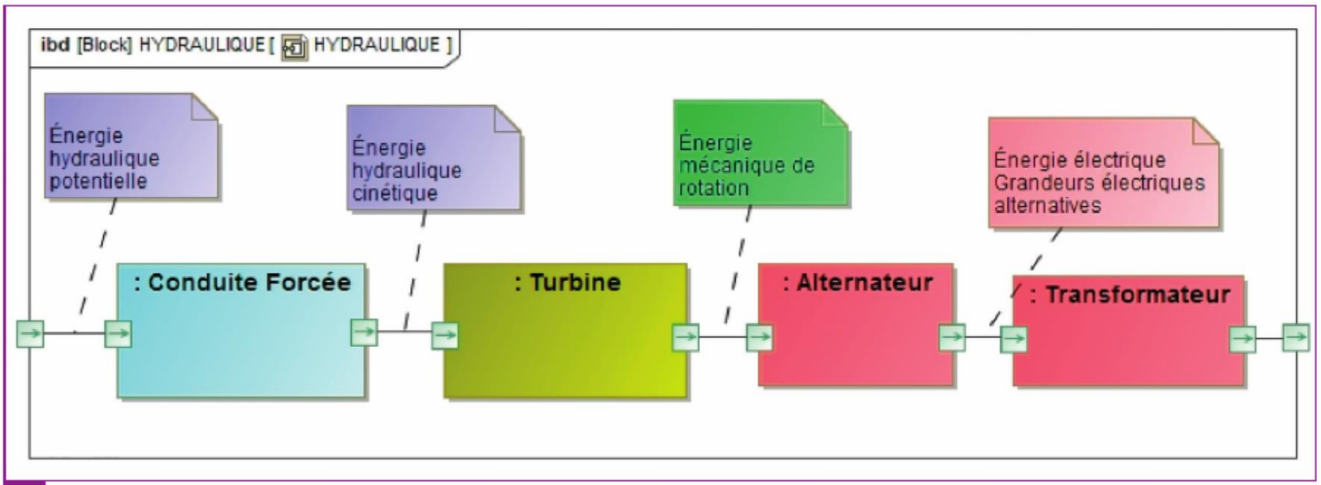
L'eau accumulée dans les barrages ou dérivées par les prises d'eau constitue une énergie potentielle disponible pour entraîner en rotation la turbine d'une génératrice. L'énergie hydraulique se transforme alors en **énergie cinétique** puis en **énergie mécanique cinétique**. Cette turbine, accouplée mécaniquement à un alternateur, l'entraîne en rotation afin de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique [document 6].

La puissance d'une centrale hydraulique vaut :

$$P_{hydro} = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H$$

Q : débit de la conduite d'amenée d'eau ($m^3 \cdot s^{-1}$)
ρ : masse volumique de l'eau (1 000 $kg \cdot m^{-3}$)
g : accélération de la pesanteur (9,81 $m \cdot s^{-2}$)
H : hauteur de la retenue d'eau (m).

Le rendement d'une installation hydraulique est de l'ordre de 85 %.



6 Organisation matérielle d'une installation hydraulique.

Ressources

FICHE 31 : Rendements des convertisseurs d'énergies renouvelables

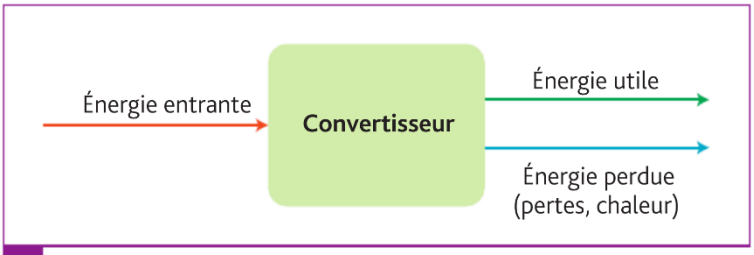
I. Convertisseur d'énergie :

Un convertisseur d'énergie est un dispositif qui permet de passer d'une forme d'énergie à une autre. Les principaux types de convertisseurs utilisés pour la production d'énergie renouvelable sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

	Hélice éolienne	Hélice hydrolienne	Turbine hydraulique	Génératrice électrique	Panneau photovoltaïque
Énergie absorbée	Fluidique	Fluidique	Fluidique	Mécanique	Rayonnante
Énergie fournie	Mécanique	Mécanique	Mécanique	Électrique	Électrique
Rendements	25-45 %	30-50 %	85 %	90-95 %	5-30 %

II. Rendement d'un convertisseur d'énergie :

Lorsqu'un convertisseur transforme de l'énergie entrante, toute l'énergie ne peut pas être convertie en énergie utile. Une partie de l'énergie est perdue ou convertie en une énergie non utilisable, généralement en chaleur [document 7].



7 Schéma de principe d'un convertisseur d'énergie.

Le rendement du convertisseur d'énergie est défini comme le rapport de :

$$\eta = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie entrante}}$$

III. Unités utilisées pour l'énergie (rappel) :

Si l'on produit une puissance constante P pendant une durée t, l'énergie correspondante en joule vaut :

$E = P \times t$

E : énergie (J)
P : puissance (W)
t : durée (s)

Si l'on produit une puissance constante P pendant une durée T, l'énergie correspondante en watt heure vaut :

$E = P \times T$

E : énergie (W·h)
P : puissance (W)
T : temps (h)

Ainsi 1W.h= 60x60 = 3600J.

Ressources

FICHE 32 : *Les réseaux*

Les réseaux ont été et sont toujours développés pour cinq raisons principales :

- Partager des ressources. Rendre accessible des logiciels, des bases de données, des imprimantes, consulter ses comptes bancaires depuis n'importe quel endroit au monde.
- Augmenter la fiabilité du stockage des données. Ils permettent de dupliquer les fichiers en plusieurs endroits. En cas de problème, la sauvegarde est disponible. C'est le "cloud".
- Augmenter les performances et réduire les coûts. De nombreux projets (projet SETI par exemple) nécessitant le traitement de nombreuses données ont été rendus possibles par la mise en commun de la puissance de calcul de nombreux ordinateurs mis en réseau, au lieu de grosses installations très coûteuses.
- Accès à l'information et au courrier. Avec les réseaux et Internet en particulier, il est très aisé de s'informer très rapidement sur toute sorte de sujets. C'est la principale utilisation d'Internet à ce jour.
- La diffusion des médias. Apparue récemment avec l'amélioration des performances et en particulier des débits, cela ne correspond pas véritablement à un besoin des professionnels mais génère la majorité du trafic sur Internet.

I. Différents types de réseaux :

Nous pouvons définir cinq types de réseaux en fonction de leur localisation, leur étendue géographique et leurs débits maximaux.

• **Les réseaux locaux industriels ou CAN (Controller Area Network) ou VAN (Vehicule Area Network).** Développés pour les applications industrielles et l'automobile, ils permettent de connecter divers capteurs, émetteurs… généralement sur de faibles distances.

• **Les réseaux domestiques ou PAN (Personel Area Network).** Ils relient des appareils électroniques personnels (ordinateurs portables et imprimantes sans fil, smartphones et oreillettes Bluetooth®, tablettes et enceintes sans fil…)

• **Les réseaux locaux ou LAN (Local Area Network).** Ce sont des réseaux locaux au sein d'une maison, d'une entreprise, d'un établissement scolaire… Ils permettent l'échange de données informatiques ou le partage de ressources (Ethernet, token ring…). Ils connaissent une utilisation importante dans le cadre des jeux vidéo en réseau avec les LAN gaming.

• **Les réseaux métropolitains ou MAN (Metropolitain Area Network).** Ces réseaux permettent par exemple de relier plusieurs bâtiments d'une commune ou d'un pôle universitaire. Ce sont des interconnexions de plusieurs sites (ou LAN) à l'échelle d'une ville.

• **Les réseaux longues distances ou WAN (Wide Area Network).** Généralement publics (exemple du Renater : Réseau national de télécommunications pour la technologie, l'enseignement et la recherche), ils assurent la transmission des données à l'échelle d'un pays. Le support de transmission peut être terrestre (réseau maillé de type téléphonique ou ligne spécialisée) ou hertzien (transmission par satellite). L'ADSL est un exemple de type de réseaux WAN. Dans une grande entreprise, un réseau est généralement une combinaison plus ou moins complexe de LAN et de WAN. Il est possible « d'émuler » un réseau LAN à travers un WAN en utilisant un VPN (Virtual Private Network).

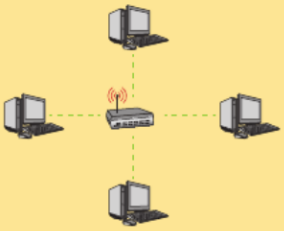
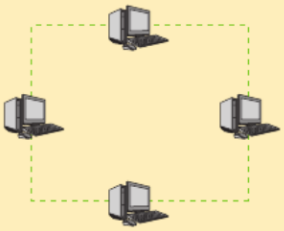
II. Architecture matérielle :

Support de transmission	C'est le support physique qui permet de relier les postes entre eux (câble coaxial, paire torsadée, fibre optique, air…).
Connecteur	Elément permettant de faire la jonction entre la carte réseau et le support de transmission (RJ45, BNC…).
Répéteur	Il reçoit des informations et les retransmet en régénérant un signal. Il permet de connecter deux segments Ethernet dans un LAN.
Hub	Multiprise qui rediffuse les informations à tous les postes, appelé aussi concentrateur.

Ressources

Switch	C'est un hub intelligent qui assure la gestion de la communication. Grâce à sa table contenant les adresses MAC, le switch est capable de transférer exactement la trame au bon destinataire.
Carte réseau	Carte connectée ou intégrée à la carte mère qui permet de relier les machines aux canaux de transmission.
Modem routeur	Passerelle entre le LAN et un autre réseau (Internet par exemple) qui dirigent le trafic des réseaux basés sur les adresses IP.
Serveur	Il définit le protocole de communication entre les différents réseaux logiques.

III. Principales topologies physiques des réseaux :

Topologie		Principe	Avantage	Inconvénient
POINT À POINT	Réseaux locaux industriels (Ethernet)	Un ordinateur qui communique avec un autre, un automate, un système, une imprimante réseau, une caméra IP… L'emploi d'un câble croisé est parfois nécessaire.	Simple. Fiable. Économique.	En cas de défaillance du câble, tout est bloqué. La communication est impossible. Transmission ralentie si trafic important.
BUS	Réseaux locaux industriels (Ethernet)	Les machines sont connectées en série sur le bus. L'information circule sur le réseau (la trame) qui contient son adresse de destination ; les postes reconnaissant les informations qui leur sont destinées.	Simple. Fiable. Économique. Ajout de machine facile.	En cas de défaillance du câble, tout est bloqué. Transmission ralentie si trafic important.
ÉTOILE	 Réseaux publics	Concerne la majorité des réseaux Ethernet actuels en RJ45. Tous les postes (hôtes) sont interconnectés grâce à un concentrateur : sorte de multiprise pour les câbles réseaux. Les hôtes émettent vers ce concentrateur qui renvoie les données vers tous les autres ports réseaux (hub) ou uniquement au destinataire (switch).	Ajout de machine facile. Si un poste est défaillant, pas d'incidence sur le reste du réseau. Postes interrogeables depuis le serveur.	La longueur des câbles est parfois importante.
ANNEAU	 Réseaux fibre optique	Les ordinateurs sont situés sur une boucle et communiquent chacun à leur tour : le dernier nœud étant relié au premier. Les ordinateurs ne sont pas reliés en boucle, mais sont reliés à un répartiteur qui va gérer la communication entre les hôtes en répartissant à chacun d'entre eux un temps de parole. C'est la méthode d'accès à « jeton » (ou *token ring*).	Performance identique pour l'ensemble des postes.	Si un poste est en panne, le réseau est affecté.

Ressources

FICHE 33 : *Adresse MAC, adresse IP, masque réseau, port, pare-feu, VPN*

I. Adresse physique : adresse MAC (Media Access Control) :

Une **adresse MAC** est affectée à un périphérique réseau Ethernet, c'est comme un numéro de série, il est donc unique au monde. Chaque constructeur de cartes réseau se voit attribuer par l'OUI (Organizationally Unique Identifier) une plage d'adresses qu'il affecte aux différentes **cartes réseau**.

Voici un exemple **d'adresse MAC** : « 00:19:7E:49:5E:96». Les trois premiers octets (00:19:7E) désignent le constructeur, les trois derniers octets (49:5E:96) sont les identifiants uniques de la carte donnés par le constructeur.

Il vient en complément de l'adresse IP qui, elle, est attribuée par le fournisseur d'accès ou par l'administrateur du réseau.

II. Adresse IP :

Une adresse IP est le numéro unique d'un ordinateur ou d'une machine sur un réseau qui lui permet de communiquer sur ce réseau. Deux postes ne peuvent pas avoir la même adresse IP sur un même réseau ; ce serait comme si deux personnes avaient le même nom et la même adresse postale.

Cette adresse IP est liée à la carte réseau de l'ordinateur (son adresse MAC). Il peut y avoir des postes ayant la même adresse IP sur différents réseaux, mais en aucune façon sur le même réseau.

Exemple : Un ordinateur a une adresse IP 190.12.24.56. À quoi cette adresse correspond-elle ?

190.12.24.56 est l'adresse IP (Internet Protocol), il est codé sur 4 octets (32 bits) comme défini dans la version 4 de l'Internet Procotol. La version IP V6 codée sur 128 bits est en déploiement et permettra de faire face à la saturation du nombre d'adresses IP nécessaires.

Une partie de l'adresse IP définit l'adresse du réseau et l'autre partie définit l'adresse de l'hôte dans le réseau.

Il existe 3 classes d'adresses IP

	Adresse réseau	Adresse hôte		
Classe A	Octet 4	Octet 3	Octet 2	Octet 1
Classe B	Octet 4	Octet 3	Octet 2	Octet 1
Classe C	Octet 4	Octet 3	Octet 2	Octet 1

La **classe A** permet de créer **peu de réseaux**, mais avec **beaucoup d'hôtes** dans chaque réseau. La **classe C fait l'inverse**.

	Adresse réseau		Adresse hôte
Classe A	0	+ 7 bits = 126 réseaux	24 bits = 16 777 214 hôtes
Classe B	10	+ 14 bits = 16 383 réseaux	16 bits = 65 534 hôtes
Classe C	110	+ 21 bits = 2 097 161 réseaux	8 bits = 254 hôtes

Il y a des adresses auxquelles on n'applique pas de numéro d'hôte :

- l'adresse d'hôte = 0 (exemple : 194.118.21.0) est réservée à l'identification du réseau ;
- l'adresse d'hôte = 255 qui a tous ses bits à 1 (exemple : 194.118.21.255).

Ressources

III. Le masque de réseau

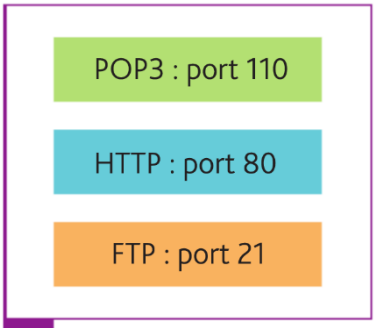
Le masque de réseau est un ensemble de 4 octets qui permet de différencier l'adresse du réseau et l'adresse de l'hôte.

Adresse IP	**194.118**.21.12	Adresse IP de classe B d'un poste sur le réseau 194.118 avec comme n° d'hôte : 21.12
Masque de réseau	**255.255**.0.0	

Adresse IP	**194.118.21**.12	Adresse IP de classe C d'un poste sur le réseau 194.118.21 avec comme n° d'hôte : 12
Masque de réseau	**255.255.255**.0	

IV. La notion de port

Le port correspond à la couche de transport du modèle OSI. La notion de port logiciel permet, lorsque l'ordinateur est identifié par l'adresse IP, de distinguer à quelle application logiciel un paquet de donnée est destiné (le navigateur web, le jeu en ligne, le logiciel de messagerie mail…). Un port est distingué par son numéro [document 8].

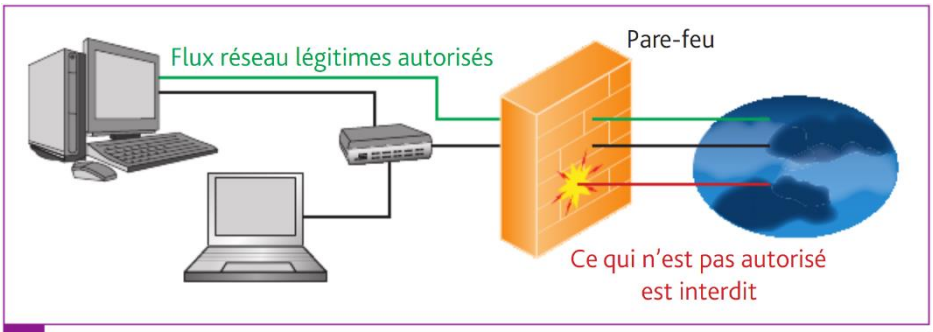


8 Numéros de port.

V. Le pare-feu

Le pare-feu (ou firewall en anglais) est un équipement de sécurité (logiciel ou matériel) entre plusieurs réseaux informatiques. Il filtre les paquets en transit en suivant des règles de filtrage qui protègent et régulent l'accès aux ressources réseau parfois sensibles.

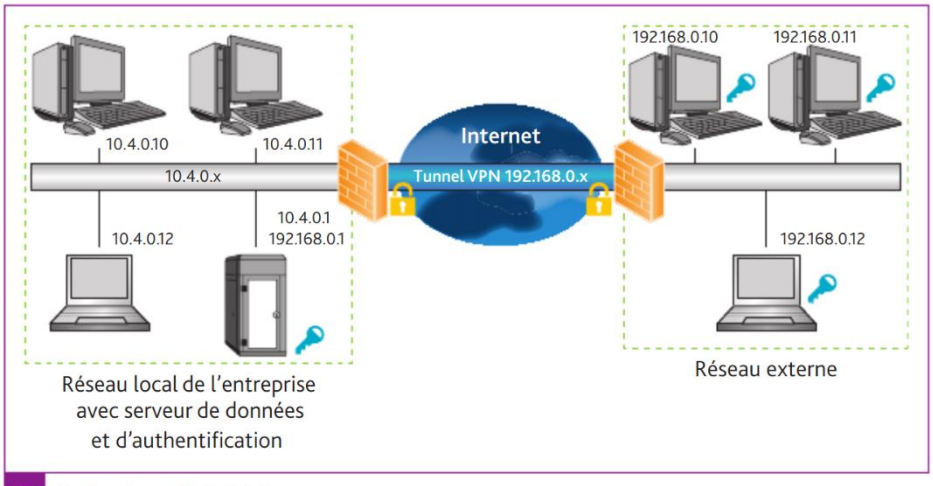
En fonction de la politique de sécurité de l'administrateur du réseau (origine, destination des paquets…), il autorise ou non les informations à le traverser [document 9].



9 Principe du pare-feu.

VI. Le VPN

Un réseau VPN est un protocole qui permet de faire circuler les informations de l'entreprise de façon cryptée d'un bout à l'autre d'un tunnel. Les utilisateurs ont l'impression de se connecter sur un poste (ou machine) du LAN alors qu'en réalité ce poste (ou machine) peut être très éloigné et oblige donc à passer par le WAN [document 10].

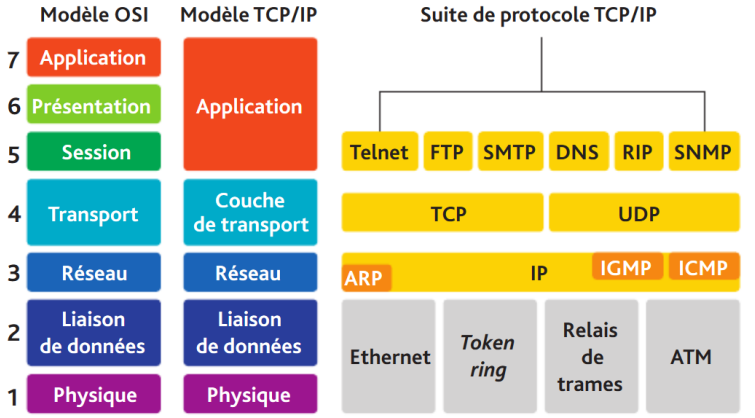


10 Principe du VPN.

Ressources

FICHE 34 : Les protocoles TCP/IP et ARP

Un protocole est l'ensemble des règles et informations échangées pour établir et gérer une communication [document 11].



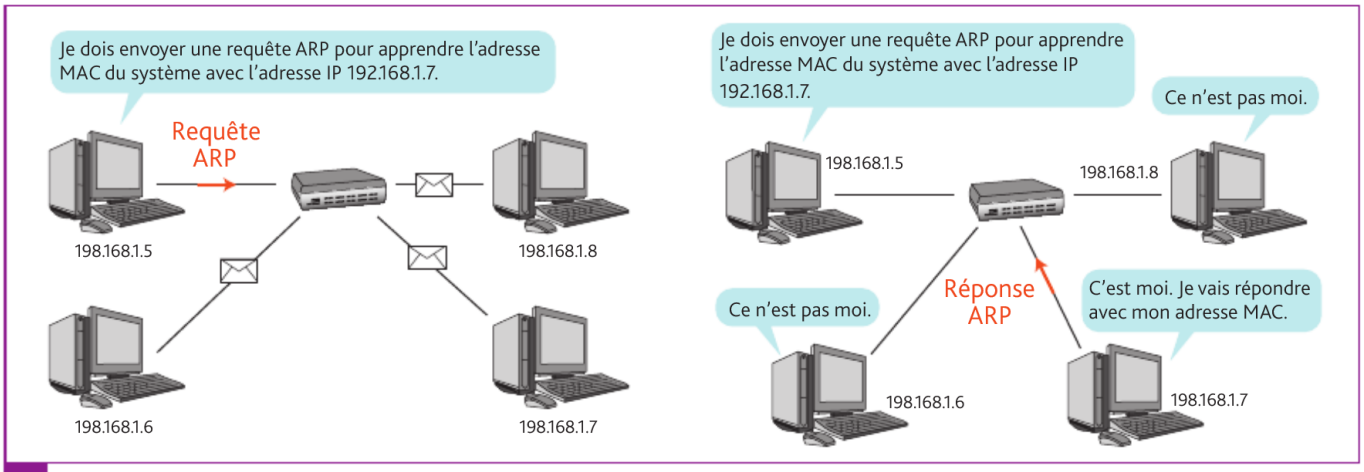
11 Modèle OSI et protocoles TCP/IP.

I. Le protocole ARP :

Le protocole **ARP** ou **Address Résolution Protocol (protocole de résolution d'adresse)** se situe sur la couche 3 du modèle OSI. Son rôle est prépondérant parmi les protocoles de la couche Internet TCP/IP car il assure la liaison entre l'adresse physique d'une carte réseau (MAC) et l'adresse IP correspondante.

L'ARP permet donc de retrouver une adresse MAC à partir d'une adresse IP grâce à la table.

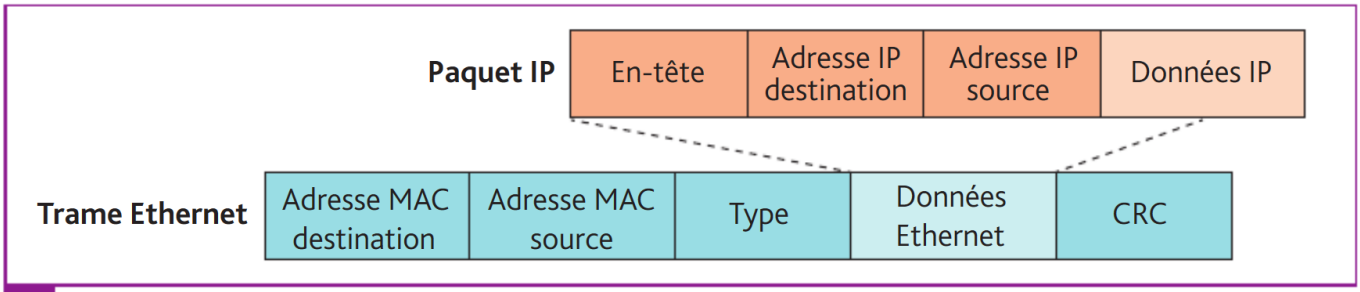
Pour cela, le protocole ARP interroge les machines du réseau pour connaître leur adresse physique, puis crée une **table de correspondance** entre les adresses IP et les adresses MAC qu'il stocke dans une **mémoire cache** [document 12].



12 Dialogue ARP entre les divers postes du LAN.

II. Le protocole TCP/IP :

TCP/IP désigne communément une **architecture réseau**, mais il s'agit en fait d'un ensemble de protocoles qui permettent de faire communiquer entre eux des ordinateurs de différents réseaux [document 13].



13 Paquet IP et trame Ethernet.

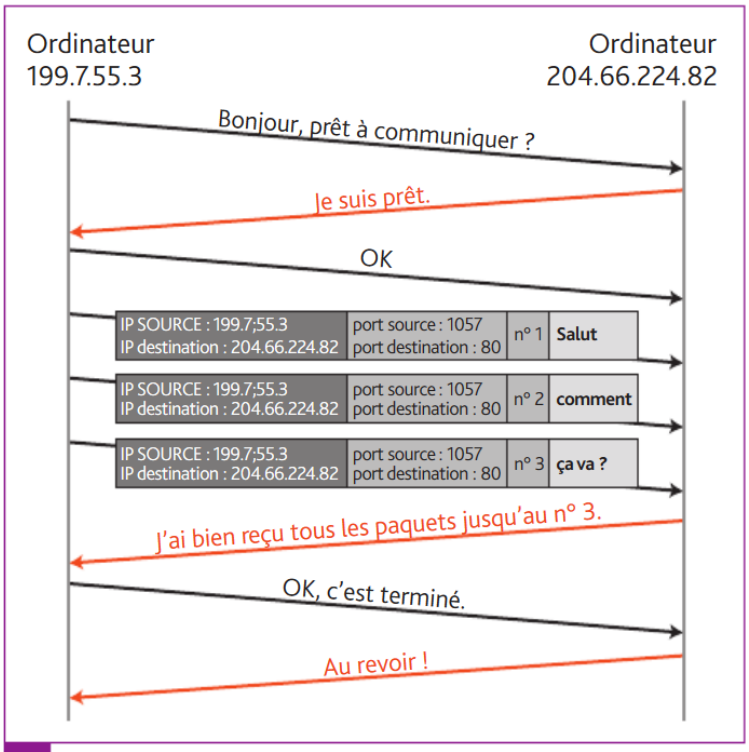
Ressources

Le protocole IP signifie Internet Protocol et correspond à la couche 3 « Réseau » du modèle OSI [Fiche 45]. Il gère la circulation des paquets à travers le réseau tout en assurant leur routage.

Le protocole TCP signifie Transmission Control Protocol et correspond à la couche 4 « Transport » du modèle OSI. Il est « au-dessus » de l'IP. Cette couche assure la communication de l'émetteur au destinataire en faisant abstraction des machines intermédiaires.

Le TCP permet de réguler le flux de données et assure un transport fiable car il est capable [document 14] :

- De vérifier que le destinataire est prêt à recevoir les données ;
- De découper et numéroter les gros paquets de données en paquets plus petits pour que l'ip les accepte ;
- De vérifier qu'ils sont tous bien arrivés à la réception, de redemander les paquets manquants et de les réassembler avant de les envoyer aux logiciels (ports) ;
- D'envoyer des accusés de réception pour prévenir l'expéditeur que les données sont bien arrivées.



14 Principe d'échanges dans le protocole TCP.

On a la garantie que toutes les données sont acheminées mais les échanges sont ralentis par rapport au protocole UDP.

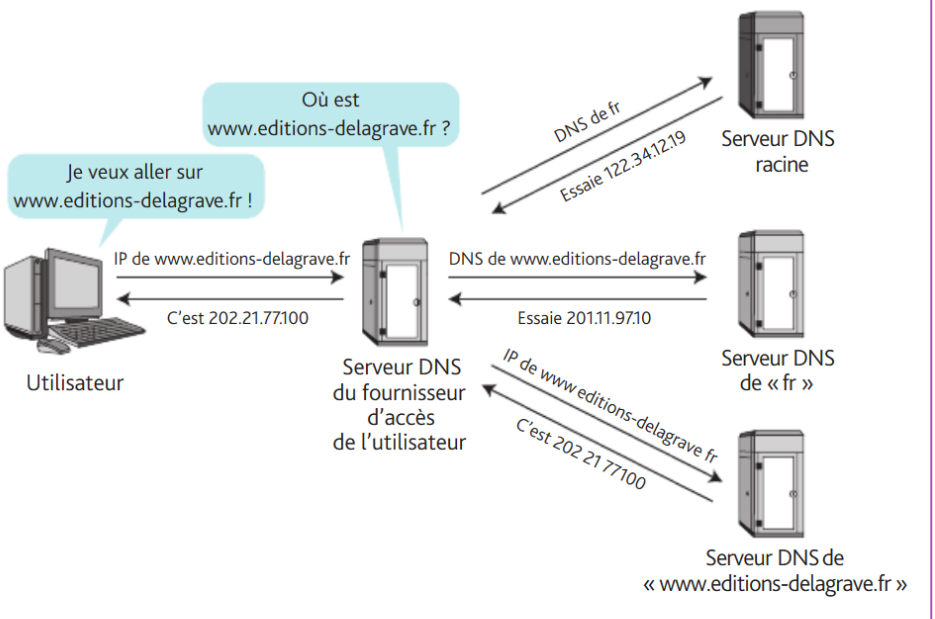
Remarque :

Il existe en effet un **protocole UDP** qui fonctionne en mode non connecté ; c'est-à-dire qui envoie les trames sans prévenir le récepteur. Le récepteur ne confirme pas la bonne réception et il n'y pas de contrôle des erreurs de transmission. Ce protocole est plus rapide que le TCP mais moins fiable. UDP est en quelque sorte une « version allégée » du TCP.

III. Le DNS :

DNS signifie **Domain Name System**, c'est un « service » qui permet de trouver l'adresse IP d'une adresse sur Internet. En effet, on ne peut pas concevoir que l'adresse d'un site Internet soit similaire à son adresse IP (par exemple 58.220.13.96) au lieu de ce que nous connaissons aujourd'hui : http://www.site.fr.

Le DNS est donc **indispensable au fonctionnement d'Internet**. La gestion des DNS se fait soit par un prestataire spécialisé, soit par des serveurs DNS privés [document 15].

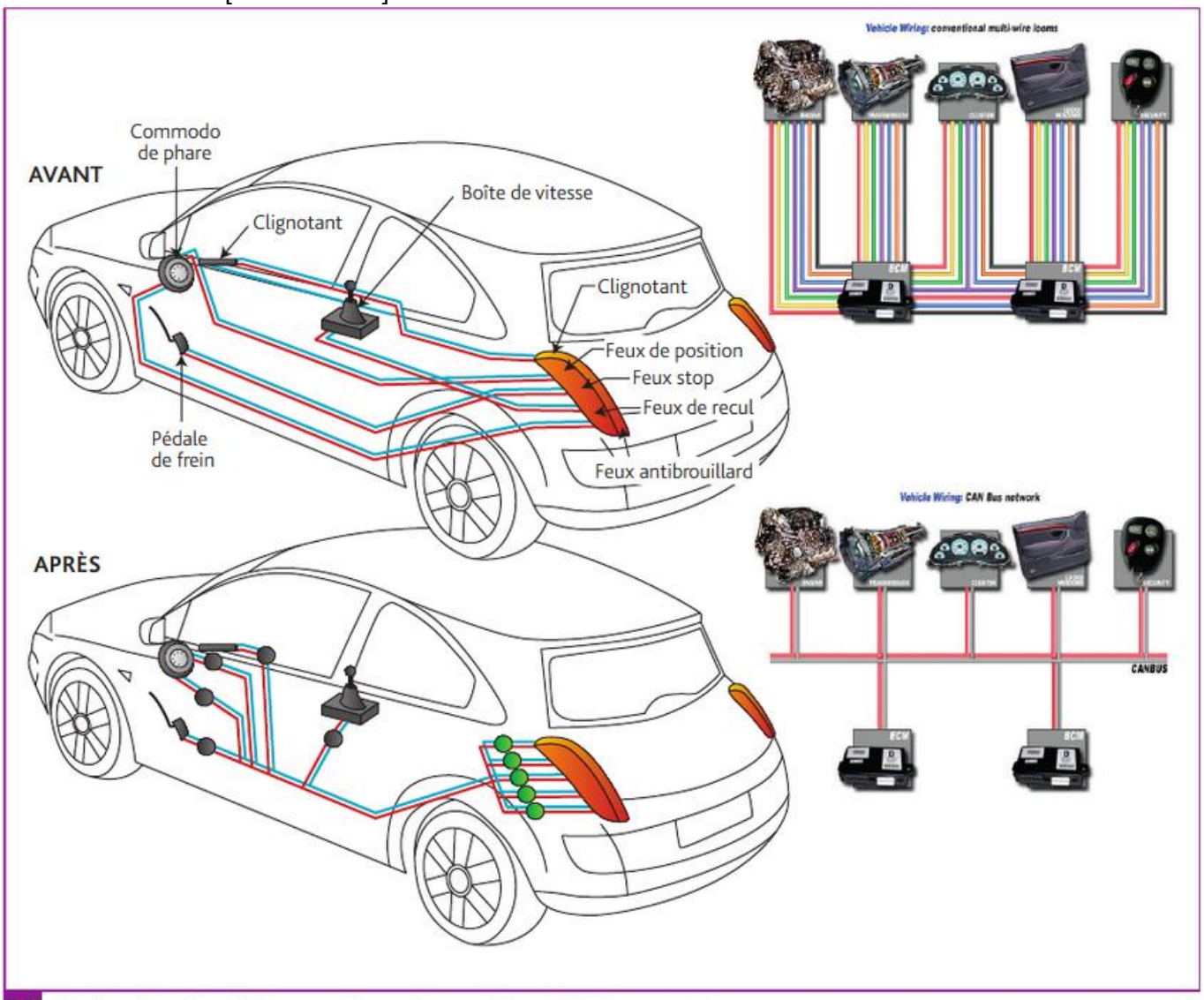


15 Illustration du fonctionnement du DNS.

Ressources

FICHE 35 : Protocole CAN/bus CAN

Le **CAN** est un protocole de communication série lancé dans les années 1990 pour répondre aux besoins de **l'industrie automobile et le développement de l'électronique embarquée**. Le principe est de remplacer les 2 km de câblage dédié nécessaires à la communication des organes d'une voiture par un bus série limitant et facilitant l'intégration des fils dans le châssis [document 16].



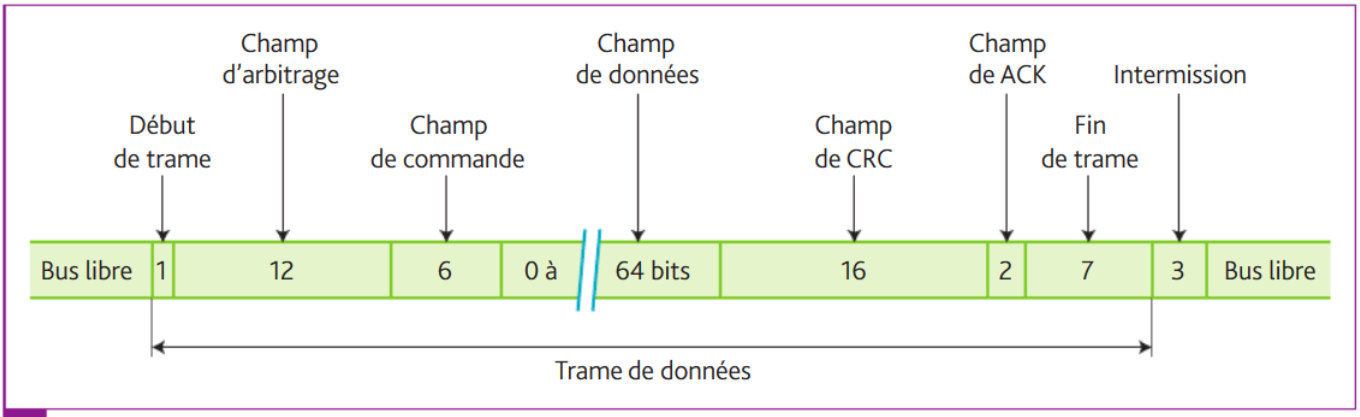
16 Limitation du câblage par la mise en place d'un bus CAN.

Le **multiplexage automobile** qui utilise le protocole de dialogue **CAN** consiste à faire circuler plusieurs informations entre divers équipements **sur un seul canal de transmission**.

La trame du bus CAN est constituée par différents champs [document 17] :

- Un **début de trame** qui indique aux équipements qu'une trame va être émise ;
- Une **zone d'arbitrage** qui indique le(s) destinataire(s) du message et qui a la priorité de parole sur le bus ;
- Un **champ de commande** ;
- Les **données à transmettre** (à lire de gauche à droite) : soit des ordres, soit des informations ;
- Un **champ de contrôle CRC** qui vérifie que les données ont été correctement transmises ;
- Un **champ ACK** qui est un accusé de réception avec acquittement ;
- Une **fin de trame**.

Ressources



17 Format de la trame CAN.

I. Principe de l'arbitrage :

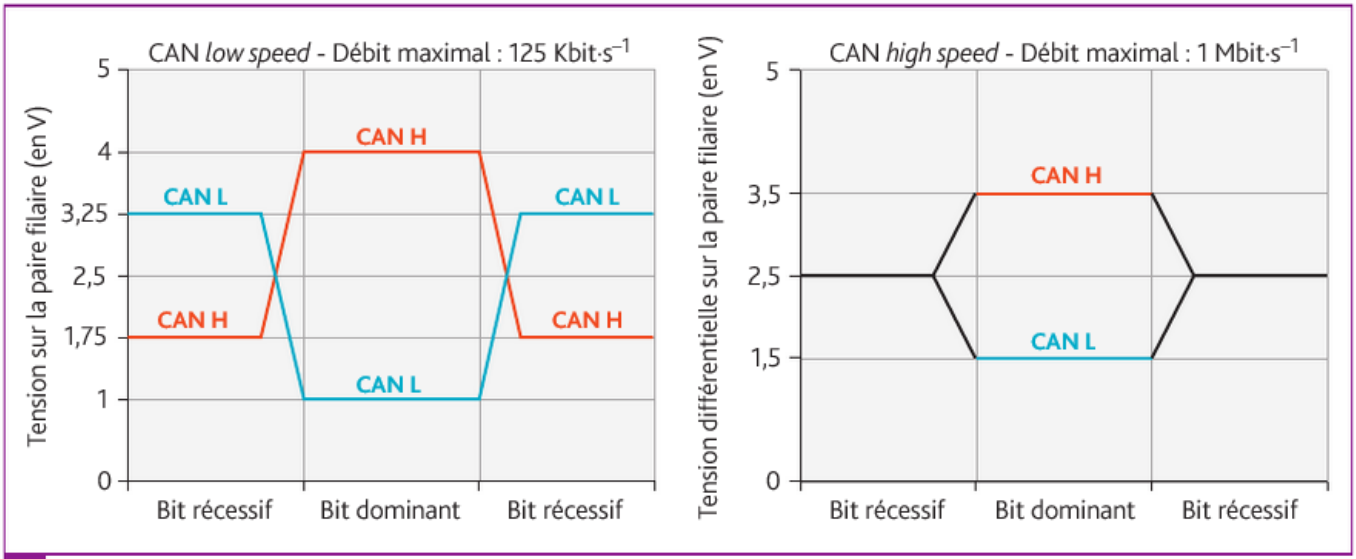
Les données sont transmises rapidement en temps réel, ce qui exige une assignation rapide du bus lorsque plusieurs éléments souhaitent transmettre simultanément des informations.

Il existe donc une **gestion des priorités** qui sont attribuées lors de la conception du réseau et qui est basée sur le principe de **l'arbitrage bit à bit**. On priorise l'accès au bus en fonction de l'importance du message. Par exemple, pour une voiture, on priorisera le freinage sur la gestion de la climatisation. Les stations de priorité moins élevées « perdent la compétition » face à celles dont la priorité est plus élevée.

II. Les signaux du bus CAN :

La transmission des données est effectuée sur **une paire filaire différentielle**.

Les **niveaux logiques (récessifs et dominants)** sont obtenus par la différence de potentiel entre les deux voies **CAN L** et **CAN H**. En fonction de la vitesse du bus (Low speed ou High Speed), les niveaux de tension sur CAN L et CAN H seront différents [document 18].



18 Signaux bus CAN.

Ressources

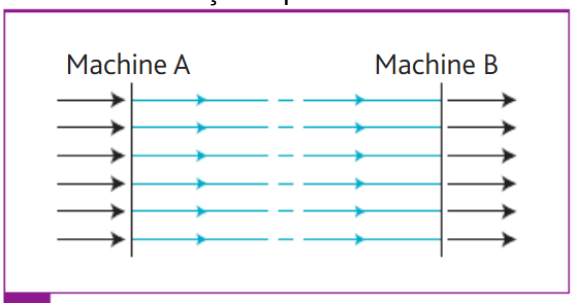
FICHE 36 : Transmission de l'information, liaisons

L'information doit être transmise en **limitant sa dégradation** par des parasites ou par de la distorsion du fait des caractéristiques électriques de la liaison. Cette transmission peut se faire sous forme **analogique** ou sous forme **numérique**.

La transmission de données consiste à **coder des informations** de façon à pouvoir être véhiculées sur un support adapté.

Les signaux peuvent être transmis suivant deux modes : **parallèle et série**.

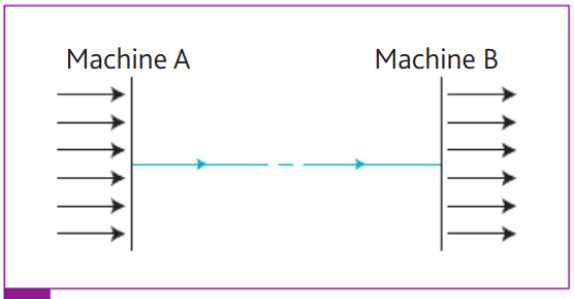
La quasi-totalité des réseaux utilisent le mode série.



19 Liaison parallèle.

I. Liaisons parallèles :

En parallèle, tous les bits d'un octet sont transmis simultanément [document 19].



20 Liaison série.

II. Liaisons en série :

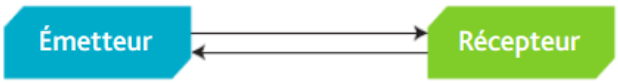
En série, les bits constitutifs d'un octet sont transmis les uns après les autres sur un nombre réduit de fils [document 20].

III. Modes de Communication :

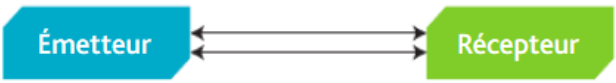
Il existe plusieurs modes de communications.

- La liaison **simplex** : la transmission ne se fait que dans un seul sens (exemple de la télévision).

- La liaison **half duplex** : la transmission peut se faire dans les deux sens mais l'un après l'autre (exemple du talkie-walkie).



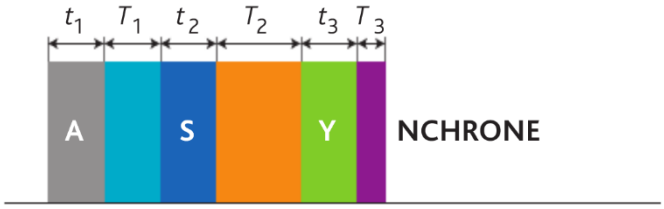
- La liaison **full duplex** : la liaison peut se faire simultanément dans les deux sens (exemple du téléphone).



IV. Transmission asynchrone et synchrone

a) La transmission asynchrone

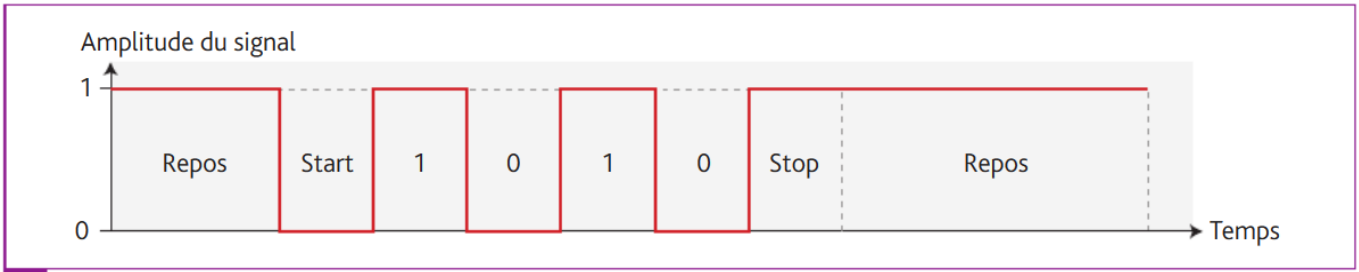
En mode asynchrone, les bits d'un même caractère sont régulièrement espacés et sont transmis n'importe quand. Toutefois, l'intervalle entre deux bits peut varier [document 21].



21 Transmission asynchrone.

Ressources

En transmission asynchrone, les caractères sont délimités par un bit de start, et un ou plusieurs bits de stop [document 22].

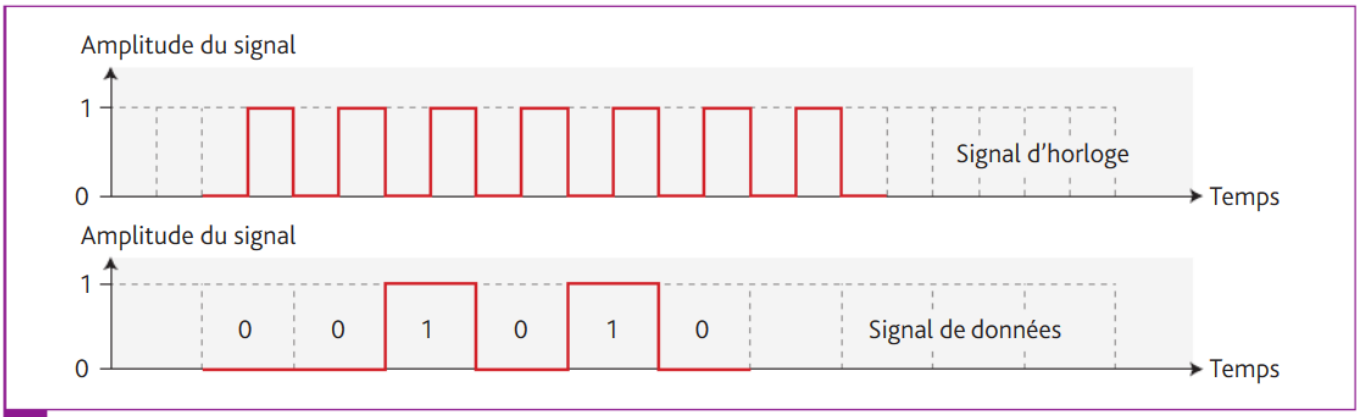


22 Transmission asynchrone.

b) La transmission synchrone

Lors d'une transmission synchrone, tous les bits d'un même message sont espacés régulièrement. Ils sont cadencés par une horloge.

La transmission s'effectue au rythme de la présence des données. Les caractères sont regroupés en blocs qui sont envoyés par un **signal start** et un **signal stop**. La transmission des différents blocs (ou trames) peut être arythmique [document 23].



23 Transmission synchrone.

Ressources

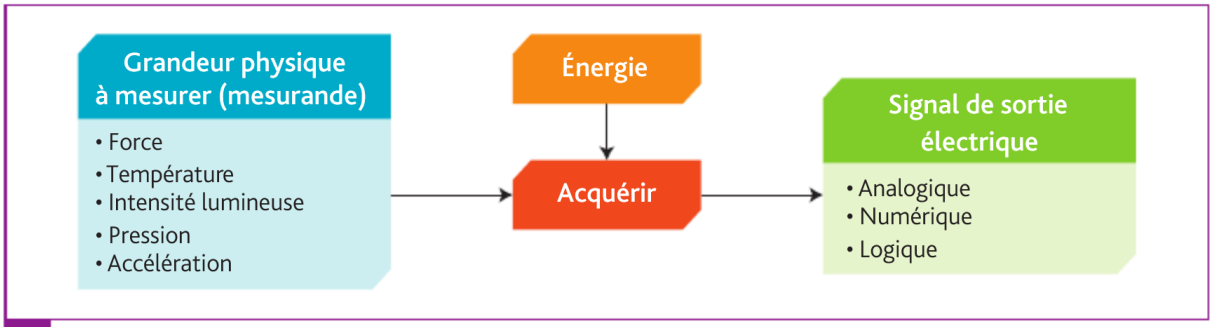
FICHE 37 : Introduction aux capteurs

Les capteurs peuvent détecter des positions, des pressions, des températures, des vitesses, des accélérations, des niveaux, des présences, des états ou toute autre grandeur physico-chimique mesurable (pH, tension, courant, fréquence, accélération…) [document 1]. Ils permettent de réaliser la fonction « acquérir » de la chaîne d'information.

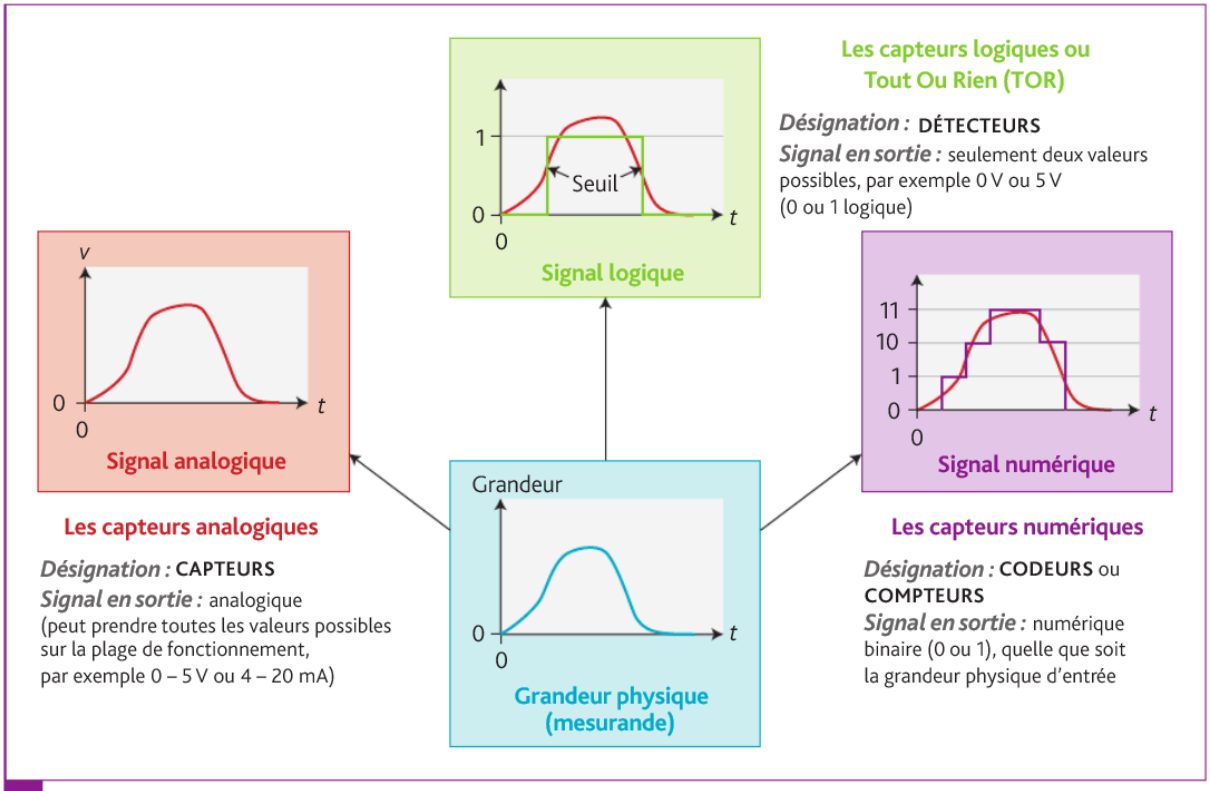
Il est possible de classer les capteurs suivant [document 2] :

- La mesurande : pression, humidité, température… ;
- Leur principe de fonctionnement ;
- Le signal qu'ils délivrent (analogique, logique, numérique).

Les signaux délivrés par les capteurs peuvent être de différents types, mais ils ont tous un point commun : ils doivent être images de la grandeur que l'on souhaite mesurer. Pour cette raison, il existe un grand nombre.



1 Fonction « acquérir » de la chaîne d'information.



2 Différents types de capteurs et de signaux associés.

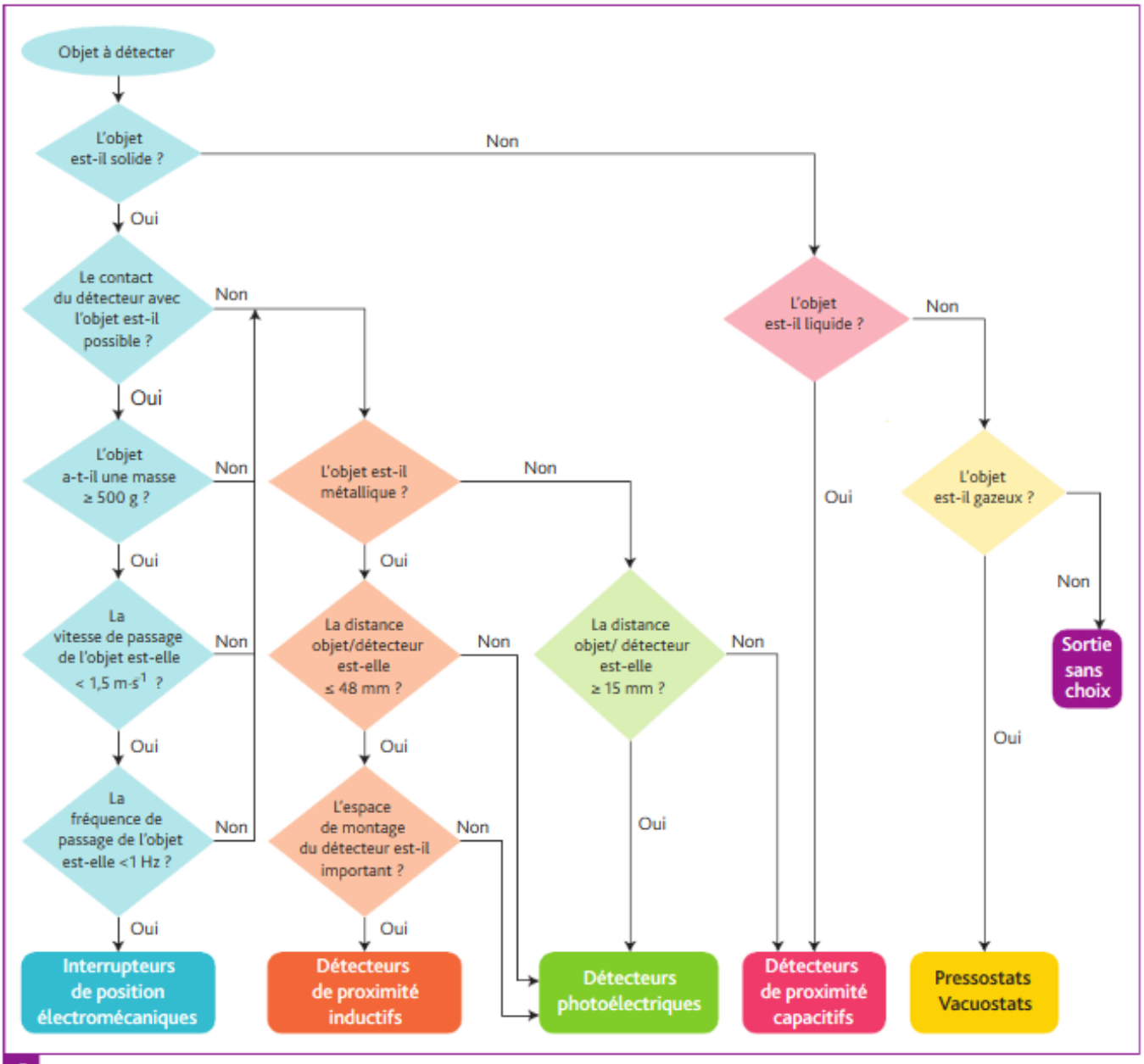
Ressources

FICHE 38 : Comment choisir un détecteur ?

Pour choisir un détecteur, il faut procéder en deux étapes.

I. Étape 1 :

Déterminer la famille de détecteur la mieux adaptée à l'application. Pour cela, il est possible d'utiliser un organigramme [document 3].



3 Organigramme de choix du type de détecteur.

II. Étape 2 :

Choisir le type et la référence du détecteur chez un fabricant en fonction :

- De l'environnement d'utilisation : humidité, poussières, températures… ;
- De la source d'alimentation : batterie ou secteur ;
- Du type de branchement physique : bornier, connecteur… ;
- De sa fiabilité, de son prix.

Ressources

FICHE 39 : Les principaux capteurs TOR

I. Les détecteurs mécaniques ou interrupteurs de position

Les détecteurs mécaniques ou interrupteurs de position permettent d'ouvrir ou de fermer un ou plusieurs contacts électriques à partir d'un contact physique avec la pièce à détecter.

II. Les détecteurs de proximité magnétique (ILS)

Les détecteurs de proximité ILS sont équipés de deux lames conductrices dont une est imantée et se déforme au passage d'un objet métallique permettant le passage du courant dans un circuit électrique.

III. Les détecteurs de proximité inductifs

Les détecteurs de proximité inductifs détectent tout objet métallique qui se trouve à proximité de la tête de détection. La présence de l'objet à détecter à proximité modifie le champ magnétique à haute fréquence créé à l'avant de la face sensible.

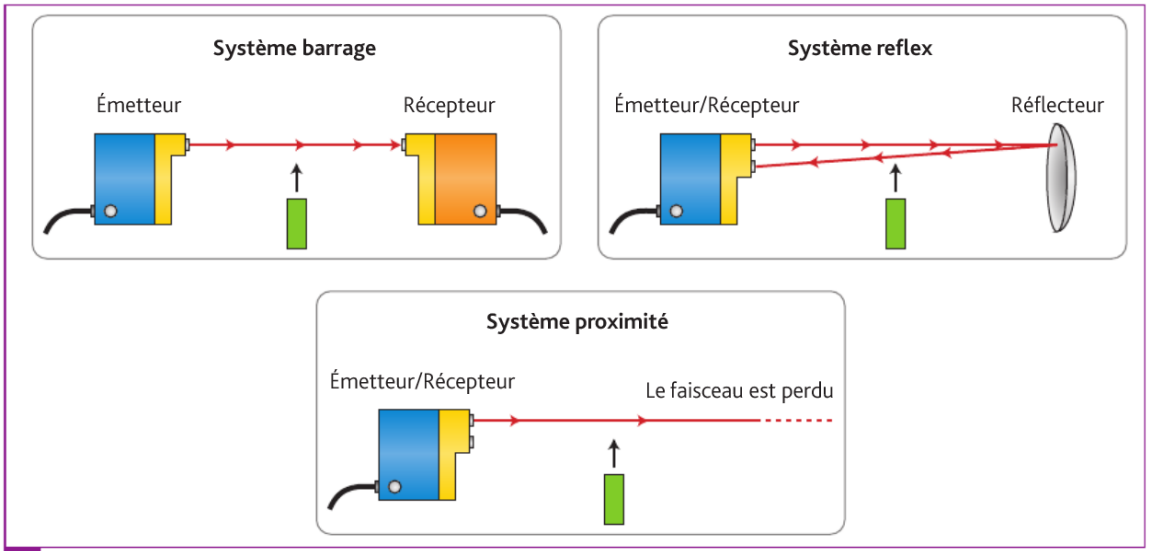
IV. Les détecteurs de proximité capacitifs

Les détecteurs de proximité capacitifs détectent tout objet non métallique qui se trouve à proximité de la tête de détection, qu'il soit conducteur ou isolant. La présence de l'objet à détecter modifie la capacité d'un circuit oscillant intégré.

V. Les détecteurs photoélectriques

Les détecteurs de proximité photoélectriques sont composés d'un émetteur de lumière visible ou infrarouge et d'un récepteur photosensible. Le détecteur photoélectrique réalise la détection d'une cible, qui peut être un objet ou une personne, au moyen d'un faisceau lumineux lorsqu'elle coupe, ou fait varier, l'intensité du faisceau lumineux sur le récepteur. Trois types de détecteurs photoélectriques existent :

- le système barrage ;
- le système reflex ;
- le système proximité.



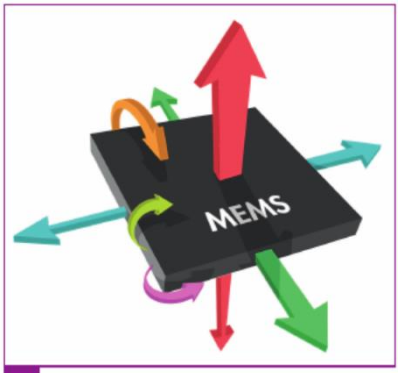
4 Les différents détecteurs photoélectriques.

Ressources

FICHE 40 : Les capteurs analogiques

Les capteurs analogiques sont utilisés pour les mesures physico-chimiques. Quelques exemples :

- Mesure de position ;
- Mesure de niveau ;
- Mesure de déplacement ;
- Mesure de température ;
- Mesure de pression ;
- Mesure de ph ;
- Mesure d'hygrométrie ;
- Mesure d'extensométrie…

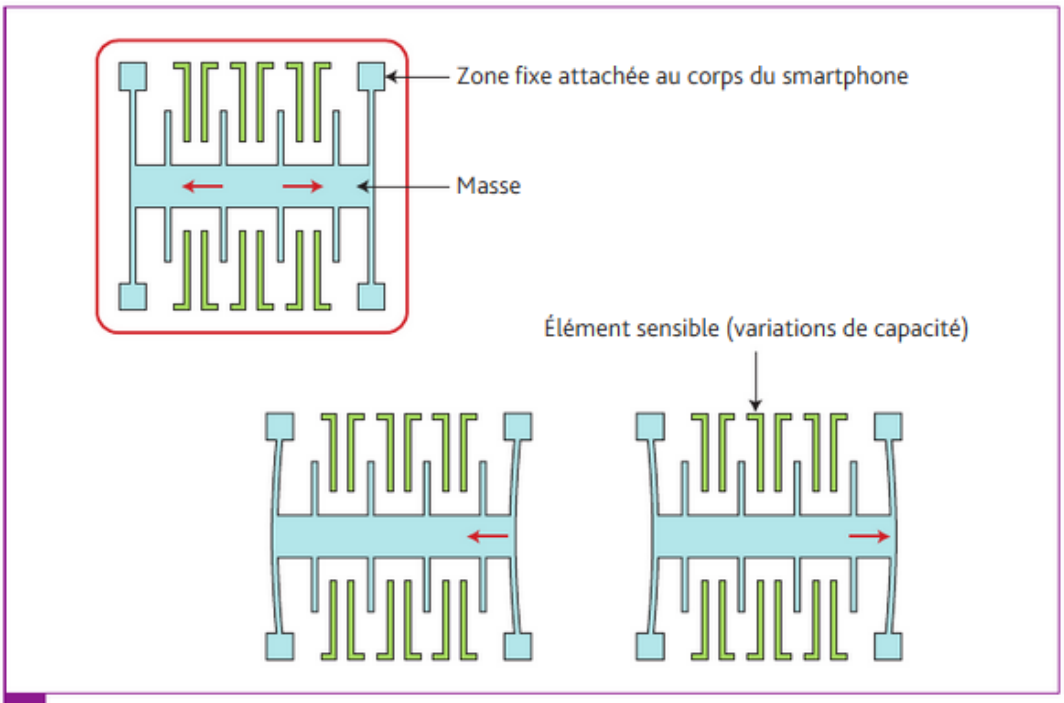


5 Accéléromètre de type MEMS.

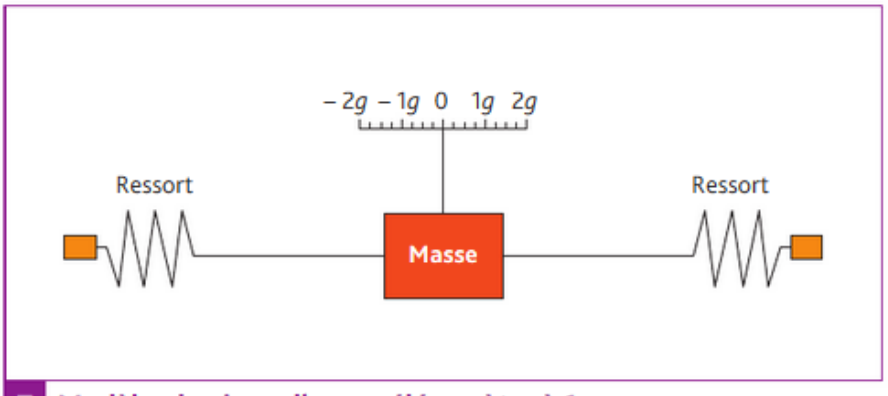
L'accéléromètre à 3 axes est un type de capteur très miniaturisé qui fait partie de ce qui est communément appelé MEMS (MicroElectroMechanical Systems). L'intérieur d'un dispositif MEMS est composé de micro-structures qui se plient en raison de l'accélération [document 5].

Lorsque l'accéléromètre subit une accélération, les déformations des montants supports de la masse sont détectés électriquement en faisant varier la capacité du capteur [document 6].

L'électronique intégrée dans le capteur transforme cette variation en une tension proportionnelle à l'accélération [document 7].



6 Structure interne d'un accéléromètre suivant 1 axe.

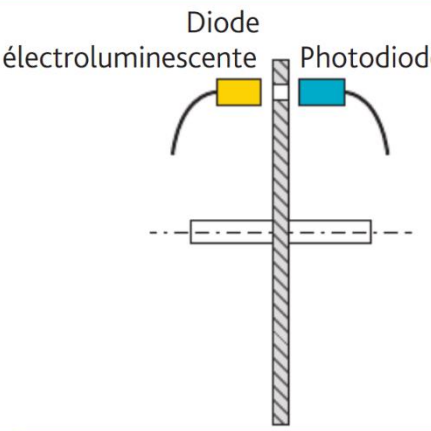


7 Modèle physique d'un accéléromètre à 1 axe.

Ressources

FICHE 41 : Les capteurs numériques

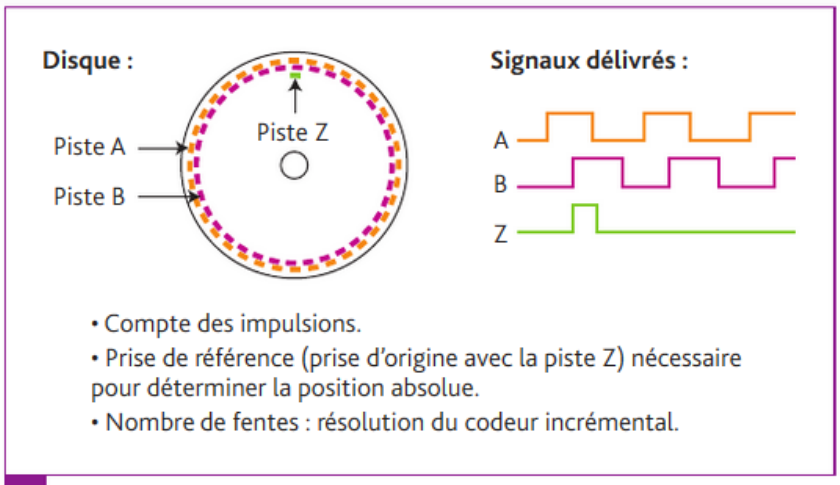
Un codeur rotatif optique est un capteur de position angulaire dont l'axe fait tourner un disque qui comporte une alternance de fentes opaques et transparentes. Une lumière, émise par une diode électroluminescente (DEL), traverse les fentes transparentes et est reçue par la photodiode qui génère un signal électrique de forme carré [document 8].



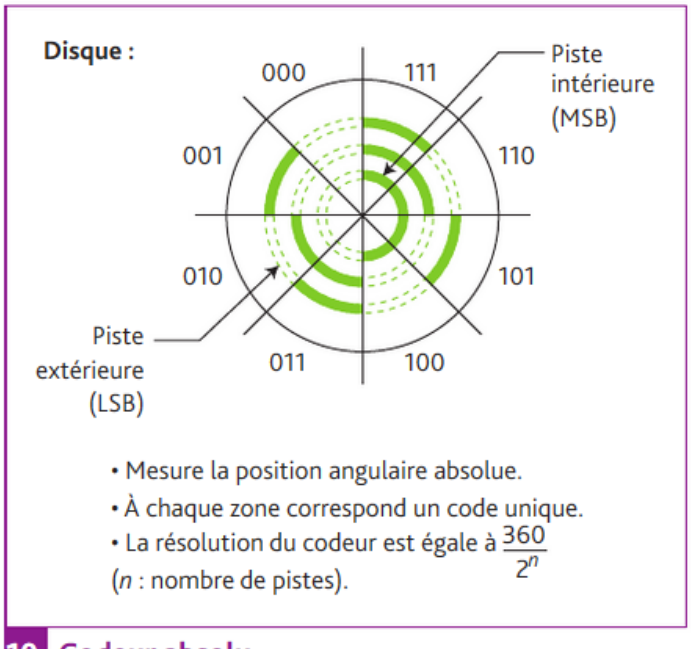
8 Détail d'un codeur optique.

Il existe deux types de codeurs optiques :

- les codeurs incrémentaux [document 9] ; les signaux des sorties logiques permettent de détecter le sens de rotation de l'axe. On n'obtient pas directement la valeur de la position angulaire de l'axe. Pour l'obtenir, il faut compter le nombre d'impulsions ;
- les codeurs absolus [document 10]. On obtient directement la valeur de la position angulaire de l'axe sous forme d'un mot binaire grâce au signal numérique fourni par le capteur.



9 Codeur incrémental.



10 Codeur absolu.

Ressources

FICHE 42 : *Numération et codage*

I. Les bases de numération :

Ce système de numération, utilisé dans la vie quotidienne, dispose de 10 symboles différents : 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 et 9. On parle de base 10.

Un nombre entier positif N s'écrit en base 10 :

$$(N)_{10} = a_n \cdot 10^n + a_{n-1} \cdot 10^{n-1} + \ldots + a_2 \cdot 10^2 + a_1 \cdot 10^1 + a_0 \cdot 10^0 = a_n a_{n-1} \ldots a_2 a_1 a_0$$

Pour spécifier la base utilisée, on place généralement le nombre entier positif entre parenthèses, suivi de la base utilisée en indice.

Exemple :

$$(7\ 239)10 = 7\ 239 = 7 \cdot 10^3 + 2 \cdot 10^2 + 3 \cdot 10^1 + 9 \cdot 10^0$$

Pour la base 10, on oublie souvent de spécifier la base car il s'agit de la base de numération utilisée quotidiennement.

Les **digits** correspondent aux coefficients a_n. Ils ne peuvent prendre que des valeurs appartenant à la base. Les **poids** sont les puissances de 10. Le poids est égal à la base élevée à la puissance de son rang.

	Unité	Dizaine	Centaine	Millier	10 Milliers	100 Milliers
Digit	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Rang	0	1	2	3	4	5
Poids	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5

Pour faciliter l'écriture, les représentations suivantes sont possibles :

$$(N)_{10} = N = (a_n a_{n-1} \cdots a_1 a_0)_{10} = (a_n a_{n-1} \cdots a_1 a_0)$$

II. Numération binaire (base 2) :

a. La numération binaire ou en base 2

La numération binaire ou en base 2 utilise deux symboles : 0 et 1. Cette base est très commode pour distinguer les deux états logiques fondamentaux (lampe allumée ou éteinte, présence ou non dans une pièce, couleur noir ou blanc…), et est très utilisée en informatique.

On écrit :

$$(a_{n-1} a_{n-2} \cdots a_1 a_0)_2$$

Exemple :

$$(100110000101)_2$$

En numération binaire, les digits (a_i) sont appelés **bit** (abréviation de Binary digIT).
Un code binaire (à n bits en base 2) distingue 2^n états ou combinaisons.

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$\mathbf{2^n}$	1	2	4	8	16	32	64	128	256

- Les puissances successives de 2 (1, 2, 4, 8, 16, 32…) sont appelées **poids binaires**.
- Le bit de poids le plus fort (a_{n-1}) est appelé **MSB (Most Significant Bit)**.

Ressources

- Le bit de poids le plus faible (a0) est appelé **LSB (Low Significant Bit)**.
- Un regroupement successif de 4 bits s'appelle un **quartet**.
- Un regroupement successif de 8 bits s'appelle un **octet**.
- Un regroupement successif de k bits (k > 8) s'appelle un **mot de k bits**.

b. Numération hexadécimale (base 16)

Ce système de numération est très utilisé dans les systèmes ordinateurs et micro-ordinateurs ainsi que dans le domaine des transmissions de données.

Il comporte 16 symboles : 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F.

Un nombre entier positif N s'écrit en base 16 :

$$(N)16 = (a_{n-1}\ a_{n-2}\ \ldots\ a_1\ a_0)_{16}$$

Pour indiquer la base 16, on peut utiliser le caractère $ (dollar) devant le nombre, ou alors 16# devant le nombre.

Exemple :

$$(A8)_{16} = 16\#A8 = \$A8$$

III. Les changements de base

a. Conversions directes

- Du binaire vers l'hexadécimal

Pour convertir du binaire vers l'hexadécimal, on divise le nombre binaire en quartet, en partant de la droite. Chacun des paquets est ensuite converti en hexadécimal.

Exemple :

$$(110101110001)_2=(11010111\ 0001)_{16}=16\#D71$$

- De l'hexadécimal vers le binaire

C'est le processus directement inverse, on écrit chaque quartet sur 4 bits en binaire en complétant éventuellement avec des zéros sur la gauche.

Exemple :

$$1C35H = (0001\ 1100\ 00110101)_2$$

b. Conversions indirectes

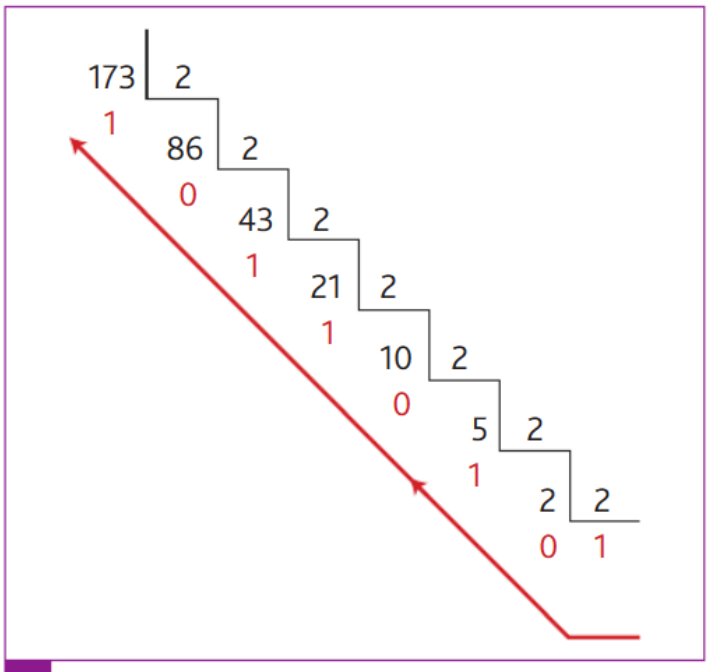
Un nombre entier positif N étant donné en base 10, on cherche à l'écrire dans une autre base notée b. La méthode consiste à diviser le nombre décimal N et à conserver le reste (division entière). Le quotient obtenu est ainsi successivement divisé tant qu'il n'est pas nul. Les restes successifs sont écrits, en commençant par le dernier, de la gauche vers la droite, pour former l'expression de N dans le système de base b.

- Du décimal vers le binaire

Exemple pour la conversion de 173 en base 2 : le résultat est donc $(10101101)_2$ [document 11].

- Du décimal vers l'hexadécimal

On reprend la même méthode mais en divisant par 16.



11 Conversion de 173 en base 2.

Ressources

IV. Le codage des nombres

a. Codages pondérés

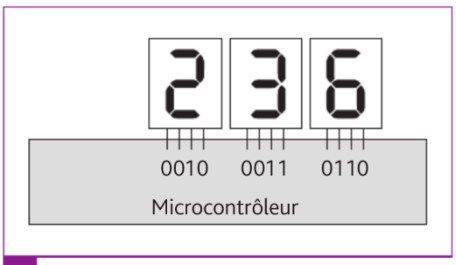
Les codes pondérés sont des codes où **chaque digit est affecté d'un poids**.

- **Les codes naturels**

Les codes binaires, décimaux et hexadécimaux répondent aux règles classiques de l'arithmétique des codes pondérés ; ce sont donc des codes pondérés.

- **Le Code Binaire Codé décimal (BCD)**

Ce codage est destiné à l'affichage de valeurs décimales, chaque digit (unités, dizaines, centaines…) doit être codé en binaire sur 4 bits. Il ne permet aucun calcul, il est uniquement destiné à la saisie et à l'affichage de données.



12 Utilisation du codage BCD.

Exemple :

$$(7239)_{16} = (\underbrace{0111}_{7_{(2)}}\ \underbrace{0010}_{2_{(2)}}\ \underbrace{0011}_{3_{(2)}}\ \underbrace{1001}_{9_{(2)}})_{BCD}$$

- **Le code complément à 1**

Le code complément à 1, appelé aussi Complément Restreint (CR) d'un nombre, est obtenu en complémentant chaque bit un à un.

Exemple : $CR(22_{10}) = CR(10110_2) = (01001)$

- **Le code complément à 2 :** représentation des nombres négatifs

Le code complément à 2, appelé aussi complément vrai (CV), permet de représenter les nombres entiers négatifs utilisés dans les calculateurs. Il est obtenu par :

$$-x = CV(x) = CR(x) + 1$$

Le signe est le bit de poids fort (MSB). Par convention, 0 pour une valeur positive et 1 pour une valeur négative.

Exemple : -22 = CV(2210) = CV (0101102) = CR (0101102) + 1 = (101001) +1=1101010

b. Codages non pondérés

Les codes non pondérés correspondent aux codes où **chaque digit n'a pas de poids**.

- **• Le code binaire réfléchi ou code Gray**

Dans ce code, un seul bit change entre 2 valeurs adjacentes. Le bit changeant est celui le plus à droite ne provoquant pas une combinaison déjà apparue. Il est employé dès que l'on doit représenter une évolution réelle des variables où une seule change d'état à un instant donné.

V. L'extension aux codes non numériques

Pour manipuler d'autres éléments que des nombres, il est aussi nécessaire de les coder. Le plus connu de ces codes, et le plus utilisé, en particulier dans le monde informatique, est le **code ASCII** (American Standard Code for Information Interchange) [documents 13 et 14]. Certains codes ne sont quasiment plus utilisés à l'exception de SOH, STX, ETX, EOT, LF et CR [document 14].

Ces codes alphanumériques sont accessibles sur un ordinateur fixe avec un clavier ou depuis un ordinateur portable disposant d'un pavé numérique. Pour cela, ouvrir un éditeur de texte, appuyer sur la touche « Alt » et saisir un nombre compris entre 32 et 127 sur le clavier numérique. Le caractère associé au code ASCII apparaîtra.

Ressources

Déc	Hex	Char	Déc	Hex	Char	Déc	Hex	Char	Déc	Hex	Char
0	00	Null	32	20	Space	64	40	@	96	60	`
1	01	Start of header	33	21	!	65	41	A	97	61	a
2	02	Start of text	34	22	"	66	42	B	98	62	b
3	03	End of text	35	23	#	67	43	C	99	63	c
4	04	End of transmit	36	24	$	68	44	D	100	64	d
5	05	Enquiry	37	25	%	69	45	E	101	65	e
6	06	Acknowledge	38	26	&	70	46	F	102	66	f
7	07	Audible bell	39	27	'	71	47	G	103	67	g
8	08	Backspace	40	28	(	72	48	H	104	68	h
9	09	Horizontal tab	41	29	)	73	49	I	105	69	i
10	0A	Line feed	42	2A	*	74	4A	J	106	6A	j
11	0B	Vertical tab	43	2B	+	75	4B	K	107	6B	k
12	0C	Form fed	44	2C	’	76	4C	L	108	6C	l
13	0D	Carriage return	45	2D	–	77	4D	M	109	6D	m
14	0E	Shift out	46	2E	.	78	4E	N	110	6E	n
15	0F	Shift in	47	2F	/	79	4F	O	111	6F	o
16	10	Data link escape	48	30	0	80	50	P	112	70	p
17	11	Device control 1	49	31	1	81	51	Q	113	71	q
18	12	Device control 2	50	32	2	82	52	R	114	72	r
19	13	Device control 3	51	33	3	83	53	S	115	73	s
20	14	Device control 4	52	34	4	84	54	T	116	74	t
21	15	Neg. aknowledgement	53	35	5	85	55	U	117	75	u
22	16	Synchronous idle	54	36	6	86	56	V	118	76	v
23	17	End trans. block	55	37	7	87	57	W	119	77	w
24	18	Cancel	56	38	8	88	58	X	120	78	x
25	19	End of medium	57	39	9	89	59	Y	121	79	y
26	1A	Substitution	58	3A	:	90	5A	Z	122	7A	z
27	1B	Escape	59	3B	;	91	5B	[	123	7B	{
28	1C	File separator	60	3C	<	92	5C	\	124	7C	|
29	1D	Group separator	61	3D	=	93	5D	]	125	7D	}
30	1E	Record separator	62	3E	>	94	5E	^	126	7E	~
31	1F	Unit separator	63	3F	?	95	5F	_	127	7F	□

13 Tableau de codage décimal/hexadécimal/ASCII.

ASCII	Caract.	Signification	ASCII	Caract.	Signification
00	NUL	*null*, nul	016	DLE	*data link escape*, échap. liaison données
01	SOH	*start of header*, début d'en-tête	017	DC1	*device control 1*, commande unité 1
02	STX	*start of text*, début de texte	018	DC2	*device control 2*, commande unité 2
03	ETX	*end of text*, fin de texte	019	DC3	*device control 3*, commande unité 3
04	EOT	*end of transmission*, fin de transmission	020	DC4	*device control 4*, commande unité 4
05	ENQ	*enquiry*, interrogation	021	NAK	*negative acknowledgement*, acc. récep. nég.
06	ACK	*acknowledge*, accusé de réception	022	SYN	*synchronous idle*, inactif synchronisé
07	BEL	*bell*, sonnerie	023	ETB	*end of transmission block*, fin tran. bloc
08	BS	*backspace*, espacement arrière	024	CAN	*cancel*, annuler
09	HT	*horizontal tabulation*, tabulation horiz.	025	EM	*end of medium*, fin du support
010	LF	*line feed*, saut de ligne	026	SUB	*substitute*, substitut
011	VT	*vertical tabulation*, tabulation verticale	027	ESC	*escape*, échappement
012	FF	*form fed*, saut de page	028	FS	*file separator*, séparateur de fichiers
013	CR	*carriage return*, retour chariot	029	GS	*group separator*, séparateur de groupes
014	SO	*shift out*, hors code	030	RS	*record separator*, sép. d'enregistr.
015	SI	*shift in*, en code	031	US	*unit separator*, séparateur d'unités

14 Tableau de signification du codage.

Ressources

FICHE 43 : *Conditionnement des signaux analogiques*

En électronique analogique, le conditionnement du signal consiste à « transformer » le signal brut (issu d'un capteur analogique) afin de lui donner la forme la plus appropriée pour son traitement.

Cette opération de conditionnement peut consister à :

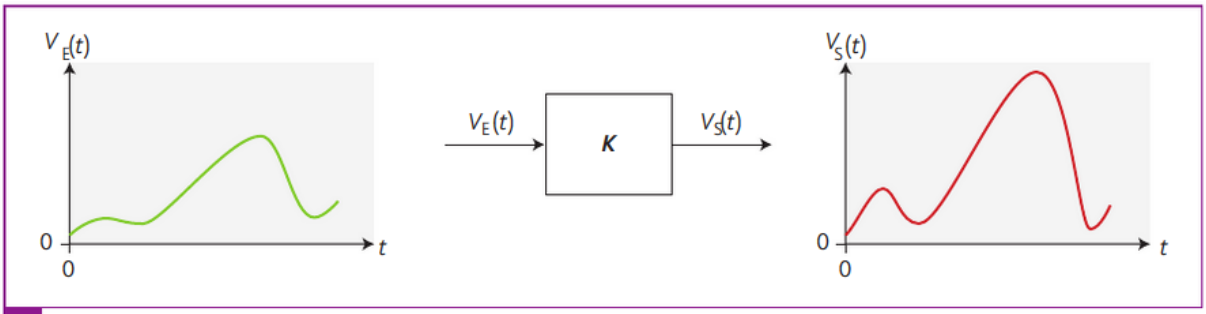
- Amplifier un signal analogique, c'est l'amplification ;
- Mettre en forme un signal analogique, c'est-à-dire supprimer les parties du signal qui sont inutiles ou gênantes ;
- Changer la grandeur (au sens des unités) d'un signal analogique, c'est la conversion de grandeurs ;
- Convertir un signal analogique en signal numérique, c'est la conversion analogique-numérique ;
- Supprimer ou atténuer des composantes fréquentielles du signal analogique, c'est le filtrage ;
- Linéariser la loi d'entrée-sortie d'un capteur analogique, c'est la linéarisation ;
- Déplacer fréquentiellement le spectre d'un signal analogique, c'est la modulation.

Nous ne présenterons pas les structures matérielles (au sens « composants ») réalisant ces différentes opérations, mais nous nous limiterons simplement à une approche fonctionnelle.

I. Amplification

Cette fonction permet de modifier l'amplitude d'un signal analogique, généralement une tension électrique, afin de l'adapter au traitement.

On peut représenter la fonction d'amplification de manière fonctionnelle [document 15].



15 Modélisation fonctionnelle de l'opération d'amplification.

La loi d'entrée-sortie de l'opération d'amplification est donc :

$$V_S = K \times V_E$$

V_S : tension d'entrée (V)
V_E : tension de sortie (V)
K : coefficient d'amplification (sans unité)

L'amplification se résume donc par une simple multiplication du signal d'entrée par un coefficient d'amplification K qui peut être positif ou négatif, inférieur ou supérieur à 1.
En fonction de la valeur du coefficient d'amplification, on parle alors :

- d'amplificateur non inverseur si $K \in [1, +\infty[$;
- d'amplificateur inverseur si $K \in]-\infty, -1]$;
- d'atténuateur non inverseur si $K \in]0, 1]$;
- d'atténuateur inverseur si $K \in [-1, 0[$.

II. Mise en forme

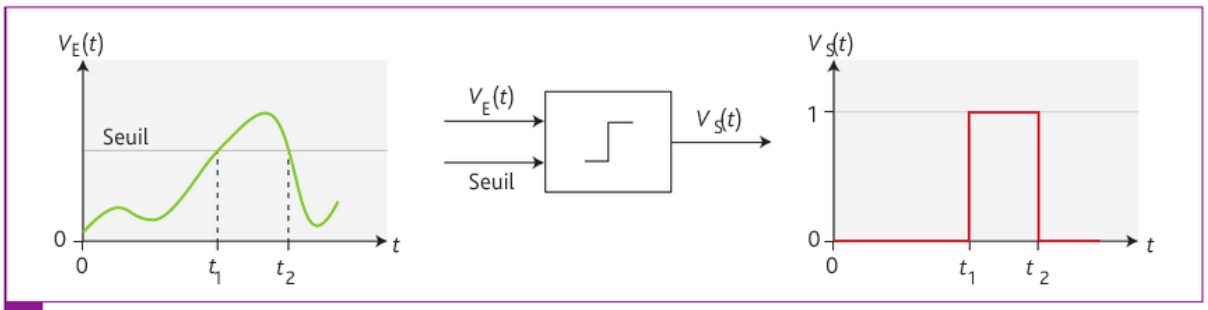
Cette opération de mise en forme permet de modifier la nature du signal analogique pour le rendre numérique, avec seulement deux états (0 ou 1 logique). Elle permet, par exemple, de détecter si un signal analogique d'entrée est supérieur ou inférieur à un seuil (constant ou variable). On parle alors de comparateur à un seuil.

Ressources

On peut représenter l'opération de mise en forme de manière fonctionnelle [document 16].

Il est possible d'obtenir la caractéristique inverse, c'est-à-dire un niveau logique 1 si le signal d'entrée est inférieur au seuil, et un niveau logique 0 dans le cas contraire. On parle alors de comparateur à un seuil inverseur.

De la même façon, il existe des comparateurs (inverseurs ou non) à deux seuils.

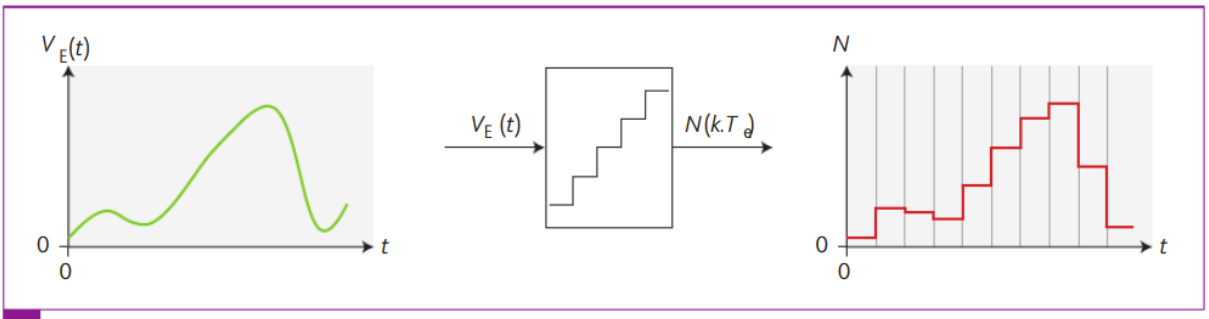


16 Modélisation fonctionnelle de l'opération de mise en forme.

III. Conversion analogique-numérique

L'opération de conversion analogique-numérique permet de fournir un code (nombre entier) représentatif de l'amplitude du signal analogique. Elle permet ainsi le traitement par un composant programmable (microprocesseur, microcontrôleur…) du signal numérique.

On peut représenter l'opération de conversion analogique-numérique de manière fonctionnelle [document 17].



17 Modélisation fonctionnelle de l'opération de conversion analogique-numérique.

Les caractéristiques d'une telle opération sont :

- La période d'échantillonnage T_e, qui correspond à la durée entre deux échantillons ;
- L'étendue de mesure PE du signal analogique en entrée, appelée généralement Pleine Échelle ;
- Le nombre de bits n du mot numérique de sortie, qui correspond au nombre de digits du mot numérique en sortie du convertisseur analogique-numérique.

Les convertisseurs analogique-numérique (CAN) réalisant cette opération possèdent des périodes d'échantillonnage de l'ordre de la microseconde (µs), et un nombre de bits de 8 à 16. Le nombre de codes possible en sortie (nombre d'états) dépend du nombre de bits n et vaut 2n. Plus celui-ci est important, plus l'erreur de quantification du signal analogique sera faible, et donc plus le signal numérique sera « proche » du signal analogique.

La loi d'entrée-sortie d'un convertisseur analogique-numérique est telle que :

$$(N)_{10} = E\left[\frac{V_E \times 2^n}{PE}\right]$$

N : code en sortie du CAN écrit en base 10
$E[x]$: partie entière de x
V_E : tension d'entrée (V)
n : nombre de bits du CAN
PE : Pleine Échelle (V)

Ressources

IV. Filtrage analogique

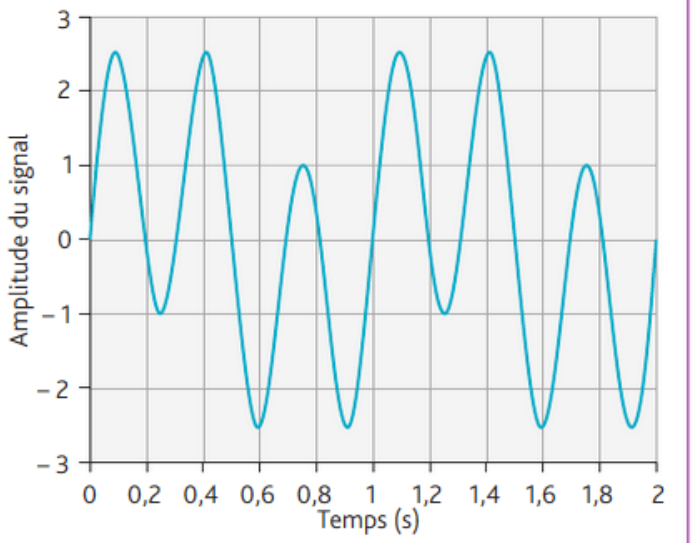
En 1822, Joseph Fourier (mathématicien et physicien) a montré que tout signal analogique x(t) (périodique ou non) peut s'écrire comme une somme infinie de termes sinusoïdaux d'amplitudes et de fréquences différentes.

On a donc :

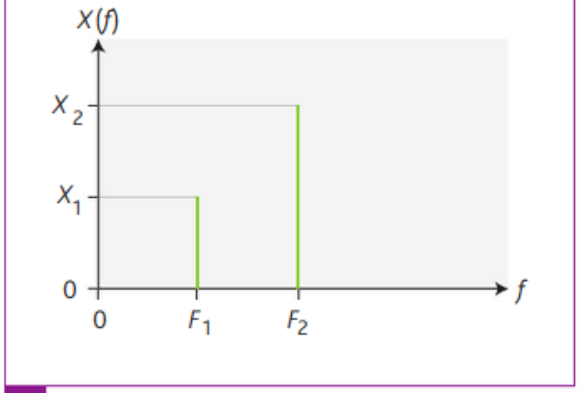
$$x(t) = \sum_{i=0}^{\infty} X_i \times \sin(2 \times \pi \times f_i \times t + \varphi_i)$$

Ces travaux ont permis de transposer les études du domaine temporel vers le domaine fréquentiel. La représentation d'un signal dans le domaine fréquentiel s'appelle le spectre.

Le spectre d'un signal analogique x(t) est noté X(f). L'axe des abscisses est gradué en fréquence, alors que l'axe des ordonnées est gradué en amplitude [document 18].

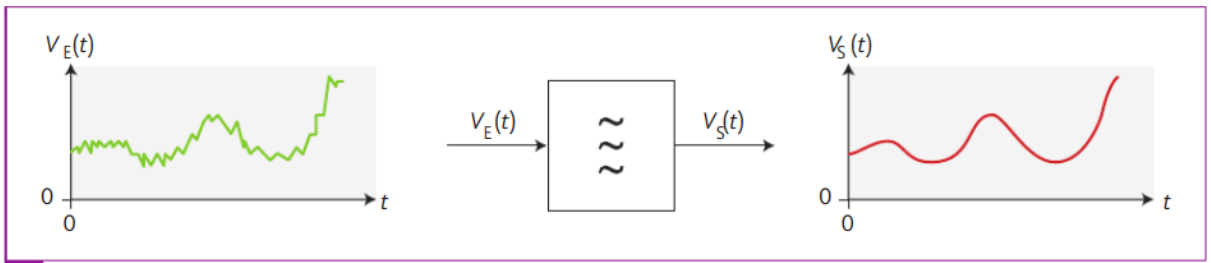


18 Exemple de signal analogique composé de deux sinusoïdes à 1 et 3 Hz.



19 Exemple de spectre $X(f)$ d'un signal analogique $x(t)$.

Cette opération de filtrage permet de modifier la forme du signal analogique dans le domaine temporel en amplifiant ou supprimant des signaux à certaines fréquences ou dans une bande de fréquences. Les montages réalisant cette opération de filtrage sont appelés filtres analogiques. On peut représenter l'opération de filtrage de manière fonctionnelle [document 20].



20 Modélisation fonctionnelle de l'opération de filtrage.

On distingue quatre différents types de filtre en fonction de leur gabarit théorique :

- Les filtres analogiques du type passe-bas qui laissent passer les signaux analogiques de fréquences inférieures à une fréquence choisie, appelée fréquence de coupure, notée fc, et qui suppriment les autres signaux ;

Ressources

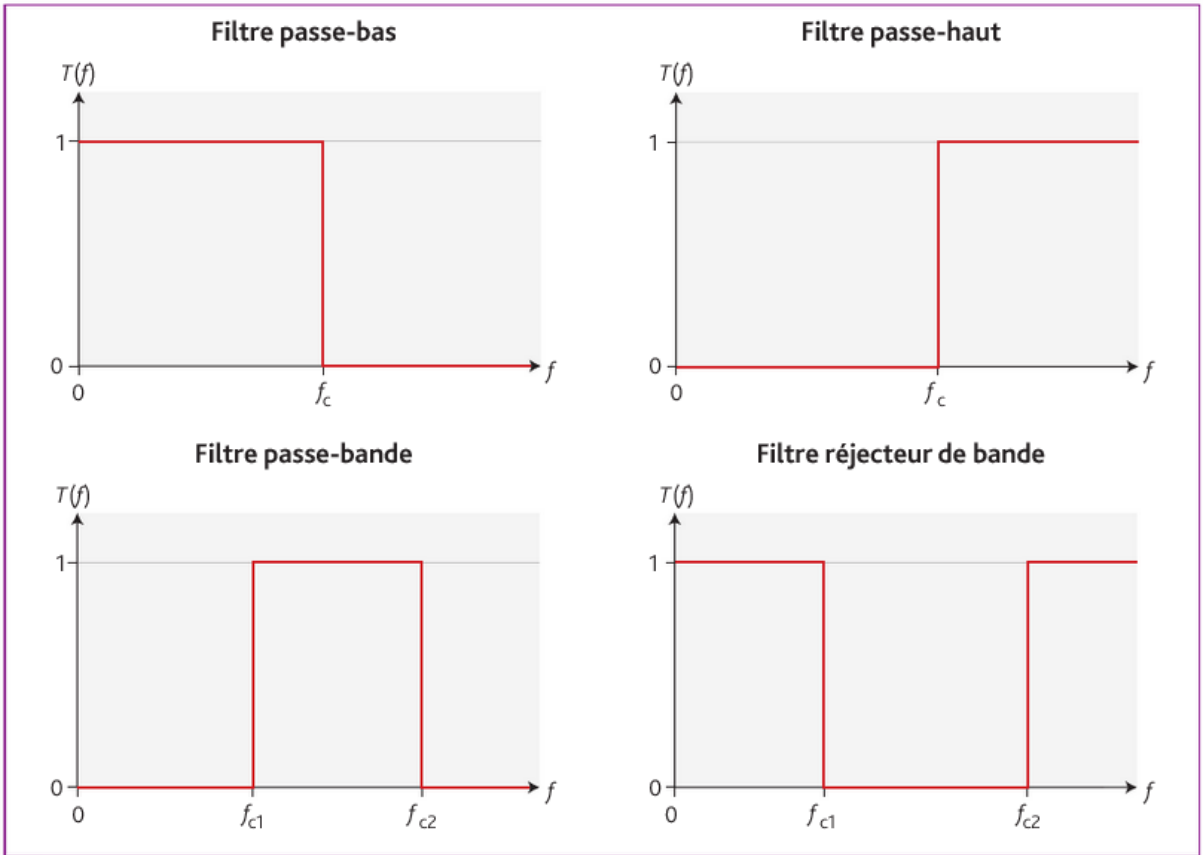
- Les filtres analogiques du type **passe-haut** qui laissent passer les signaux analogiques de fréquences supérieures à une fréquence choisie, appelée fréquence de coupure, notée f_c, et qui suppriment les autres signaux ;
- Les filtres analogiques de type **passe-bande** qui laissent passer les signaux analogiques de fréquences comprises entre deux fréquences de coupure, notées f_{c1} et f_{c2} et qui suppriment les autres signaux ;
- Les filtres analogiques de type **réjecteur de bande** qui laissent passer l'ensemble des signaux analogiques sauf ceux dont la fréquence est comprise entre deux fréquences de coupure, notées f_{c1} et f_{c2}.

Le gabarit d'un filtre est une représentation fréquentielle traduisant l'amplification, notée T(f), des signaux en fonction de la fréquence [document 21].

La loi d'entrée-sortie dans le domaine fréquentiel des filtres analogiques est telle que :

$$V_S(f) = T(f) \times V_E(f)$$

V_S : amplitude du signal de sortie à la fréquence f (V)
T : amplification du filtre à la fréquence f (sans unité)
V_E : amplitude du signal d'entrée à la fréquence f (V)



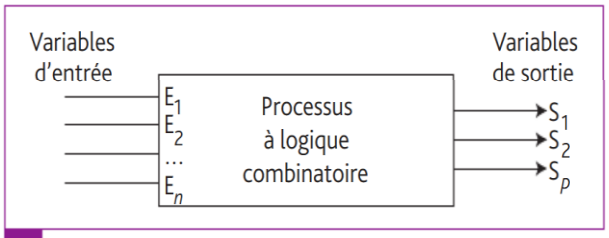
21 Gabarits des quatre types de filtre analogique.

Ressources

FICHE 44 : Outils de description du comportement d'un processus

I. Processus à logique combinatoire ou séquentielle ?

Un processus est dit à **logique combinatoire si les variables de sorties ne dépendent que des variables d'entrées** [document 22].



22 Structure d'un processus à logique combinatoire.

Le but étant de décrire le comportement du processus, il faut donc définir les fonctions logiques reliant les sorties aux entrées.

$$S_1 = f_1(E_1, E_2, \ldots, E_n)$$
$$S_2 = f_2(E_1, E_2, \ldots, E_n)$$
$$\ldots\ldots\ldots$$
$$S_p = f_p(E_1, E_2, \ldots, E_n)$$

Les fonctions f_1, f_2, …, f_p sont appelées fonctions logiques car elles manipulent des variables logiques binaires (0 ou 1). Ces fonctions permettent de décrire le comportement global du système étudié.

La description du comportement d'un système combinatoire peut être faite soit par :

- Une table de vérité ;
- Une fonction logique avec les opérateurs logiques de base ;
- Un logigramme.

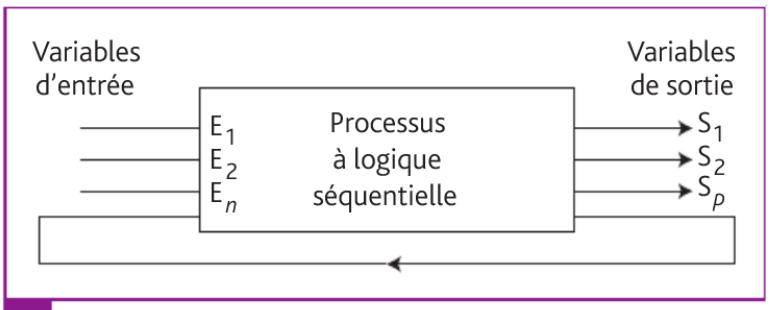
Une table de vérité est un tableau donnant l'état des variables de sorties d'un système logique en fonction de l'ensemble des états possibles des variables d'entrées. Exemple : un système à deux variables d'entrées (a et b) et deux variables de sorties (X et Y).

Entrées		Sorties	
a	b	X	Y
0	0	1	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	1	1	0

Un processus est dit à **logique séquentielle lorsque la ou les variables de sorties dépendent de la combinaison des variables d'entrées mais aussi de l'état précédent des sorties et/ou de la variable temps** [document 23].

Une même cause (même combinaison des entrées E_1, E_2, …, E_n) peut produire des effets différents (états différents des sorties S_1, S_2, … S_p). L'effet peut persister si la cause disparaît.

$S_i = f(E_1, E_2, \ldots, E_n, S_1, S_2, \ldots, S_p, t)$



23 Structure d'un processus à logique séquentielle.

La description du comportement d'un processus à logique séquentielle peut être faite soit par :

- Un algorithme (ou algorigramme) ;
- Un graphe d'état (fourni à titre d'information).

Ressources

II. Démarche de description du comportement d'un processus

Étape 1 : définir la frontière d'étude du processus étudié.

Étape 2 : recenser les variables d'entrées et de sorties et leur associer des noms de variables binaires (les noms associés aux variables sont parfois appelés mnémoniques).

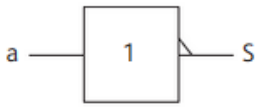
Étape 3 : identifier si le comportement du processus relève de la logique combinatoire ou séquentielle.

Étape 4 : traduire le comportement observé ou le comportement souhaité à l'aide d'un des outils les plus appropriés.

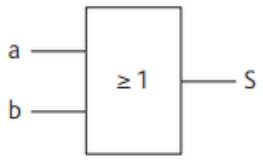
Étape 5 : tester le fonctionnement par simulation par exemple.

III. Les opérateurs logiques de base

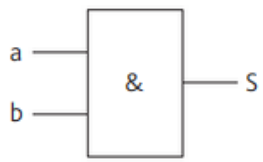
a. La fonction NON

Symbole	Équation logique	Table de vérité
	$S = \overline{a}$	a | S 0 | 1 1 | 0
Cette fonction complémente le niveau logique présent sur son entrée.		

b. La fonction OU inclusif

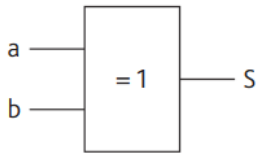
Symbole	Équation logique	Table de vérité
	$S = a + b$	a | b | S 0 | 0 | 0 0 | 1 | 1 1 | 0 | 1 1 | 1 | 1
Cette fonction présente un niveau logique haut sur sa sortie dès qu'au moins l'une de ses entrées est au niveau logique haut.		

c. La fonction ET

Symbole	Équation logique	Table de vérité
	$S = a \cdot b$	a | b | S 0 | 0 | 0 0 | 1 | 0 1 | 0 | 0 1 | 1 | 1
Cette fonction positionne sa sortie au niveau logique haut si toutes ses entrées sont au niveau haut.		

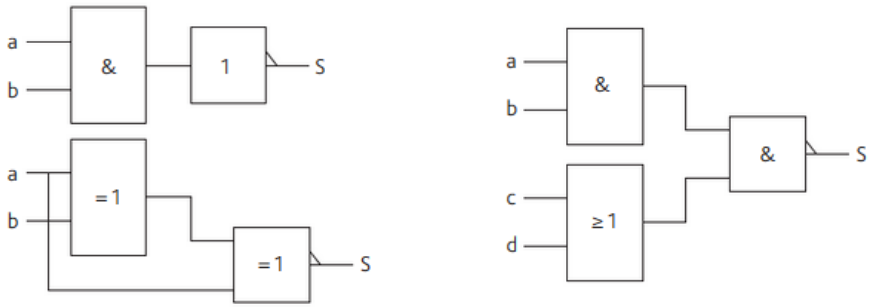
Ressources

d. La fonction OU Exclusif

Symbole	Équation logique	Table de vérité
	$S = a \oplus b$ ou $S = \bar{a} \cdot b + a \cdot \bar{b}$	a b S 0 0 **0** 0 1 **1** 1 0 **1** 1 1 **0**
Cette fonction présente sur sa sortie un niveau logique haut si ses entrées sont à un niveau logique différent.		

IV. Association d'opérateurs logiques de base

Il est possible d'associer des opérateurs logiques de base en les connectant en « cascade ». Un opérateur logique, dont l'une des entrées est reliée à la sortie d'un autre opérateur, se voit appliquer sur son entrée le résultat obtenu sur la sortie de l'opérateur logique précédent. On combine chaque nouvelle valeur des entrées dans l'équation de celui-ci pour obtenir l'équation de sortie [document 24].



24 Exemple d'association d'opérateurs logiques de base.

V. Détermination de fonctions logiques à partir d'une table de vérité

En supposant que, suite à une étude d'un cahier des charges, nous obtenons la table de vérité suivante où a et b sont les variables d'entrées et S la variable de sortie :

a	b	S
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	0

Nous nous apercevons que la variable de sortie S vaut 1 quand a = 0 et b = 1.
Si nous codons S = 1 par S, a = 0 par a et b = 1 par b, nous pouvons écrire :

$$S = \overline{a}.b$$

Dans cette expression, le point signifie "et".

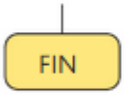
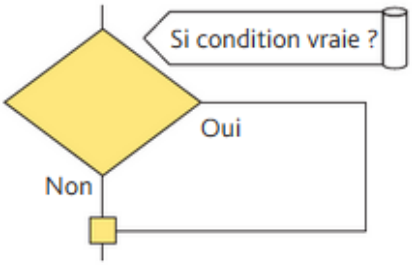
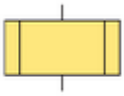
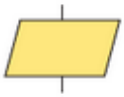
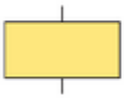
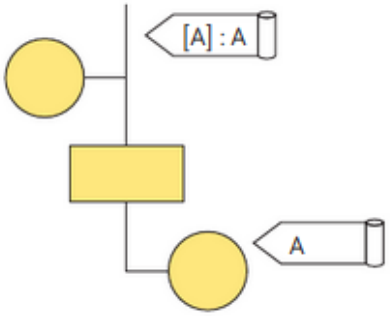
Ressources

VI. Description du comportement séquentiel par l'outil algorithme

Un algorithme est l'ensemble de règles opératoires ordonnant à un microprocesseur d'exécuter dans un ordre déterminé un nombre d'opérations élémentaires.

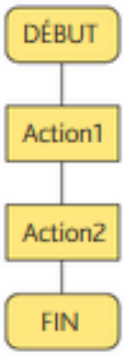
Un algorigramme (appelé aussi ordinogramme) est une représentation graphique de l'algorithme utilisant des symboles normalisés.

a. Constitution de l'outil de description algorigramme

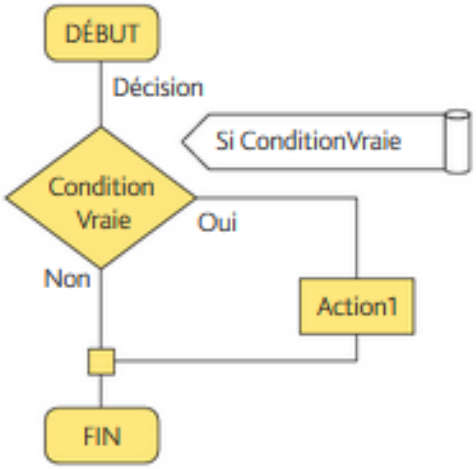
Symbole	Désignation du symbole
	Début de l'algorigramme
	Fin de l'algorigramme
	Test ou branchement conditionnel
	Appel à un sous-programme
	Symbole d'acquisition et ou de mise à jour des entrées/sorties
	Bloc de traitement de données
	Saut de séquence
	Commentaires

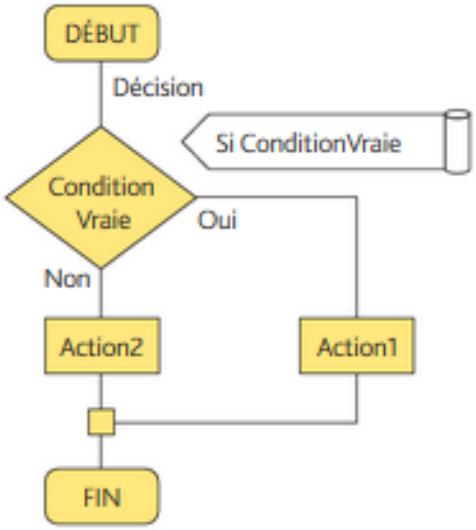
Ressources

b. Constitution de l'outil de description algorigramme

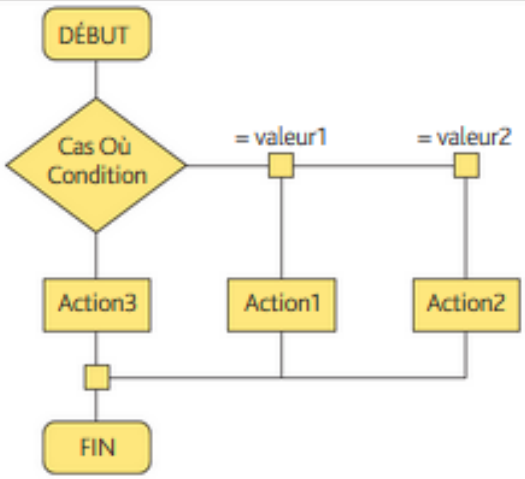
Algorigramme	Algorithme
	**Début** Action1 Action2 **Fin**
On exécute successivement une suite d'actions dans l'ordre de leur énoncé.	

Structures alternatives

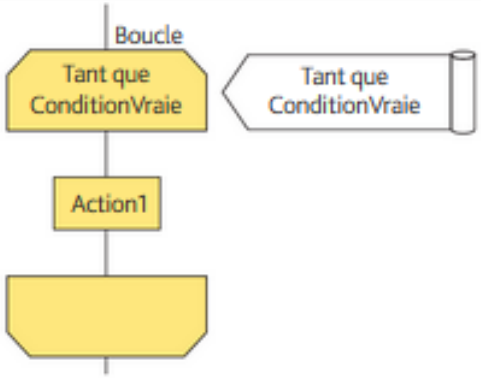
Algorigramme	Algorithme
	**Début** **Si** ConditionVraie **Alors** Action1 **Fin Si** **Fin**
Cette structure offre le choix de réaliser ou non une séquence d'action(s).	

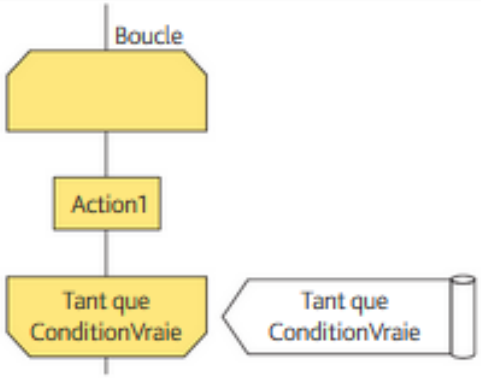
Algorigramme	Algorithme
	**Début** **Si** ConditionVraie **Alors** Action1 **Sinon** Action2 **Fin Si** **Fin**
Cette structure offre le choix entre deux séquences s'excluant mutuellement.	

Ressources

Algorigramme	Algorithme
	**Début** **Cas Où** Condition = valeur1 **Faire** Action1 Condition = valeur2 **Faire** Action2 **Autrement Faire** Action3 **Fin Cas Où** **Fin**
Cette structure offre le choix entre plusieurs séquences s'excluant mutuellement.	

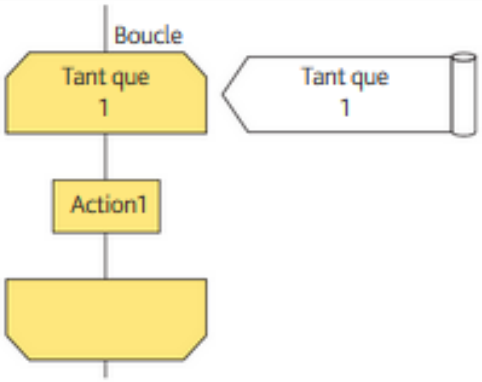
Structures itératives

Algorigramme	Algorithme
	**Tant que** ConditionVraie **Faire** Action1 **Fin Tant Que**
On teste d'abord la condition, la séquence est exécutée tant que la condition est vraie.	

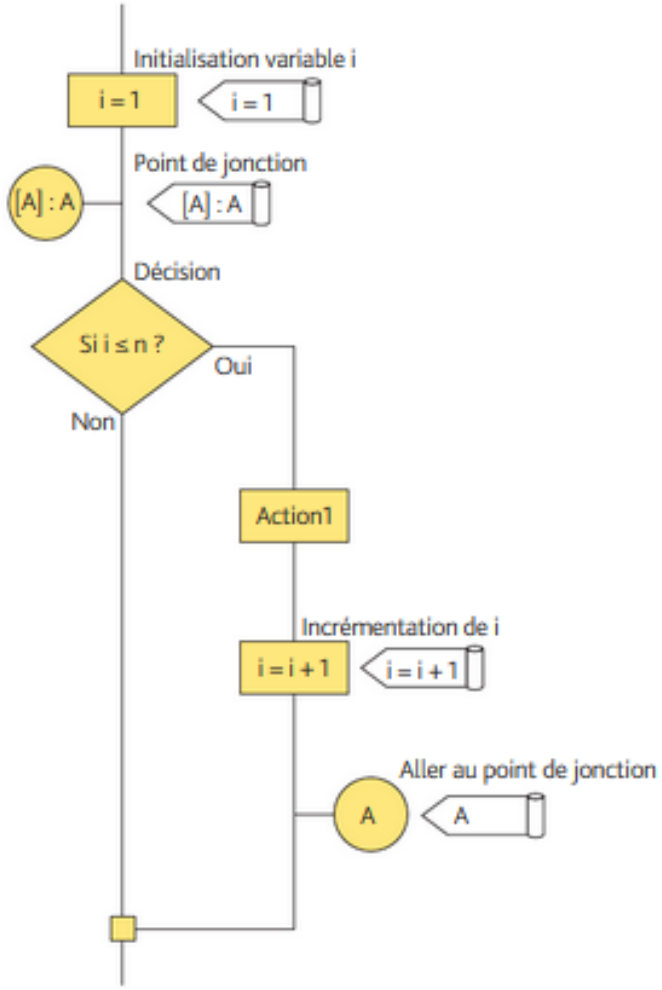
Algorigramme	Algorithme
	**Faire** Action1 **Tant que** ConditionVraie **Fin Tant Que**
L'action est exécutée au moins une fois, elle est répétée tant que la condition est vraie.	

Ressources

La structure **Tant que** … **Faire** … **Fin Tant Que** est très utilisée, notamment lorsque l'on veut faire une boucle infinie. On utilise alors :

Algorigramme	Algorithme
	**Tant que** 1 **Faire** Action1 **Fin Tant Que**

Structure à reprise de séquence

Algorigramme	Algorithme
	**Pour** i **allant** de 1 **à** n **avec pas de** 1 **Faire** Action1 **Fin Pour**
L'action ou la suite d'actions est exécutée un nombre de fois prédéfini.	

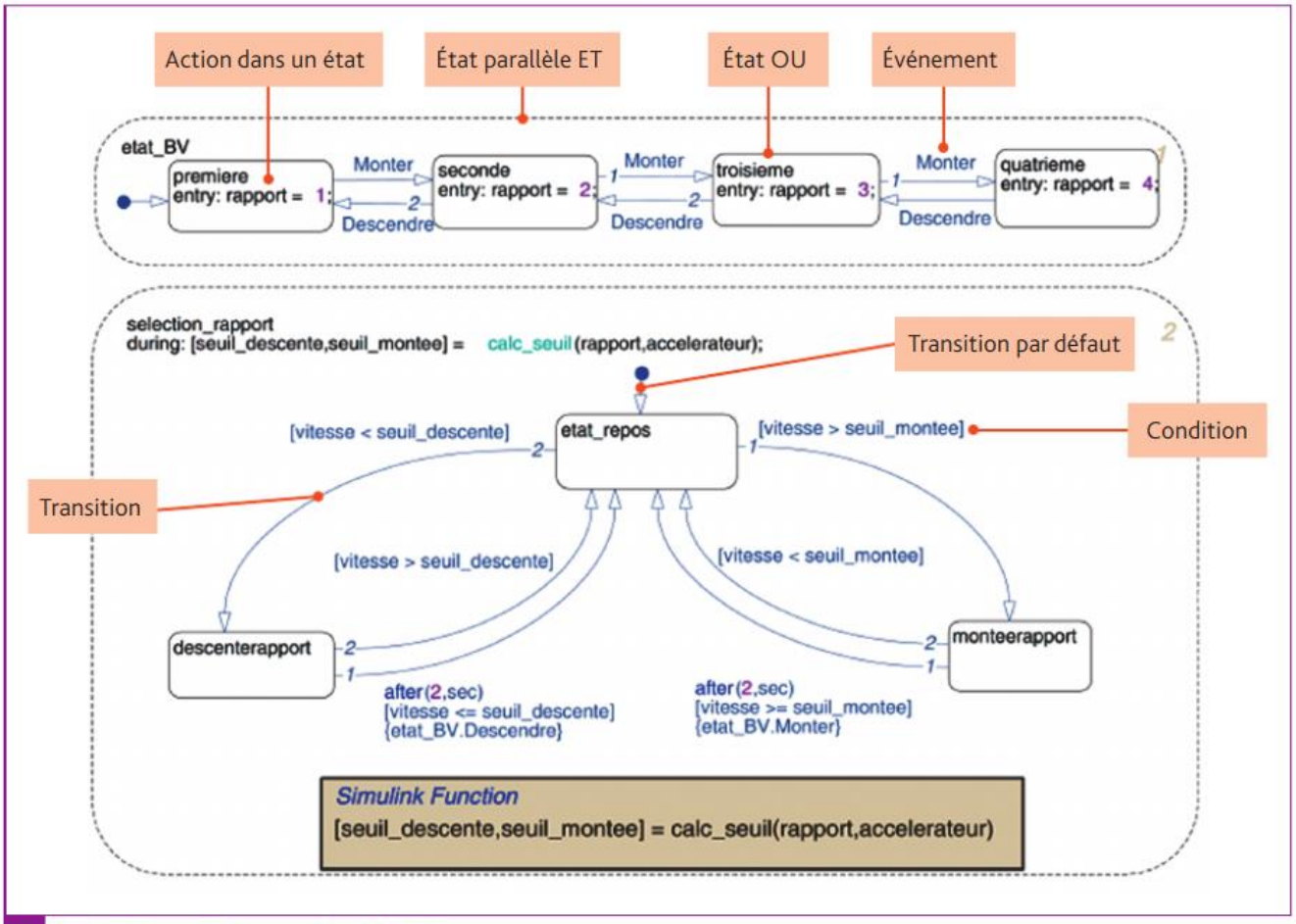
Ressources

VII. Description du comportement d'un processus par l'outil graphe d'états

Le **graphe d'états**, appelé aussi **diagramme états-transitions**, est l'un des outils permettant de décrire le comportement séquentiel d'un processus.

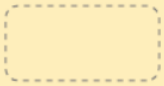
a. Constitution de l'outil graphe d'états

L'exemple ci-dessous montre les différents constituants d'un graphe d'états [document 25].



25 Constituants de graphe d'états.

b. Descriptif des constituants d'un graphe d'états

Symbole graphique	Dénomination	Descriptif
	État OU	Les états « OU » représentent des états de fonctionnement de manière mutuellement exclusive. Deux ou plusieurs états OU de même niveau hiérarchique ne peuvent être actifs simultanément.
	État ET	Les états « ET » représentent des états de fonctionnement totalement indépendants. Deux ou plusieurs états ET de même niveau hiérarchique peuvent être actifs simultanément. Ces états sont représentés graphiquement par un rectangle en traits pointillés.

Ressources

Symbole graphique	Dénomination	Descriptif
	Transitions	Les transitions sont représentées par des flèches orientées et permettent de décrire les évolutions du processus d'un état source vers un état destination.
[vitesse > seuil_descente]	Condition associée à une transition	Il s'agit de définir la condition pour passer d'un état source à un état destination. La condition est une fonction logique dont le résultat est binaire (vrai ou faux).
	Transition par défaut	Cette transition indique l'état (ou super-état) qui doit être actif à l'état initial. Elle ne peut apparaître que sur des états OU.
Nom_etat entry: actions1; during: actions2; exit: actions3;	Actions dans un état	Il s'agit de définir les actions à effectuer lorsque l'état est actif. On définit les trois types d'actions ci-dessous. • Action à l'activation de l'état : pour spécifier ce type d'action, la syntaxe est *entry* : *actions1*. • Action durant l'état : pour spécifier ce type d'action, la syntaxe est *during* : *actions2*. • Action à la désactivation de l'état : pour spécifier ce type d'action, la syntaxe est *exit* : *actions3*.

Remarque : lorsqu'un état est composé de sous-états, on parle de super-état, de macro-état ou d'état composite.

c. Règles d'évolution d'un diagramme états-transitions

Lorsque dans un diagramme états-transitions seuls des états OU sont présents, il est nécessaire de vérifier :
• qu'il y a toujours au moins un état destination (Condition 1) ;
• qu'il n'existe qu'un seul état destination (Condition 2).

Condition 1 : il doit être complet ou non ambigu.

Ceci signifie que le comportement du processus est toujours défini. À chaque évolution des variables d'entrées (conditions ou événements), et quel que soit l'état dans lequel se trouve le processus, il est nécessaire de pouvoir connaître l'état suivant. On peut traduire cette propriété sous forme d'équation booléenne en écrivant que le OU logique de toutes les conditions associées aux transitions partant d'un état quelconque est toujours vrai. Soit C1, C2, …, Ci ,…, Cn ces conditions, alors :

$$\sum_{i=1}^{i=n} C_i = 1$$

Condition 2 : il doit être non contradictoire.

Ceci signifie qu'à tout changement des variables d'entrées (condition ou événement), une seule transition est possible. Si plus d'une transition à sa condition associée est vraie, le diagramme est dit contradictoire (par exemple, deux actions contradictoires sont simultanément possibles). On peut traduire cette propriété en écrivant que le OU logique de tous les ET logiques de deux conditions associées aux transitions partant d'un état quelconque est toujours faux.

$$\sum_{i=1}^{i=n} \prod_{j=i+1}^{j=n} C_j = 0$$

Ressources

FICHE 45 : Encapsulation de données, notion de protocole

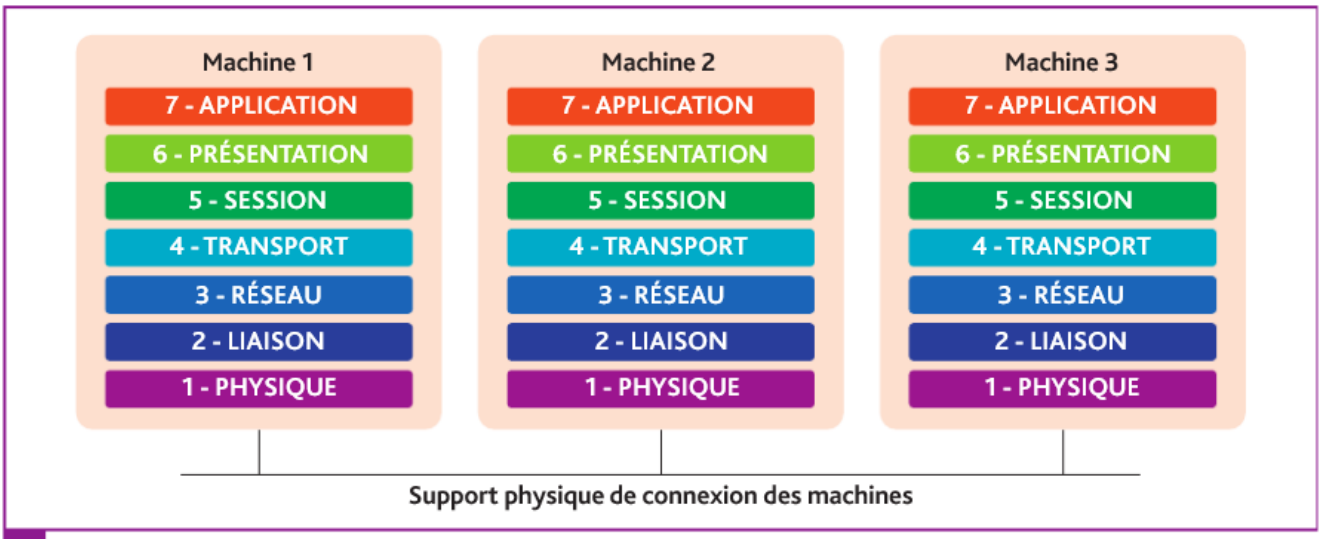
I. Principe du modèle OSI

Pour permettre l'interconnexion d'architectures hétérogènes, l'ISO (International Standardization Organisation) a développé le modèle OSI (norme internationale) qui permet de faire communiquer entre elles des machines :

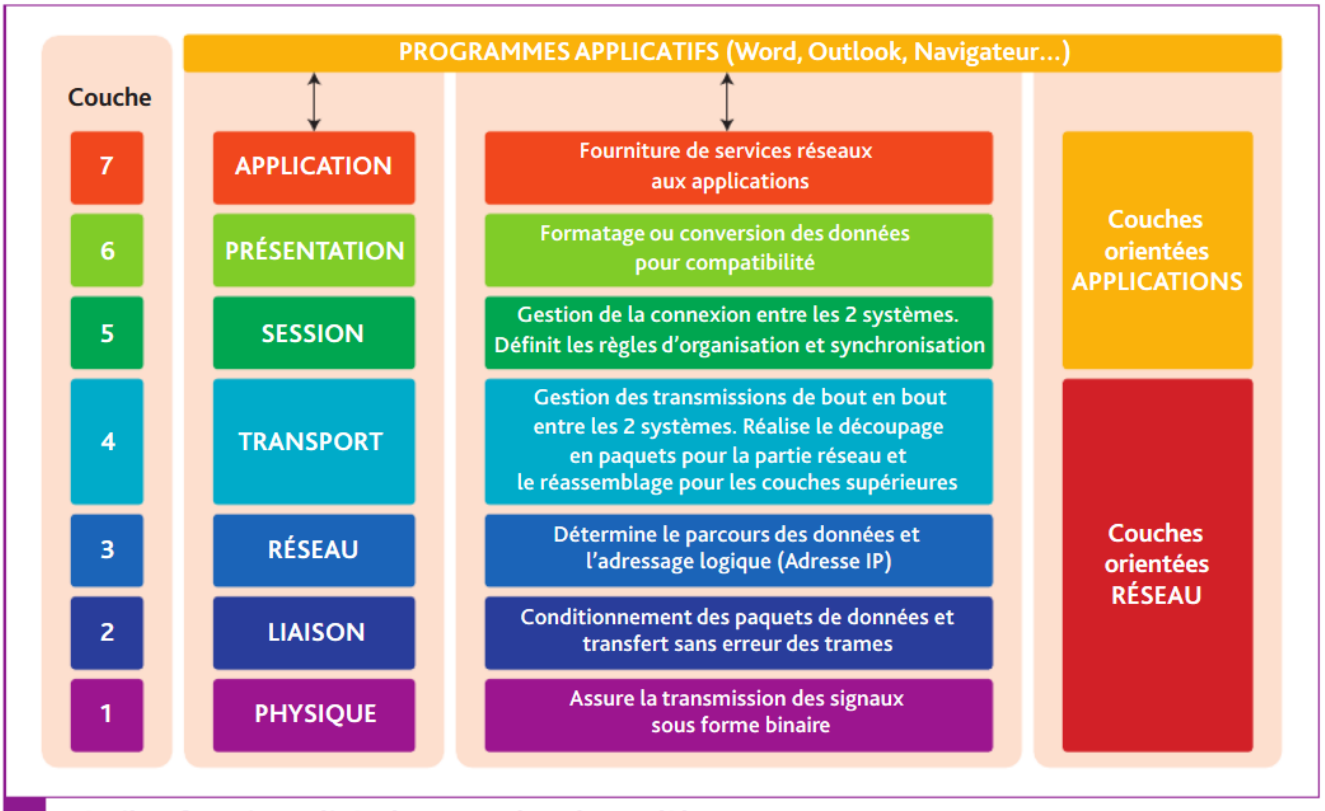
- sur des réseaux d'architectures différentes ;
- associant divers types de protocoles.

Ce modèle décrit les concepts utilisés et la démarche suivie pour normaliser l'interconnexion de systèmes.

Chaque couche porte un nom et un numéro. Le modèle OSI définit ainsi une architecture découpée en 7 couches qui ont chacune leur fonction [documents 26, 27 et 28].

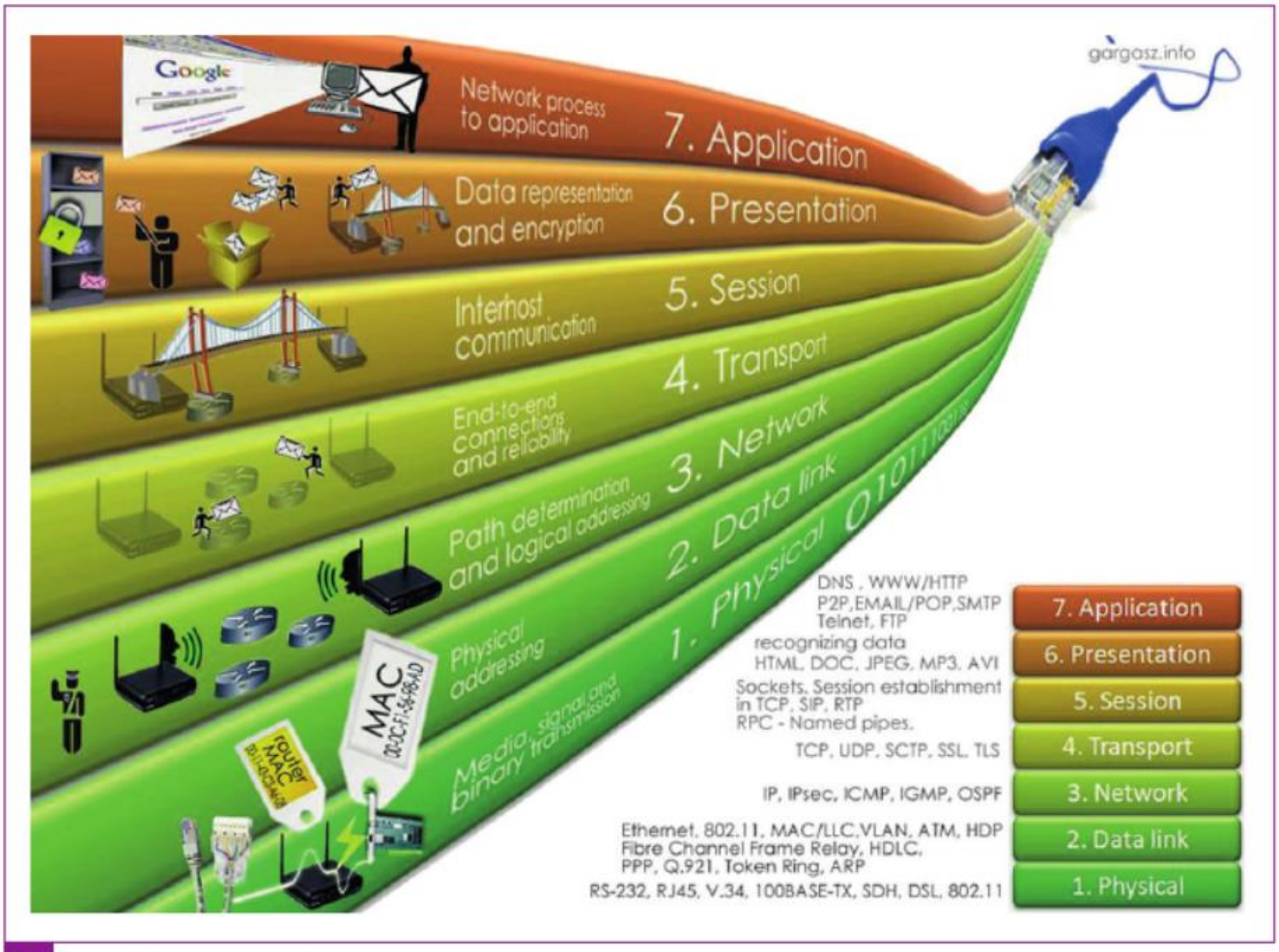


26 Modèle OSI avec la connexion de trois machines.



27 Détail et fonctionnalités des 7 couches du modèle OSI.

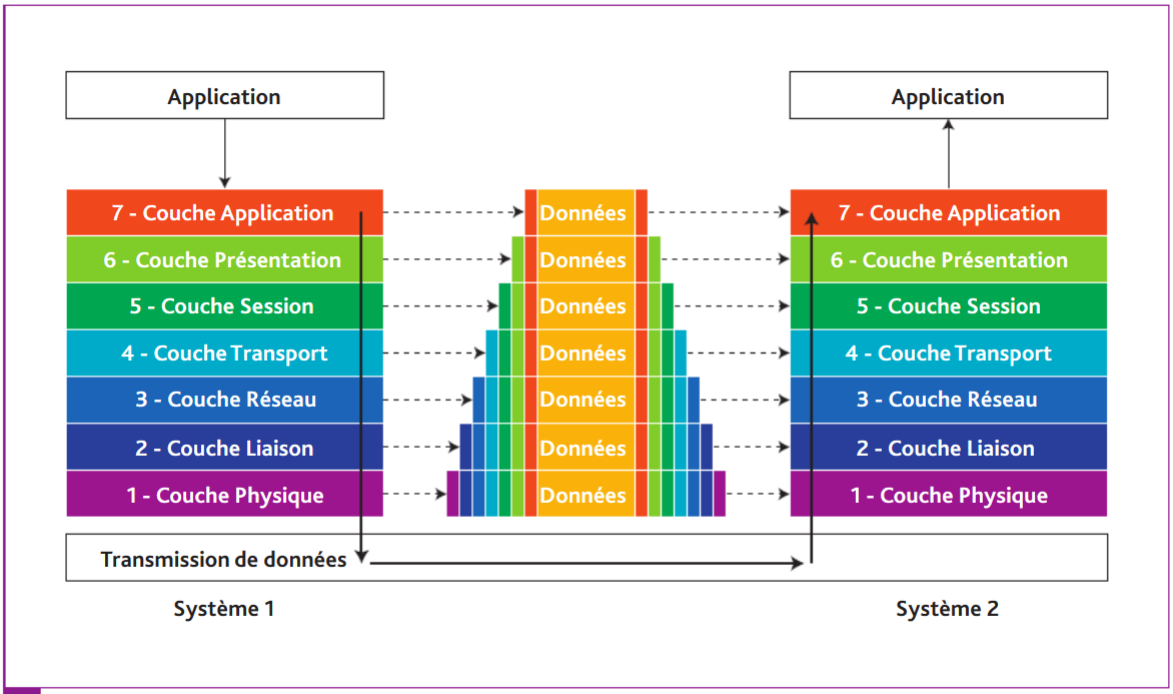
Ressources



28 Modèle OSI et fonctions.

II. Principe de l'encapsulation d'une information à transmettre

Chaque couche, qui a une fonction déterminée, ajoute des champs (ensemble de bits) à l'information (data) à transmettre afin que la couche identique de la machine destinataire effectue des vérifications [document 29].

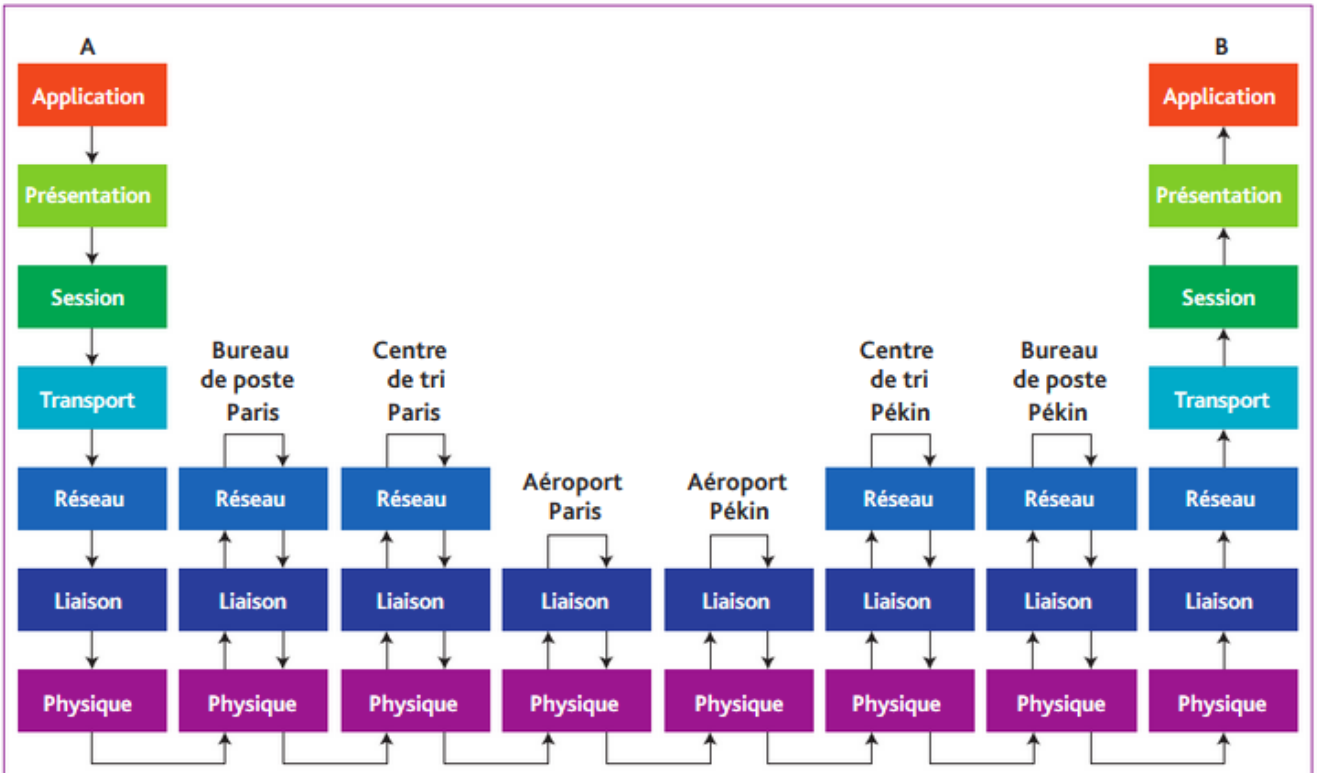


29 Principe de l'encapsulation de données.

Ressources

En fait, une couche utilise les services de la couche en dessous d'elle qui, à son tour, en offre pour la couche du dessous. De fait, un certain nombre d'informations se retrouvent d'une couche à une autre ; c'est le principe d'encapsulation. L'encapsulation consiste à « envelopper » les données à chaque couche du modèle OSI.

Lorsque vous écrivez une lettre, vous la glissez dans une enveloppe ; c'est à peu près le même principe dans le modèle OSI : les données sont enveloppées à chaque couche et le nom de l'unité de données n'est rien d'autre que le nom de l'enveloppe. Afin de mieux saisir le principe, on peut faire un parallèle avec un envoi postal [document 30]. À chaque étape, on ajoute des informations au message initial de manière à ce que l'ensemble des intervenants (humains ou matériels) possède et comprenne les données nécessaires à l'acheminement du courrier.



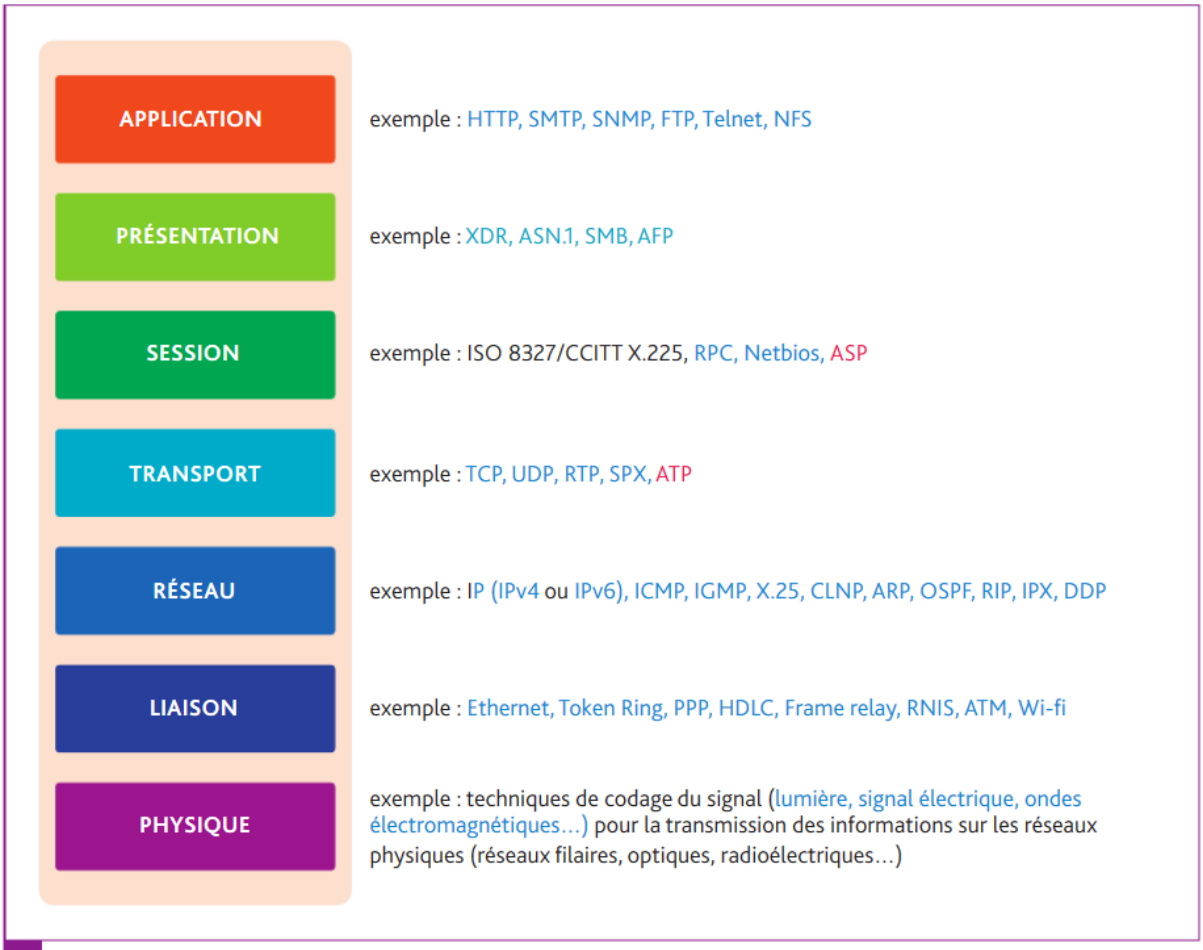
1) A écrit la lettre en français.
2) A transmet la lettre au secrétariat qui la traduit en anglais, la met dans une enveloppe sur laquelle elle écrit l'adresse de B.
3) La personne chargée du ramassage du courrier de l'entreprise dans laquelle travaille A passe dans le service de ce dernier pour ramasser son courrier.
4) Le service de courrier effectue un tri du courrier et l'affranchit avec une machine à affranchir.
5) Le courrier est déposé au bureau de poste.
6) Le courrier est chargé dans une voiture qui l'emmène au centre de tri.
7) Le courrier pour la Chine est emmené à l'aéroport de Paris par train.
8) Le courrier pour la Chine est transmis par avion à l'aéroport de Pékin.
9) Le courrier est transmis par train de l'aéroport de Pékin au centre de tri de Pékin.
10) Le courrier pour l'entreprise de B est transmis à l'entreprise par voiture.
11) Le service de courrier de l'entreprise de B trie le courrier arrivé.
12) Le courrier est distribué à heure fixe aux destinataires et en particulier au service de B.
13) Le secrétariat de B ouvre le courrier et traduit en chinois le contenu de la lettre destinée à B.
14) B lit la lettre que lui a envoyée A.

30 Analogie encapsulation de données/envoi de courrier.

Ressources

III. Qu'est-ce qu'un protocole ?

Un protocole est un ensemble de conventions (règles de communication) qui permettent une communication efficace sans faire directement partie du sujet de la communication elle-même. Un protocole réseau est un protocole de communication mis en œuvre sur un réseau informatique. Le protocole le plus connu dans le cadre des réseaux est le protocole IP utilisé sur Internet ; mais il en existe beaucoup d'autres. En effet, le fonctionnement d'un réseau est généralement le résultat de « l'empilement » de plusieurs protocoles réseau qui forment des Couches de protocoles comme le modèle OSI [document 31].



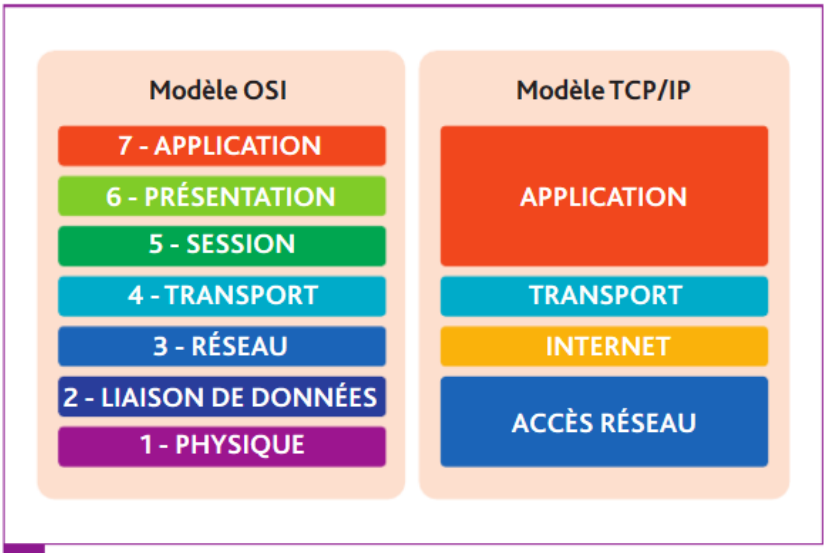
31 Différents protocoles.

IV. Modèle OSI et modèle TCP/IP

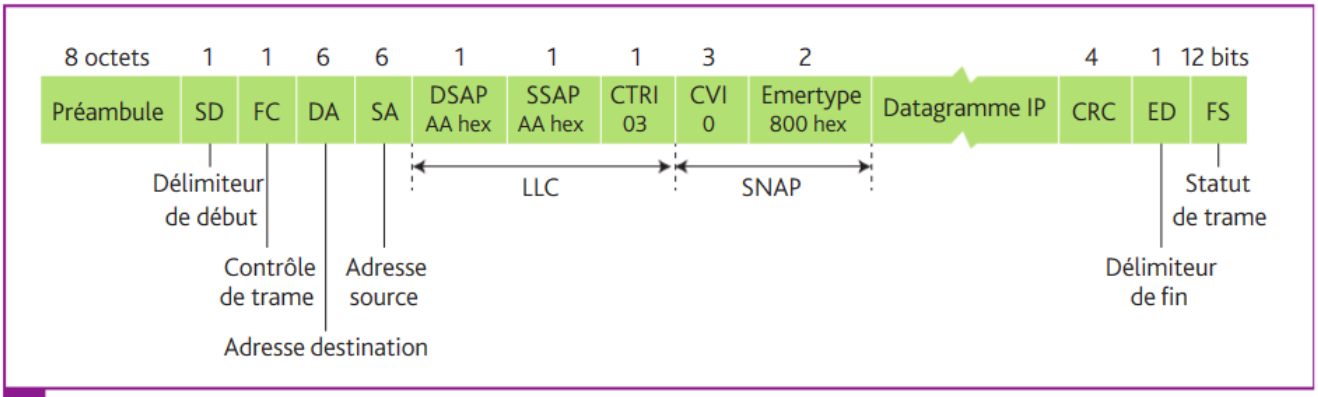
Il existe un autre modèle de référence appelé TCP/IP, du nom de ses deux principaux protocoles. Utilisé par Internet, ce modèle a été créé pour relier des réseaux très divers de la façon la plus transparente possible.

Reposant sur la forme générale du modèle OSI, ce modèle a cependant moins de couches; la plupart des applications ne les utilisant pas [documents 32, 33 et 34].

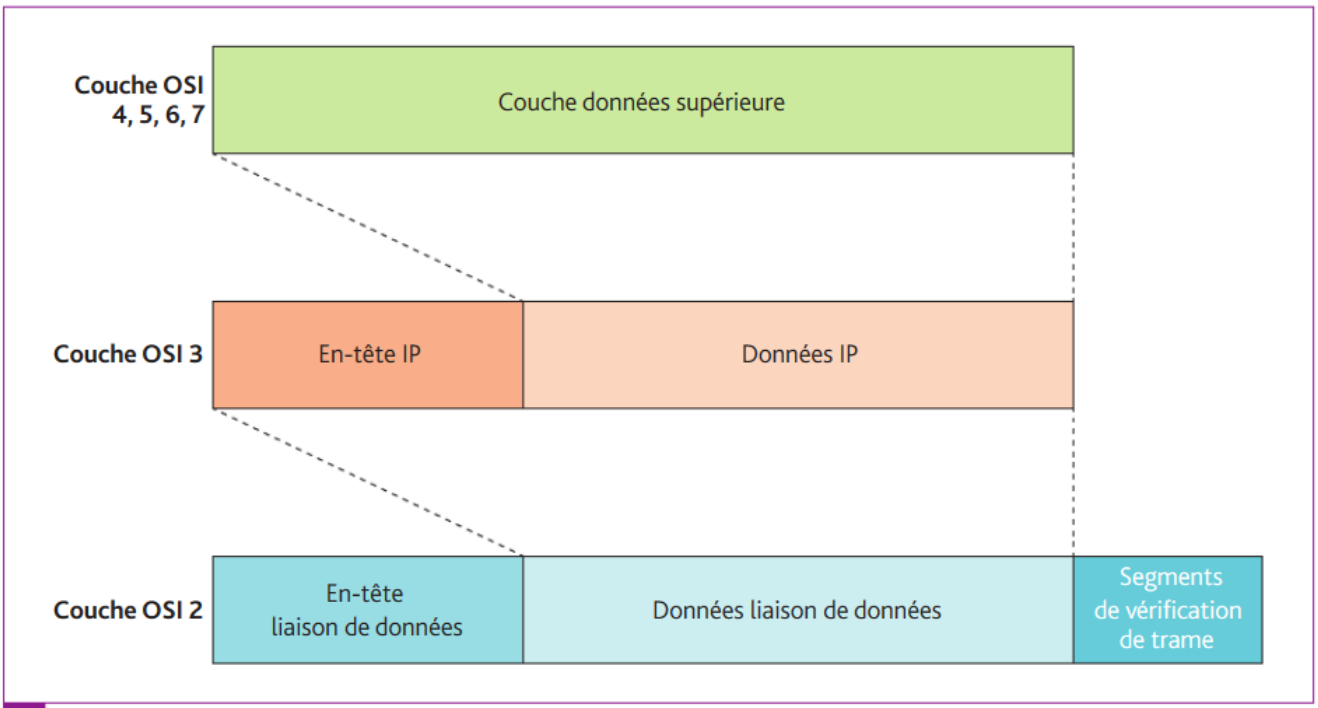
Ressources



32 Correspondance entre les modèles OSI et TCP/IP.



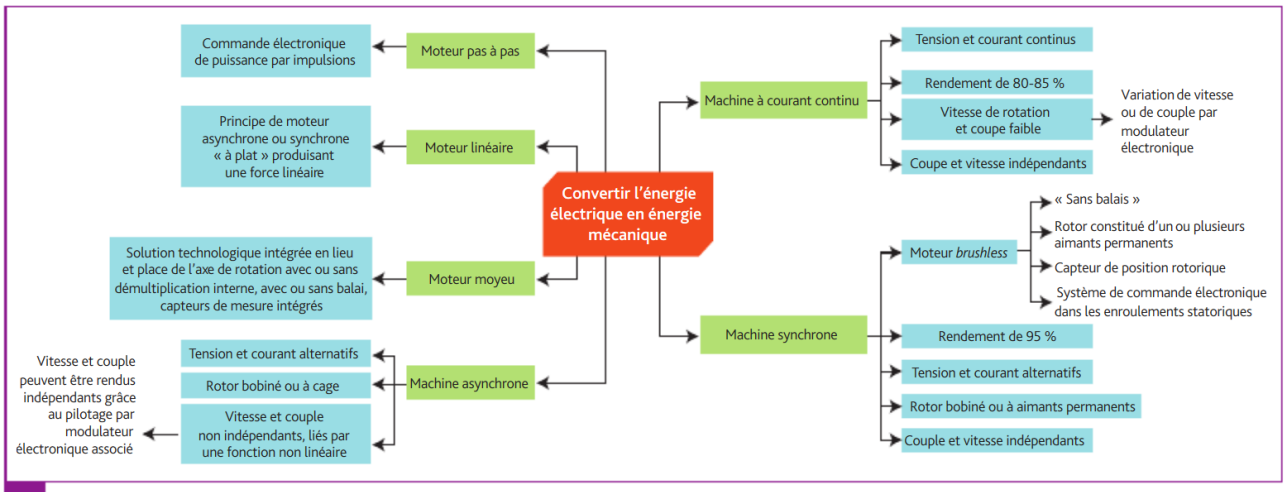
33 Trame d'un protocole TCP/IP.



34 Correspondance entre la partie IP du protocole et les couches OSI.

Ressources

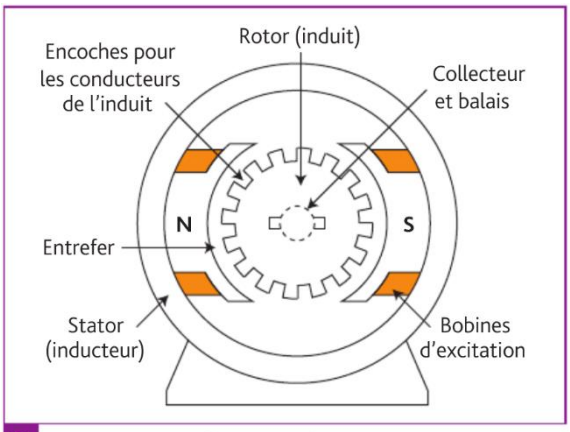
FICHE 46 : *Les différentes technologies de motorisation*



1 Carte mentale des différents systèmes pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique.

I. Machine à courant continu

Les machines à courant continu sont très utilisées en raison de leur faible coût et de leur simplicité de fonctionnement (maîtrise séparée du couple et de la vitesse). Dans ce type de machine, les aimants sont placés sur la cage du moteur et forment le stator. Le bobinage est fixé sur l'axe de rotation, le courant à l'intérieur de ces bobines est conduit par l'intermédiaire des balais et du collecteur. Le rendement de ce type d'actionneur est de l'ordre de 70 %, dû aux pertes par frottements des balais sur le collecteur [document 2].



2 Constitution d'une machine à courant continu.

II. Machine synchrone brushless (sans balais)

Les machines synchrones brushless (ou moteur sans balais) n'utilisent pas de collecteurs mais un modulateur qui crée, en fonction de la position du rotor, des courants triphasés produisant le couple entraînant le moteur en rotation. Le couple produit est proportionnel au courant de phase, au champ magnétique dans l'entrefer entre le rotor et le stator et au rayon du rotor. **La commande en courant** permet d'imposer le couple à vitesse de rotation quelconque imposée par la charge dans la limite de la puissance nominale, **la commande en tension** permet d'imposer la vitesse de rotation à couple quelconque dans la limite de la puissance nominale. L'absence des frottements des balais permet d'atteindre des rendements plus élevés, proches des 80 %. Cependant, ces machines nécessitent un modulateur électronique pour convertir la tension continue provenant de la batterie en tension triphasée, ce qui augmente leur coût.

a. Machine synchrone brushless à rotor interne

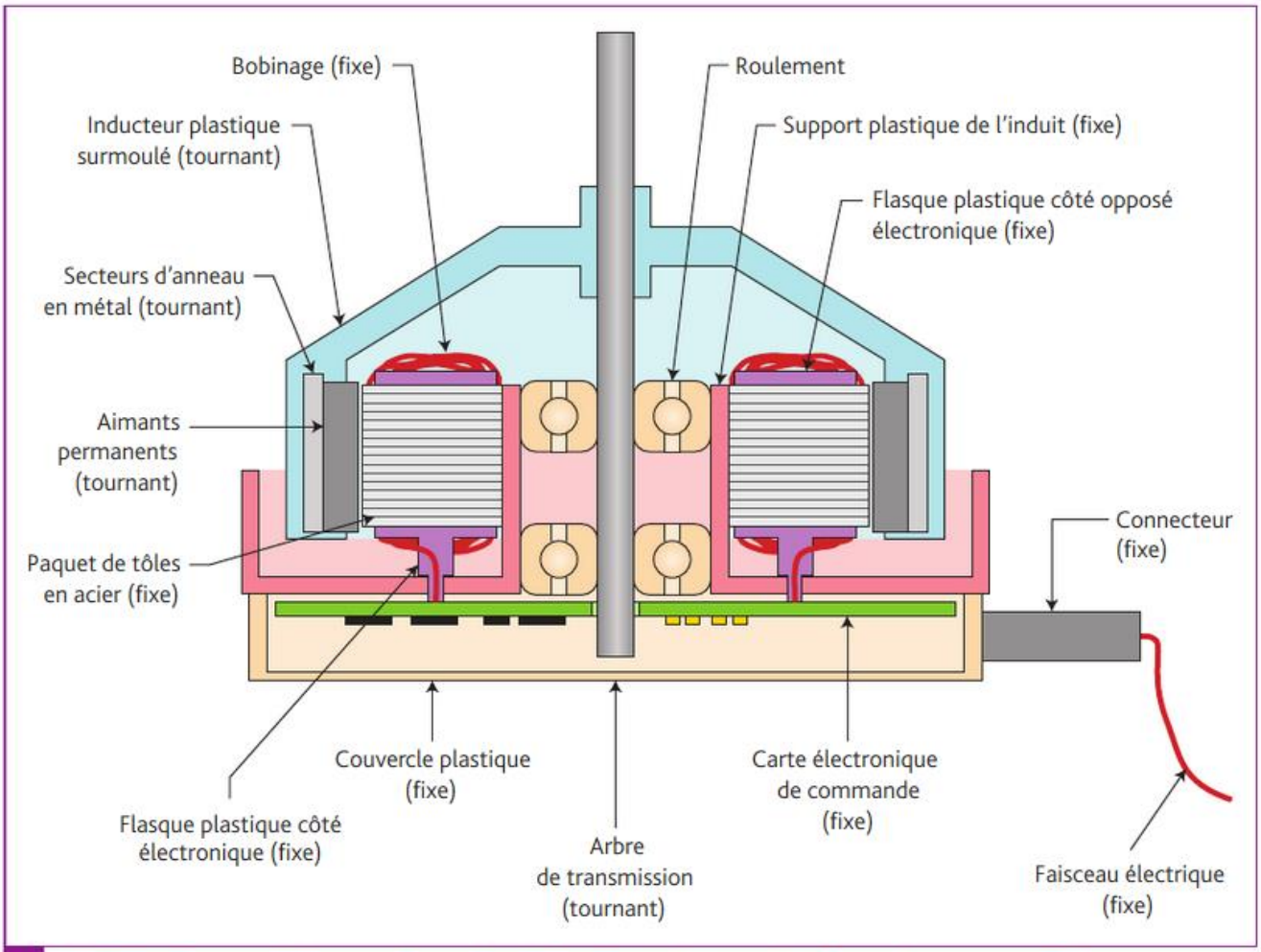
Les brushless « classiques » à rotor interne sont composées d'un stator externe comportant 3 ou 6 bobines et d'un rotor cylindrique interne (généralement 2 pôles) porteur de l'arbre de sortie fournissant la puissance mécanique à l'hélice.

Ressources

Ils peuvent tourner jusqu'à 30 000 tr·min^{-1} pour ce type d'application. Cependant, ils nécessitent l'utilisation d'un réducteur pour faire tourner les hélices à des vitesses entre 3 000 et 7 000 tr·min^{-1}. Cela est un surplus de masse et une perte de rendement supplémentaire.

b. Machine synchrone brushless à rotor externe ou à cage tournante

Ces machines possèdent un stator interne comportant 3n bobines, et un rotor cylindrique externe. Par rapport à une machine à rotor interne, pour une masse et une puissance électrique équivalente, on peut espérer un couple plus important du fait d'un plus grand bras de levier créé par la position des aimants en périphérie du moteur. Si ce couple est suffisant, on peut éliminer l'étage du réducteur et donc gagner en masse et en rendement sur l'ensemble de la chaîne d'énergie. Cette conception en rotor externe permet d'atteindre des rendements de 90 %. La possibilité d'un entraînement direct de l'hélice permet une utilisation de ces moteurs en aéromodélisme, par exemple dans le cadre d'un quadri-rotor caréné [document 3].



3 Principe d'une machine synchrone *brushless* à cage tournante (coupe transversale).

Ressources

FICHE 47 : *Choix d'une machine électrique*

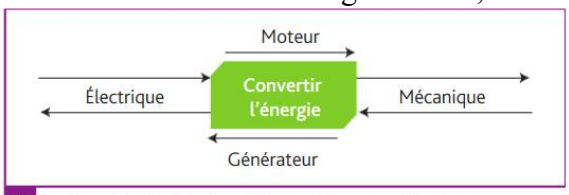
I. Définitions

Les machines synchrones brushless (ou moteur sans balais) n'utilisent pas de collecteurs mais un modulateur qui crée, en fonction de la position du rotor, des courants triphasés produisant le couple entraînant le moteur en rotation. Le couple produit est proportionnel au courant de phase, au champ magnétique dans l'entrefer entre le rotor et le stator et au rayon du rotor. **La commande en courant** permet d'imposer le couple à vitesse de rotation quelconque imposée par la charge dans la limite de la puissance nominale, **la commande en tension** permet d'imposer la vitesse de rotation à couple quelconque dans la limite de la puissance nominale. L'absence des frottements des balais permet d'atteindre des rendements plus élevés, proches des 80 %. Cependant, ces machines nécessitent un modulateur électronique pour convertir la tension continue provenant de la batterie en tension triphasée, ce qui augmente leur coût.

a. Convertisseur électromécanique ou machine électrique

On définit une machine électrique comme étant un dispositif de conversion « électrique → mécanique » ou « mécanique → électrique » [documents 4 et 5] :

- En fonctionnement moteur, la conversion est électrique → mécanique ;
- En fonctionnement générateur, la conversion est mécanique → électrique



4 Principe d'un convertisseur électromécanique.

5 Machine à courant continu 8,9 W.

b. Choisir une machine électrique

Pour choisir une machine électrique, il faut connaître les caractéristiques des énergies ntrantes et sortantes.

Pour l'énergie électrique :

- La nature de l'alimentation (continue, alternative monophasée, alternative triphasée…)
- Les caractéristiques des grandeurs tension et courant
- La puissance

Pour l'énergie mécanique :

- Le couple
- La fréquence de rotation ou de vitesse de déplacement
- La puissance

D'autres critères doivent néanmoins être pris en compte :

- L'environnement (définition de l'ip : indice qui détermine le degré de protection du matériel contre la pénétration des corps solides ; de l'ik : indice de protection qui détermine le degré de protection du matériel contre les chocs d'origine mécanique, de la classe de température, de l'altitude de fonctionnement, de la nature de l'atmosphère…)
- Le service de fonctionnement
- Les dimensions de la machine (hauteur d'axe…)
- La position de fonctionnement (verticale, horizontale)

Voici quelques exemples de convertisseurs électromécaniques :

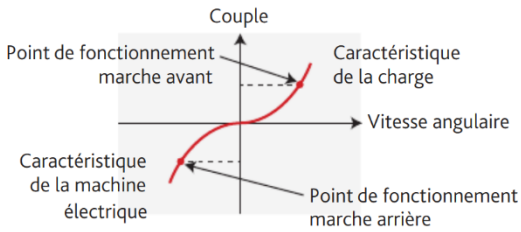
- Machine à courant continu (moteur ou dynamo)
- Machine asynchrone triphasée (moteur ou générateur)
- Machine synchrone triphasée (moteur ou alternateur)
- Machine spéciale (moteur asynchrone à deux vitesses, moteur pas à pas, moteur linéaire…).

Ressources

c. Point de fonctionnement

Dans un plan mécanique, le point de fonctionnement fixe la valeur du couple T pour une vitesse angulaire donnée Ω [document 6].

Dans tous les cas, c'est la charge qui impose le point de fonctionnement d'une machine électrique.



6 Point de fonctionnement de l'association machine électrique-charge mécanique.

d. Point nominal de fonctionnement

C'est le **point de fonctionnement** en régime permanent prévu par le constructeur du moteur.

e. Notion de charge

Pour une **machine électrique**, on appelle charge le dispositif mécanique qui impose le point de fonctionnement. Par exemple, pour une grue de levage, c'est la vitesse de déplacement qui impose la fréquence de rotation à la montée et la masse à déplacer qui impose le couple.

Pour **un générateur**, on appelle charge le dispositif électrique qui impose la caractéristique « tension-courant ».

Par exemple, pour une grue de levage, c'est la vitesse de déplacement qui impose la fréquence de rotation à la descente et la masse à déplacer qui impose le couple.

Lorsqu'il est nécessaire d'adapter les caractéristiques de la machine électrique à celles de la charge, on utilise un réducteur de vitesse-multiplicateur de couple (ou multiplicateur de vitesse-réducteur de couple).

II. Critères de choix électriques

a. La nature du réseau

- Alternatif monophasé, triphasé avec ou sans neutre, polyphasé.
- Continu.
- …

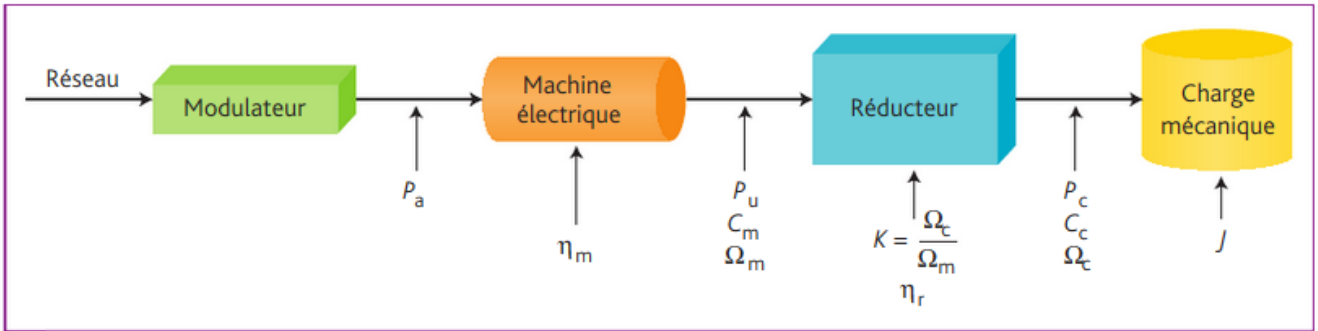
b. Les caractéristiques

- Tension.
- Fréquence.
- Puissance.
- …

III. Critères de choix mécaniques

Le choix d'un convertisseur électromécanique dépend essentiellement du type de charge (couple, vitesse, accélération, cycle de fonctionnement).

a. Chaîne d'énergie de transmission



7 Chaîne d'énergie de transmission.

Ressources

On doit, à l'aide des lois de la mécanique, déterminer les paramètres P_U, Ω_m et T_m.
Sur le document 7 :
P_a: puissance absorbée par la machine électrique (W ou kW).
η_m : rendement de la machine électrique ($\eta_m = P_u/P_a$).
P_u: puissance utile fournie par la machine électrique sur l'arbre (W ou kW) ($P_u = C_m \times \Omega_m$).
C_m: couple utile sur l'arbre de la machine électrique ou couple résistant opposé par la charge (N·m).
Ω_m : vitesse angulaire de rotation de la machine électrique (rad·s^{-1}).
K : rapport de réduction du réducteur ($K = \Omega_c/\Omega_m$).
η_r : rendement du réducteur ($\eta_r = P_c/P_u$).
P_c : puissance demandée par la charge (W ou kW).
Ω_c : vitesse angulaire de rotation de la charge (rad·s^{-1}).
C_c: couple résistant de la charge (N·m).
J : moment d'inertie de la charge (kg·m^{-2}).

b. Le moment d'inertie

L'inertie caractérise les masses en mouvement (paramètre dynamique). C'est par son inertie qu'un système s'oppose aux changements de vitesse que l'on veut lui imposer. La grandeur physique associée à l'inertie pour un mouvement de rotation est le moment d'inertie J en kg·m^{-2}.

c. Étude de la dynamique

L'étude dynamique est hors programme. Cependant, ce complément d'information permet de comprendre l'aspect des effets de la dynamique lors du choix d'une machine électrique.

Équation fondamentale :

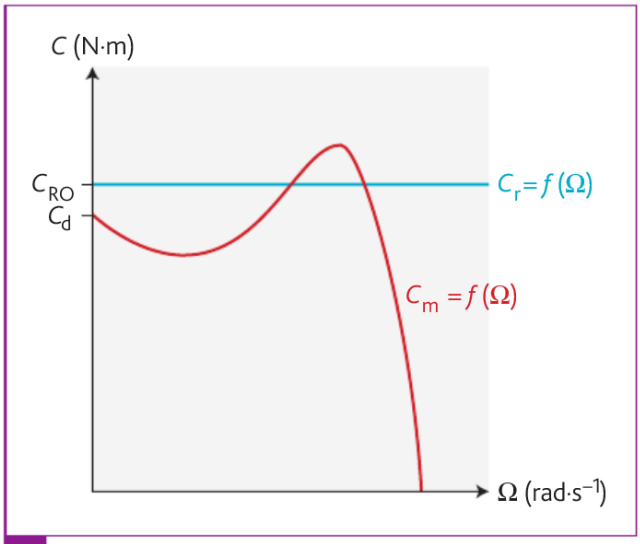
$$C_m = C_a + C_r \text{ et } C_a = J \times \frac{d\Omega}{dt}$$

C_m : couple fourni par la machine électrique (N·m)
C_a : couple accélérateur (N·m)
C_r : couple résistant opposé par la charge (N·m)
J : moment d'inertie (kg·m^{-2})

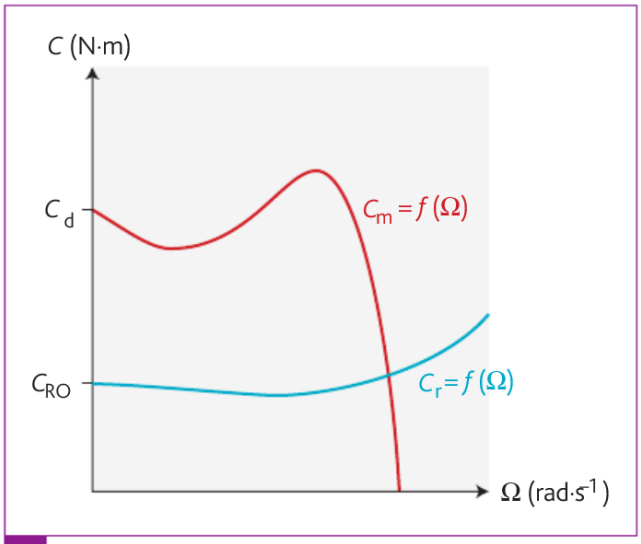
Conditions de démarrage : la machine ne peut démarrer que si le couple de démarrage de la machine est supérieur au couple résistant de la charge.

$$C_d > C_m \Rightarrow C_a = J\frac{d\Omega}{dt} \Leftrightarrow C_m - C_r = J\frac{d\Omega}{dt}$$

Exemples : l'accélération est d'autant plus importante lorsque le couple moteur Cm est grand devant le couple résistant Cr et que l'inertie J est faible [documents 8 et 9].



8 Le moteur ne démarre pas : $C_d < C_{RO}$.



9 Le moteur démarre : $C_d > C_{RO}$.

Ressources

d. Régime établi (point de fonctionnement)

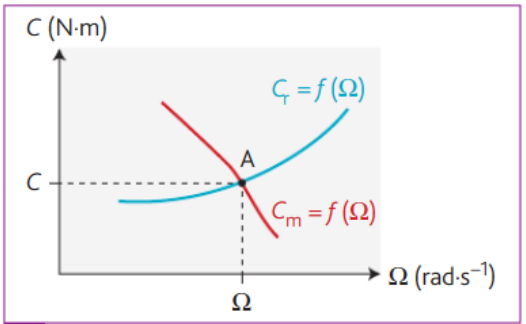
En régime établi, la vitesse est constante. Donc le couple d'accélération est nul.

$$\text{Si } \Omega = cte \Rightarrow \frac{d\Omega}{dt} = 0 \Rightarrow C_m = C_r$$

Fonctionnement stable de la machine

Le point de fonctionnement stable de la machine est le point où les couples moteur et résistant sont égaux [document 10].

Remarque : la machine est généralement choisie afin que le point de fonctionnement A soit le plus proche possible du fonctionnement en régime nominal.

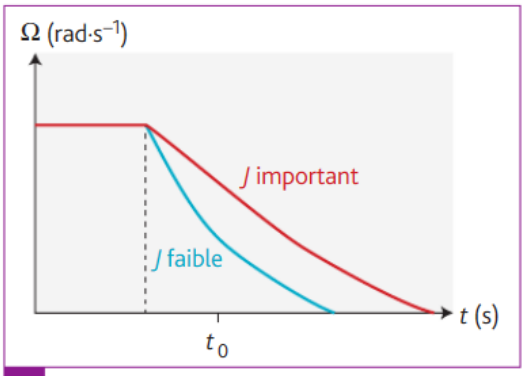


10 Point de fonctionnement stable.

Ralentissement de la machine électrique et de sa charge

Le ralentissement de l'ensemble machine électrique + charge est obtenu lorsque la valeur du couple fournie par la machine électrique devient inférieure à celle qu'impose la charge à une vitesse donnée. La charge devient alors « entraînante ». L'accélération angulaire est négative.

Le ralentissement du système est d'autant plus fort que le moment d'inertie J est faible et que la récupération d'énergie (ou sa dissipation par frottement) est grande. L'accélération angulaire est négative, donc il y a ralentissement de la machine [document 11].



11 Temps d'arrêt en fonction de l'inertie du moteur et de sa charge.

Freinage

Pour réaliser un freinage, on ajoute à l'instant t_0 un couple de freinage C_f.

Le couple de freinage peut être produit par :

- un élément mécanique ;
- un système électrique extérieur (frein à poudre, frein à courant de Foucault) ;
- la machine électrique elle-même ;
- une injection de courant continu ;
- un fonctionnement en génératrice.

En cas de coupure réseau, seul le frein mécanique assure l'immobilisation de la charge

IV. Quadrants de fonctionnement d'une machine électrique

Les divers fonctionnements sont caractérisés par :

- Une marche en moteur (quadrants 1 et 3), la machine électrique fournit une puissance mécanique ;
- Une marche en générateur (quadrants 2 et 4), la machine électrique absorbe une puissance mécanique.

L'analyse de fonctionnement peut se résumer par le tableau ci-dessous.

Sens de rotation	Vitesse	Couple	Puissance	Quadrant	Travail machine électrique	Charge
Sens 1	+	+	+	1	moteur	résistante
	+	–	–	2	générateur	entraînante
Sens 2	–	–	+	3	moteur	résistante
	–	+	–	4	générateur	entraînante

Ressources

FICHE 48 : *Détermination d'un composant de stockage de l'énergie*

Tous les systèmes nécessitent de l'énergie pour agir sur la matière d'œuvre et, dans une moindre mesure, pour alimenter la chaîne d'information. Alimenter un système par un réseau d'énergie distribuée (comme le réseau électrique EDF) est facile, mais rendre cette source d'énergie indépendante ou embarquée est plus complexe

I. Comment stocker l'énergie et la restituer au moment opportun ?

Pour choisir un composant de stockage d'énergie il faut connaître **l'énergie massique** qui est la quantité d'énergie stockée par unité de masse ($W \cdot h \cdot kg^{-1}$). Ces fourchettes de valeurs sont très larges car elles dépendent de la technologie de fabrication et sont en constante évolution et amélioration.

Dans le choix d'un constituant de stockage de l'énergie, les paramètres de choix sont **l'encombrement**, **la masse** et **l'énergie stockée**. Nous parlons alors de densité énergétique du constituant, densité massique ($W \cdot h \cdot kg^{-1}$) ou densité volumique ($W \cdot h \cdot m^{-3}$). Le tableau ci-dessous propose une comparaison de différents réservoirs d'énergie et de leurs densités énergétiques.

Forme d'énergie	Support de stockage	Énergie massique ($W \cdot h \cdot kg^{-1}$)	Observation
Mécanique	Élastique tendu	50	Utilisation directe de l'énergie mécanique, besoin sous forme électrique d'un convertisseur électromécanique.
	Ressort	0,2	
	Volant d'inertie	1	
Pneumatique	Cartouche de gaz CO_2	500	Conversion sous forme mécanique par un moteur pneumatique très simple.
	Air comprimé	10	
Chimique renouvelable	Hydrogène	500	Performant dû à sa forme de stockage comme hydrure métallique.
Fossile	Essence	10 000	Moteurs complexes et coûteux, avec un rendement médiocre de 30 à 60 %.
Chimique irréversible	Pile saline	100 à 120	Non rechargeable et peu écologique au recyclage.
	Pile alcaline	150 à 180	
Chimique réversible	Batterie au plomb	20 à 45	Stable mais peu écologique au recyclage.
	Accumulateur Ni-Cd	40 à 50	Stable, charge rapide possible, densité énergétique élevée.
	Accumulateur Ni-Mh	50 à 70	
	Accumulateur Li-Ions	100-150	
	Accumulateur Li-Po		
	Condensateur électrolytique (dépend de la capacité)		Faible capacité de charge. La tension décroît rapidement, mais cycle de charge/décharge très fréquent. Forte puissance massique.
	Condensateur double couche	0,3	
	Supercondensateur	5	

Ressources

II. Les différents types d'accumulateurs (comparaison masse, encombrement, autonomie)

Exemple 1 : pour un véhicule électrique de caractéristiques 72 V / 20 A·h / 1 440 W·h, on compare la masse, l'encombrement et le taux de charge/décharge.

Type	Taille et volume (cm^3)	Masse (kg)	Taux de charge maximal	Taux de décharge maximal
Li-Po / 20 A·h	(0,8 × 20,3 × 10) 3 000	7,5	20 A	60 A
Li-Po / 20 A·h	(1 × 22 × 10) 3 960	9	50 A	360 A
Li-Fe / 20 A·h	(0,8 × 22,8 × 16) 6 600	11	20 A	60 A
Supercondensateur 58F / 75 V / 45 W·h	(Ø4 × 7,6) 3 650	3,7	20 A	20-200 A
Supercondensateur 1 600 F / 75 V / 1 250 W·h	(Ø6 × 8,5) 9 100	10,5	60 A	60-1 240 A
Supercondensateur 50 F / 75 V / 39 W·h	(Ø1,8 × 4) 400	0,6	14 A	14-70 A

Les supercondensateurs peuvent supporter de très grands courants de décharge et de charge, mais leur énergie massique reste faible et leur prix encore important par rapport aux accumulateurs. Cependant, ils acceptent un grand nombre de cycles de charges et de décharges, jusqu'à 1 000 fois plus qu'un accumulateur Li-Po et ils offrent une forte puissance massique.

Exemple 2 : comparaison avantages/inconvénients pour l'équipement d'un vélo électrique ou d'un téléphone portable.

Type	Avantages	Inconvénients
Batterie au plomb	Robuste. Prix abordable. Durée de vie de l'ordre de 300 à 400 cycles.	Capacité plus faible que les accumulateurs Ni-Cd. Pas de charges rapides. À conserver toujours chargée.
Accumulateur Ni-Cd	Charge rapide. Prix raisonnable. Durée de vie importante de 500 cycles.	Technologie ancienne. À conserver toujours déchargé.
Accumulateur Ni-Mh	Capacité plus élevée que le Ni-Cd. Durée de vie importante de 400 à 500 cycles.	Technologie ancienne. À conserver toujours chargé.
Accumulateur Li-Ions	Capacité de charge plus élevée que les accumulateurs Ni. Durée de vie très importante (1 500 cycles pour les meilleurs). Seulement 15 % de décharge par an (sans utilisation).	Circuit de protection pour protéger la charge. À conserver entre 45 % et 60 % de la charge. Prix élevé mais souvent gage de qualité.
Accumulateur Li-Po	Plus sûr à la surcharge. Faible poids. Forme de la batterie plus libre.	Plus coûteux et protocole de charge complexe.

Ressources