

## Exploration par les modèles du futur possible d'un écosystème : expérience avec des lycéens confrontés au problème des espèces introduites en Méditerranée

MANEL DHOUBI<sup>1,2</sup>, PATRICIA SCHNEEBERGER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université Ezzittouna  
Tunisie  
maneldhouibi2@gmail.com

<sup>2</sup>Lab E3D  
Université Bordeaux  
France  
schneepat33@gmail.com

### ABSTRACT

*We are interested in the question of species introduced into the marine environment of the Mediterranean Sea. We propose to the students of three second year Science groups to represent the Mediterranean ecosystem before and after the entry of three new species through diagrams. We examine the path of the students during the connections between different universes: the universe of the abstract imaginary thought of the models and that of the phenomena of empirical reality thanks to the language activities deployed through the diagrams. Our investigations show that students represent the possible future of the ecosystem by building models different from those learned in class. They are examining their old codings, transforming it to build the concept of introduced species.*

### KEYWORDS

*Models introduced species, schema, language activities, possible worlds*

### RÉSUMÉ

*Nous nous intéressons à la question des espèces introduites en milieu marin de la mer Méditerranée. Nous proposons aux élèves de trois groupes de deuxième année Sciences de représenter l'écosystème méditerranéen avant et après l'entrée de trois nouvelles espèces à travers des schémas. Nous examinons le parcours des élèves lors des mises en relation entre des univers différents : l'univers de la pensée imaginaire abstraite des modèles et celui des phénomènes de la réalité empirique grâce aux activités langagières déployées à travers les schémas. Nos investigations montrent que les élèves représentent le futur possible de l'écosystème par la construction de modèles différents de ceux appris en classe. Ils mettent en examen leurs anciens codages, les transforment pour construire le concept d'espèces introduites.*

### MOTS CLÉS

*Modèles, espèces introduites, schémas, activités langagières, mondes possibles*

## INTRODUCTION

Nous nous intéressons à l'un des problèmes environnementaux « *les plus préoccupants* » (Vicente, 2022) à savoir celui des espèces introduites en Méditerranée. L'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture annonce en 2022 l'introduction de 900 espèces allochtones dans cette mer et en Mer Rouge. Cette introduction change l'écosystème méditerranéen en modifiant la composition de ses communautés faunistiques et floristiques et les facteurs en relation. Ce système écologique « *sera plus riche ou plus pauvre ; il sera probablement différent* » (Vicente, 2022). Ces changements futurs doivent être prédits pour éviter l'inévitable, d'où les chantiers actuels qui tentent de représenter l'état actuel et de construire l'avenir des écosystèmes marins.

La représentation de l'état actuel des systèmes écologiques et la prédiction de leur avenir sont possibles grâce aux modèles. La modélisation, dans ce cas, prend en considération l'enchevêtrement des composantes de l'écosystème, en interaction et en perpétuel évolution spatiotemporelle.

La représentation de l'avenir de ces systèmes nécessite la mise en place d'une variété de modèles prédictifs (Anderson et al., 2003). La fonction de prédiction d'un modèle interroge la relation entre le modèle et son objet réel. En effet, au moment de la représentation d'une prédiction, le chercheur modélise un objet qui n'est pas une réalité, qui n'existe pas encore et peut-être qui n'existera jamais. Cet objet est de l'ordre de la fiction. Le modèle devient la « *source de connaissance* » (Le Moigne, 1987) sur ce futur possible, il perd momentanément son rôle d'intermédiaire avec la réalité empirique actuelle. Cette séparation rend possible l'imagination d'un autre monde biologique.

Les modèles sont des outils incontournables dans la recherche scientifique et la modélisation représente actuellement une composante fondamentale de l'activité du chercheur. Il en est devenu de même, et ceci depuis des décennies, dans les recherches didactiques où la modélisation requiert « *des démarches intellectuelles* » (Chomat et al., 1988, p. 143) spécifiques que les élèves devraient acquérir.

Un modèle possède différentes dimensions d'où la nécessité d'instaurer un enseignement qui prend en considération la pluralité de la pratique de modélisation. Dans nos recherches nous nous penchons sur les moments de manipulation des modèles par des élèves qui connaissent déjà le modèle théorique (Schneeberger & Dhouibi, 2006, p. 151). Ces moments représentent une expérience de la pensée au cours de laquelle les apprenants interrogent simultanément le système biologique réel et le système modèle (Braillard, 2008, p. 124).

Nos investigations visent à comprendre comment les élèves utilisent les modèles pour se représenter un système écologique réel actuel et imaginer le futur possible de ce système. Nous cherchons à comprendre comment conduit-on une pratique de modélisation qui permettrait aux apprenants de réaliser une expérience de la pensée par une mise en examen du langage et des concepts déjà appris. Nous nous penchons sur l'étude des représentations et des prédictions construites d'un écosystème marin en nous basant sur l'analyse des modèles des réseaux trophiques dessinés par les apprenants.

## CADRE THÉORIQUE

### *Le devenir des écosystèmes : une question vive*

La naissance de l'écologie comme une science indépendante, qui étudie les interconnexions des êtres vivants entre eux et leurs interactions avec le milieu, s'est produite en 1866 par Ernest Haeckel (1834-1919). Au 20<sup>e</sup> siècle, l'écologie interfère avec le courant de pensée

interdisciplinaire environnemental. Le concept environnement exprime « *l'extériorité physique* » (Walter, 1994, p. 32) par rapport à l'homme. L'évolution de ce concept a permis l'exposition de « *l'action anthropique* » dans tout ce qui entoure l'homme et la mise en avant de l'enjeu fondamental de la protection de la nature. Ce défi nécessite la compréhension du fonctionnement de l'environnement naturel et de son évolution. La prédiction de l'avenir des écosystèmes est devenue une nécessité politique, économique et sociale.

Par ailleurs, L'écologie étudie des « *entités* » (Keller & Golley, 2000, p. 23) complexes de natures différentes : organiques, systémiques et formelles. Un système écologique marin comme celui choisi pour notre étude est composé « *d'un ensemble d'éléments qui interagissent entre eux* » (Delattre, 1971, p. 47). L'évaluation de la « *bonne santé* » (Costanza, 2012; Giraudoux, 2014) d'un écosystème se fait par l'estimation de son organisation (Costanza, 2012, p. 25), qui s'exprime par le nombre et la diversité des relations qui lient ses composants. Les relations trophiques entre les espèces animales et végétales assurent la circulation de la matière et de l'énergie au sein du système. Cette interaction continue entre les sous-systèmes, structurée par une multitude de boucles de régulation, maintient l'intégrité et la survie du système écologique.

Un écosystème produit « *un enchaînement de processus* » (Blondel, 1990, p. 395) qui opèrent selon trois échelles « *celles de l'espace, celle du temps et celle des changements* » (Blondel, 1990, p. 395). Les perturbations subies par un écosystème sont des facteurs récurrents, les écosystèmes ne connaissent que momentanément des états de « *constance absolue* » (Delettre & Korniliou, 2022, p. 65). Ils varient avec une tendance à « *se maintenir dans un certain état ou à y revenir* » (Delettre & Korniliou, 2022, p. 64) après une perturbation. Notons cependant que les écosystèmes n'ont pas un seul état d'équilibre possible. Un système écologique sur une durée donnée peut évoluer vers plusieurs « *états dynamiques* » (Giraudoux, 2014, p. 130) tout en conservant les mêmes composants.

### **La modélisation**

Expliquer l'environnement naturel et prédire son devenir nécessitent la mise en œuvre des modèles. Le modèle peut s'exhiber sous une forme abstraite (une équation) comme il peut prendre une forme concrète (une maquette...).

#### *Les apports épistémologiques des modèles*

Le modèle en écologie est un construit élaboré dans le but de représenter la « *structure* » et le « *comportement* » (Koponen, 2007, p. 758) d'un système écologique réel. Sa fonction principale est d'être un « *facilitateur* » (Varenne, 2008) à l'explication de l'objet biologique et à la prédiction de son évolution. Pour représenter fidèlement le phénomène, le modèle doit être « *similaire* » (Weisberg, 2007, p. 216) à son objet sans constituer toutefois une réplique complètement identique au système réel, la similitude ne pouvant qu'être partielle selon certains aspects choisis par le modélisateur. Même si un modèle peut avoir comme origine une ressemblance physique, une analogie ou une métaphore, il n'est pas « *un simple analogue* », il a « *une indépendance ontologique* » et « *une existence autonome* » (Varenne, 2008, p. 8), ou plutôt une « *semi-autonomie* » (Koponen, 2007, p. 752) vu les liaisons qu'il établit obligatoirement avec son objet réel.

En outre, le modèle est comparable aux fictions littéraires (Godfrey-Smith, 2009a) ; c'est « *un construit symbolique* » (Varenne, 2012, p. 5) « *imaginaire* » (Godfrey-Smith, 2009a, p. 102) « *imaginé* » (Frigg & Nguyen, 2016, p. 225) par les scientifiques pour explorer les transformations possibles de la réalité. La nature fortement fictive du modèle amplifie sa valeur prédictive. L'autonomie du modèle lui octroie la possibilité de construire un objet empirique imaginaire hypothétique.

### *Les apports didactiques des modèles*

Sur le plan didactique, Loucas et Zacharias (2012, p. 471) définissent une « *approche* » d'enseignement basée sur la modélisation. Ils affirment que la construction des modèles possède un « *grand potentiel* » pour améliorer l'enseignement des sciences. L'apport de cette approche est multiple « *cognitive, métacognitive, sociale, matérielle et épistémologique* » (Loucas, & Zacharias, 2012, p. 487).

Les programmes tunisiens de deuxième année Sciences proposent un chapitre intitulé « *Gestion rationnelle des écosystèmes* » qui a comme objectif l'enseignement des concepts écosystème, adaptation, répartition des végétaux en Tunisie, réseaux trophiques, et cycles de la matière. La notion de « la chaîne alimentaire » est enseignée aux élèves depuis le primaire alors que « le réseau trophique » est enseigné plus tardivement au lycée.

La relation qui lie le modèle au phénomène étudié n'est pas prédéterminé (Weisberg, 2007, p. 216) et définitive, ce qui explique l'utilisation par les chercheurs d'un même modèle selon des visions différentes (quantitatives, qualitatives) pour des objectifs variés (explication, prédiction...) en établissant à chaque fois des relations dissemblables entre des propriétés du modèle et certaines propriétés du phénomène réel. Sur le plan didactique, les activités de modélisation peuvent progresser, sans faire intervenir des changements au niveau du modèle lui-même, par la construction de nouvelles relations entre le modèle et le phénomène réel, ou par une nouvelle « *interprétation* » (Frigg & Nguyen, 2016, p. 229) des relations déjà existantes, ou bien par une comparaison (Godfrey-Smith, 2009a, p. 102) d'un modèle avec plusieurs phénomènes réels. Ces affirmations montrent la variété possible des activités de modélisation susceptibles d'être appliquées en classe. La construction d'un modèle représente une seule étape du processus de modélisation. Ce processus est lié à des démarches intellectuelles variables.

### *Le modèle et l'activité langagière*

Inventer un modèle revient à réaliser une « *expérience de la pensée heuristique* » (Vermandel, 2021, p. 34) qui met en examen le langage et les concepts (Murzilli, 2022, p. 3) déjà construits favorisant leurs transformations par « *l'exploration d'autres possibilités* » (Murzilli, 2004, p. 223) de la connaissance. Le modèle est extériorisé essentiellement par des « *mots* » (Godfrey-Smith, 2009a, p. 102) et des représentations de natures différentes (graphiques, matérielles...) rendant possible un discours à propos et sur le modèle, qui devient par la sorte le sujet des investigations communes des modélisateurs. La dimension fictive du modèle permet « *une expérience de la signification* » (Murzilli, 2004, p. 223) par l'élaboration de nouvelles significations des concepts explicatifs des possibilités étudiées, qui sont « *non formulables* » dans l'ancien langage (Varenne, 2012, p. 18).

Le langage permet la description et l'analyse du modèle lors des activités de modélisation en réalisant une « *coordination explicite* » (Weisberg, 2007, p. 219) entre un système réel avec le système modèle fictif. Si le modèle est suffisamment similaire au monde, alors l'analyse du modèle est aussi, indirectement, une analyse des propriétés du phénomène du monde réel (Weisberg, 2007, p. 209).

Selon Astolfi et al. (1988), la simplicité des schémas des chaînes et des réseaux trophiques n'est qu'apparente. Elle cache « *un surplus de conceptualisation* » (Astolfi et al., 1988, p. 698). Les maillons représentent « *des classes d'équivalence* » résultant d'une activité cognitive complexe. La représentation schématique d'une espèce dans un réseau trophique est une abstraction par « *extraction* » (Portides, 2021) des propriétés autres que la nutrition de l'espèce considérée. La transformation de l'entité espèce en une entité prédateur est un acte d'idéalisation (Godfrey-Smith, 2009b, p. 48) qui suppose que tous les individus de la population sont obligatoirement les prédateurs et les proies citées dans le réseau. C'est une caractéristique imaginaire ajoutée à l'entité espèce qui n'est probablement pas réelle vu la dynamique spatiotemporelle de l'espèce.

## PROBLÉMATIQUE

Notre étude théorique a mis en exergue le rôle fondamental du modélisateur, en appliquant un modèle déjà construit précédemment, et ceci, en considérant que la modélisation est un processus continu, et que le modèle est « *dynamique* » (Walliser, 1977), qu'il est « *indissociable du sujet qui le manipule* » (Le Moigne, 1987, p. 3). L'action de modélisation nécessite la réalisation de nombreux choix.

Nous partons de l'hypothèse qu'en modélisant, l'élève interroge simultanément le problème du phénomène des espèces introduites et le modèle du réseau trophique, le choix du réseau trophique étant basé sur la récurrence de ce concept et de ses schémas dans les manuels scolaires. La modélisation d'un écosystème sous forme d'un réseau nécessite le recours à un choix des propriétés pertinentes du système écologique à prendre en considération. L'élève modélisateur sélectionne les propriétés de son modèle et le degré de sa similitude avec le système réel. Ce choix s'exprime à travers un langage au niveau des schémas. En effet, l'action demandée aux élèves a principalement deux dimensions langagières et cognitives. Il s'agit pour nous d'explorer :

- Les caractéristiques des modèles construits par les élèves pour résoudre le problème proposé des espèces introduites.
- L'expérience conceptuelle et langagière des apprenants qui se déploie tout au long des activités de modélisation et s'exprime dans le codage des schémas.

## MÉTHODOLOGIE

### *Présentation de la situation de classe*

Nous avons proposé à trois groupes d'élèves de deuxième année secondaire « Section Sciences » (16-17 ans dont un groupe de 18 élèves, les deux autres de 17 élèves chacun) de représenter et d'expliquer l'état de l'écosystème méditerranéen avant et après l'introduction de trois espèces animales et végétales. Chaque groupe a été divisé en quatre sous-groupes. Le support fourni aux élèves précise brièvement les éléments suivants :

- L'introduction accidentelle ou intentionnelle des espèces en Méditerranée.
- L'évolution au cours du temps, du nombre de ces espèces après leur introduction.
- La précision, pour chacune des trois espèces allochtones, de la date de son entrée dans le bassin méditerranéen ainsi que du chemin qu'elle a parcouru.
- Les principales relations trophiques de chacune de ces trois espèces.

### *Le corpus analysé*

Notre corpus est constitué des productions écrites par les 12 sous-groupes. Ces productions sont composées de schémas et de textes explicatifs. Nous nous penchons dans cet article sur l'étude des schémas et des textes qui commentent les schémas. Nous analysons :

- Dans un premier temps : la nature du modèle choisi pour représenter l'écosystème par l'analyse des composantes du système présenté dans le schéma et des relations qui les relie, lesquelles relations sont représentées sur les schémas par des lignes ou bien des flèches.
- Dans un deuxième temps : la relation entre le modèle et le système réel empirique par l'estimation du niveau d'abstraction du modèle et la détermination du système réel modélisé.

## RÉSULTATS

### *Nature et choix des modèles de l'écosystème pour représenter son état initial*

Nous avons demandé aux élèves de représenter et d'expliquer l'état de l'écosystème avant l'introduction de nouvelles espèces, avec des schémas à l'appui sans préciser la nature de ces schémas. Nous avons classé les schémas modèles produits selon trois critères :

- Les éléments du système,
- La nature des relations établies entre les éléments du système,
- L'émergence possible résultant du fonctionnement du système.

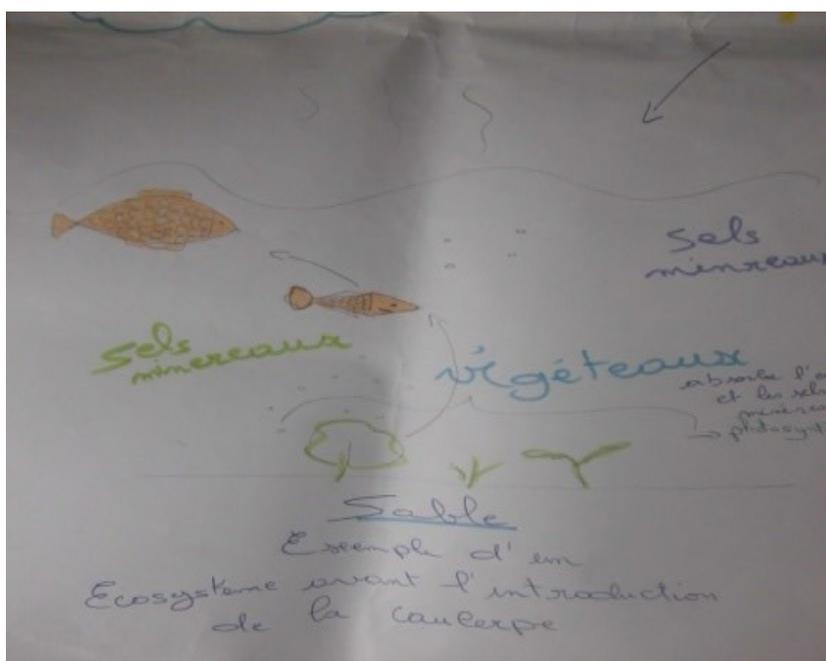
Ces critères nous permettent de déterminer le niveau d'abstraction ce qui nous a permis de distinguer trois catégories, chaque groupe ayant présenté un nombre variable de schémas pouvant appartenir à des catégories différentes (Tableau 1, Figures 1, 2, 3).

**TABLEAU 1**

*La catégorisation des modèles de l'état initial de l'écosystème*

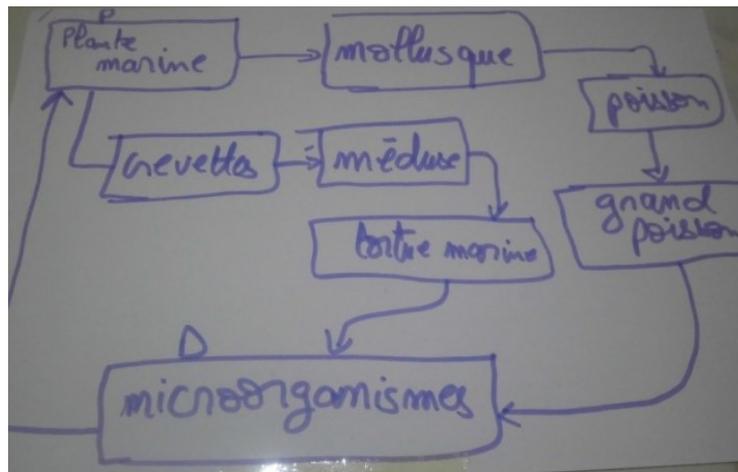
Niveau abstraction		Niveau croissant <span style="float: right;">→</span>		
<b>Le Modèle</b>		Catégorie 1 Une Chaîne alimentaire	Catégorie 2 Un réseau trophique	Catégorie 3 Un réseau trophique
<b>Système cible réel</b>	Les éléments du système	Des individus	Des espèces	Des niveaux trophiques
	Les types d'interaction	Des relations trophiques entre individus	Des relations trophiques entre espèces	Des relations trophiques entre niveaux trophiques
<b>L'émergence</b>		État statique	Un équilibre statique	Un équilibre dynamique

**FIGURE 1**



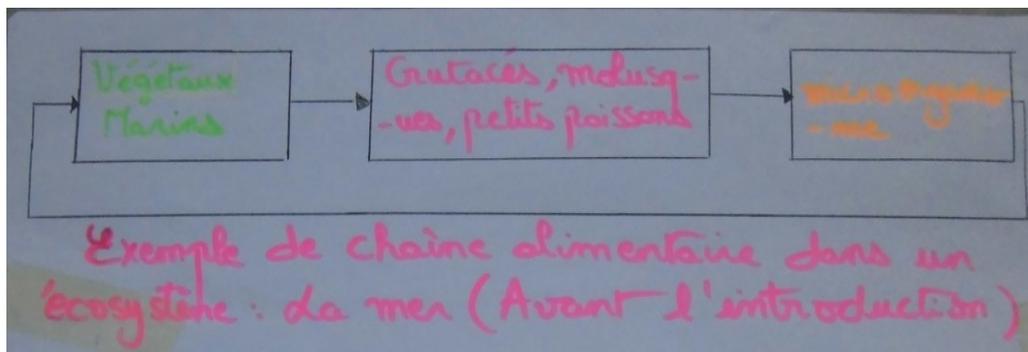
*Exemple du schéma de la catégorie 1*

FIGURE 2



Exemple du schéma de la catégorie 2

FIGURE 3



Exemple du schéma de la catégorie 3

### ***Nature et choix des modèles de l'écosystème pour représenter son état final***

Les sous-groupes ont représenté une variété de schémas pour expliquer l'état de l'écosystème après l'introduction des espèces allochtones :

- Deux sous-groupes seulement n'ont pas dessiné de schéma pour répondre à cette question.
- Certains sous-groupes ont ajouté des schémas afin d'explicitier l'apparition de nouvelles relations trophiques entre les éléments du système autres que la prédation, comme la compétition par exemple.
- Seulement deux sous-groupes ont produit un modèle sous forme d'un réseau trophique qui réunit les trois espèces introduites en représentant leur coexistence en Méditerranée.

Nous avons pris en considération dans notre catégorisation de ces schémas la nature des nouvelles propriétés du modèle imaginé et de la relation qu'il établit avec le réel empirique.

### ***Catégorie a***

Les espèces introduites deviennent des composantes des modèles produits. Les élèves utilisent les mêmes symboles des espèces autochtones pour dessiner les espèces introduites, à savoir un rectangle contenant le nom de l'espèce (Tableau 2). Les données concernant les relations trophiques de l'espèce sont représentées par des lignes ou des flèches.

**TABLEAU 2**

*Description de la catégorie a des modèles de l'état final de l'écosystème*

Type de système	Les éléments du système	Les relations entre les éléments
Le Modèle	Nouveaux éléments	Nouvelles relations
Le Système cible réel	Les espèces introduites	Les relations de consommation entre les espèces introduites et les espèces autochtones

*Catégorie b*

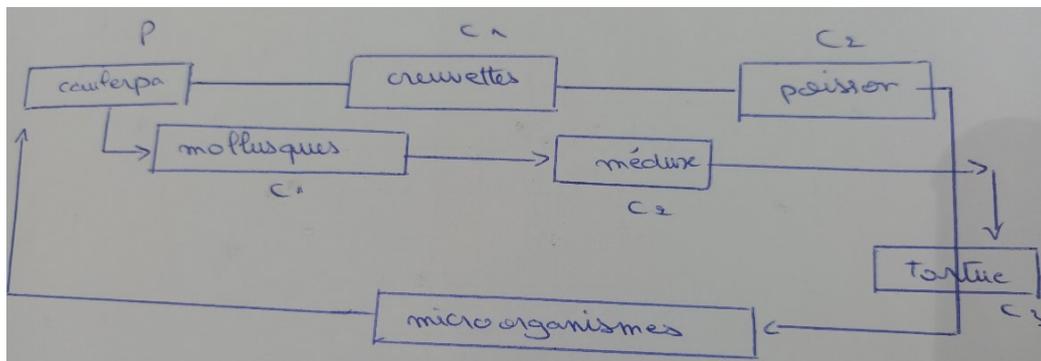
Nous avons classé dans cette catégorie les schémas qui introduisent des composantes (de type 2) qui n'ont pas de supports matériels réels définis (Tableau 3, Figure 4).

**TABLEAU 3**

*Description de la catégorie b des modèles de l'état final de l'écosystème*

Type de système	Les éléments du système		Les relations entre les éléments	
Le modèle	Nouveaux éléments de type1	Nouveaux éléments de type2	Nouvelles relations	Nouvelles relations de type2
Le système cible réel	Les espèces introduites	Pas d'objet réel	Les relations entre les espèces introduites et les espèces autochtones	Pas d'objet réel

**FIGURE 4**



*Exemple de schéma de la catégorie b*

**Modéliser : inventer un langage**

Les élèves ont utilisé spontanément le modèle du réseau trophique pour représenter les états de l'écosystème avant et après l'introduction des espèces parce que ces schémas constituent des prérequis étudiés récemment en classe.

Réellement, les élèves ont présenté des modèles différents de réseaux trophiques comme le montrent les catégories 1, 2 et 3. Ces modèles possèdent des niveaux d'abstraction variable. Ils résultent d'un processus différent de modélisation. L'écosystème selon ces catégories ne possède pas les mêmes constituants (un individu, une espèce, un niveau trophique). La signification des flèches exprimant une relation entre deux individus n'a pas la même signification qu'une flèche reliant deux niveaux trophiques constitués de plusieurs espèces. La première relation peut avoir un support matériel dans le système réel alors que la deuxième exprime une relation purement fictive.

Par ailleurs, Les élèves semblent avoir perçu les limites du modèle du réseau trophique.

Les symboles utilisés dans ce modèle ne peuvent pas représenter les relations trophiques autres que la prédation. Le langage du modèle est inapproprié. Il ne peut pas décrire l'état d'un écosystème après l'introduction de nouvelles espèces. Ce fait a incité les élèves à écrire des textes d'explication ou à ajouter d'autres schémas pour exprimer leurs prédictions à propos des relations qu'établirait l'espèce introduite avec les espèces autochtones.

Les codes utilisés dans les réseaux trophiques acquièrent de nouvelles significations grâce à l'action de modélisation des élèves. Le modèle du réseau trophique est adimensionnel, l'activité langagière déployée par les apprenants lui confère les deux dimensions du temps et de l'espace. Certains éléments appartiennent à l'espace occupé par l'écosystème, d'autres éléments proviennent d'autres aires. De plus, en imaginant les états d'un écosystème à des moments différents, les élèves ont introduit la dimension temps. Une espèce donnée peut être l'espèce la plus compétitive ou bien la moins compétitive à des moments différents de l'histoire de l'écosystème. Ces significations sont inhérentes aux modèles construits par les élèves.

### ***Le futur possible de l'écosystème***

Les modèles de la catégorie a et b sont les traces de deux processus différents de modélisation.

Prenons l'exemple de la figure 4. Le sous-groupe utilise les données présentes dans l'activité pour résoudre le problème des espèces introduites. Il représente l'état de l'écosystème au moment de l'entrée des nouvelles espèces. Il prédit sous forme de texte la disparition des crustacés, des mollusques et des petits poissons. Pour eux, l'entrée d'une nouvelle espèce de poisson cause un déséquilibre qui risque d'entraîner une extinction.

Par ailleurs, le nom d'un autre élément apparaît dans le schéma 4 de la catégorie (b) : la tortue ajoutée au réseau trophique. Cet animal va manger les méduses. Cette donnée n'existe pas dans le document présenté aux élèves. De même, le sous-groupe prédit un changement de l'alimentation des mollusques et des crevettes qui vont dans le futur consommer l'algue la caulerpe. Le premier événement imaginé est possible, car les tortues de mer sont connues comme prédateurs des méduses. Par contre, le deuxième événement semble peu probable, étant donné que *Caulerpa taxifolia* a eu la réputation d'un envahisseur tropical du bassin méditerranéen au début des années 2000. Or actuellement, les superficies occupées par cette algue sont limitées, et sa progression a ralenti. L'existence d'un nouveau consommateur qui a limité son invasion est une hypothèse plausible. Dans ce futur possible, l'écosystème évolue vers un autre équilibre. Alors que les élèves de la catégorie (a) n'imaginent que le déséquilibre de l'écosystème qui peut engendrer sa disparition.

### ***Elaboration d'un nouveau concept : les espèces introduites***

Au cours des activités de modélisation, les élèves construisent un nouveau concept, celui de « l'espèce introduite ». UICN (2000) définit une espèce introduite comme une espèce animale ou végétale qui se trouve en dehors de son aire de répartition naturelle, qui pourrait vivre et se multiplier dans le nouveau milieu. Cette introduction peut avoir des effets négatifs ou positifs sur les différents plans : écologique politique, économique et socioculturel.

L'impact est négatif, lorsque ces espèces envahissent et transforment profondément le système écologique. Ainsi, le réchauffement climatique que notre terre est en train de vivre, a favorisé la survie, l'installation, la prolifération, voire l'invasion de la Méditerranée par des espèces introduites de l'Atlantique, ce qui a provoqué une « *tropicalisation* » de la mer Méditerranée causant un changement des caractéristiques de l'eau (Hassoun, 2014) de cette mer (température, acidité, salinité, oxygène dessous...).

D'autres espèces allochtones peuvent avoir des effets écologiques (adaptation aux conditions méditerranéennes), socioculturels, politiques et économiques (source économique et commerciale nouvelle) positifs. C'est le cas du crabe bleu introduit à travers le canal de Suez, qui a envahi les côtes tunisiennes, cette invasion est devenue une opportunité d'exportation très

rentable. Il s'est avéré, par ailleurs, que certaines espèces méditerranéennes définies actuellement comme autochtones sont en réalité d'anciennes espèces introduites.

De plus, une espèce introduite peut ne pas pouvoir survivre dans le système méditerranéen.

Ces différentes possibilités du devenir des espèces introduites ne figurent pas dans les modèles imaginés par les élèves. Chez les élèves, la conception d'une espèce introduite dominante compétitive est la conception principale, alors que pour eux, les espèces autochtones sont des espèces moins compétitives. Pour les élèves, chaque espèce introduite est une espèce invasive qui causera la disparition d'autres espèces et le déséquilibre de l'écosystème.

En réalité, le nombre élevé des espèces allochtones, leur diversité, la complexité des relations qu'elles établissent avec les autres espèces rend l'opération de prédiction par les scientifiques de l'avenir de l'écosystème méditerranéen ardue.

## DISCUSSION

La pluralité des modèles cache une unité du processus cognitif effectué par les apprenants. Les schémas sont le résultat d'une expérimentation mentale imaginaire, irréalisable empiriquement, qui met en tension le monde réel référentiel avec le monde de la fiction (Bruguière et al., 2007). Par l'intermédiaire d'un modèle, les apprenants mettent en scène des écosystèmes inexistantes mais s'ils existent, ils seraient « *des choses concrètes, physiques, situés dans l'espace et dans le temps* » (Godfrey-Smith, 2009a, p. 102). Ces écosystèmes sont fictifs tout en étant fondés sur des « *éléments empruntés* » de la réalité.

Les modèles de la catégorie b dessinent l'image d'un écosystème « *idéal* » (Koyré, 1960, p. 198) dans lequel les espèces cohabitent et interagissent à travers les relations trophiques. Les élèves imaginent ce que les scientifiques considéraient comme « *impossible* » il y a quelques années dans le cas de la caulerpe. Un modèle peut donc représenter « *ce qui n'est pas encore saisi par la pensée* » (Demoures & Monnet, 2005, p. 43) à l'aide d'une prospection (Barberousse & Ludwig, 2000, p. 31) de l'avenir. C'est une « *possibilisation* » (Murzilli, 2022) de la situation proposée par une variation mentale des données. Cette « *projection imaginaire* » (Barberousse & Ludwig, 2000, p. 31) nécessite de la part des apprenants une exploration de leurs conceptions concernant la structure et le fonctionnement d'un écosystème. Ceci ne signifie nullement que les schémas de cette catégorie présentent des connaissances vraies.

Le modèle du réseau trophique n'est pas formulé dans un langage « *parfait* » (Demoures & Monnet, 2005, p. 46) pour représenter le comportement d'un écosystème après une perturbation. Les schémas produits sont le résultat d'une évaluation du modèle (Schwarz et al., 2009) par une exploration des significations des mots et du codage graphique. Cette « *expérience de la signification* » (Murzilli, 2004) engendre un nouveau langage « *privé* » (Demoures & Monnet, 2005, p. 46) intrinsèque au modèle construit. En effet, les codes des schémas des réseaux trophiques ont acquis de nouvelles significations (l'espace, le temps, la compétition...) tout en gardant les anciennes devenant ainsi polyphoniques (Dhouibi & Schneeberger, 2015, 2020). Incontestablement, les représentations graphiques sont dialogiques, elles sont orientées vers les autres membres de la communauté discursive scolaire.

L'imagination chez le scientifique « *ne s'embarrasse pas des limitations que nous impose le réel* » (Koyré, 1960). Ce détachement n'est pas total, certaines contraintes théoriques contrôlent cette activité mentale. Dans notre recherche, la diversité des réponses des élèves peut être expliquée par une différence d'interprétation du contexte. Certains sous-groupes ont pris la liberté d'ajouter à leurs modèles des éléments et des relations hypothétiques non cités dans la situation proposée. Ce choix a constitué une condition de possibilité à la prédiction d'un nouvel

équilibre. Ces affirmations montrent que la subjectivité des modélisateurs est transposable en classe.

Généralement, la subjectivité du sujet apprenant ainsi que sa représentation personnelle du contexte sont envisagées comme un obstacle à l'apprentissage d'un savoir scolaire objectif, dépersonnalisé et décontextualisé. Pour notre part, nous pensons que la manipulation d'une construction abstraite lors des épisodes fictifs peut constituer un levier à l'apprentissage si « *les propriétés* » du contexte (Barberousse & Ludwig, 2000, p. 20) et les contraintes sont explicitées et négociées en classe car l'objectivité apparaît dans la négociation des intersubjectivités (Popper, 1979,1983,1999).

## CONCLUSION

La préservation des systèmes écologiques nécessite une compréhension du fonctionnement de ces systèmes et la possibilisation de leurs devenir. Notre recherche souligne l'importance de l'imagination dans la pratique de modélisation et des interactions langagières.

L'apprentissage en écologie par les modèles développe un raisonnement « flexible ». Les élèves manipulent mentalement un modèle pour inventer des écosystèmes futurs. La réalisation de ce projet nécessite de la part des apprenants une mise en examen de leurs conceptions et de leur langage. La recherche des conséquences de l'introduction de nouvelles espèces oblige les élèves à examiner les éléments du système écologique et à revoir les relations actuelles et futures entre ces éléments. En imaginant le futur, on peut « *transformer* » le réel actuel (Varenne, 2008, p. 2) déjà construit.

Notre analyse porte seulement sur une seule séance d'enseignement. Elle ne s'étale pas en durée pour pouvoir étudier l'impact de l'expérience réalisée sur les conceptions des élèves à propos de l'environnement. Il serait intéressant d'organiser une stratégie d'enseignement/apprentissage fondée sur les modèles de la totalité du chapitre « *Gestion rationnelle des écosystèmes* ».

Une approche interdisciplinaire (Giordan & Souchon, 2008) dans l'étude des problèmes liés à l'environnement permettrait une manipulation consciente et contextuelle de l'imagination chez l'élève. La modélisation est une pratique commune intégratrice des sciences environnementales. L'exploitation de sa dimension fictive favoriserait la construction de « *modèles généraux* » (Wolkenhauer, 2001, p. 261) multidisciplinaires. Ces modèles globaux fortement abstraits peuvent rendre intelligible les systèmes écologiques complexes et contingents.

## RÉFÉRENCES

- Anderson, R. P., Lew D., & Peterson A. T. (2003). Evaluating predictive models of species distributions criteria for selecting optimal models. *Ecological Modeling*, 162, 211-232.
- Astolfi, J. P., Ginsburger-Vogel, Y., & Peterfalvi, B. (1988). Aspects de la schématisation en didactique des sciences. *Bulletin de Psychologie*, 41(386), 694-700.
- Barberousse, A., & Ludwig, P. (2000). Les modèles comme fictions. *Philosophie*, 68, 16-43.
- Blondel, J. (1990). Faunes, peuplement, population : Une perspective hiérarchique. *Ecologia Mediterranea*, 16, 395-401.
- Braillard, P. A. (2008). *Enjeux philosophiques de la biologie des systèmes*. Thèse de doctorat, Université Paris 1, France.

- Bruguière, C., Héraud, J.-L., Errera, J.-P., & Rembetta, X. (2007). Mondes possibles et compréhension du réel. La lecture d'un album en cycle 2 comme source de questionnement scientifique. *Aster*, 44, 69-106.
- Chomat, A., Larcher, C., & Méheut, M. (1988). Modèle particulière et activités de modélisation en classe de quatrième. *Aster*, 7, 143-184.
- Costanza, R. (2012). Ecosystem health and ecological engineering. *Ecological Engineering*, 45, 24-29.
- Delattre, P. (1971). *Système, Structure, Fonction, Evolution*. Paris: Librairie Maloine S.A.
- Delettre, O., & Korniliou, A. (2022). De l'équilibre naturel à la stabilité et à la résilience. Désuétude et persistance. *Philosophia Sientia*, 26(1), 57-72.
- Demoures, F. X., & Monnet, E. (2005). Le monde à l'épreuve de l'imagination. Sur « l'expérimentation mentale ». *Tracés. Revue de Sciences Humaines*, 9, 37-52.
- Dhouibi, M., & Schneeberger, P. (2015). L'étude du discours d'un scientifique : éclairage sur le processus de dépassement d'obstacles et perspectives didactiques. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, 11, 79-108.
- Dhouibi, M., & Schneeberger, P. (2020). Le discours polyphonique des manuels de Biologie en Tunisie : Exemple de la régulation de la glycémie. *Éducation et Didactique*, 14(3), 113-135.
- Frigg, R., & Nguyen, J. (2016). The fiction view of models reloaded. *The Monist*, 3(99), 225-242.
- Giordan A., & Souchon A. (2008). *Une éducation pour l'environnement, vers le développement durable*. Delagrave.
- Giraudoux, P. (2014). Équilibre écologique et santé des écosystèmes : Entre mythe biologique et consensus social. In *Nature ou Culture, les colloques de l'institut universitaire de France* (pp. 129-142). Saint Etienne: Publications de l'Université de St Etienne.
- Godfrey-Smith, P. (2009a). Models and fictions in science. *Philosophical Studies*, 143(1), 101-116.
- Godfrey-Smith, P. (2009b). Abstractions, idealizations and evolutionary biology. In A. Barberousse, M. Morange & T. Pradue (Eds.), *Mapping the future of biology: Evolving concepts and theories. Boston studies in the philosophy of science* (pp. 47-55). Boston: Springer.
- Hassoun, A. E. (2014). *Analyse de la modélisation de l'acidification en mer méditerranée. Océan, Atmosphère*. Thèse de doctorat, Université de Perpignan Via Domitia, France.
- Keller, D. R., & Golley, F. B. (2000). Entities and processes in Ecology. In D. R. Keller & F. B. Golley (Eds.), *The philosophy of ecology: From Science to synthesis* (pp. 23-35). The University of Georgia Press.
- Koponen, I. T. (2007). Models and modelling in Physics Education: A critical re-analysis of philosophical underpinnings and suggestions for revisions. *Science & Education*, 16, 751-771.
- Koyré, A. (1960). Le De Motu Gravium de Galilée. De l'expérience imaginaire et de son abus. *Revue d'Histoire des Sciences et de leurs Applications*, 3(13), 197-245.
- Le Moigne, J. L. (1987). Qu'est-ce qu'un modèle ? Les modèles expérimentaux et la clinique. *Confrontation Psychiatrique, Numéro spécial consacré au modèle*. Retrieved from <http://mcxapc.accedo.pro/fileadmin/docs/lemoign2.pdf>.
- Loucas, T. L., & Zacharias, Z. C. (2012). Modeling-based learning in science education: Cognitive, metacognitive, social, material and epistemological contributions. *Educational Review*, 64, 471-492.

- Murzilli, N. (2004). La possibilisation de la pensée : Littérature et expérience de pensée. *Critique*, 682, 218-234.
- Murzilli, N. (2022). La fiction ou l'expérimentation des possibles. In *Actes du Colloque "L'effet de fiction de fabula"*. Retrieved from <https://www.fabula.org/colloques/document7710.php>.
- Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture. (2022). *Des espèces envahissantes sont en train de changer la mer Méditerranée*. Retrieved from <https://www.fao.org/fao-stories/article/fr/c/1603776/>.
- Popper, K. (1979). *La logique de la découverte scientifique*. Paris: Édition Payot.
- Popper, K. (1983). *Conjectures et réfutations*. Paris: Édition Payot.
- Popper, K. (1999). *Les deux problèmes fondamentaux de la théorie de la connaissance*. Paris: Édition Hermann.
- Portides, D. (2021). Thinking about idealization, abstraction and scientific models: An introduction. *Synthèse*, 198, 5849-5853.
- Schneeberger P., & Dhouibi, M. (2006). La régulation de la glycémie : Une étude de cas en première S. *Aster*, 42, 135-158.
- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., Schwarz, Y., Hug, B., & Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal for Research in Science Teaching*, 6(46), 632-654.
- UICN (Union internationale pour la conservation de la nature). (2000). *Guidelines for the Prevention of Biodiversity Loss caused by Alien Species*. Retrieved from <http://www.iucn.org/>.
- Varenne, F. (2008). *Épistémologie des modèles et des simulations : Tour d'horizon et tendances*. Communication présentée au colloque les modèles possibilités et limites organisé par la Société Française de Physique, France. Retrieved from [https://hal.science/hal00674144/file/Epistemologie\\_des\\_modeles\\_et\\_des\\_simulations\\_BNF\\_10\\_decembre\\_2008.pdf](https://hal.science/hal00674144/file/Epistemologie_des_modeles_et_des_simulations_BNF_10_decembre_2008.pdf).
- Varenne, F. (2012). Les frontières entre modèles formels : Juxtaposition, intégration, fusion, composition. In A. F. Schmid (Ed.), *Épistémologie des frontières*. Paris : Pétra. Retrieved from [https://www.academia.edu/16403373/Les\\_fronti%C3%A8res\\_entre\\_mod%C3%A8les\\_formels\\_juxtaposition\\_int%C3%A9gration\\_fusion\\_composition](https://www.academia.edu/16403373/Les_fronti%C3%A8res_entre_mod%C3%A8les_formels_juxtaposition_int%C3%A9gration_fusion_composition).
- Vermandel, F. (2013). Quels enjeux épistémologiques pour la fiction ? *Les Cahiers du LAUA*, 16, 29-46.
- Vicente, N. (2022). Espèces introduites et invasives en mer méditerranée. In M.-L. Demeester & V. Mercier (Eds.), *La mer Méditerranée : Changement climatique et ressources durables* (pp. 171-187). Aix-en-Provence: Presse Universitaire d'Aix-Marseille.
- Walliser B. (1977). *Systèmes et modèles*. Paris: Seuil.
- Walter, F. (1994). L'historien et l'environnement : Vers un nouveau paradigme. *Natures Sciences-Sociétés*, 2(1), 31-39.
- Weisberg, M. (2007). Who is a modeler? *British Journal for the Philosophy of Science*, 58, 207-233.
- Wolkenhauer, O. (2001). Systems biology: The reincarnation of systems theory applied in biology? *Briefings in Bioinformatics*, 2(3), 258-270.