

A. Présentation du système

A.1. Problématique

Le sous-sol français possède de nombreuses cavités soit naturelles (coulées de lave...) soit liées à des activités humaines (mines...).

Les terrains constructibles se faisant de plus en plus rares, on est amené à construire dans des zones où les sous-sols sont médiocres. Afin de limiter le risque d'effondrement et de connaître l'extension des cavités, des études de terrains sont réalisées.

Actuellement, la présence d'une cavité est détectée en surface à l'aide de moyens électromagnétiques mais son volume et sa position exacte ne sont pas mesurables par ces moyens externes. Le Centre d'Expertise du Bâtiment des Travaux Publics (CEBTP) utilise une mesure par télémètre laser.

Une fois la cavité décelée, le CEBTP procède à un forage vertical en profondeur d'un diamètre de 104mm pour atteindre la cavité. Un outil « sonde » est introduit et transmet les mesures en surface.

Le volume de la cavité est alors calculé et une visualisation 3D peut être générée (voir figure 2).

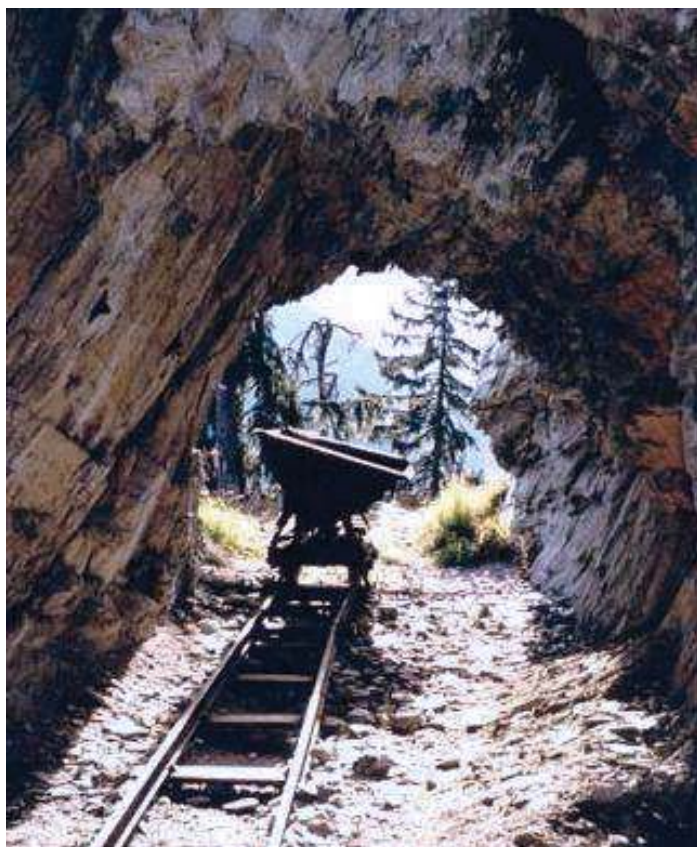


Figure 1 – Cavité minière.

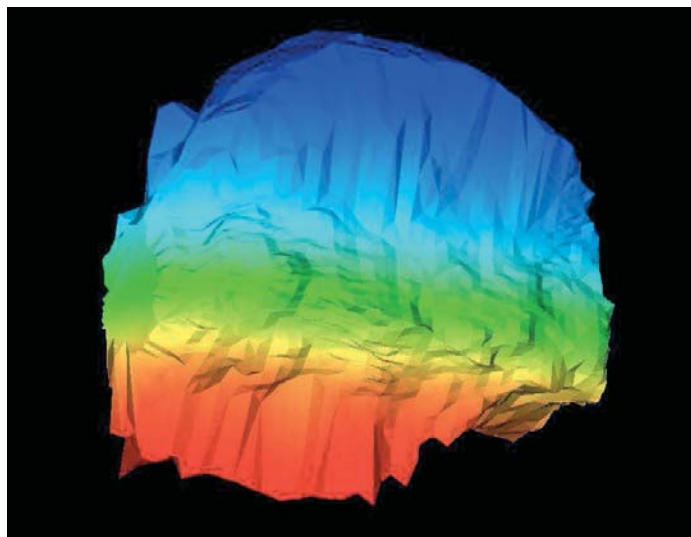


Figure 2 – Visualisation 3D d'une cavité.

A.2. Principe de fonctionnement

Le système étudié peut se décomposer en trois parties (voir figures 3 et 5) :

- la partie commande du système : un calculateur industriel (API) et un micro-ordinateur,

- le système de déplacement de la sonde, composé d'un ensemble motoréducteur et variateur, accouplé à un tambour sur lequel s'enroule un câble permettant la montée et la descente de la sonde dans le trou de forage par un système de poulies,
- la sonde en tant que telle (voir le document technique DT1 (figure 4), permettant l'acquisition de la forme de la cavité.
- La position de la sonde est mesurée par un codeur (capteur) entraîné par le câble par une roue de friction.

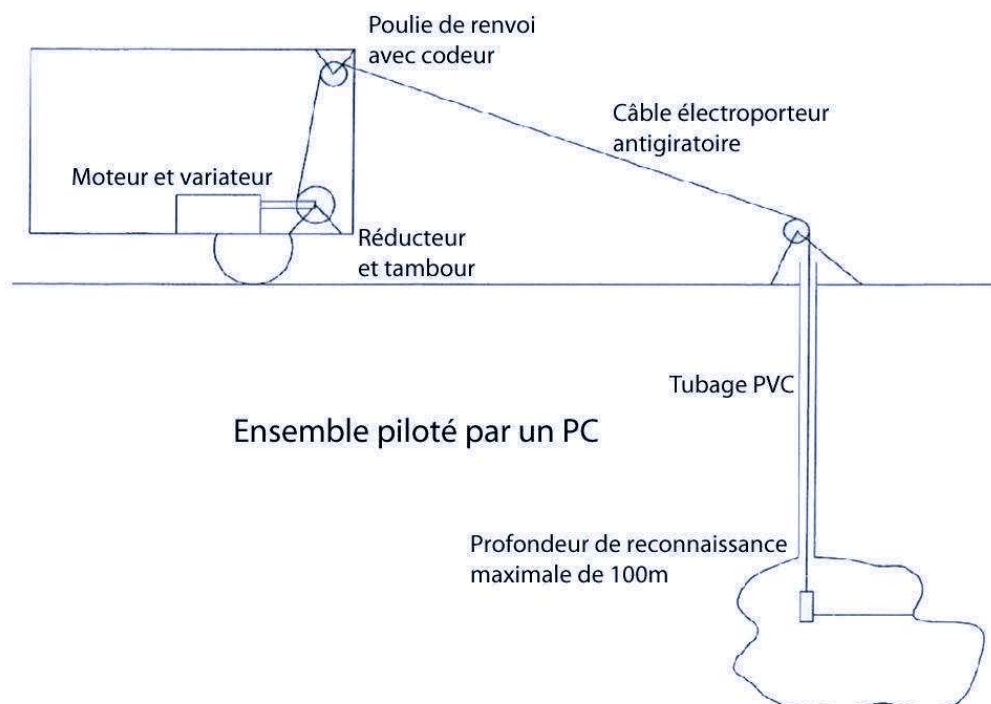


Figure 3 – Composants assurant le déplacement de la sonde.

Par l'intermédiaire d'un câble enroulé sur le tambour, la sonde de mesure est descendue en vitesse lente ($0,1 \text{ m s}^{-1}$) jusqu'au bas du tubage puis en vitesse rapide ($0,5 \text{ m s}^{-1}$) jusqu'au fond de la cavité. Elle y réalise sa première mesure de distance par rapport à la paroi de la cavité. La mesure utilise le principe de réflectométrie laser : la sonde comporte un télémètre laser qui mesure la distance entre l'axe vertical du câble et le bord de la paroi.

La sonde dispose d'une partie mobile qui est mise en mouvement grâce à un moteur pas à pas (voir figure 4) : cela lui permet d'effectuer une série de mesures sur 360° pour une profondeur donnée.

Le principe de la mesure consiste à remonter la sonde par paliers successifs. Pour chacun de ces paliers, on effectue une série de mesures :

- une résistance chauffante « tapis chauffant » est alimentée avant chaque série de mesure pour éviter toute formation de buée sur le miroir de renvoi du télémètre ;
- un moteur pas à pas de 200 pas/tour va permettre de faire tourner le télémètre par pas de $1,8^\circ$ toutes les 0,1 s. Ainsi on pourra réaliser 200 points de mesure pour une profondeur donnée, le faisceau laser de mesure sera horizontal alors que l'axe du télémètre est vertical, ceci sera réalisé grâce à un miroir à

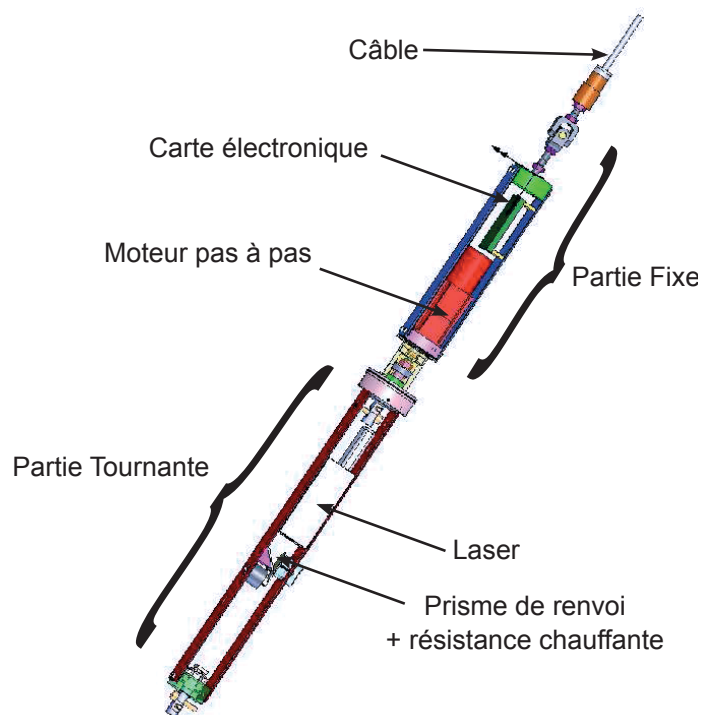


Figure 4 – Document technique DT1.

45° fixé sur le télémètre ;

- afin de ne pas torsader les fils électriques, il faut revenir en position initiale (rotation de 360° dans le sens opposé, à vitesse modérée de 20tr/min avant la série de mesures suivante ;
- une boussole électronique permet de contrôler l'orientation de la sonde et son inclinaison.
- une fois la première série de mesures effectuée au fond de la cavité, la sonde remonte en vitesse rapide d'une hauteur donnée (50cm) et effectue de nouveau une série de mesures, ces opérations étant répétées jusqu'à atteindre le haut de la cavité. La dernière mesure s'effectue entre 0 et 50cm du bas du tubage.

La sonde remonte ensuite en vitesse lente ($0,1\text{ m s}^{-1}$) jusqu'en haut du tubage.

En surface, on utilise un ordinateur industriel (API) relié à un micro-ordinateur pour générer des consignes et collecter les résultats de mesure.

La descente des appareillages dans la cavité est réalisée par un ensemble moteur-treuil. Le câble s'enroule sur le tambour du treuil.

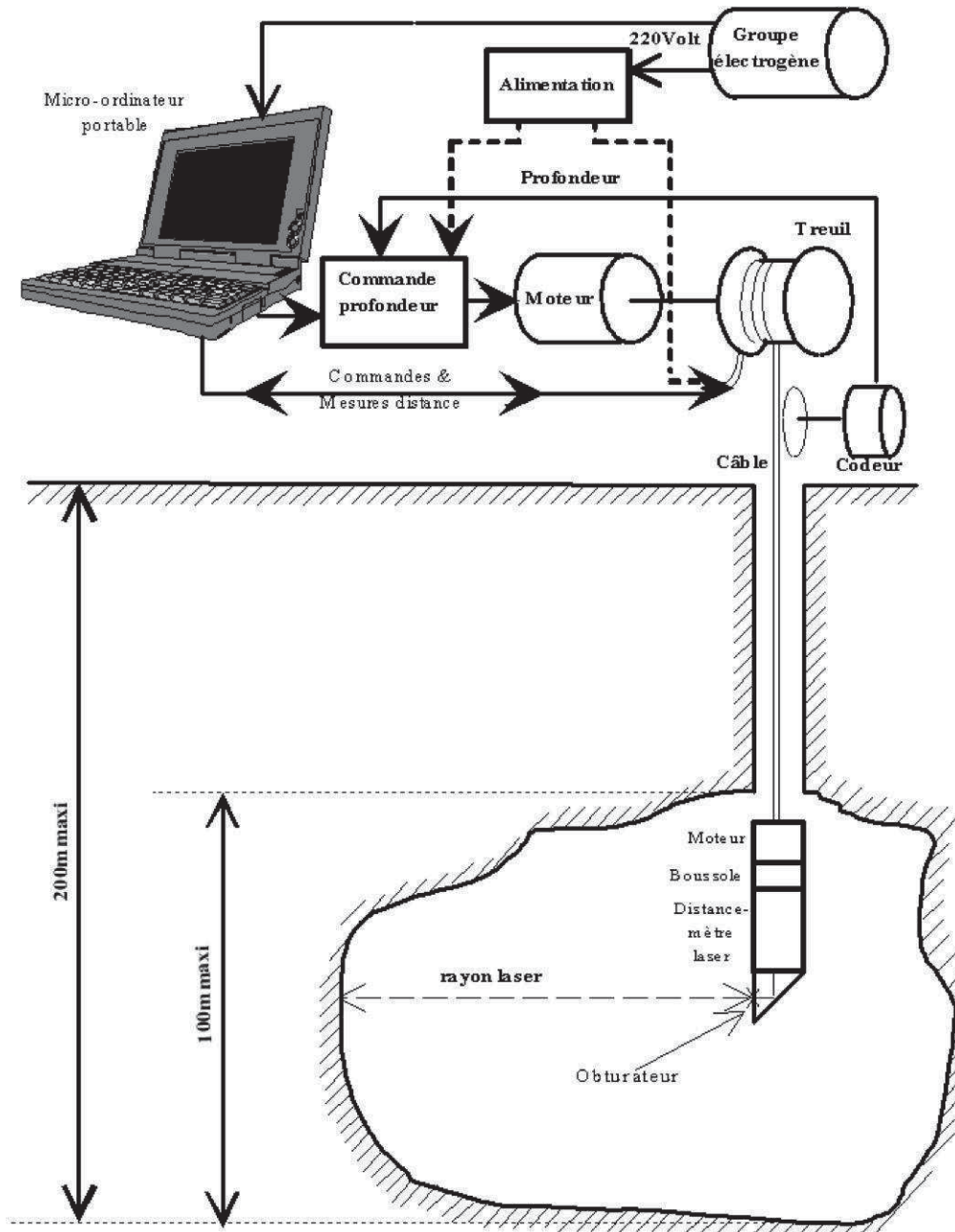


Figure 5 – Schéma fonctionnel du mesureur de cavité.

L'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du système est fournie par un groupe électrogène. Une alimentation régulée en tension fournit l'énergie électrique aux différents appareils. Un variateur associé à l'automate programmable (API) permet de commander et alimenter le moteur.

B. Analyse du système

B.1. Analyse globale : contexte et cas d'utilisation

Q1. Compléter le diagramme SysML de cas d'utilisation du document réponse DR-1.

Q2. Compléter le diagramme SysML de contexte de la figure 7 du document réponse DR-2 en indiquant le nom des 2 acteurs non nommés.

DR-1. Cas d'utilisation à compléter

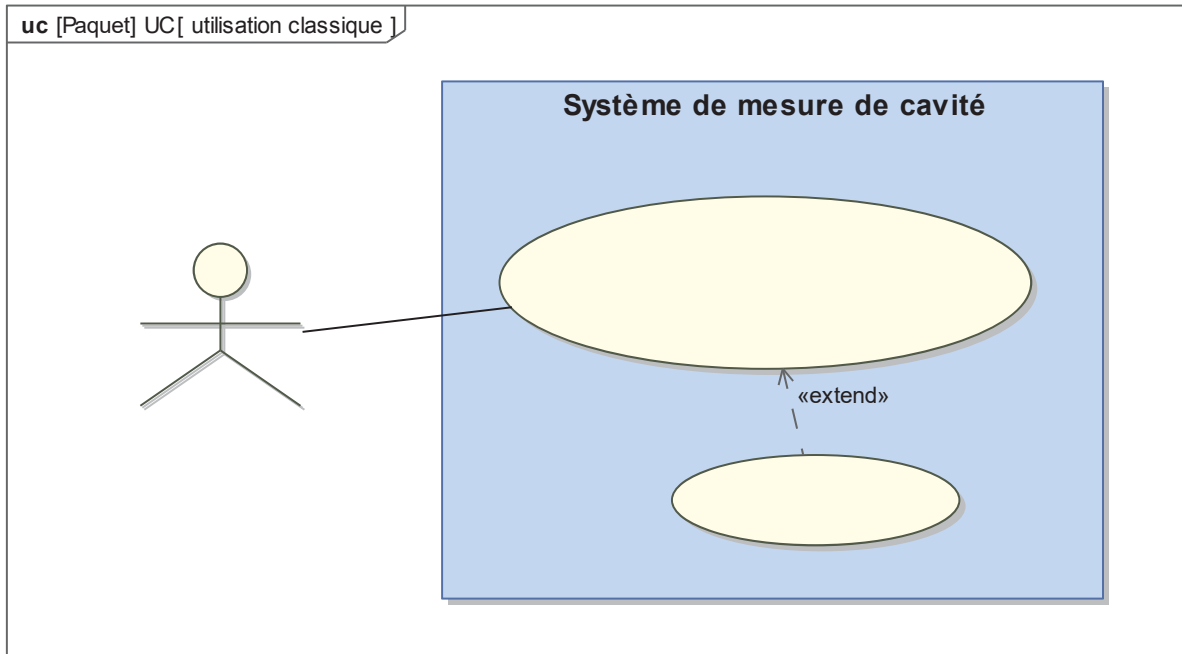


Figure 6 – Cas d'utilisation à compléter.

DR-2. Diagramme de contexte à compléter

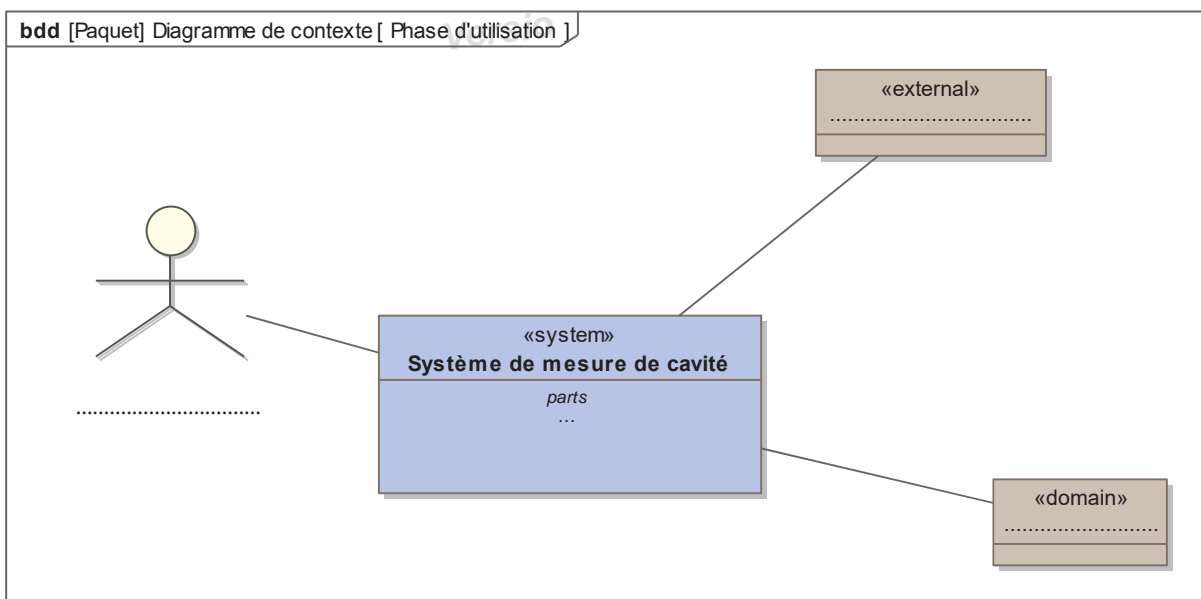


Figure 7 – Diagramme de contexte à compléter.

B.2. Exigences

Le diagramme de la figure 8 décrit les exigences générales du système et ne détaille que les exigences techniques

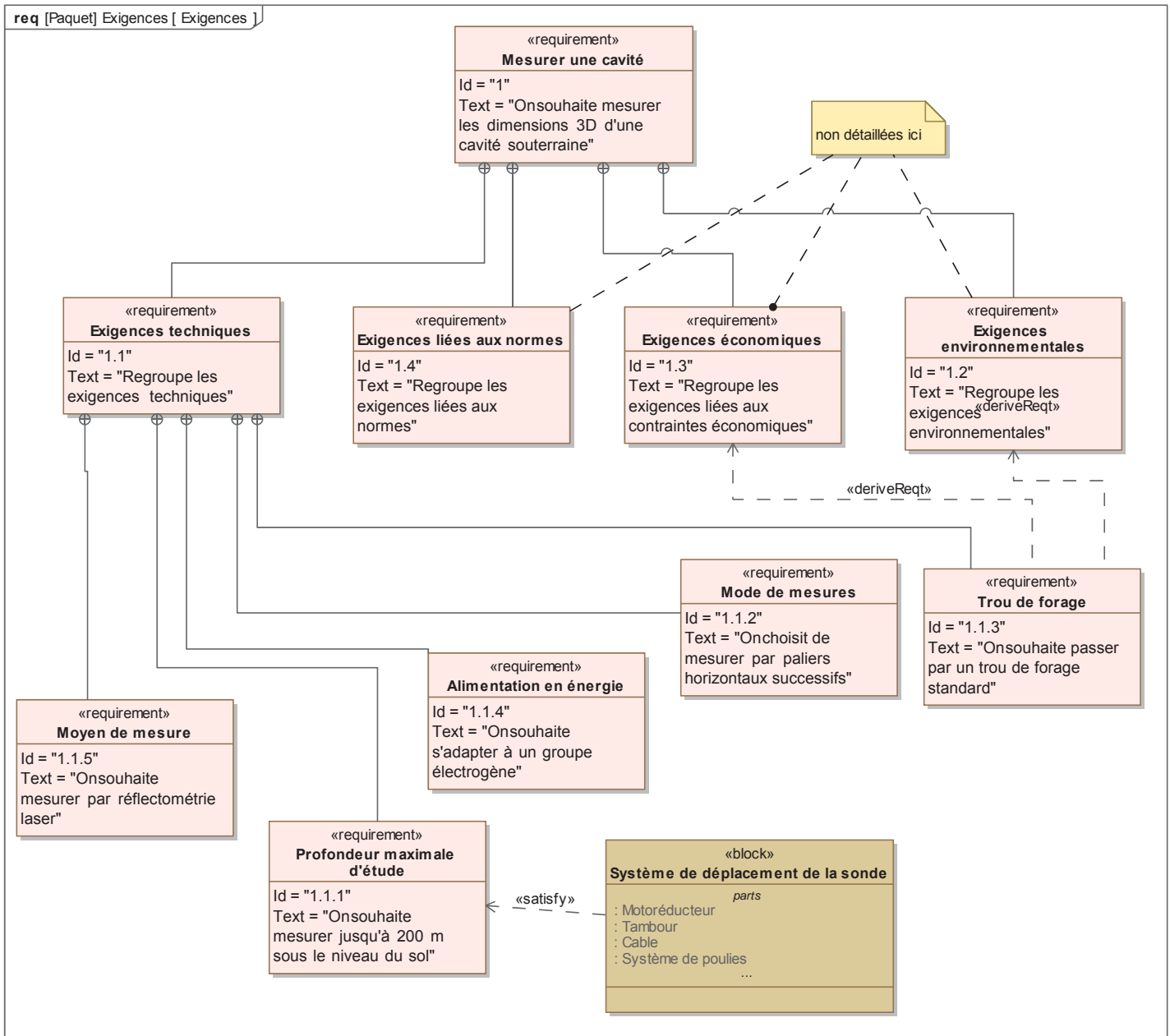


Figure 8 – Diagramme d'exigences.

Q3. Rappeler l'utilité des diagrammes d'exigences.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Le diagramme de la figure 9 précise l'exigence relative à la mesure.

Q4. Compléter le diagramme SysML d'exigences partiel de la figure 9 en indiquant les 2 exigences (1.1.2.3) et (1.1.2.4) ainsi que le bloc satisfaisant l'exigence (1.1.2.1).

DR-3. Diagramme d'exigence à compléter

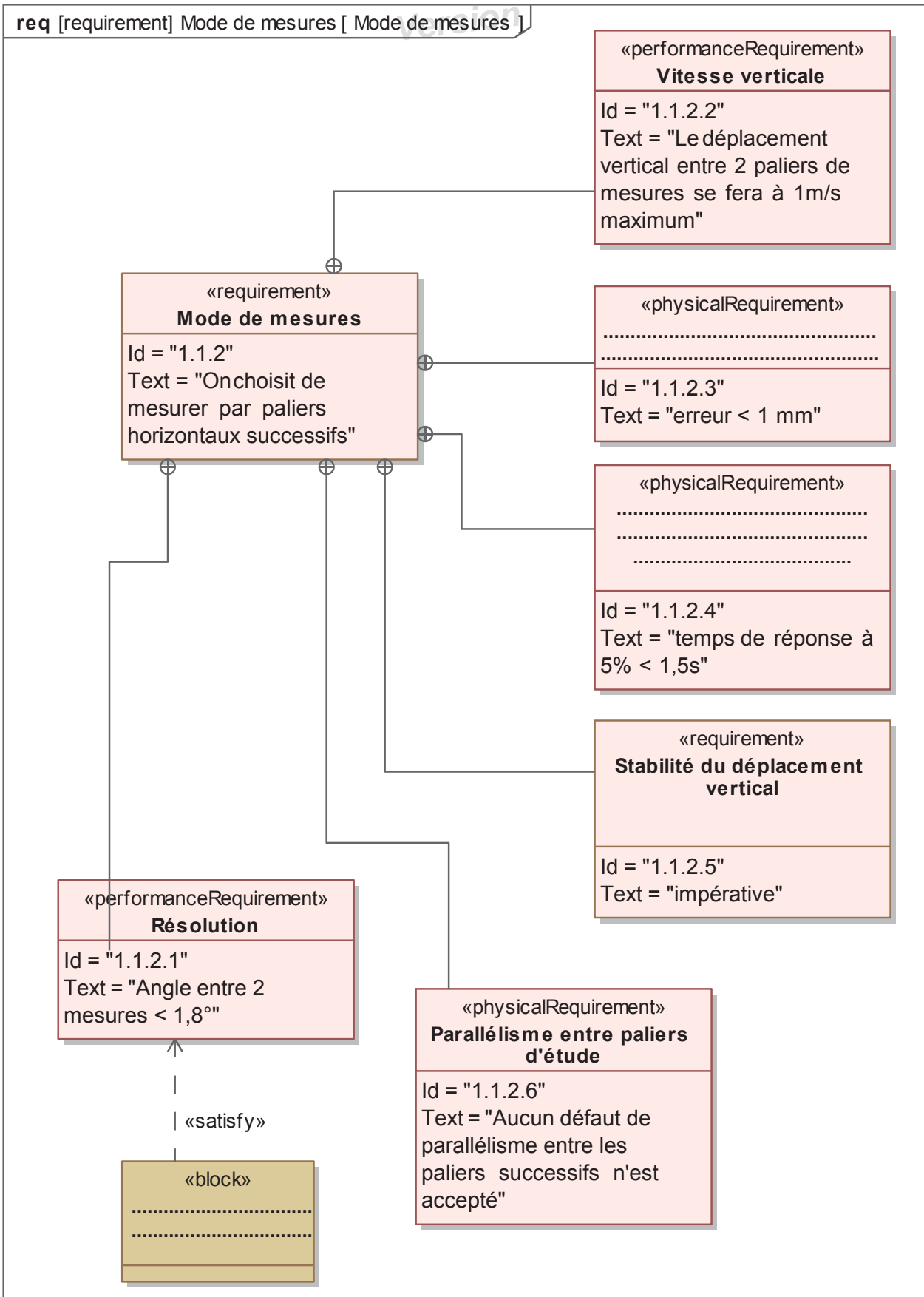


Figure 9 – Diagramme d'exigences partiel à compléter.

B.3. Analyse interne : BDD et IBD

On se propose maintenant de décrire les constituants du système et les relations entre ceux-ci et l'extérieur.

À partir de la description du fonctionnement et des différentes figures,

Q5. Compléter le diagramme e la figure 10 du document réponse DR-4 en indiquant les blocs composants le sous-ensemble : Système de déplacement de la sonde.

DR-4. Diagramme de définition de blocs à compléter

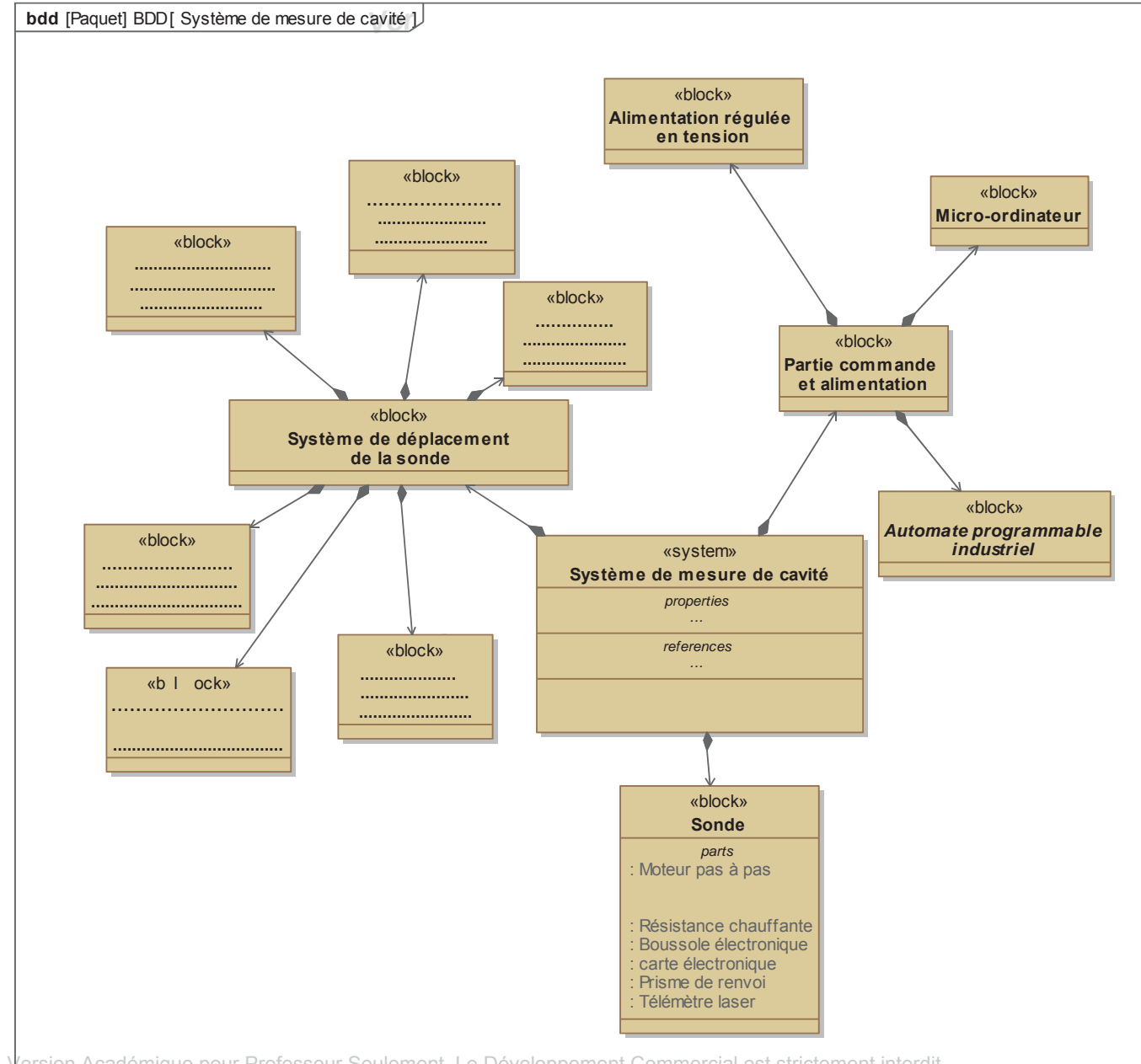


Figure 10 – Diagramme de définition de blocs à compléter.

Les relations entre les différents constituants entre eux et avec l'extérieur sont précisés sur le diagramme de la figure11.

Q6. A partir de la description du fonctionnement et des différents documents, compléter la chaîne d'énergie et d'information du document réponse DR-5.

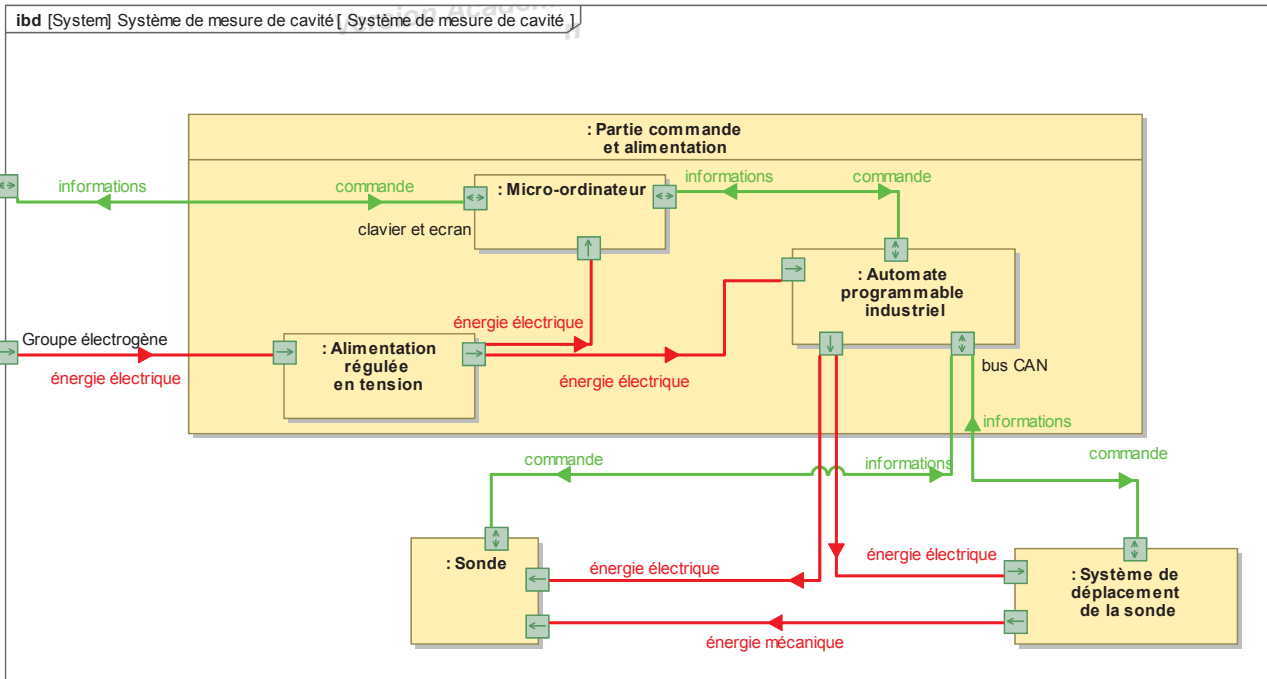


Figure 11 – Diagramme de blocs internes du système complet.

DR-5. Chaîne d'énergie et d'information à compléter

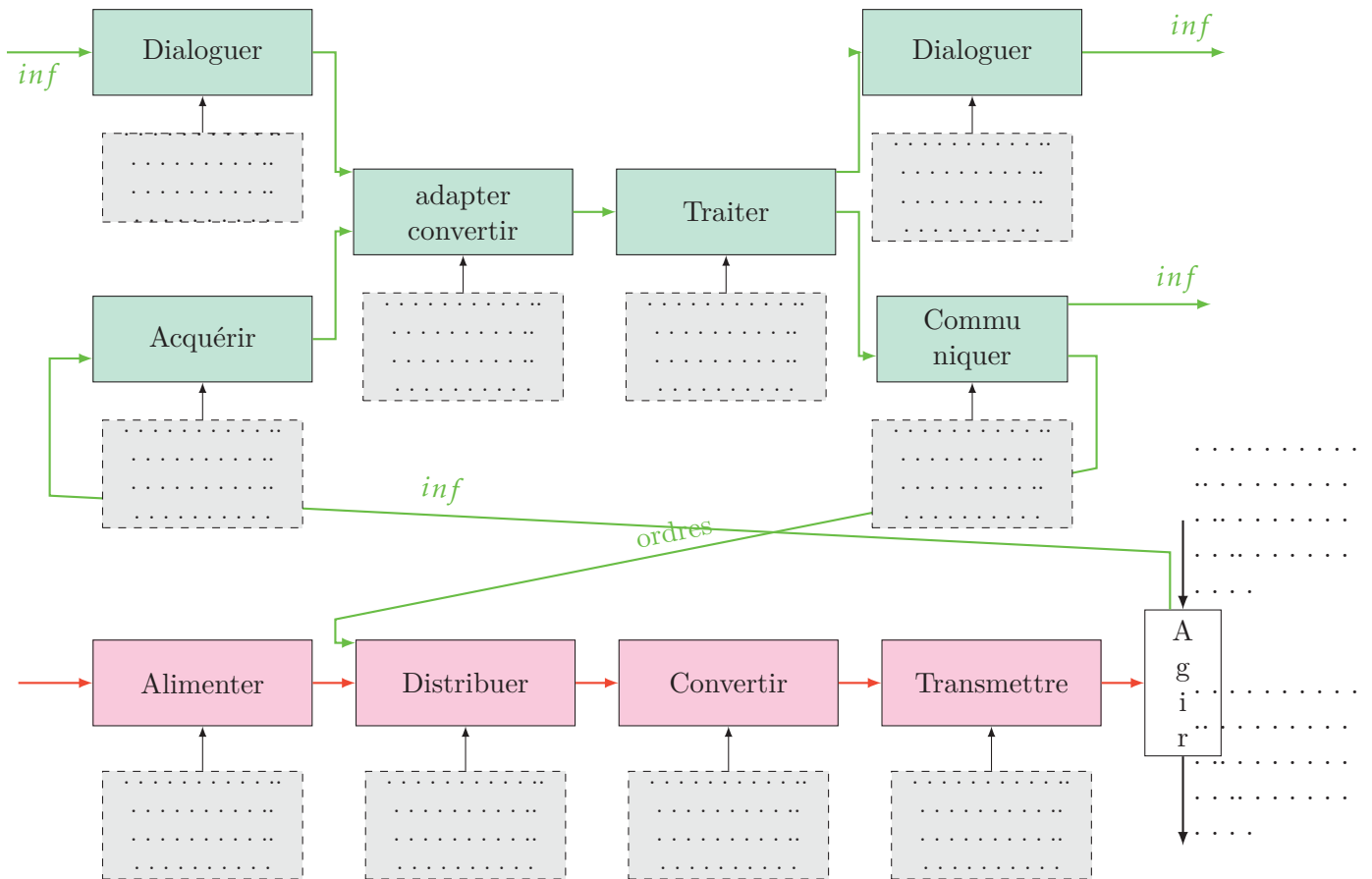


Figure 12 – Description des chaînes d'information et d'énergie

Les moteurs à courant continu sont très souvent utilisés pour réaliser l'asservissement de position ou de vitesse des systèmes en mouvement.

Le modèle de connaissance du moteur est décrit par les quatre équations différentielles ci-dessous.

Équation électrique :

$$u(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + E(t)$$

Équation de la dynamique en rotation :

$$J_m \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = C_m(t) - C_r(t) - f \cdot \omega_m(t)$$

Deux équations de couplage électromécanique

$$C_m(t) = K_t \cdot i(t)$$

$$E(t) = K_e \cdot \omega_m(t)$$

avec

- $u(t)$: la tension d'alimentation du moteur,
- $i(t)$: le courant,
- $E(t)$: la force contre-électromotrice,
- $C_m(t)$: le couple moteur,
- $C_r(t)$: le couple résistant.
- R : la résistance de l'induit,
- L : l'inductance,
- K_e : la constante de vitesse,
- K_t : la constante couple,
- f : la constante de frottement visqueux
- J_m : le moment d'inertie du rotor.

A. Étude simplifiée

On considère que le moteur est à vide sans efforts extérieurs : $C_r(t) = 0$. On considère aussi que l'inductance et le frottement visqueux sont négligeable : $f = 0$ et $L = 0$.

Q1. Ré-écrire les quatre équations compte tenu de ces données.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Q2. À partir de ces quatre équations écrire l'équation différentielle qui relie $u(t)$ la tension d'alimentation du moteur et $\omega_m(t)$ et ses dérivées.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

On considère les valeurs numériques suivantes :

Constante de couple : $K_t = 0,0525 \text{ N m A}^{-1}$

Constante de vitesse : $K_e = 0,0525 \text{ V/(rad/s)}$

Moment d'inertie du rotor : $J_m = 69,6 \times 10^{-7} \text{ kg/m}^2$

Résistance : $R = 2,07 \Omega$

Q3. Mettre l'équation différentielle sous la forme :

$$T_r \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} + \omega_m(t) = K \cdot u(t)$$

puis Déterminer T_r et K en fonction des différents paramètres. Faire l'application numérique.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

On considère que le moteur est alimenté par la tension constante $u(t) = U_0 = 20 \text{ V}$.

Q4. Montrer que $\omega_m(t) = K \cdot U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_r}} \right)$ est solution de l'équation différentielle. Déterminer la vitesse de rotation $\omega_m(t)$ atteinte par le moteur en régime permanent (lorsque $t \rightarrow \infty$).

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....