

## Séquence 1

**Analyser et décrire les besoins, les systèmes industriels et leur impact****Objectif de la séquence**

L'objectif de ce cours est de comprendre ce qu'est un besoin et ce qu'est un système. On se donnera des outils pertinents pour décrire les exigences que doit vérifier un système ainsi que pour analyser sa structure. On donnera un aperçu de ce qu'est une démarche de conception adaptée aux systèmes multiphysiques auxquels vous serez confrontés en tant qu'ingénieurs.

**Table des matières**

Page

<b>1</b>	<b>Besoin, système et démarche de conception</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Structure des systèmes</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Architecture fonctionnelle des systèmes</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>Analyse du cycle de vie – Impact environnemental d'un système</b>	<b>15</b>

**Objet d'étude**      *Respirateur médical Puritan Bennett 980*

Un respirateur médical est un système permettant d'assister la respiration d'un patient voire de remplacer le patient dans cette fonction lorsque celui-ci en est incapable. Il en existe de nombreux modèles et ils ne remplissent pas tous exactement les mêmes fonctions.

- Comment décrire précisément le rôle que remplit un respirateur ?
- Comment préciser les caractéristiques qu'il doit avoir pour remplir sa fonction ?
- Comment peut-on concevoir efficacement un tel système ?
- Comment décrire la structure du respirateur ?
- Quelles structures matérielles permettent au respirateur de remplir sa fonction ?
- Quels impacts environnementaux et climatiques a ce respirateur ?

**1 Besoin, système et démarche de conception****1.1 Un système pour répondre à un besoin****À savoir**

On appelle **système** un « ensemble d'éléments en **interaction** entre eux et avec l'environnement, intégrés pour rendre à son environnement les services correspondant à sa finalité. Un système est bien plus qu'un ensemble de composants : les flux d'information, d'énergie ou de matière échangés entre les composants sont essentiels dans le comportement global ».

source : Association Française d'Ingénierie Systèmes

Les différents éléments du respirateur ne remplissent évidemment pas les mêmes fonctions que le respirateur assemblé. De la même façon, C3PO est mis en pièces dans *L'empire contre-attaque* et ne peut plus agir en tant que droïde de protocole... (cf. figure 1)

L'existence d'un système commence par la définition du besoin auquel il répond, de la fonction de service qu'il remplit.



FIGURE 1 – C3PO démonté n'est plus un droïde de protocole

### À savoir

Le **besoin** est défini comme étant une « nécessité ou désir éprouvé par l'utilisateur potentiel. Il peut être exprimé ou implicite. Le besoin implicite recouvre le besoin non-exprimé actuel ou futur. »

source : Norme NF X 50-151

Les premiers respirateurs datent du début du XX<sup>e</sup> siècle, lorsque les médecins voulurent assister la respiration de patients dont les poumons étaient défaillants. Aujourd'hui, il existe des respirateurs différents en fonction du besoin précis auquel ils répondent : assister un patient avec des difficultés respiratoires, maintenir la fonction respiratoire d'un patient pendant son transport, assurer le maintien en vie d'un patient en réanimation tout en l'accompagnant dans sa guérison...

Décrire le comportement que doit avoir le système à concevoir pour satisfaire le besoin identifié consiste à définir les **cas d'utilisation** (ou fonctions de service) qu'il doit remplir. Il s'agit d'expliciter ce que le système doit faire et non comment il doit le faire. Un outil adapté est le **diagramme des cas d'utilisation**, dans lequel on représente la **frontière du système** (rectangle) qui contient les cas d'utilisation (verbe à l'infinitif suivi d'un complément, dans un ovale). Chacun d'entre eux est relié à l'**acteur principal** (bonhomme, petit rectangle ou cube) situé à l'extérieur du système à gauche. Si un acteur secondaire était nécessaire, il apparaîtrait à droite du système et serait également relié au cas d'utilisation. Les acteurs sont à l'extérieur du système et font donc partie de son **environnement**.

### À savoir

Un **diagramme des cas d'utilisation** (*use case diagram* en anglais) représente ce que **doit faire** le système sans s'intéresser au comment. On y fait apparaître :

- la **frontière** du système
- les **acteurs** principaux et secondaires constituant l'**environnement**
- les **cas d'utilisation** (aussi appelés **fonctions globales**)

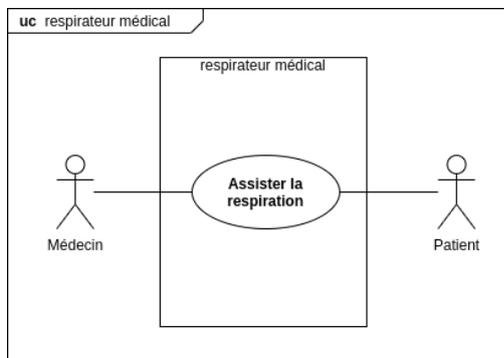


FIGURE 2 – Diagramme des cas d'utilisation succinct d'un respirateur médical.

Ce premier diagramme des cas d'utilisation (cf. figure 2), très succinct, montre que le système décrit a pour rôle de permettre à un médecin (acteur principal) d'assister la respiration (cas d'utilisation) d'un patient (acteur secondaire). S'agissant d'une description fonctionnelle du système, elle ne précise pas la façon de réaliser cette fonction.

Il est possible de mieux préciser les fonctions du système comme dans le diagramme figure 3. On y lit qu'il existe différents acteurs principaux possibles, qui sont des cas particuliers les uns des autres (  $\rightarrow$  ). Le *réanimateur* est un cas particulier de *médecin* qui est un cas particulier de *personnel médical*. Le *médecin*, et donc aussi le *réanimateur*, peuvent déclencher le cas d'utilisation *assister la respiration*. Ce n'est pas le cas d'un infirmier, personnel médical mais non médecin. Il peut cependant *régler les paramètres* de la respiration comme le *médecin* et en particulier le *réanimateur*.

Le sevrage est la phase pendant laquelle un patient dépendant d'un respirateur est petit à petit rendu autonome. Il s'agit d'une phase délicate du traitement. De ce fait, la fonction *assister la respiration pendant le sevrage*, qui est un cas particulier de la fonction *assister la respiration* (  $\rightarrow$  ) ne peut être déclenchée que par le *réanimateur*.

La fonction *assister la respiration*, que ce soit sous sa forme générale ou particulière (*pendant le sevrage*) nécessite de pouvoir *régler les paramètres* de la respiration (  $\_ \text{« include » } \_$  ). La fonction *obtenir un mélange air-O<sub>2</sub>* est une extension (  $\_ \text{« extend » } \_$  ) possible de la fonction principale *assister la respiration* ou de sa particularisation *assister la respiration pendant le sevrage*. Pour *obtenir un mélange air-O<sub>2</sub>*, il faut que le système soit en présence d'une *source d'oxygène*.

### Remarque

Il faut savoir lire, interpréter et compléter les diagrammes d'état mais non les écrire.

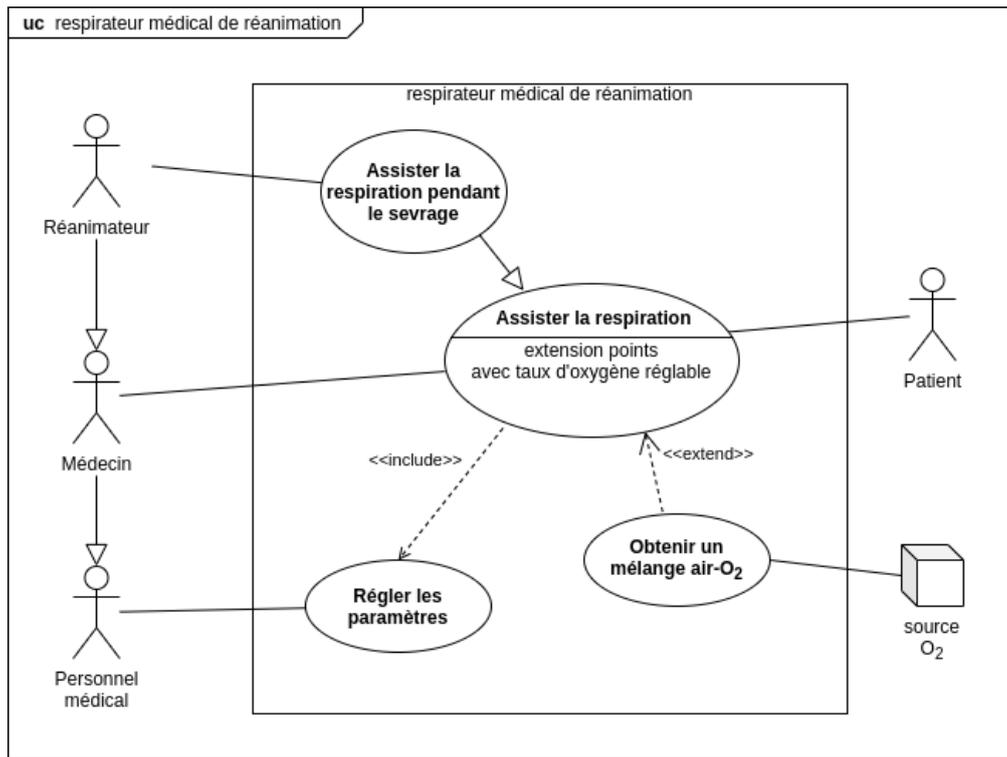


FIGURE 3 – Diagramme des cas d'utilisation plus détaillé d'un respirateur médical de réanimation.



### Pour aller plus loin

Le diagramme des cas d'utilisations est l'un des diagrammes d'un langage, appelé SysML (acronyme de *System Modeling Language*), dont l'objectif est de décrire le comportement, la structure et les exigences des systèmes. SysML est une évolution de l'UML (*Unified Modeling Language*), langage destiné à la représentation de programmes informatiques (dépendance entre les classes, appels entre les fonctions etc.)

## 1.2 Diagramme des exigences et cahier de charges

La description des cas d'utilisation est complétée par le détail des exigences auxquelles doit répondre le système pour remplir sa fonction.



### À savoir

Le **diagramme des exigences** (*requirement diagram*) décrit de façon structurée les exigences d'un système.

Les exigences doivent être quantifiées pour pouvoir être vérifiées et déterminer donc si un système est ou non conforme aux exigences. Par exemple, l'exigence 4.4 précise que la pression de gaz déclenchant la sécurité de surpression doit être de 45 cmH<sub>2</sub>O. Mais avec quelle précision? L'exigence 1.3 impose que le volume de gaz inspiré par le patient doit être réglable entre 350 et 450 mL. Mais avec quelle précision doit se faire ce réglage?



### À savoir

Le **cahier des charges** est un document contractuel qui énumère les exigences et y associe :

- un **critère** : grandeur physique mesurable et quantifiable
- un **niveau** : valeur que doit prendre le **critère**
- une **flexibilité** : tolérance d'erreur acceptée entre la valeur mesurée du **critère** d'exigence et le **niveau** souhaité.

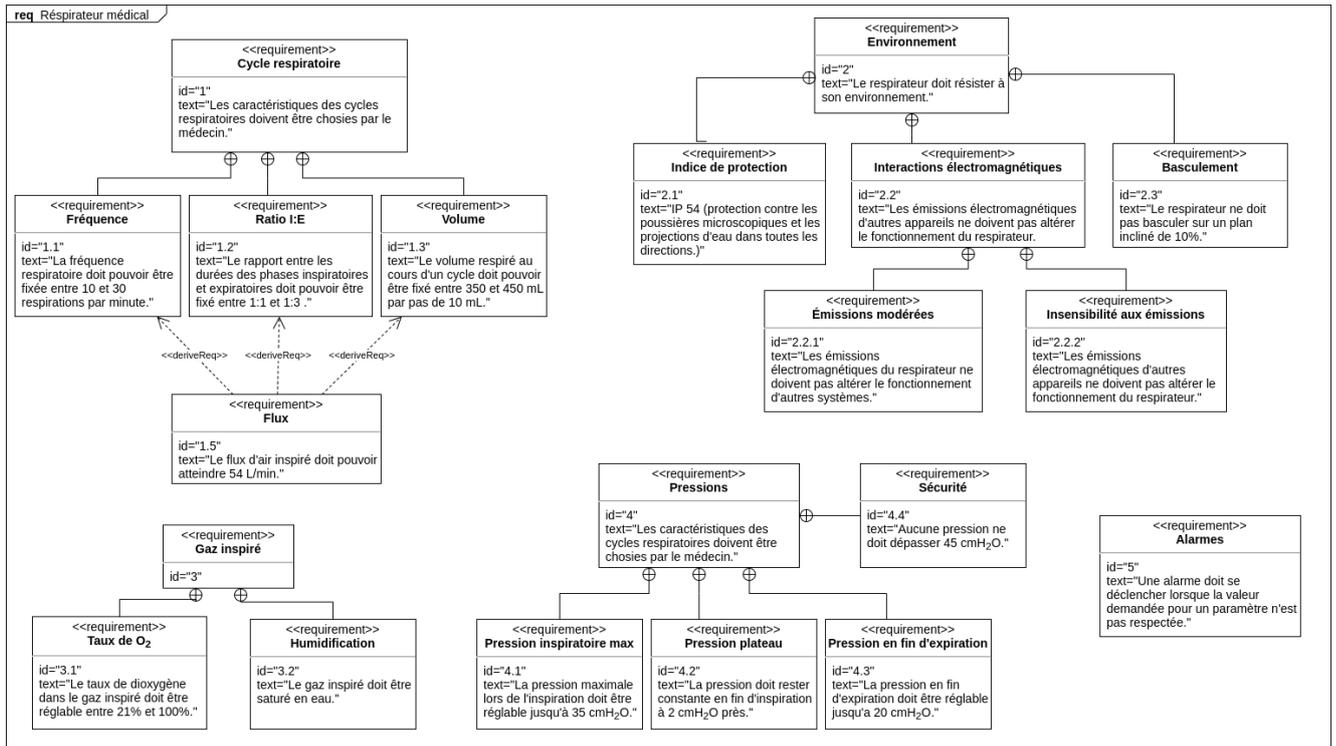


FIGURE 4 – Diagramme des exigences du respirateur médical.

Id	Exigence	Critère	Niveau	Flexibilité
1.3	Volume	Volume inspiré par cycle	réglable entre 350 et 450 mL par pas de 10 mL	± 30 mL
3.2	Humidification	Humidité relative du gaz inspiré	100 %	> 95 %
5	Alarmes	Niveau sonore	65 dB	± 5 dB
...	...	...	...	...

FIGURE 5 – Extrait du cahier des charges du respirateur.

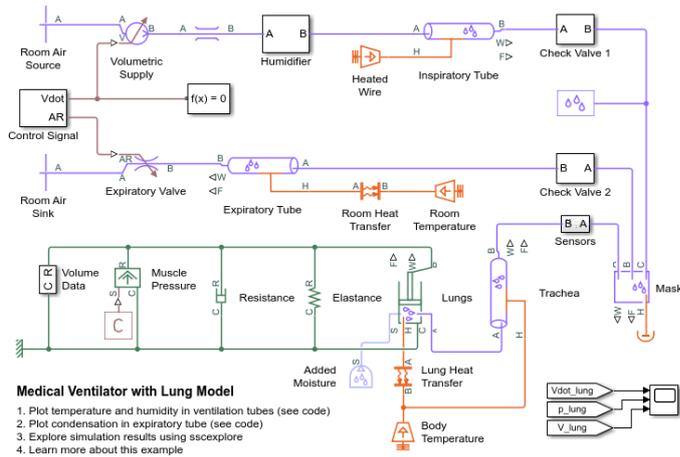
### 1.3 Du besoin au système... en passant par le modèle

Pour s'assurer que le système conçu répond au cahier des charges, il est utile de prévoir ses performances avant de le réaliser. Pour ce faire, on se donne un **modèle**.

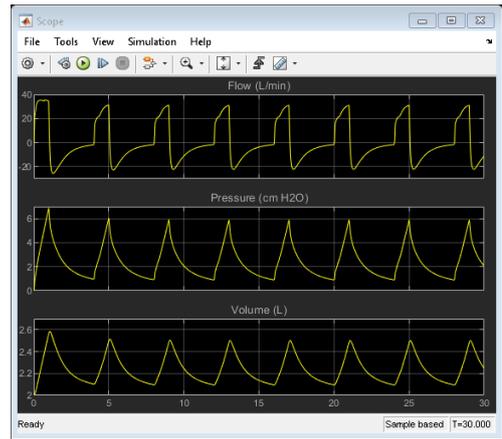
**À savoir**

- Un **modèle** (ou **système virtuel**) est une représentation abstraite idéalisée du système dont le comportement peut être traduit mathématiquement.
- Un modèle n'a de sens que dans un **contexte donné**.
- Un modèle doit être aussi **simple** que possible tout en permettant d'obtenir des résultats utiles.

Afin de prévoir le comportement pneumatique du respirateur, on peut se donner un modèle numérique qui traduit le comportement des différents composants du respirateur par des équations (cf. figure 6a). Ce modèle, pertinent pour simuler le comportement pneumatique du respirateur (cf. figure 6b) et obtenir une prévision des résultats expérimentaux et donc de discuter de la validation ou non des exigences 1.1 à 1.5 et 4.1 à 4.4, ne permettra pas de prédire le comportement de celui-ci face à des perturbations électromagnétiques comme l'impose l'exigence 2.2.2.

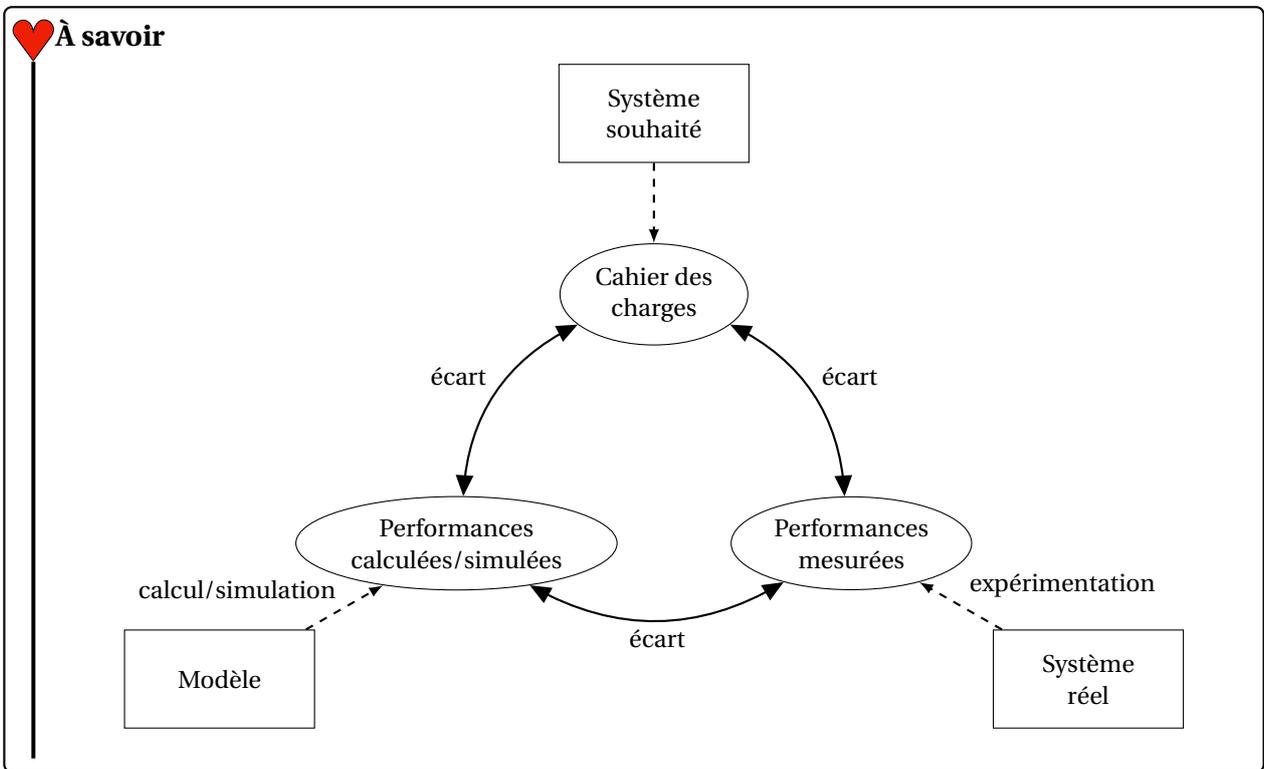


(a) Modèle pneumatique numérique.



(b) Résultats obtenus par simulation du modèle.

FIGURE 6 – Modèle pneumatique numérique d'un respirateur et résultats de simulation (source : Steve Miller (2021). Medical Ventilator Model in Simscape).



**Attention !**

Il ne faut pas confondre le système réel, le modèle et le système souhaité.

- Le système **souhaité** est l'**objectif** : il est concrétisé par le cahier des charges.
- Le système **réel** (parfois dit matériel) est le système réalisé qui peut être utilisé par le client : ses performances se mesurent.
- Le **modèle** (parfois dit **système virtuel**) n'a d'intérêt que pour l'ingénieur/chercheur : ses performances se calculent ou se simulent. Leur capacité à prédire les performances réelles dépendra de la pertinence et de la qualité du modèle, de sa résolution etc.

On ne doit donc pas confondre les performances mesurées, les performances souhaitées et les performances prédites par calcul ou simulation.



### Pour aller plus loin

Dans une démarche de conception classique, on se donne un modèle du système qu'on veut réaliser. Si l'écart entre les performances calculées/simulées et les performances souhaitées est faible, on peut considérer que le système conçu devrait répondre au cahier des charges. On peut alors le **réaliser** afin d'obtenir un **système réel** dont on mesurera les performances. L'écart entre les performances mesurées et souhaitées doit être faible pour que le système réalisé réponde au cahier des charges et que le client soit satisfait.

Bien que la démarche passe systématiquement aujourd'hui par une étape de modélisation et de simulation, les résultats de simulation n'ont aucune valeur pour le client qui attend que le système réponde à ses besoins. Il y a donc deux étapes plus ou moins indépendantes dans la démarche de l'ingénieur : concevoir un modèle du système répondant au cahier des charges et réaliser un système se comportant comme le modèle. L'écart entre les performances souhaitées et réelles sera donc d'autant plus important que ces deux écarts le seront. En MPSI et PCSI, on se contentera de travailler sur la première étape : la conception d'un modèle répondant au cahier des charges. La réalisation est hors programme.

## 2 Structure des systèmes

Le langage SysML fournit plusieurs outils pour bien décrire la structure des systèmes ainsi que les interactions entre elles.

### 2.1 Les composants d'un système

Appréhender la structure du respirateur médical à partir de vues 3D comme celles de la figure 7 peut être difficile. Afin de s'affranchir des détails qui peuvent surcharger la représentation, on peut établir un **diagramme de définition de blocs**.

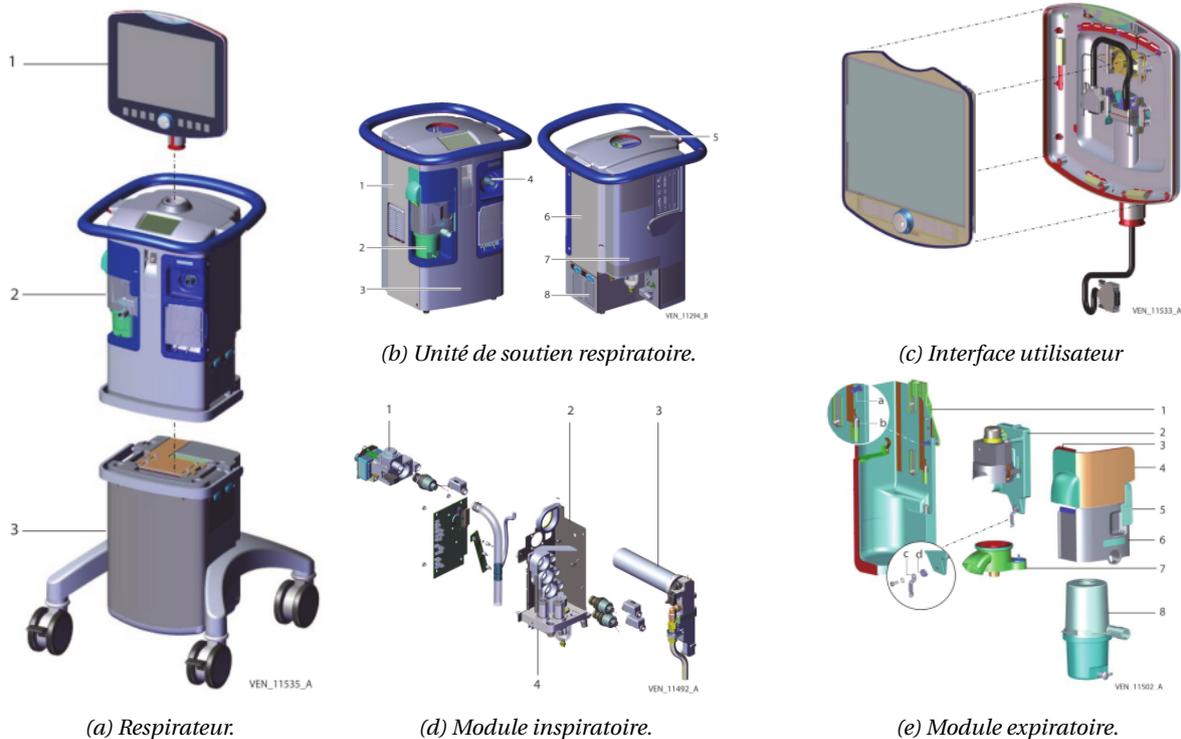


FIGURE 7 – Description structurelle du respirateur par vues 3D (source : Manuel d'utilisation Puritan Bennett 980).

#### ♥ À savoir

Le **diagramme de définition de blocs** (ou **bdd** pour **block definition diagram**) est un diagramme représentant la **structure** d'un système en ignorant les interactions entre les parties. On y fait apparaître :

- le système
- un bloc par élément majeur le composant, relié au système par un trait  $\text{---}\blacklozenge$  traduisant la composition.
- à son tour, chaque élément peut être vu comme un nouveau système et décomposé en sous-systèmes

Le respirateur est composé de :

- une *interface utilisateur*
- une *unité de soutien respiratoire*
- une *base*
- un *module batterie*

À son tour, la *base* est composée de

- un *support*
- **quatre roues**, comme indiqué sur le lien de contenance entre la roue et la base.

Le *module inspiratoire* comporte trois *électrovalves à solénoïde* : une dans l'*ensemble de sortie* et deux dans l'*ensemble de mixage*. Comme il n'y a qu'un *module inspiratoire* dans le *respirateur*, il y a trois *électrovalves à solénoïde* dans le respirateur.

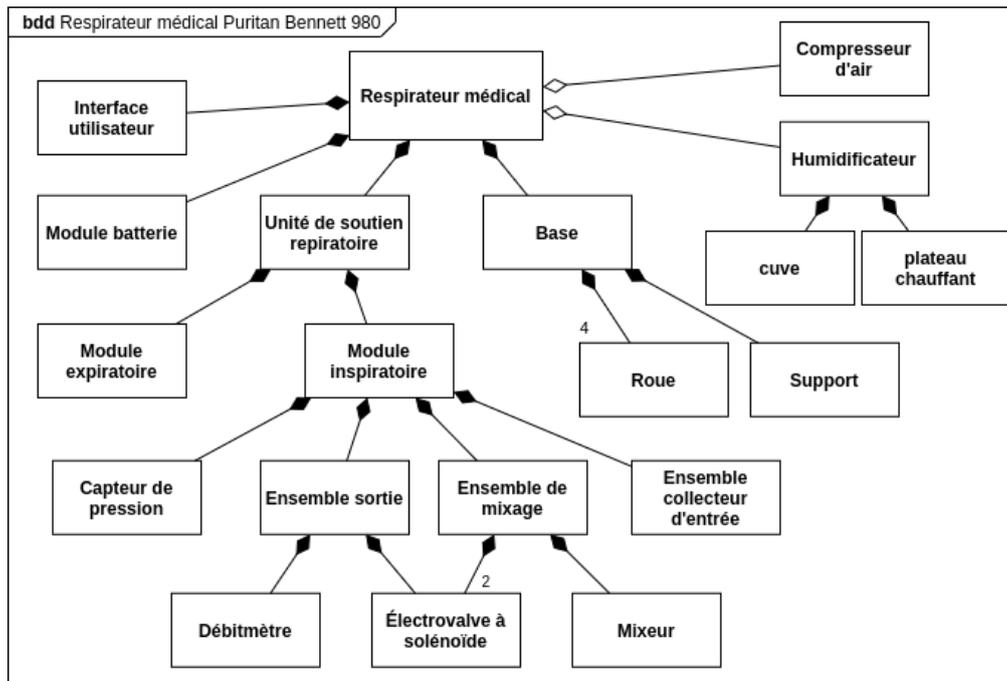


FIGURE 8 – Diagramme de définition de blocs du respirateur médical.

### ★ Quelques précisions supplémentaires

Chaque bloc représente un type d'élément et non l'élément en lui-même (on dit qu'il représente une classe et non une instance). On n'écrit donc qu'**une seule fois chaque bloc** (normalement au singulier) et on ajoute les contenances et les multiplicités nécessaires.



### Pour aller plus loin

Il est également possible de représenter des liens plus complexes comme

- l'agrégation (représentée par  $\text{---}\diamond$ ) une composition particulière où le contenu n'est pas forcément toujours présent dans le système. Par exemple ici, un humidificateur peut être en agrégation avec le respirateur.
- Chaque bloc peut contenir des informations concernant le système ou le composant concerné, notamment les **values**, des caractéristiques ou valeurs courantes du système.
- D'autres informations peuvent également être indiquées sur le diagramme de définition de blocs dans des « post-it », par exemple des explications (**rationale**) ou des problèmes potentiels (**problem**).

## 2.2 Les interactions entre le système et l'extérieur : le diagramme de contexte

### À savoir

Le diagramme de contexte décrit les interactions entre le système et les acteurs et éléments de son environnement. Il a une syntaxe assez libre.

- Au centre, se place le système
- Autour se situent les éléments avec lesquels il interagit (ceux qui apparaissent sur le diagramme des cas d'utilisation au moins)
- Les liens peuvent être plus ou moins détaillés.

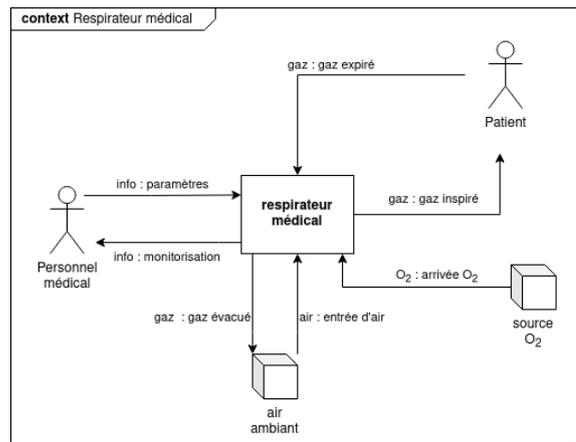


FIGURE 9 – Diagramme de contexte du respirateur médical.

Dans le diagramme de contexte du respirateur (cf figure 9) on a fait apparaître les acteurs du diagramme des cas d'utilisation et l'air ambiant. On y a précisé la nature des grandeurs échangées comme dans un diagramme de blocs interne (décrit ci-après).

## 2.3 Les interactions au sein du système : le diagramme de blocs interne

### À savoir

Le **diagramme de blocs interne** (ou **ibd** pour *internal block diagram*) est un diagramme représentant la **structure** d'un système et les **interactions** entre les parties. On y fait apparaître :

- le système comme une grande boîte contenant ses composants
- les différents composants représentés dans le sous-système le contenant directement (comme une boîte gigogne)
- des liens entre les éléments qui peuvent traduire
  - \* des flux de matière
  - \* des flux d'énergie
  - \* des flux d'informations

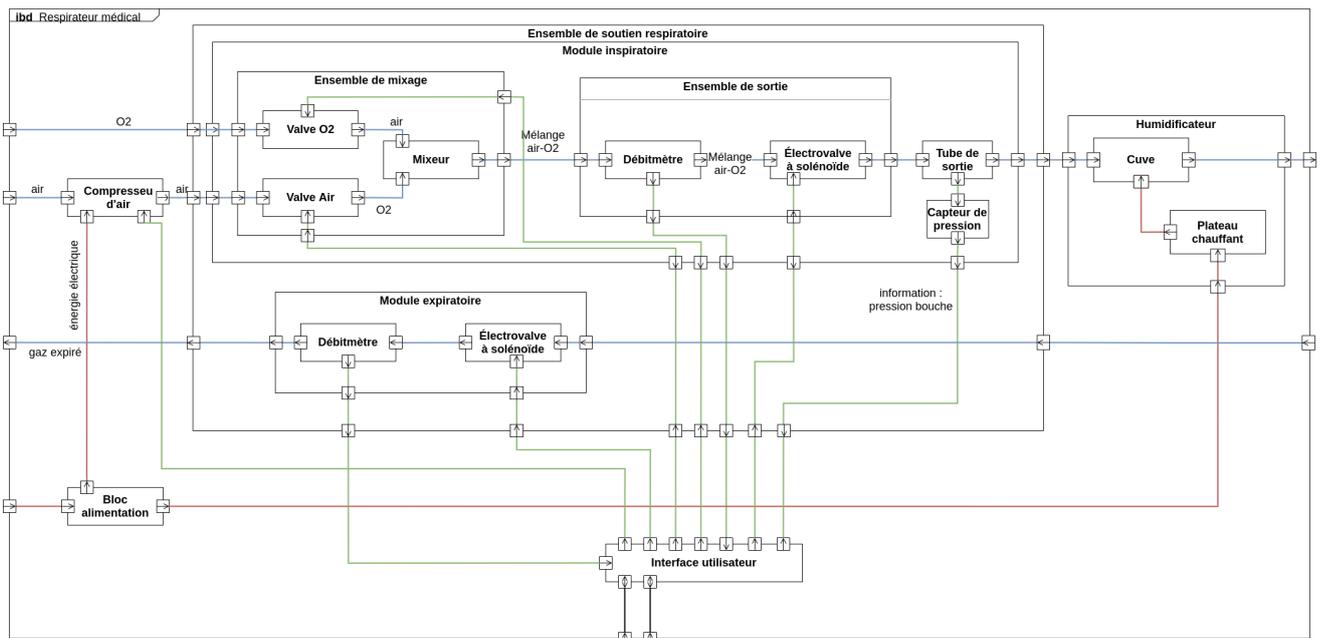


FIGURE 10 – Diagramme de blocs interne du respirateur médical.

 **Remarque**

Le **diagramme de blocs interne** reprend les éléments du diagramme de **définition de blocs** même si la représentation graphique est différente. Le **diagramme de blocs interne** contient une information supplémentaire qui est la nature des échanges entre les composants.

 **Quelques précisions supplémentaires**

- Les flux de matière, énergie ou informations peuvent être unidirectionnels ou bidirectionnels
- Il existe aussi d'autres interactions entre les composants qui traduisent un échange d'information sans flux (état d'un bouton marche/arrêt, réglage d'un paramètre)

 **Pour aller plus loin**

- Pour véhiculer de l'information, il faut un support matériel et de l'énergie, en très petites quantités. Cependant, dans certains cas et notamment lorsque les flux d'énergie sont de faible puissance, la frontière entre l'information et l'énergie est floue.
  - \* Dans une direction assistée, on agit sur la position des roues. La puissance à développer est donc celle nécessaire pour faire tourner les roues. La position du volant et donc des roues, ainsi que l'effort exercé sur le volant, sont des informations servant à piloter le système. Cette information, de nature mécanique, est véhiculée par une puissance qui est de l'ordre de grandeur de celle que produit le système.
- Un flux de matière peut cacher un flux d'énergie (dans l'humidificateur, le flux d'air chaud et humide sortant contient l'eau du flux entrant mais aussi l'énergie entrante sous forme de chaleur)
- Lorsque l'information véhicule une quantité négligeable d'énergie par rapport aux flux d'énergie du diagramme, il est impossible qu'un système ne stockant pas de l'énergie ait un flux d'énergie entrant et non sortant (ou à l'envers). Cela impliquerait que l'énergie disparaisse (ou se crée), ce qui violerait le principe de conservation de l'énergie.
- Les ports peuvent être ajoutés aux blocs du diagramme de définition de blocs comme étape intermédiaire lors de la création d'un diagramme de blocs interne. Dans ce cas, ils ne sont pas connectés entre eux et traduisent uniquement la possibilité d'un composant (ou d'un sous-système) d'établir un échange d'information ou un flux avec un autre composant.

### 3 Architecture fonctionnelle des systèmes

La gestion comportementale d'un système nécessite la présence d'une architecture fonctionnelle pertinente et d'une gestion logicielle adaptée.

#### 3.1 Comportements séquentiels

Le respirateur doit permettre au médecin de choisir le mode respiratoire qu'il souhaite, qui ne doit être disponible que si le matériel adapté est installé et si l'état du patient l'autorise. Au sein d'un mode ventilatoire donné, le comportement attendu du respirateur dépend de la phase du cycle respiratoire dans laquelle se trouve le patient (inspiration, pause en fin d'inspiration, expiration, attente d'un nouveau cycle).

La gestion de ces différents **états** de fonctionnement du système relève du **comportement séquentiel** : l'état dans lequel se situe le système dépend de l'histoire des actions que subit le système (appui sur les boutons, évolutions des grandeurs mesurées).

#### 3.2 Chaînes fonctionnelles : de la consigne à l'action – Information et puissance

Au sein d'un état de fonctionnement donné, le système doit s'assurer qu'une certaine grandeur a la valeur souhaitée par l'utilisateur. Par exemple,

- en phase d'inspiration, la pression au niveau de la bouche du patient doit augmenter graduellement jusqu'à atteindre la valeur souhaitée;
- en phase de fin d'inspiration, le respirateur doit assurer que la pression soit constante, et ce malgré les efforts musculaires que peut faire le patient.

Pour remplir cette fonction de suivi et de régulation de la pression, il faut que le respirateur soit équipé d'une **chaîne fonctionnelle** particulière permettant de connaître la pression réelle et d'agir sur celle-ci.



#### À savoir

Une **chaîne fonctionnelle** est un ensemble de composants reliés les uns aux autres permettant au système de remplir une **fonction de service**. Elle permet au système d'agir sur la **matière d'œuvre**. Elle se décompose en

- une **chaîne d'information**, dans laquelle sont échangées des **informations** en vue de piloter la chaîne d'action
- une **chaîne d'action**, dans laquelle sont échangés des flux d' **énergie** (donc de la **puissance**) et qui agit effectivement sur la matière d'œuvre.

La **chaîne d'information** comporte les composants remplissant les fonctions :

**acquérir** les informations de consigne, mesurer l'état du système...

- **capteurs, interfaces** homme-machine

**traiter** l'information acquise pour en générer une **commande**

- par ex : carte de commande

**communiquer** la commande à la chaîne de puissance et les informations utiles à l'utilisateur

- par ex : réseau Bluetooth, télécommunication à infrarouges, ondes radio

La **chaîne d'action** comporte les composants remplissant les fonctions :

**alimenter** la chaîne en énergie

- par ex : bloc d'alimentation électrique, réservoir d'air comprimé

**moduler** la puissance disponible en fonction de la commande envoyée par la chaîne d'information

- **préactionneurs**, par ex : hacheurs, électrovannes, distributeurs pneumatiques

**convertir** l'énergie disponible en une forme utile

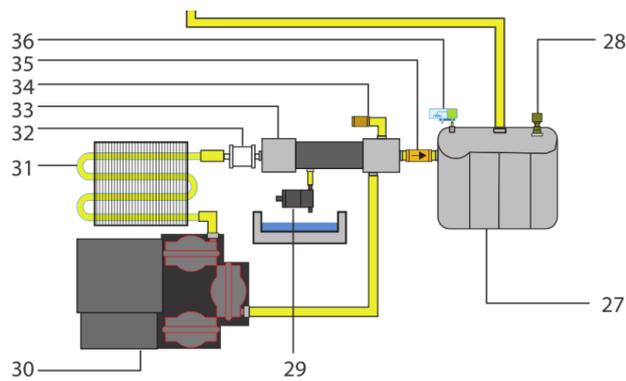
- **actionneurs**, par ex : moteurs, pompes, résistance

**transmettre** l'énergie jusqu'à l'effecteur

- par ex : réducteurs à engrenages, tuyauterie

**agir** sur la matière d'œuvre

- **effecteur**, par ex : pinces, radiateur



27	accumulateur
28	soupape de sécurité
29	électro-valve à solénoïde (décharge)
30	moteur et pompe
31	échangeur thermique
32	filtre
33	sécheur
34	admission d'air silencieuse
35	clapet anti-retour
36	capteur de pression

FIGURE 11 – Schéma pneumatique du compresseur d'air du respirateur.

Lorsque le respirateur n'est pas relié à une prise d'air sous pression, on se sert du compresseur d'air fourni en option, comme décrit dans le diagramme de blocs interne figure 10. Le schéma pneumatique du compresseur décrit son fonctionnement (cf. figure 11).

La matière d'œuvre, l'air contenu dans l'accumulateur, doit être maintenu à la pression voulue. Pour ce faire, la chaîne d'action comporte un moteur, qui va convertir l'énergie électrique fournie par un bloc d'alimentation électrique et modulée par un contacteur (tous deux non représentés sur la figure 11, car il s'agit d'un schéma pneumatique) en énergie mécanique, qui est à son tour transformée en énergie pneumatique (débit d'air sous pression) par la pompe qui y est associée. La tuyauterie, comportant un sécheur, un filtre et un échangeur transmet la puissance pneumatique à l'accumulateur via le clapet anti-retour.

Afin de déclencher le moteur lorsqu'il est nécessaire, c'est-à-dire, lorsque la pression dans l'accumulateur décroît, la chaîne d'information est composée d'un capteur de pression et d'une carte de commande. La communication entre la carte de commande et le contacteur est directe.

La fonction de service du compresseur *fournir de l'air sous pression au respirateur* est remplie par le système grâce à cette chaîne fonctionnelle qui permet de connaître la pression dans l'accumulateur et de déclencher la compression de l'air ambiant pour l'injecter dans l'accumulateur.

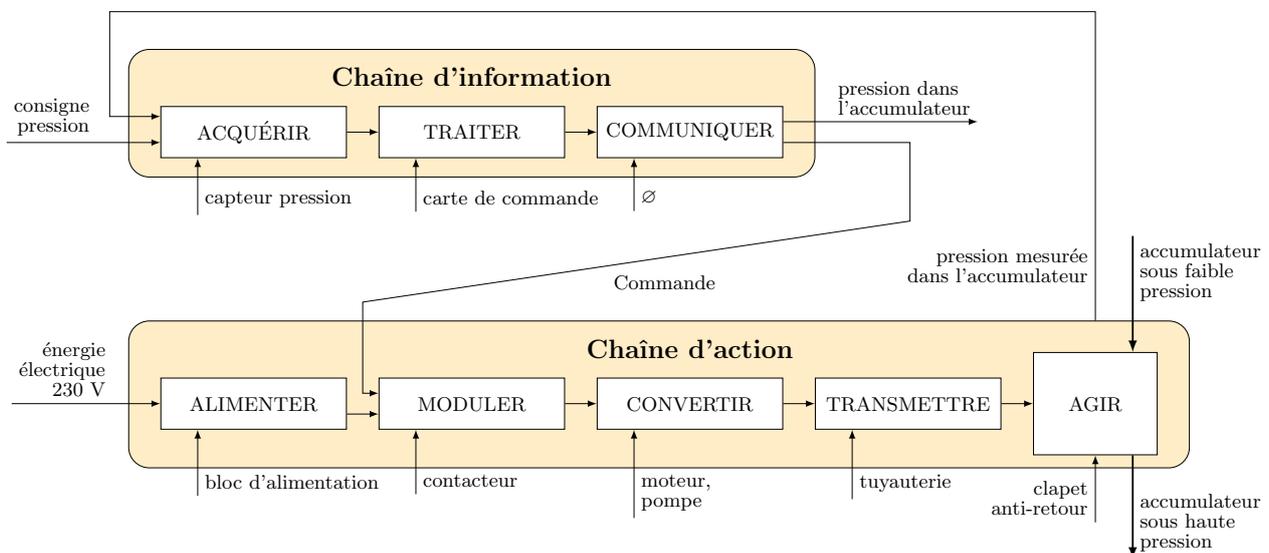


FIGURE 12 – Chaîne fonctionnelle de mise et maintien sous pression de l'accumulateur du compresseur d'air.

### ★ Quelques précisions supplémentaires

La structure de la chaîne fonctionnelle est essentiellement toujours la même, bien qu'il puisse y avoir quelques variations. Il se peut qu'il y ait plusieurs transformations de l'énergie avant d'arriver à l'effecteur, que la source d'énergie soit directement celle qui est utilisée par l'effecteur, que l'actionneur soit directement l'effecteur ou que la transmission soit directe.

On a cependant toujours une chaîne d'information qui pilote une chaîne d'action par l'intermédiaire d'un composant qui *module* l'énergie disponible afin de ne délivrer que la puissance nécessaire à la réalisation de la fonction de service.

**À savoir**

Lorsque la chaîne d'information contient un **capteur** qui permet d'établir un **retour d'état**, c'est-à-dire qui lui permet de connaître l'état de la grandeur qu'il contrôle, on parle de **boucle d'asservissement** ou de **système asservi**.

Au cours d'une inspiration, le respirateur doit s'assurer que la courbe de pression correspond à celle souhaitée (cf. figure 13). En particulier, la pression doit croître pendant la phase initiale de l'inspiration puis rester constante à la valeur souhaitée par le médecin. La figure 14 présente la boucle d'asservissement en pression du respirateur qui permet d'assurer cette fonction.

**Remarque**

La chaîne fonctionnelle ne fournit pas plus d'information que le diagramme de blocs interne mais il permet de mettre en relief une seule chaîne fonctionnelle et le rôle qui y joue chaque composant.

**À savoir**

Un asservissement peut avoir un rôle suiveur ou régulateur.

**suiveur** : la valeur de la **consigne varie** au cours du temps et le rôle majeur de l'asservissement est de faire *suivre* ces variations à la grandeur asservie

**régulateur** : la valeur de la consigne reste globalement constante mais des **perturbations** peuvent avoir tendance à modifier la valeur de la grandeur à asservir, que l'on souhaite *réguler* pour être indépendante de ces perturbations

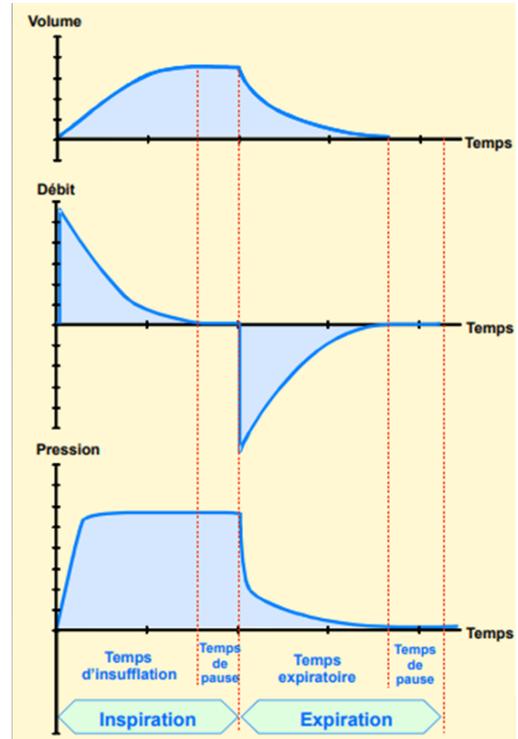


FIGURE 13 – Pression souhaitée au cours d'un cycle respiratoire.

Pendant la phase initiale de l'inspiration, la consigne évolue au cours du temps et le rôle de l'asservissement est suiveur. Une fois la pression cible atteinte, l'asservissement doit compenser les variations d'effort respiratoire que peut exercer le patient ; le rôle de l'asservissement est alors régulateur.

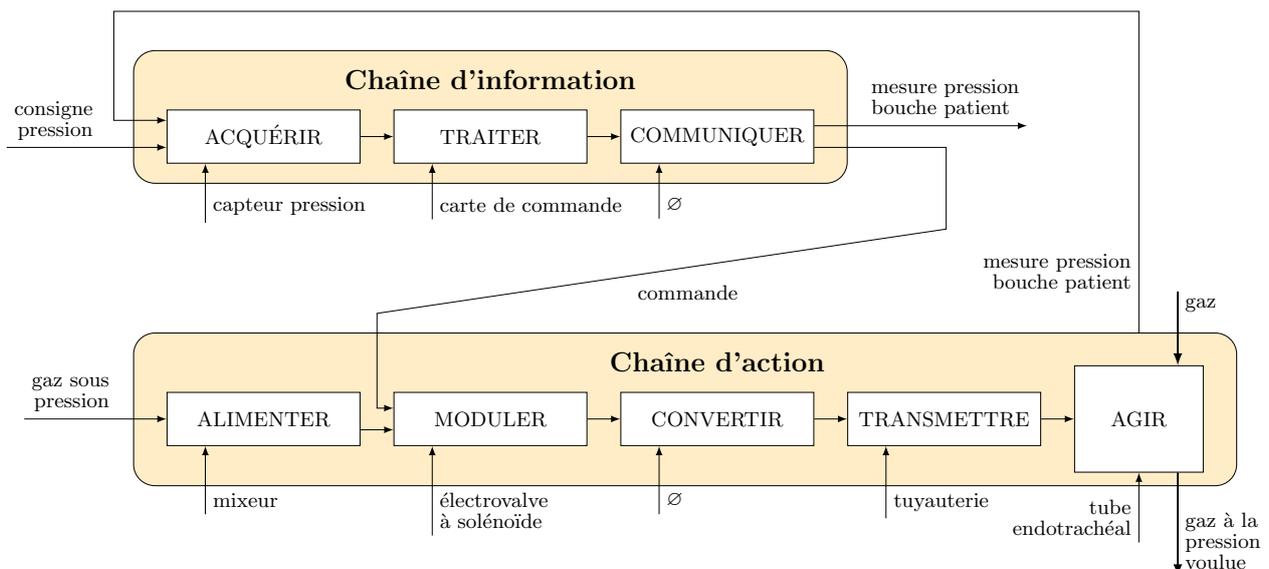


FIGURE 14 – Chaîne fonctionnelle d'asservissement de la pression du gaz inspiré par le patient.

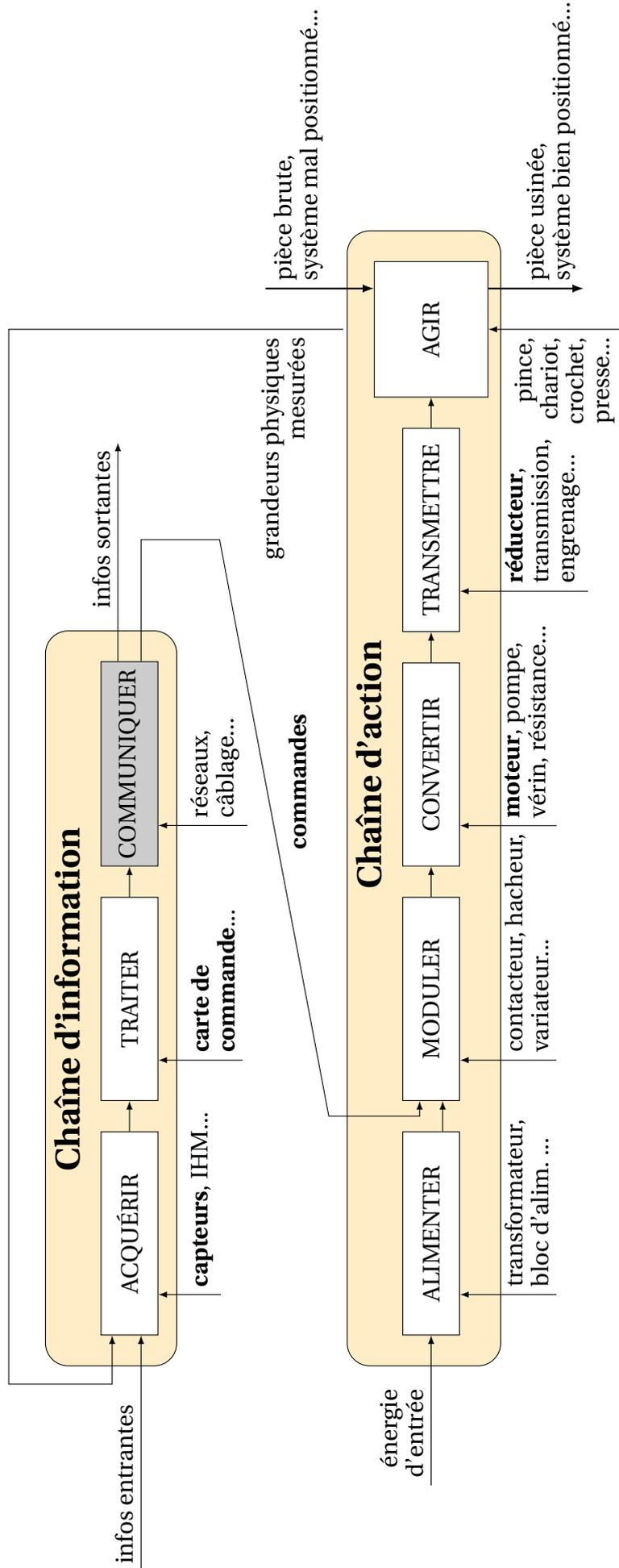


FIGURE 15 – Chaîne fonctionnelle et composants classiques.

## 4 Analyse du cycle de vie – Impact environnemental d'un système

### 4.1 Phases de vie d'un système

La vie d'un système ne se limite pas à sa phase d'utilisation. Le respirateur est d'abord conçu, les pièces fabriquées et assemblées, il est ensuite transporté et parfois stocké. Une fois livré au client, le respirateur reste souvent en attente d'utilisation, est désinfecté et préparé, assiste la respiration d'un patient, peut être amené à être déplacé pendant son utilisation et est réparé en cas de besoin. Finalement, une fois en fin de vie, le respirateur devra être transporté à nouveau jusqu'à un centre de traitement, démonté, puis ses composants seront recyclés ou traités en fonction des possibilités. Les déchets générés seront quant à eux stockés, enfouis ou incinérés.



#### À savoir

L'ensemble des **phases de vie** d'un système constitue son **cycle de vie**. Il faut prendre en compte toutes les phases de vie lors de la conception du système mais aussi lors de l'étude de son **impact** environnemental, sociétal et économique.

### 4.2 Impact environnemental et empreinte carbone

Tout système, produit ou service a un impact sur les acteurs qui l'entourent, sur son environnement. D'une part, il a un impact positif par la réalisation de sa fonction de service. D'autre part, il peut être à l'origine d'impacts négatifs dont il faut avoir conscience pour les éviter ou s'y adapter mais surtout pour évaluer la pertinence d'un système dans un contexte global qui va au-delà du seul besoin qui pourrait lui donner naissance.

Parmi les impacts d'un système, on peut citer les impacts :

- climatiques
- environnementaux
- économiques
- sociétaux

Dès la fin des années 1960, le *Club de Rome*, des scientifiques, économistes et fonctionnaires de plusieurs pays, s'interrogent sur les impacts d'un mode de vie qui commence à se généraliser. Ils commandent au MIT (Massachusetts Institute of Technology) un rapport, rendu en 1972 et intitulé *The Limits to Growth* (dont le titre sera traduit en français *Limites à la croissance (dans un monde fini)*), qui alerte sur les conséquences sur la planète, les écosystèmes et donc l'être humain de la société de consommation. La notion d'**empreinte écologique** des systèmes fait son apparition dans le plan scientifique international.

#### 4.2.1 Impact sur la biodiversité

La production des systèmes requiert l'exploitation de ressources (matières premières) et les systèmes deviennent des déchets en fin de vie.

L'extraction de matières premières peut être très polluante. Par exemple, l'extraction et le raffinage de métaux nécessitent de grandes modifications des lieux d'extraction, avec les impacts négatifs sur la biodiversité locale mais aussi l'utilisation de nombreux produits chimiques très polluants (cyanure, ammoniac, acide sulfurique). La gestion de ces produits étant très difficile, ils se retrouvent régulièrement dans les zones d'extraction avec un impact à très long terme. Dans les pays où les réglementations sont assez strictes (comme en Europe), l'extraction de ressources a été abandonnée ou profit de l'importation de celles-ci (ou directement des produits transformés). Cette démarche réduit la pollution locale mais ne résout pas le problème, qui est simplement délocalisé vers d'autres endroits de la planète.

En fin de vie, les systèmes constituent des déchets qu'il est difficile de recycler. Bien qu'il existe aujourd'hui des technologies pour séparer et recycler une partie des éléments fabriqués, ces opérations sont rarement suffisamment efficaces pour être rentables économiquement et sont donc délaissées. Par ailleurs, elles sont très énergivores et posent donc le problème de la disponibilité des ressources énergétiques et de leur impact climatique. De nombreux composants des systèmes, parfois très toxiques, finissent donc dans l'environnement.

#### 4.2.2 Impact économique et sociétal

L'apparition de nouveaux systèmes modifie les activités humaines et a donc un impact économique à prendre en compte. Par exemple, l'apparition des appareils photo numériques a entraîné la presque disparition de la filière de traitement argentique avec des disparitions d'emplois mais a également fait apparaître une filière de développement numérique parfois en ligne. Cette transformation entraîne aussi une dépendance plus importante au numérique et donc aux pays détenant les ressources minérales permettant de produire les cartes électroniques.

L'extraction des ressources nécessaires à fabriquer ces produits peut être une activité économique très profitable et peut entraîner des pratiques répréhensibles et moralement très discutables. Un exemple bien connu est l'exploitation d'enfants pour l'extraction du cobalt, notamment en République Démocratique du Congo mais également dans d'autres parties du monde en conflit. Les relations entre un groupe cimentier français et l'État Islamique pour la disponibilité de ressources en Syrie a également posé question.

### 4.2.3 Impact climatique

Les activités humaines utilisent de l'énergie pour se réaliser (cf. figure 16) ce qui conduit à l'émission de gaz à effet de serre. La quantité d'énergie utilisée ne cesse de croître et plus de 90 % de celle-ci est à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre par combustion.

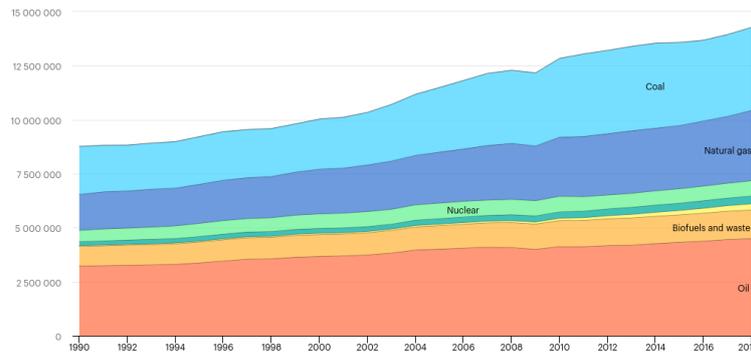


FIGURE 16 – Production d'énergies primaires par source depuis 1990 en milliers de tonnes équivalent pétrole. (source : International Agency for Energy (IAE) – 2018)



#### À savoir

L'**effet de serre** est un phénomène physique : des gaz présents dans l'atmosphère et capables d'absorber le rayonnement infrarouge émis par la Terre réchauffent les couches basses de l'atmosphère et donc la surface de la Terre. Ces gaz (le dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$ , le méthane  $\text{CH}_4$ , le protoxyde d'azote  $\text{N}_2\text{O}$ ...) sont appelés **gaz à effet de serre**. Leur émission est très souvent liée à la **combustion** de matière organique, principalement des sources d'énergie fossile comme le **charbon**, le **pétrole** ou le **gaz naturel**.

Comme le gaz à effet de serre majoritaire dans l'atmosphère est le  $\text{CO}_2$ , la quantité de gaz à effet de serre est souvent quantifiée en **équivalent  $\text{CO}_2$** , cet équivalent étant établi par une estimation de leur impact sur le réchauffement sur une durée de 100 ans.

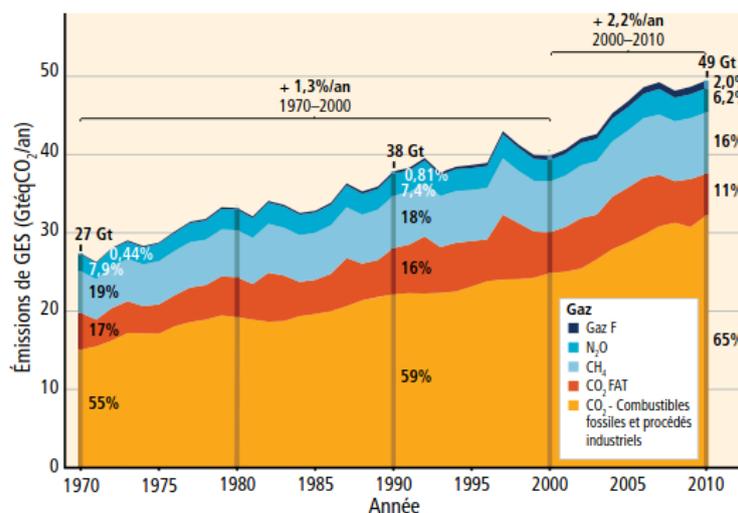


FIGURE 17 – Historique des émissions anthropiques de gaz à effet de serre dans le monde depuis 1970 en millions de tonnes équivalent  $\text{CO}_2$  (source : 5<sup>e</sup> rapport du GIEC – 2014).

L'Organisation des Nations Unies, alertée et consciente de l'importance de l'impact du changement climatique sur l'ensemble de la population mondiale, crée le GIEC en 1988, qui reçoit le prix Nobel de la Paix en 2007.

### À savoir

Le **GIEC, Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat** (*IPCC en anglais pour Intergovernmental Panel on Climate Change*) est un organisme international regroupant la presque totalité des pays. Il est composé de scientifiques et de représentants des états. Il a pour objectif « de fournir des **évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques**, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade. »

Le GIEC produit régulièrement des rapports sur l'état des connaissances scientifiques sur le changement climatique mais n'a pas vocation à réaliser des recherches. Le 6<sup>e</sup> rapport a été publié en 2021.

Depuis a été créée la **Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques** (CCNUCC, en anglais *United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC*) pour servir d'intermédiaire entre le GIEC, organisme essentiellement scientifique et l'ONU qui regroupe les décideurs.

### À savoir

L'**accord de Paris** est signé lors de la Conférence de Paris de 2015 (COP21) de la CCNUCC et a aujourd'hui l'adhésion de **tous les pays**. L'objectif de l'accord est de **limiter le changement climatique à +2 °C** par rapport à l'ère pré-industrielle mais ne contraint pas les pays à le faire.

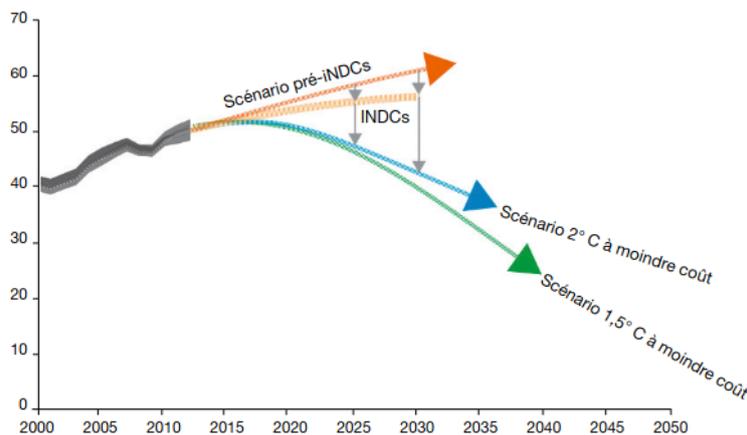


FIGURE 18 – Émissions anthropiques de gaz à effet de serre dans le monde depuis 2000 en millions de tonnes équivalent CO<sub>2</sub> et trajectoires envisagées pour les décennies à venir (source : developpement-durable.gouv.fr, issu d'un rapport de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques de 2016).

Les figures 17 et 18 montrent l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre ainsi que les trajectoires estimées pour différents scénarios (INDC signifie *Intended Nationally Determined Contributions*, c'est-à-dire les contributions auxquelles chaque pays s'est engagé en vue de respecter l'accord de Paris en 2016).

Le constat de cette situation a conduit un nombre croissant de pays à prendre des mesures normatives pour tenter de limiter les émissions de gaz à effet de serre. En France, il existe depuis 2016 une obligation pour les grandes entreprises de faire un bilan régulier de leur **empreinte carbone**.

### À savoir

L'**analyse de cycle de vie** (ACV) est une méthode normalisée consistant à « compiler et évaluer les intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie ». Elle permet notamment de déterminer l'**empreinte carbone** d'un produit ou d'un service, c'est-à-dire la quantité de gaz à effet de serre émis dont il est responsable, que ce soit directement ou indirectement. Oublier une phase de vie dans le calcul de l'empreinte carbone d'un produit conduit souvent à des erreurs grossières.



### Pour aller plus loin

Dans l'ACV, on distingue trois domaines (ou **scopes**) d'émissions liées à un organisme ou à une entreprise :

- le **scope 1** relève des émissions directes de l'entreprise (combustion, procédés libérant des gaz à effet de serre, émission des ruminants, fuite de fluide frigorigène, engrais azotés...)
- le **scope 2** concerne les émissions dues à la production de l'énergie utilisée par l'entreprise (électricité, chauffage...)
- le **scope 3** est bien plus large et regroupe toutes les émissions non prises en compte dans les scopes 1 et 2. Par exemple, il s'agit des émissions des fournisseurs (extraction de matières premières, transport...), des clients, les travailleurs, le recyclage des produits...

On en déduit que les empreintes carbone ne s'*additionnent* pas. L'empreinte carbone traduit la dépendance d'une entreprise, un organisme, une activité ou un produit à l'émissions de gaz à effet de serre mais l'étendue des empreintes carbone se chevauchent. Les émissions dues à l'utilisation de la voiture pour aller à un centre commercial sont incluse dans l'empreinte du client, de la voiture, du fabricant de la voiture, du centre commercial etc. Cette multiplicité d'apparitions d'une même action dans de nombreuses empreintes carbone montre les liens de dépendance des activités et des produits entre eux et, si les émissions sont élevées, elle traduisent le fort impact sociétal de la réduction des émissions qui doit avoir lieu.