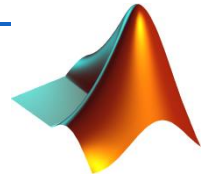


# La puissance en courant alternatif

## Prise en main de Matlab / Simulink



### 1 Objectifs :

Etude de circuits électriques alimentés en tensions sinusoïdales. Simulation avec simulink puis transfert des données dans matlab pour analyse. L'apprentissage du logiciel Matlab se fera au travers d'exemples de difficulté progressive.

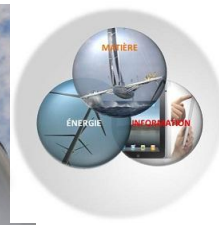
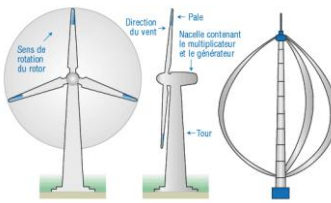
L'ergonomie et le visuel du logiciel sont relativement faibles. Ce défaut est assez facilement surmonté dès que l'on découvre la puissance de calcul de celui-ci. Les simulations seront réalisées à partir de Simulink avec envoi des résultats dans Matlab pour post traitement.

### 2 Première étude : alimentation d'une charge résistive avec une tension monophasée.

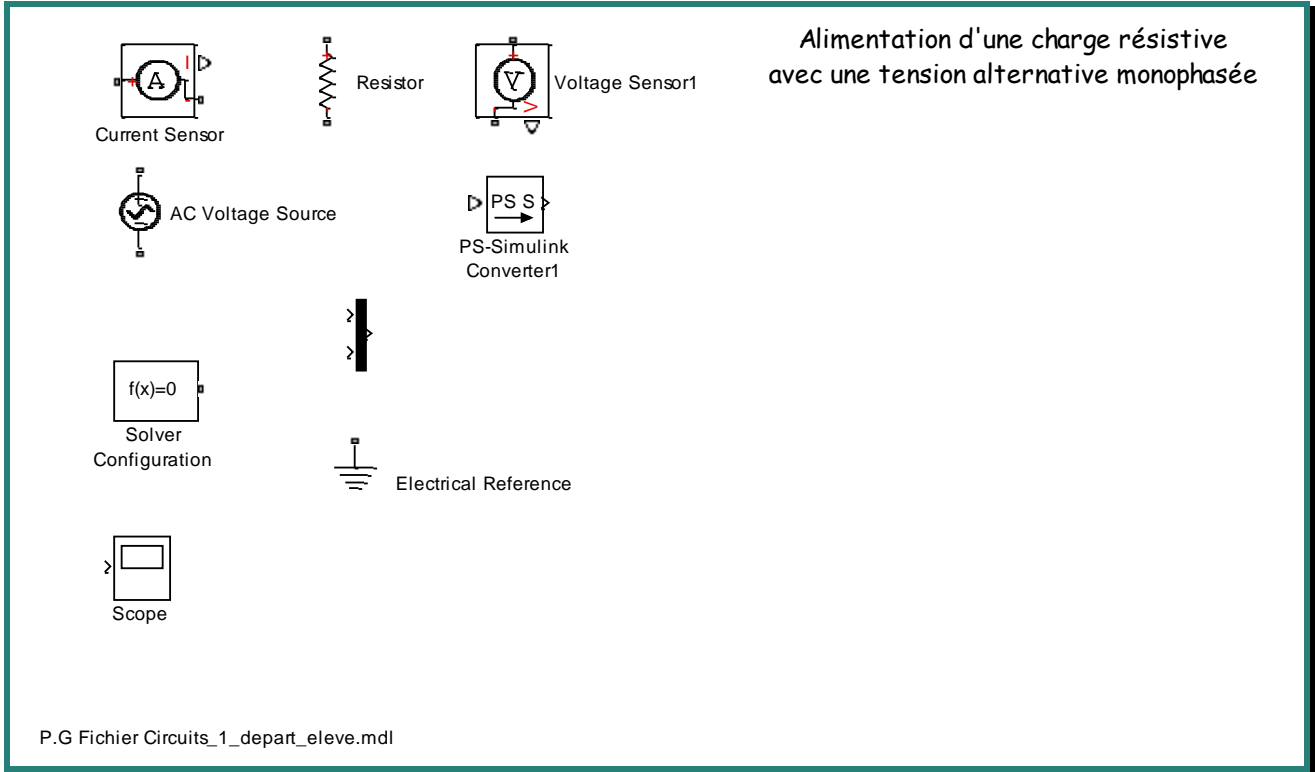
#### 2.1 Se positionner dans l'espace de travail

Il faut avant tout travail se positionner dans l'espace de travail indiqué par le professeur :

Saisie du schéma à simuler

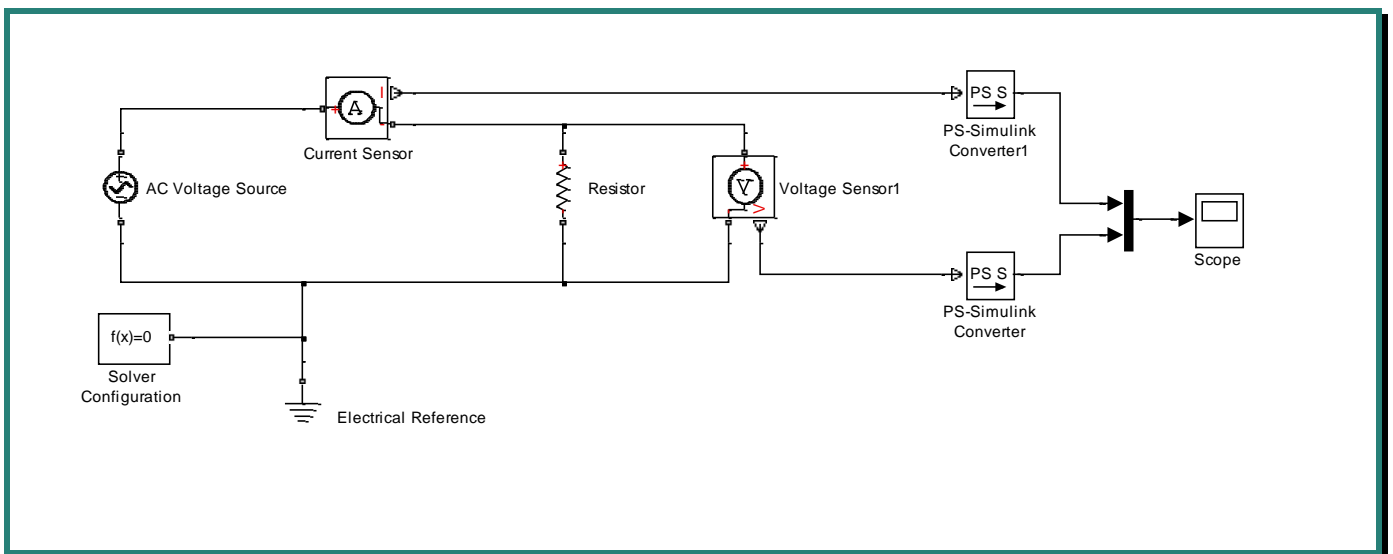


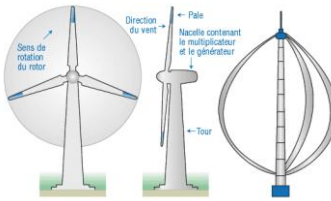
Ouvrir le modèle Circuits\_1\_depart\_eleve.mdl celui-ci contient tous les éléments nécessaires mais il faut réorganiser et relier ces éléments pour aboutir au schéma définitif. Voilà la situation de départ :



Voilà le schéma terminé, la source alternative de tension alimente une résistance. Pour accéder aux paramètres des éléments il suffit de cliquer deux fois dessus. La configuration est donnée ci-dessous :

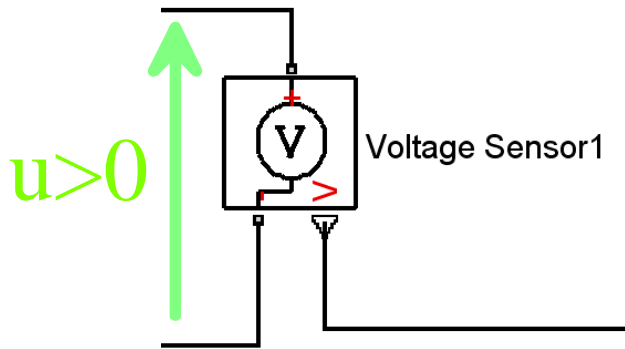
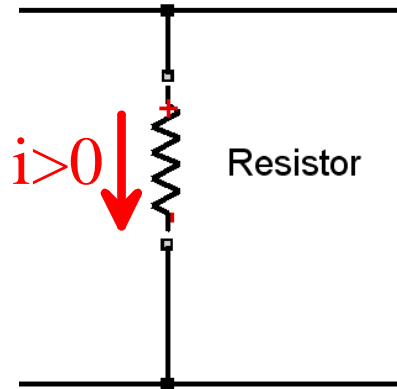
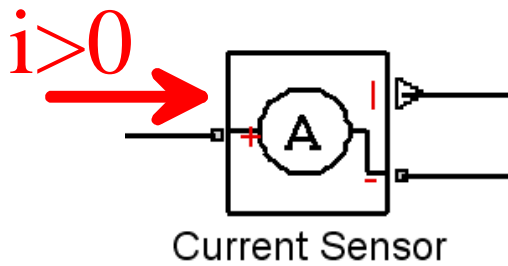
- La source de tension est configurée en une source alternative de fréquence (Frequency) 50Hz, d'amplitude crête (Peak amplitude) de 311V, d'une phase à l'origine (Phase shift) nulle.
- La résistance a une valeur de  $10\Omega$ .





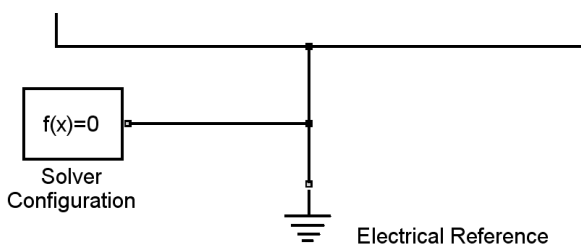
## 2.2 Quelques commentaires :

Dans tout simulateur, et Simulink n'échappe pas à la règle, les composants sont polarisés. La borne positive est celle par laquelle entre le courant compté alors positivement. Exemples :

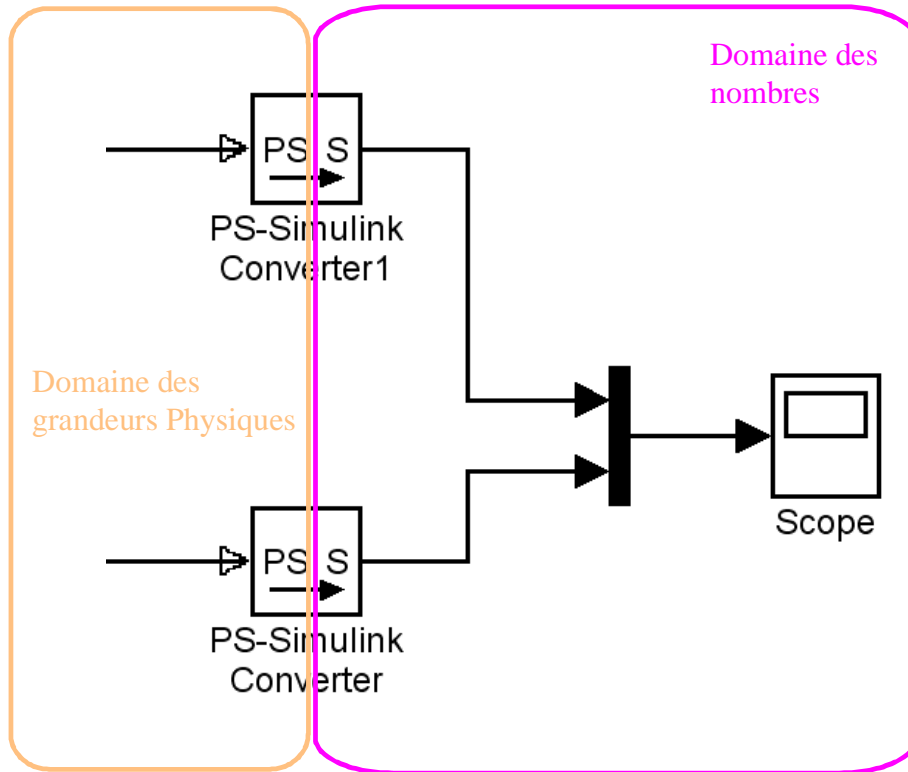
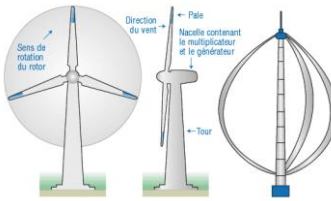


Notez que l'ampèremètre est branché en série, le voltmètre en parallèle, les instruments virtuels suivent les mêmes règles que les vrais instruments !

Deux éléments sont obligatoirement placés sur la simulation, la référence de tension et le solveur numérique, celui-ci est aussi configurable pour une utilisation avancée, inutile pour le moment.

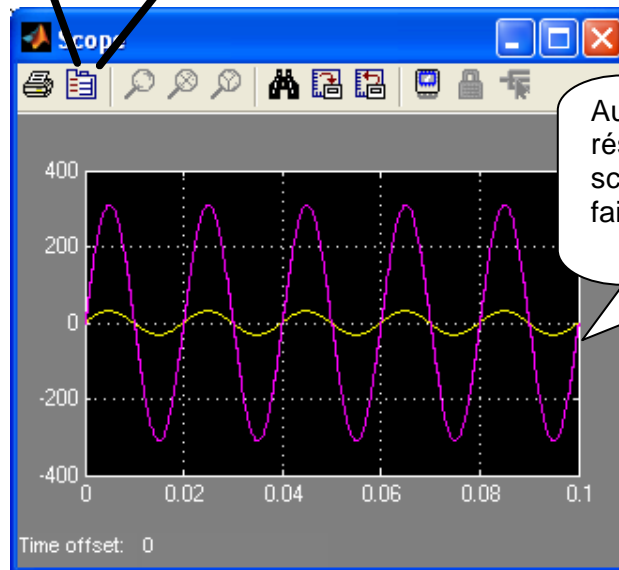
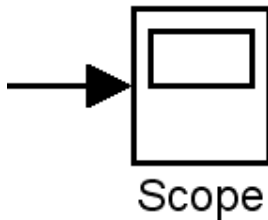
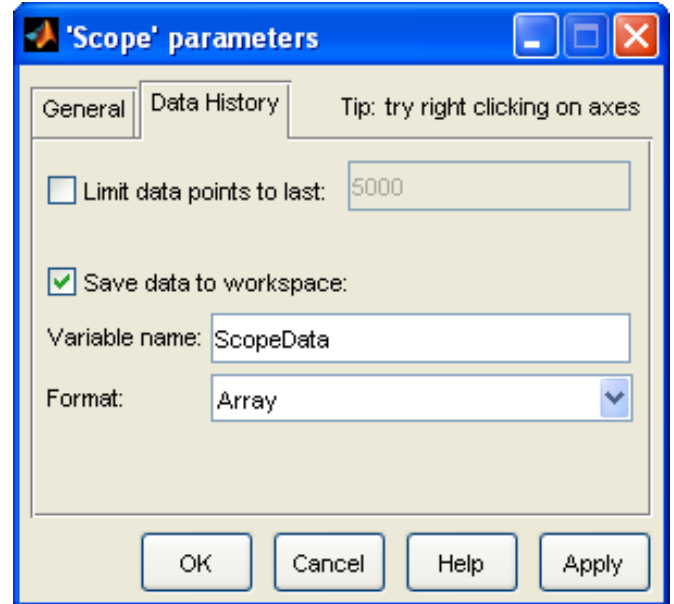
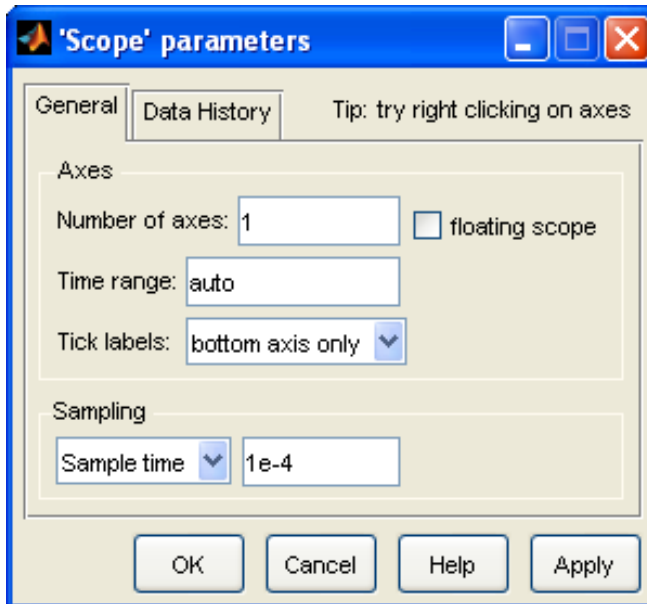
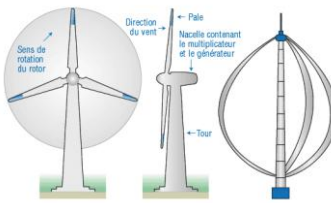


L'univers matlab est divisé en deux parties, le domaine des unités physiques réelles PS et le domaine des nombres mathématiques S. Il faut donc obligatoirement utiliser le bloc PS-Simulink convertir pour passer d'un domaine dans un autre. Voir sur la figure ci-dessous :



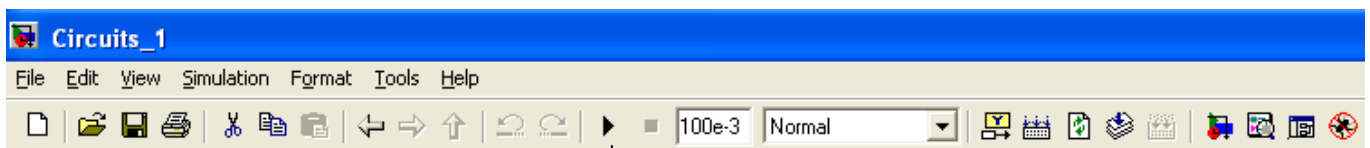
Enfin l'outil de visualisation des données, l'oscilloscope (Scope). Celui-ci est très important car c'est lui qui permet l'envoi des données numériques dans matlab. Il est aussi configurable, pour le post traitement des données la case **Save data to workspace** doit être cochée. (Voir ci-dessous).

Notez la philosophie de l'outil le workspace, c'est-à-dire l'espace de travail c'est matlab !

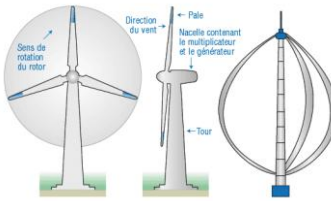


Au passage voilà le résultat graphique du scope on ne peut pas faire plus moche !

Le schéma étant achevé il est temps de lancer la simulation :



Lancer la simulation



### 2.3 Post traitement du premier exemple.

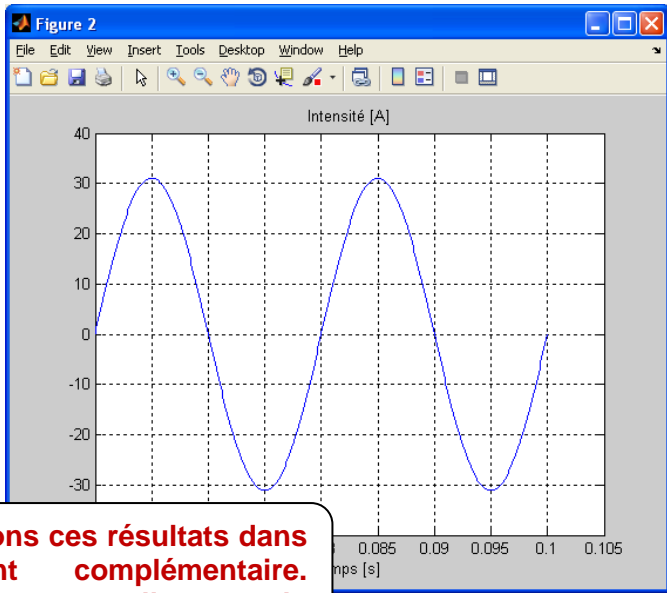
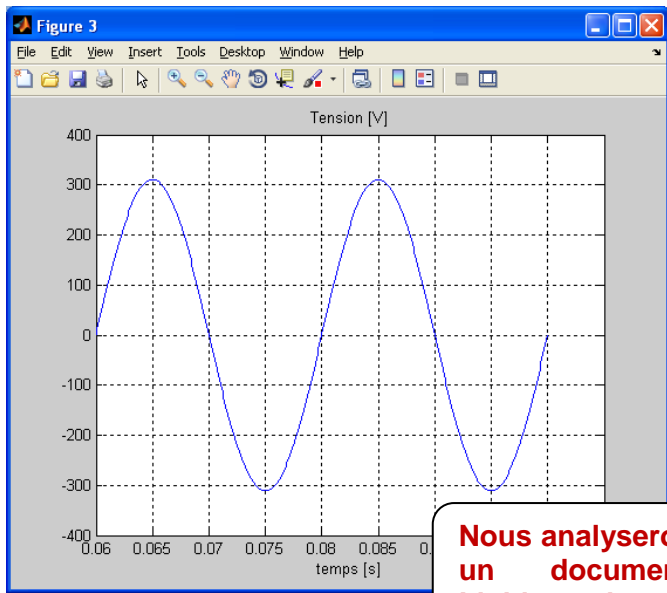
Nous allons lancer l'exécution d'un programme macro ou .m tout prêt. Il suffit de taper son nom dans l'espace de travail (sans l'extension .m prise par défaut).

Observez les résultats obtenus automatiquement :

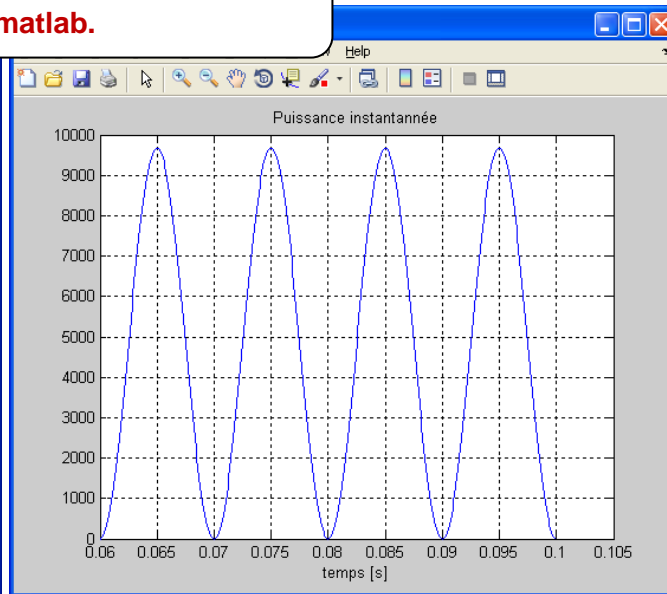
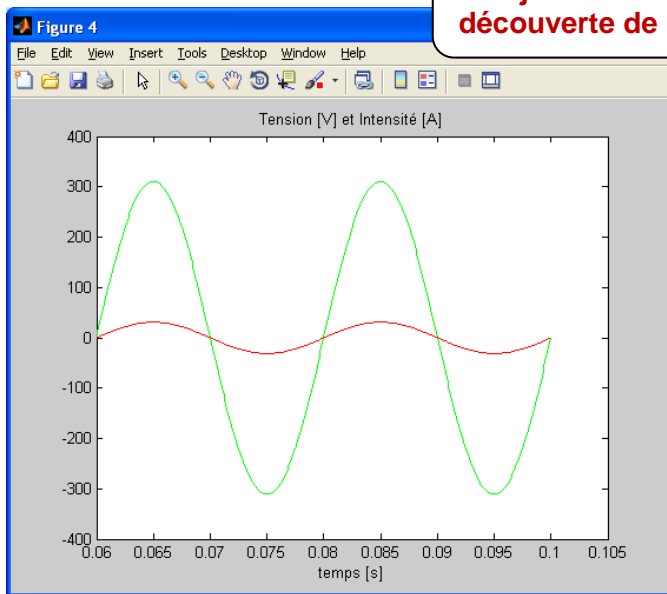
```
>> mPuissance
Puissance moyenne = 4824 [W]
Intensite moyenne = 1.521E-012 [I]
Intensité efficace = 21.99 [Ieff]
Tension moyenne = 1.524E-011 [V]
Tension efficace = 219.9 [Veff]
>> |
```

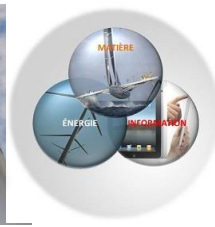
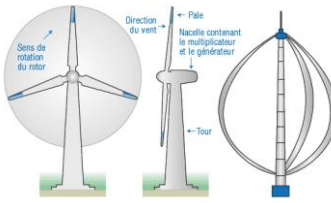
Voilà la spécialité du logiciel, le traitement des nombres. Au passage nous découvrons un graphe beaucoup plus propre que le scope.

Matlab signifie **MAT**rice **LAB**oratory

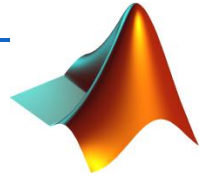


**Nous analyserons ces résultats dans un document complémentaire. L'objet de ce travail est la découverte de matlab.**





## Analyse rapide des graphes et gestion de curseurs

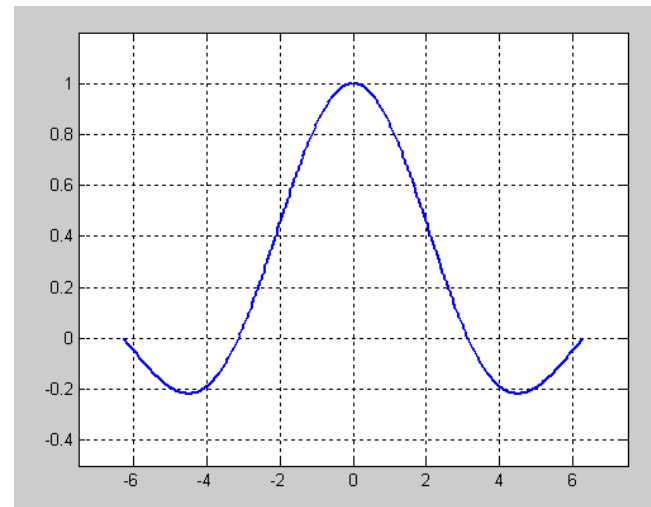


Le graphe obtenu par la commande plot permet une analyse du résultat, Permet la lecture de la forme de la courbe, la lecture des amplitudes, pour faciliter le travail il est possible d'utiliser les curseurs :

Voilà le tracé d'une fonction sinus cardinal  $f(x) = \sin(x) / x$   
Obtenu par le fichier macro ci-dessous : trace\_sinc2.m

```

2      % x : angle dans l'intervalle [-2pi 2pi]
3      x=-2*pi:pi/100:2*pi;
4
5      % fonction sinc à tracer
6      y=sin(x)./x;
7
8      % la fonction plot retourne le ponteur h
9      h=plot(x,y);
10
11     % modification de la largeur du trait
12     set(h,'LineWidth',2)
13
14     % choix des dimensions des axes
15     axis([-7.5 7.5 -0.5 1.2])
16     grid
    
```

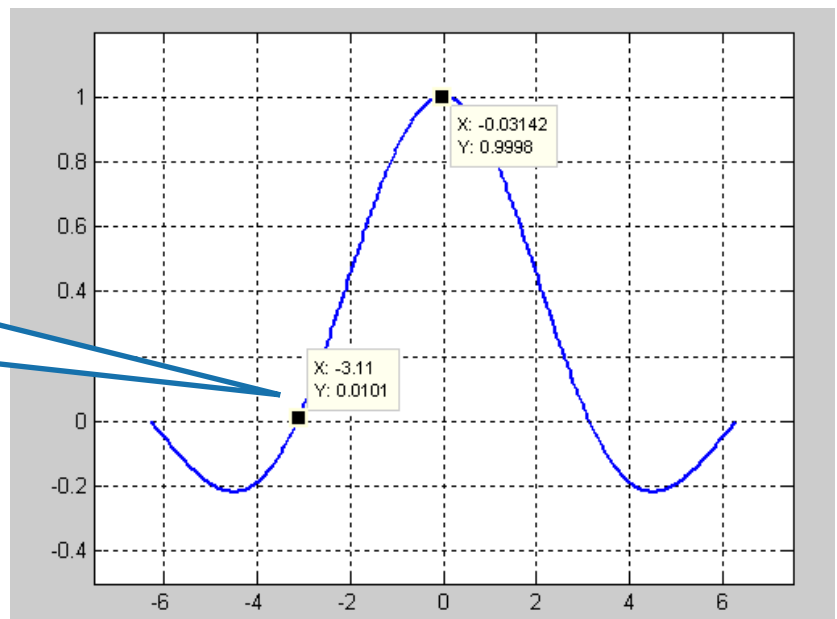


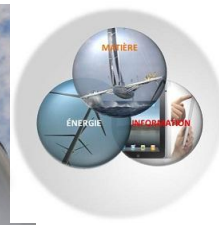
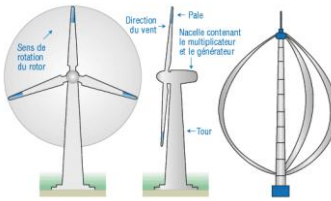
Pour insérer le premier curseur menu : **Tools/Data Cursor**

Puis il faut cliquer sur la courbe à l'endroit où l'on souhaite voir le curseur.

Pour en insérer d'autres il suffit ensuite de cliquer aux endroits voulus en maintenant la touche [Alt] enfoncée autant de fois que nécessaire.

Pour déplacer le curseur il suffit d'utiliser la souris !





## 2.4 Analyse du fichier de commande mPuissance.m

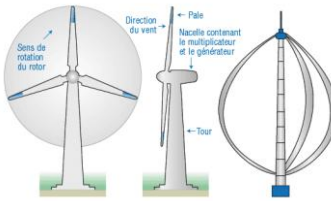
Le fichier de commande est en fait un programme qui permet le traitement scientifique des données. Analyser et comprendre ce type de macro permet d'être en douceur dans la puissance et la versatilité de matlab.

```

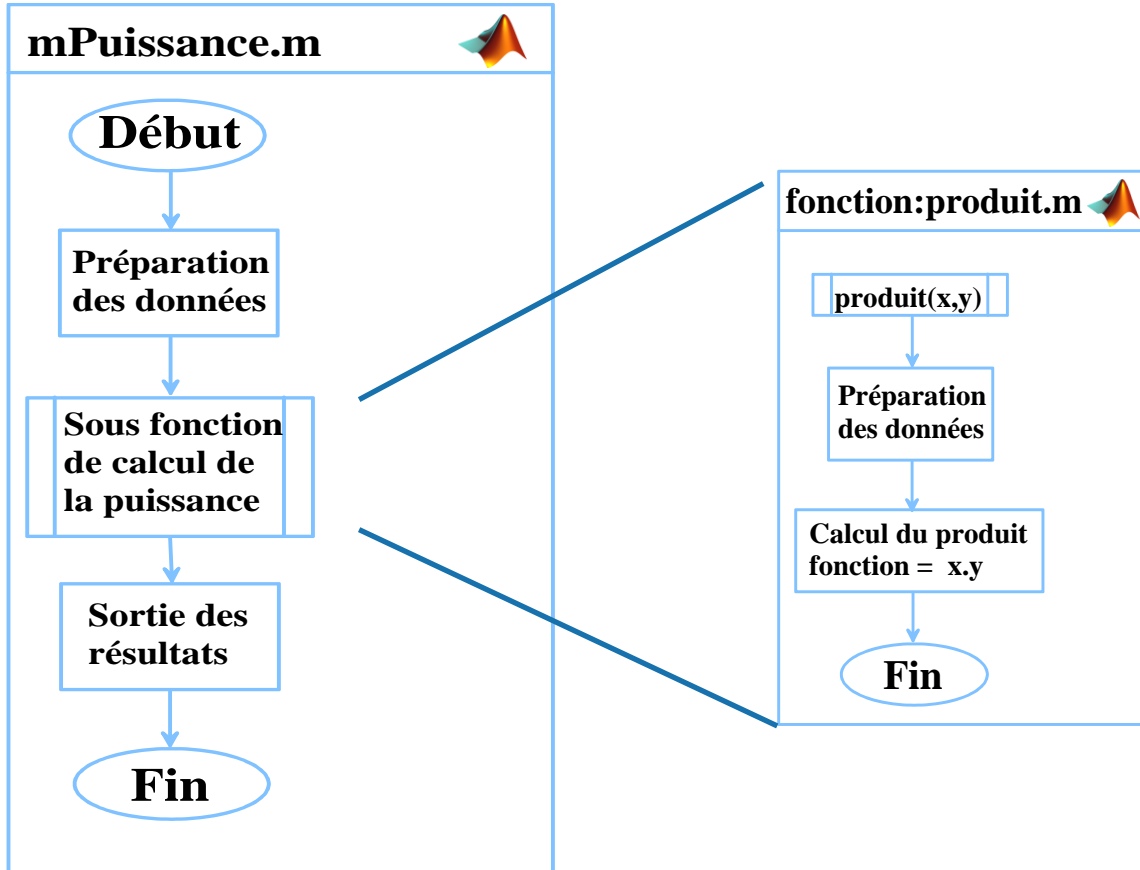
1  %-----
2  %  Exploitation des résultats calcul de puissance en monophasé
3  %-----
4  Date=ScopeData(:,1);
5  [nDate,mDate]=size(Date);
6  Intensite=ScopeData([nDate-400 : nDate],2);
7  Tension=ScopeData([nDate-400 : nDate],3);
8  Date=ScopeData([nDate-400 : nDate],1);
9  %
10 %
11 Puissance=produit(Intensite,Tension);
12 %
13 %
14 figure(1);
15 plot(Date,Puissance);
16 title('Puissance instantannée');xlabel('temps [s]');grid;
17 Puissance_moy=mean(Puissance);
18 fprintf('Puissance moyenne = %6.4G [W]\n',Puissance_moy);
19 %
20 %
21 figure(2);
22 plot(Date,Intensite);
23 title('Intensité [A]');xlabel('temps [s]');grid;
24 Intensite_moy=mean(Intensite);
25 fprintf('Intensite moyenne = %6.4G [I]\n',Intensite_moy);
26 fprintf('Intensité efficace = %6.4G [Ieff]\n',max(Intensite)/sqrt(2));
27 %
28 %
29 figure(3);
30 plot(Date,Tension);
31 title('Tension [V]');xlabel('temps [s]');grid;
32 Tension_moy=mean(Tension);
33 fprintf('Tension moyenne = %6.4G [V]\n',Tension_moy);
34 fprintf('Tension efficace = %6.4G [Veff]\n',max(Tension)/sqrt(2));
35 %
36 %
37 figure(4);
38 plot(Date,Tension,'g');grid;hold on;plot(Date,Intensite,'r');grid;
39 title('Tension [V] et Intensité [A]');xlabel('temps [s]');
40

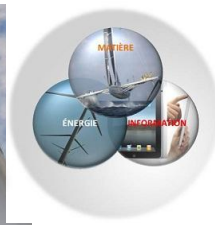
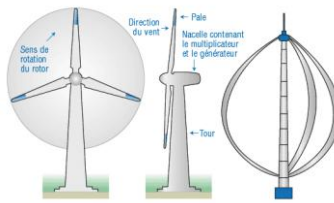
```





Donnons l'algorithme de cette fonction :





Listing de la sous-fonction produit.m :

```

1  %-----
2  % Cette fonction réalise le produit point par point de deux
3  % vecteurs.
4  %-----
5  function produit = produit(x,y)
6  % On récupère les dimensions pour vérifier que le calcul est possible
7  % développement futur
8  [nx,mx]=size(x);
9  [ny,my]=size(y);
10 % Initialise le vecteur contenant le résultat
11 ProduitVecteur=x;
12 % Calcul du produit point par point boucle sur tous les points du tableau
13 for m = 1:1:nx           %Pour début:pas:fin
14     ProduitVecteur(m)=x(m)*y(m);
15 end
16 % Sortie du résultat
17 produit=ProduitVecteur;
    
```

### 3 Deuxième étude : système de tensions triphasées

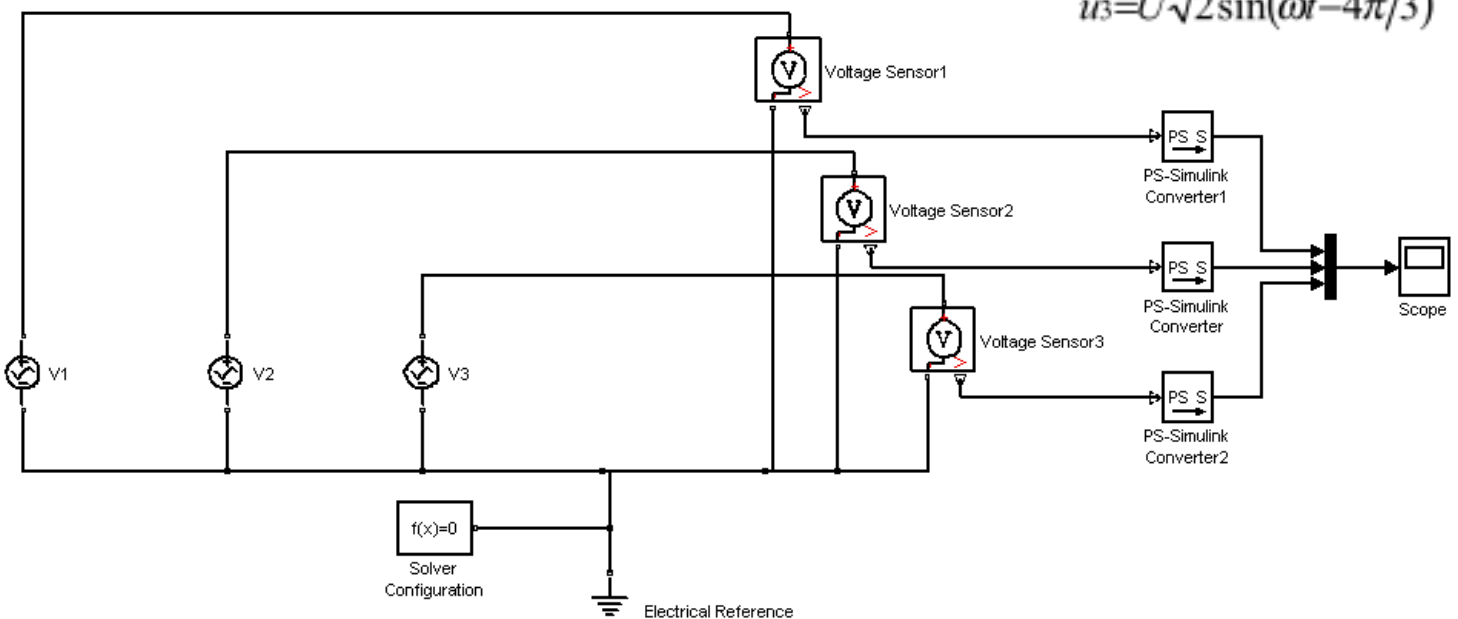
Exécuter la simulation du circuit suivant :

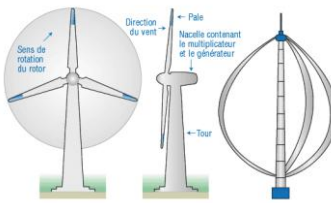
Circuits\_4.mdl :

$$u_1 = U\sqrt{2}\sin(\omega t)$$

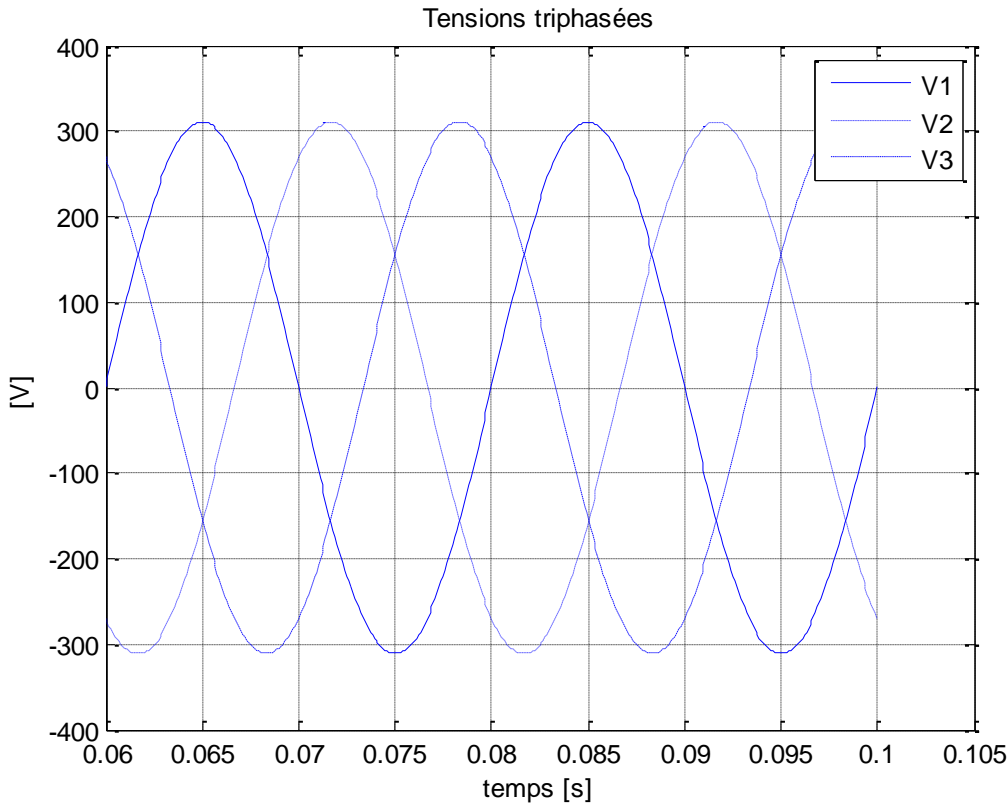
$$u_2 = U\sqrt{2}\sin(\omega t - 2\pi/3)$$

$$u_3 = U\sqrt{2}\sin(\omega t - 4\pi/3)$$





Post analyser le résultat par le tracé des trois tensions pour cela exécuter la macro mTensionTri.m :



Le fichier macro correspondant :

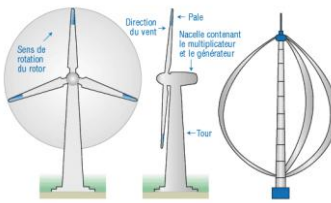
```

1  %-----
2  % Tracé de trois tensions triphasées envoyées sur un scope [t,v1,v2,v3]
3  %-----
4  Date=ScopeData(:,1);
5  [nDate,mDate]=size(Date);
6  V1=ScopeData([nDate-400 : nDate],2);
7  V2=ScopeData([nDate-400 : nDate],3);
8  V3=ScopeData([nDate-400 : nDate],4);
9  Date=ScopeData([nDate-400 : nDate],1);
10 figure(1);
11 plot(Date,V1,'b-',Date,V2,'b:',Date,V3,'b-.');
12 legend('V1','V2','V3');
13 title('Tensions triphasées');
14 xlabel('temps [s]');grid;
15 ylabel(' [V] ');
16

```

b- signifie :  
couleur bleu  
trait plein  
il n'y a que deux  
paramètres ici.

Pour colorier les tracés ajout du troisième paramètre : 'cst' à chaque triplet plot(x,y,'cst',... avec la syntaxe suivante :



*c* désignant la couleur du trait  
*s* le symbole du point  
*t* le type de trait.

y -jaune	. point	- trait plein
m magenta	o cercle	: pointillé court
c cyan	x marque	x - pointillé long
r rouge	+ plus	- pointillé mixte
g vert	* étoile	< triangle (gauche)
b bleu	s carré	> triangle (droit)
w blanc	d losange	p pentagone
k Noir	v triangle (bas)	^ triangle (haut)

## 4 Démarrage d'une simulation sur un nouveau modèle Simulink

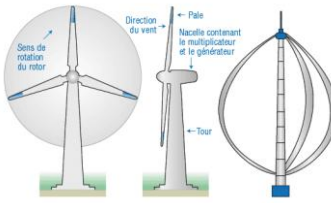
Lorsque l'on souhaite démarrer une simulation sous matlab / simulink :

- Se positionner dans le bon espace de travail
- Lancer simulink puis faire **new / model**
- Enregistrer ce nouveau modèle dans le répertoire de travail
- Rechercher les éléments composants le schéma à simuler dans les bibliothèques de Simulink puis les poser dans le modèle en construction par glisser / déplacer :

**Recherche principalement dans :**

- ⇒ Simulink/Commonly/Use
- ⇒ Simscape/Foundation/Electrical

- Faire le schéma

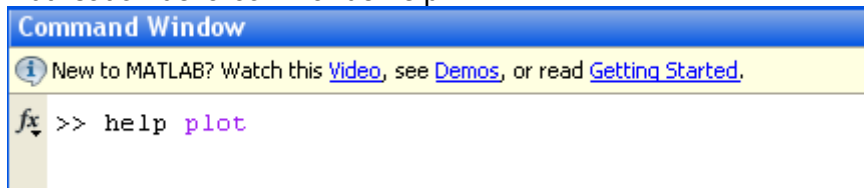


## Pour approfondir

### 5 Utilisation de la commande Help

Pour connaître toutes les fonctions de Matlab il faut pour le moins y passer un certain temps. Les sources d'informations sont essentiellement :

- Les tutoriels livrés avec le logiciel
- Le web
- L'utilisation de la commande help



Utiliser cette commande help pour comprendre le rôle de la commande text.

### 6 Utilisation des curseurs ( Modèle Circuits\_4.mdl avec macro mTensionTri.m)

Reprendre l'exemple Circuits\_4.mdl de tracés des tensions triphasées. Utiliser les curseurs pour mesurer les déphasages entre (V1,V2), V2 est en retard sur V1 faire de même pour (V1,V3). Voir la méthode sur la page suivante.

### 7 Amélioration des fonctions ( Modèle Circuits\_1.mdl avec macro mPuissance.m)

Lors de l'utilisation de la commande macro mPuissance les résultats sont affichés avec une précision 'mathématique' inutile ici. Nous allons améliorer cette macro commande en ajoutant un filtre.

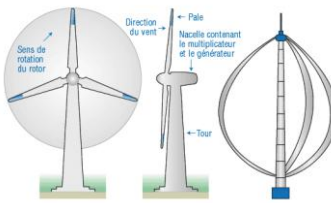
```
>> mPuissance
Puissance moyenne = 4824 [W]
Intensite moyenne = 1.521E-012 [I]
Intensité efficace = 21.99 [Ieff]
Tension moyenne = 1.524E-011 [V]
Tension efficace = 219.9 [Veff]
>> |
```

Les résultats bruts, un peu indigeste en  $10^{-12}$  ou  $10^{-11}$

Le filtre supprimera toute valeur comprise entre  $-0.1 < x < 0.1$  pour améliorer la lisibilité des résultats. Voilà le programme correspondant :

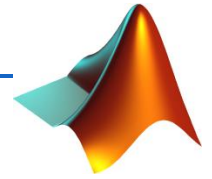
```
1 %-----
2 % Cette fonction filtre la valeur reçue
3 % si elle est inférieure à un seuil en valeur absolue
4 %-----
5 function filtre = filtre(x)
6 if ( abs(x) < 0.1 ) x=0; end;
7 filtre = x;
```

Modifier la macro mPuissance pour filtrer les résultats numériques avant de les afficher.



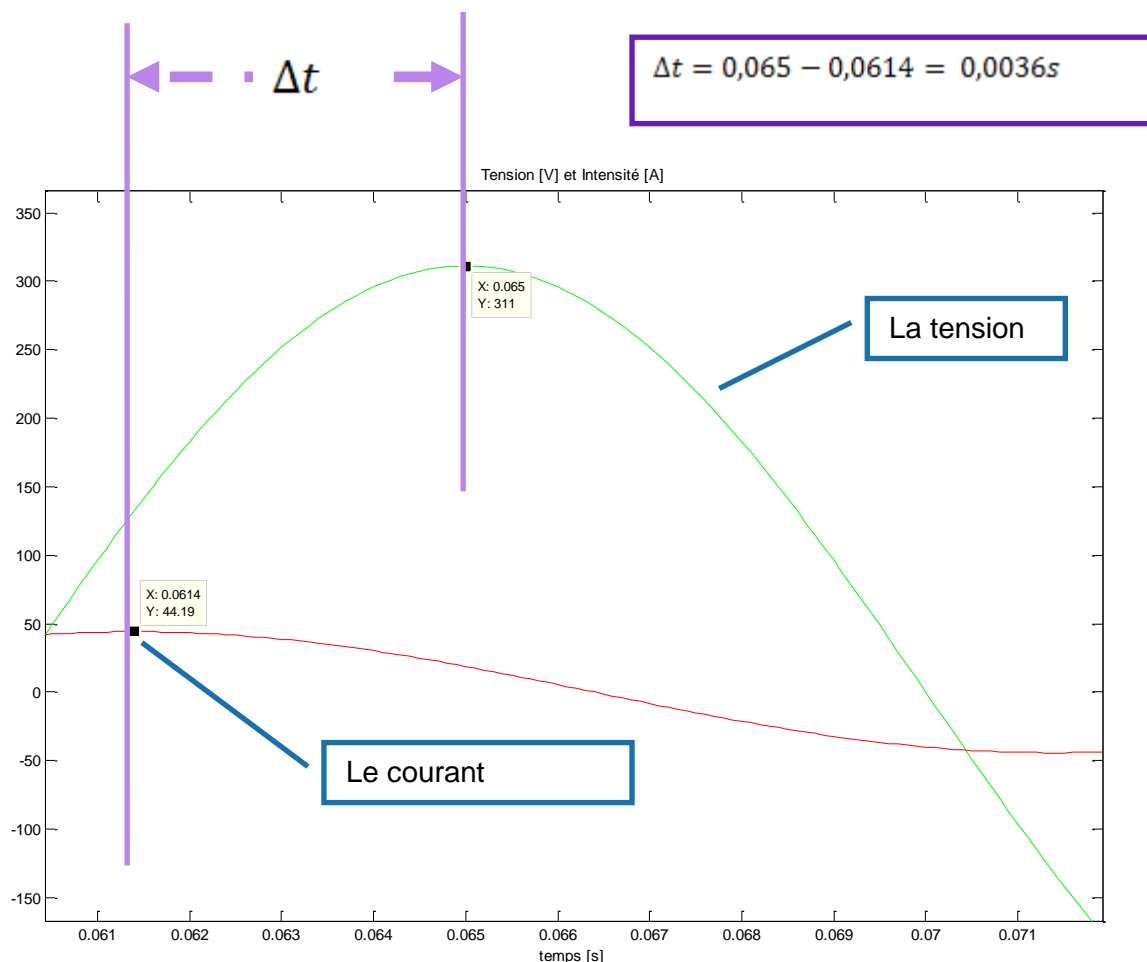
## Fiche : Principe de la détermination du déphasage entre deux courbes périodiques

### Mise en œuvre de Matlab / Simulink



Nous avons en exemple ci-dessous le tracé de la tension et du courant. Le courant est en avance sur la tension. Pour déterminer la valeur du déphasage graphiquement :

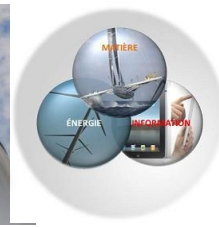
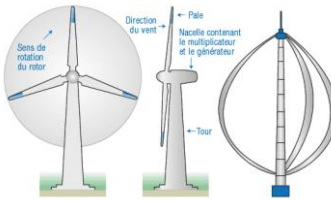
- Déterminer la valeur numérique de la période ici  $T=0,020$
- Positionner un curseur sur le sommet de chaque courbe comme sur la recopie d'écran ci-dessous.
- Déterminer la valeur numérique du déphasage, on part du sommet de la grandeur de référence pour les déphasages, ici la tension, et on va vers le sommet de l'autre courbe le courant.



- Convertir la valeur obtenue en degré, on a  $360^\circ$  pour la période  $T=0,020$  d'où :

$$\varphi = 360^\circ \cdot \frac{0,0036}{0,02} = 64,8^\circ$$

Le courant est en avance de  $64,8^\circ$  sur la tension



## 8 La puissance en système de tensions sinusoïdales

### Mise en œuvre de Matlab / Simulink

Nous nous sommes maintenant exercés à la manipulation du logiciel matlab suffisamment pour l'utiliser pour mieux comprendre l'expression de la puissance en signaux sinusoïdaux.

L'expression de la puissance électrique dans un système de tension continu est le produit du courant par la tension aux bornes du dipôle étudié. Pour les courants et tensions sinusoïdaux la puissance est toujours le produit de la tension et du courant qui sont tout deux des expressions en  $\sin(2.\pi.f.t)$ .

Le travail va consister à étudier différents cas de figures, sans calcul, uniquement par la mise en œuvre du logiciel.

## 9 Tension et courant en régime sinusoïdal monophasé

### 9.1 Expression théorique

En régime sinusoïdal monophasé la tension présente sur le secteur EDF a pour expression :

$$v(t) = VM. \sin(\omega. t)$$

Avec  $VM = \sqrt{2}.V_{eff}$ ,  $\omega = 2.\pi.f$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $V_{eff} = 220V$

L'expression du courant électrique est de la forme :

$$i(t) = IM. \sin(\omega. t + \varphi)$$

Avec  $IM = \sqrt{2}.I_{eff}$ ,  $\omega = 2.\pi.f$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$

#### Résultat à connaître :

Pour les fonctions en sin ou cos la valeur crête est liée à la valeur efficace par :

$$VM = V_{eff} . \sqrt{2}$$

### 9.2 Simulation des trois circuits typiques R,RL,RC mesure du déphasage

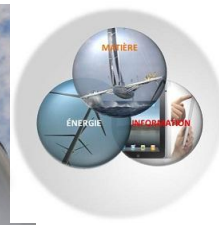
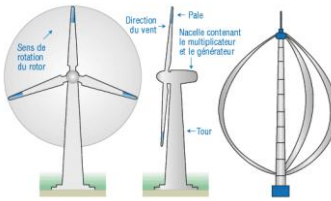
D'une manière générale le courant  $i(t)$  n'est pas en phase avec la tension  $v(t)$ . Le déphasage dépend de la nature du récepteur. Nous allons étudier ce déphasage pour trois cas de récepteur :

- Une résistance pure ou autrement appelé circuit R : Circuits\_1.mdl
- Un circuit self + résistance en série appelé circuit RL : Circuits\_2.mdl
- Un circuit capacité + résistance en série appelé circuit RC : Circuits\_3.mdl

Pour chacun de ces circuits appliquer la fonction mPuissance et mesurer graphiquement le déphasage entre la tension et le courant avec les curseurs. Remplir le tableau :

Fichier	Nature du circuit	Déphasage mesuré
Circuits_1.mdl	R	
Circuits_2.mdl	R + L	
Circuits_3.mdl	R + C	

Commenter les trois déphasages obtenus en fonction de la nature des charges. En particulier le lien entre le signe de  $\varphi$  et la nature de la charge selfique R+L ou capacitive R + C.



### 9.3 Etude de la puissance

Dans les systèmes de tensions sinusoïdales la puissance est en fait composée de trois parties<sup>1</sup> :

P la puissance active =  $U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi$  en Watt, c'est aussi la valeur moyenne de  $p(t)$

Q la puissance réactive =  $U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \sin \varphi$  en VAR (Volt Ampère Réactif)

S la puissance apparente =  $U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$  VA (Volt Ampère) avec  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

En simulant les trois circuits R, R+L, R+C l'application de la macro mPuissance vous donne les valeurs de la tension efficace et du courant efficace, vous avez déjà déterminé le déphasage  $\varphi$ .

⇒ Pour les trois circuits étudiés remplir le tableau ci-dessous :

Fichier	Nature du circuit	Déphasage mesuré	$U_{\text{eff}}$	$I_{\text{eff}}$	P	Q	S
Circuits_1.mdl	R						
Circuits_2.mdl	R + L						
Circuits_3.mdl	R + C						

Seule la puissance active est utile, la puissance réactive correspond à un transfert d'énergie provoqué par les composants<sup>2</sup> qui accumulent de l'énergie pendant une partie de la période puis la restituent au réseau, donc la self qui accumule de l'énergie magnétique ou le condensateur qui accumule de l'énergie électrostatique.

Le distributeur d'électricité EDF facture uniquement P pour les petits consommateurs, particuliers et petits commerces ou exploitations agricoles. Pour les gros consommateurs P et Q sont facturés. En effet la puissance réactive n'a pas d'effet utile mais doit quand même être échangée sur le réseau. Cette puissance réactive est due à la présence de charges, consommateurs, de nature selfique ou capacitive qui sont inexistantes de manière significative chez les petits consommateurs.

C'est d'ailleurs sur la puissance apparente S que le réseau de transport est dimensionné.

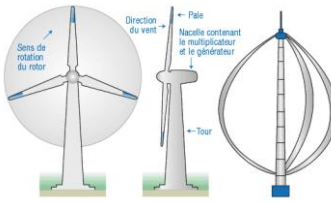
⇒ Comparer la présence de Q et la forme du graphe de la Puissance.

⇒ Comparer P et S quand  $\varphi = 0$ .

<sup>1</sup> En régime sinusoïdal linéaire il n'y a pas de puissance déformante, voir p. 105-107 du livre de cours

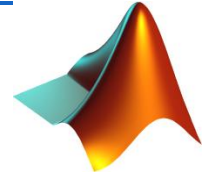
<sup>2</sup> Nous n'étudions ici que les composants passifs R,L,C.





## Fiche : Calcul symbolique de la puissance moyenne

### Mise en œuvre de Matlab / Simulink



A partir de l'expression algébrique de la tension  $v(t)$  et du courant  $i(t)$  il est possible de calculer la puissance  $p(t)=v(t).i(t)$  avec :

$$v(t) = VM.\sin(\omega.t) \quad i(t) = IM.\sin(\omega.t + \varphi)$$

Profitons du logiciel matlab pour lui faire calculer littéralement le résultat de ce produit de deux fonctions sinusoïdales et calculer la valeur moyenne. Cela s'appelle le calcul symbolique.

### 1 Déclaration des variables et des fonctions $v(t)$ $i(t)$

Le calcul symbolique utilise des variables symboliques qui doivent donc être déclarées spécialement par la commande syms :

```
>> syms Veff leff t Phi
```

Nous déclarons ensuite les fonctions  $v(t)$  et  $i(t)$  :

```
>> v=Veff*sqrt(2)*sin(100*pi*t)
```

```
>> i=leff*sqrt(2)*sin(100*pi*t+Phi)
```

### 2 Calcul littéral de la puissance $p(t)$

Effectuons le produit  $p(t) = u(t).i(t)$  :

```
>> p = v*i
```

On obtient  $P = 2*leff*Veff*\sin(\Phi + 100*pi*t)*\sin(100*pi*t)$

### 3 Calcul de l'expression théorique de la puissance moyenne

Calculer la puissance moyenne c'est calculer :

$$P_{moy} = \frac{1}{T} \cdot \int_T p(t) dt$$

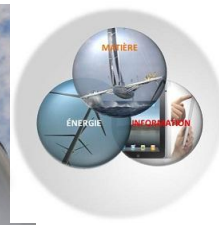
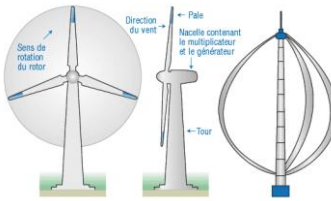
La fonction intégrale  $\int_T p(t) dt$  a une expression littérale que matlab sais obtenir avec la commande int il suffit de diviser le résultat de cette intégrale par la valeur de la période.

```
>> Pmoy=(int(p,t,0,0.02))/0.02
```

Cette commande signifie : intègre p sur la variable t depuis t=0 jusqu'à t= 20mS (soit sur une période T)

$$P_{moy}=leff*Veff*\cos(\Phi)$$

Ce résultat théorique est à connaître.



## 8 Tensions et courants en régime sinusoïdal triphasés

### 8.1 Système de tensions triphasés

En régime sinusoïdal triphasé l'énergie électrique est distribuée avec un système de trois tensions qui sont déphasés mutuellement :

$$u_1 = U\sqrt{2}\sin(\omega t)$$

$$u_2 = U\sqrt{2}\sin(\omega t - 2\pi/3)$$

$$u_3 = U\sqrt{2}\sin(\omega t - 4\pi/3)$$

$2.\pi = 360^\circ$  aussi :  
 $U_2$  est en retard de  $120^\circ$  sur  $U_1$  :  $\varphi = -120^\circ = -2\pi/3$  rad  
 $U_3$  est en retard de  $240^\circ$  sur  $U_1$  :  $\varphi = -240^\circ = -4\pi/3$  rad

### 8.2 Observation du système de tensions triphasés

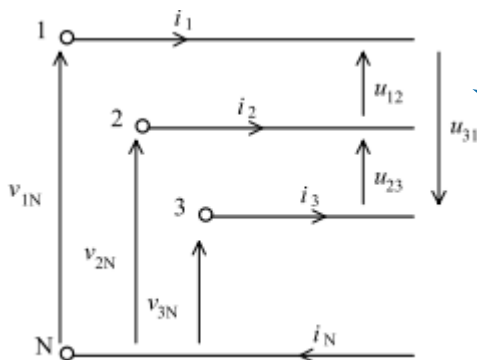
- ⇒ Simuler le fichier Circuits\_4.mdl appliquer ensuite la macro mTensionTri.m
- ⇒ Vérifier les déphasages avec la méthode des curseurs graphiques,
- ⇒ Observer l'amplitude des tensions  $V_1, V_2, V_3$  elles sont identiques, que valent-elles ?

### 8.3 Tensions simples / tensions composées

En triphasé il y a deux manières d'observer le système de tension soit comme dans le schéma précédent où chaque tension  $V_1, V_2, V_3$  est référencée par rapport à la masse on parle alors de tension simples  $V_{1N}, V_{2N}, V_{3N}$  ( le N est souvent omis car sous entendu ).

Mais il y a aussi le système  $U_{12}, U_{23}, U_{31}$  appelées tensions composées pour l'observer simuler le schéma Circuits\_5 et appliquer la macro mTensionTri.m

- ⇒ La commande mTensionTri appelle toujours  $V_1, V_2, V_3$  les tensions envoyées dans l'outil Scope selon l'ordre du composant MUX, d'après le schéma que représente ces tensions ?
- ⇒ Observer l'amplitude des tensions  $V_1, V_2, V_3$  elles sont identiques, que valent-elles ?



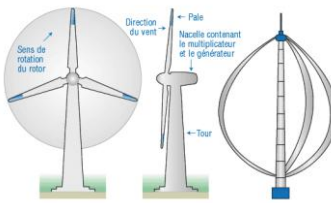
Tension = différence de potentiel (ddp) entre deux nœuds soit par exemple :

$$U_{12} = V_{1N} - V_{2N}$$

$$V_{\text{extrémité}} - V_{\text{départ}}$$

$$V_{1N} = V_1 - \text{Masse (ici le neutre N)}$$

$$V_{2N} = V_2 - \text{Masse}$$



## 8.4 Alimentation d'une charge résistive en triphasé

### 8.4.1 Charge équilibrée

Alimentons une charge avec un système de tensions triphasées. Cette charge sera résistive et comprend donc trois résistances de valeurs identiques, schéma Circuits\_6.mdl

- ⇒ Simuler le schéma
- ⇒ Appliquer la commande mCourantTri
- ⇒ Que peut-on dire des courants  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$  forme, amplitude maximum ?
- ⇒ Que peut-on dire du courant de retour, on dit de neutre  $I_N$  ?

### 8.4.2 Charge déséquilibrée

Reprenons l'étude précédente mais maintenant la charge n'est plus identique sur les trois phases, on parle de réseau déséquilibrés, schéma Circuits\_7.mdl

- ⇒ Simuler le schéma
- ⇒ Appliquer la commande mCourantTri
- ⇒ Que peut-on dire des courants  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$  forme, amplitude maximum ?
- ⇒ Que peut-on dire du courant de retour, on dit de neutre  $I_N$  ?