



HAL
open science

ForenSeek: un programme de simulation du développement des insectes nécrophages dédié à l'entomologie médico-légale

Damien Charabidze, Gildas Morvan, Daniel Dupont, Didier Gosset, Benoît Bourel

► To cite this version:

Damien Charabidze, Gildas Morvan, Daniel Dupont, Didier Gosset, Benoît Bourel. ForenSeek: un programme de simulation du développement des insectes nécrophages dédié à l'entomologie médico-légale. *Annales de la Société Entomologique de France*, 2008, 44 (3), pp.385-392. 10.1080/00379271.2008.10697575 . hal-03331915

HAL Id: hal-03331915

<https://hal.science/hal-03331915>

Submitted on 24 Sep 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ForenSeek: un programme de simulation du développement des insectes nécrophages dédié à l'entomologie médico-légale

Damien Charabidze , Gildas Morvan , Daniel Dupont , Didier Gosset & Benoît Bourel

To cite this article: Damien Charabidze , Gildas Morvan , Daniel Dupont , Didier Gosset & Benoît Bourel (2008) ForenSeek: un programme de simulation du développement des insectes nécrophages dédié à l'entomologie médico-légale, *Annales de la Société Entomologique de France*, 44:3, 385-392, DOI: [10.1080/00379271.2008.10697575](https://doi.org/10.1080/00379271.2008.10697575)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/00379271.2008.10697575>



Published online: 31 May 2013.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 350



View related articles [↗](#)

ForenSeek : un programme de simulation du développement des insectes nécrophages dédié à l'entomologie médico-légale

DAMIEN CHARABIDZE^(1,2), GILDAS MORVAN⁽³⁾, DANIEL DUPONT⁽⁴⁾, DIDIER GOSSET⁽¹⁾ & BENOÎT BOUREL^(1,2)

⁽¹⁾ Institut de Médecine Légale et Sociale, Faculté de Médecine, Place de Verdun, F-59045 Lille Cedex, France

⁽²⁾ Laboratoire Environnement & Santé, Faculté Libre des Sciences et Technologies, 41 rue du Port, F-59046 Lille Cedex, France

⁽³⁾ LGI2A (Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois), Université d'Artois, Faculté des Sciences Appliquées - Technoparc Futura, F-62400 Béthune, France

⁽⁴⁾ Hautes Etudes d'Ingénieur (HEI), 13 rue de Toul, F-59046 Lille Cedex, France

Abstract. Forenseek: a simulation program of carrion-feeding insects development dedicated to forensic entomology. Forensic entomology focuses on the study of necrophagous insects in the field of criminal investigations, particularly to estimate the time of death. This method rests on solid bases and is frequently used in the framework of criminal affairs, in France as abroad. The ForenSeek project is a computer based decision support system (DSS) dedicated to forensic entomology. The core part of the program is a model of behaviour and development of necrophagous diptera larvae based on a multiagent system (MAS). This concept allows to model complex group behaviours from simple individual data, and thus is particularly well adapted to study insect populations. Moreover, the results of this model are intended to be automatically computed to extract relevant information to estimate *post-mortem* intervals (PMI).

Résumé. L'entomologie médico-légale repose sur l'utilisation des insectes nécrophages pour estimer le moment de la mort dans le cadre d'enquêtes judiciaires et permet dans certains cas de préciser les circonstances du décès. Cette technique repose sur des bases scientifiques solides et est désormais couramment utilisée en France comme à l'étranger dans le cadre d'affaires criminelles. Le projet ForenSeek est un outil informatique d'aide à la décision, dédié à la réalisation de simulations et d'expertises en entomologie médico-légale. Le cœur de ce programme est un modèle de comportement et de développement des larves de diptères nécrophages basé sur un système multi-agents (SMA). Ce procédé permet de modéliser des comportements de groupes complexes à partir de données individuelles simples, et est donc particulièrement bien adapté à l'étude des populations d'insectes. De plus, les résultats de ce modèle sont destinés à être traités automatiquement pour en extraire des informations sur la pertinence de chaque simulation, et ainsi estimer de manière automatisée et avec précision l'intervalle *post-mortem* (IPM).

Keywords: multiagent system, *post-mortem* interval, forensic entomology, behaviour, modelisation.

Lors de la découverte d'un corps, les enquêteurs ont besoin de déterminer précisément la date et l'heure du décès. La médecine légale peut fournir cette information grâce à l'étude des caractéristiques du cadavre et de son état de décomposition. Ainsi, la rigidité cadavérique, la présence de lividité ou la température du corps sont autant de paramètres permettant d'estimer précisément l'heure du décès. Cependant, ces techniques ne sont efficaces que durant une courte période, et passé quelques jours après le décès, l'estimation de l'intervalle *post-mortem* (IPM) devient délicate et imprécise (Kashyap 1989).

Dans ce cas, il est possible de recourir à l'entomologie médico-légale, qui consiste à étudier l'entomofaune

nécrophage pour estimer la date de la mort. L'objectif est de dater les premières pontes en calculant l'âge des insectes prélevés. Le travail de l'expert consiste donc à identifier les insectes, à estimer leur âge, à corréliser ces données avec les préférences écologiques des espèces concernées et ainsi à déterminer le moment des premières pontes sur le corps.

Ce procédé, simple en apparence, peut se révéler relativement complexe. En effet, de nombreux paramètres influent sur le développement des insectes ; principalement la température, mais également des critères plus difficiles à quantifier comme la compétition ou la prédation. Il est également déterminant de connaître le délai écoulé entre le décès et les premières pontes : actuellement, seule la température journalière est prise en compte pour déterminer l'activité des insectes, tandis qu'une récente étude démontre clairement l'effet de paramètres climatiques plus

E-mail: damien@forenseek.org

Accepté le 31 janvier 2008

complexes (pluviométrie, température moyenne durant le mois précédent, etc.) sur la présence des diptères (Goulson *et al.* 2005). De même, la température habituellement utilisée pour le calcul du temps de développement des larves est la température extérieure, alors que celle-ci peut différer de plusieurs degrés par rapport à la température du corps, réellement ressentie par les insectes. Enfin, de nombreuses techniques existent pour estimer l'âge des insectes, chacune présentant un certain nombre d'intérêts et de limites, et utilisant des données de référence comportant une variabilité importante.

Le projet ForenSeek s'intéresse à la conception d'un outil d'aide à la décision dédié à la réalisation d'expertises en entomologie médico-légale. Le cœur du programme est un modèle du comportement et du développement des larves de diptères nécrophages sur un corps, basé sur un paradigme issu des recherches en intelligence artificielle distribuée, appelé système multi-agents (SMA). Cette méthode a déjà été appliquée avec succès à la modélisation du comportement d'insectes sociaux (Theraulaz 1990, Drogoul 1993, Drogoul *et al.* 1995). Cependant, ces modèles sont purement descriptifs et qualitatifs et ne permettent pas de raisonner sur les résultats des simulations. Le programme ForenSeek présente au contraire une structure à deux niveaux permettant le traitement et la comparaison des résultats issus d'un grand nombre de simulations. Dans un premier temps, les paramètres de simulations ont été fixés pour les trois espèces de Diptères nécrophages les plus fréquentes dans le nord de la France : *Calliphora vicina*, *Lucilia sericata* et *Protophormia terraenovae*. Ces

espèces ont des préférences écologiques comparables et des comportements similaires. À terme, le modèle pourrait être généralisé à l'ensemble des espèces nécrophages. Enfin, un système expert s'appuyant sur les résultats de ces simulations permettra de tester différentes hypothèses quant à l'heure de la mort, et ainsi d'estimer de manière automatique, précise et fiable l'IPM.

Matériel et méthode

Le développement du programme a été effectué sous MadKit 4.0 (www.madkit.org), une plateforme libre de développement et d'exécution de systèmes multi-agents. La modélisation par SMA consiste à décrire par un certain nombre de propriétés élémentaires les caractéristiques d'un individu, qui sera représenté dans le programme comme étant un agent (unité élémentaire du système de modélisation). Dans le cas présent, chaque Diptère (larve ou adulte) est représenté par un agent. On définit également ses relations avec son environnement et les autres individus : le comportement global du système résulte des interactions entre l'ensemble des agents (*i.e* des individus).

Description de l'environnement

Les agents (pendants virtuels des larves de Diptères nécrophages) évoluent dans un environnement en deux dimensions simulant un cadavre. Cette surface est divisée en cellules carrées de deux cm par deux cm caractérisées par un ensemble de propriétés : la densité des tissus (variant de zéro pour l'extérieur à un pour les os), la température locale T_a (perçue par les larves), l'hygrométrie et la quantité de ressources disponibles. La température locale T_a résulte d'une transformation de la température extérieure T_e : le corps présentant une certaine inertie du fait de sa masse, les données climatiques extérieures sont recalculées par la formule de Henssge (Henssge 1988, 1992). Cette équation, fréquemment utilisée en médecine légale, tient notamment compte de la masse du corps et donc de sa relative inertie thermique. Elle repose sur les lois de refroidissement de Newton afin de prédire la réponse d'un corps aux changements de température T_e de son environnement. La prise en compte de ce phénomène apporte donc une plus grande précision dans le calcul de la vitesse de développement des insectes se développant sur le corps.

Une fonction polynomiale de degré trois, ajustée pour chaque espèce à partir de données expérimentales présentes dans la littérature, indique la probabilité de survie d'un individu dans chaque cellule en fonction du rapport entre la concentration locale de larves et la quantité de nourriture disponible dans cette zone (De Jong 1976, Putman 1977, Goodbrod & Goff 1990, Dos Reis *et al.* 1999, Moe *et al.* 2002). Ainsi, plus la quantité de ressources est faible et le nombre d'individus élevé dans une cellule, plus la probabilité de survie des insectes dans cette cellule devient faible. Cette approche traduit la compétition locale entre des individus qui essaient d'acquiescer le plus de nourriture possible le plus rapidement possible.

Description des agents

Pour chaque espèce, plusieurs propriétés dynamiques caractérisent les agents (larves de Diptères nécrophages) :

- Le taux de développement : la durée de développement des larves étant dépendante de la température, on utilise une fonction cumulative (valeur de zéro pour un œuf et de

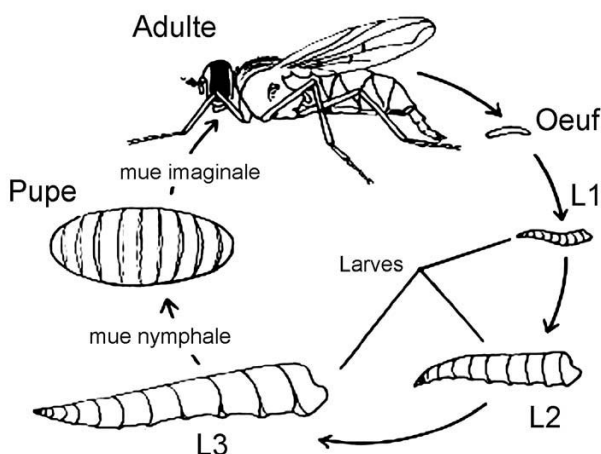


Figure 1
Cycle de développement holométabole d'un diptère calliphoridae, composé de trois stades larvaires et d'un stade nymphal. L'imago est mature sexuellement quelques jours après l'émergence.

un pour un imago) indiquant l'âge relatif de l'individu. Les données expérimentales disponibles pour chaque espèce ont été modélisées par l'équation de Stinner (1974), qui décrit l'évolution de la vitesse de développement des insectes comme une fonction sigmoïde de la température. Cette fonction est de la forme : $V = c/(1+\text{Exp}[(k1+k2)*T])$ ou V est la vitesse de développement, T la température locale et c , $k1$ et $k2$ les paramètres d'ajustement du modèle. On calcule donc pour chaque pas d'une heure la température moyenne ressentie par chaque individu pour en déduire sa vitesse de développement durant cette période. Le taux de développement qui en résulte (vitesse de développement multipliée par la durée) est ajouté aux données précédentes pour déterminer le taux de développement accumulé par l'individu.

- Le stade: suivant son taux de développement, un agent se définit comme appartenant à un des stades de développement suivant : œuf, larve de stade 1, 2 ou 3, prépupe, puppe ou imago (fig. 1). Lorsqu'une larve termine le stade puppe et se transforme en mouche (taux de développement égal à un), elle sort du système et n'est plus prise en compte dans le modèle. De plus, le stade a une influence directe sur le comportement de l'individu (recherche de nourriture durant les premiers stades mais pas chez les prépupe ni les pupes).

- Le poids et la taille : ils évoluent avec le taux de développement de l'insecte (Reiter 1984, Davies & Ratcliffe 1994, Wells & LaMotte 1995, Byrd & Butler 1997).

- Les besoins nutritionnels : ils augmentent linéairement avec le taux de développement. Durant son développement (hors stades prépupe et pupes), une larve de diptère nécrophage consomme 2,56 fois le poids atteint par la puppe (Putman 1977).

- La vitesse de déplacement des larves : elle augmente avec la taille des individus et la température locale T_a selon une relation logarithmique (Miller 1929, Charabize *et al.* 2008).

Les agents œufs sont placés sur le corps selon un modèle de ponte (absence de pontes la nuit, variations de la période d'attractivité du corps selon les espèces, nombre d'œufs et lieu de dépôt, etc.), lui-même dépendant de la probabilité de présence des insectes dans le milieu (Byrd & Allen 2001). Les espèces actuellement prises en compte dans le modèle étant toutes précoces dans la colonisation des corps (espèces de la première escouade), leurs préférences écologiques sont similaires. Le nombre d'œufs déposés par ponte est de 250 ± 35 et les pontes ont lieu entre une heure et huit jours après le décès (fonction Gaussienne, maximum atteint après trois jours), ce qui correspond aux valeurs moyennes observées en conditions naturelles (Hayes 1999, Pitts 2004, Davies 2006).

Comportement des agents

Le comportement d'une larve est déterminé par les stimuli qu'il perçoit en provenance de l'environnement et des autres agents. Plusieurs postulats sont posés :

- Les larves se nourrissent continuellement jusqu'à atteindre le stade prépupe (Godoy *et al.* 1996).

- Les larves se déplacent perpétuellement à la recherche d'une zone permettant d'optimiser leur « confort », c'est-à-dire de privilégier les paramètres attractifs (hygrométrie élevée et température proche de l'optimum thermique, présence de nourriture facilement ingérable, etc.), et leur taux de survie (Hafez 1948).

Tableau 1. Synthèse des interactions connues entre l'environnement et le comportement des larves de diptères nécrophages.

Les paramètres sont hiérarchisés selon leur intensité d'effet (du plus influant [1] au moins influant [4]).

Paramètre testé	Description du comportement	Hiérarchie	Observations des auteurs
Hafez 1948. Espèce <i>Musca domestica</i>			
Humidité	Préférence marquée pour l'hygrométrie la plus élevée. Préférence forte pour les substrats mouillés.	1	Fortes interactions avec la température
Température	En dessous de 15 °C, forte préférence pour la T ° la plus élevée. A partir de 15 °C, faible préférence pour la T ° la plus élevée. Passé 35 °C, répulsion forte.	2	Comportement dépendant de l'hygrométrie
Odeur	Existence d'odeurs attractives et d'odeurs répulsives.	3	Sans effet sur 1 et 2
Eclairage	Lumière vive répulsive	4	Habitude rapide
Maddox 2005. Espèce <i>Lucilia sericata</i>			
Déjections et résidus Larves + nourriture	Attire plus d'individus que la nourriture seule	1	Expériences de choix : la recherche d'agrégation prime sur la recherche de nourriture chez les L1. Différence significative à $\alpha = 0,05\%$
Nourriture seule	Attire moins d'individus que la présence d'autres larves	2	
Liu 2006. Espèce <i>Lucilia sericata</i>			
Déjections et résidus	Temps nécessaire à l'agrégation : 111s	1	Expériences sur la vitesse de réponse : les L1 réagissent plus vite à la présence d'autres larves qu'à celle de nourriture. Différence significative à $\alpha = 0,05$
Larves + nourriture	Temps nécessaire à l'agrégation : 171s	2	
Nourriture seule	Temps nécessaire à l'agrégation : 364s	3	
Témoin (eau)	Temps nécessaire à l'agrégation : 1364s	4	

- Chaque agent émet un signal d'agrégation attractif pour les autres agents (Liu 2006, Maddox 2006). La nature de ce signal n'a pas encore été déterminée, bien que plusieurs résultats laissent supposer l'implication de phéromones (tab. 1). Le rôle du comportement grégaire des larves est également mal compris : il semble que le regroupement favorise l'alimentation en créant localement une zone où la nourriture est liquéfiée et donc beaucoup plus facilement ingérable par les larves. Les observations réalisées en milieu homogène et en absence de nourriture confirment la nature active du phénomène, qui est donc à distinguer d'une agrégation induite par les zones les plus favorables de l'environnement.

- Chaque agent émet de la chaleur du fait de son métabolisme (Ruf & Fiedler 2000, Slone *et al.* 2005).

- La température ressentie par les agents est la température de leur environnement immédiat (Hafez 1948).

Il faut donc considérer que chaque agent ne perçoit que son environnement immédiat et ne réagit qu'à celui-ci. Il cherche alors systématiquement à se placer sur la zone favorisant simultanément le comportement d'agrégation, la recherche de nourriture, de tissus de faible densité ainsi que d'une température et d'une hygrométrie adaptées. L'opposition constante entre la recherche de nourriture et le comportement d'agrégation permet de créer une dynamique de la masse de larves et contraint les

individus à rester groupés tout en se déplaçant perpétuellement. Le tableau 1 récapitule les données expérimentales existantes quand au comportement des larves de diptères nécrophages. Enfin, on considère que les différents paramètres physiques du milieu sont indépendants : par exemple, la température d'une cellule n'influe pas sur son hygrométrie. Cette hypothèse n'impacte pas le résultat final des simulations dans la gamme de valeur étudiée et allège considérablement le processus de simulation (Grabisch 2006).

On calcule donc l'attractivité des cellules au voisinage de l'agent pour chaque paramètre pris indépendamment ; ces attractivités locales sont ensuite agrégées pour déterminer une mesure de l'attractivité globale des cellules. L'opérateur d'agrégation privilégie les situations « moyennes », c'est-à-dire qu'il conduit à rejeter les cellules présentant un paramètre très défavorable au profit de celles où tous les paramètres environnementaux sont moyens ou très favorables. Ainsi, une larve ne se déplacera jamais sur une zone très froide, même si la nourriture et l'hygrométrie y sont élevées.

Résultats

La confrontation des résultats de simulations avec les données expérimentales confirme en premier lieu la

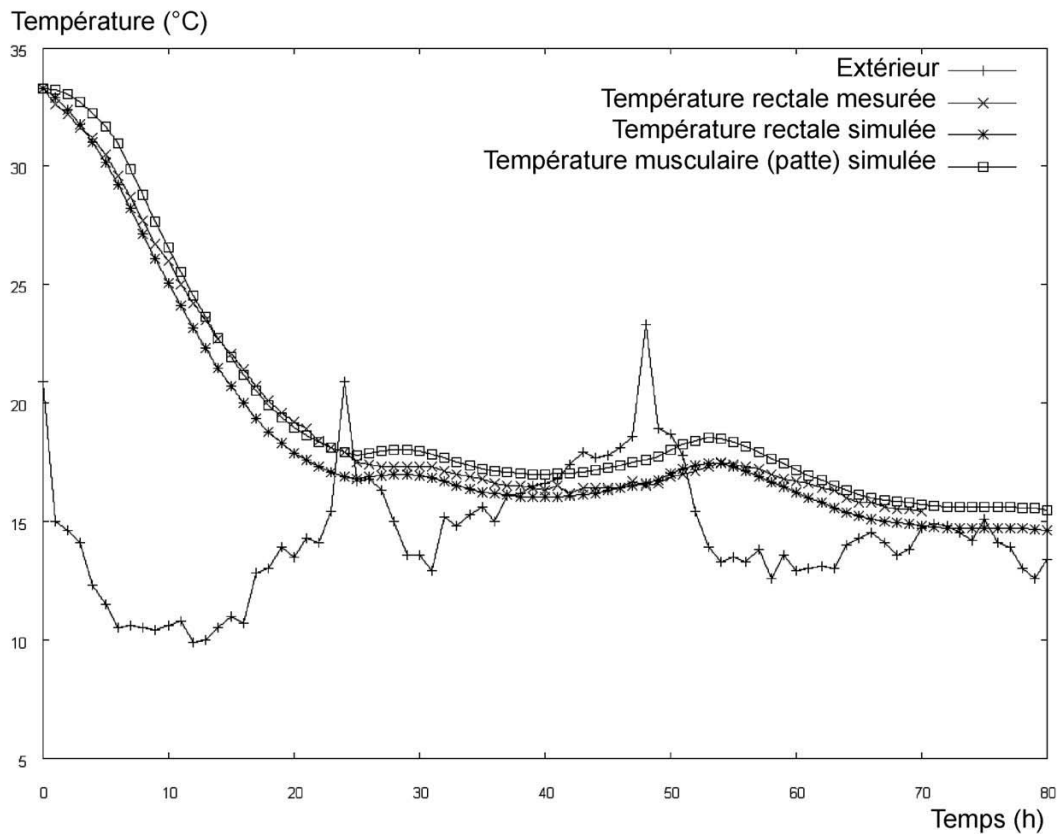


Figure 2

Comparaison de la température extérieure, interne mesurée et interne simulée (rectale et musculaire) à partir de l'équation de Henssge. Mesures effectuées pendant 80 heures avec un cadavre de porc de 30 kg.

pertinence de la modélisation thermique du cadavre. La figure 2 représente l'évolution de la température rectale d'un cadavre de porc de 30 kg : la température interne enregistrée diffère significativement de la température extérieure, car le corps amortit l'amplitude des variations et réagit avec un certain délai. Cette relation, prise en compte dans le modèle, est dépendante de la masse du corps : elle varie donc dans le temps au fur et à mesure que les agents consomment les ressources locales. Par conséquent, l'environnement virtuel dans lequel se développent les larves rend compte de l'inertie du corps aux changements de température.

Lorsque les conditions sont favorables, les larves simulées s'agrègent systématiquement et forment une masse compacte qui consomme rapidement les ressources : on observe sur la figure 3 que ce comportement émerge rapidement (dès 5 h après le début de la simulation), même lorsque les agents sont initialement disséminés aléatoirement. Chaque agent se déplace continuellement au sein du groupe, et la masse dans son ensemble évolue dans l'environnement au fur et à mesure qu'elle consomme les ressources disponibles.

De plus, le dégagement de chaleur produit par chaque individu conduit à une augmentation de température au centre de la masse pouvant aller jusqu'à une quinzaine de degrés (Deonier 1940, Greenberg 1991, Joy *et al.* 2006, Slone & Gruner 2007). Cette variation de la température entraîne des variations de vitesse de développement entre les individus se trouvant au centre et ceux en périphérie. Ce phénomène est partiellement compensé par le brassage des larves au sein de la masse mais conduit néanmoins à une

désynchronisation des individus et à l'apparition d'une certaine variabilité du taux de développement entre des individus pourtant issus d'une même ponte.

Si les agents sont placés en conditions hostiles (température extrême, absence de nourriture, surpopulation), ils se dispersent dans l'environnement à la recherche de conditions plus propices. De même, si la température au centre de la masse de larve devient trop élevée, les agents fuient temporairement cette zone, provoquant ainsi une baisse de la température locale (phénomène d'autorégulation de la température).

Enfin, on constate l'émergence du phénomène de thigmotactisme, c'est-à-dire la tendance des individus à maximiser leur surface de contact, notamment avec les parois de leur environnement. Ainsi, en absence de nourriture, les agents se trouvant à proximité de la bordure de l'espace virtuel dans lequel ils évoluent sont systématiquement attirés par celle-ci, et plus particulièrement par les angles où le contact est maximal. Ce phénomène est fréquemment observé *in vivo* lorsque des larves sont placées dans un environnement vide (absence de nourriture) : ils forment alors des groupes aux angles de l'enceinte expérimentale.

Outre l'affichage de la densité locale de population, le système permet de contrôler visuellement ou numériquement l'ensemble des paramètres. Il est possible par exemple de visualiser la température locale, la quantité de larve de chaque stade ou les ressources restantes. Ces informations peuvent être consultées en temps réel au cours de la simulation ou stockées pour un usage ultérieur.

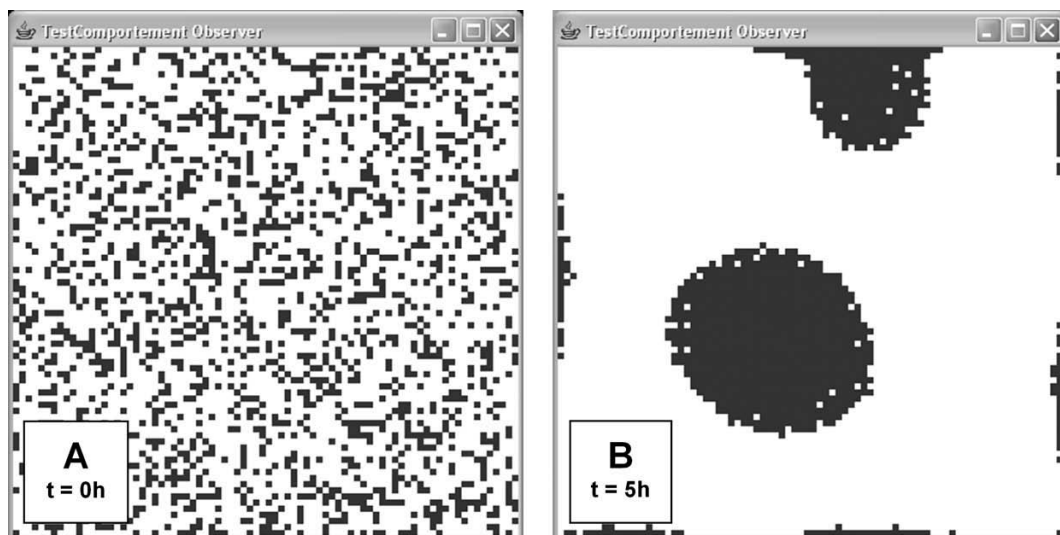


Figure 3
Visualisation du comportement d'agrégation de 1000 agents (chacun représenté par un pixel noir) au départ de la simulation et après 5 h.

Discussion

Les simulations réalisées donnent des résultats particulièrement probants : le comportement des larves virtuelles correspond aux observations effectuées en conditions réelles, et ce pour les différents types d'environnements et de conditions initiales testés. Ainsi, l'apparition d'un mouvement perpétuel des individus au sein de la masse de larve est parfaitement reproduite par le modèle. De plus, l'existence d'une zone de forte chaleur au centre des masses de larves correspond également aux observations mentionnées dans la littérature (Deonier 1940, Greenberg 1991, Slone *et al.* 2005, Joy *et al.* 2006). Enfin, il est particulièrement intéressant de noter que l'apparition du phénomène de thigmotactisme, bien décrit dans les études précédentes sur le déplacement de Miller (1929) et de Hafez (1948), n'a pas été programmé spécifiquement dans le comportement. Il s'agit d'un comportement émergent, c'est-à-dire d'un comportement global ne pouvant être déduit des caractéristiques des agents.

Les études réalisées chez *Lucilia sericata* (Diptera, Calliphoridae) semblent indiquer la faculté des larves de diptères à détecter à distance la présence d'autres individus (Liu 2006, Maddox 2006) (tab. 1). Même

si plusieurs hypothèses sont actuellement envisagées quant au signal provoquant l'agrégation des individus (phéromones, vibrations émises par les larves se nourrissant, odeur des déjections), la connaissance de la nature même du signal n'est pas nécessaire pour le fonctionnement du modèle.

La première application du modèle réside dans la possibilité de simuler le développement d'insectes sur un corps en conditions contrôlées, sans avoir recours à l'expérimentation animale. En effet, ce type d'étude est habituellement réalisé sur des cadavres de porc (Grassberger & Frank 2004, Joy *et al.* 2006) ou des cadavres humains (Shadid 2003), ce qui pose un certain nombre de problèmes éthiques et sanitaires. A terme, le développement d'un « laboratoire virtuel » basé sur modèle SMA permettra de réaliser une partie de ces études sur ordinateur, et de disposer de plans expérimentaux prévisionnels adaptés.

Le second intérêt de la modélisation par système multi-agents est le traitement des données pour la réalisation d'expertises (Weber 2006). Ce processus d'analyse, actuellement en cours de développement, est effectué par une surcouche logicielle appelée contrôleur : le contrôleur utilise les résultats numériques des simulations pour les comparer aux prélèvements effectués sur le corps, et en déduire la validité du scénario utilisé pour la simulation (fig. 4). Plus la similitude est importante, plus le scénario est considéré comme cohérent et les hypothèses initiales utilisées proches de la réalité. Ainsi, une simulation lancée au temps t_0 est d'autant plus valide que l'état du système au temps t_n correspondant à la découverte du corps est similaire (stade de développement des insectes, espèces prélevées, abondance, état du corps, etc.) aux prélèvements effectués sur le cadavre. On associe alors à t_0 un fort indicateur de plausibilité. La répétition de ce processus sur l'ensemble de la période allant de la disparition de la victime à la découverte du corps permet de déterminer quelle hypothèse t_0 est la plus compatible et donc d'estimer le moment du décès.

De plus, les prélèvements effectués sur un corps n'étant pas toujours complets et représentatifs, et les données décrivant l'abondance des larves ou l'état du corps étant par nature imprécises et délicates à estimer, le contrôleur se basera sur une technique permettant de traiter des données incertaines et de prendre en compte cette incertitude dans le processus d'analyse et de décision (logique floue par exemple). La conclusion de ce type d'expertise logicielle pourra ainsi être exprimée sous forme d'un intervalle de confiance.

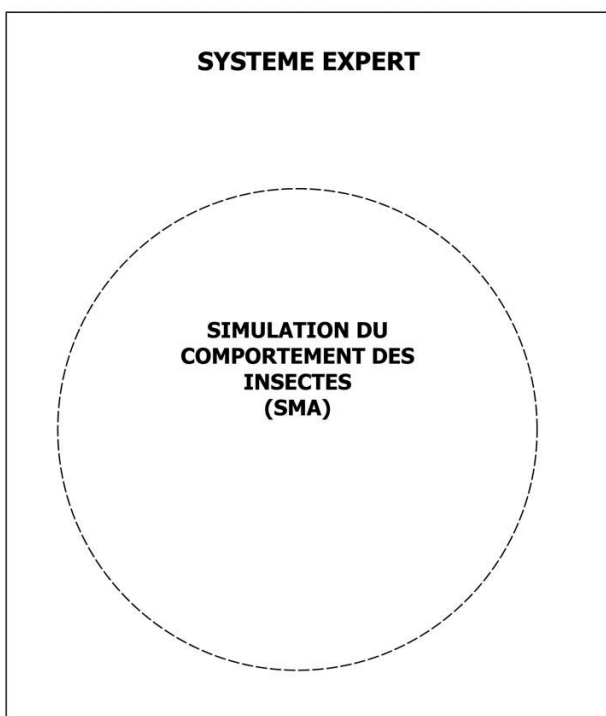


Figure 4
Structure du programme destiné à la réalisation d'expertises entomologiques. La partie interne est un simulateur (SMA) placé sous le contrôle d'un système expert.

Conclusion

L'utilisation d'un système multi-agents pour simuler le développement des larves de diptères nécrophages sur un corps fait émerger des comportements à la fois complexes et fidèles à la réalité. Les données issues de ces simulations peuvent être traitées à la fois de manière qualitative, pour l'étude et la description de certains comportements par exemple, et quantitative. Ils pourront à terme être analysés de manière entièrement automatisée grâce à un système expert afin de disposer d'un véritable outil d'aide à la décision permettant de réaliser des expertises entomologiques plus précises et plus fiables.

Remerciements. Les auteurs tiennent particulièrement à remercier Gilles Goncalves, Philippe Kubiak et Alexandre Veremme (Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois) pour leur aide précieuse et dévouée. Ce projet bénéficie de financements de la Fondation Norbert Segard et du ministère de la recherche.

Références

- Byrd J. H., Butler J. F. 1997. Effects of temperature on *Chrysomya rufifacies* (Diptera:Calliphoridae) development. *Journal Medical Entomology* **34**: 353-8.
- Byrd J. H., Allen J. C. 2001. Computer modelling of insect growth and its application to forensic entomology, p. 303-329 in: Byrd J. H., Castner J. L. (eds.), *Forensic entomology: the utility of arthropods in legal investigations*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida.
- Charabidze D., Bourel B., Leblanc H., Hedouin V., Gosset D. 2008. Effect of body length and temperature on the crawling speed of *Protophormia terraenovae* larvae (Robineau-Desvoidy) (Diptera Calliphoridae). *Journal of Insect Physiology* **54**: 529-33.
- Davies L., Ratcliffe G. G. 1994. Development rates of some pre-adult stages in blowflies with reference to low temperatures. *Medical and Veterinary Entomology* **8**: 245-54.
- Davies L. 2006. Lifetime reproductive output of *Calliphora vicina* and *Lucilia sericata* in outdoor caged and field populations; flight vs. Egg production? *Medical and Veterinary Entomology* **20**: 453-458.
- De Jong G. 1976. A model of competition for food. I. Frequency-dependent viabilities. *The American Naturalist* **110**: 1013-1027.
- Deonier C. C. 1940. Carcass temperature and their relation to winter Blowfly populations and activity in the southwest. *Journal of Economic Entomology* **33**: 166-170.
- Dos Reis S. F., Von Zuben C. J., Godoy W. A. C. 1999. Larval aggregation and competition for food in experimental populations of *Chrysomya putoria* (Wied.) and *Cochliomyia macellaria* (F.) (Dipt., Calliphoridae). *Journal of Applied Entomology* **123**: 485-489.
- Drogoul A. 1993. *De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes*. Thèse de Doctorat, Université Paris VI, Paris, 231 p.
- Drogoul A., Corbara B., Fresneau. D. 1995. MANTA : New experimental results on the emergence of (artificial) ant societies, p.183-198 in: Gilbert N., Conte R. *Artificial Societies: the computer simulation of social life*. UCL Press, London.
- Godoy W. A., Von Zuben C. J., Dos Reis S. F., Von Zuben F. J. 1996. Theoretical estimates of consumable food and probability of acquiring food in larvae of *Chrysomya putoria* (Diptera: Calliphoridae). *Memorias do Instituto Oswaldo Cruz* **91**: 257-64.
- Goodbrod J. R., Goff M. L. 1990. Effects of larval population density on rates of development and interactions between two species of *Chrysomya* (Diptera: Calliphoridae) in laboratory culture. *Journal of Medical Entomology* **27**: 338-43.
- Goulson D., Derwent L. C., Hanley M. L. E., Dunn D. W., Abolins S. R. 2005. Predicting calyptrate fly populations from the weather, and probable consequences of climate change. *Journal of Applied Ecology* **42**: 795-804.
- Grabish M. 2006. L'utilisation de l'intégrale de Choquet en aide multicritère à la décision. European Working Group "Multiple Criteria Decision Aiding" **3**: 5-10.
- Grassberger M., Frank C. 2004. Initial Study of Arthropods Succession on Pig Carrion in a Central European Urban habit. *Journal of Medical Entomology* **41**: 511-523.
- Greenberg B. 1991. Flies as forensic indicators. *Journal of Medical Entomology* **28**: 565-77.
- Hafez M. 1948. On the behaviour and sensory physiology of the house-fly larva, *Musca domestica* L. 1. Feeding stage. *Parasitology* **40**: 215-236.
- Hayes E. J., Wall R., Smith K. E. 1999. Mortality rate, reproductive output, and trap response bias in populations of the blowfly *Lucilia sericata*. *Ecological entomology* **24**: 300-307.
- Henssge C. 1988. Death time estimation in case work. 1. The rectal temperature time of death nomogram. *Forensic Science International* **38**: 209-236.
- Henssge C. 1992. Rectal temperature time of death nomogram: dependence of corrective factors on the body weight under stronger thermic insulation conditions. *Forensic Science International* **54**: 51-66.
- Joy J. E., Liette N. L., Harrah H. L. 2006. Carrion fly (Diptera: Calliphoridae) larval colonization of sunlit and shaded pig carcasses in West Virginia, USA. *Forensic Science International* **164**: 183-92.
- Kashyap V. K., Pillay V. V. 1989. Efficacy of entomological method in estimation of postmortem interval: A comparative analysis. *Forensic Science International* **40**: 245-250.
- Liu S., O'Flaherty R. 2006. Determinants of Maggot Aggregation Behavior in Carrion. <http://ysp.ucdavis.edu/Research06/lius/default.html>.
- Maddox N., Wong B., Kimsey R., Bullard R., Armijo-Prewitt, T. 2006. Determinants of maggot behavior in carrion. <http://ysp.ucdavis.edu/research/maddoxn/maddoxn.html>.
- Miller D. F. 1929. Determining the effects of change in temperature upon the locomotor movements of fly larvae. *Journal of Experimental Zoology* **52**: 293-313.
- Moe S., Stenseth J., Chr N., Smith R. H. 2002. Density dependence in blowfly populations: experimental evaluation of non-parametric time-series modelling. *Oikos* **98**: 523-533.
- Pitts K. M., Wall R. 2004. Adult mortality and oviposition rates in field and captive populations of the blowfly *Lucilia sericata*. *Ecological entomology* **29**: 727-734.
- Putman R. J. 1977. Dynamics of the Blowfly, *Calliphora erythrocephala*, within carrion. *Journal of Animal Ecology* **46**: 853-866.
- Reiter C. 1984. Growth behavior of the blue blowfly *Calliphora vicina* maggots. *Zeitschrift für Rechtsmedizin* **91**: 295-308.
- Ruf C., Fiedler K. 2000. Thermal Gains Through Collective Metabolic Heat Production in Social Caterpillars of *Eriogaster lanestris*. *Naturwissenschaften* **87**: 193-196.
- Shahid S. A., Schoenly K., Haskell N. H., Hall R. D., Zhang W. 2003. Carcass enrichment does not alter decay rates or arthropod community structure: a test of the arthropod saturation hypothesis at the anthropology research facility in Knoxville, Tennessee. *Journal Medical Entomology* **40**: 559-569.
- Slone D., Gruner S. 2007. Thermoregulation in larval aggregations of carrion-feeding blow flies (Diptera: Calliphoridae). *Journal of Medical Entomology* **44**: 516-523.
- Slone D., Gruner S., Allen J. 2005. Assessing error in PMI prediction using a forensic entomological computer model. *U.S. Department of Justice final report*. 37 p.

Stinner R.E., Gutierrez A.P., Butler G.D. 1974. An algorithm for temperature-dependent growth rate simulation. *The Canadian Entomology* **106**: 519-524.

Theraulaz G., Goss S., Gervet J., Deneubourg J.L. 1990. Swarm intelligence in wasps colonies: an example of task assignment in multiagents systems, p. 135-143 in: *Proceedings of the 1990 IEEE International Symposium on Intelligent Control, Philadelphia*.

Weber A., Rahmani A., Dupont D., Follet A. 2006. Multiagent System for Flow Management in Complex Systems: Development of a Decision Support System in Epidemiology. *Proceedings of European Simulation Multiconference (ESM)*.

Wells J.D., LaMotte L.R. 1995. Estimating maggot age from weight using inverse prediction. *Journal of Forensic Science* **40**: 585-590.

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple ou d'illustration, « toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.