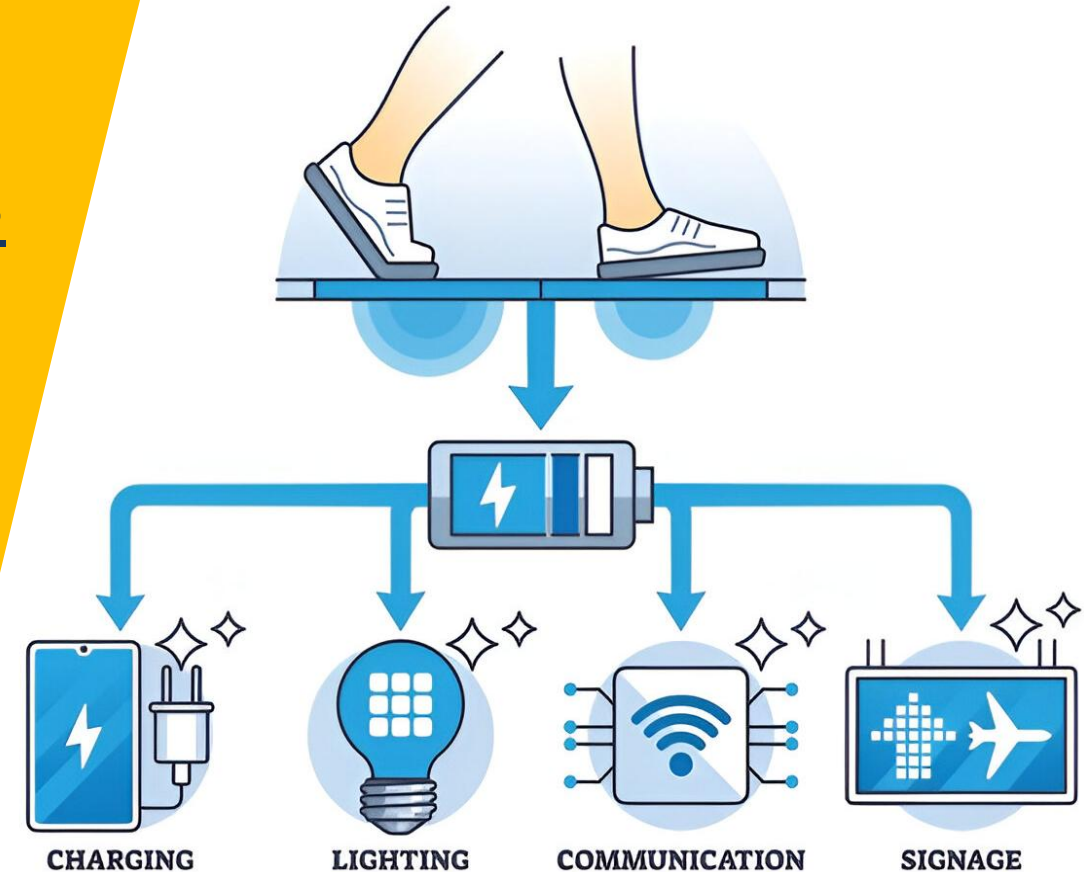


# Conversion de l'énergie cinétique des pas des piétons en énergie électrique dans les gares

Code CNC : SF020T



**Réalisé par :**

**El Makhloufy Adil**

**Encadré par :**

**Abarbas Meriem**





# **PLAN :**

**1**

**Contextualisation**

**2**

**Problématique**

**3**

**Présentation du système et cahier des charges**

**4**

**Objectif 1 : Etude du système mécanique**

**5**

**Objectif 2 : Etude de génératrice**

**6**

**Objectif 3 : choix des composants**

**7**

**Objectif 4 : Simulation du fonctionnement du système**

**8**

**Conclusion**



# Contextualisation :



**Image 1 :** Maroc, Casablanca. Les passagers dans le hall de la gare ferroviaire Casa-Voyageurs, ONCF



**Image 2 :** Scène dans une gare bondée



**Il est donc utile d'exploiter ce flux de passagers pour produire de l'énergie, en transformant leur mouvement en une source d'énergie durable.**



# Problématique retenue :

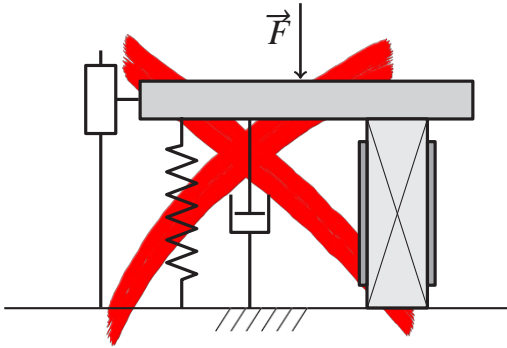


Comment peut-on convertir  
l'énergie cinétique générée par  
les pas des passagers en énergie  
électrique de manière efficace afin  
de réduire les besoins énergétiques  
dans les gares ?



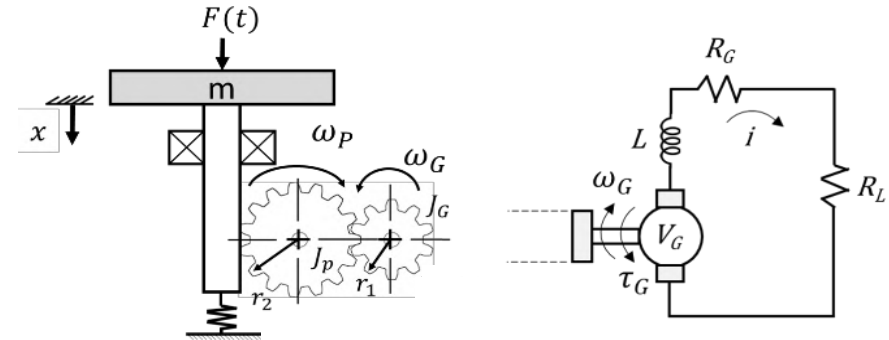
# Choix de la solution de **conversion** d'énergie :

## Convertisseur piézoélectrique



- + Intégration discrète dans le sol
- + Pas de pièce mobile = faible maintenance
- Faible puissance par pas
- Coût des matériaux
- Difficulté de stockage de l'énergie
- Dégradation des propriétés piézoélectriques

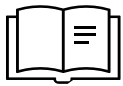
## Convertisseur électromécanique



- + Meilleur rendement énergétique
- + Stockage d'énergie facilité
- + Utilisation de matériaux robustes
- Usure mécanique et maintenance régulière
- Bruits et vibrations

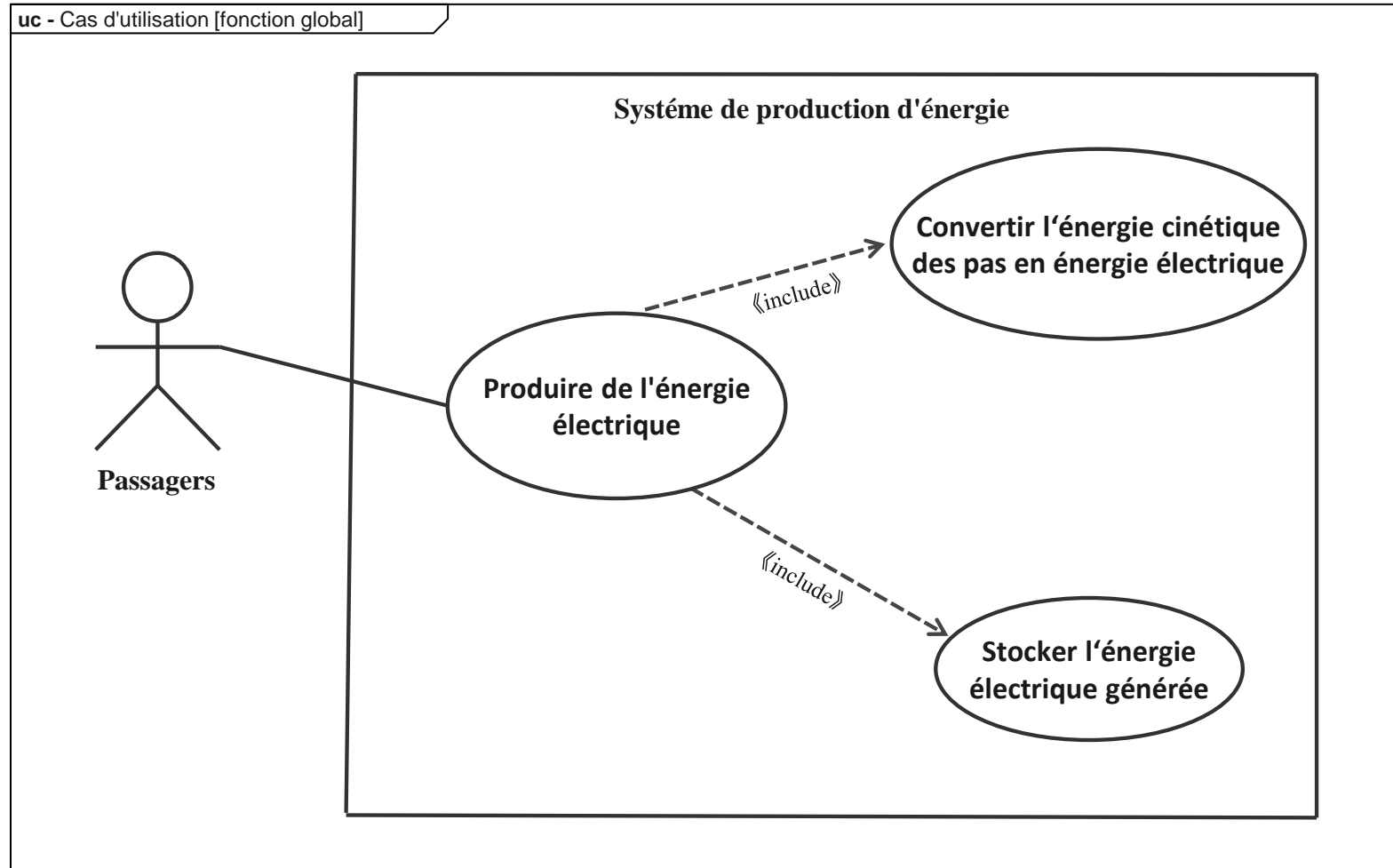


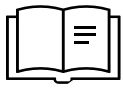
la solution choisie est donc le convertisseur électromécanique .



# Présentation du systeme :

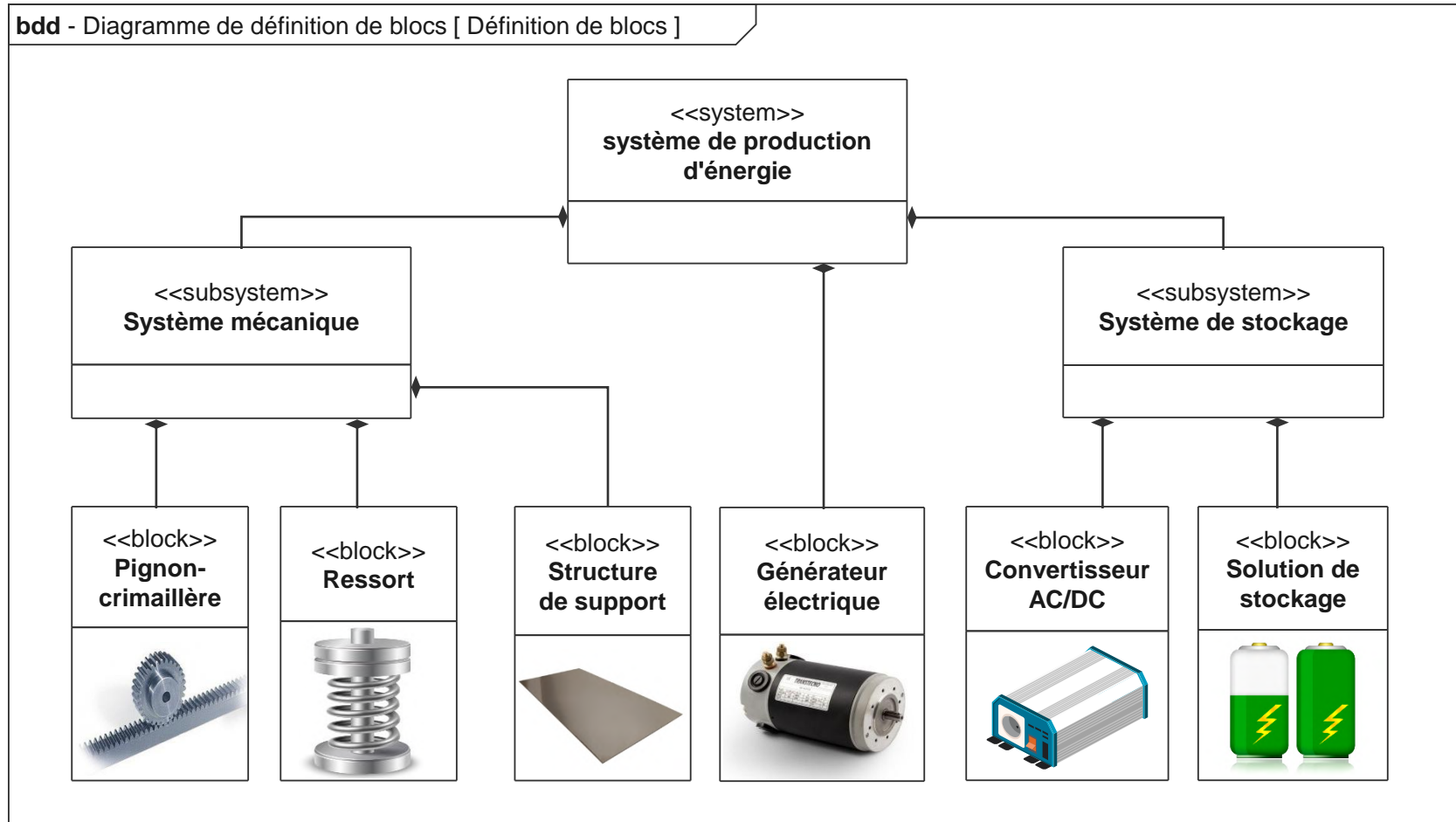
## Diagramme de cas d'utilisation (uc)

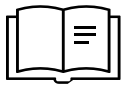




# Présentation du systeme :

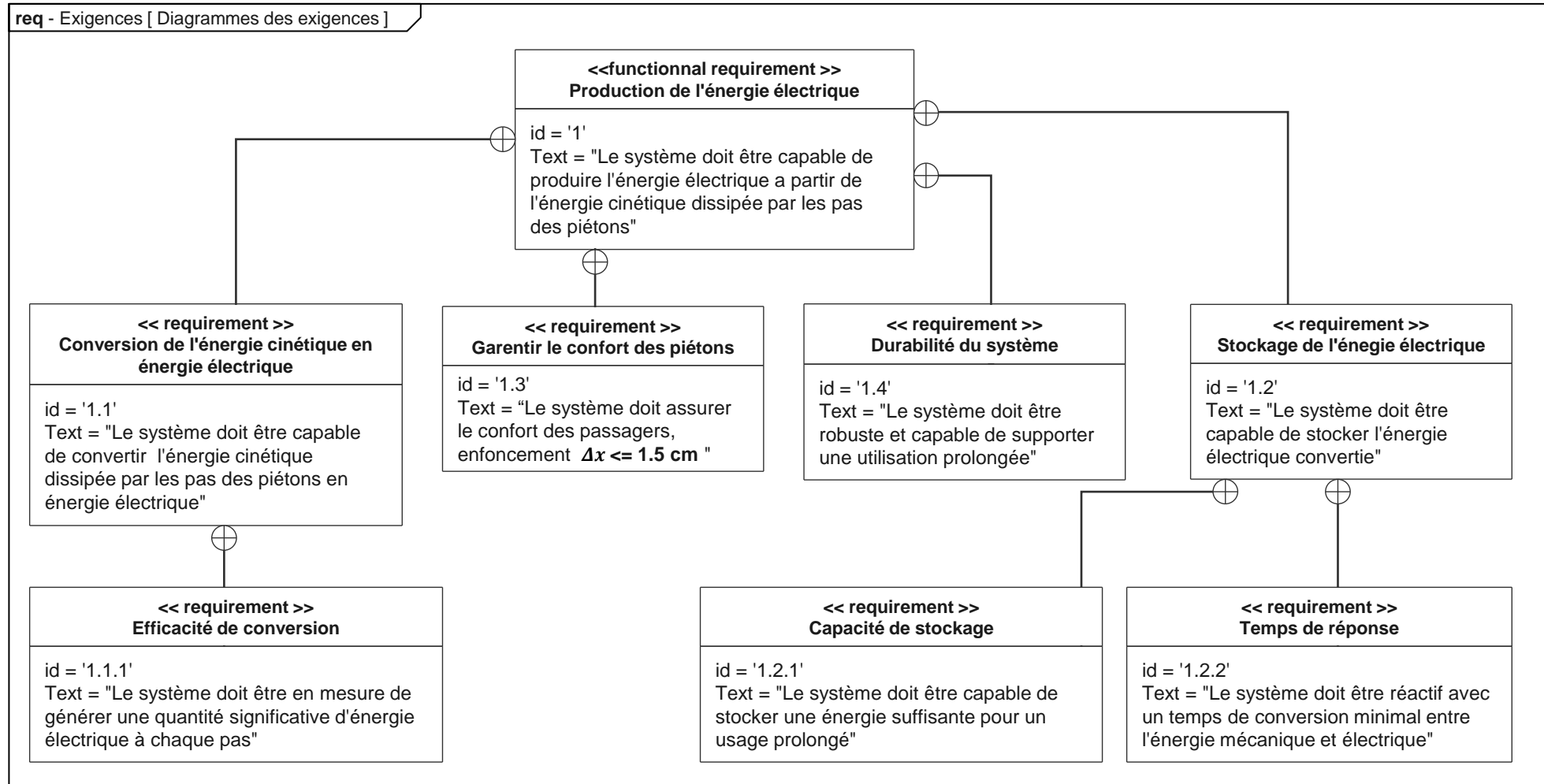
## Diagramme de définition de bloc(bdd)





# Cahier des charges :

## Diagramme des exigences (req)

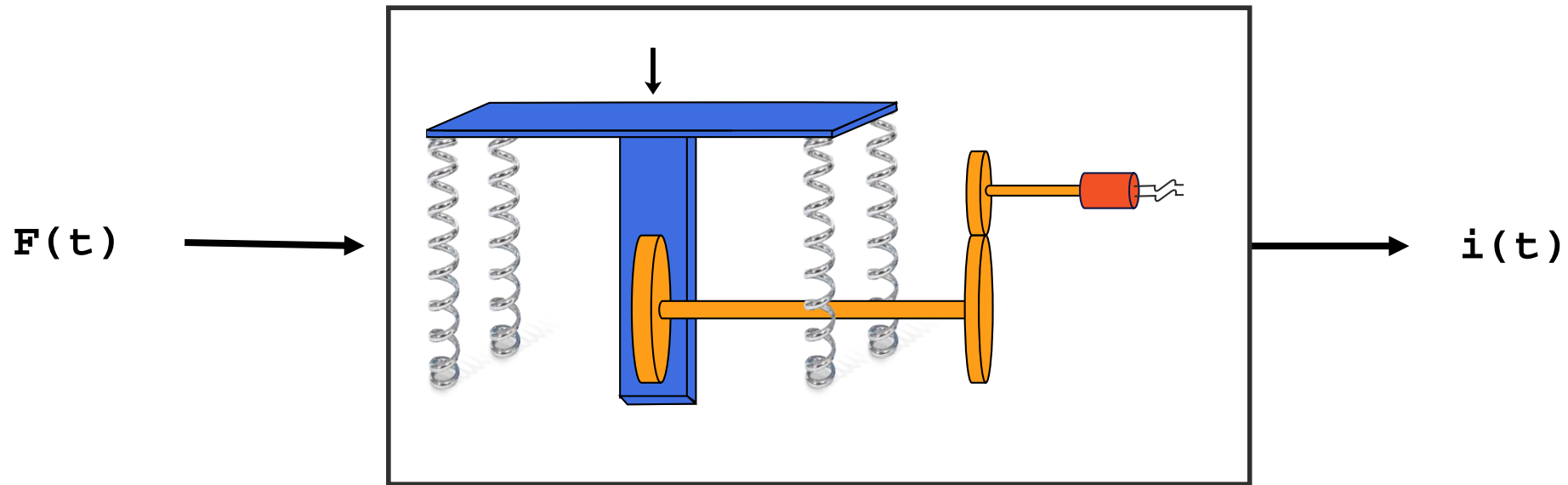


# OBJECTIF 1 :

Étude du système de  
conversion de l'énergie  
cinétique en énergie  
mécanique de rotation



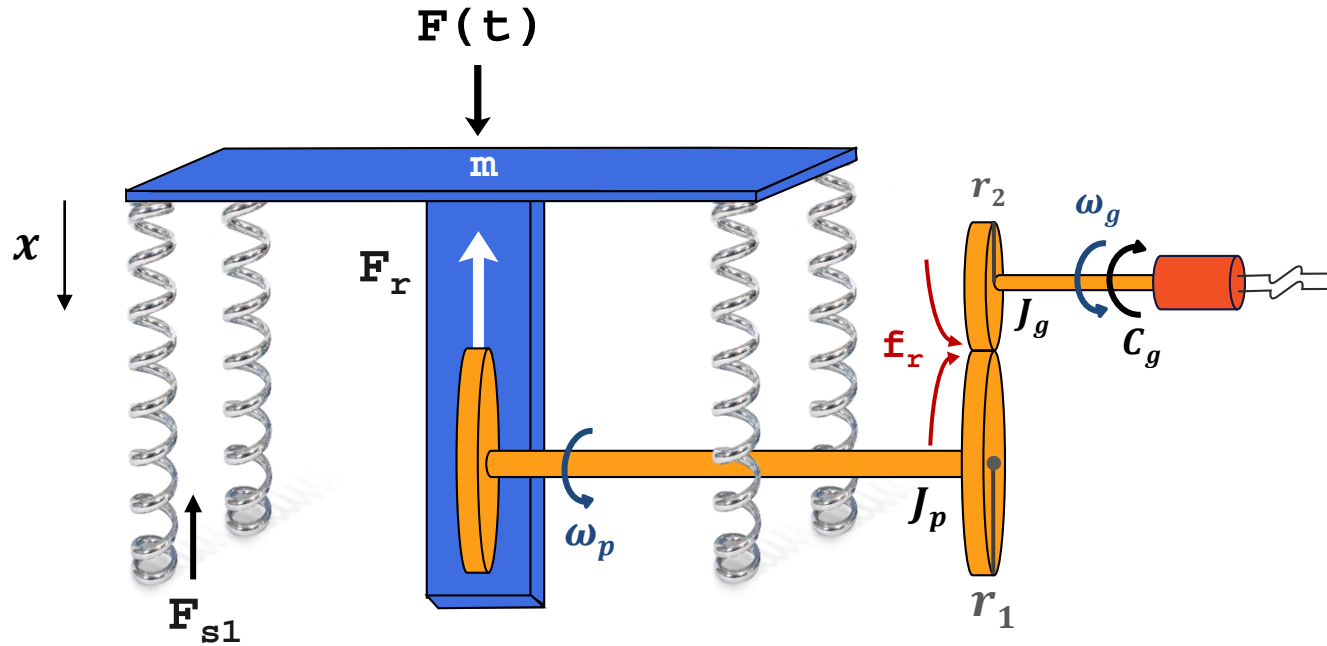
- **Le but** de cet objectif est de déterminer le courant  $i(t)$  en fonction de la force appliquée par le passager  $F(t)$  :



Système électromécanique de conversion d'énergie

# ↪ Modélisation du système mécanique :

- $m$  : masse de la plaque et de la crémaillère .
- $J_p, J_g$  : moments d'inertie des pignons .
- $x$  : déplacement de la crémaillère .
- $F(t)$  : force appliquée par le piéton .
- $F_r$  : force de friction entre crémaillère et pignon .
- $f_r$  : force de friction entre les deux pignons .
- $F_s$  : résultante de la tension des ressorts de rappel .
- $\omega_p, \omega_g$  : Vitesses angulaires des pignons .
- $C_g = K_t i$  : couple électromagnétique du générateur .



Avec :  $\dot{x} = r_1 \omega_p = r_2 \omega_g$

## ↪ Mise en équation :

→ *Système étudié n° 1 : { Plaque + crémaillère }*

*On applique le théorème de la résultante dynamique dans le cadre d'un référentiel galiléen,*

*on trouve :*

$$m \ddot{x} = F(t) - F_r - F_s \quad (1)$$

→ *Système étudié n° 2 et n° 3 : { Pignon 1 } et { Pignon 2 }*

*On applique le théorème du moment dynamique dans le cadre du même référentiel,*

*on trouve :*

$$J_p \dot{\omega}_p = J_p \frac{\ddot{x}}{r_1} = (F_r - f_r) r_1 \quad (2)$$

$$J_g \dot{\omega}_g = J_g \frac{\ddot{x}}{r_2} = f_r r_2 - C_g \quad (3)$$

## ↪ Mise en équation :

*En effectuant :*  $(1) + \frac{1}{r_1} (2) + \frac{1}{r_2} (3)$

*On obtient :*

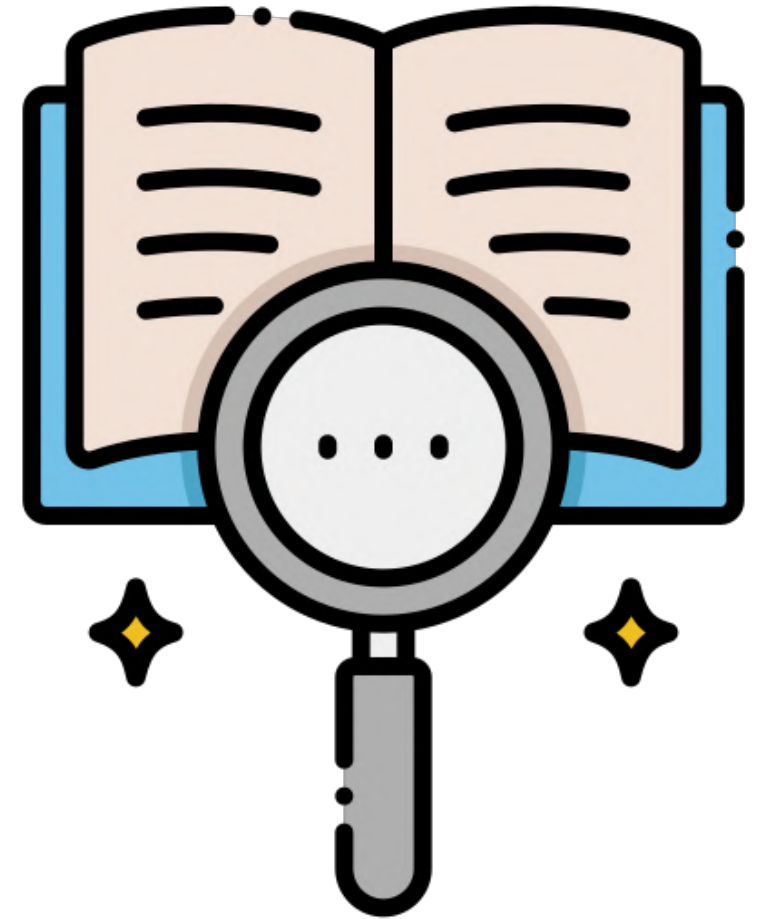
$$F(t) = M \ddot{x} + F_s + \frac{K_t}{r_2} i \quad (4)$$

*Avec :*

$$M = m + \frac{J_p}{r_1^2} + \frac{J_g}{r_2^2}$$

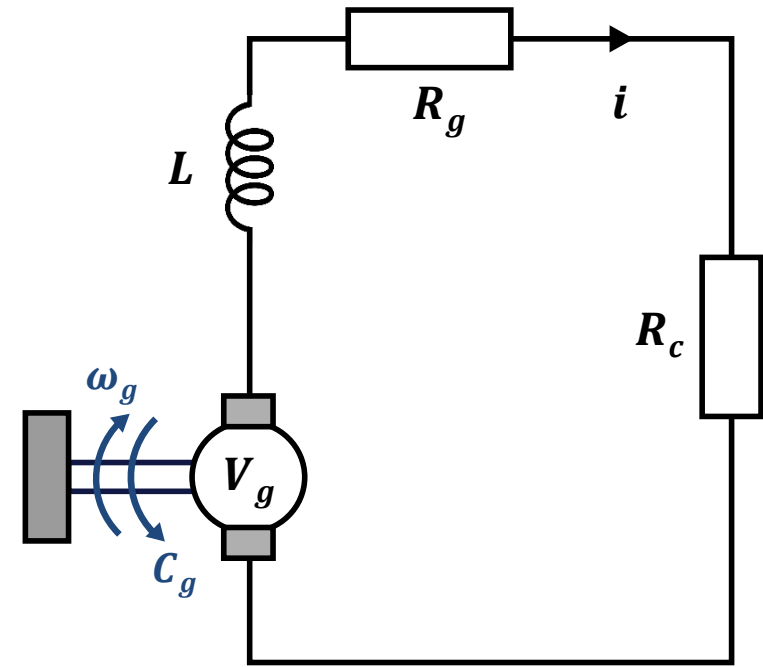
# OBJECTIF 2 :

Étude de  
génératrice



# ↪ Modélisation de système électrique :

- $V_{R_g}$  : tension au borne de la résistance du générateur .
- $V_{R_c}$  : tension au borne de la résistance de la charge .
- $V_g = K_t \omega_g$  : force électromotrice de générateur .



*Figure : schéma électrique équivalent*

## ↪ Mise en équation :

*On applique la loi des mailles, on trouve :*

$$V_L + V_{R_g} + V_{R_c} - V_g = 0$$

*On en déduit :*

$$\boxed{i + \left( \frac{R_g + R_c}{L} \right) i - \frac{K_t}{Lr_2} \dot{x} = 0} \quad (5)$$

# Finalemment :

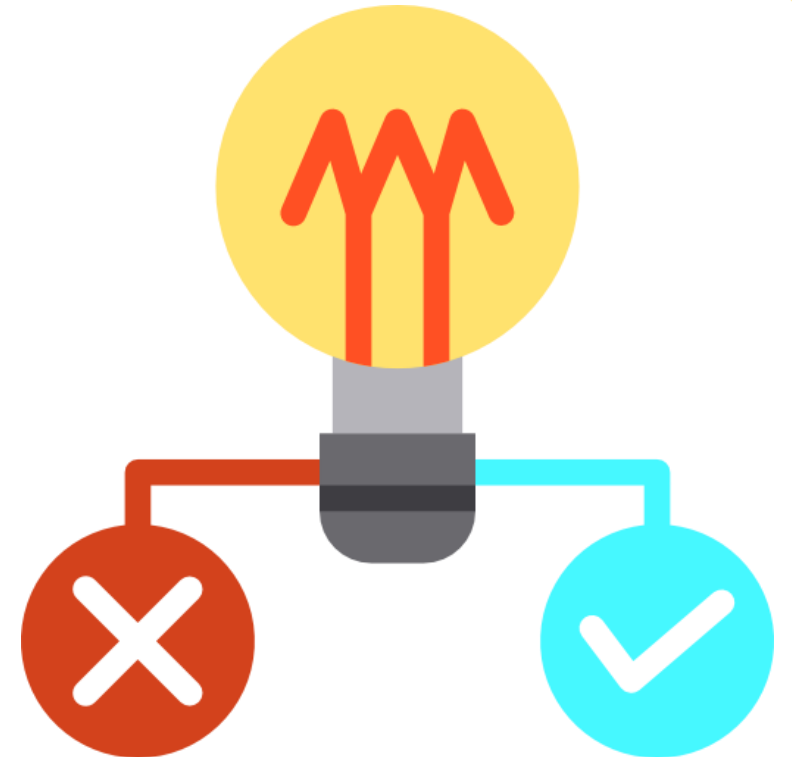
*Finalemment, de (4) et (5) on obtient l'équation différentielle matricielle suivante :*

$$\begin{pmatrix} \dot{i} \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_g + R_c}{L} & 0 & \frac{K_t}{L r_2} \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_t}{M r_2} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i \\ x \\ \dot{x} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{F(t) - F_s}{M} \end{pmatrix}$$

⇒ Ce système différentiel matriciel sera utilisé par la suite pour élaborer la modélisation complète du système sous Xcos (Scilab) .

# OBJECTIVE 3 :

Choix des  
composants





# Choix des composants :

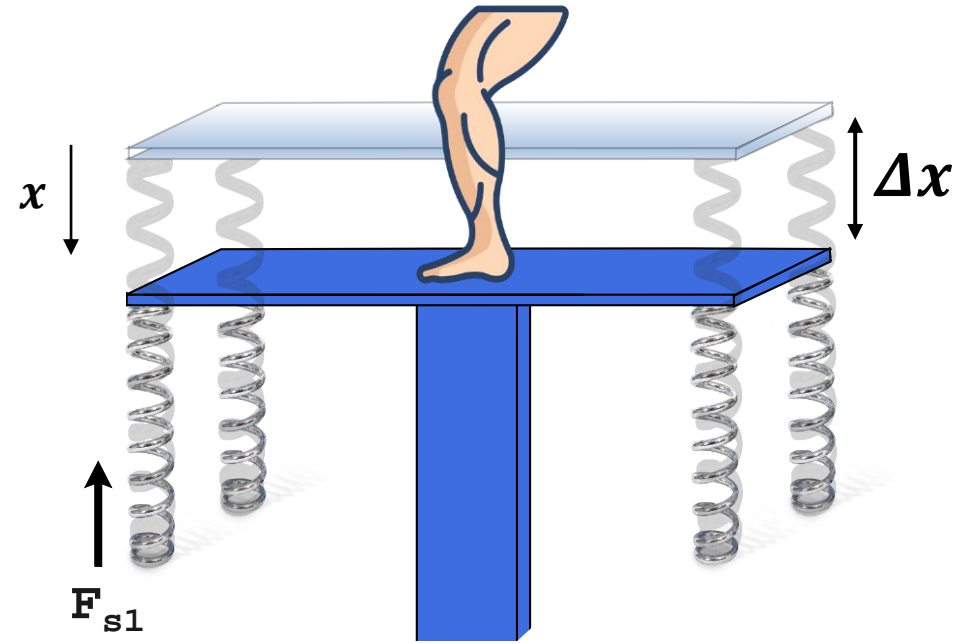
## 1. Dimensionnement du ressort :

Le système comporte **4** ressorts identiques en parallèles.  
On détermine la constante de raideur  $k$  en considérant **l'équilibre** sous une force **maximale**, exercée par une personne **immobile** .

$$\Rightarrow F_{r,repos} + F_{s,repos} - F_{max} = 0$$

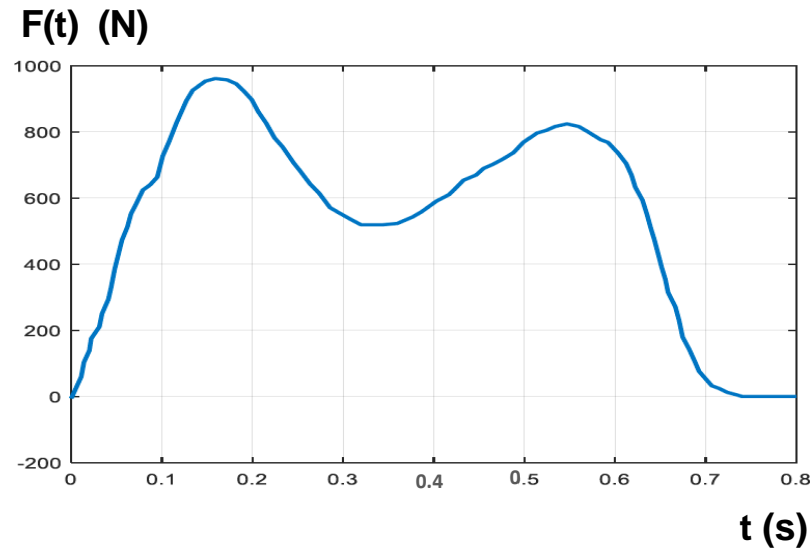
Le système est au repos, le frottement dynamique est donc nul, et le frottement statique est négligé :  $F_{r,repos} = 0 \text{ N}$

Alors :  $F_{s,repos} = F_{max}$



Alors :  $4k \Delta x = F_{max}$       Donc :  $k = \frac{F_{max}}{4 \Delta x}$

- D'après la courbe :



$\Rightarrow F_{max} = 955 \text{ N}$

*Figure : courbe representative de la force appliquée par le passager*

- Le cahier des charges impose que l'enfoncement de la dalle ne dépasse pas 1 cm sous l'effet de  $F_{max}$ .

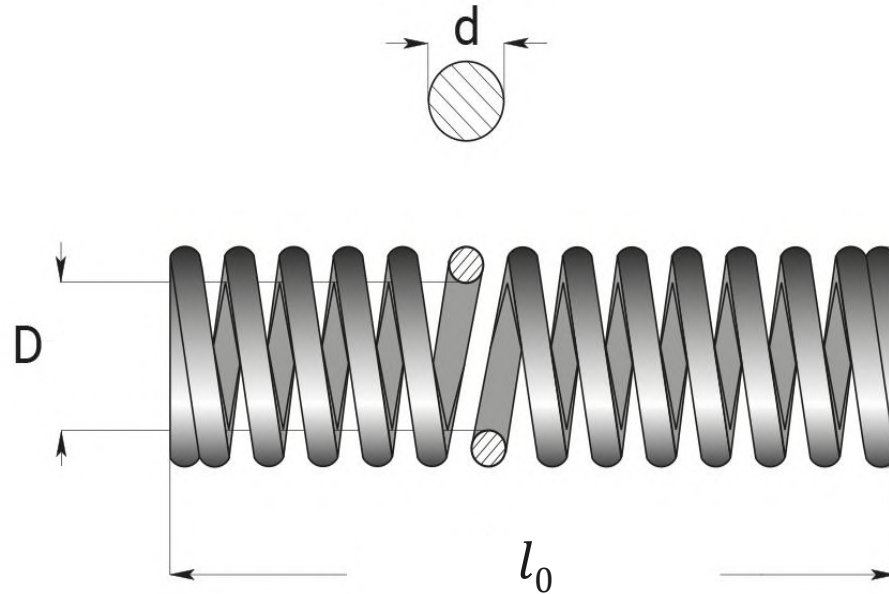
$\Rightarrow \Delta x = 1.5 \text{ cm}$

D'où :

$k = 15,916 \text{ N/mm}$

- On peut également définir un ressort avec son nombre de spires  $n$ , on peut le calculer à partir de la relation suivante que nous admettrons :

$$\Delta x = \frac{8 n F_s D^3}{G d^4}$$



Avec :  $G$  module d'élasticité transversal du matériau utilisé pour réaliser le ressort, pour les aciers,  $G \approx 80\,000 \text{ N/mm}^2$ .

- D'après le catalogue suivant, et pour un

$k = 15.916 \text{ N/mm}$  on a :

$d = 10 \text{ mm}$

$D = 80 \text{ mm}$

$l_0 = 370 \text{ mm}$

$$\Rightarrow n = \frac{G d^4}{8 k D^3}$$

$$\Rightarrow n = 12.26$$

d	Dm	Lo	Ln	Axe	Logement	Fn Newton	c N/mm	Référence
10,0	50,0	75,0	52,7	38,5	61,5	5199,3	232,86	D 7250
		110,0	74,9				148,18	D 7260
		165,0	110,8				95,88	D 7270
		230,0	150,3				65,20	D 7280
		335,0	217,0				44,05	D 7290
	63,0	96,0	60,6	51,1	74,9	4120,2	116,41	D 7300
		135,0	79,4				74,08	D 7310
		200,0	114,0				47,93	D 7320
		285,0	158,6				32,59	D 7330
		410,0	222,9				22,02	D 7340
	80,0	115,0	57,9	67,1	92,9	3247,1	56,85	D 7350
		175,0	85,2				36,18	D 7360
		255,0	116,3				23,41	D 7370
		370,0	166,0				15,92	D 7380
		540,0	238,1				10,76	D 7390
100,0	150,0	60,7	86,9	113,1	2599,7	29,11	D 7400	
	230,0	89,7				18,52	D 7410	
	345,0	128,1				11,99	D 7420	
	500,0	181,0				8,15	D 7430	
	730,0	257,9				5,51	D 7440	
125,0	205,0	65,4	111,0	139,0	2079,7	14,90	D 7450	
	315,0	95,7				9,48	D 7460	
	475,0	136,1				6,14	D 7470	
	690,0	191,6				4,17	D 7480	
	1015,0	277,4				2,82	D 7490	



# Choix des composants :

## 2. Choix de la génératrice :

❖ *Détermination de la vitesse de rotation maximale du générateur  $N_{gmax}$  :*

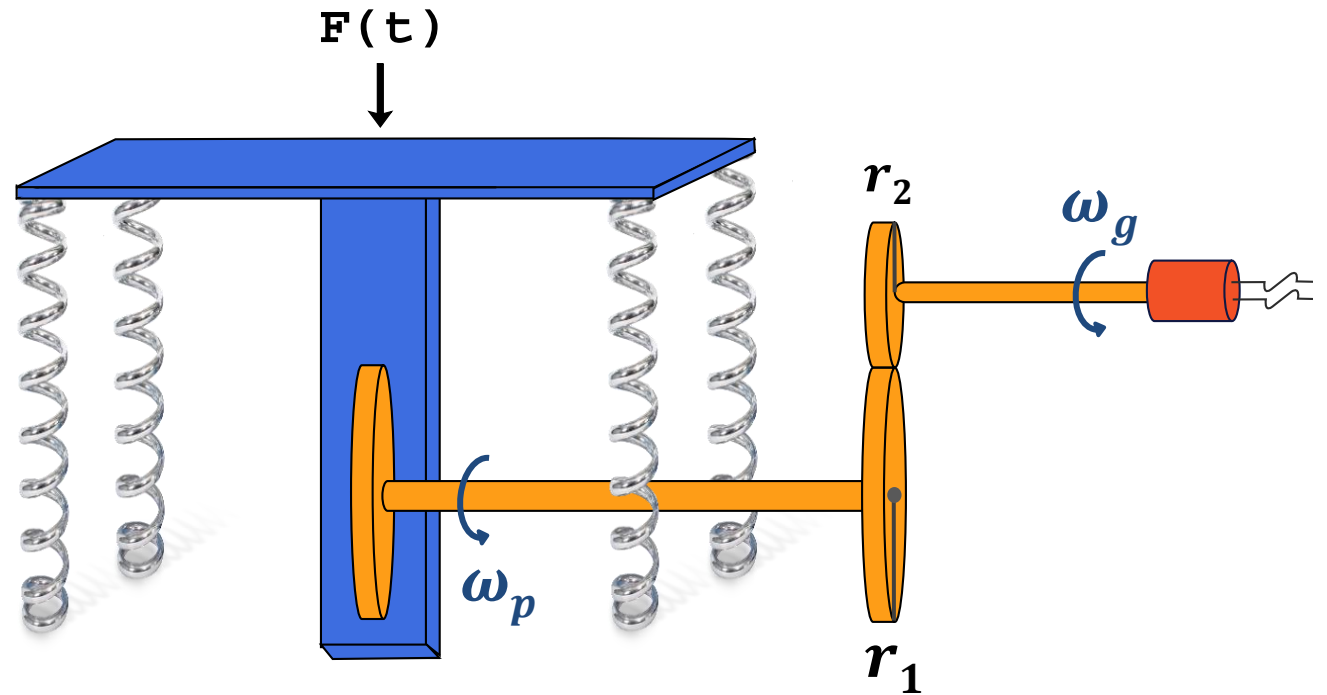
- On a : 
$$N_g = \frac{30}{\pi} \omega_g$$

- Avec : 
$$\omega_g = \frac{r_1}{r_2} \omega_p$$

- Et : 
$$\omega_p = \frac{V}{r_1}$$

Avec :  $V$  la vitesse de la crémaillère .

- Donc : 
$$N_g = \frac{30 V}{\pi r_2}$$



❖ *Détermination de la vitesse de rotation maximale du générateur  $N_{gmax}$  :*

➤ *Calculons de la vitesse maximale de la crémaillère  $V_{max}$  :*

❑ *Modélisation du système sans générateur :*

En basant sur l'équation obtenue dans l'objectif 1 ,

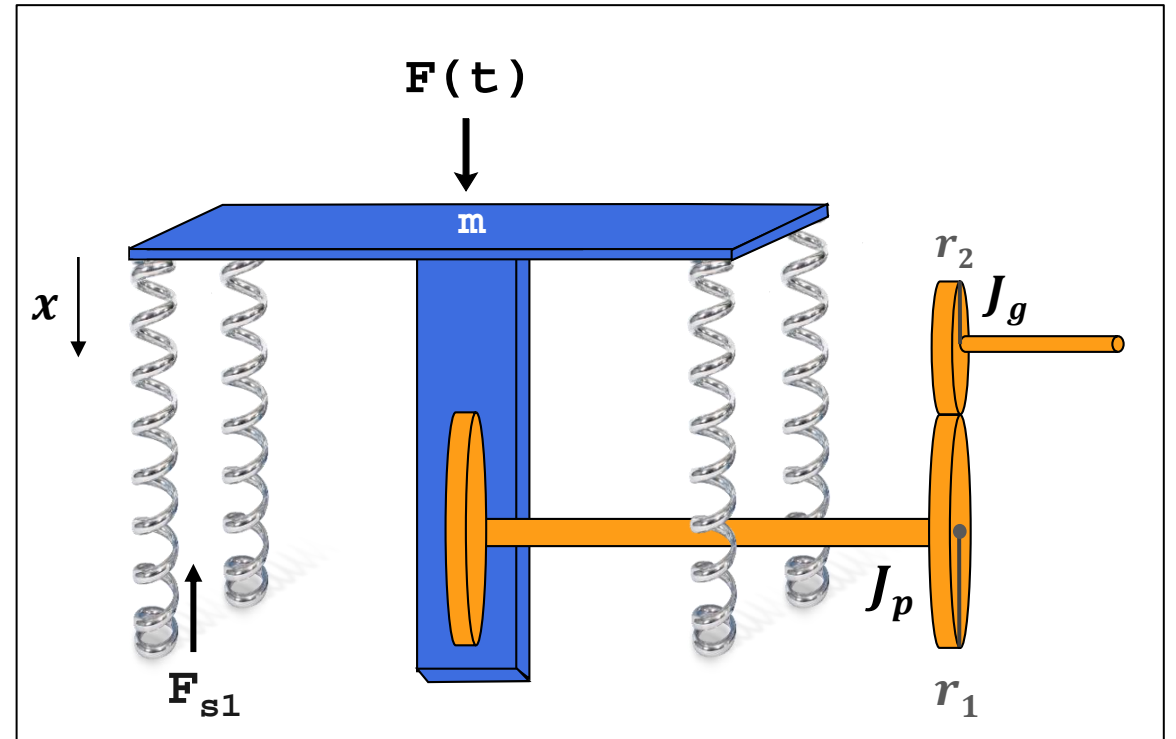
on utilise :  $F(t) = M \ddot{x} + F_s + \frac{C_g}{r_2}$

Avec :

- $F_s = 4k \Delta x$
- $C_g = 0$  (absence du générateur)

Donc :  $F(t) = M \ddot{x} + 4k \Delta x$

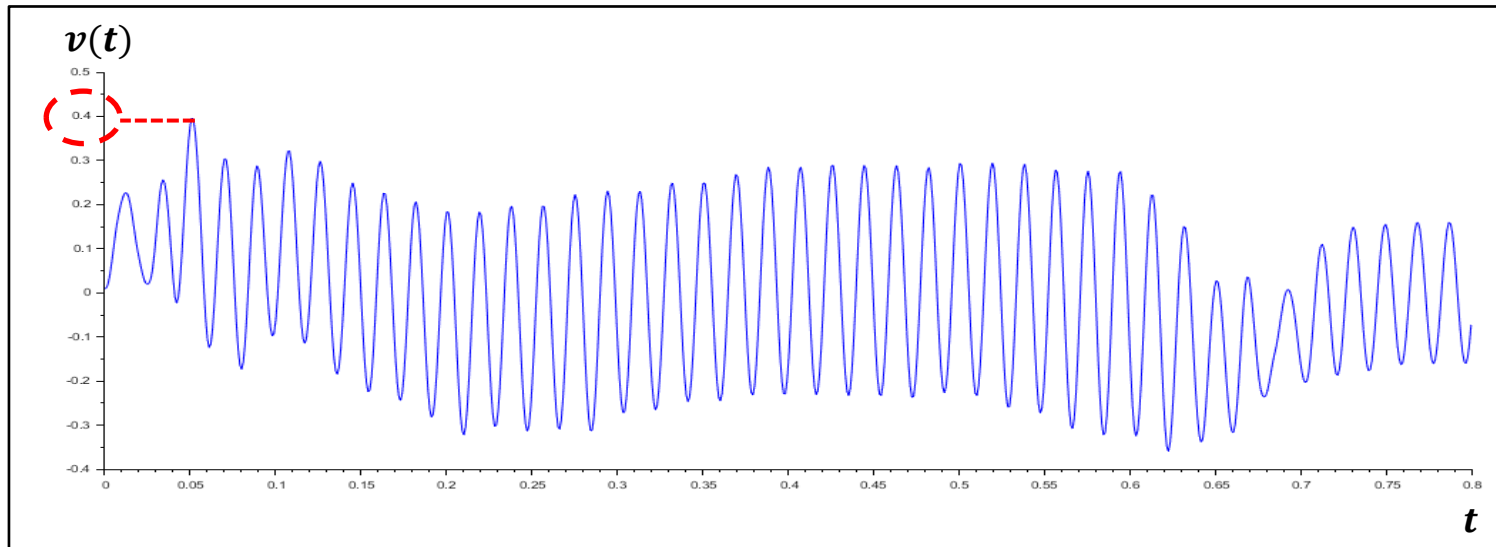
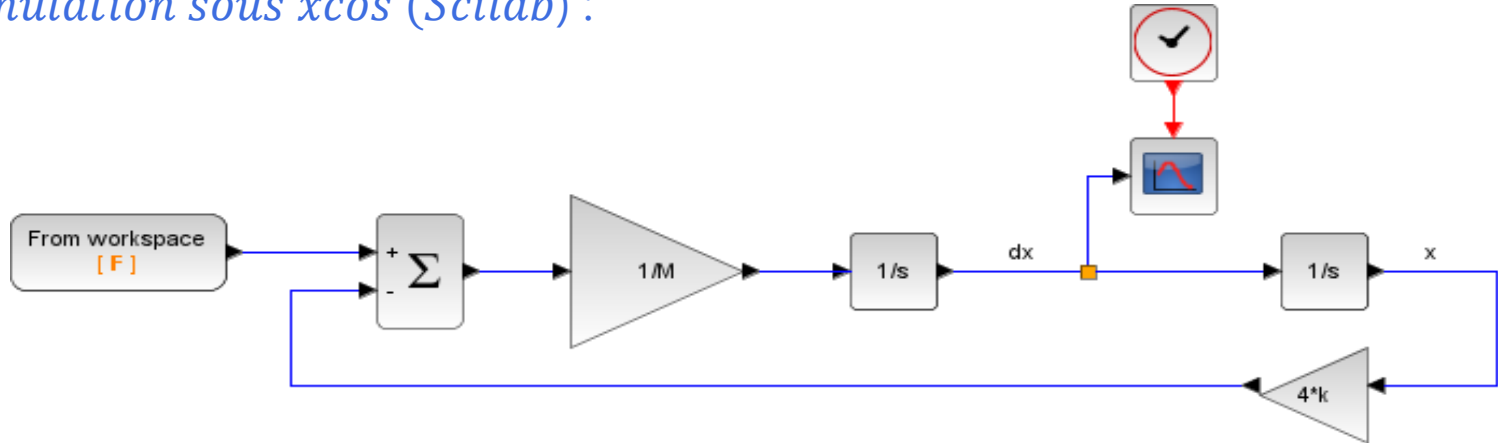
Avec :  $M = m + \frac{J_p}{r_1^2} + \frac{J_g}{r_2^2}$



❖ *Détermination de la vitesse de rotation maximale du générateur  $N_{gmax}$  :*

➤ *Calculons de la vitesse maximale de la crimaillère  $V_{max}$  :*

☐ *Simulation sous xcos (Scilab) :*

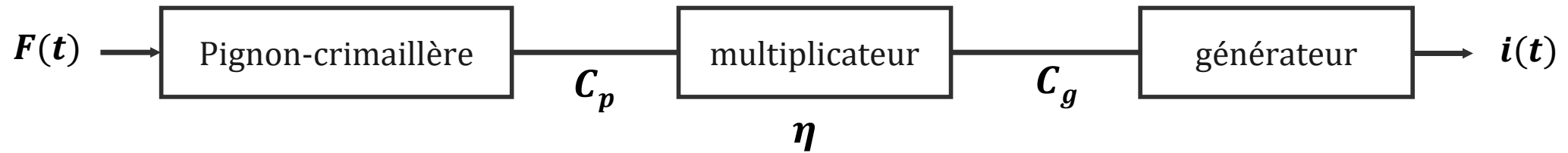


$V_{max} = 0.4 \text{ m/s}$

**Donc :**

Avec  $r_2 = 0.75 \text{ cm}$  on obtient : 
$$N_{gmax} = \frac{30 V_{max}}{\pi r_2} \implies N_{gmax} = 509.29 \text{ tr/min}$$

❖ *Détermination du couple maximale du générateur  $C_{gmax}$  :*



On a : 
$$C_g = \eta C_p \frac{r_2}{r_1}$$

- Le rendement de l'engrenage est compris entre 0.9 et 0.98 On prend :  $\eta = 0.9$
- Avec :  $r_1 = 1.5 \text{ cm}$  et  $r_2 = 0.75 \text{ cm}$

➤ Calcul de couple maximale transmis au pignon 1  $C_{pmax}$  :

- Pour simplifier, on modélise  $F_r$  comme une force de frottement visqueux :

$$F_r = c \dot{x} \quad c = 15 \text{ N s / m}$$

- Et :

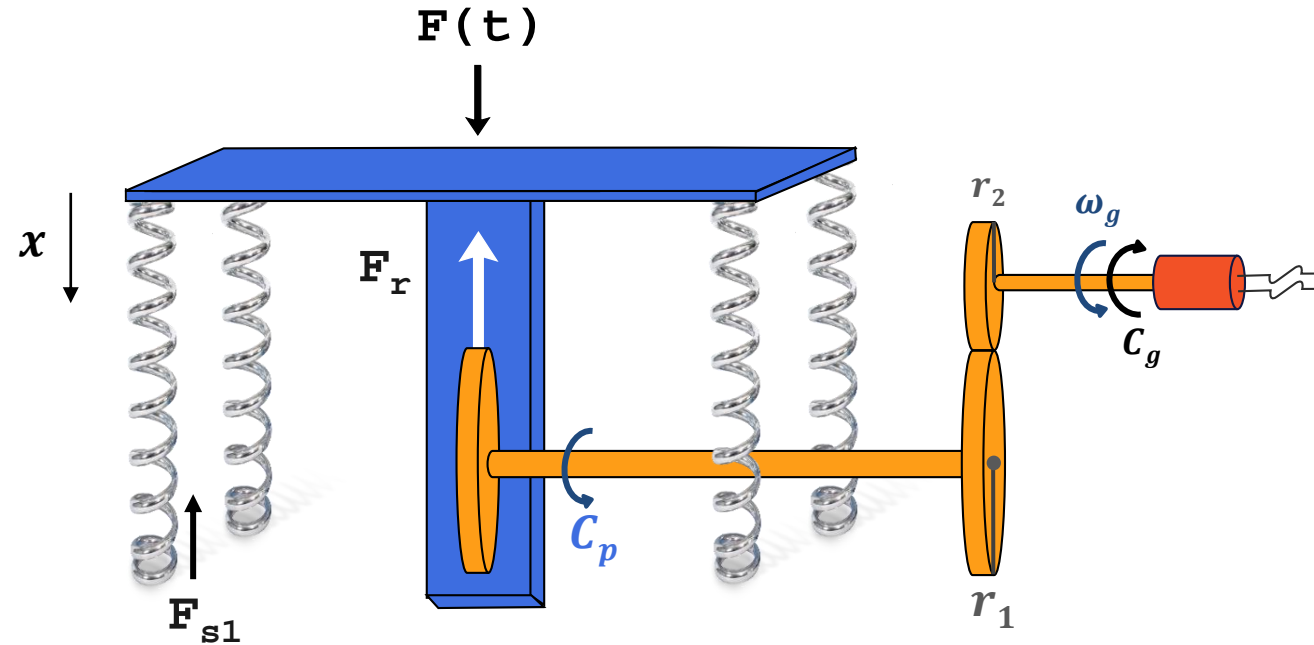
$$F_s = 4k \Delta x$$

- Donc :

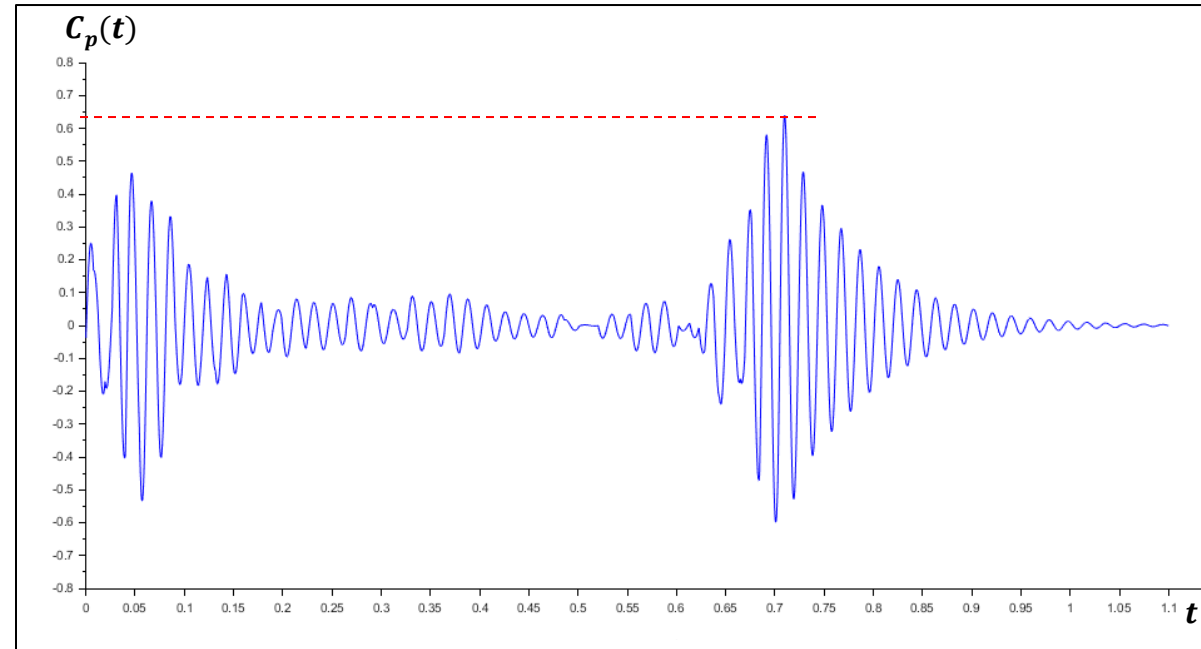
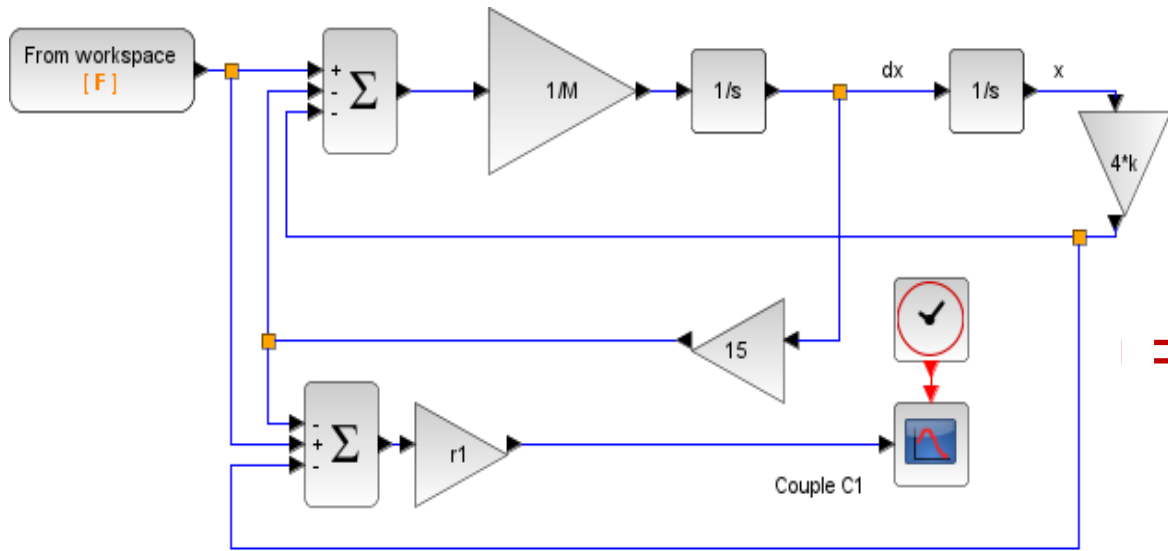
$$\begin{aligned} C_p &= (F(t) - F_s - F_r) r_1 \\ &= (F(t) - 4k \Delta x - c \dot{x}) r_1 \end{aligned}$$

⇒ Cette expression sera utilisée dans le modèle

Xcos pour simuler le couple transmis au pignon 1 :



➤ Calcul de couple maximale transmis au pignon 1  $C_{1max}$  :



⇒  $C_{pmax} = 0.65 \text{ Nm}$

Donc :  $C_{gmax} = \eta C_{pmax} \frac{r_2}{r_1}$

AN :  $C_{gmax} = 0.3 \text{ Nm}$

## 2. Choix de la génératrice :

Données techniques							
Modèle		RA 42-30 001	RA 42-30 002	RA 42-30 003	RA 42-30 004	RA 42-30 005	RA 42-30 006
Tension d'alimentation (Vcc)		12	24	48	12	24	48
Vitesse de sortie (min <sup>-1</sup> )	Rapport de réduction	Références des moteurs utilisés avec les réducteurs et couple de sortie nominal (N.m)					
		MA 42-25 001	MA 42-25 002	MA 42-25 003	MA 42-40 001	MA 42-40 002	MA 42-40 003
590	5,34÷1	0,14	0,17	0,16	0,26	0,29	0,31
358	8,79÷1	0,23	0,28	0,26	0,43	0,48	0,51
269	11,7÷1	0,30	0,38	0,34	0,57	0,65	0,69
127	24,8÷1	0,58	0,72	0,65	1,08	1,23	1,30
89	35,2÷1	0,82	1,03	0,92	1,54	1,74	1,85

⇒ Donc le générateur choisi est un motoréducteur ( modèle *RA 42 – 30 005* ) composé d'un moteur de référence *MA 42 – 40 002* .



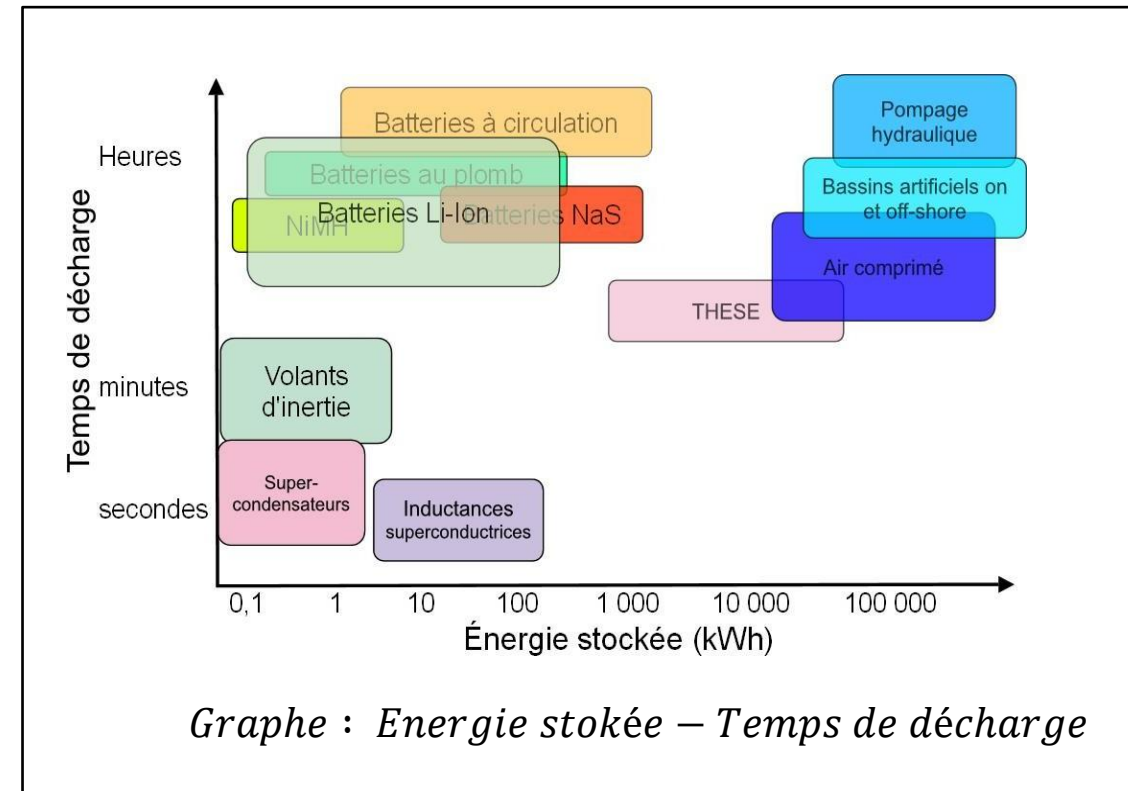
# Choix des composants :

## 3. Choix de la solution de stockage :

Notre système produit une **faible Energie**, une batterie à une faible puissance de charge et à une **décharge lente** est préférable .

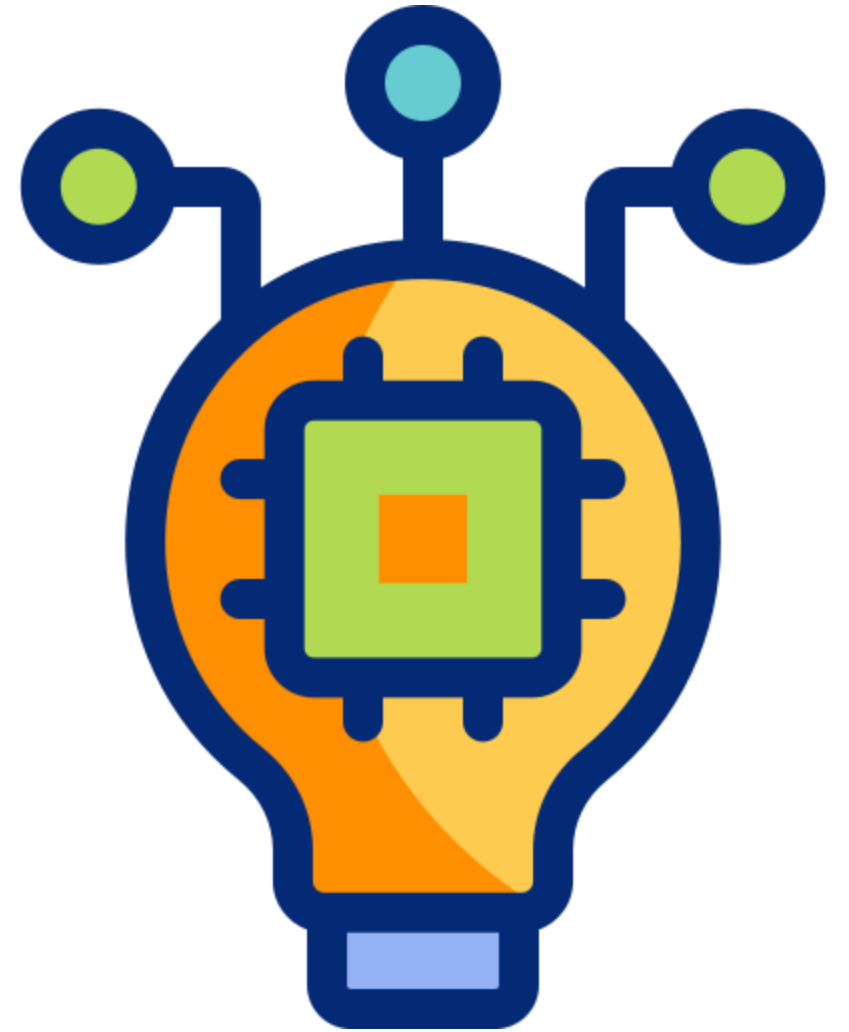
D'après le graphe *Energie stockée – Temps de décharge* la solution choisie est l'utilisation de :

***Batteries Li – Ion***



# OBJECTIFE 4 :

Simulation du  
fonctionnement  
du système

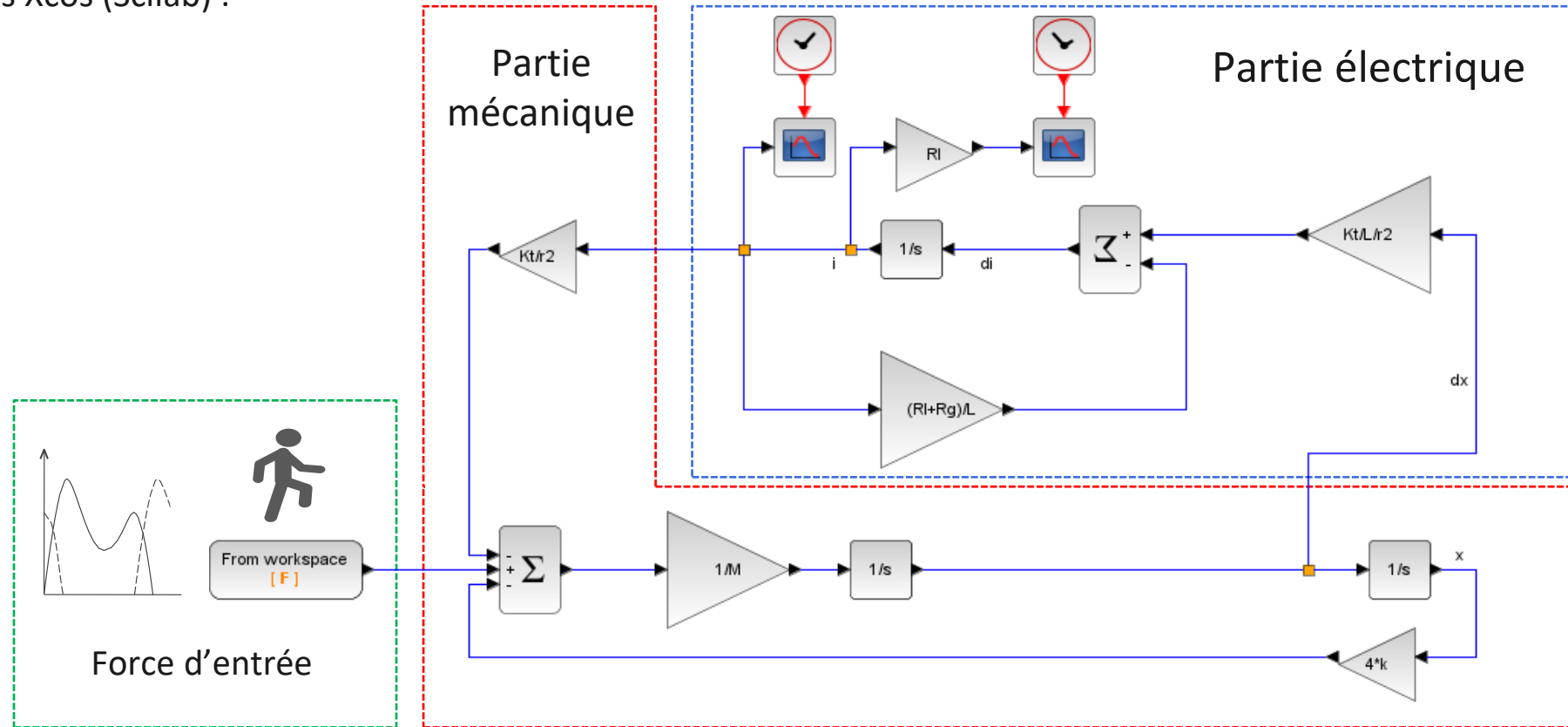




# Simulation globale du fonctionnement du système :

## Simulation du modèle électromécanique sur Scilab :

En se basant sur l'équation différentielle obtenue précédemment, une modélisation complète du système a été réalisée sous Xcos (Scilab) :

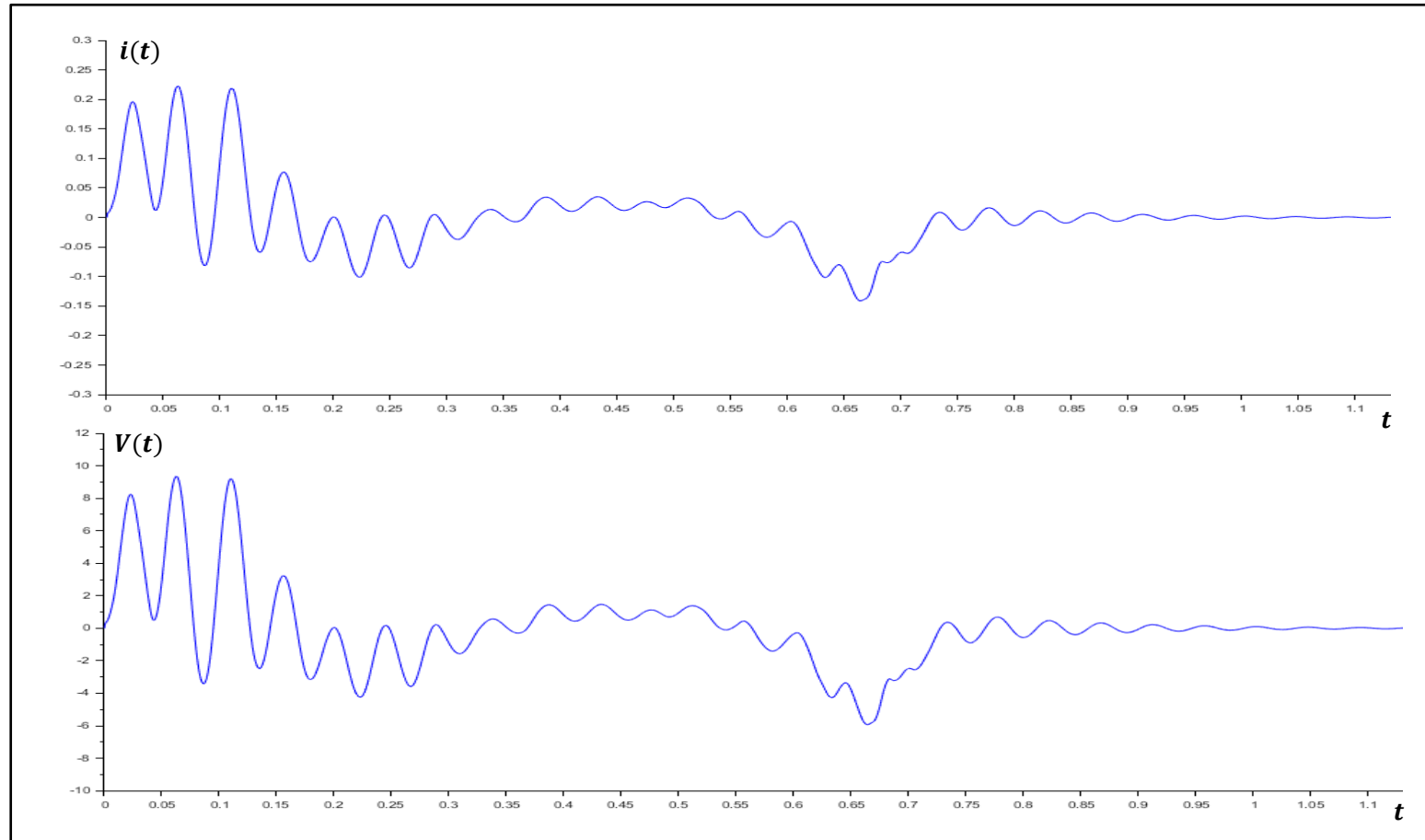


**Figure** : Modèle Xcos d'un générateur électromagnétique basé sur un mécanisme à pignon crémaillère



# Simulation globale du fonctionnement du système :

## Résultat de la simulation sur Scilab :



$\Rightarrow I_{max} = 0.225 \text{ A}$

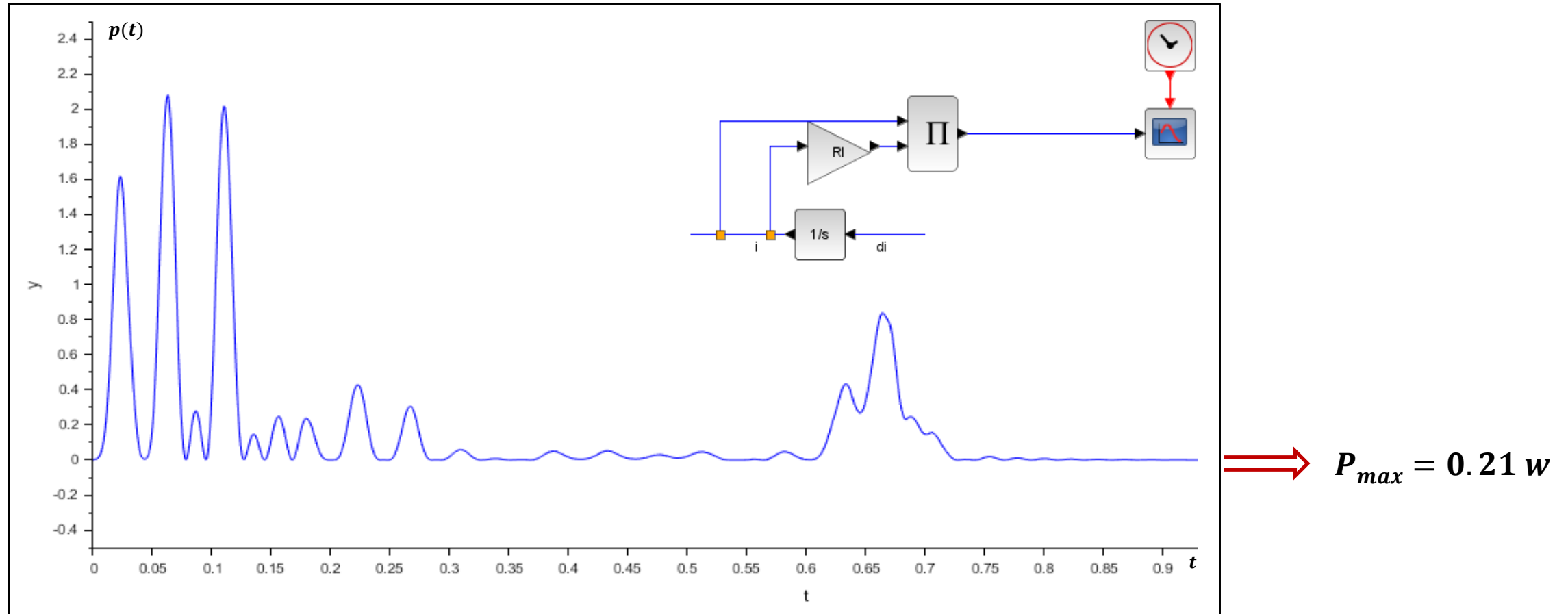
$\Rightarrow V_{max} = 9.3 \text{ V}$

Figure : Courant et tension du modèle à pignon crémaillère issue de la simulation ( $R_c = 42 \text{ Ohm}$ )



# Simulation globale du fonctionnement du système :

## Résultat de la simulation sur Scilab :



*Figure : Puissance générée avec une charge résistive ( $R_c = 42 \text{ Ohm}$ )*



# Simulation globale du fonctionnement du système :

## Performances du générateur EM :

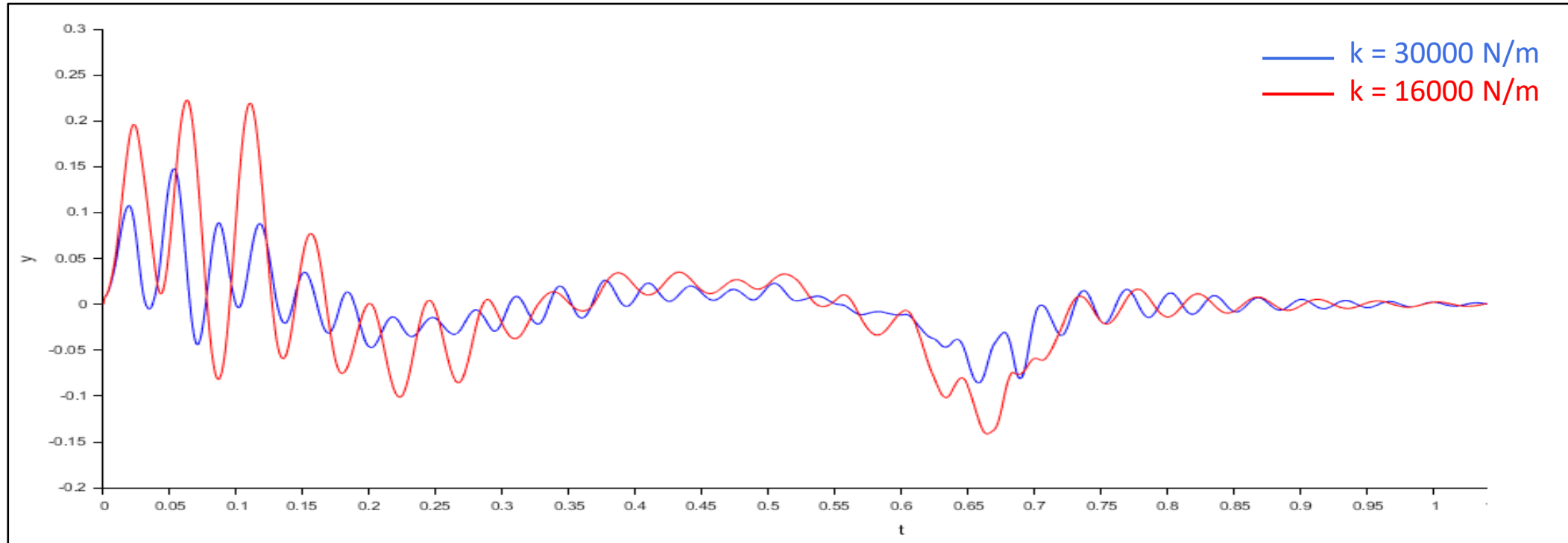
Grandeur	Valeur par pas
Courant maximal	225 mA
Courant moyen	47 mA
Tension maximale	9.3 V
Tension moyen	2 V
Puissance maximale	0.21 w
Puissance moyenne	0.2 w
Energie générée	0.2 J

⇒ Les grandeurs électriques générées à chaque pas sont de faible amplitude, ce qui est attendu pour un système basé sur une sollicitation humaine. Elles restent toutefois suffisantes pour alimenter des appareils à faible consommation .



# Simulation globale du fonctionnement du système :

## Influence de la raideur des ressorts sur le courant générée :



*Figure : Courant générée pour deux valeurs de raideur :  $k = 16000 \text{ N/m}$  et  $k = 30000 \text{ N/m}$*

⇒ Une raideur trop élevée réduit le courant, La valeur  $16000 \text{ Nm}$  reste optimale. Car elle maximise le courant sans dépasser l'enfoncement maximal autorisé ( $\Delta x \leq 1.5 \text{ cm}$ ).



# Simulation globale du fonctionnement du système :

## Interprétation :

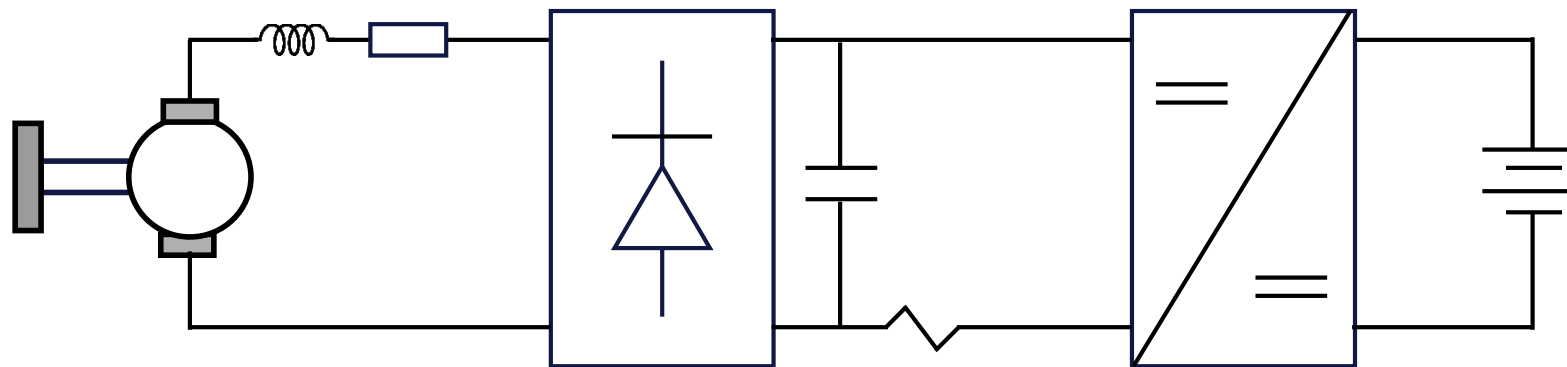
Les signaux électriques issus du générateur présentent des variations rapides (instabilités) .

### *Problème :*

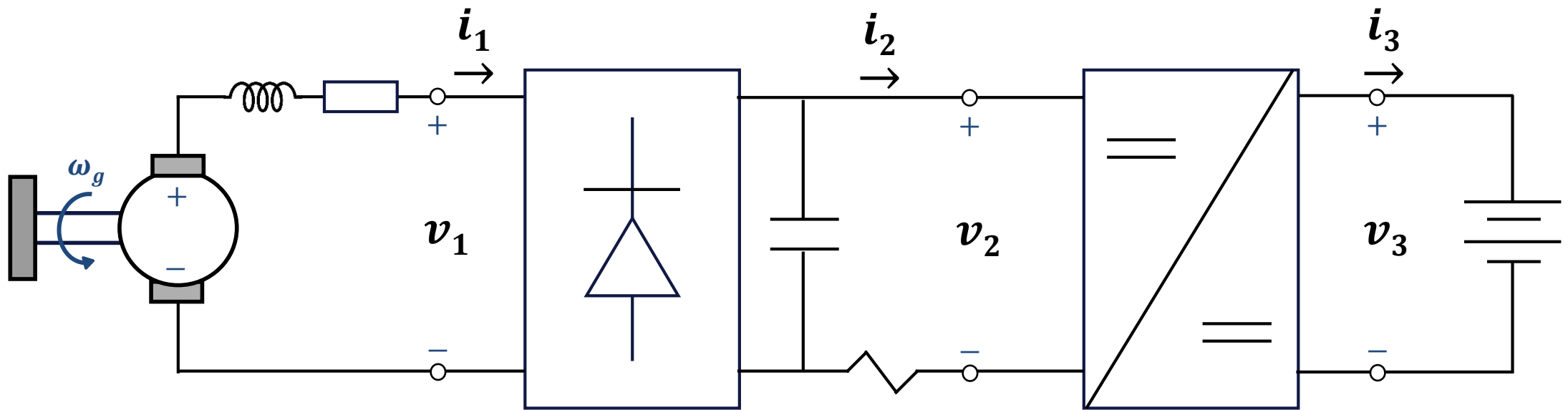
Cette instabilité rend la recharge directe de la batterie difficile et inefficace .

### *Solution :*

Un convertisseur de type buck-boost est utilisé pour adapter la tension de sortie et permettre une charge efficace de la batterie :



→ Description du convertisseur proposé :



⇒ Ce convertisseur permet de stabiliser la tension issue du générateur avant de la transférer vers la batterie .

# CONCLUSION :

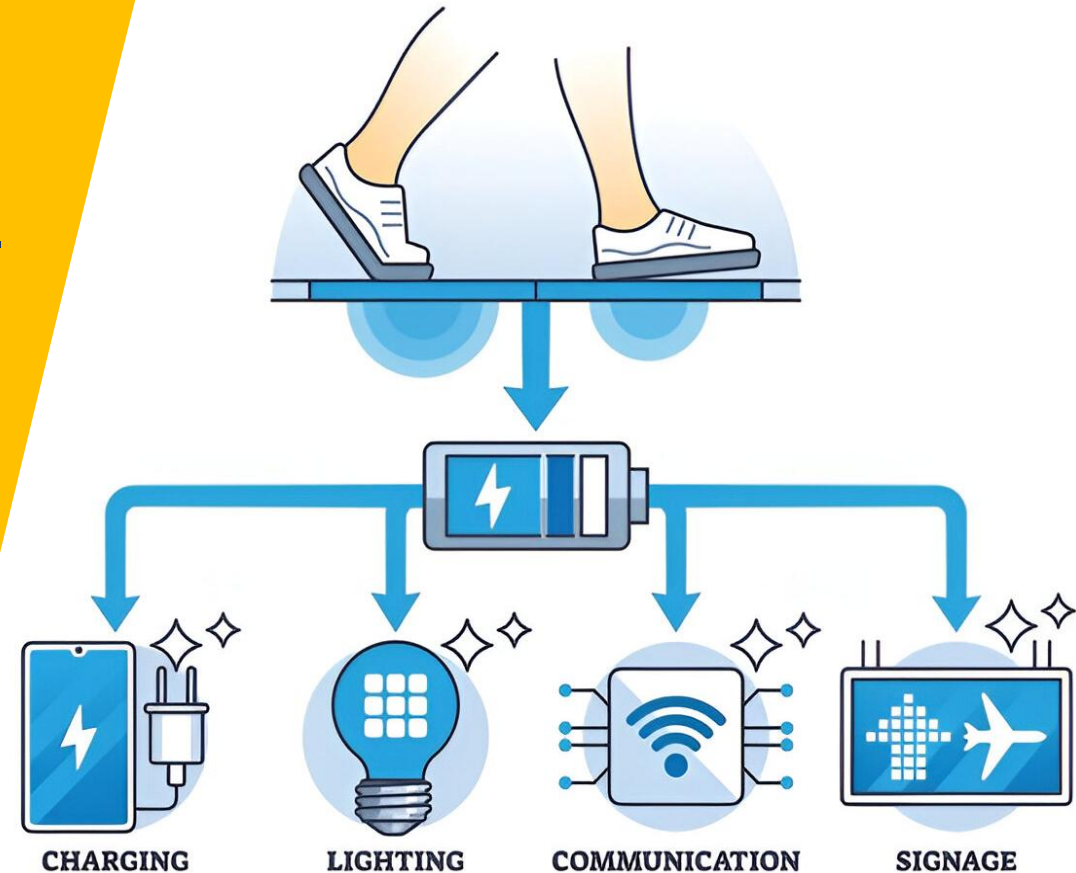
*Avec une énergie moyenne d'environ 0.2 J par pas, la multiplication des modules en série permettrait de générer suffisamment d'énergie pour alimenter certains équipement de la gares tels que l'éclairage, les capteurs de présences ou les systèmes de signalisation .*

**MERCI POUR VOTRE  
ATTENTION**



# Conversion de l'énergie cinétique des pas des piétons en énergie électrique dans les gares

Code CNC : SF020T



**Réalisé par :**

**El Makhloufy Adil**

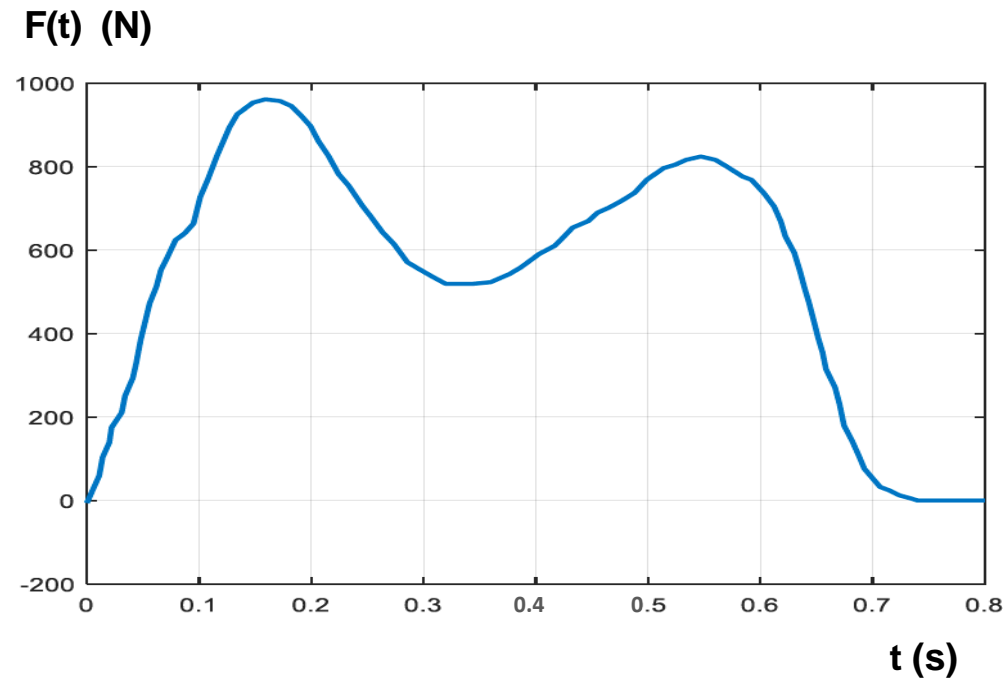
**Encadré par :**

**Abarbas Meriem**



**Annexes :**

## Annexe 1 : Courbe représentative de la force appliquée par le passager



Source : Design, simulation and experiment of a novel high efficiency energy harvesting paver, Mingyi Liu, Rui Lin, Shengxi Zhou, Yilun Yu, Aki Ishida, Margarita McGrath, Brook Kennedy, Muhammad Hajj, Lei Zuo .

## Annexe 2 : Données d'entrée pour la simulation Xcos

```
1 m = 3 ; ..... // Masse (kg)
2 r2 = 0.0075 ; ..... // Rayon (m)
3 r1 = 0.015 ;
4 Jg = 1.7*(10**-6) ;
5 Jp = 1.5*(10**-5) ;
6 Kt = 0.5 ; ..... // Constante de la génératrice (V.s/rad)
7 L = 10**-3 ; ..... // Inductance (H)
8 Rg = 42 ; ..... // Résistance de la génératrice (Ohm)
9 Rl = 42 ; ..... // Résistance de la charge (Ohm)
10 k = 16000 ; ..... // Constante de la force élastique (N/m)
11 M = m + Jg/(r1**2) + Jp/(r2**2) ;
12
13 TIPE = csvRead("TIPE.csv");
14 values = TIPE(:, 1);
15 t = TIPE(:, 2);
16 F.time = t;
17 F.values = values;
18 F.time = t;
19 F.time = double(F.time);
20 F.values = double(F.values);
21
```