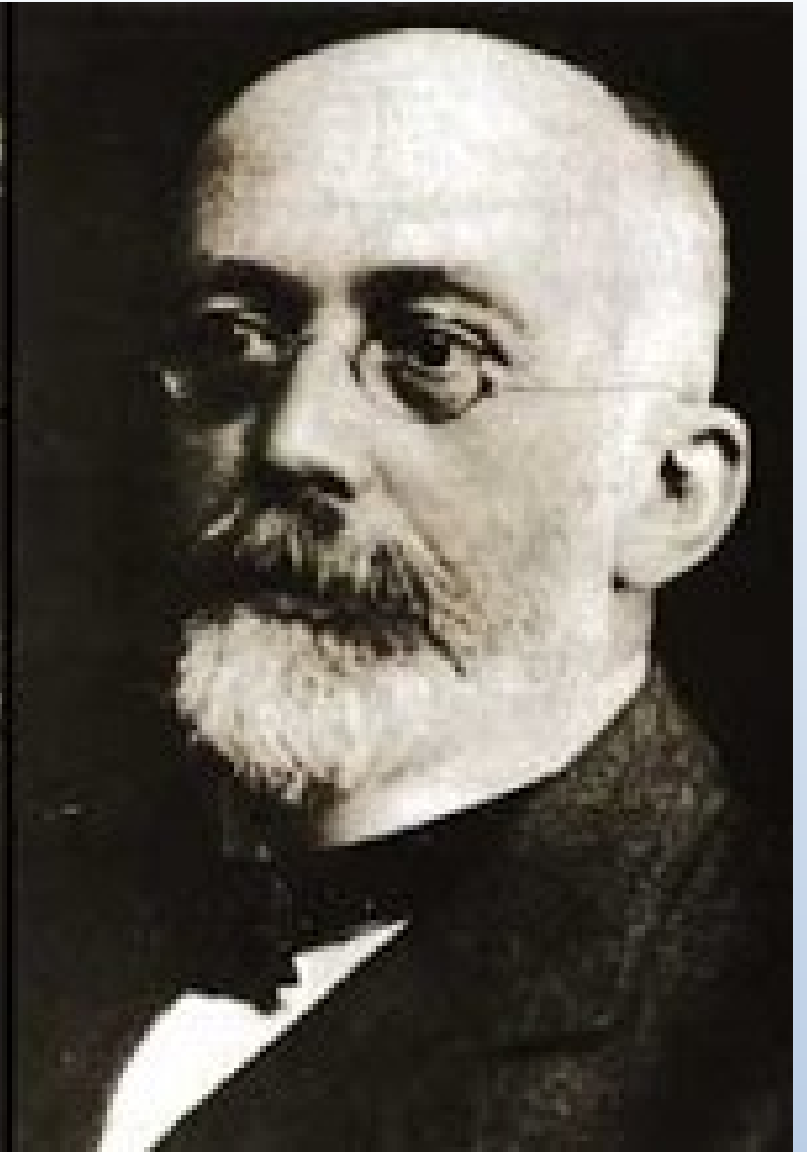


# Chapitre 3 : L'inéluctable évolution des populations au sein des génomés.

## I. Le modèle théorique de Hardy-Weinberg (HW)



# Hardy-Weinberg equilibrium

If there are only 2 alleles for a trait in a Population, then:

$$P + q = 1$$

frequency of dominant allele

frequency of recessive allele



Purple is dominant to Pink

# Hardy-Weinberg equilibrium

If there are only 2 alleles for a trait in a Population, then:

$$P^2 + 2Pq + q^2 = 1$$

frequency of  
homozygous  
dominant  
genotype



frequency of  
heterozygous  
genotype



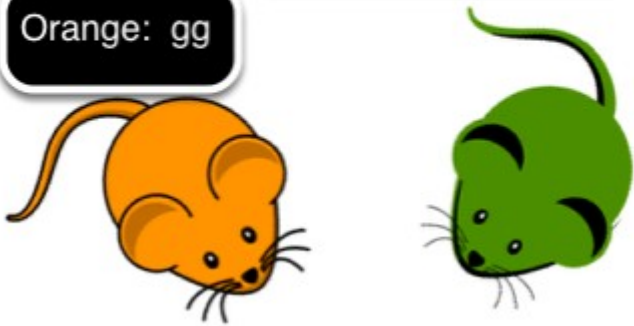
frequency of  
homozygous  
recessive  
genotype



Purple is dominant to Pink

Green: GG and Gg

Orange: gg



$$q^2 = \frac{330}{130,000} = 0.002$$

$$q = \sqrt{q^2} = \sqrt{0.002}$$

$$q = 0.04$$

$$p + q = 1$$

$$p = 1 - q$$

$$p = 1 - 0.04$$

$$p = 0.96$$

$$p^2 = 0.96^2 = 0.92$$

$$2pq = 2(0.96)(0.04) = 0.08$$

$$q^2 = 0.04^2 = 0.0016$$

(= 0.002)

On considère un gène dont les deux allèles R et B déterminent la couleur des pétales de la belle de nuit. La fréquence  $f_R$  de l'allèle R est égale à p et la fréquence  $f_B$  de l'allèle B est égale à q. Comme il n'y a que 2 allèles, on a  $f_R + f_B = 1$ , donc  $p + q = 1$  (a). À l'issue de fécondation, s'il y a panmixie, c'est-à-dire si les différents individus se croisent au hasard, la fréquence des différents génotypes des zygotes sera :

Génotype	R//R	B//B	R//B
Fréquence	$p^2$	$q^2$	$2pq$

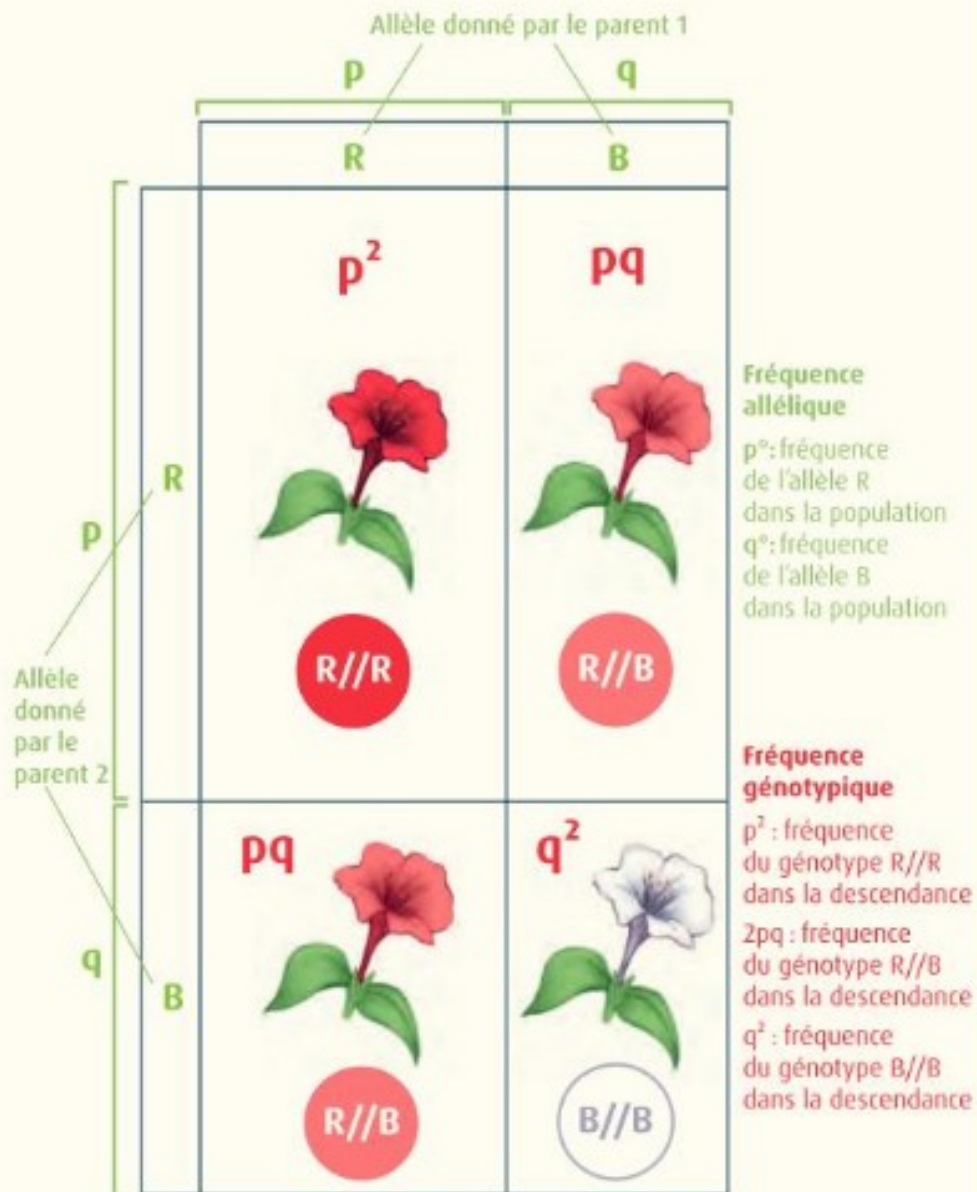
On peut donc calculer les fréquences  $f_R$  et  $f_B$  des allèles R et B dans les zygotes :

$f_R = \text{fréquence (R//R)} + \frac{1}{2} \text{ fréquence (R//B)} = p^2 + pq$   
 $f_B = \text{fréquence (B//B)} + \frac{1}{2} \text{ fréquence (R//B)} = q^2 + pq$   
 D'après (a),  $q = 1 - p$  et  $p = 1 - q$ . Donc :

$$f_R = p^2 + pq = p^2 + p(1 - p) = p^2 + p - p^2 = p$$

$$f_B = q^2 + pq = q^2 + (1 - q)q = q^2 + q - q^2 = q$$

Donc, la fréquence de l'allèle R dans les zygotes est identique à la fréquence de l'allèle R chez les parents et la fréquence de l'allèle B dans les zygotes est identique à la fréquence de l'allèle B chez les parents. Si aucune force évolutive n'agit sur ces zygotes et sur les individus qui seront issus de leur développement, la fréquence des allèles et des génotypes sera constante dans la population considérée.







• La loi de Hardy-Weinberg énonce que, dans une population où il y a **panmixie** et pour un gène donné, la fréquence des génotypes des **zygotes** issus de la fécondation est prévisible si l'on connaît la fréquence des allèles chez les parents. On dit alors que la **structure génétique** de la population suit la loi de Hardy Weinberg.

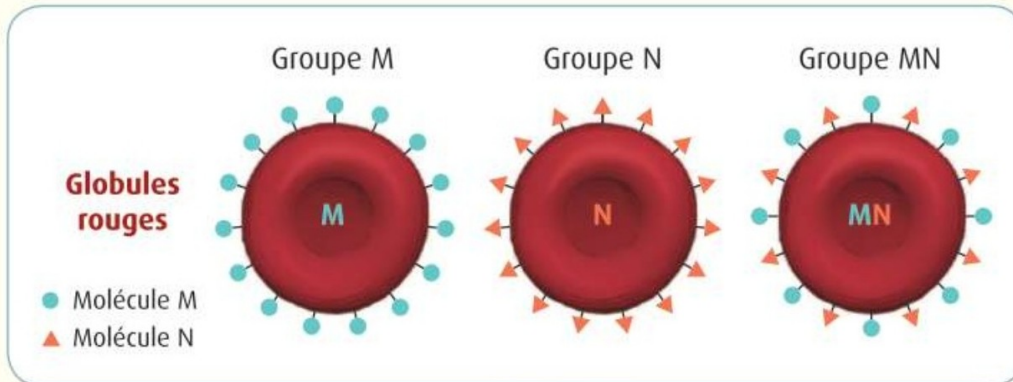
• De plus, si les conditions ci-dessous sont respectées, alors les fréquences alléliques et génotypiques chez les **individus** sont stables dans le temps : c'est ce qu'on appelle l'**équilibre de Hardy-Weinberg**.

**Conditions de l'équilibre de Hardy-Weinberg**

1. Les croisements entre individus s'effectuent au hasard (panmixie).
2. Il y a absence de mutation à l'origine de nouveaux allèles.
3. Il n'y a pas de sélection naturelle agissant sur les allèles.
4. Il n'y a pas de flux génétique, c'est-à-dire pas de migration.
5. La population est de grande taille.

**2 Loi et équilibre de Hardy-Weinberg.**

Les globules rouges portent à leurs surfaces des molécules qui peuvent être reconnues par des anticorps. Les plus connues sont celles qui déterminent les groupes sanguins ABO. Il existe beaucoup d'autres molécules permettant d'établir des groupes sanguins, comme les molécules M et N. Elles sont codées par un gène possédant deux allèles M et N. Dans les années 1950, le génotype pour ce gène d'un échantillon de 1416 habitants d'une ville japonaise a été déterminé.



Résultats			
Génotype	M//M (groupe M)	M//N (groupe MN)	N//N (groupe N)
Nombre d'individus	406	744	332

## Méthode-clé

### Tester si une population suit la structure génétique de Hardy-Weinberg

1. Partir de effectifs de chaque génotype dans l'échantillon d'effectif  $N$  :  $n_{[AA]}$ ,  $n_{[Aa]}$  et  $n_{[aa]}$
2. Calculer la fréquence de chaque allèle dans l'échantillon :

$$f_A = (n_{[AA]} + \frac{1}{2} n_{[Aa]}) / N$$

$$f_a = (n_{[aa]} + \frac{1}{2} n_{[Aa]}) / N$$

3. Calculer les effectifs attendus sous l'hypothèse de Hardy Weinberg :

$$n_{[AA]} = f_A^2 \times N$$

$$n_{[Aa]} = 2 \times f_A \times f_a \times N$$

$$n_{[aa]} = f_a^2 \times N$$

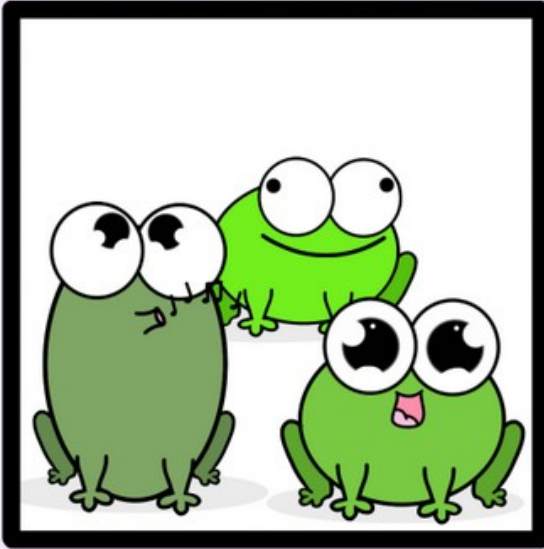
4. Comparer effectifs attendus et effectifs observés.

## 4 Études des groupes sanguins M et N dans une ville japonaise.

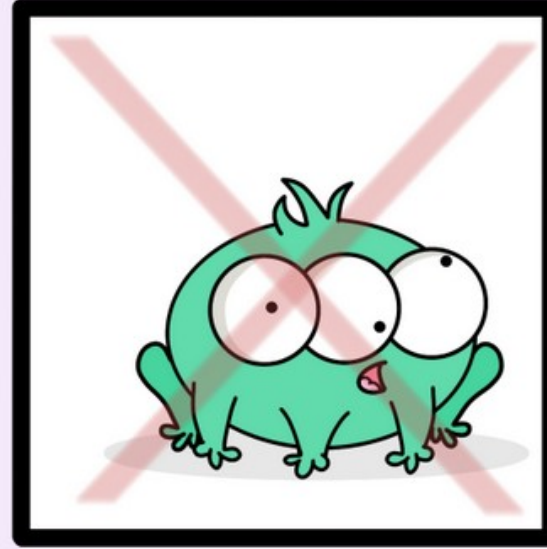


# Assumptions of Hardy-Weinberg Equilibrium

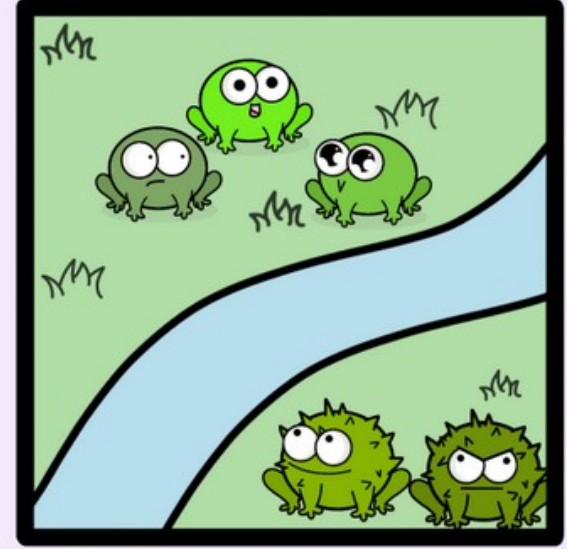
1. No Selection



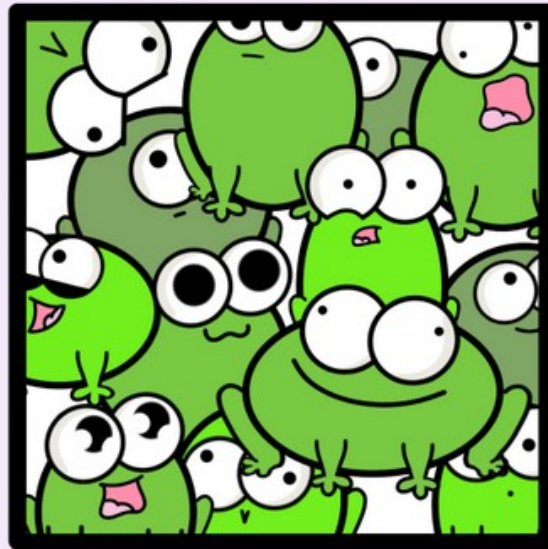
2. NO Mutation



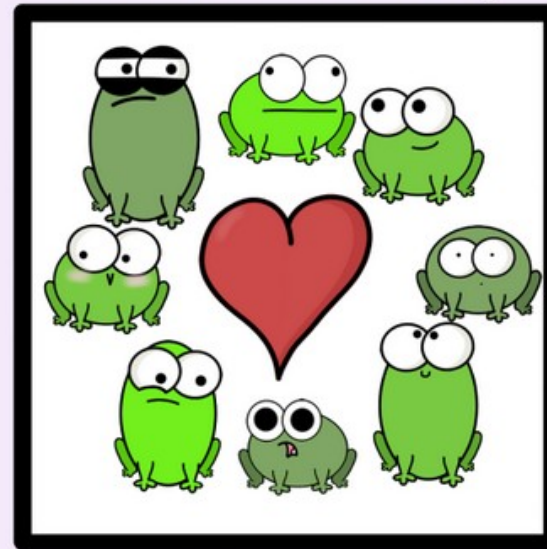
3. NO Migration



4. Large Population



5. Random Mating



**Comment évoluent les fréquences alléliques dans une population selon le principe de Hardy-Weinberg ?**

**Comment évoluent les fréquences alléliques observées dans les populations naturelles?**

## Édu'modèles

module algorithmique (multi-agents)

🏠 Ecran d'accueil

### Modèle :

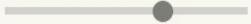
- 📄 Nouveau modèle
- 📄 Charger un modèle
- 📄 Enregistrer ce modèle

📄 Exporter un résumé

### Graphique :

- Afficher :
- Lisser :
- 📄 Exporter

Echelle horizontale :



### Animation :

Tours de chauffe :

Durée (0 = infini) :



Vitesse de l'animation :

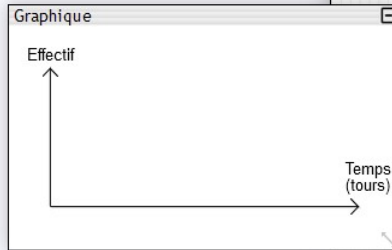


Nombre de  
tours écoulés : 0

D'après NetBioDyn de P. BALLET  
virtulab.univ-brest.fr

Adapté/modifié par P.COSENTINO  
v0.36 (24/05/2020)  
Lic. CC BY-NC

Environnement



Légende :

Interface niveau expert :

### Environnement :

- ⚙️ Paramètres
- 🗺️ Zones
- Grille visible :

### Agents (entités) :



- ➕ Ajouter un agent
- ⊖ Supprimer cet agent
- ✎ Modifier cet agent
- 👤 Placer cet agent
- 👤 Introduire cet agent
- 👤 Dépeupler cet agent

Légende :  Effectif :

### Règles (comportements) :



- ➕ Ajouter une règle
- ⊖ Supprimer cette règle
- ✎ Modifier cette règle
- ⏸️ Suspender cette règle

### Ajouter une nouvelle règle

Nom de la règle :

Repro (A1//A1) avec (A2//A2)



Type : Réaction (rencontre entre plusieurs agents) ▾

Age minimal des réactifs (en nombre de tours) :

0

Probabilité de réaction à chaque tour (en %) : 10

Conditionner cette règle à l'effectif d'un agent :

Réactifs		Produits	
(A1//A1) ▾	<input type="checkbox"/>	(A1//A2) ▾	<input type="checkbox"/>
(A2//A2) ▾	<input type="checkbox"/>	(A1//A2) ▾	<input type="checkbox"/>
----- ▾	<input type="checkbox"/>	(A1//A2) ▾	<input type="checkbox"/>
----- ▾	<input type="checkbox"/>	(A1//A2) ▾	<input type="checkbox"/>
----- ▾	<input type="checkbox"/>	----- ▾	<input type="checkbox"/>

Le premier réactif doit forcément être au centre de la réaction :


Ajouter cette règle

Annuler

### Modification d'un agent

Nom de l'agent : (A1//A1)

Apparence : Carré vide ▾

Couleur : 

L'agent est mobile :

Probabilité de déplacement par tour (en %) : 100



Demi-vie (en nombre de tours, 0 = infini) : 100

Mode de placement : Automatique (aléatoire) ▾

Nombre d'agents de ce type au démarrage : 100

Appliquer

Annuler la modification



# Simulation de l'équilibre de Hardy-Weinberg

## Édu'modèles

module algorithmique (multi-agents)

🏠 Ecran d'accueil

### Modèle :

- 📄 Nouveau modèle
- 📄 Charger un modèle
- 📄 Enregistrer ce modèle

📄 Exporter un résumé

### Graphique :

- Afficher :
- Lisser :
- 📄 Exporter

Echelle horizontale :



### Animation :

Tours de chauffe : 0  
Durée (0 = infini) : 500



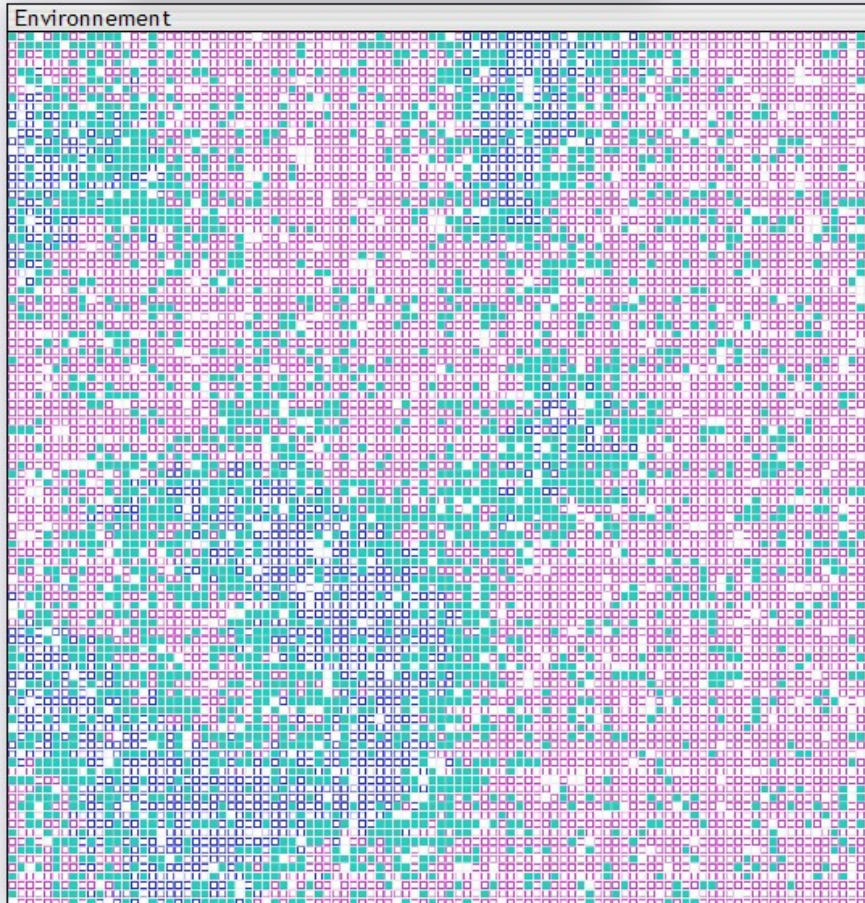
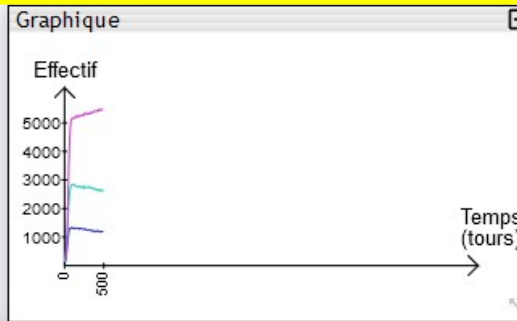
Vitesse de l'animation :



Nombre de  
tours écoulés : 500

D'après NetBioDyn de R. BALLET  
virtulab.univ-brest.fr

Adapté/modifié par P.COSENTINO  
v0.36 (24/05/2020)  
Lic. CC BY-NC



Légende : □ (A1//A1)(1222) □ (A1//A2)(2620) □ (A2//A2)(5503)

Interface niveau expert :

### Environnement :

- ⚙️ Paramètres
- 🗺️ Zones
- Grille visible :

### Agents (entités) :

(A1//A1)  
(A1//A2)  
(A2//A2)

- ⊕ Ajouter un agent
- ⊖ Supprimer cet agent
- ✎ Modifier cet agent
- 👤 Placer cet agent
- 👤 Introduire cet agent
- 👤 Dépeupler cet agent
- Légende :  Effectif :

### Règles (comportements) :

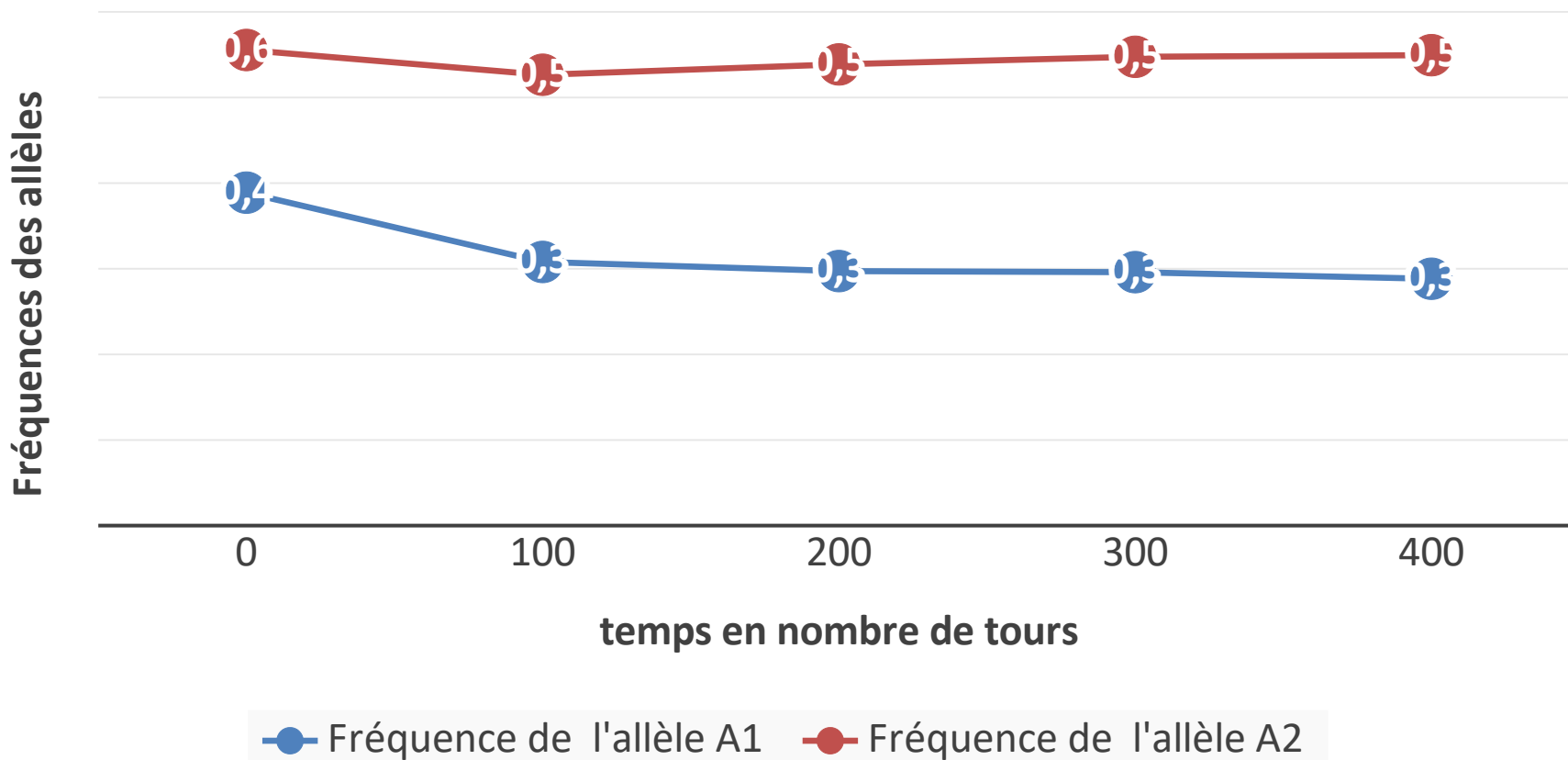
Repro (A1//A1) avec (A2//A1)  
Repro (A1//A1) avec (A1//A1)  
Repro (A1//A1) avec (A1//A2)  
Repro (A2//A2) avec (A1//A1)  
Repro (A2//A2) avec (A1//A2)  
Repro (A2//A2) avec (A2//A2)

- ⊕ Ajouter une règle
- ⊖ Supprimer cette règle
- ✎ Modifier cette règle
- ⏸ Suspendre cette règle

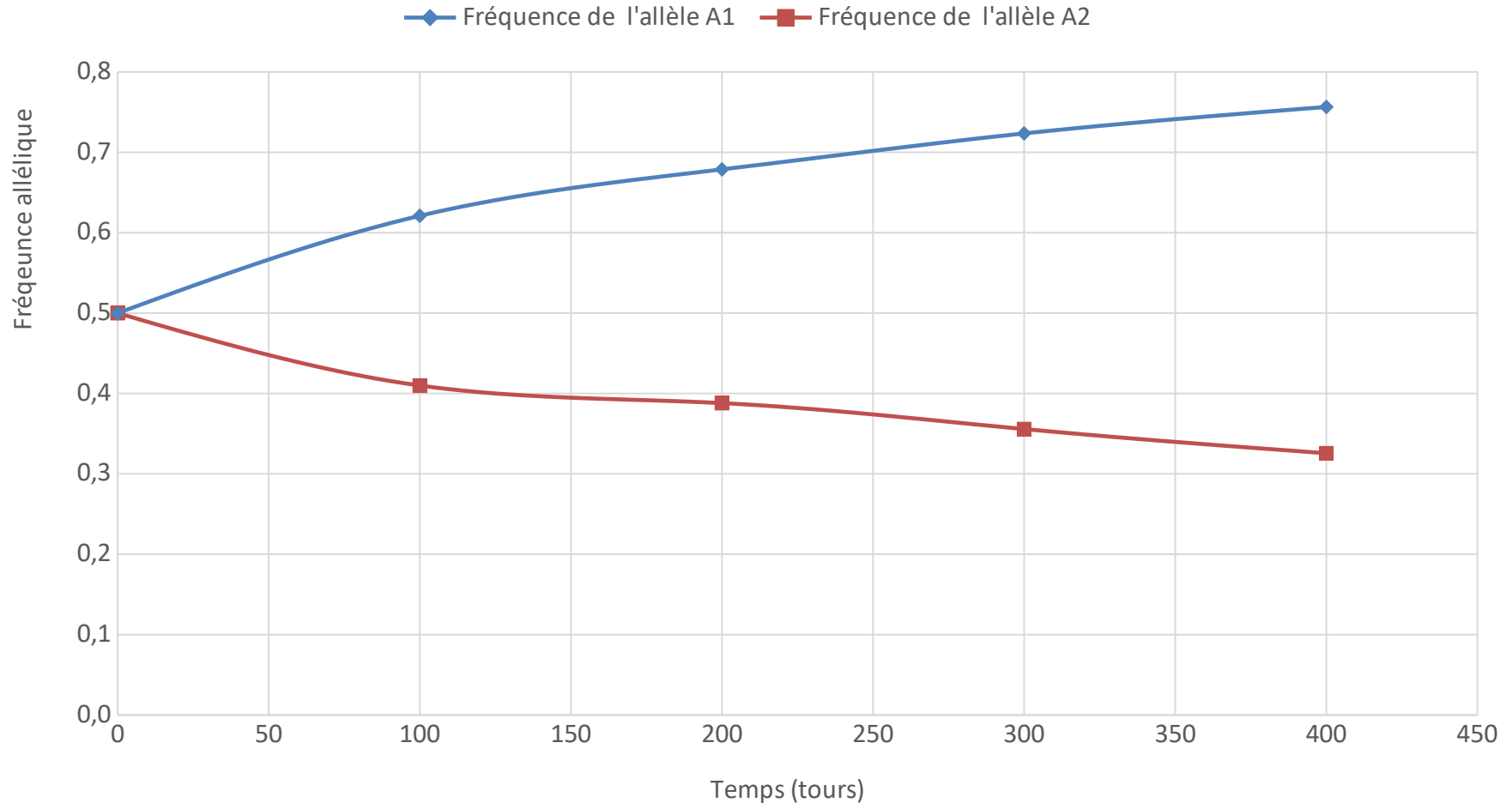


# Simulation de l'équilibre de Hardy-Weinberg

Evolution de la fréquences des allèles A1 et A2 en fonction du temps (en nombre de tours)  
Dans une population qui suit le modèle théorique d'Hardy-Weinberg

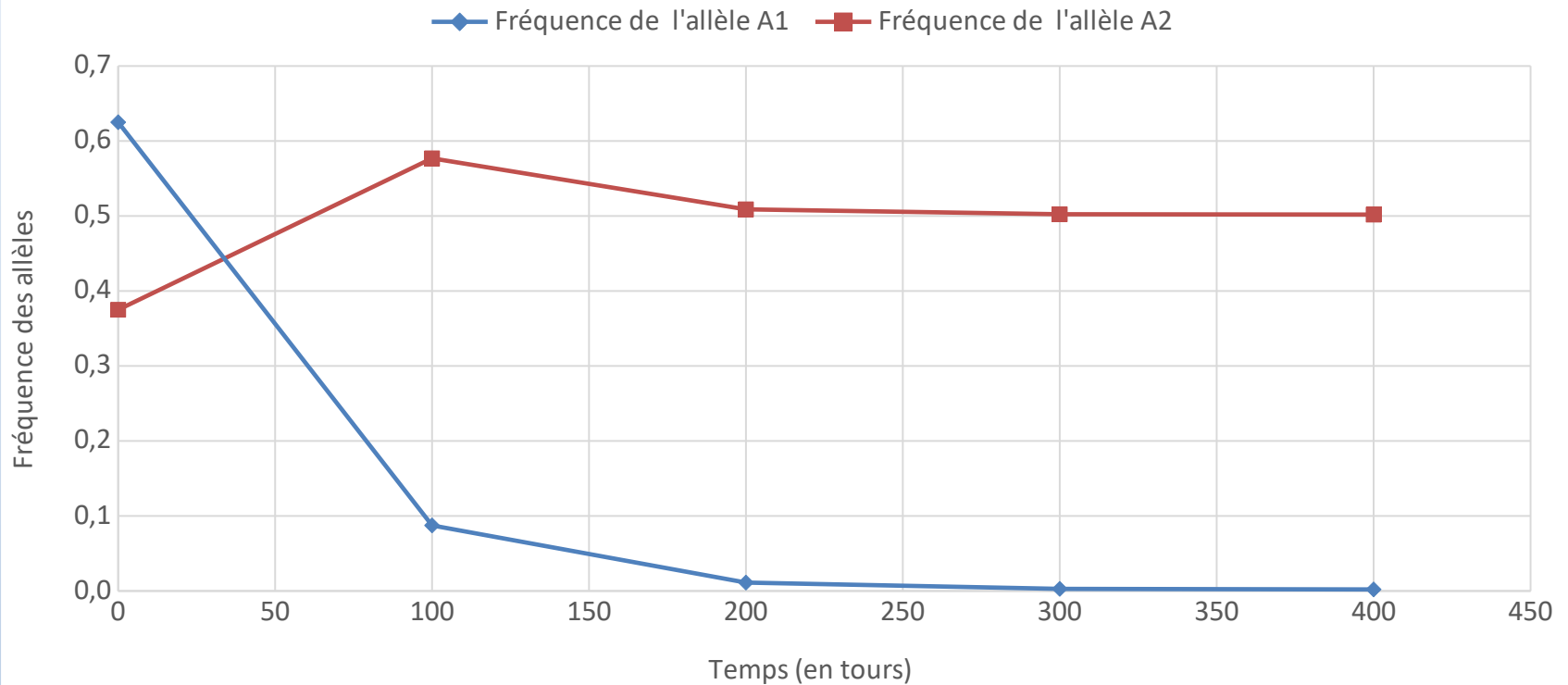


## Graphique représentant l'évolution de la fréquence allélique au cours du temps



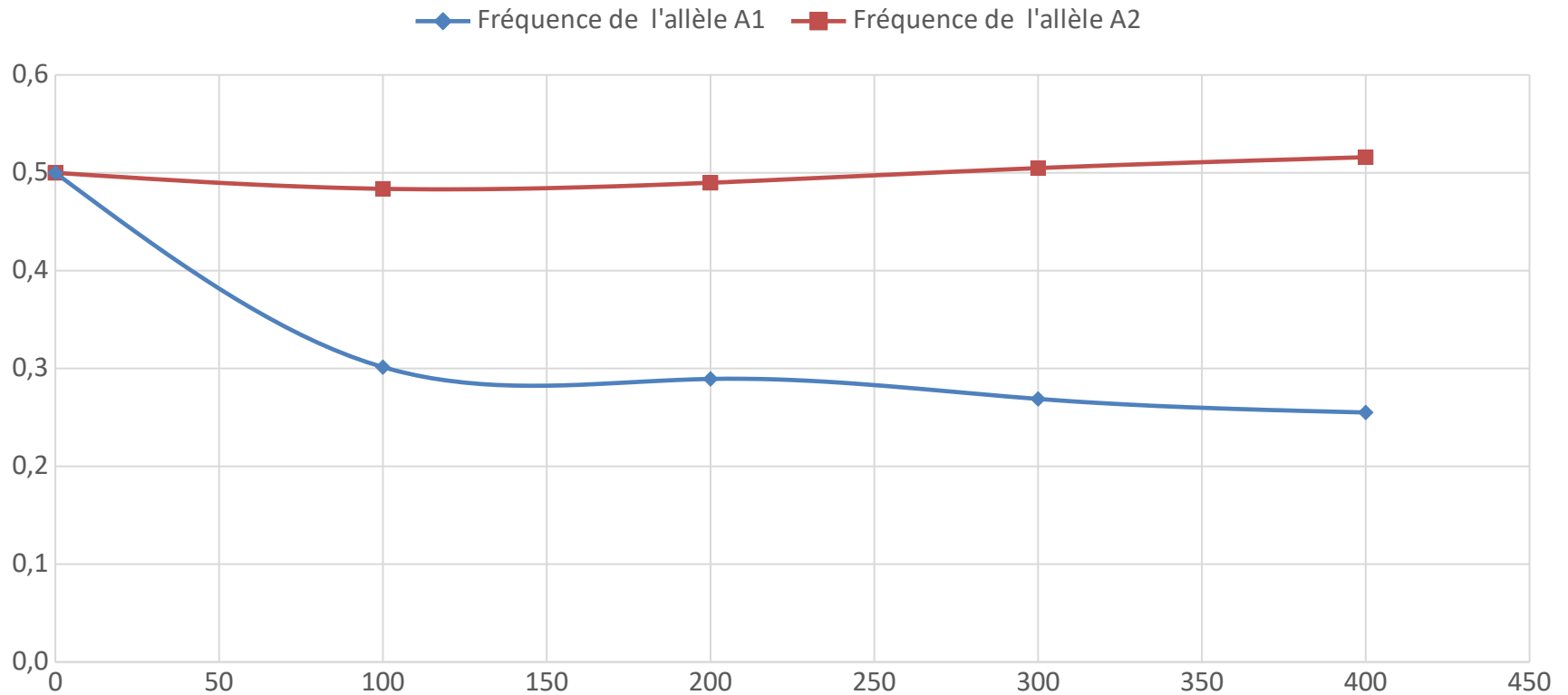
## Simulation dans une petite population (exemple 2)

### Evolution de la fréquence des allèles au cours du temps :



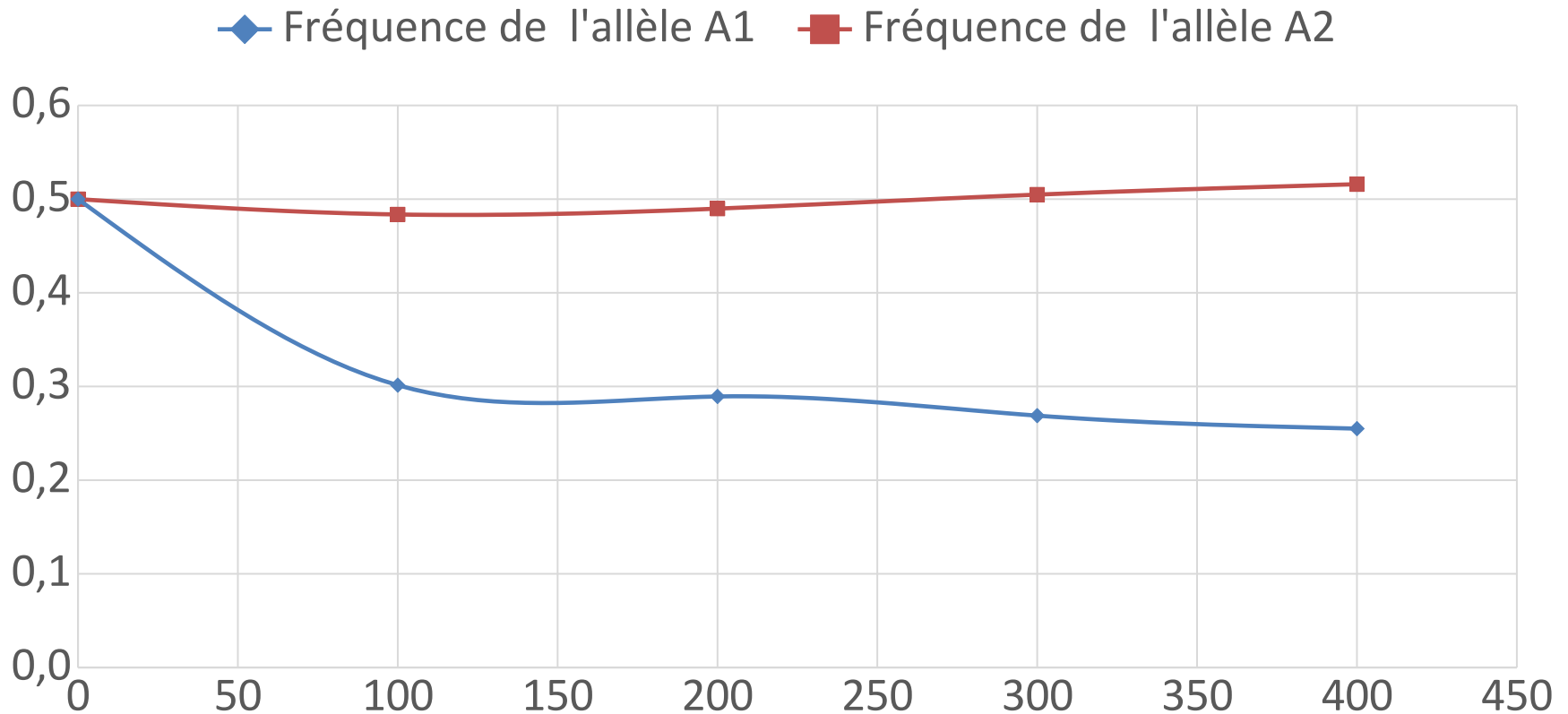
## Simulation dans une petite population (exemple 2)

### Evolution des fréquences alléliques au cours du temps.



## Simulation dans une population avec sélection sexuelle (exemple 3)

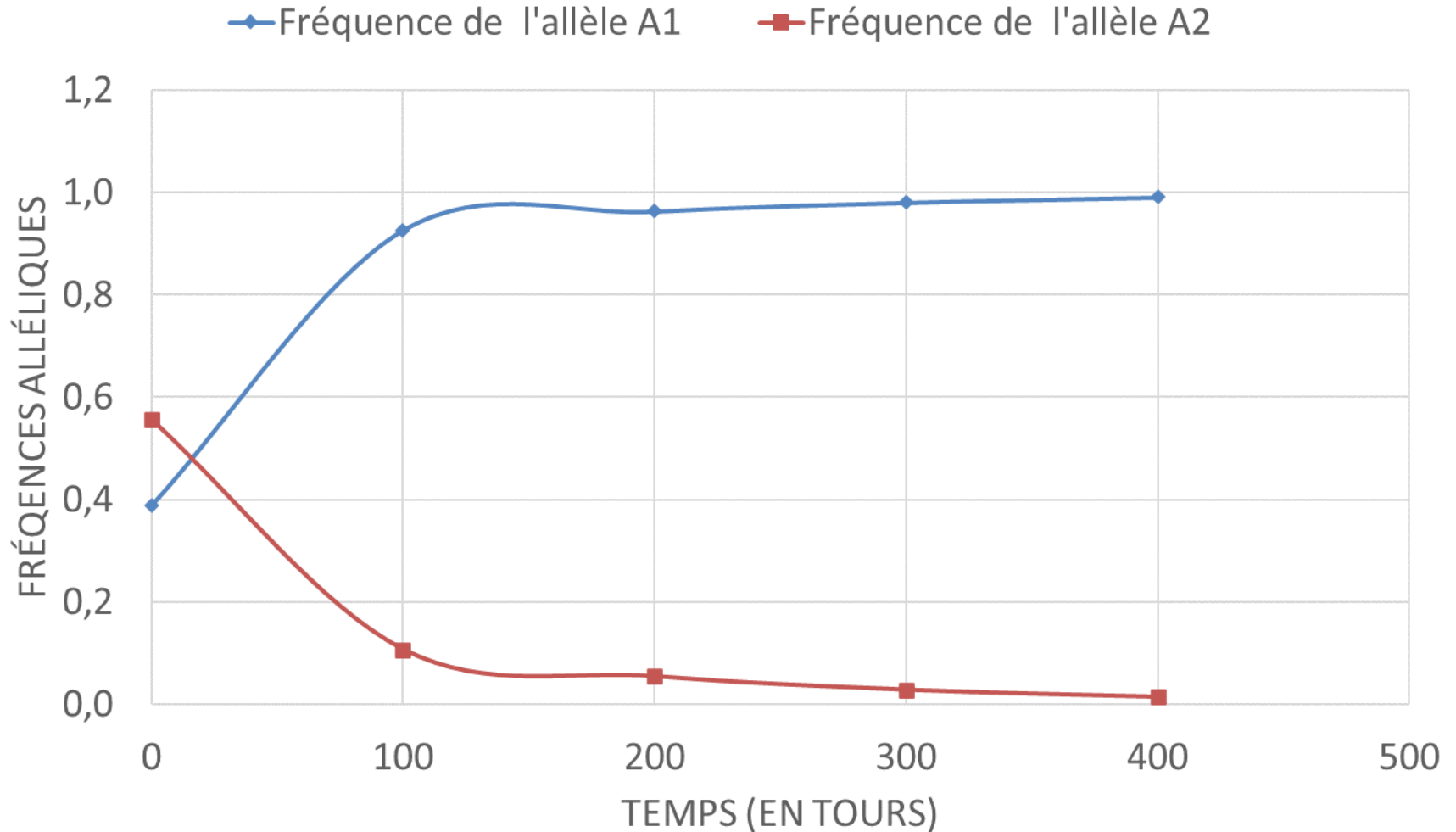
### Evolution de la fréquence des allèles A1 et A2 au cours du temps.





## Simulation dans une population ayant subi une immigration (exemple 4)

### GRAPHIQUE DE LA FRÉQUENCES DES ALLÈLES A1 ET A2 EN FONCTION DU TEMPS



## II. La situation des populations réelles, éloignée du modèle théorique

Etude des exemples proposés :

- Questions 1 à 3 p 78-79
- Histoire des éléphants
- Exemple de la drépanocytose

Compléter le tableau à l'aide des exemples étudiés en cours et TP :

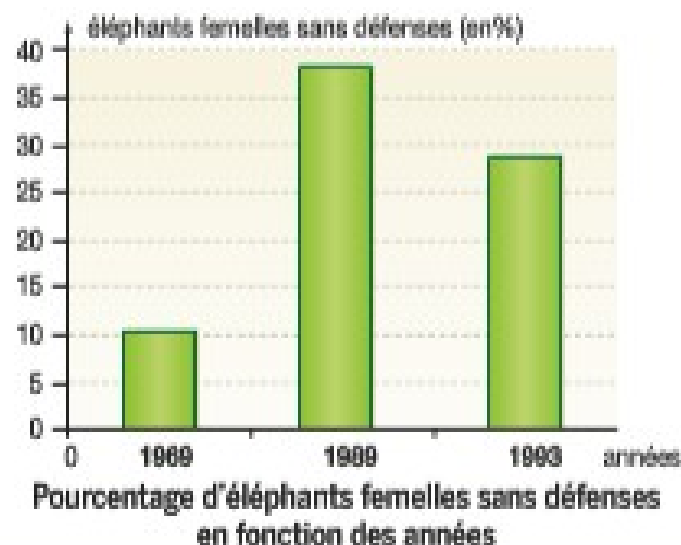
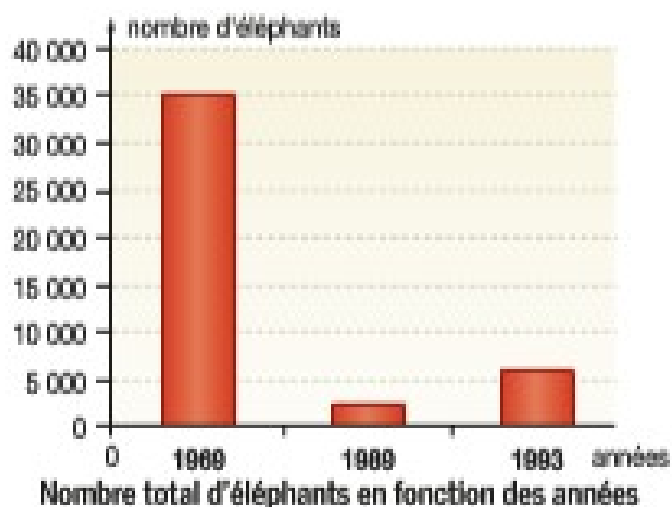
Exemples étudiés	Observations	Conditions de l'équilibre de HW non remplies	Mécanismes évolutifs mis en jeu



En Zambie (comme dans de très nombreux autres pays), les populations d'éléphants ont été décimées par des chasseurs et des braconniers entre 1900 et 1989. Ils tuaient les éléphants pour vendre l'ivoire de leurs défenses ; ils ne chassaient généralement pas les éléphants sans défenses, dépourvus de valeur marchande.

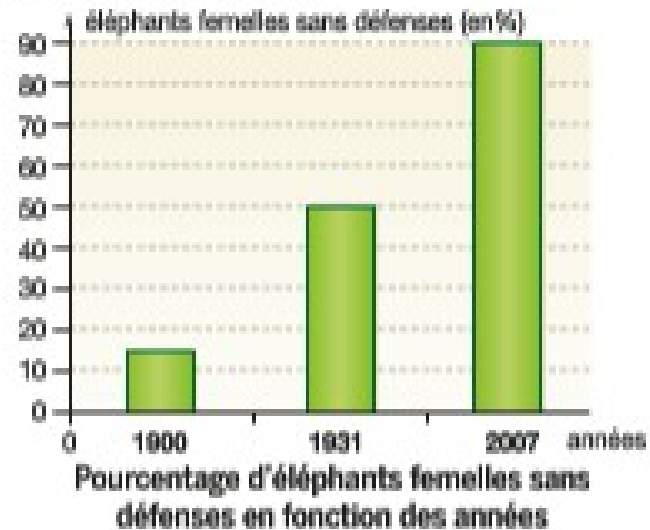
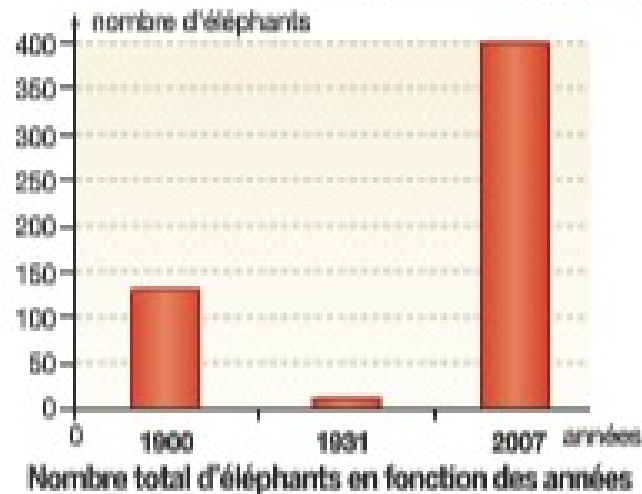
Parallèlement, et jusqu'en 1989, la proportion d'éléphants sans défenses a très nettement augmenté. En 1989, la Zambie a été l'un des très nombreux pays à signer un traité interdisant le commerce de l'ivoire ; elle a également créé des parcs nationaux et mis en place des barrières de protection et des patrouilles anti-braconnage.

Données concernant la population du parc national du Sud Luangwa

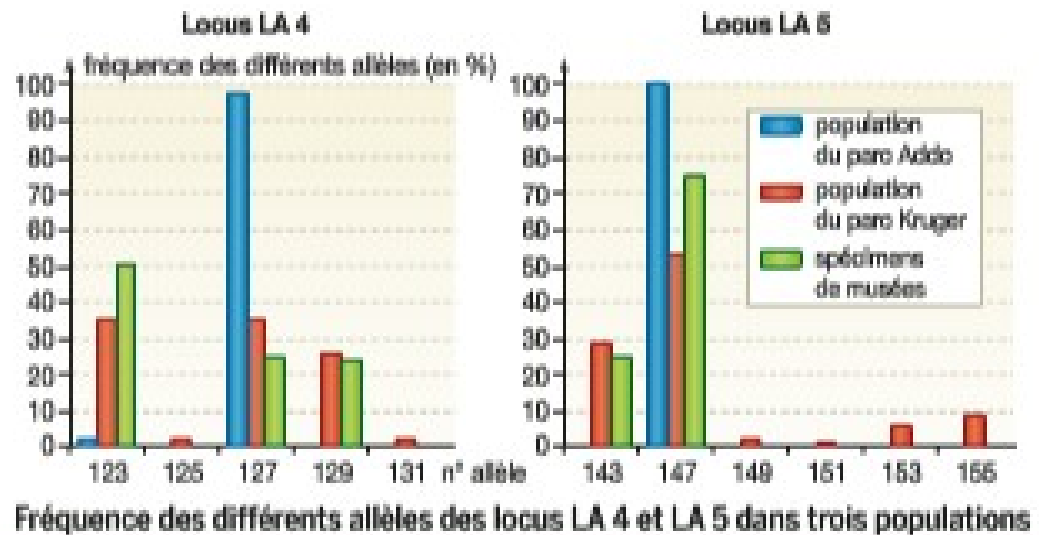


**Doc. 2** L'histoire d'une population d'éléphants en Zambie.

## Données concernant la population du parc national Addo



• La diversité génétique des populations d'Afrique du Sud a été étudiée en se fondant sur des séquences d'ADN appelées microsatellites, composées par un motif de nucléotides répété en grand nombre. Les allèles se distinguent par le nombre de copies du motif. Les graphiques ci-contre montrent, pour deux locus, les fréquences des différents allèles présents dans trois populations (la population d'éléphants d'Addo, la population d'éléphants du parc Kruger et des spécimens originaires d'Afrique du Sud et conservés dans des musées). Les allèles sont désignés par le nombre de copies du motif répétitif.



## A. Des populations qui évoluent sous l'effet de la sélection naturelle

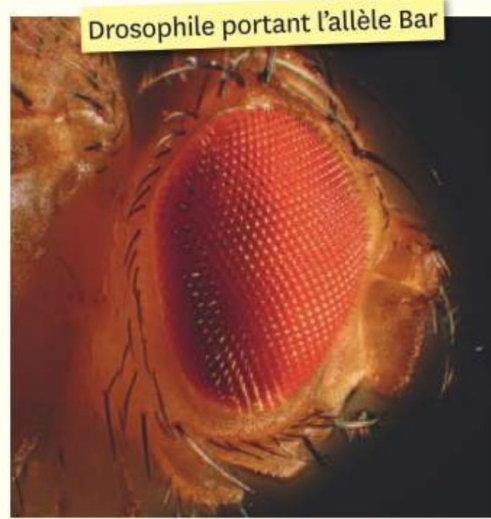


Au milieu des années 1930, Georges Tessier et Philippe L'Héritier étudient une population de drosophiles enfermées dans une cage. Elles portent l'allèle Bar, qui perturbe la structure et la fonction de l'œil. Mais quelques mouches de type

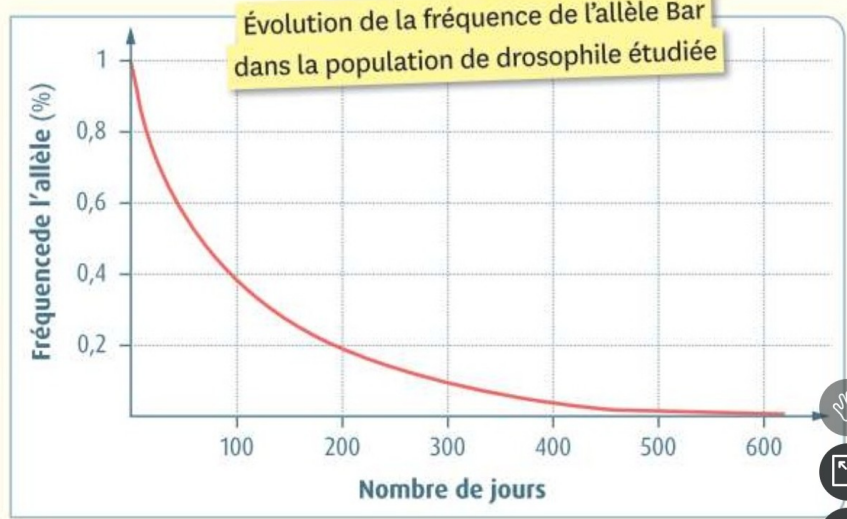
sauvage sont par erreur introduites dans la cage. Ils décident alors de suivre cette population mixte durant cinq mois. Une fois par mois, ils prélèvent les nouvelles drosophiles écloses, analysent leur génotype puis les rendent à la population.



Drosophile sauvage



Drosophile portant l'allèle Bar



# 1 L'étude d'une population de drosophiles.



Depuis 1968, la population de moustiques *Culex pipiens L.* est contrôlée dans le Languedoc-Roussillon par l'épandage d'insecticides sur les étendues d'eau dans lesquelles les larves se développent. Les insecticides utilisés sont essentiellement des organophosphorés comme le chlorpyrifos, qui tuent les larves en perturbant le fonctionnement

de certaines synapses. Dans les populations de moustiques, il existe deux allèles du gène *Ace* :  $Ace^R$  et  $Ace^S$ . L'allèle  $Ace^R$  confère une résistance aux insecticides organophosphorés, mais il induit aussi un développement plus lent des moustiques. Dans les années 1990, les quantités d'insecticides utilisées annuellement ont été fortement diminuées et un autre insecticide (le temephos) a été employé.

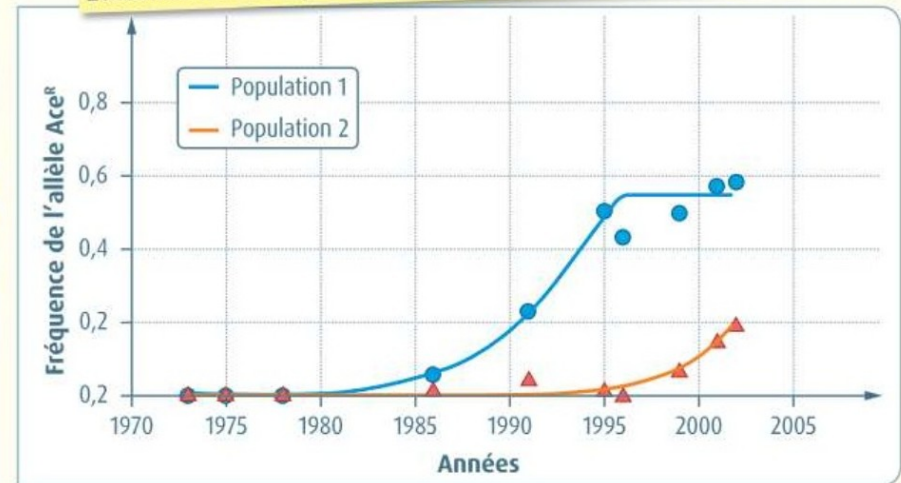
Larve de moustique



Génotypes de 416 adultes dans une région traitée

Génotype	$Ace^R/Ace^R$	$Ace^R/Ace^S$	$Ace^S/Ace^S$
Effectif de moustiques	66	130	220

Évolution de la fréquence de  $Ace^R$  chez les moustiques de la région

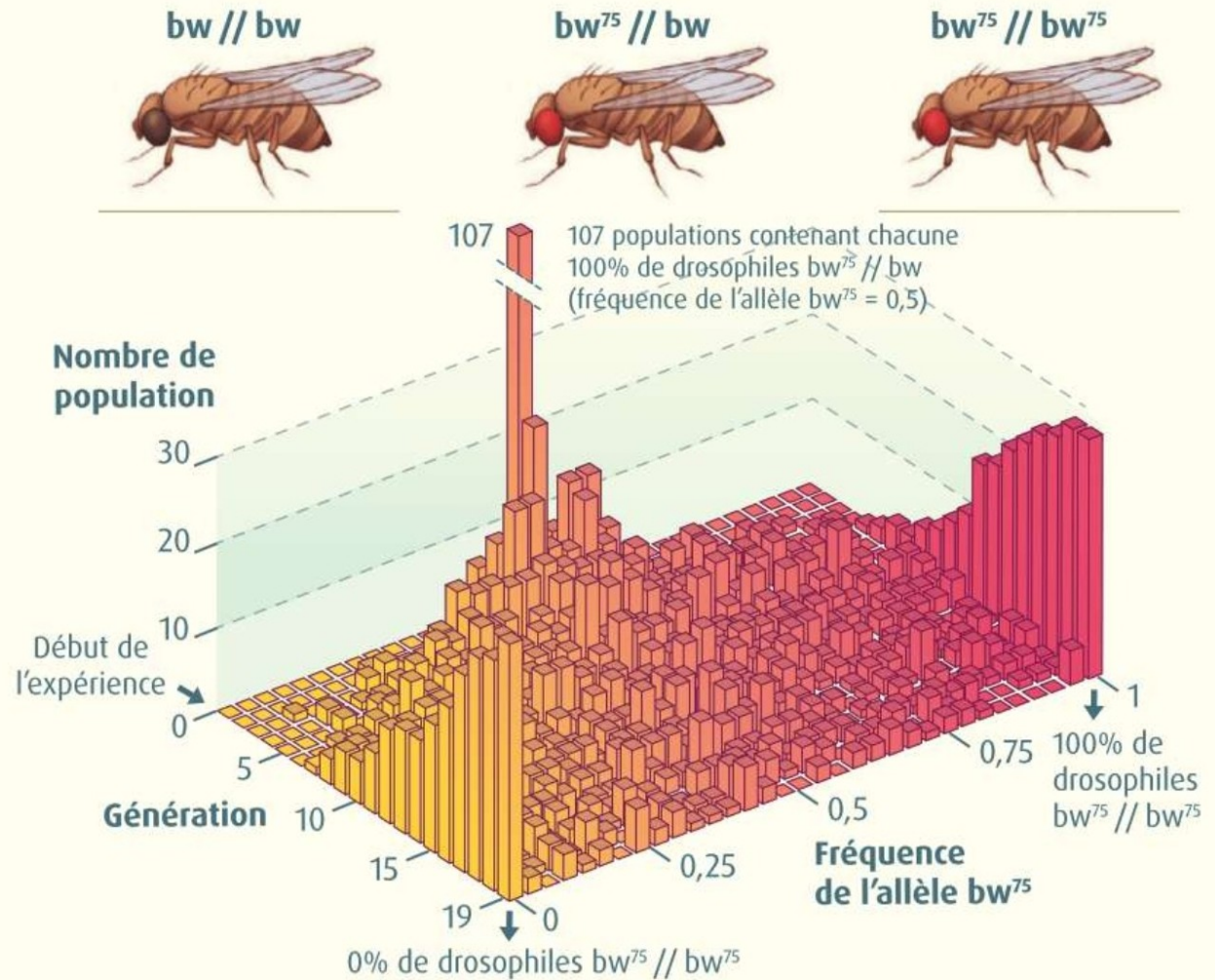


## 2 L'étude d'une population de moustiques en Languedoc-Roussillon.

## B. Des populations qui évoluent sous l'effet de la dérive génétique



Ces résultats expérimentaux ont été publiés en 1956 par Peter Buri. Les allèles  $bw^{75}$  et  $bw$  du gène *Bw* déterminent la couleur des yeux des drosophiles. Des chercheurs ont obtenu 107 populations de 16 drosophiles hétérozygotes  $bw^{75}/bw$ , pour moitié mâles et pour moitié femelles. Ils ont suivi ces populations sur 19 générations en ne conservant à chaque génération que 8 mâles et 8 femelles choisis de manière aléatoire. À chaque génération, la fréquence de l'allèle  $bw^{75}$  de chacune des 107 populations a été mesurée. Les mouches de chacun des trois génotypes ont le même succès reproducteur et le même taux de survie.



#### 4 Évolution de la fréquence de l'allèle $bw^{75}$ des populations de drosophiles.

## C. Des populations qui évoluent sous l'effet d'autres mécanismes



Fleur ne s'ouvrant pas à maturité

### 3 L'étude d'une population de lamier amplexicaule.

Le lamier amplexicaule est une plante herbacée annuelle. Cette espèce présente des fleurs hermaphrodites. Certaines d'entre elles ne s'ouvrent pas à maturité. Des scientifiques ont étudié un site chromosomique ne codant pas de protéine (Tri02) et pouvant présenter deux allèles: Tri02<sup>166</sup> et Tri02<sup>169</sup>. La présence de ces allèles a été testé sur un échantillon de 39 individus prélevés dans une population beaucoup plus large de lamiers amplexicaules.

Génotypes	Tri02 <sup>166</sup> / Tri02 <sup>166</sup>	Tri02 <sup>166</sup> / Tri02 <sup>169</sup>	Tri02 <sup>169</sup> / Tri02 <sup>169</sup>
Effectifs observés dans l'échantillon	4	1	34

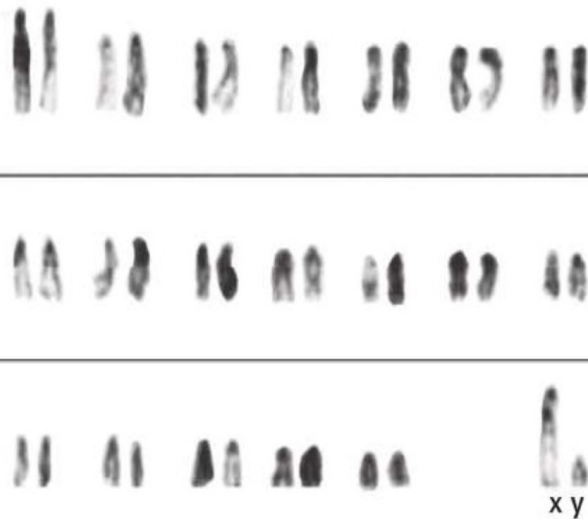
Navigation icons: a pencil icon at the top, a hand icon, a square icon with a right arrow, and a magnifying glass icon at the bottom.

# III. Evolution des populations et spéciation.

Exemple des souris de Madère p 80-81

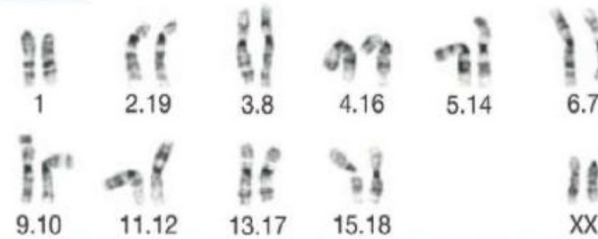


Caryotype d'une souris du Portugal continental



Caryotypes de deux populations de souris de Madère

Pop. 1



Pop. 2

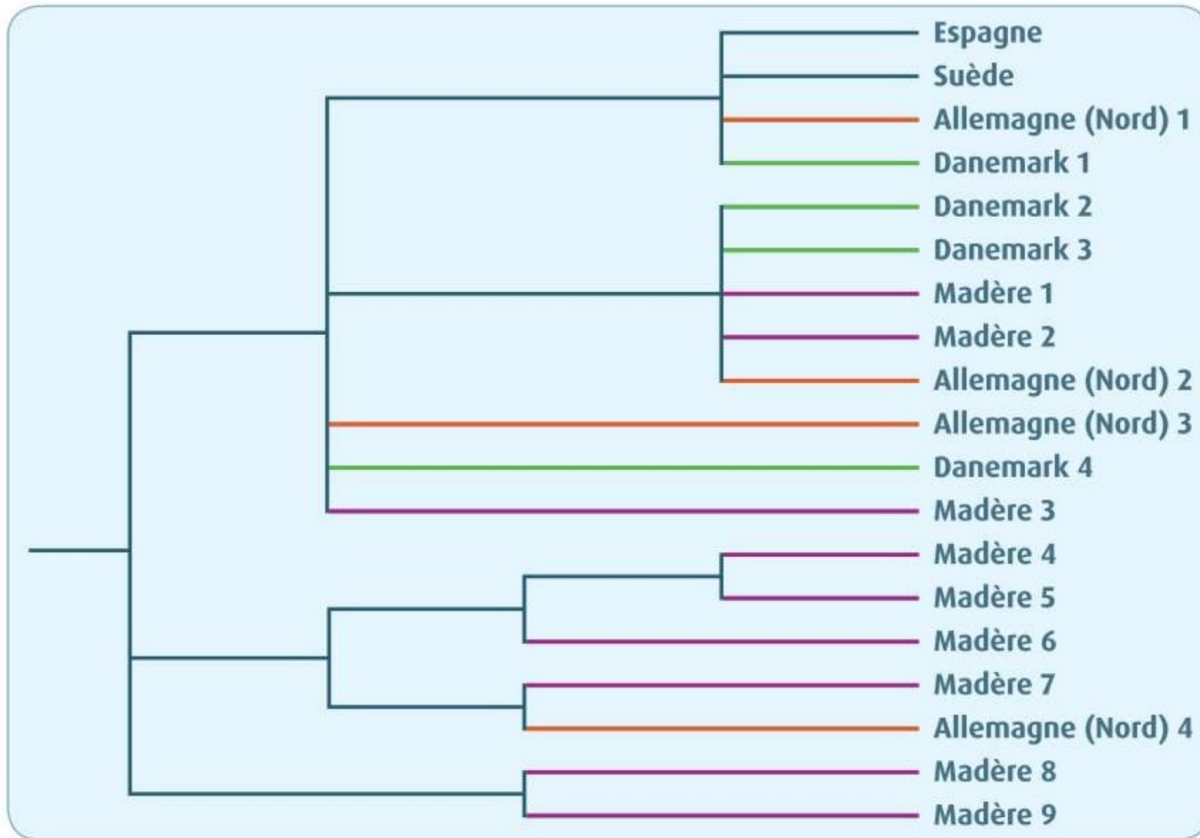


Mécanisme d'une fusion chromosomique



**2 Les caryotypes des souris de Madère.** Les souris ont normalement 20 paires de chromosomes ( $2n = 40$ ). Ces chromosomes sont dits acrocentrique : le bras court est extrêmement réduit. Chez les souris de Madère, plusieurs chromosomes ont fusionné.





**4** Arbre phylogénétique simplifié de souris originaire de l'île de Madère et d'autres populations de souris.

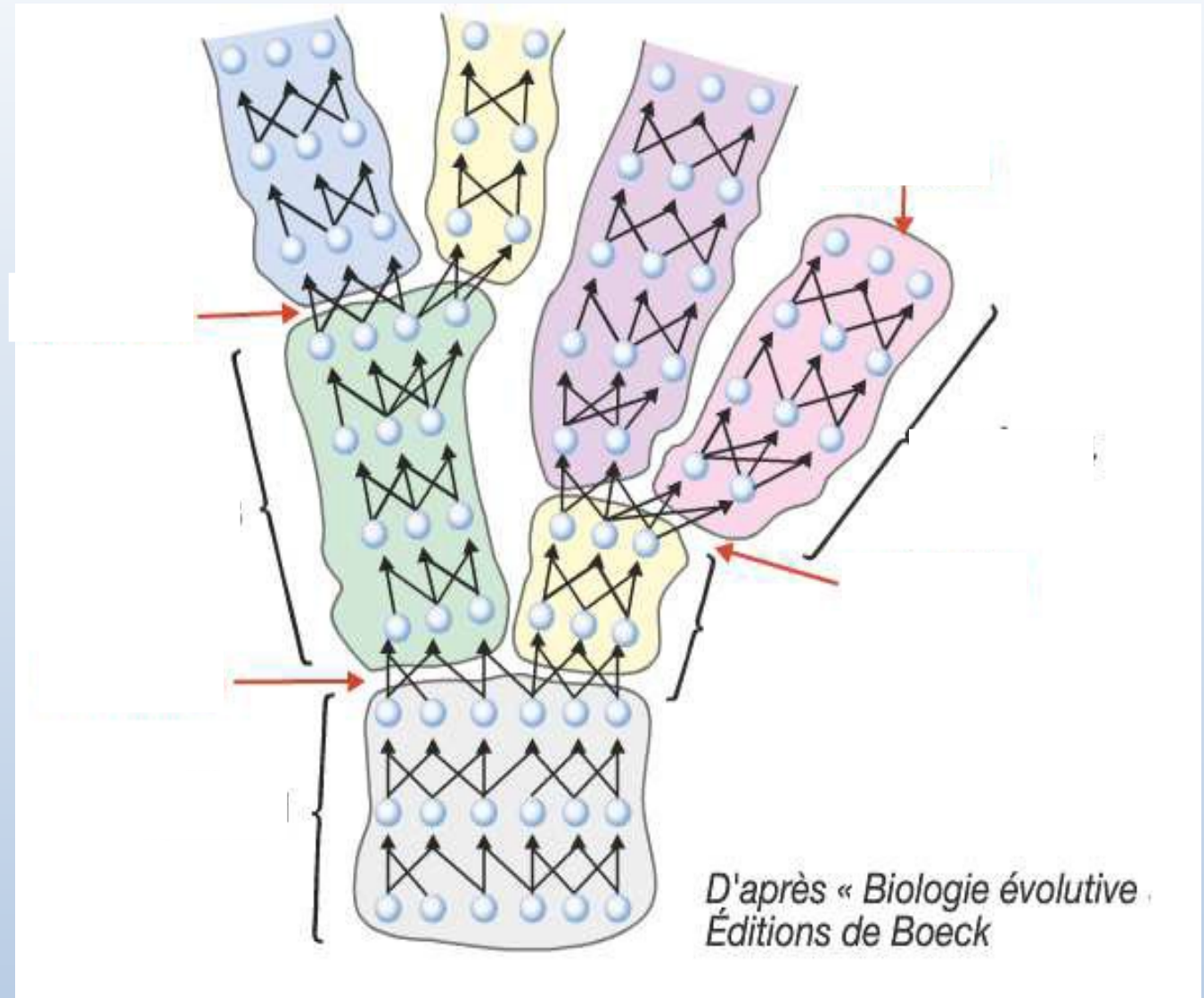
Cet arbre a été obtenu par séquençage d'un gène contenu dans l'ADN des mitochondrie (cet ADN est transmis seulement par la mère). Il montre une proche parenté de souris de Madère avec des souris du nord de l'Europe. Mais d'autres études fondées sur l'étude de séquences dans l'ADN nucléaire montrent une grande proximité avec des souris du Portugal continental.

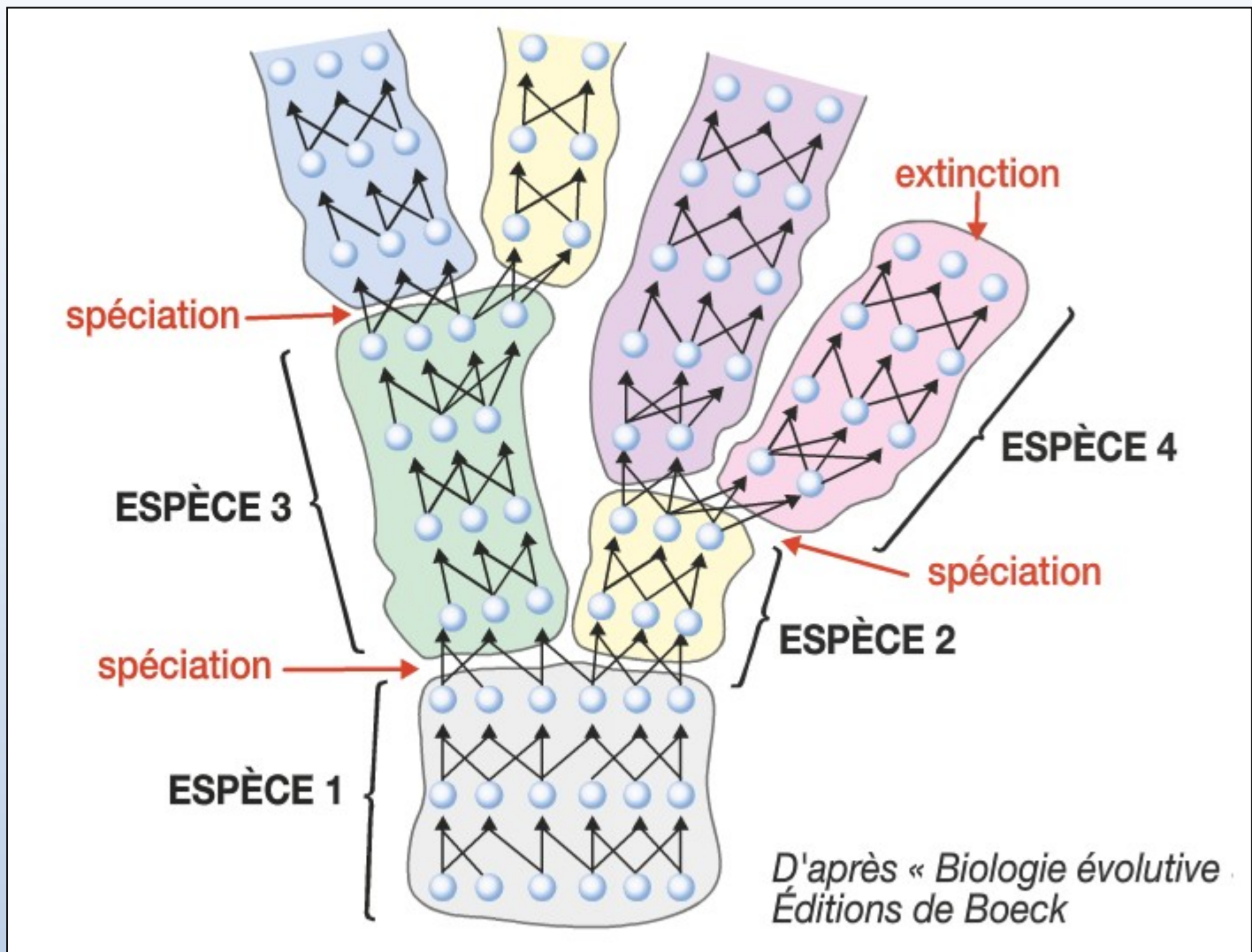
Chaque groupe de souris possède maintenant son propre réarrangement chromosomique ce qui fait qu'elles peuvent être considérées comme des espèces différenciées. Cette spéciation s'est produite entre 500 et 1000 ans (en fonction de l'origine viking ou portugaise qu'on leur attribue) ce qui représente environ 2000 à 4000 générations. Ce qui est extrêmement rapide, l'histoire de l'évolution montre en effet que les spéciations se produisent d'habitude sur plusieurs centaines de milliers d'année.

**Placer sur le schéma :**

- Individu
- Espèce
- Isolement reproducteur
- Spéciation
- Extinction
- croisement

**Positionner un hybride stérile**





<https://www.reseau-canope.fr/corpus/video/la-speciation-122.html>



## DM vacances de Pâques

### La découverte d'une nouvelle espèce : le Pizzly ?

Le Pizzly, encore appelé Grolar ou Prizzly a été identifié en milieu naturel sur l'île de Banks, au nord-ouest du Canada, pour la première fois en 2006. Des cas précédents d'hybridation avaient été rapportés et bien que probables n'avaient pu être confirmés, les techniques ADN n'étant pas alors disponibles. D'autre part, des cas d'hybridation ont été observés, notamment au Zoo d'Osnabrück en Allemagne. Leur étude montre qu'ils seraient moins résistants aux grands froids et présenteraient des aptitudes à la nage plus faibles que leurs cousins l'Ours polaire.



Voici pour rappel l'article du Monde qui fait état de cette découverte.

*"En 2006, un ours blanc portant des taches brunes est tué par un chasseur américain. Après analyse de son ADN, il s'avère qu'il s'agit d'un hybride entre l'ours polaire et le grizzly. Ce premier cas reste isolé jusqu'à ce que soit confirmé, au printemps 2012, qu'un nouvel ours bicolore venait d'être tué. Fourrure blanche et pattes brunes, l'animal est cette fois une chimère de seconde génération, né d'un grizzly mâle et d'une femme hybride".*

## Aire de répartition du grizzly

*Ursus arctos* d'Amérique du nord  
( = grizzly ou ours brun)



## Aire de répartition de l'Ours Polaire

*Ursus maritimus*  
( = ours polaire)



## Comparaison de l'ours polaire et du grizzly

<i>Ours</i>		<i>Ursus arctos</i> <i>d'Amérique du Nord (=</i> <i>grizzly ou ours brun)</i>	<i>Ursus maritimus</i> <i>(=ours polaire)</i>
<i>Caractéristiques</i>			
<i>Pelage</i>		<i>Brun</i>	<i>Blanc uniformément</i>
<i>Dimensions</i>	<i>Tête et corps</i>	<i>1.7 à 2.8 m</i>	<i>1.8 à 3m</i>
	<i>Hauteur au garot</i>	<i>0.9 à 1.5m</i>	<i>1 à 1.6 m</i>
<i>Membres</i>		<i>Griffes non rétractiles de 5 à 7 cm à la main et 3 à cm au pied</i>	<i>Griffes plus courtes et plus acérées. Doigts partiellement palmés</i>
<i>Régime alimentaire</i>		<i>Omnivore</i>	<i>Carnivore</i>
<i>Milieu de vie</i>		<i>Forêts, zones côtières, montagnes</i>	<i>Banquise</i>
<i>Période d'accouplement</i>		<i>Mai à Juillet</i>	<i>Avril à Juin</i>
<i>hibernation</i>		<i>De décembre à mi-mars</i>	<i>Seules les femelles gestantes hibernent</i>



Ainsi, le pizzly est le résultat du croisement entre un ours polaire et un grizzly. En première approximation, on peut donc le penser qu'il s'agit d'un **hybride interspécifique** comme c'est le cas des ligres ou des mules. En effet, *Ursus maritimus* (l'Ours polaire) et *Ursus arctos* (l'Ours brun, ou grizzly) sont considérés comme deux espèces d'ours différentes. Néanmoins, la définition biologique de l'espèce formulée par Ernst Mayr en 1943 stipule que deux individus appartiennent à la même espèce s'ils se ressemblent, peuvent se reproduire et que leurs descendants sont viables et fertiles. Pourtant, l'article met en lumière la formation de nouveaux hybrides entre le grizzly et le pizzly. Le pizzly est donc fertile.

Actuellement, les données sur les pizzlies sont très éparées et on ne sait pas exactement combien de représentants seraient présents. Les quelques cas identifiés ont permis de construire une aire de répartition hypothétique (ci-contre).

