



Aujourd'hui

- Objectifs :
 - Connaître la SD
 - SD = system dynamics = dynamique des systèmes
 - = modélisation par équations différentielles par rapport au temps
 - = modélise des flux continus en termes de *stocks* et de *flux* (flux discrets = pièce à pièce comme dans ARENA, FlexSim, Simio)
 - Savoir implémenter un petit modèle de SD
 - Modifier un gros modèle de SD en ajoutant de l'économie circulaire à World3
 - Quantifier les améliorations apportées par l'économie circulaire
- Plan :
 - Modèles :
 - Equation différentielle $\dot{x} = \alpha x$
 - « Proies-Prédateurs » de Lotka-Volterra
 - World3
 - Travail à faire sur World3 :
 - Ajouter de l'économie circulaire à World3
 - Décrire vos ajouts et leur impact sur la vie des gens
 - Placer votre World3 modifié et vos explications sur Moodle

Introduction

- Rappels :
 - IAM = énorme MFA

	MFA	IAM
Signification	Material Flow Analysis	Integrated Assessment Model
Taille du système	De petit (atelier) à énorme (Monde)	Enorme (Monde)
Nb flux	De un à beaucoup	Beaucoup
Outil mathématique	Algèbre linéaire (si statique) OU Equations différentielles ou aux différences (si dynamique)	Equations différentielles (toujours dynamique)

- La séance s'est conclue sur le constat que *certaines flux d'une MFA croissent très rapidement avec le taux de recyclage* (i.e., de manière inversement proportionnelle à ce taux)
- World3 est l'IAM le + connu et le + ancien
 - p. e., repris dans le modèle WITNESS (World environmental Impact and Economic ScenarioS) du projet SoSTrades d'Airbus [<https://os-climate.org/transition-analysis>]

1. Equation différentielle $\dot{x} = \alpha x$

Notations :

- t temps (continu)
- $x(t)$ fonction
- α constante

Equations :

$$\dot{x}(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \alpha x(t)$$

\Leftrightarrow

$$\frac{dx(t)}{x(t)} = \alpha dt$$

\Leftrightarrow

$$\int \frac{dx(t)}{x(t)} = \alpha \int dt$$

\Leftrightarrow

$$\ln(x(t) - x(t_0)) = \alpha(t - t_0)$$

\Leftrightarrow

$$x(t) = e^{\alpha t} + x(t_0) \quad \text{avec } t_0=0$$

Donc $\dot{x} = \alpha x$ implique une (dé-)croissance exponentielle.

Le tutoriel qui suit va utiliser $x(0) = 1,9$ et $\alpha = 0,666$

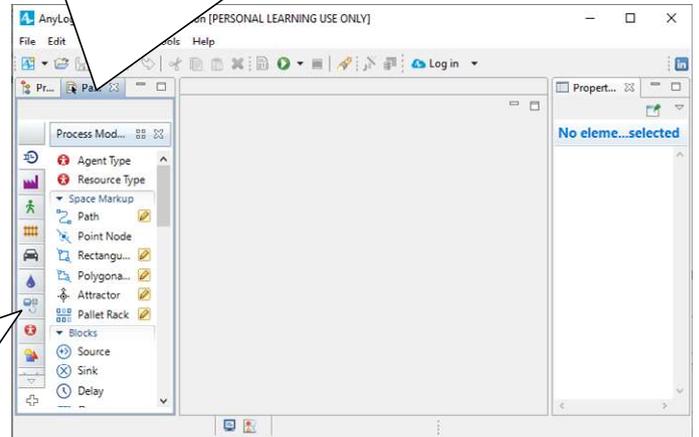
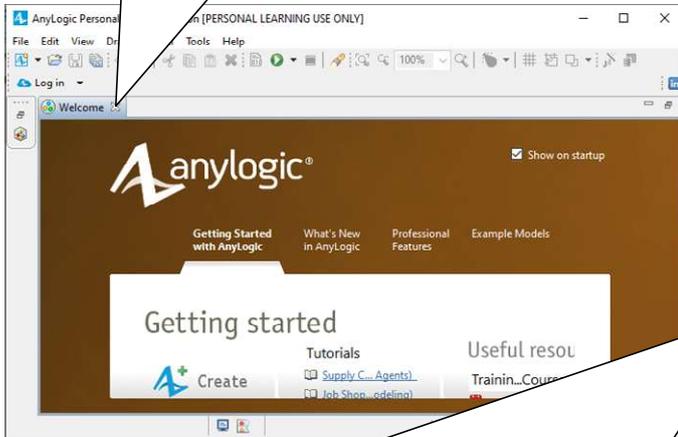
1. $\dot{x} = \alpha x$ dans AnyLogic 8 (1/7)

1. Démarrer AnyLogic 8,7,2 (pas 7,3,4)

2. Cliquer sur Annuler au message du firewall

3. Fermer l'onglet « Welcome »

4. Par défaut, l'onglet « Projects » est sélectionné. Cliquez sur l'onglet « Palette » pour afficher la copie d'écran ci-dessous



5. La palette/bibliothèque qui s'ouvre par défaut est « Process Modelling » (équivalente à ARENA, FlexSim, Simio...). Ouvrez la bibliothèque « System Dynamics ».

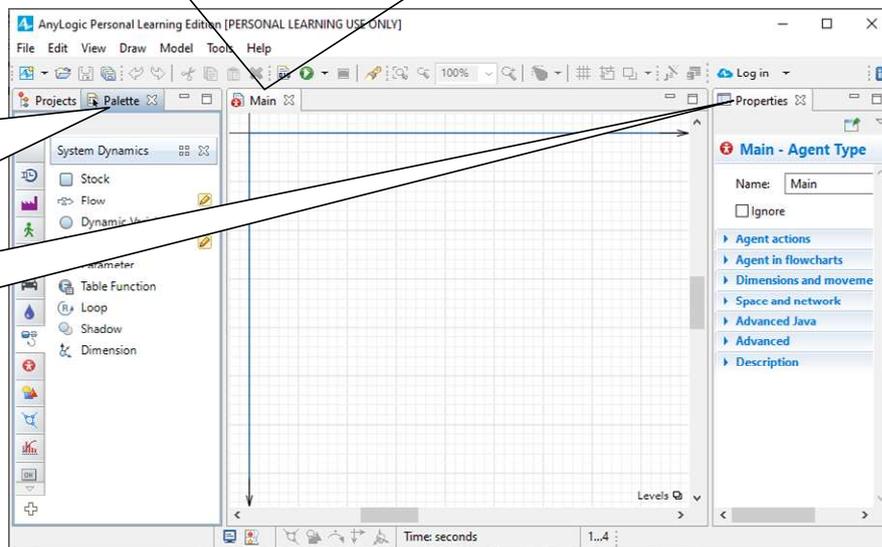
1. $\dot{x} = \alpha x$ dans AnyLogic 8 (2/7)

6. Créez un nouveau modèle (File > New > Model) en indiquant votre H: avec le bouton « Browse... », puis cliquez sur « Finish ».

7. L'onglet « Main » doit s'ouvrir automatiquement. (Sinon, allez dans l'onglet « Projects » et double-cliquez sur « Main ».) « Main » contient votre modèle.

8. Dans la suite, vous allez glisser-déposer des composants (Stock, Flow, ..., Dimension) de l'onglet « Palette » vers « Main », puis...

9. ... le clic sur un composant de l'onglet « Main » affiche ses propriétés dans l'onglet « Properties »



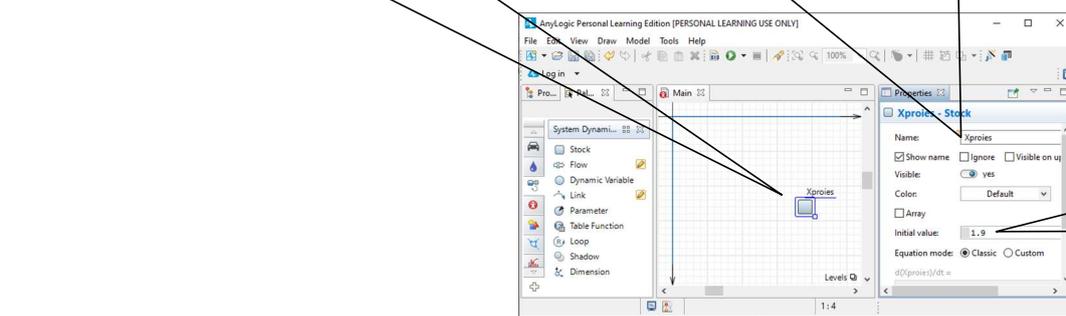
1. $\dot{x} = \alpha x$ dans AnyLogic 8 (3/7)

10. Nous allons commencer par implémenter $dx(t)/dt = \alpha$ avec $\alpha = 0,666$ et $x(0) = 1,9$

11. Faites un glisser-déposer d'un Stock de Palette vers le Main.

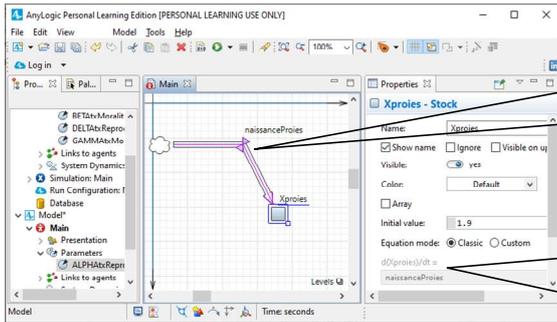
12. Nommez ce Stock « Xproies » en remplaçant « stock » par « Xproies » dans le « Name » de l'onglet Properties et...

13. ... mettez sa « Initial value » à 1.9 (avec un point).



14. Faites un glisser-déposer d'un Flow de Palette vers le Main et nommez-le « naissancesProies ». Cliquez sur le petit cercle entre l'extrémité de la flèche et le nuage de gauche et, sans relâcher le bouton, connectez ce flux au stock Xproies.

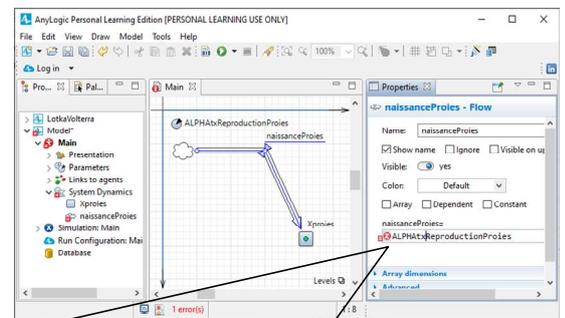
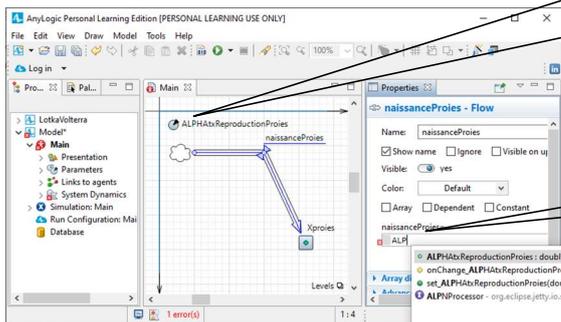
15. Si la connexion s'est bien faite alors :
(i) la flèche du flux naissancesProies doit suivre chaque déplacement du stock xProies et
(ii) dans les propriétés du stock Xproies, le champs (grisé) « d(Xproies)/dt= » contient naissanceProies.



1. $\dot{x} = \alpha x$ dans AnyLogic 8 (4/7)

16. Ajoutez un « Parameter » avec (i) « ALPHAtxReproductionProies » comme « Name » et (ii) « 0.666 » comme « Default value ».

17. Ajoutez ce paramètre dans le flux naissance Proies en sélectionnant ce flux, et, dans son champ « naissanceProies = », tapez « ALP » puis Ctrl+barre d'espace pour activer l'auto-complétion, et double-cliquez sur « ALPHAtxReproductionProies » dans la liste qui apparaît.



18. L'ajout de « ALPHAtxReproductionProies » ajoute un message d'erreur (croix blanche sur fond rouge). Cliquez sur le « ALPHAtxReproductionProies » que vous venez d'entrer par auto-complétion pour afficher un second message d'erreur rouge à côté du premier, cliquez sur ce second pour faire apparaître « Create a link from ALPHAtxReproductionProies » et cliquez dessus.

1. $\dot{x} = \alpha x$ dans AnyLogic 8 (5/7)

19. L'étape 18 a créé un « link » (flèche) représenté par une flèche du Parameter ALPHAtxReproductionProies vers le Flow naissanceProies.

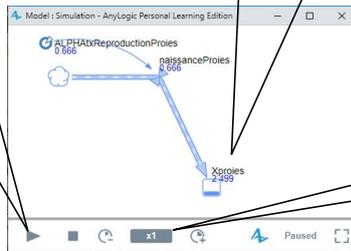
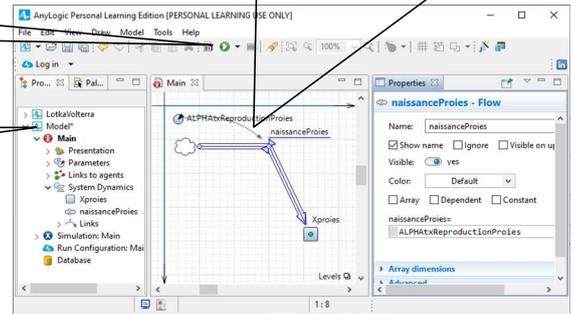
20. Pour exécuter le dernier modèle exécuté, cliquez sur le triangle blanc dans un cercle vert (ou sur le triangle vers le bas à sa droite pour lancer un autre modèle).

21. Pour exécuter votre modèle, une alternative est d'aller dans l'onglet « Projects », de cliquer-droit sur le nom de votre modèle et de sélectionner « Run ».

22. Cliquez sur le triangle pour lancer la simulation.

23. Le nombre de proies Xproies augmente.

24. Vous pouvez accélérer/ralentir la simulation (x1, x2, ... jusqu'à « Virtual » qui simule aussi vite que le permet votre machine).



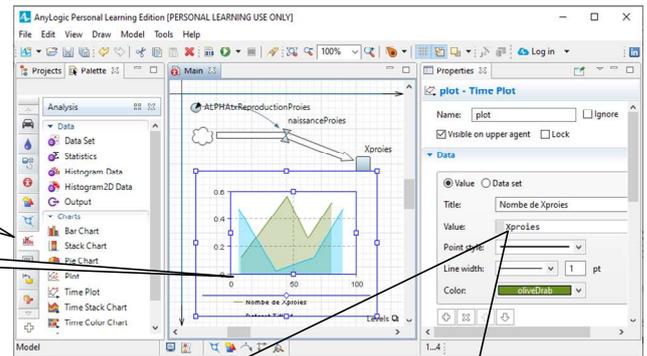
1. $\dot{x} = \alpha x$ dans AnyLogic 8 (6/7)

25. Ce transparent ajoute un graphique visualisant l'augmentation du nombre de proies en fonction du temps.

26. Fermer la fenêtre de simulation

27. Dans l'onglet « Palette », ouvrez la bibliothèque « Analysis ».

28. Glissez-déposez un « Time plot » de la Palette vers le Main.



29. Dans les Properties du Time plot, dans sa section Data, remplacez :

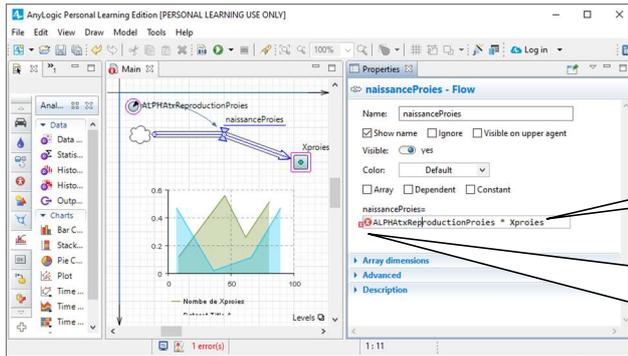
- dans Title : « Dataset Title » par « Nombre de Xproies »
- Dans Value : « 0 » par « Xp » puis Ctrl+barre d'espace, puis sélectionnez « Xproies »

30. Exécutez le modèle.

Constatez que le Time Plot montre une croissance linéaire ($\dot{x} = \alpha$) et non pas exponentielle ($\dot{x} = \alpha x$) du nombre de proies Xproies

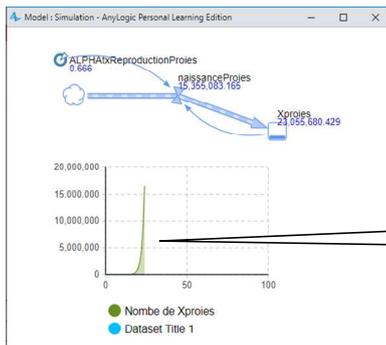
1. $\dot{x} = \alpha x$ dans AnyLogic 8 (7/7)

31. Ce transparent corrige le modèle pour modéliser $\dot{x} = \alpha x$ (au lieu de $\dot{x} = \alpha$)



32. Dans le Flow naissanceProies, dans le champ « naissanceProies », après « ALPHAtxReproductionProies », ajoutez « * Xp » puis Ctrl+barre d'espace puis sélectionnez « Xproies ».

33. Une erreur est signalée. Cliquez dans le champ « naissanceProies » pour faire apparaître la seconde icône d'erreur, puis cliquez sur celle-ci et sélectionnez « Create a link from Xproies ».



34. Relancez la simulation (touche F5) pour voir que vous avez bien la croissance exponentielle attendue.

2. Lotka-Volterra : Introduction au modèle proies-prédateurs

35. Le tutoriel précédent n'a implémenté qu'une partie de la première de ces 2 équations. Utilisez ce transparent et le suivant pour programmer les deux équations différentielles ci-dessous. (Vous pouvez vous aider du fichier LotkaVolterra.alp sur Moodle.)

Notations :

- t temps (continu)
- $x(t)$ effectif des proies
- α taux de reproduction intrinsèque des proies (indépendant du nombre de prédateurs)
- β taux de mortalité des proies dû aux prédateurs (dépendant du nombre prédateurs)
- $y(t)$ effectif des prédateurs
- δ taux de reproduction des prédateurs (dépendant des proies mangées)
- γ taux de mortalité intrinsèque des prédateurs (indépendant du nombre de proies)

Equations :

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = x(t)(\alpha - \beta y(t)) \\ \frac{dy(t)}{dt} = y(t)(\delta x(t) - \gamma) \end{cases}$$

Rappel : $\dot{x} = \alpha x$ est la définition de l'exponentielle. Par ex., si $\beta = \delta = 0$, alors ces équations sont :

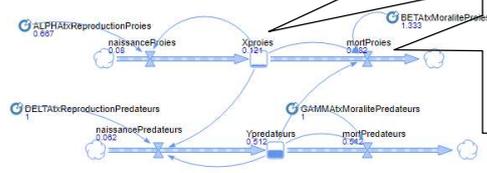
$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = \alpha x(t) \\ \frac{dy(t)}{dt} = -\gamma y(t) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x(t) = e^{\alpha t} \\ y(t) = e^{-\gamma t} \end{cases}$$

2. Lotka-Volterra : Introduction au modèle proies-prédateurs

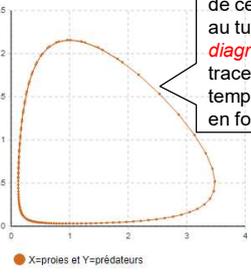
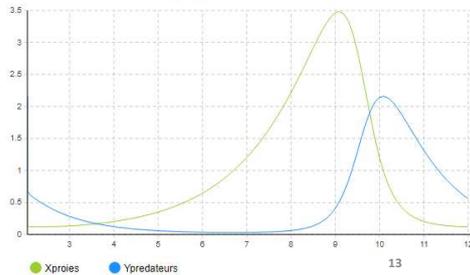
A retenir :

- Une **fonction** $x(t)$ (p.e. Xproies) est représentée par un **stock**.
- Chaque stock contient une **équation différentielle** des flows entrants moins les flows sortants dans ce stock.

Exemple montré dans le tutoriel suivant pour $x(0) = y(0) = 1,9$, $\alpha = 0,666$, $\beta = 1,333$ et $\delta = \gamma = 1$:



A retenir : Chaque **flow** calcule l'un des termes de la somme/soustraction de l'équation différentielle d'un stock (p.e. mortProies détaille ce qui est après le signe moins (donc $x(t)\beta y(t)$) de l'équation différentielle $\frac{dx(t)}{dt} = \dots - x(t)\beta y(t)$.)



Regardez les paramètres de ce Plot : contrairement au tutoriel précédent, ce **diagramme de phase** ne se trace pas en fonction du temps, mais montre Xproies en fonction de Ypredateurs.

3. Modèle World3 : Vue générale

- World = notre monde
- World2 développé par **Jay Wright Forrester** (=créateur de la dynamique des systèmes qui a, par exemple, mis en évidence l'effet coup de fouet dans les chaînes logistiques)
- World3
 - basé sur World2
 - développé par **Dennis Meadows**, Donella Meadows, Jørgen Randers et William Behrens au MIT
 - à la demande du Club de Rome
 - livre « The Limits to Growth » paru en 1972 (en français « **Les limites à la croissance** (dans un monde fini) ») (Reparation de « Les Limites à la croissance - Edition spéciale 50 ans » en 2022)
 - modélise qu'une croissance infinie est impossible dans un monde fini
 - combattit par le modèle DICE de William Nordhaus (comparaison des 2 modèles par Heu?reka dans « Modéliser l'avenir de l'humanité » <https://youtu.be/nAO21ec1lqc>)
- World3 représente les interactions entre 5 systèmes :
 1. alimentaire (incluant agriculture et industrie agroalimentaire)
 2. industriel
 3. démographique
 4. ressources non renouvelables
 5. pollution
- Limites du modèle :
 - réchauffement climatique non pris en compte
 - pas de substitution possible entre ressources

4. Modèle World3 : Travail à faire

- Version de World3 implémentée par Justin E. Lane [<https://github.com/cogijl/World3>]
- Parcourez le modèle pour voir sa taille et avoir une idée de son contenu
- Décélérez la baisse de la population :
 1. Réfléchissez à une modification dans le monde réel
 - Modification d'un paramètre du modèle
 - Ou
 - Ajout d'un flux de retour pour circulariser l'économie
 2. Simulez cette modification.
 3. **Sauvegardez une copie d'écran**