

SIMULATION INFORMATIQUE

Partie 1 : Le mouvement harmonique simple

De nombreux domaines scientifiques utilisent la simulation pour étudier certains phénomènes. La simulation est le fait de reproduire un phénomène de façon artificielle, d'ordinaire par ordinateur. Qu'il soit complexe ou non, tout phénomène peut être étudié beaucoup plus rapidement en contrôlant certains paramètres dans un programme informatique qu'en répétant une expérience réelle dans différentes conditions. Si la réalisation de l'expérience réelle est compliquée, dispendieuse ou demande beaucoup de temps, la simulation devient très rapidement une approche profitable.

En l'occurrence, nous allons étudier un mouvement harmonique simple (par exemple le mouvement vertical, selon y , d'une masse suspendue à un ressort). L'objectif concret est de produire un graphique pour lequel on pourra modifier rapidement les paramètres de l'oscillation pour étudier les différentes combinaisons de valeurs ainsi que l'effet de la variation des différents paramètres.

Au passage, vous ferez connaissance avec quelques fonctions sophistiquées de Excel qui pourront éventuellement vous servir dans le futur.

Reproduisez les étapes suivantes pour construire progressivement le simulateur de M.H.S. ou d'onde progressive. Utilisez les mêmes adresses de cellules que dans la marche à suivre pour assurer une correspondance exacte dans les instructions.

1- On doit d'abord créer deux colonnes de valeurs, soit les coordonnées t et y des points de la courbe. En produisant une grande quantité de points, ceux-ci suffiront à rendre la courbe visible, sans ajouter de courbe de tendance (d'ailleurs, il n'y a pas de courbe de tendance disponible dans Excel pour une fonction sinusoïdale). En B10 et C10, inscrivez les titres des colonnes t et y .

2- Choisissons pour commencer de tracer la courbe entre 0 et 10 s, à l'aide de 1 000 points, c'est-à-dire par

incréments de 0,01 s. Vous savez sans doute qu'on pourrait générer les 1 000 valeurs de temps en inscrivant d'abord 0 et 0,01, pour étendre ensuite cette progression sur 1 000 lignes, mais il y a une fonction automatisée utile à connaître : en B11, inscrivez la fonction suivante :

= sequence(1000 ; 1 ; 0 ; 0,01)

Remarque : si votre ordinateur est en anglais, les décimales utilisent « . » au lieu de « , », et les arguments sont séparés par « , » au lieu de « ; ».

Cette fonction génère une suite sur 1 000 lignes et 1 colonnes, à partir de 0 et par incrémentation de 0,01. Les cases sous B11 n'ont aucun contenu inscrit mais affichent les valeurs de la série. N'y écrivez rien pour ne pas empêcher le fonctionnement de cette fonction.

En d'autres mots, il s'agit d'un vecteur (une entité comportant plusieurs valeurs). Vous l'ignorez sans doute, mais Excel peut manipuler des vecteurs (et même des matrices), qui occupent plusieurs cases à partir de l'inscription dans une seule case.

3- Pour calculer les positions y correspondantes, on doit connaître les différents paramètres du mouvement. Supposons que le mouvement étudié soit défini par : $y = 0,2 \cdot \cos\left(2t + \frac{\pi}{2}\right)$. On peut donc entrer en C11 l'équation qui suit :

= 0,2 * cos(2*B11# + pi()/2)

Remarques :

- Le symbole « # » fait en sorte que l'équation utilisera toutes les valeurs du vecteur défini en B11 plutôt que la seule valeur en B11. Le résultat est donc aussi un vecteur de 1 000 lignes, dont toutes les valeurs se calculent automatiquement sans autre intervention.
- La valeur π peut être entrée rapidement et précisément avec la fonction « pi() » d'Excel (n'entrez jamais manuellement sa valeur).
- Vous obtenez la valeur y pour l'instant $t = 0$, soit $x = 1,22515E-17$ (ou semblable). Il s'agit en fait d'un zéro « mal arrondi ». Il s'agit d'une manifestation occasionnelle de la manière complexe dont les ordinateurs manipulent les

nombre, manière bien différente de notre conception mentale. N'en faites pas de cas.

- Par défaut, Excel considère que les angles sont en radians. Il n'y a donc pas de transformation à faire pour obtenir le cosinus de la parenthèse car chaque terme est déjà considéré en radians.
- Des espaces sont volontairement ajoutés entre les termes de l'équation. Ils aident à distinguer les termes et facilitent la lecture, sans empêcher les calculs de se faire correctement. Prenez l'habitude d'en ajouter quelques-uns pour rendre visible la structure de l'équation.
- Excel mettra automatiquement en majuscules tous les noms de fonctions; vous n'avez pas à faire attention à la casse. (Et ne mettez aucun accent.)

On peut maintenant tracer le graphique.

Traçage du graphique

4- On veut d'abord sélectionner tous les points pour demander le traçage automatique du graphique. Aussi, le graphique apparaîtra à l'endroit où se trouve la vue lorsqu'on demande son affichage. Utilisons donc une technique rapide à la fois pour déplacer la vue et pour sélectionner les valeurs, plus rapide que faire défiler l'écran. Sélectionnez d'abord B11, et en tenant enfoncé la touche CTRL (🍏 peut-être « Cmd »), appuyez simultanément sur la flèche vers le bas (CTRL-⬇️). Cela vous amène à la dernière valeur avant une cellule vide. Sélectionnez maintenant les deux dernières valeurs (B1010 et C1010) et appuyez ensuite simultanément sur CTRL-SHIFT-⬆️. Vous avez alors sélectionné toutes les valeurs, avec les titres. Appuyez sur SHIFT-⬇️ pour réduire la sélection aux valeurs seules. Vous avez maintenant une sélection de toutes les valeurs, seulement les valeurs.

5- Insérez un graphique de type « nuage de points » sans courbe, qu'on placera à côté de nos colonnes de valeurs. Le but étant de pouvoir observer instantanément le graphique après avoir modifié certains paramètres, et la mise en forme n'étant pas importante, le graphique peut être placé sur la même feuille, mais de façon à ne pas cacher les colonnes B et C.

Toute situation où il est utile de tracer un graphique pour étudier un phénomène se prête à l'utilisation d'Excel. Même si Excel n'offre pas de courbe de tendance pour une fonction trigonométrique, le fait de tracer 1 000

points fait apparaître une courbe de la fonction de votre choix.

6- En principe, on a déjà un simulateur. On peut modifier les paramètres dans le calcul des positions y pour étudier le comportement de la courbe. Mais c'est une manière très inefficace de le faire. En fait, le fait d'avoir inscrit les paramètres dans l'équation elle-même est une bien mauvaise approche. Plutôt, inscrivez les divers symboles des paramètres dans les cases B2 à B4 et inscrivez en C2 à C4 les valeurs correspondantes déjà choisies, tel que sur la figure suivante :

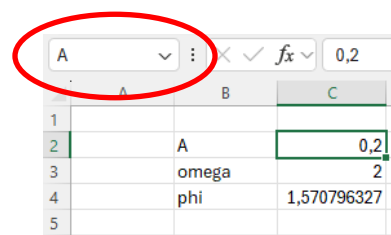
	A	B	C
1			
2		A	0,2
3		omega	2
4		phi	=PI()/2

La valeur « phi » (ϕ) sera évidemment calculée et remplacée automatiquement par sa valeur en raison du symbole « = »

7- On pourrait maintenant retourner à la case C11 pour remplacer les valeurs fixes par les adresses des cases nouvellement remplies avec l'équation qui suit, mais il y a mieux encore...

$$=C2 * \cos(C3*B11\# + C4)$$

Sélectionnez la cellule de l'amplitude C2 et dans la « Zone Nom » à gauche de la barre de formule, inscrivez le nom de variable « A », et validez ce choix en appuyant sur « ENTER » :



	A	B	C
1			
2		A	0,2
3		omega	2
4		phi	1,570796327

Faites de même pour C3 et C4 avec les noms « omega » et « phi ».

On peut même le faire pour un vecteur! Sélectionnez toutes les valeurs de temps (sélectionnez B11 et faites CTRL-SHIFT-⬇️) et inscrivez « t » dans la Zone Nom pendant que toutes les valeurs sont sélectionnées, (le vecteur de 1 000 valeurs est maintenant désignées par t).

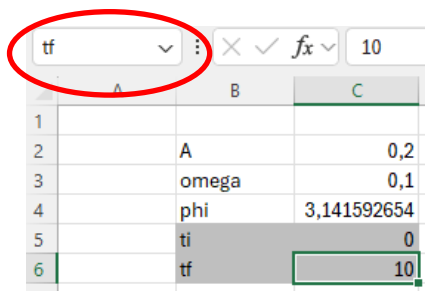
En C11, remplacez l'équation inscrite par :

$$= A * \cos(\text{omega}*t + \text{phi})$$

Le fait de nommer les cases avec un nom de variable a deux avantages : les équations élaborées sont plus faciles à lire avec les noms de variables de l'expérience, et on peut les appeler depuis n'importe quelle page sans devoir les localiser pour les sélectionner ou pour connaître l'adresse à inscrire. t étant un vecteur, y est encore un vecteur.

Notre simulateur est maintenant plus fonctionnel. On peut modifier facilement les paramètres en C2 à C4 pour voir la courbe s'ajuster instantanément. Par exemple, remplaçons la constante de phase ϕ en C4 par π (écrivez « π »). On devrait alors voir la courbe débiter à $y = -0,2$ plutôt qu'à $y = 0$.

8- Maintenant, remplaçons la fréquence angulaire ω par 0,1, une valeur impliquant une période plus grande ($T = 62,8$ s). On n'aperçoit alors qu'une partie de cycle, alors qu'on veut d'ordinaire apercevoir plus d'un cycle complet (l'axe horizontal s'arrête à 12 s). Ce problème vient du fait que l'échelle horizontale ($0 \leq t \leq 10$) a elle aussi été codée de façon fixe dans la colonne B. On peut également la rendre ajustable assez rapidement. En B5 et B6, inscrivez les variables « t_i » et « t_f » (pour *temps initial* et *temps final*). En C5 et C6, inscrivez les valeurs 0 et 10 qu'on a utilisées jusqu'à maintenant. Nommez-les également t_i et t_f dans la Zone Nom. :



	A	B	C
1			
2		A	0,2
3		omega	0,1
4		phi	3,141592654
5		ti	0
6		tf	10

9- On peut maintenant utiliser cet intervalle modifiable pour définir les valeurs de la colonne B ainsi que les incréments d'une case à l'autre. En B11, modifiez les paramètres de la fonction SEQUENCE pour avoir :

= SEQUENCE(1000 ; 1 ; t_i ; $(t_f - t_i) / 1000$)

Le graphique n'a pas changé, mais à partir de maintenant on peut ajuster à notre guise le domaine horizontal du graphique. Remplacez t_f par 150. On aperçoit alors plus d'un cycle complet du mouvement étudié; l'incrémenta a réparti également entre 0 s et 150 s les 1 000 instants qu'on voulait tracer.

10- Rendons le tout plus convivial en indiquant les unités des paramètres (on s'y retrouvera mieux la prochaine fois qu'on ouvrira le fichier, sans inspecter chaque cellule pour se souvenir de son rôle). De D2 à D6, inscrivez les unités cm, rad/s, rad, s et s.

11- Toujours pour faciliter l'utilisation, surlignez en jaune les cases C2 à C6. Cela a pour but d'indiquer rapidement à tout utilisateur les cases où il peut modifier les valeurs; modifier les autres va plutôt altérer le simulateur si on remplace des équations par des valeurs fixes.

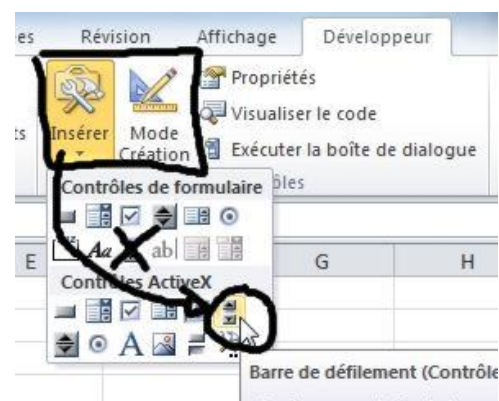
Automatiser le contrôle d'un paramètre

12- Pour rendre ce simulateur encore plus fonctionnel, nous allons exploiter d'autres fonctions avancées d'Excel. C'est tout à fait facultatif, mais on rendra encore plus rapide le contrôle de ϕ .

13- Il faut d'abord rendre visible l'onglet « Développeur » dans Excel, donnant accès à de nouveaux outils, s'il n'est pas déjà accessible dans le ruban des onglets. Allez dans l'onglet « Fichier », choisissez « Options », et dans « Personnaliser le ruban », activez la case « Développeur » de la liste des *onglets principaux*. Faites OK (⌘ : il peut être activé via Excel/Préférences (ou Fichier/Préférences), et via l'item Affichage (ou Ruban) où vous trouverez la case « Développeur ») Vous avez maintenant un nouvel onglet en haut de l'écran :



Dans cet onglet, « Insérez » une « Barre de défilement » du sous-groupe « Contrôles ActiveX » (bien voir image qui suit). (⌘ le bouton « Barre de défilement » est accessible directement parmi les boutons du menu).



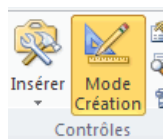
14- Vous devez alors tracer un rectangle qui représente cet objet. Tracez un rectangle à peu près équivalent à la case E4 (voir image qui suit). Ce rectangle deviendra une barre de défilement pour modifier une valeur d'un simple clic :

	B	C	D	E
ymax		0,2 cm		
omega		0,1 rad/s		
phi		3,141592654 rad		
ti		0 s		
tf		150 s		

15- Immédiatement après l'avoir créé, par un clic-droit sur cet objet, sélectionnez « Propriétés » (🍏 c'est parfois « Format de contrôle » ou « Format d'objet »). Apparaît alors une boîte de dialogue comprenant des paramètres liés à cet objet de contrôle. Définissez seulement les valeurs suivantes :

Min : 0
 Max : 48
 Cellule liée (ou LinkedCell) : F4

Fermez cette fenêtre. Sur PC, vous devez désactiver le « Mode Création » (dans l'onglet « Développeur ») pour rendre actif ce bouton de contrôle (🍏 le mode création n'existe pas; il n'y a qu'à désélectionner le bouton de contrôle en cliquant à côté) :



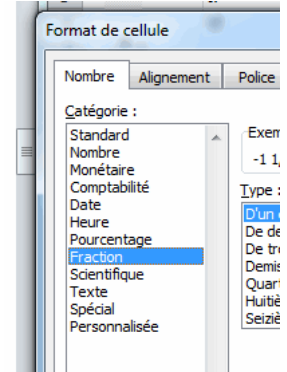
16- Vous disposez maintenant d'une barre de défilement qui permet de contrôler la valeur en F4 qui oscille entre 0 et 48. Nous nous servons de cette valeur pour fixer ϕ entre -2π et $+4\pi$, par sauts de $\pi/8$ (donc 49 valeurs possibles, entre -2π et $+4\pi$ inclusivement, liées aux valeurs entre 0 et 48 inclusivement). En C4, remplacez le contenu par l'expression suivante :

$$= -2 + F4/8$$

Considérons que c'est alors la constante de phase en unités « π rad » plutôt qu'en rad. Et pour tenir compte de ces unités, il faut ajuster conséquemment l'équation en C11 :

$$= A * \cos(\omega * t + \phi * \pi())$$

17- Pour faciliter l'interprétation de cette valeur ϕ , modifiez le « Format de cellule » de C4 pour « Fraction » (dans l'onglet « Nombre »; voir image qui suit); faites OK.



Finalement, ajustez les unités indiquées en D4, en indiquant « π rad » (insérez le caractère spécial).

18- Voilà, tout est fonctionnel. Vous pouvez maintenant explorer rapidement l'effet de différentes valeurs de constante de phase. Utilisez la barre de défilement pour ajuster $\phi = 0$; vous observez alors une courbe de cosinus sans décalage.

Avec $\phi = +\frac{1}{2}\pi$ rad, la courbe est décalée d'un quart de cycle vers la gauche (elle est en avance d'un quart de cycle sur la courbe de cosinus standard).

Si $\phi = -1\pi$ rad, on observe un sommet négatif à $t = 0$.

Servez-vous de ce simulateur pour vérifier/clarifier votre compréhension du rôle ou de l'effet de ϕ .

19- Pour améliorer le simulateur davantage, on peut y ajouter quelques fonctions de calcul automatique. Par exemple, en B7, indiquez « T » (pour période), et en C7, insérons le calcul de la période à partir du ω connu car « $T = 2\pi/\omega$ » :

$$= 2 * \pi() / \omega$$

En D7, ajoutez « s » comme unités. La période se calcule maintenant automatiquement. Elle est de 62,8 s pour le mouvement actuel. Excel peut donc aussi vous servir de calculatrice rapide pour les paramètres inconnus d'une oscillation, à partir des paramètres entrés.

20- Modifiez maintenant la valeur de ω en C3 pour « 1 ». Le graphique est alors un peu plus confus. C'est parce qu'on aperçoit environ 24 cycles de période 6,28 s. Les cycles sont très minces sur le graphique et on commence à distinguer les 1000 points qui ne se touchent plus. Modifions l'intervalle affiché en changeant t_f en C6 pour 100. Vous recommencerez à voir une courbe sinusoïdale et pourrez mieux comprendre la vue confuse qui précédait.

Votre simulateur est maintenant très complet pour étudier la position en fonction du temps dans un mouvement harmonique. De façon plus générale, avec ou sans graphique, l'utilisation d'Excel est une alternative pour résoudre vos problèmes. En escamotant les étapes de mise en forme ou plus poussées, 2 ou 3 minutes suffisent à construire un simulateur fonctionnel. Si vous enregistrez le document, il pourra vous servir pour tous les cas futurs où vous effectuerez un même calcul et être alors plus rapide que votre calculatrice, et ce, particulièrement lorsqu'un graphique est utile ou requis dans la solution.

Partie 2 : Les ondes sinusoïdales progressives

Nous allons maintenant étudier une onde sinusoïdale progressive sur une corde. L'objectif concret est de produire un graphique représentant la position verticale des points de la corde et pour lequel on pourra modifier rapidement les paramètres de l'onde pour observer les différentes combinaisons de valeurs ainsi que l'effet de la variation des différents paramètres.

Dans nouveau fichier Excel, reproduisez les étapes suivantes pour construire progressivement le simulateur d'onde progressive. Utilisez les mêmes adresses de cellules que la marche à suivre pour assurer une correspondance exacte dans les instructions.

21- Établissons pour commencer les paramètres de l'onde. Supposons que l'onde étudiée soit définie par $y = 0,1 \cdot \sin(3x - 10\pi t + \pi)$, et qu'on la tracera entre $x_a = 0$ et $x_b = 10$ m. Inscrivez les divers symboles des paramètres dans les cases B2 à B8 (avec leur unités, comme manière alternative) et inscrivez en C2 à C8 les valeurs correspondantes, tel que sur la figure suivante (les valeurs ω et ϕ vont évidemment être remplacées automatiquement par leur valeur en raison du symbole « = ») :

	A	B	C
1			
2		A (m)	0,1
3		k (1/m)	3
4		omega (rad/s)	=10*PI()
5		phi (rad)	=PI()
6		t (s)	0
7		xa (m)	0
8		xb (m)	10

Dans la zone nom de chaque paramètre (colonne C, et non B), entrez les noms des variables tels quels.

Créons ensuite deux colonnes de valeurs pour les coordonnées x et y des points de la corde. En B14 et C14, inscrivez les titres des colonnes « x » et « y », et en B15, inscrivez la fonction qui va générer 1 000 valeurs x , de x_a à x_b :

=SEQUENCE(1000 ; 1 ; xa ; (xb-xa) / 1000)

Ces 1 000 valeurs étant créés, nommez x ce vecteur via la Zone Nom (sélectionnez B15 et CTRL-↓...).

22- Pour calculer les positions y correspondantes, on peut inscrire en C15 l'équation suivante :

=A * SIN(k*x – omega * t + phi)

On peut maintenant tracer le graphique.

Traçage du graphique

23- Sélectionnez les deux colonnes entières

- sélectionner B15 et faire CTRL-↓ pour vous rendre aux dernières valeurs, (⌘ Cmd-↓);
- sélectionnez B1014 et C1014, puis CTRL-SHIFT-↑ pour sélectionner toutes les valeurs;
- SHIFT-↓ pour retirer de la sélection les titres x et y .

Insérez un graphique de type « nuage de points sans courbe » qu'on placera à côté de nos colonnes de valeurs.

24- Notre simulateur est fonctionnel. On peut maintenant modifier les paramètres en un seul clic (cases C2 à C8) pour voir la courbe s'ajuster instantanément. Par exemple, remplaçons la constante de phase ϕ en C5 par $\pi/2$ (« =pi()/2 »). On devrait alors voir la courbe débiter à $y = 0,1$ plutôt qu'à $y = 0$ (un sinus décalé d'un quart de cycle début avec un sommet).

25- Maintenant, remplaçons le nombre d'onde k par 0,2 (en C3), une valeur impliquant une longueur d'onde plus

grande ($\lambda = \frac{2\pi}{k} = 10\pi$ m). On n'aperçoit alors qu'une partie de cycle, alors qu'on préfère voir plus d'un cycle complet. On peut modifier la longueur de corde affichée via x_a et x_b . Changez la valeur x_b pour 50 et vous apercevrez une portion plus grande de la corde correspondante.

26- Faisons maintenant calculer par Excel certains paramètres utiles de cette onde, soit la période et la longueur d'onde. En B9, inscrivez « T » (pour période), et en C9, calculons-la partir de la fréquence angulaire connue ($T = 2\pi/\omega$) :

$$= 2*\pi() / \omega$$

27- En B10, inscrivez « lambda » (pour longueur d'onde) et en C10 calculons-la à partir du nombre d'onde k (car $\lambda = 2\pi/k$) :

$$= 2*\pi() / k$$

28- Pour observer la courbe à différents instants, on pourrait également modifier la valeur t inscrite en C6. Cette valeur t est l'instant pour lequel la trace de l'onde est mise en graphique. Par exemple, et maintenant que l'on sait que la période est de 0,2 s, inscrivons en C6 un temps de 0,01 s et voyez l'onde se déplacer légèrement vers la droite (d'un vingtième de cycle) alors que vous appuierez sur « ENTER ».

On a un simulateur fonctionnel, mais on va l'améliorer encore.

Superposer deux scénarios

29- Ajoutons une seconde courbe sur le même graphique. Comme il sera plus rapide d'insérer un nouveau graphique avec les deux courbes que d'ajouter une courbe sur le graphique actuel, supprimez simplement le graphique actuel.

Donnons à la nouvelle onde quatre valeurs pour les paramètres principaux en copiant horizontalement la plage C2-C6 vers D2-D6 : sélectionnez les cases de paramètres de C2 à C6, et par le coin inférieur droit, étirez la sélection vers la colonne D (image qui suit). Toutes les valeurs seront recopiées pour l'onde #2.

	B	C	D
A		0,1	
k		0,2	
omega		31,41592654	
phi		1,570796327	
t		0,01	
xa		0	
xb		50	

Via la Zone Nom, nommez ces quatre paramètres A_2, k_2, omega_2, phi_2 et t_2 (on ne pourrait utiliser A2 k2 et t2 car des cases de la feuille porte déjà ces noms).

30- En D14, inscrivez un nom pour cette deuxième onde, soit « y2 ». En D15, calculez les positions avec l'équation suivante :

$$= A_2 * \sin(k_2 * x - \omega_2 * t_2 + \phi_2)$$

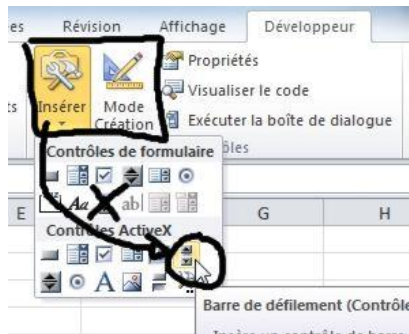
31- On peut maintenant recréer un graphique qui inclura les deux séries de données. Sélectionnez les trois colonnes entières et insérez à nouveau un graphique (B15, CTRL-↓, sélectionner B1014 à D1014, CTRL-SHIFT-↑, SHIFT-↓, ...).

32- Les deux courbes sont évidemment confondues puisqu'on regarde des ondes identiques au même instant. On pourrait par contre modifier les paramètres de l'une des deux pour les voir se distinguer. Mais plutôt, affichons deux instants différents pour la même onde.

Automatiser le contrôle d'un paramètre

33- Rendons possible une animation de l'onde (eh oui!). Choisissons un intervalle de temps sur lequel l'analyse nous intéresse. Par exemple, le premier et le dernier des instants étudiés dans un problème. Appelons-les t_i et t_f . Inscrivez en B11 et B12 « t_i (s) » et « t_f (s) ». Supposons qu'on s'intéresse à l'intervalle de 0 à 1 s. En D11 et D12, inscrivez « 0 » et « 1 ». On divisera en 100 cet intervalle et on pourra observer les 101 instants qui définissent ces 100 intervalles. (Via la Zone Nom, nommez ces valeurs t_i et t_f).

34- Dans l'onglet « Développeur » (au besoin voir l'activation de l'onglet Développeur au point 13 de la partie 1), insérez une « Barre de défilement » (du sous-groupe Contrôle ActiveX) et tracez un rectangle à peu près équivalent à la case F6 (déplacez le graphique s'il couvre F6). (Voir les deux images qui suivent.)

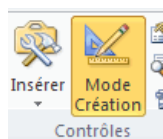


C	D	E
0,1	0,1	
0,2	0,2	
41592654	31,4159265	
70796327	1,57079633	
0,01	0,01	
0		

35- Immédiatement après l'avoir créé, par un clic-droit sur cet objet sélectionnez « Propriétés » (🍏 c'est parfois « Format de contrôle » ou « Format d'objet »). Apparaît alors la boîte de dialogue comprenant des paramètres liés à cet objet de contrôle. Fixez les valeurs suivantes :

Cellule liée (ou LinkedCell) : F6
 Max : 100
 Min : 0

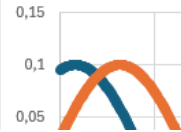
Fermez cette fenêtre. Toujours dans l'onglet « Développeur », désactivez le « Mode Création » pour rendre actif ce bouton de contrôle (🍏 il n'y a pas de Mode Création à désactiver) :



36- Vous disposez maintenant d'une barre de défilement qui permet de contrôler la valeur en F6 qui oscille entre 0 et 100. Nous nous servons de cette valeur pour fixer t entre t_i et t_f , selon 100 valeurs intermédiaires. En D6, remplacez le contenu par l'équation suivante :

$$= t_i + (t_f - t_i) * F6/100$$

A (m)	0,1	0,1
k (1/m)	0,2	0,2
omega (rad/s)	31,41592654	31,4159265
phi (rad)	1,570796327	1,57079633
t (s)	0,01	0,04
xa (m)	0	
xb (m)	50	
T	0,2	
lambda	31,41592654	
ti		0



37- Voilà. Utilisez la nouvelle barre de défilement pour modifier l'instant de traçage de l'onde y_2 . En appuyant sur les flèches de la barre de défilement, vous pouvez animer la courbe comme si le mouvement avait lieu devant vous (sur PC, appuyer en continu sur la flèche suffit pour animer). Si tous les paramètres sont identiques, comme dans le cas présent, ça vous permet d'illustrer la même corde à deux instants différents.

Notez également qu'une barre de défilement pourrait être créée pour contrôler chacun des paramètres. Mais ça deviendrait vite un simulateur de luxe. L'important était ici que vous connaissiez le principe si jamais il devait vous être profitable dans le futur.

Conservez ce fichier puisqu'il pourra concrètement vous servir d'outil d'analyse pour tous les problèmes sur les ondes progressives dans votre cours.