

# Biologie des Abeilles — Guide pour le Simulateur

---

Ce document contient tout ce que tu dois savoir sur le fonctionnement réel d'une colonie d'abeilles pour créer un simulateur réaliste.

---

## Vue d'ensemble d'une colonie

Une colonie typique contient :

- **1 Reine** (peut vivre 2-7 ans)
  - **20 000 - 80 000 Ouvrières** (vivent 6 semaines en été, 4-6 mois en hiver)
  - **0 - 2 000 Faux-bourdons** (présents printemps/été uniquement)
- 

## La Reine (Queen)

Caractéristiques

Propriété	Valeur
Durée de développement	16 jours (œuf → adulte)
Durée de vie	2-7 ans (moyenne 2-3 ans)
Ponte maximale	Jusqu'à 2 000 œufs/jour en pic
Ponte annuelle	~200 000 œufs/an
Vols de fécondation	1-3 vols, s'accouple avec 10-20 mâles

Rôles

1. **Ponte** — Seule femelle fertile de la colonie
2. **Phéromones** — Émet la "phéromone royale" (QMP) qui :
  - Inhibe le développement ovarien des ouvrières
  - Maintient la cohésion sociale
  - Attire les mâles pendant le vol nuptial
  - Signal la présence/santé de la reine

Variables à simuler

- age: number (jours)
- fertility: number (décline avec l'âge)
- pheromoneStrength: number (décline avec l'âge)
- isVirgin: boolean (avant fécondation)
- spermCount: number (stock de sperme, diminue à chaque ponte)
- eggsLaidToday: number
- health: number

## Événements liés à la reine

- **Mort de la reine** → Les ouvrières créent des cellules royales d'urgence
- **Reine vieillissante** → Phéromones faibles → Risque d'essaimage
- **Supersédure** — Remplacement naturel d'une reine défaillante

## Les Ouvrières (Workers)

### Caractéristiques

Propriété	Valeur
Durée de développement	21 jours (œuf → adulte)
Durée de vie (été)	5-7 semaines
Durée de vie (hiver)	4-6 mois
Sexe	Femelle (non fertile)

### Polyéthisme temporel (Division du travail par âge)

C'est LE concept central de ton simulateur. Les ouvrières changent de tâche selon leur âge :

Âge (jours)	Rôle	Tâches
0-2	<b>Nettoyeuse</b>	Nettoie les cellules, se prépare
3-5	<b>Nourrice (couvain)</b>	Nourrit les larves avec gelée royale/pollen
6-11	<b>Nourrice (reine)</b>	Nourrit et soigne la reine
12-17	<b>Cirièr/Bâtisseuse</b>	Produit de la cire, construit les rayons
12-17	<b>Manutentionnaire</b>	Stocke nectar/pollen, évapore le nectar
18-21	<b>Ventileuse</b>	Régule température/humidité
18-21	<b>Gardienne</b>	Protège l'entrée de la ruche
21+	<b>Butineuse</b>	Récolte nectar, pollen, eau, propolis

### Plasticité comportementale

**IMPORTANT pour le simulateur :** Cette progression n'est PAS rigide !

- Si manque de nourrices → des butineuses RÉGRESSENT pour devenir nourrices
- Si manque de butineuses → des jeunes abeilles ACCÉLÈRENT leur maturation
- Le ratio est régulé par les besoins de la colonie

**Mécanisme :** Hormone juvénile (JH) + Vitellogénine

- JH élevée = transition vers butineuse

- Vitellogénine élevée = reste nourrice

Variables à simuler pour chaque ouvrière

- ```

- age: number (jours)
- role: WorkerRole (enum basé sur l'âge ET les besoins)
- health: number
- juvenileHormone: number (influence le rôle)
- vitellogenin: number (influence le rôle)
- fatBodies: number (réserves pour l'hiver)
- foragingExperience: number (améliore l'efficacité)
- knownFoodSources: FoodSource[] (mémoire des lieux)

```

## ● Les Faux-bourdons (Drones)

Caractéristiques

| Propriété              | Valeur                                             |
|------------------------|----------------------------------------------------|
| Durée de développement | 24 jours (œuf → adulte)                            |
| Durée de vie           | ~90 jours max                                      |
| Sexe                   | Mâle (haploïde)                                    |
| Capacités              | Pas de dard, ne butine pas, ne produit pas de cire |

Rôle unique

- **Reproduction** — S'accouplent avec des reines vierges d'AUTRES colonies
- **Thermorégulation** — Participent au chauffage du couvain

Cycle annuel

- **Printemps** → Production de mâles commence
- **Été** → Population maximale (quelques centaines à 2000)
- **Automne** → **Expulsion des mâles** (les ouvrières les chassent/tuent)
- **Hiver** → Aucun mâle dans la ruche

Variables à simuler

- ```

- age: number
- maturity: boolean (mature sexuellement vers 12 jours)
- health: number
- hasFlownToday: boolean (vols de fécondation l'après-midi)

```

## 🥚 Cycle de développement (Couvain)

Stades de développement

Stade	Durée Reine	Durée Ouvrière	Durée Mâle
Œuf	3 jours	3 jours	3 jours
Larve	5 jours	6 jours	7 jours
Nymphe	8 jours	12 jours	14 jours
<b>TOTAL</b>	<b>16 jours</b>	<b>21 jours</b>	<b>24 jours</b>

Détermination du sexe et de la caste

Œuf fécondé (diploïde) → Femelle  
 └ Nourriture normale → Ouvrière  
 └ Gelée royale abondante → Reine

Œuf non fécondé (haploïde) → Mâle (faux-bourdon)

Variables pour le couvain

```
- stage: 'egg' | 'larva' | 'pupa'
- daysInStage: number
- caste: 'worker' | 'queen' | 'drone'
- isFertilized: boolean
- fedRoyalJelly: boolean (détermine reine vs ouvrière)
- health: number
- temperature: number (critique pour le développement)
```

## 🍯 Ressources de la colonie

Types de ressources

Ressource	Origine	Utilisation	Stockage
<b>Nectar</b>	Fleurs	Transformé en miel	Cellules (non operculées)
<b>Miel</b>	Nectar déshydraté	Énergie (glucides)	Cellules operculées
<b>Pollen</b>	Fleurs	Protéines (couvain)	Cellules = "pain d'abeille"
<b>Eau</b>	Sources diverses	Dilution miel, thermorégulation	Non stockée
<b>Propolis</b>	Résine d'arbres	Antiseptique, colmatage	Utilisée directement
<b>Cire</b>	Glandes des ouvrières	Construction rayons	Rayons

## Consommation

### Une colonie consomme par an :

- ~120 kg de miel
- ~20-30 kg de pollen
- Des litres d'eau (variable selon climat)

### Une butineuse :

- Fait 10-12 voyages/jour
- Rapporte ~40 mg de nectar ou ~15 mg de pollen par voyage
- Visite 50-1000 fleurs par voyage

## Variables à simuler

```
interface Resources {
    nectar: number;           // grammes
    honey: number;            // grammes (1 cadre plein ≈ 2-3 kg)
    pollen: number;           // grammes
    water: number;            // ml (besoin quotidien)
    propolis: number;         // grammes
    wax: number;              // grammes disponibles
    comb: number;             // nombre de cellules construites
}
```

## 💬 Communication

### 1. La Danse frétilante (Waggle Dance)

C'est le système de communication le plus fascinant !

**Quand :** Une butineuse a trouvé une source de nourriture intéressante

**Comment ça marche :**

Direction = Angle entre le soleil et la source  
(traduit en angle par rapport à la verticale sur le rayon)

Distance = Durée de la phase frétilante  
(1 seconde ≈ 1 km)

Qualité = Intensité/enthousiasme de la danse

## À simuler :

```
interface WaggleDance {
    direction: number;          // angle en degrés
    distance: number;           // mètres
    duration: number;           // secondes de frétinement
    quality: number;            // "enthousiasme" 0-1
    foodSource: FoodSource;
    followers: Worker[];        // abeilles recrutées
}
```

## 2. Les Phéromones

Phéromone	Émetteur	Effet
<b>QMP (Queen Mandibular Pheromone)</b>	Reine	Cohésion, inhibe ovaires ouvrières
<b>Phéromone de couvain</b>	Larves	Stimule nourrices, inhibe ovaires
<b>Phéromone d'alarme</b>	Ouvrières (dard)	Alerte, agression collective
<b>Phéromone de Nasanov</b>	Ouvrières	Orientation, marquage entrée
<b>Phéromone de trace</b>	Butineuses	Marque les fleurs visitées

## 3. Autres communications

- **Trophallaxie** — Échange de nourriture bouche-à-bouche (partage d'infos chimiques)
- **Vibrations** — Signaux sur les rayons
- **Sons** — "Piping" de la reine, "quacking" des reines en cellule

## 🌡 Thermorégulation

### Températures critiques

Zone	Température cible	Tolérance
<b>Couvain</b>	34-36°C	±0.5°C (TRÈS strict)
<b>Grappe hivernale (centre)</b>	20-25°C	-
<b>Grappe hivernale (surface)</b>	8-10°C	-

### Mécanismes

#### Pour chauffer :

- Contraction des muscles thoraciques (frissonnement)
- Regroupement sur le couvain

#### Pour refroidir :

- Ventilation (abeilles ventileuses à l'entrée)

- Évaporation d'eau (régurgitent de l'eau sur les rayons)
- Étalement de la grappe

## Impact sur le simulateur

- Température externe trop basse → Plus de consommation de miel
  - Température externe trop haute → Risque de fonte des rayons
  - Couvain mal thermorégulé → Malformations, mortalité

## Maladies et Parasites

### 1. Varroa destructor (CRITIQUE)

Le pire ennemi des abeilles modernes.

Propriété	Valeur
Type	Acarien parasite
Cible	Couvain (reproduction) + adultes (alimentation)
Reproduction	Dans cellules de couvain operculé
Préférence	Couvain de mâles (plus long = plus de reproduction)

#### Cycle :

1. Femelle varroa entre dans une cellule avant operculation
2. Se reproduit pendant le développement de la nymphe
3. Sort avec l'abeille adulte
4. Se nourrit de l'hémolymphe (sang) et du corps gras

#### Effets :

- Affaiblit les abeilles
- Transmet des virus (DWV = ailes déformées)
- Raccourcit la durée de vie
- Effondrement de la colonie si non traité

#### À simuler :

```
interface VarroaMite {
  age: number;
  location: 'phoretic' | 'reproductive'; // sur abeille ou dans cellule
  hostBee?: Bee;
  hostCell?: BroodCell;
  offspring: number;
}
```

// Taux d'infestation critique : >3 varroas / 100 abeilles = danger

## 2. Nosema (Nosema apis / N. ceranae)

Propriété	Valeur
Type	Champignon microsporidien
Cible	Intestin des abeilles adultes
Transmission	Spores dans les fèces
Effet	Dysenterie, durée de vie réduite, mauvaise digestion

## 3. Loque américaine (American Foulbrood)

Propriété	Valeur
Type	Bactérie (Paenibacillus larvae)
Cible	Larves
Gravité	TRÈS grave, colonie souvent détruite
Signe	Larves mortes, odeur de pourriture

## 4. Autres menaces

- **Loque européenne** (bactérie, moins grave)
- **Petit coléoptère de la ruche** (Aethina tumida)
- **Fausse teigne** (Galleria mellonella) — mange la cire
- **Virus** (DWV, ABPV, CBPV, etc.)
- **Pesticides** (néonicotinoïdes notamment)

## Saisonnalité

### Printemps (Mars-Mai)

Événement	Détail
Reprise de ponte	La reine recommence à pondre massivement
Développement colonie	Population explose
Premières fleurs	Saule, pissenlits, arbres fruitiers
Risque d'essaimage	Colonies fortes peuvent essaier
Production de mâles	Commence

### Été (Juin-Août)

Événement	Détail
Pic de population	40 000 - 80 000 abeilles
Miellée principale	Selon flore locale
Essaimage	Période principale
Fin des mâles	Expulsion fin août

## Automne (Sept-Nov)

Événement	Détail
Réduction ponte	La reine ralentit
Abeilles d'hiver	Production d'ouvrières à longue durée de vie
Constitution réserves	Stockage intensif de miel
Expulsion mâles	Les ouvrières chassent les mâles

## Hiver (Déc-Fév)

Événement	Détail
Grappe hivernale	Abeilles se regroupent en boule
Pas de couvain	Ou très peu
Consommation réserves	~1-2 kg miel/mois
Mortalité hivernale	Période critique

## 🐝 Essaimage (Swarming)

### C'est quoi ?

La reproduction de la COLONIE (pas des individus). La vieille reine part avec ~50% des ouvrières.

### Déclencheurs

1. Colonie trop forte (surpopulation)
2. Reine vieillissante (phéromones faibles)
3. Manque d'espace
4. Printemps favorable

### Séquence

1. Ouvrières construisent des cellules royales (10-20)
2. Reine pond dedans
3. ~1 semaine avant éclosion des nouvelles reines, l'ancienne part
4. **Essaim primaire** : vieille reine + 50% des ouvrières

## 5. Essaims secondaires possibles avec reines vierges

À simuler

```
interface SwarmEvent {
  triggerFactors: {
    populationDensity: number; // trop élevée
    queenPheromone: number; // trop faible
    queenCellsBuilt: number; // cellules royales présentes
  };
  departingBees: Worker[];
  departingQueen: Queen;
  remainingBees: Worker[];
  newQueens: Queen[]; // qui vont se battre
}
```

## Variables environnementales à simuler

Météo

```
interface Weather {
  temperature: number; // °C
  humidity: number; // %
  precipitation: boolean; // pluie = pas de vol
  windSpeed: number; // km/h (>30 = pas de vol)
  cloudCover: number; // % (affecte navigation)
  dayLength: number; // heures de jour
}
```

Flore

```
interface FlowerPatch {
  position: { x: number, y: number };
  distance: number; // depuis la ruche
  nectarQuantity: number; // disponible
  nectarQuality: number; // concentration en sucre
  pollenQuantity: number;
  pollenQuality: number; // teneur en protéines
  flowerCount: number;
  bloomStart: Date;
  bloomEnd: Date;
  isKnownByColony: boolean;
}
```

Prédateurs

- Guêpes, frelons (surtout frelon asiatique)
  - Oiseaux (guêpiers)
  - Souris (en hiver, entrent dans la ruche)
  - Ours (dans certaines régions)
- 

## Résumé pour le simulateur

### Entités principales

1. **Colony** — Conteneur global
2. **Queen** — Une par colonie
3. **Worker** — Milliers, avec rôles dynamiques
4. **Drone** — Saisonniers
5. **Brood** — Œufs, larves, nymphes
6. **Resources** — Miel, pollen, nectar, eau, cire
7. **Comb** — Structure physique (cellules)
8. **VarroaMite** — Parasites (optionnel mais réaliste)

### Systèmes à implémenter

1. **Cycle de vie** — Naissance, vieillissement, mort
2. **Division du travail** — Polyéthisme temporel + plasticité
3. **Ressources** — Collecte, stockage, consommation
4. **Communication** — Danse, phéromones
5. **Thermorégulation** — Chauffage/refroidissement
6. **Reproduction** — Ponte, essaimage
7. **Saisonnalité** — Cycle annuel
8. **Maladies** — Varroa, virus, etc. (optionnel)
9. **Environnement** — Météo, flore, prédateurs

### Paramètres de simulation suggérés

```
interface SimulationConfig {
  ticksPerDay: number;           // ex: 24 (1 tick = 1 heure)
  startDate: Date;
  startingSeason: Season;
  initialWorkers: number;        // ex: 10000
  initialDrones: number;         // ex: 0 (hiver) ou 200 (été)
  initialResources: Resources;
  weatherModel: 'static' | 'random' | 'realistic';
  diseasesEnabled: boolean;
  swarmingEnabled: boolean;
}
```

---

## Sources

- PerfectBee - The Honeybee Lifecycle
  - PMC - Bee++ Simulator
  - PlanetBee - The Three Castes
  - UF/IFAS - Tasks and Duties of Worker Bees
  - PMC - Division of labor in honeybees
  - Science Advances - Waggle Dance Research
  - Nature - Foraging distances and waggle dance
  - Scientific Beekeeping - Varroa Research
  - Wiley - BEEHAVE Model for Varroa simulation
- 

*Document créé pour le projet Simulateur de Ruche — 100 Jours Challenge*