

Lutter contre la propagation d'une épidémie

simulations par un modèle multi-agents de quelques mesures de prévention

Rapegno Virgile - n° 2879

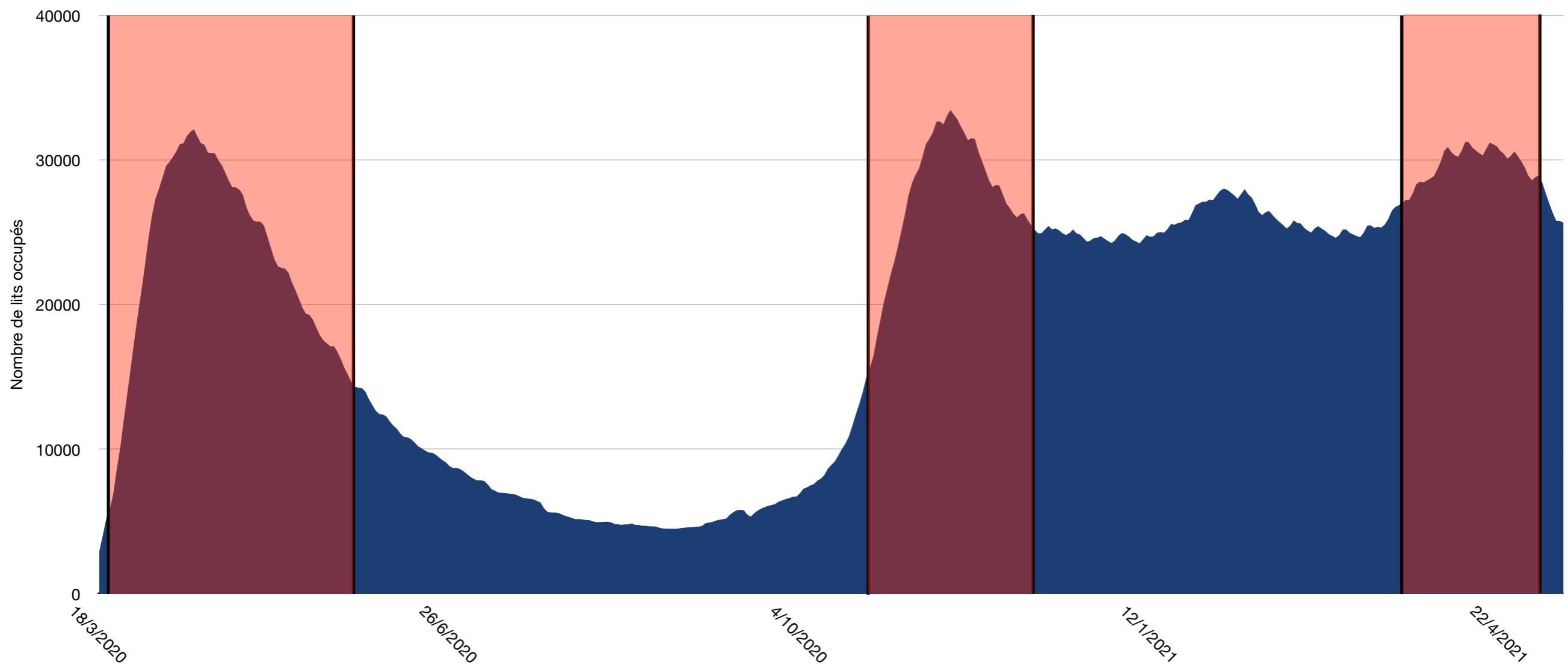
Plan de la présentation

- Mise en situation
- Élaboration du modèle
- Caractérisation des mesures de préventions
- Comparaison des résultats
- Conclusion

Mise en situation

Aplatir la courbe

Évolution du nombre d'individus hospitalisés en raison de la COVID
de mars 2020 à mai 2021 - data.gouv.fr

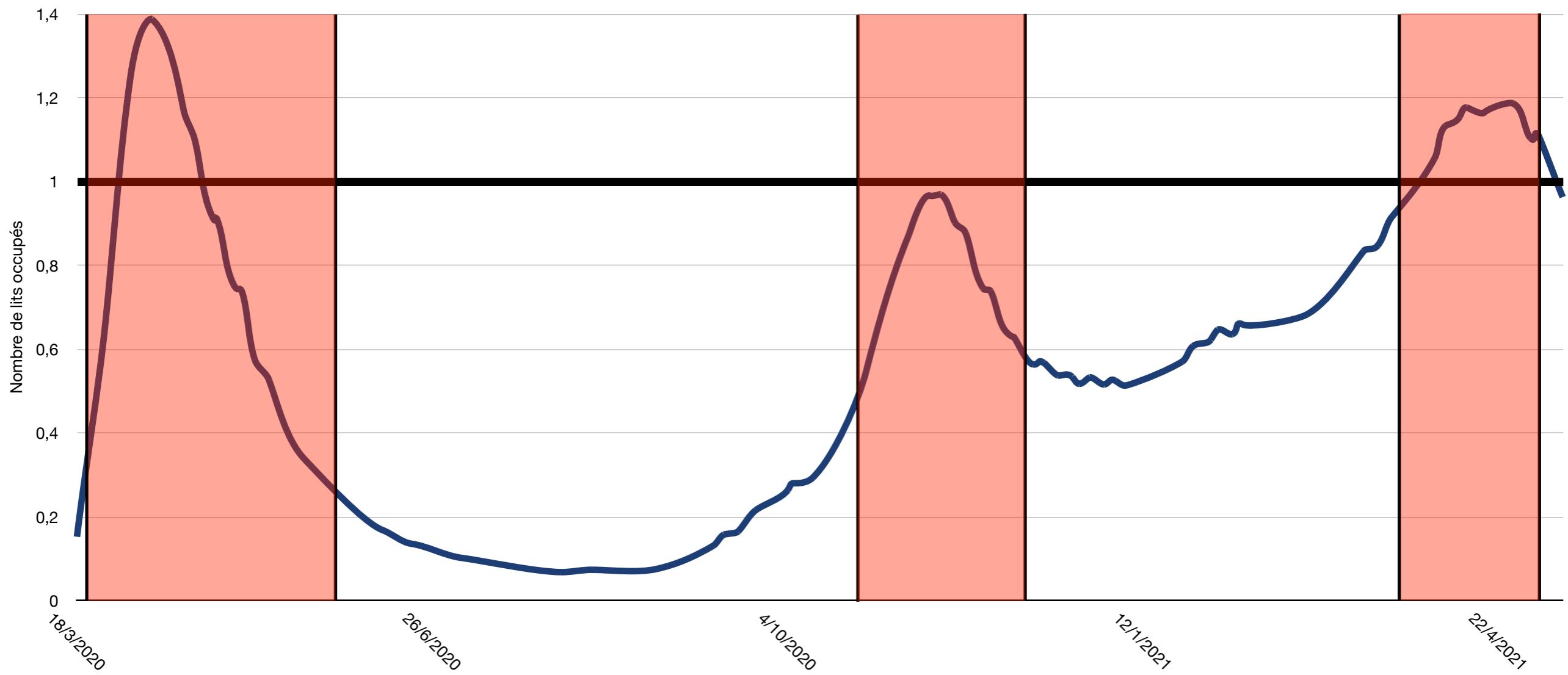


Rapegno Virgile - n° 2879

Mise en situation

Aplatir la courbe

Évolution du taux d'occupation des lits en réanimation
de mars 2020 à mai 2021 - data.gouv.fr



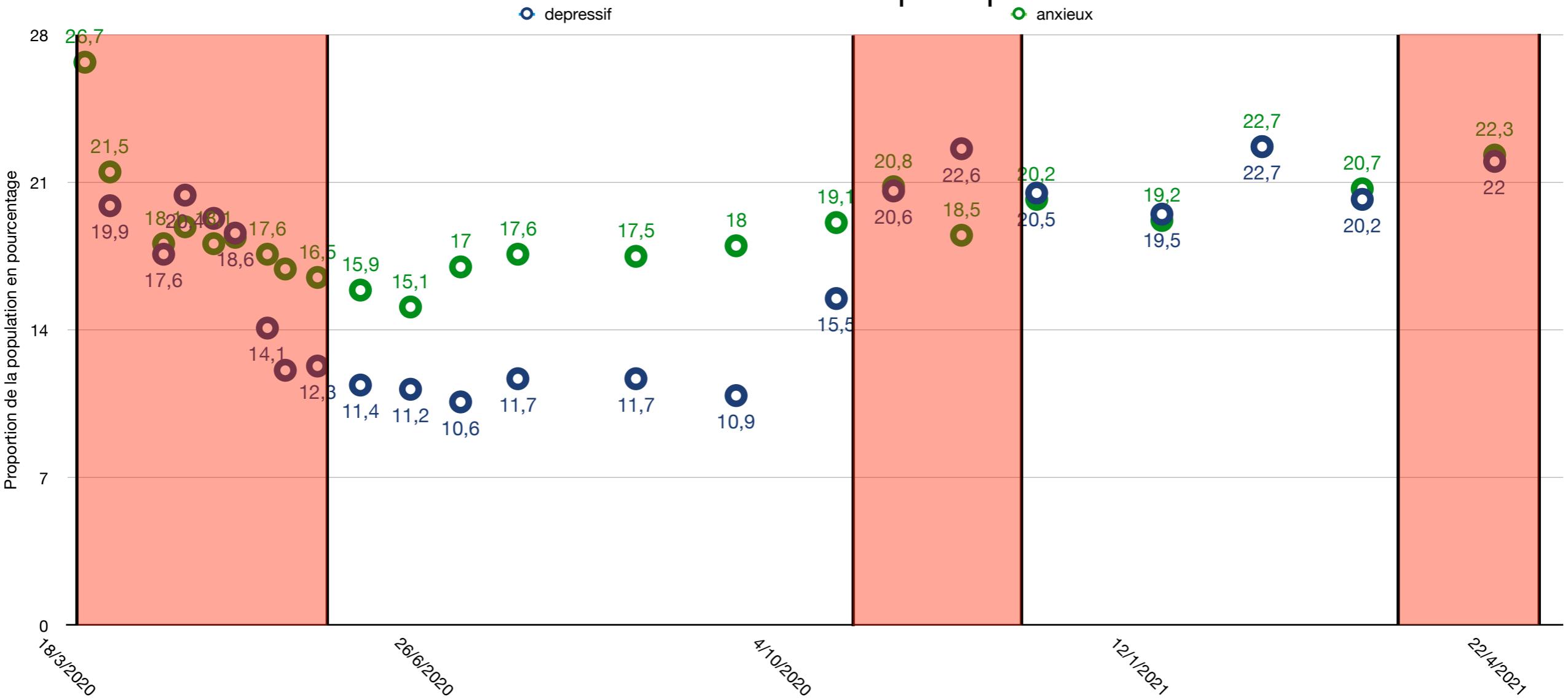
Rapegno Virgile - n° 2879

Mise en situation

Contexte

Évolution du nombre d'individus se déclarant en état dépressif ou anxieux sur l'échelle HAD

de mars 2020 à mai 2021 - santepubliquefrance.fr



Mise en situation

Contexte

En mars 2020, 93 % des Français étaient favorables à l'instauration du premier confinement. Maintenant ils ne sont plus que 48 %. Pourquoi n'y a-t-il plus de consensus autour du confinement ?

L'Obs janvier 2021 - sondage Institut Elabe

Liberticide Inefficace Insuffisant
Crise économique Santé mentale

Mise en situation

Épidémiologie

Analyse :

- Évaluer le taux d'incidence, la dispersion dans la population et sur le territoire
- Lister les symptômes
- Trouver des facteurs de risques
- Suivre l'épidémie jour après jour

Prévention :

- Expliquer de la conduite à tenir
- Accompagner les politiques
- Anticiper et endiguer le développement de la maladie
- Simuler l'épidémie et l'incidence des mesures

Mise en situation

Objectif de ce TIPE

Quel est l'action d'un confinement et des mesures de distanciation ?

« Our results show that major non-pharmaceutical interventions—and lockdowns in particular—have had a large effect on reducing transmission. »

Flaxman, S., Mishra, S., Gandy, A. et al. Estimating the effects of non-pharmaceutical interventions on COVID-19 in Europe. *Nature* 584, 257–261 (2020).

Mise en situation

Objectif de ce TIPE

Comment simuler un confinement et des mesures de distanciation ?

Initiation à la modélisation

Visualiser la transmission

Critère de reproductibilité

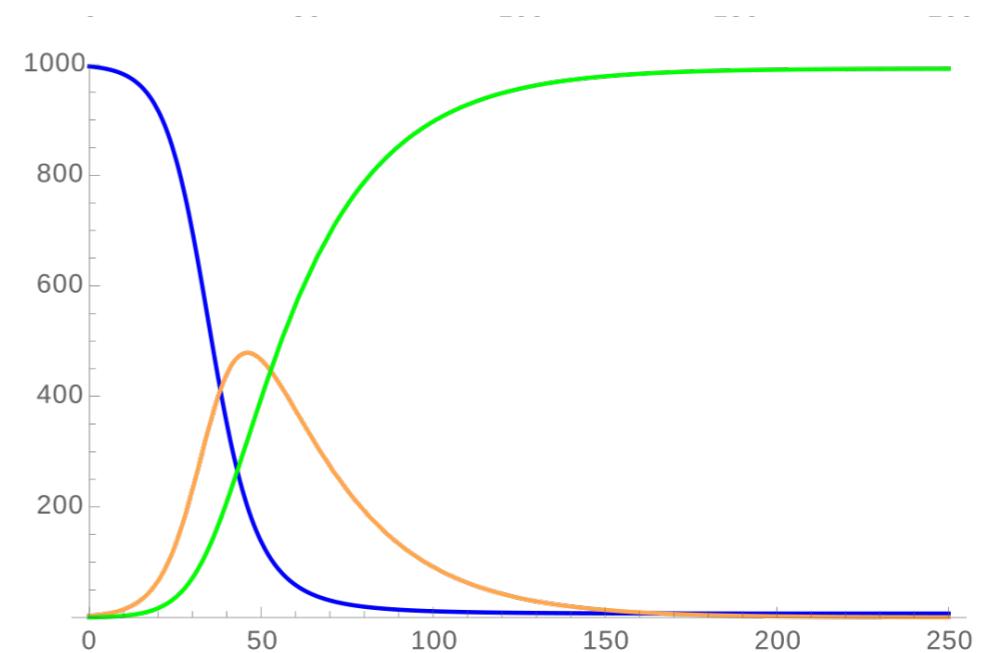
Élaboration du modèle

Comment tester des mesures sur une population ?

Modèle SIR :

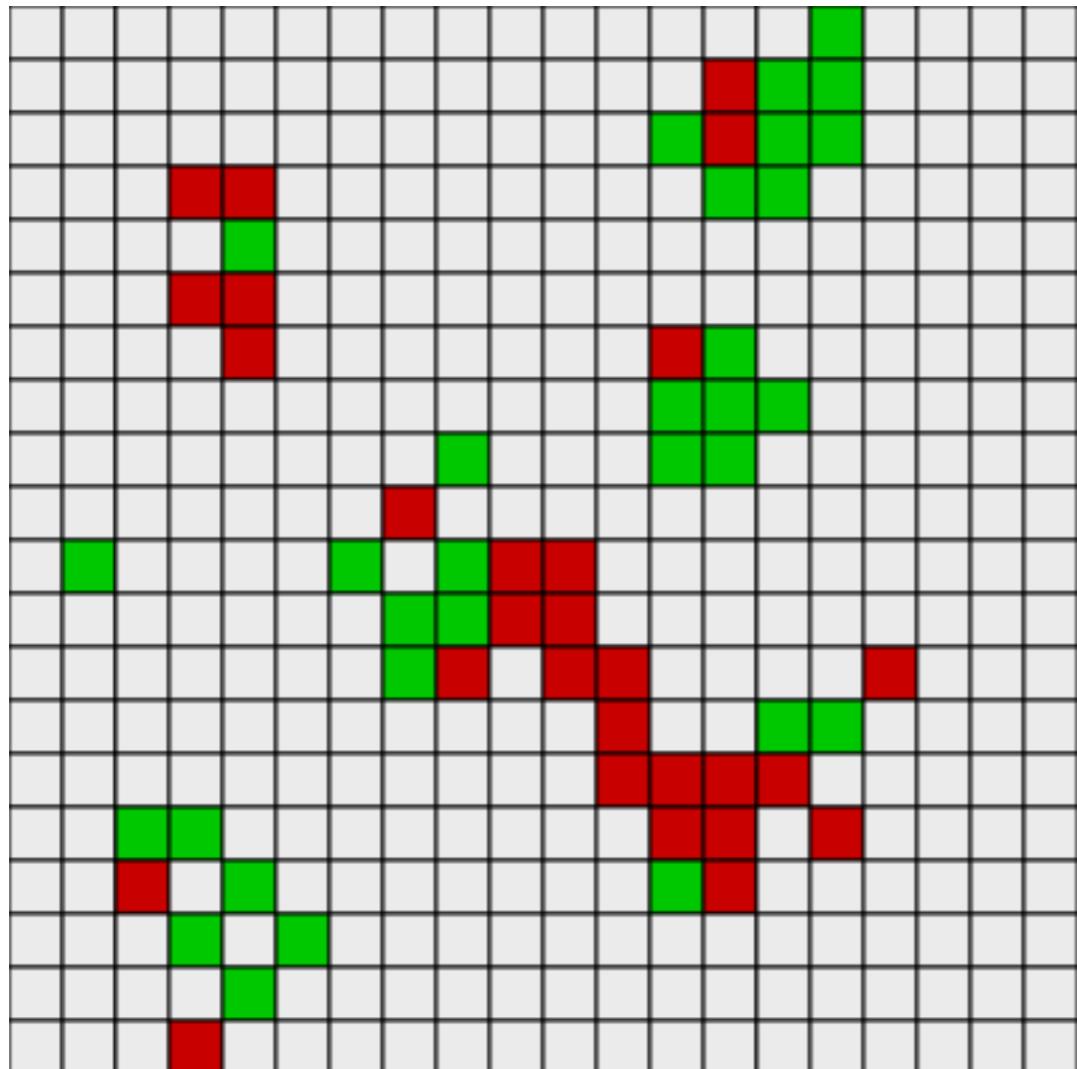
- Trois états dans la version classique : Sains, Infectés, Rétablis
- Modéliser la vitesse d'infection au sein d'une population
- Simplicité et Fiabilité
- Impossibilité d'étudier un comportement

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS}{dt} = -\beta SI \\ \frac{dI}{dt} = \beta SI - \lambda I \\ \frac{dR}{dt} = \lambda I \end{array} \right.$$



Élaboration du modèle

Comment tester des mesures sur une population ?



Automate Cellulaire :

- Individualisation des agents
- Contrôle de l'environnement et des règles d'interactions
- Statistiques toujours disponibles
- Simplification trop importante de la propagation

Élaboration du modèle

Modèle multi-agents

Agents individualisés

Volonté propre, programmer des comportements

Environnement continu

Libre circulation, tester la distanciation sociale

Population en temps réel

Accès aux données, agir comme les pouvoirs publics

Élaboration du modèle

Caractérisation des individus

Individus :

- Programmation orientée objet pour faciliter la création et la manipulation
- Méthode automatisant le passage d'un état à l'autre
- Marche aléatoire assurée dans l'environnement

```
class Individu: Hashable {  
    let id: Int  
    var coordonnées: CGPoint  
    var couleur: CGColor  
    var statut: Statut  
    var isolé: Bool  
    var obéissant: Bool  
    var vitesse: CGFloat  
    var propagation: CGFloat  
  
    func devenir_malade() { ... }  
  
    func devenir_immunisé() { ... }  
  
    func devenir_isolé() { ... }  
  
    func déplacer() { ... }  
}
```

Élaboration du modèle

Caractérisation de la population

```
class Population {  
    var agents: Set<Individu>  
    var sains: Set<Individu>  
    var malades: Set<Individu>  
    var immunisés: Set<Individu>  
    var obéissant: Set<Individu>  
    var grille: [[Set<Individu>]]  
    var ensemble_voisins: [[Set<Individu>]]  
    var déplacés: [Individu: CGPoint]  
  
    func position_grille( ... ) { ... }  
    func créer_grille() { ... }  
    func voisinage( ... ) { ... }  
    func créer_ensemble_voisins() { ... }  
  
    func se_séparer( ... ) { ... }  
  
    func aller_rassemblement() { ... }  
    func retour_rassemblement() { ... }  
  
    func évolution( ... ) { ... }  
}
```

Population :

- Type set similaire aux listes ou tableaux mais sans index, optimisé pour la réunion en temps et en espace
- Utilisation d'une grille pour éviter dans le meilleur des cas évolution en $O(n^2)$ car création de la grille en $O(n)$

Élaboration du modèle

Caractérisation de la population

Évolution de la population :

- Réalisation des déplacements
- Infection des agents
- Rétablissement ou dépistage des malades

```
func évolution( ... ) {  
    for agent in agents { agent.déplacer() }  
    créer_grille()  
    créer_ensemble_voisins()  
  
    if distanciation { ... }  
    if rassemblement { ... }  
  
    créer_grille()  
    créer_ensemble_voisins()  
  
    for agent in sains {  
        let (i, j) = position_grille(agent)  
        for voisin in ensemble_voisins[i][j] { ... }  
    }  
  
    for agent in malades {  
        if random() < probabilité_immunisé { ... }  
        else if agent.obéissant && !agent.isolé  
            && random() < probabilité_isolément { ... }  
    }  
}
```

Rapegno Virgile - n° 2879

Élaboration du modèle

Caractérisation de l'environnement

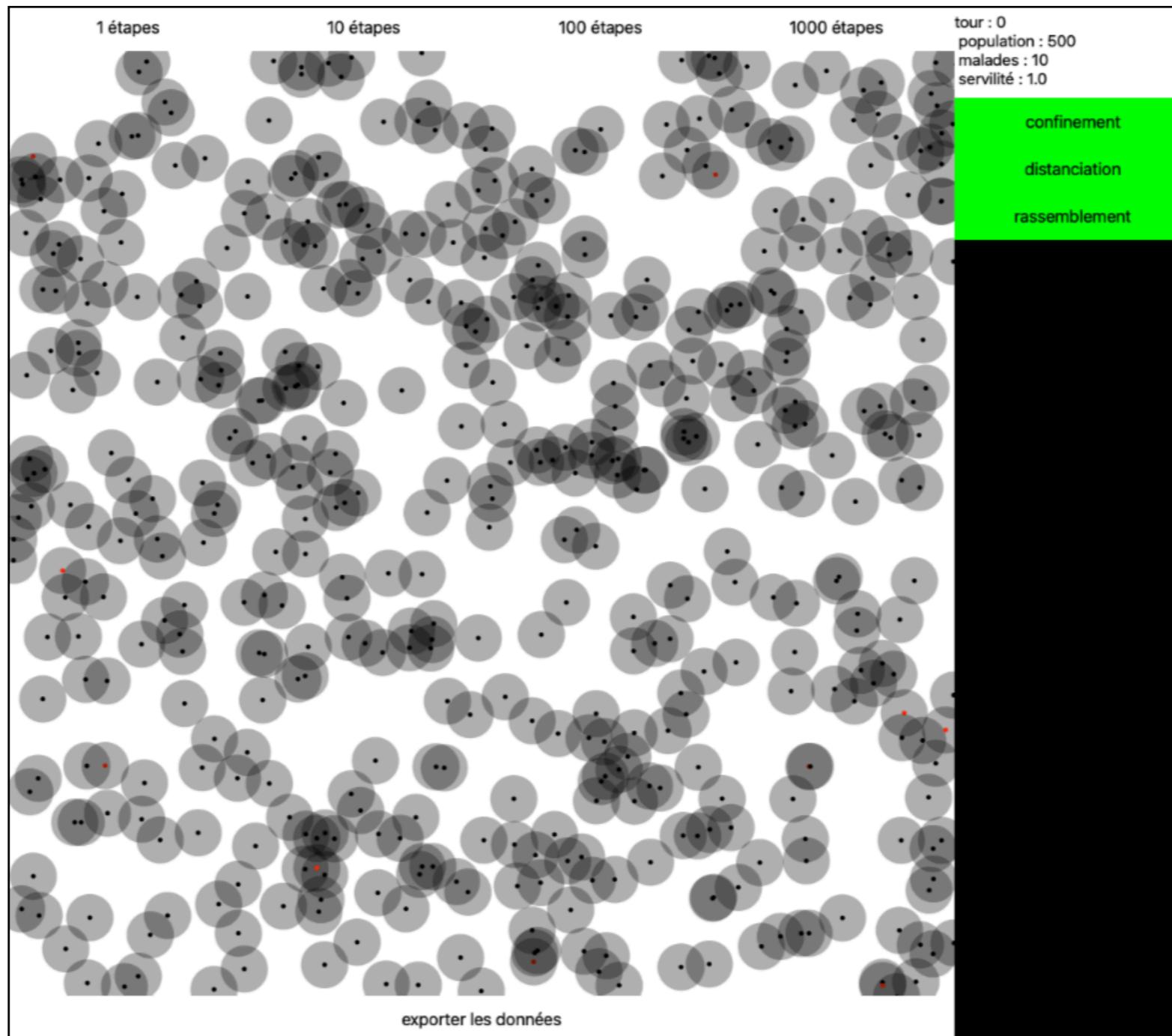
```
class Environnement {  
    var population: Population  
    var évolution_sains: [Int]  
    var évolution_malades: [Int]  
    var évolution_immunisés: [Int]  
    var en_confinement: Bool  
    var en_distanciation: Bool  
    var nombre_tour: Int  
  
    func étape() { ... }  
  
    func changer_confinement() { ... }  
    func changer_distanciation() { ... }  
    func changer_rassemblement() { ... }  
  
    func afficher() { ... }  
}
```

Environnement

- Espace fini avec bordure
- Nombre d'agents fixe
- Suivi et stockage de l'évolution de la population
- Paramétrisation de la simulation à l'initialisation et lors du décret d'une mesure

Élaboration du modèle

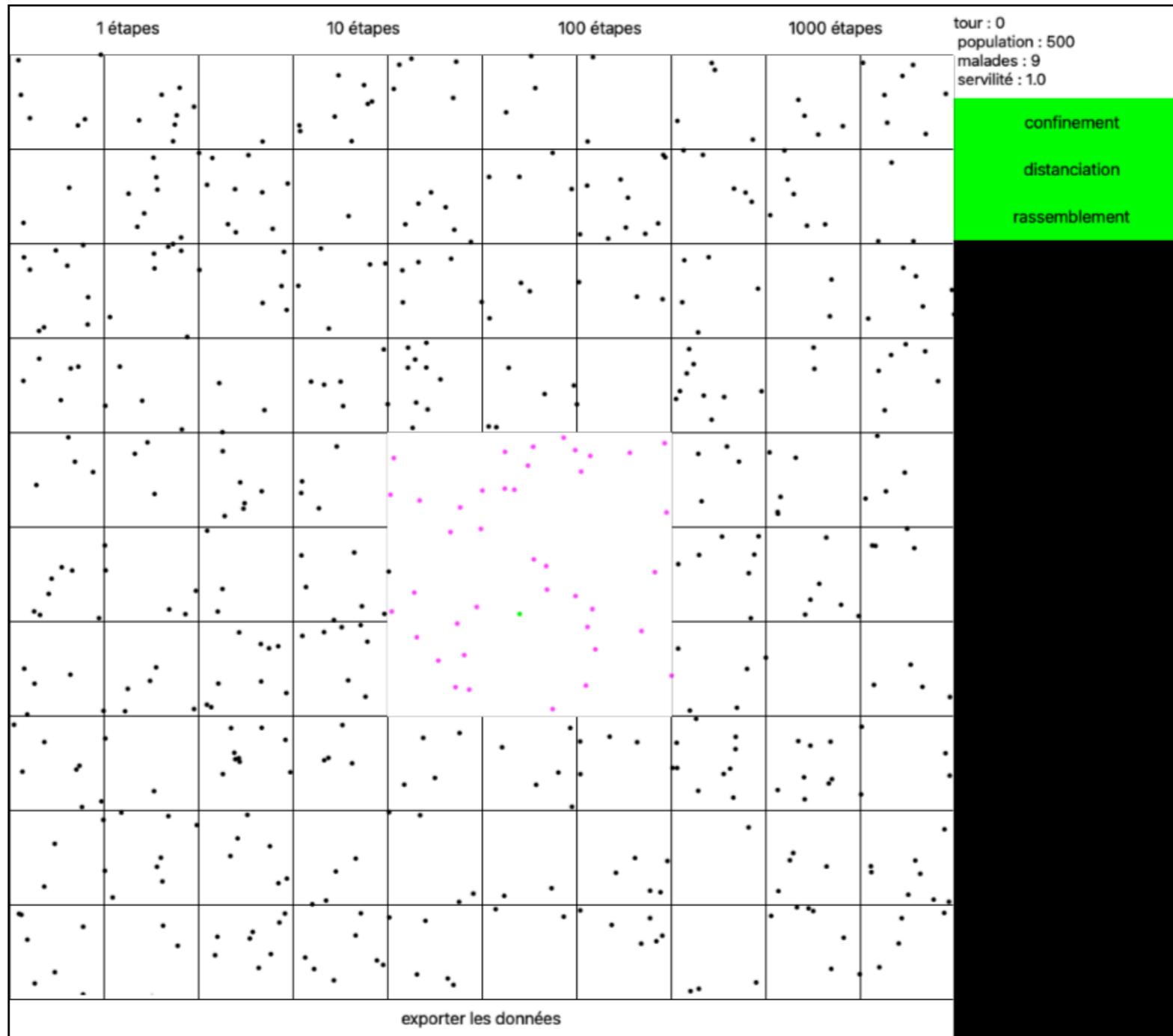
Distance de propagation



Rapegno Virgile - n° 2879

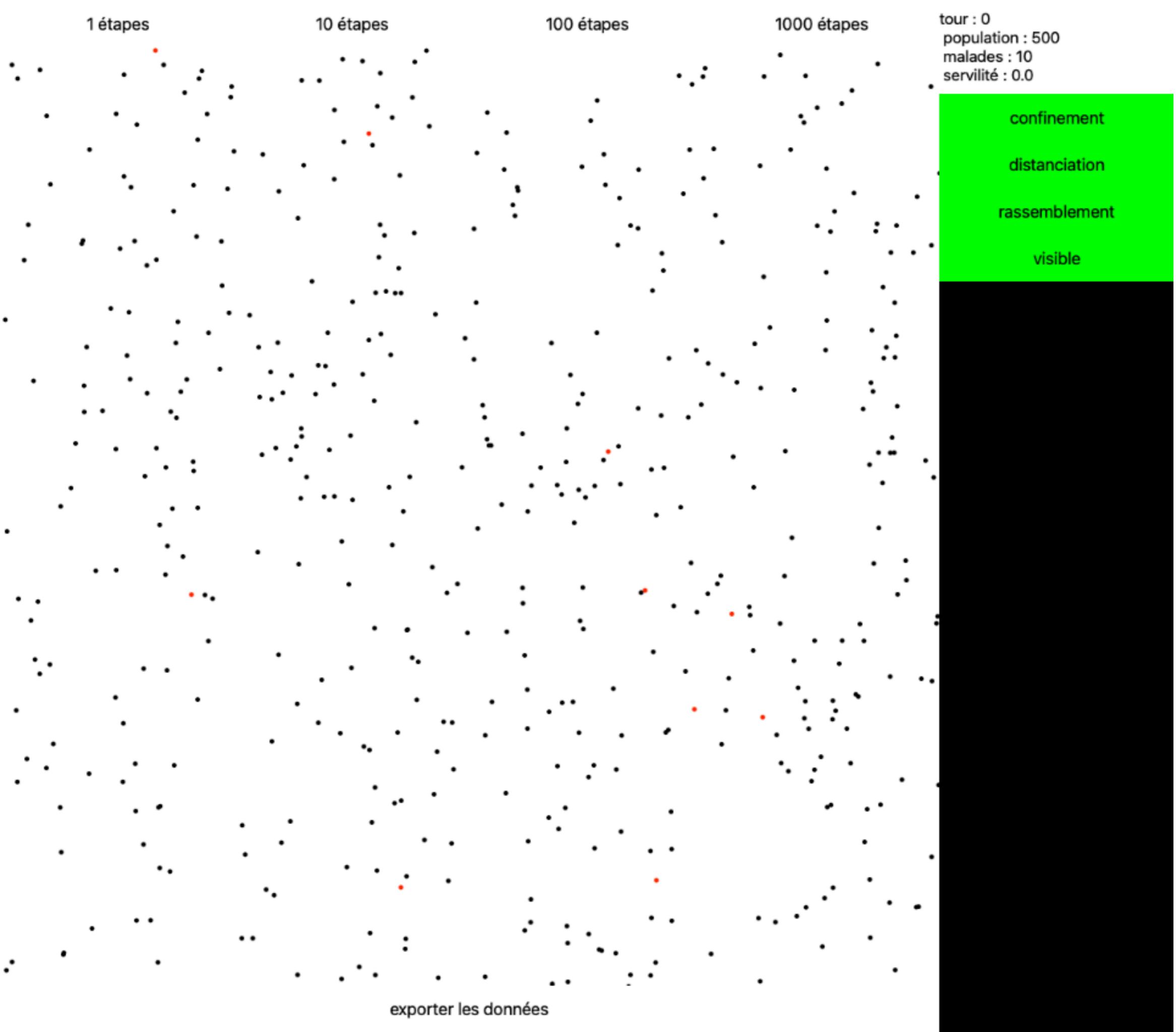
Élaboration du modèle

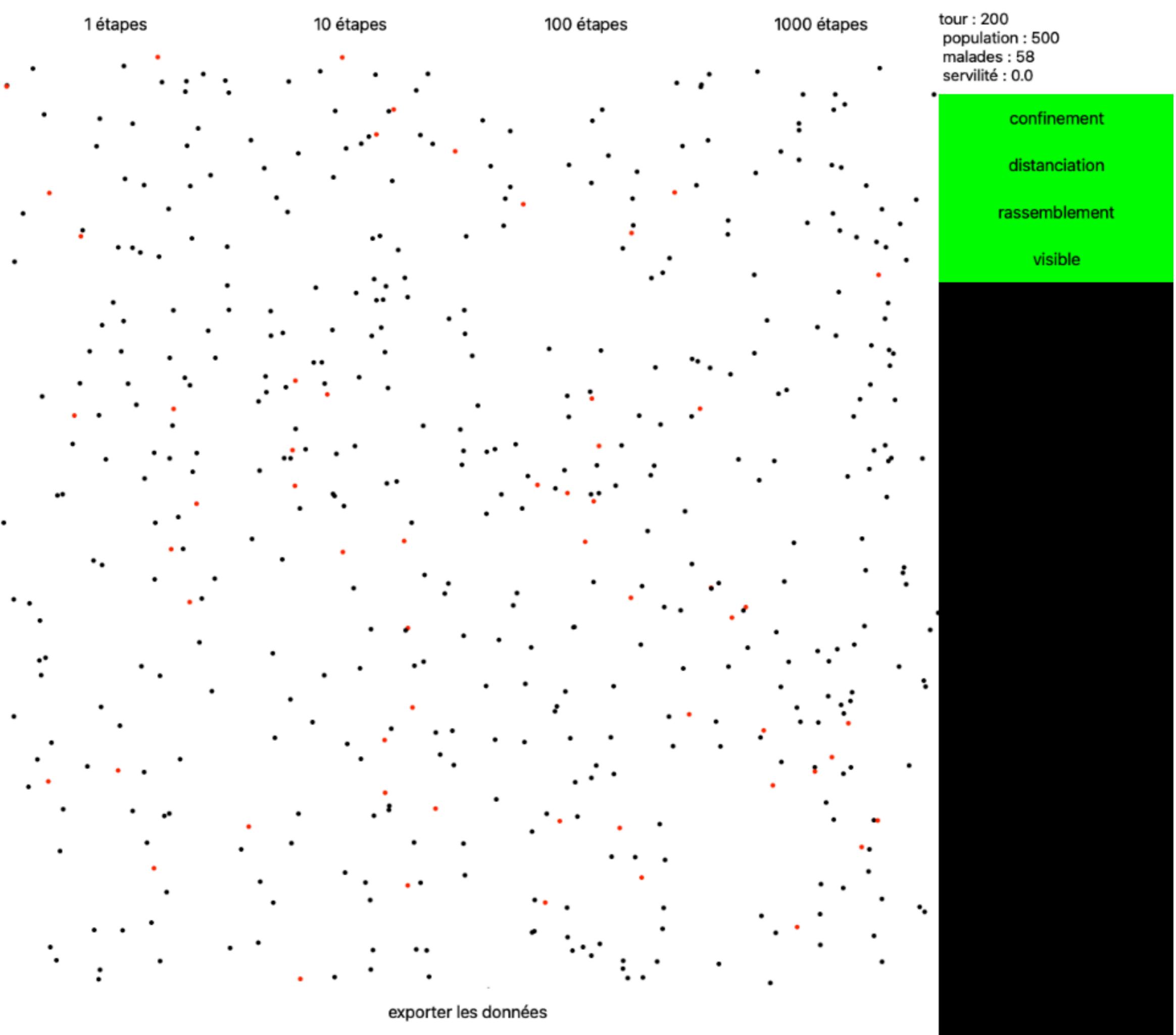
Grille et voisinage



Rapegno Virgile - n° 2879

Déroulement typique de la simulation





1 étapes

10 étapes

100 étapes

1000 étapes

tour : 300
population : 500
malades : 81
servilité : 0.0



exporter les données

1 étapes

10 étapes

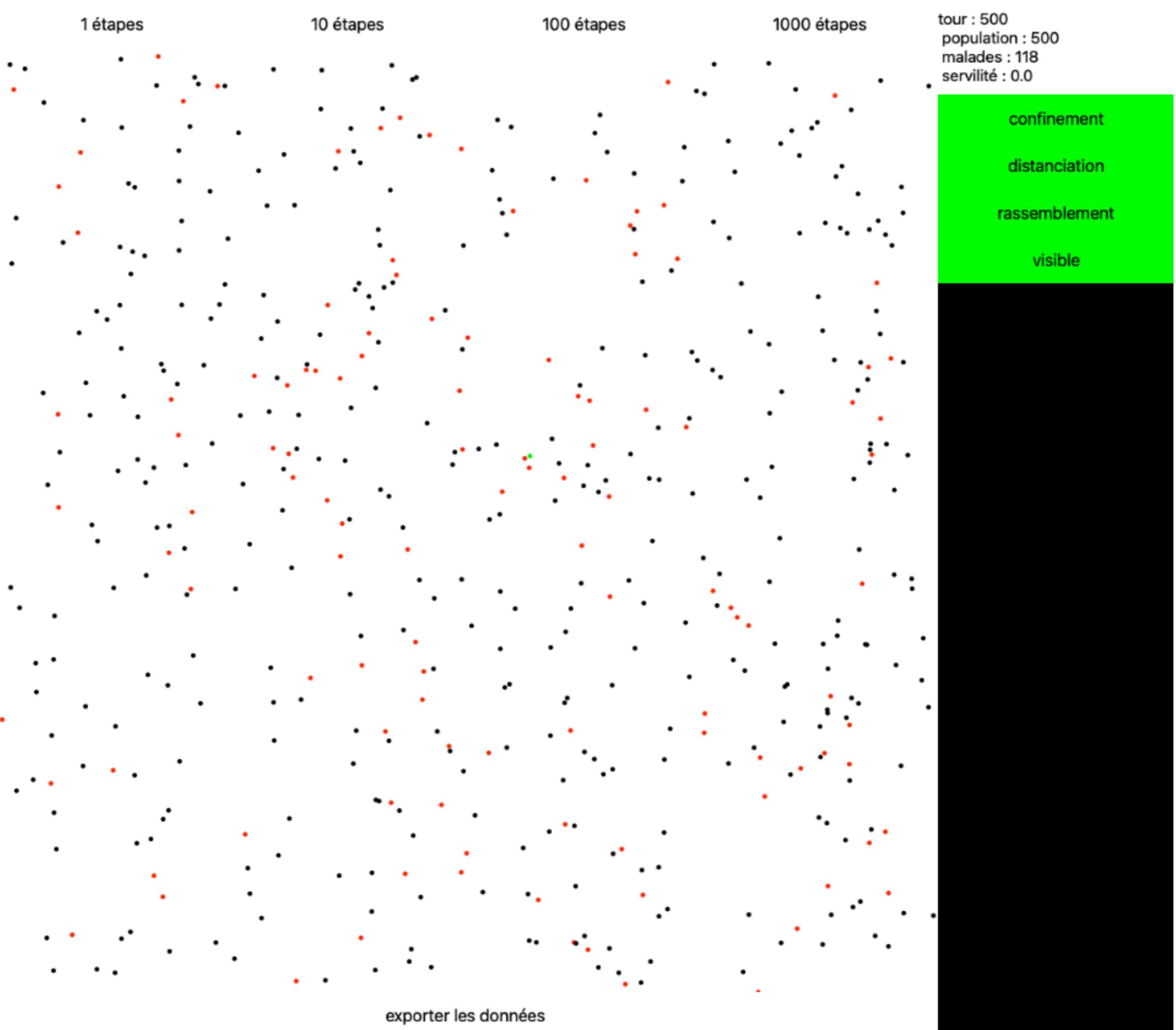
100 étapes

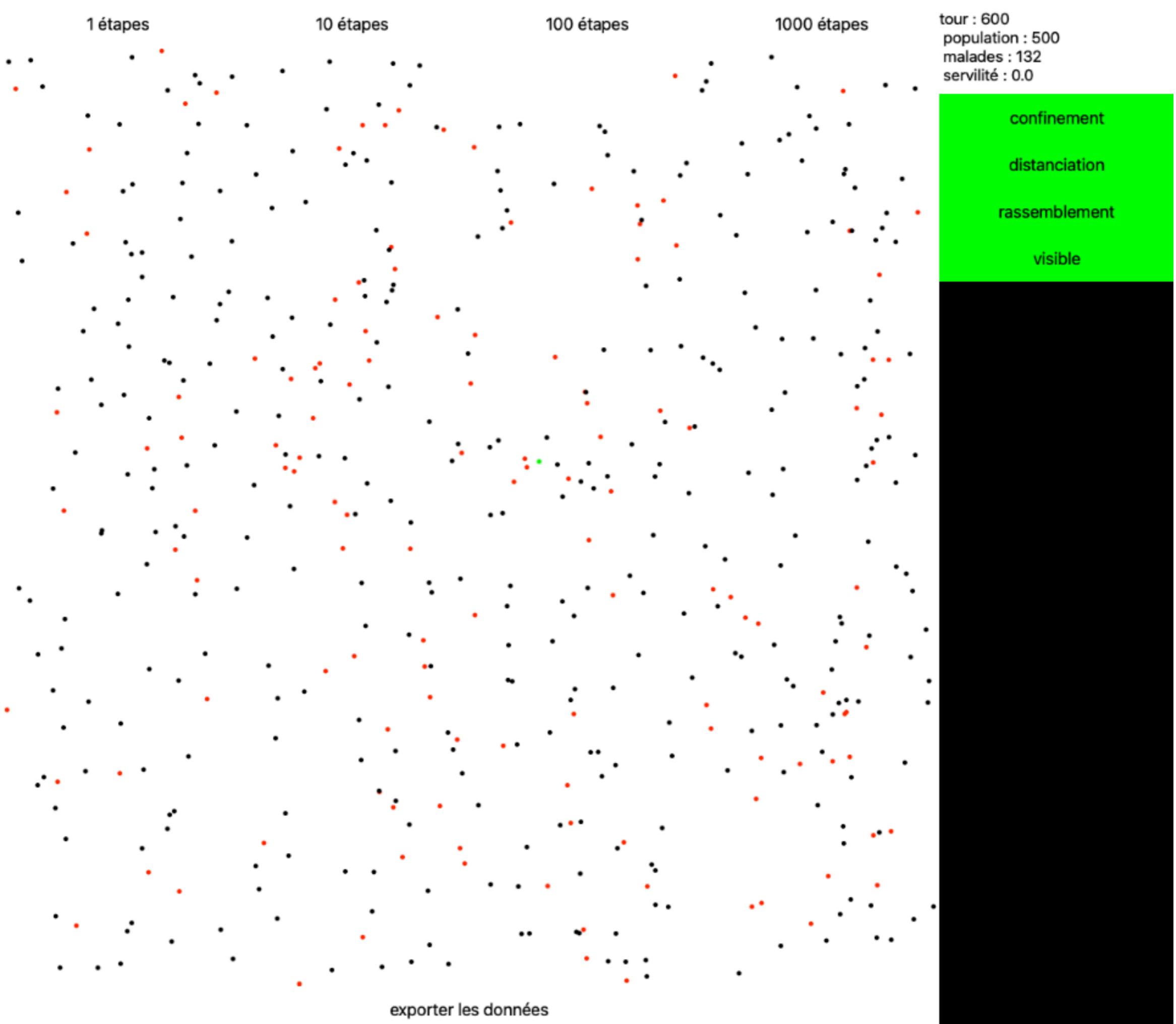
1000 étapes

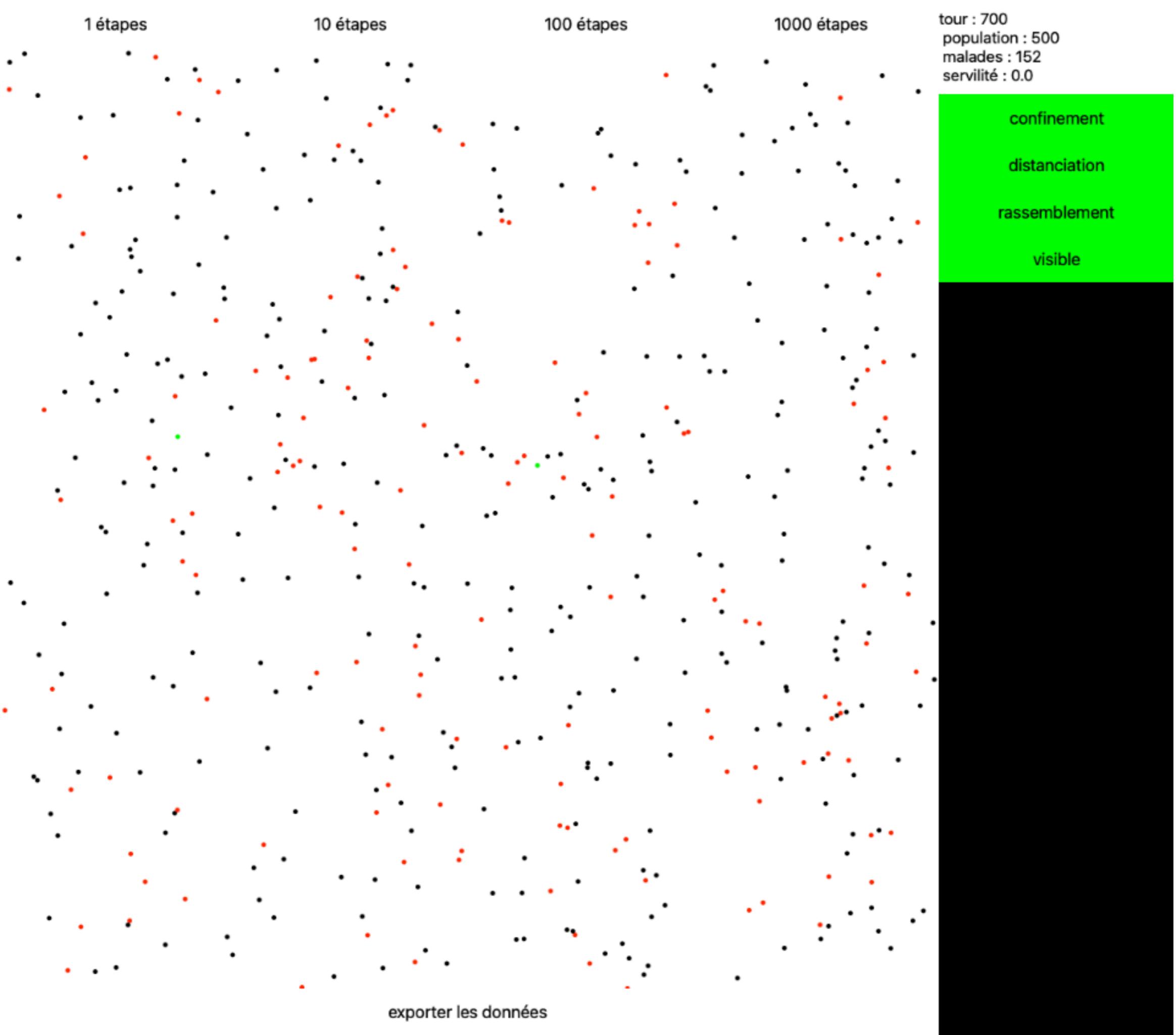
tour : 400
population : 500
malades : 98
servilité : 0.0

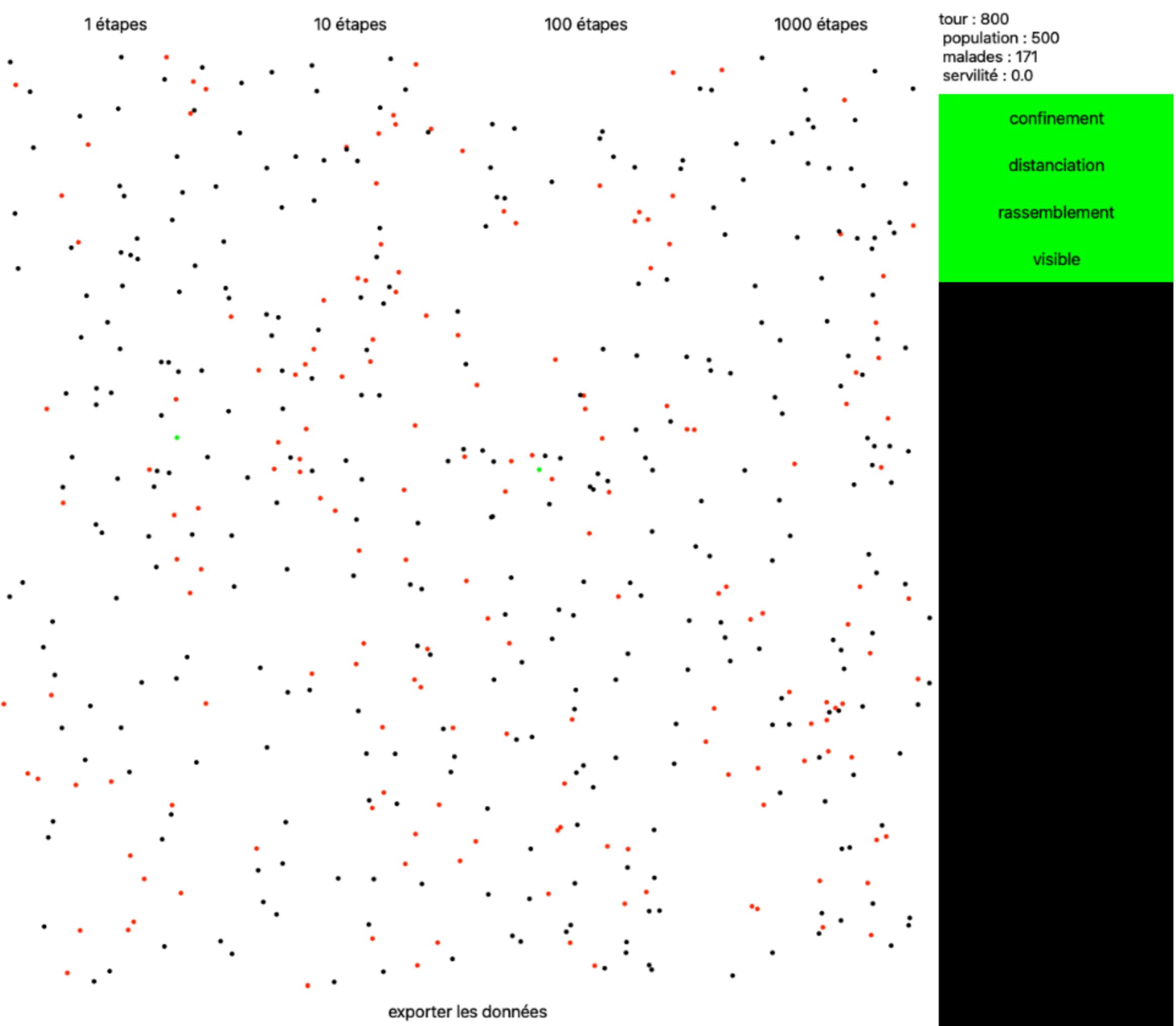
confinement
distanciation
rassemblement
visible

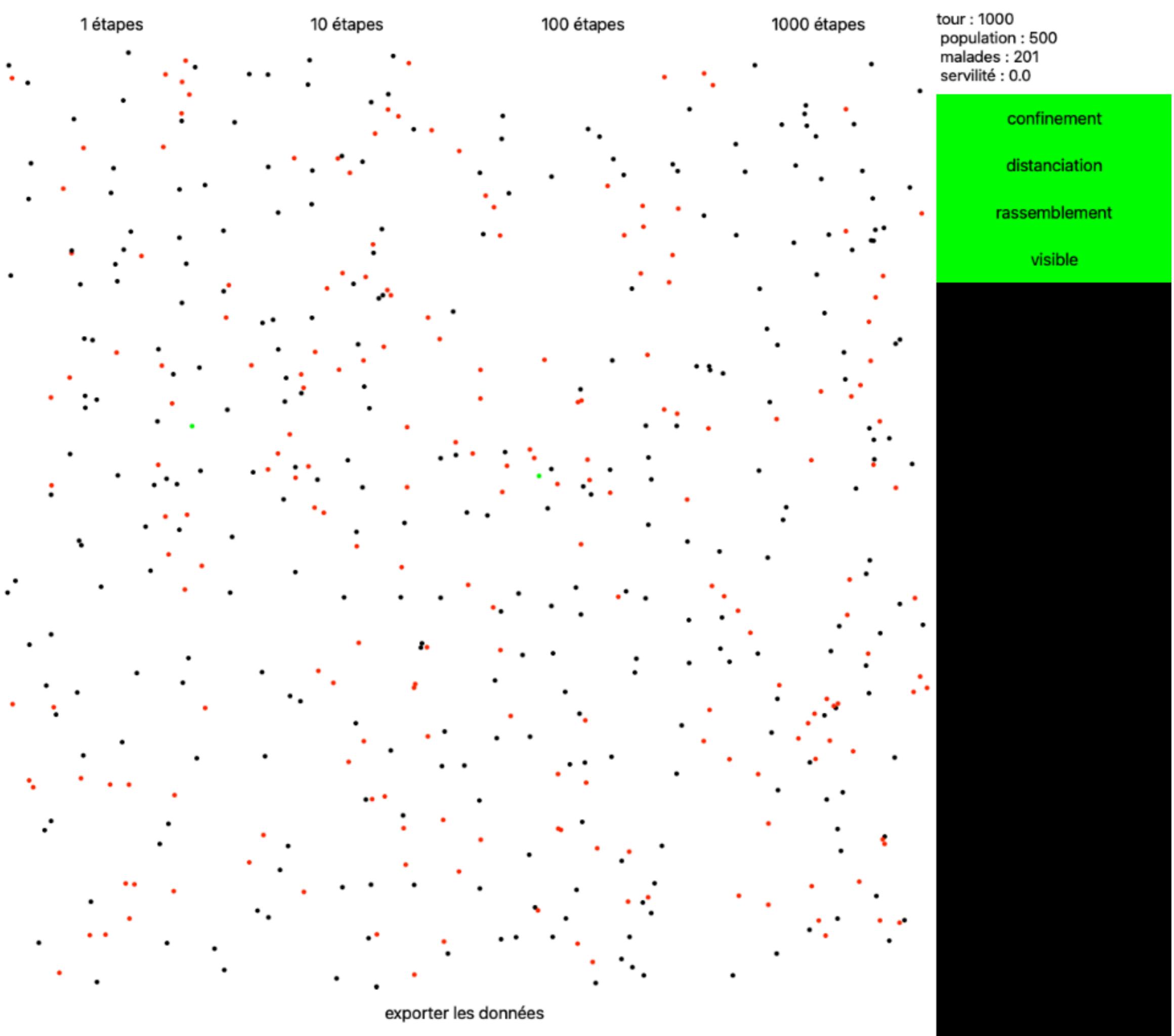
exporter les données

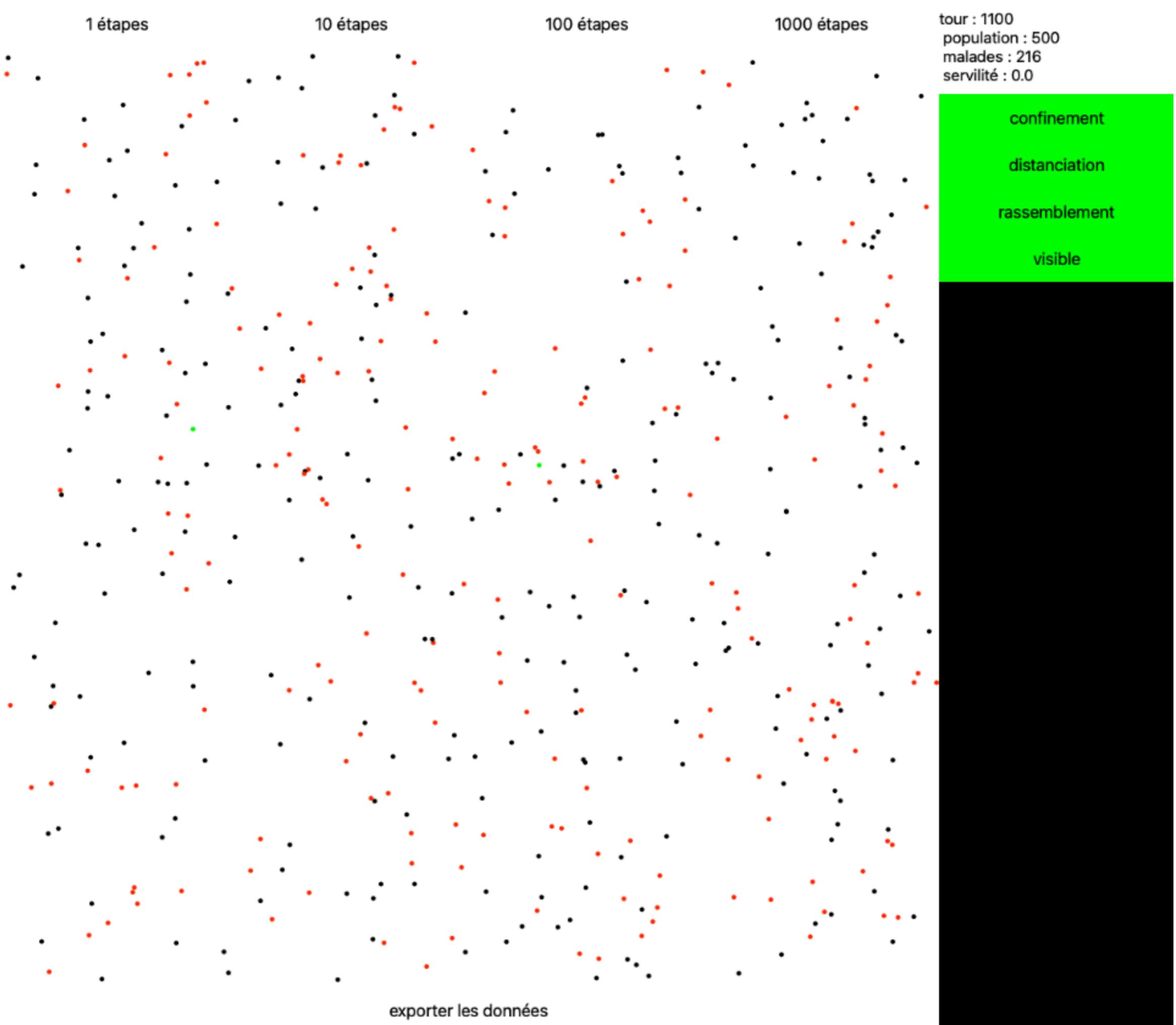


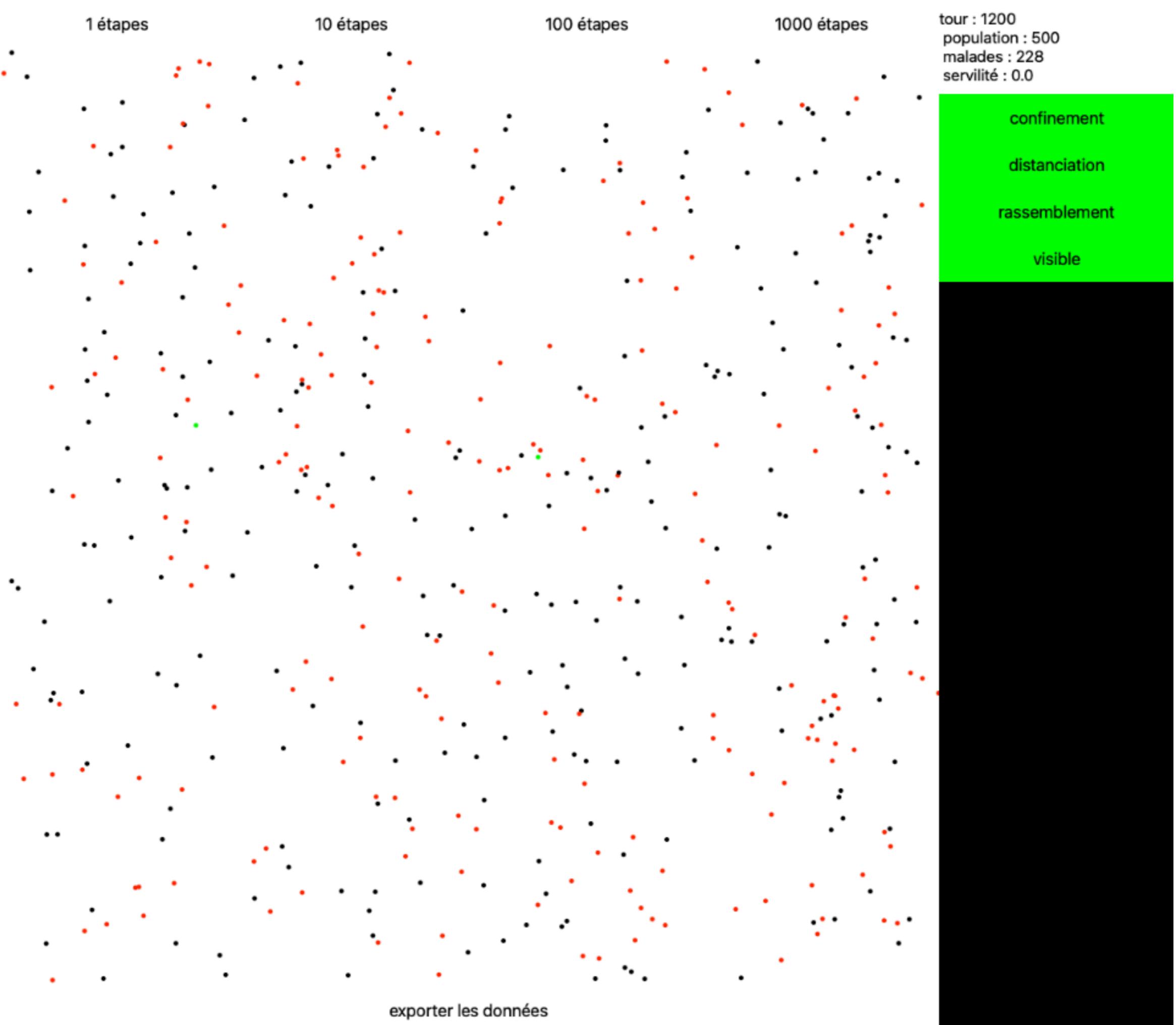


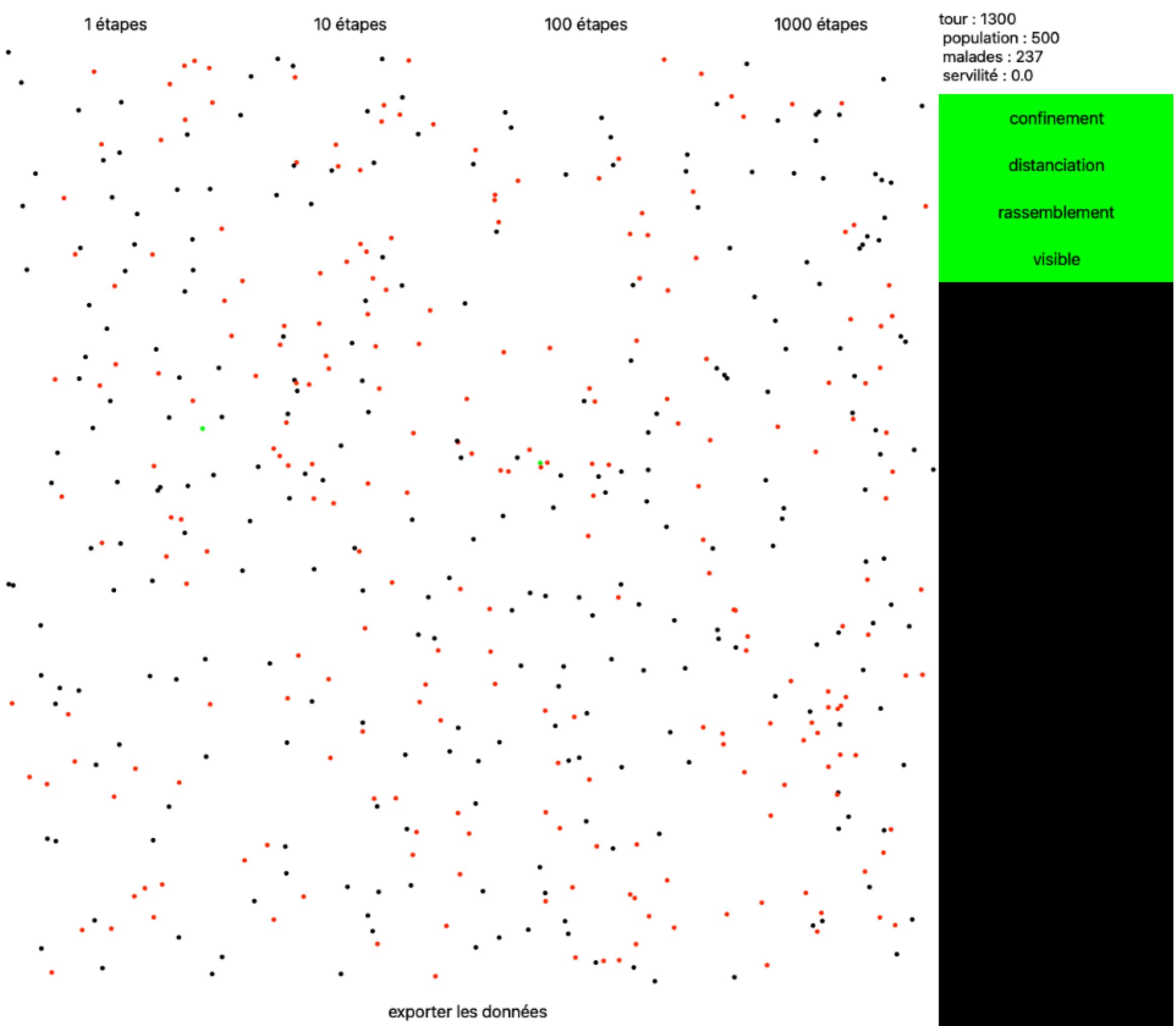


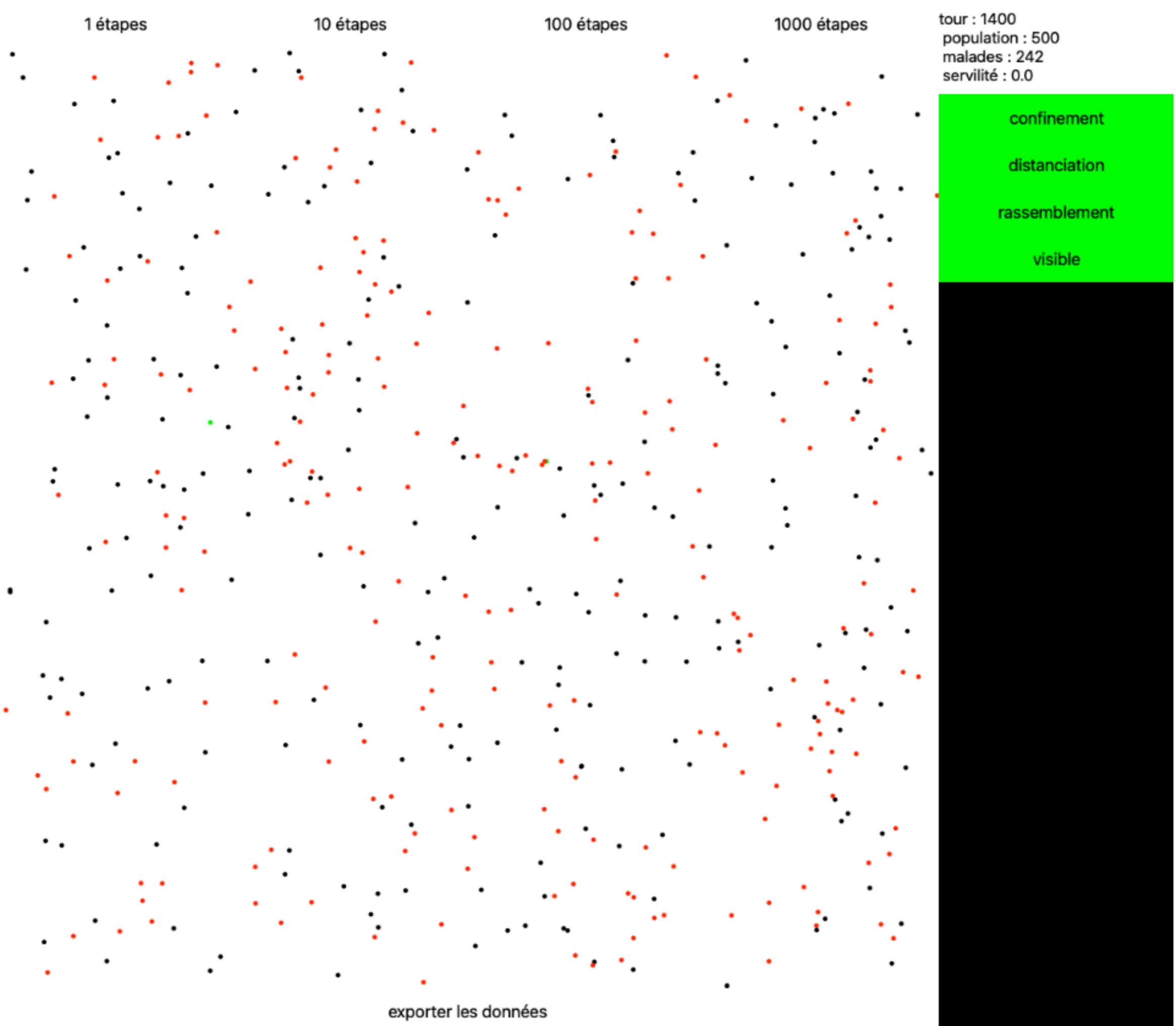












1 étapes

10 étapes

100 étapes

1000 étapes

tour : 1500
population : 500
malades : 254
servilité : 0.0



exporter les données

1 étapes

10 étapes

100 étapes

1000 étapes

tour : 1600
population : 500
malades : 264
servilité : 0.0



exporter les données

1 étapes

10 étapes

100 étapes

1000 étapes

tour : 1700
population : 500
malades : 273
servilité : 0.0



exporter les données

1 étapes

10 étapes

100 étapes

1000 étapes

tour : 1800
population : 500
malades : 281
servilité : 0.0



exporter les données

1 étapes

10 étapes

100 étapes

1000 étapes

tour : 1900
population : 500
malades : 286
servilité : 0.0



exporter les données

1 étapes

10 étapes

100 étapes

1000 étapes

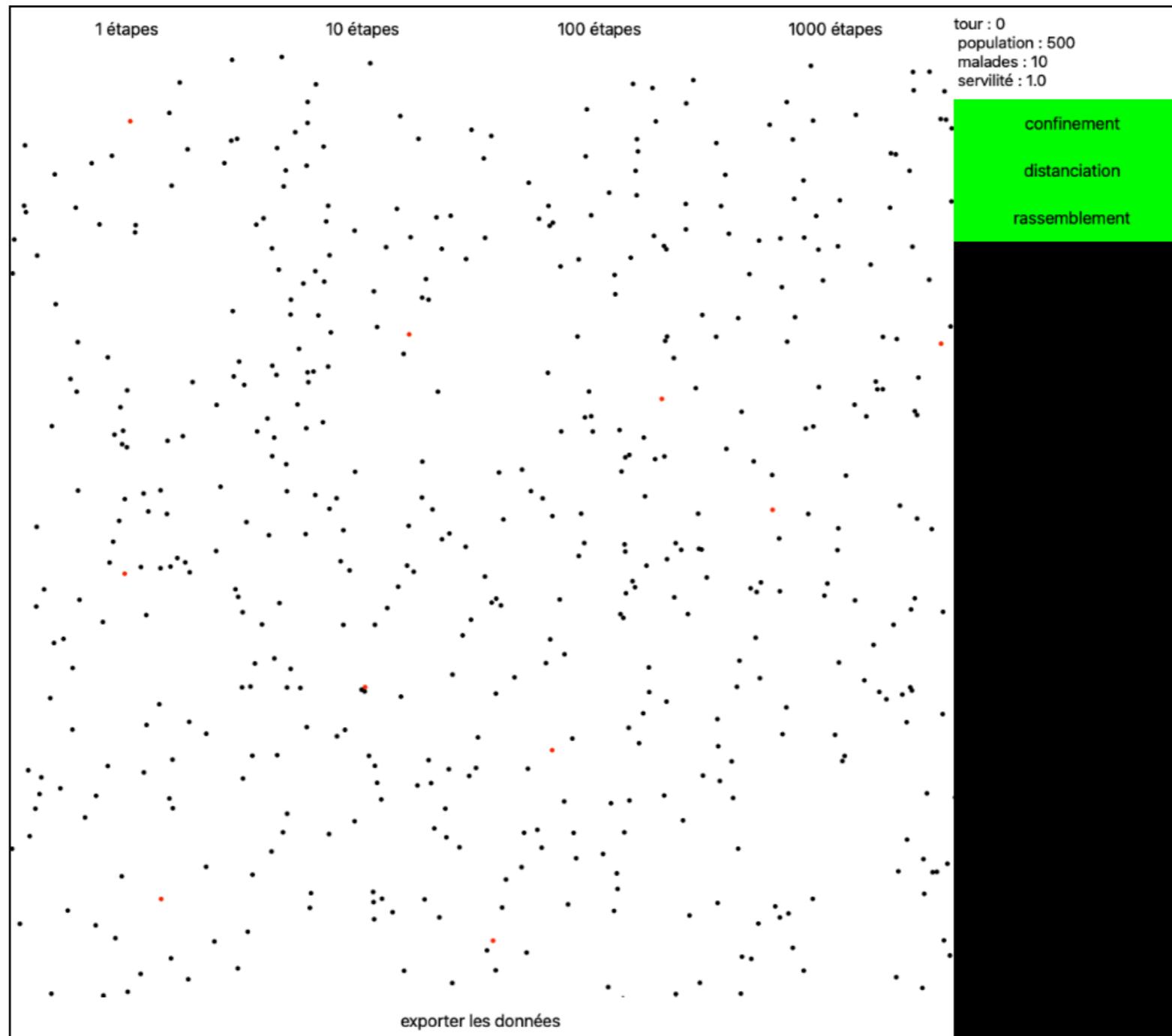
tour : 2000
population : 500
malades : 297
servilité : 0.0



exporter les données

Caractérisation des mesures de préventions

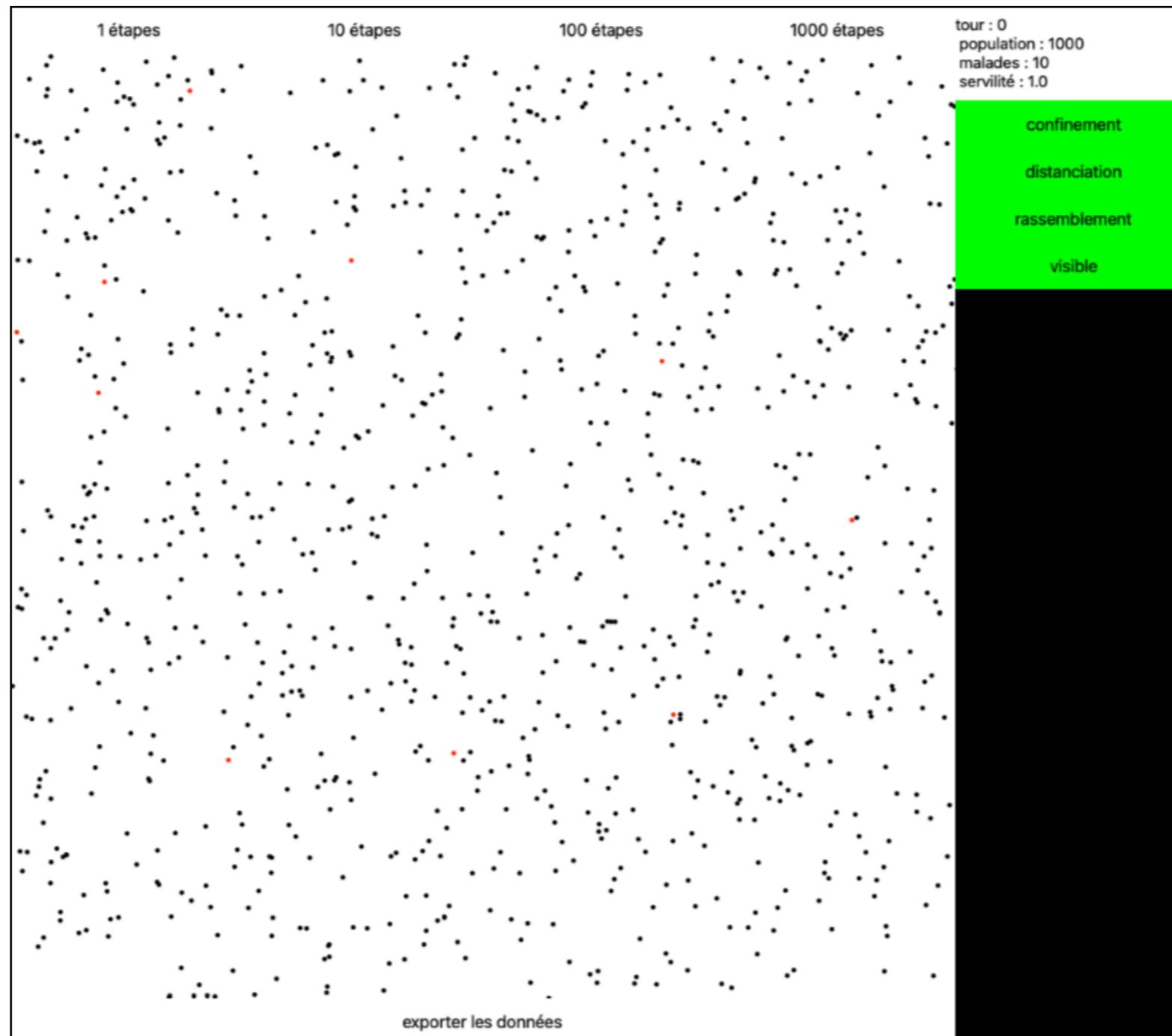
Densité et obéissance civile



Rapegno Virgile - n° 2879

Caractérisation des mesures de préventions

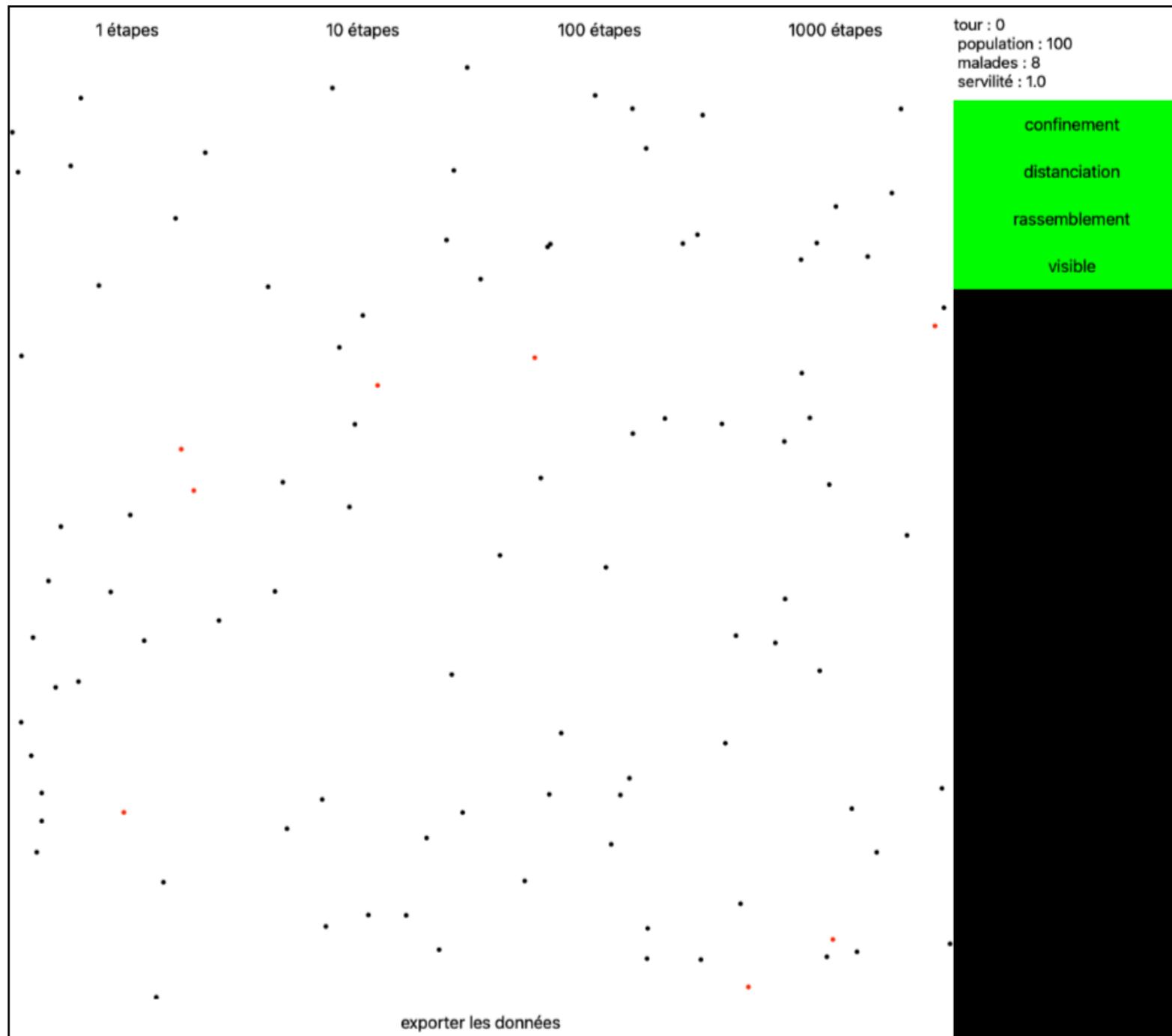
Densité et obéissance civile



Rapegno Virgile - n° 2879

Caractérisation des mesures de préventions

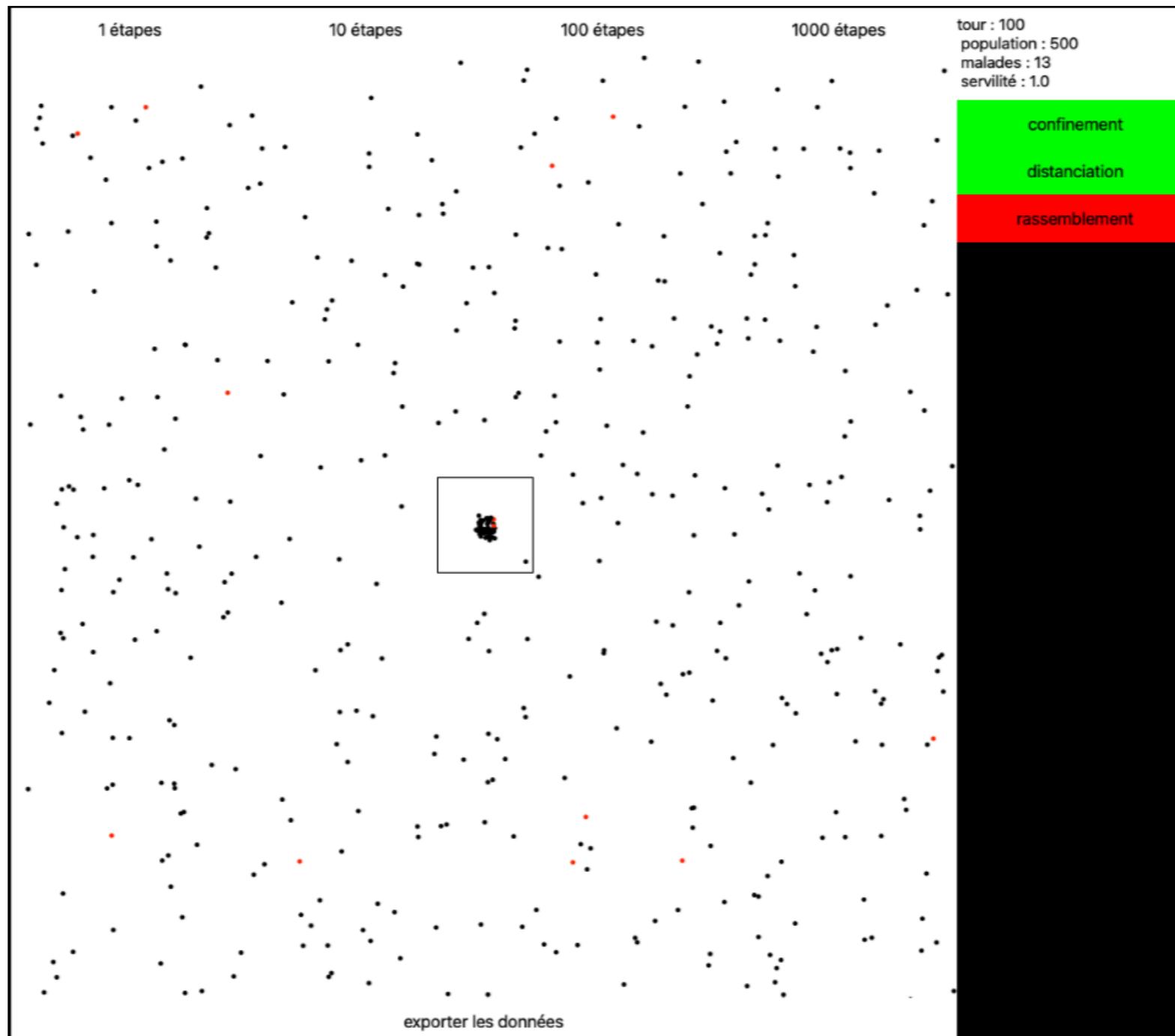
Densité et obéissance civile



Rapegno Virgile - n° 2879

Caractérisation des mesures de préventions

Lieu de rassemblement



Rapegno Virgile - n° 2879

1 étapes

10 étapes

100 étapes

1000 étapes

tour : 0
population : 200
malades : 9
servilité : 0.0

confinement

distanciation

rassemblement

visible

exporter les données

1 étapes

10 étapes

100 étapes

1000 étapes

tour : 10
population : 200
malades : 11
servilité : 0.0



exporter les données

1 étapes

10 étapes

100 étapes

1000 étapes

tour : 20
population : 200
malades : 11
servilité : 0.0



[exporter les données](#)

1 étapes

10 étapes

100 étapes

1000 étapes

tour : 30
population : 200
malades : 12
servilité : 0.0



exporter les données

1 étapes

10 étapes

100 étapes

1000 étapes

tour : 40
population : 200
malades : 12
servilité : 0.0



exporter les données

1 étapes

10 étapes

100 étapes

1000 étapes

tour : 50
population : 200
malades : 12
servilité : 0.0



exporter les données

1 étapes

10 étapes

100 étapes

1000 étapes

tour : 60
population : 200
malades : 12
servilité : 0.0



[exporter les données](#)

1 étapes

10 étapes

100 étapes

1000 étapes

tour : 70
population : 200
malades : 12
servilité : 0.0



exporter les données

1 étapes

10 étapes

100 étapes

1000 étapes

tour : 80
population : 200
malades : 17
servilité : 0.0



[exporter les données](#)

1 étapes

10 étapes

100 étapes

1000 étapes

tour : 90
population : 200
malades : 18
servilité : 0.0



exporter les données

1 étapes

10 étapes

100 étapes

1000 étapes

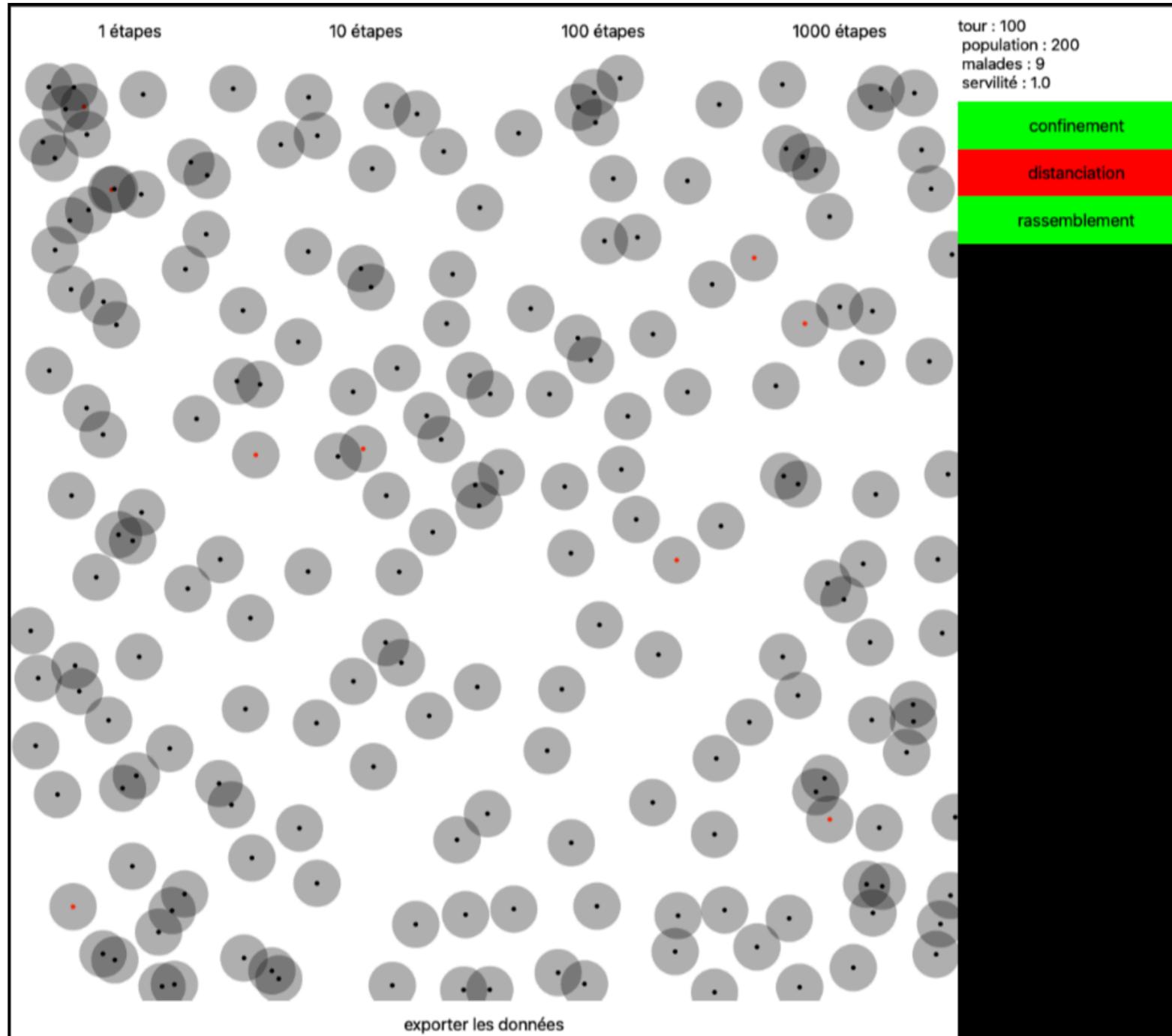
tour : 100
population : 200
malades : 22
servilité : 0.0



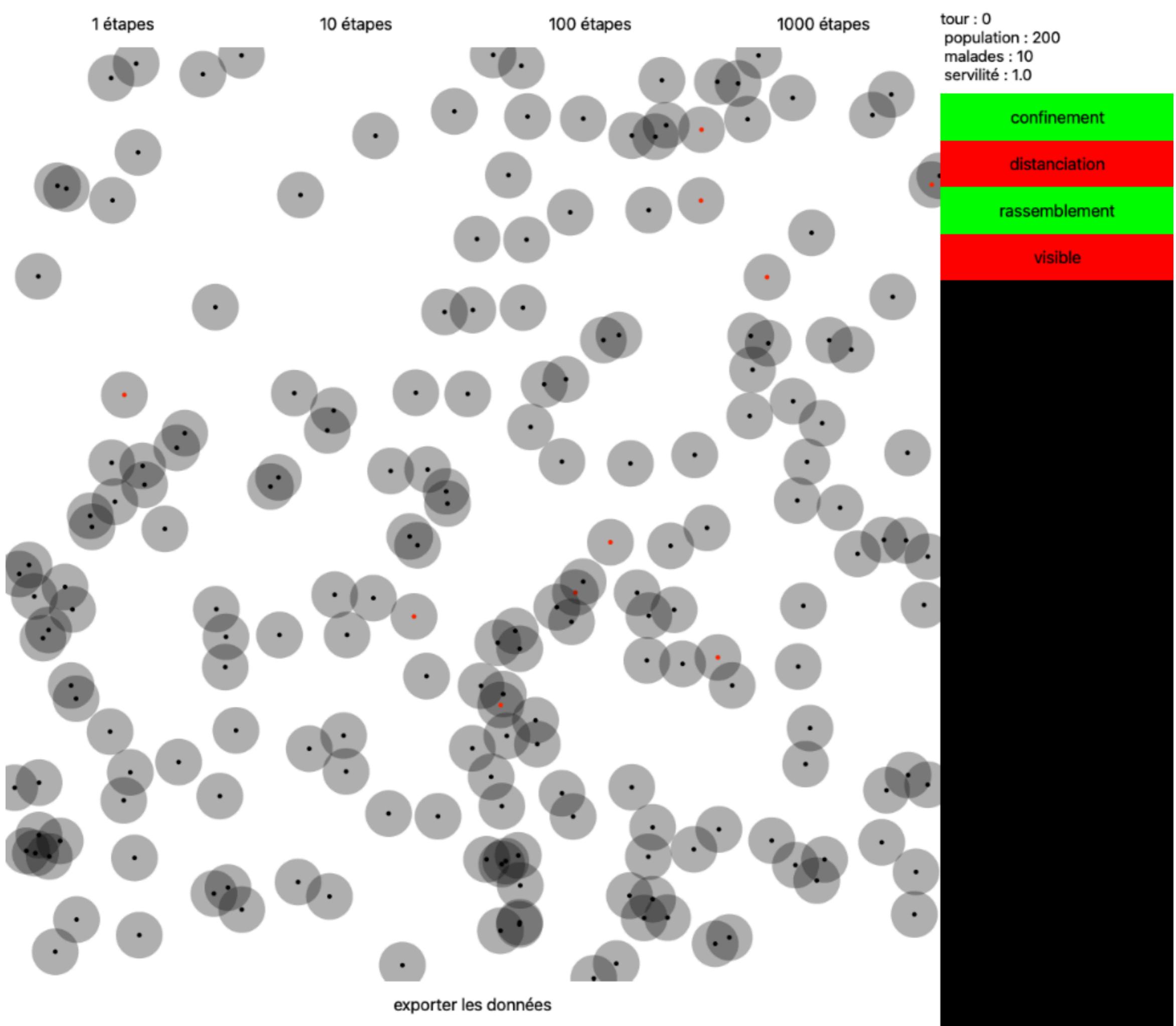
exporter les données

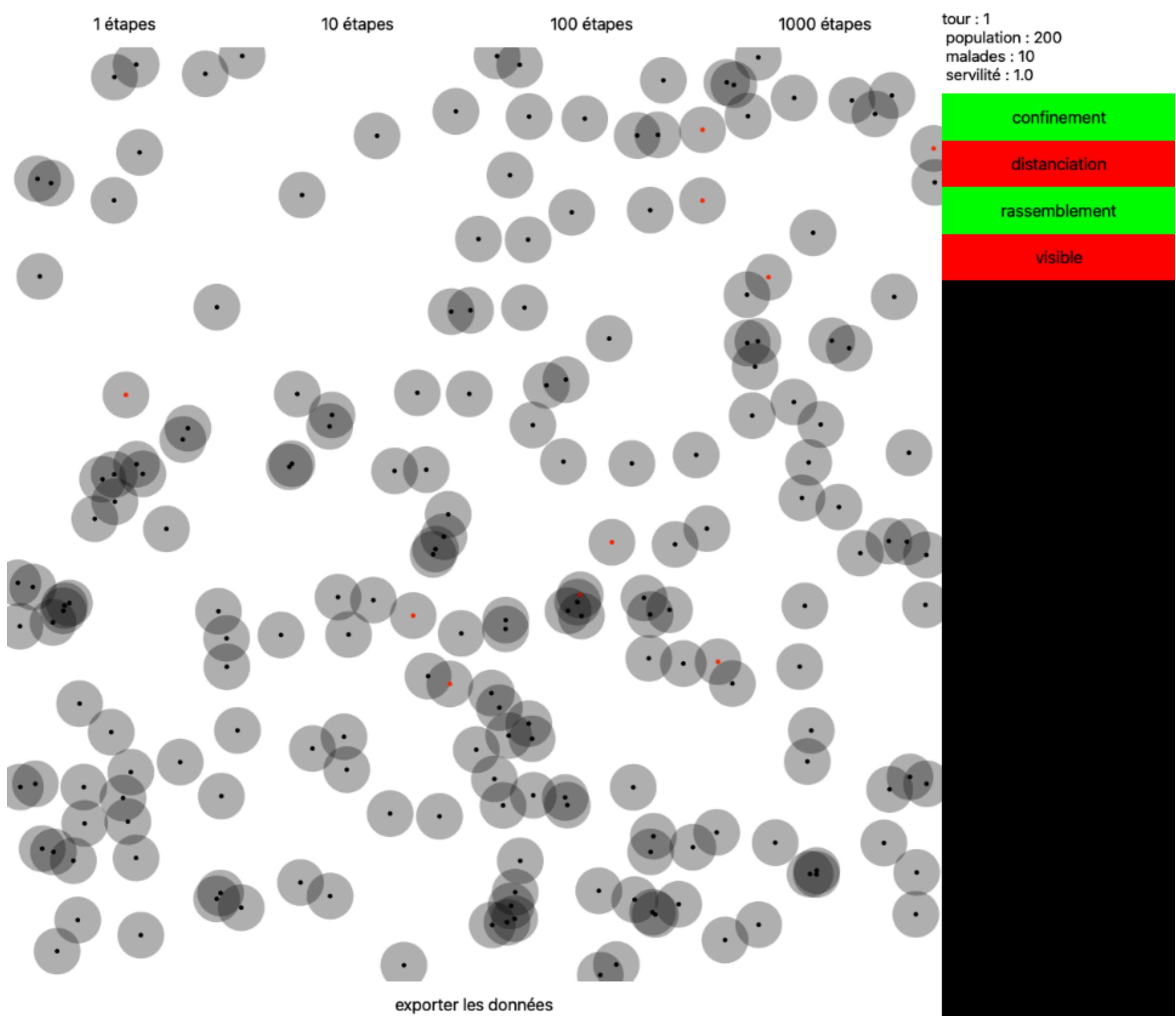
Caractérisation des mesures de préventions

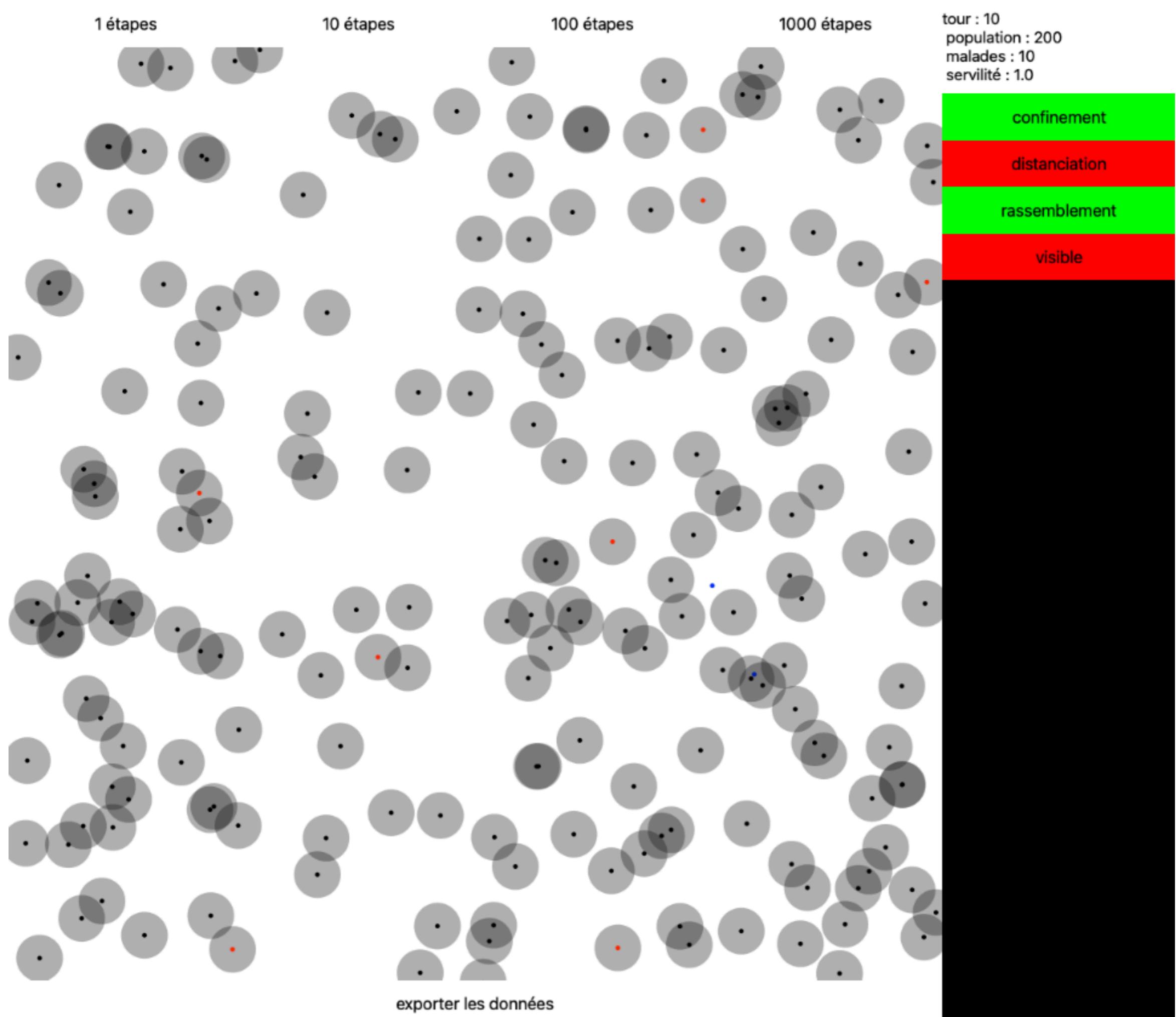
Répartition avec distanciation

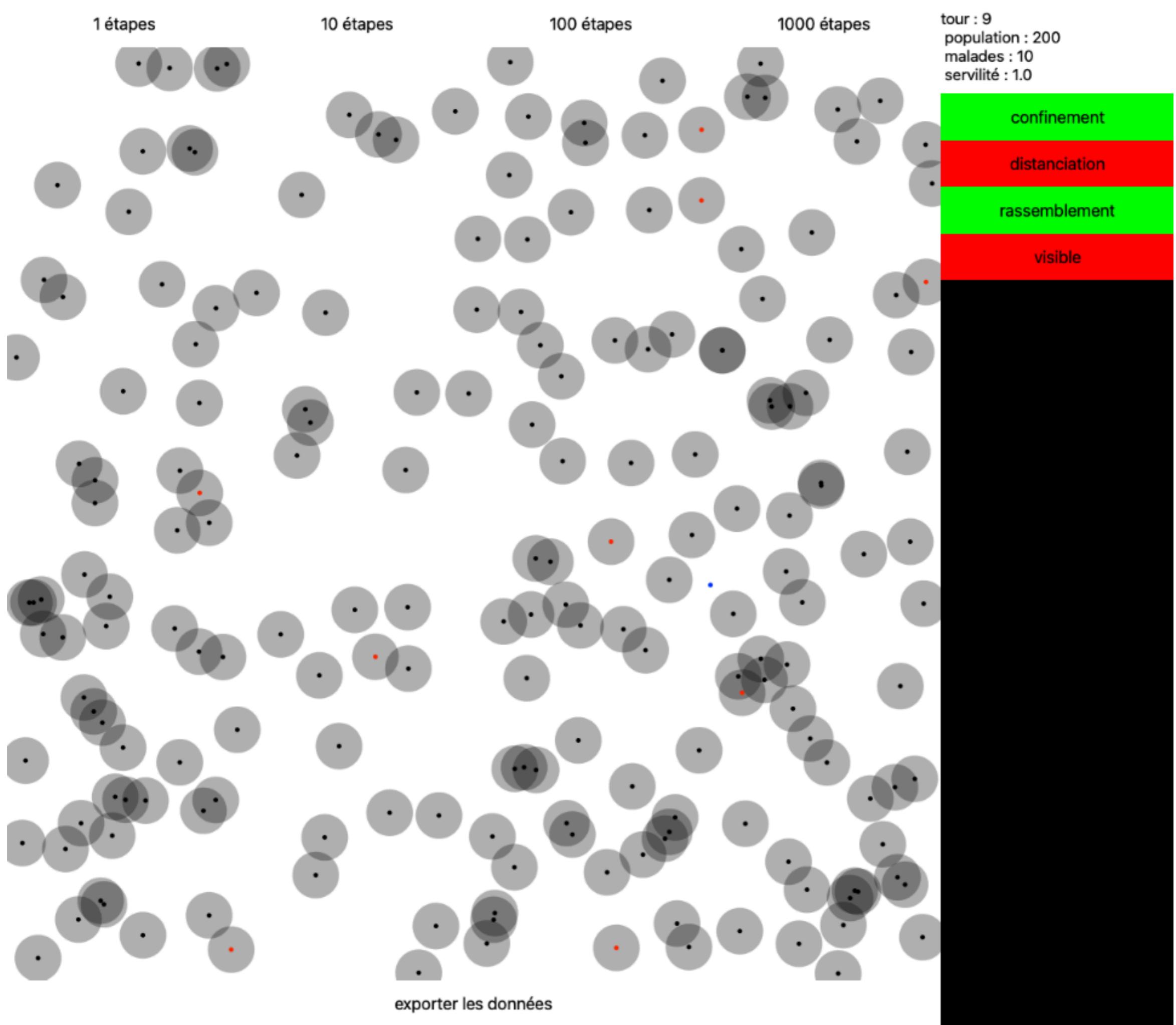


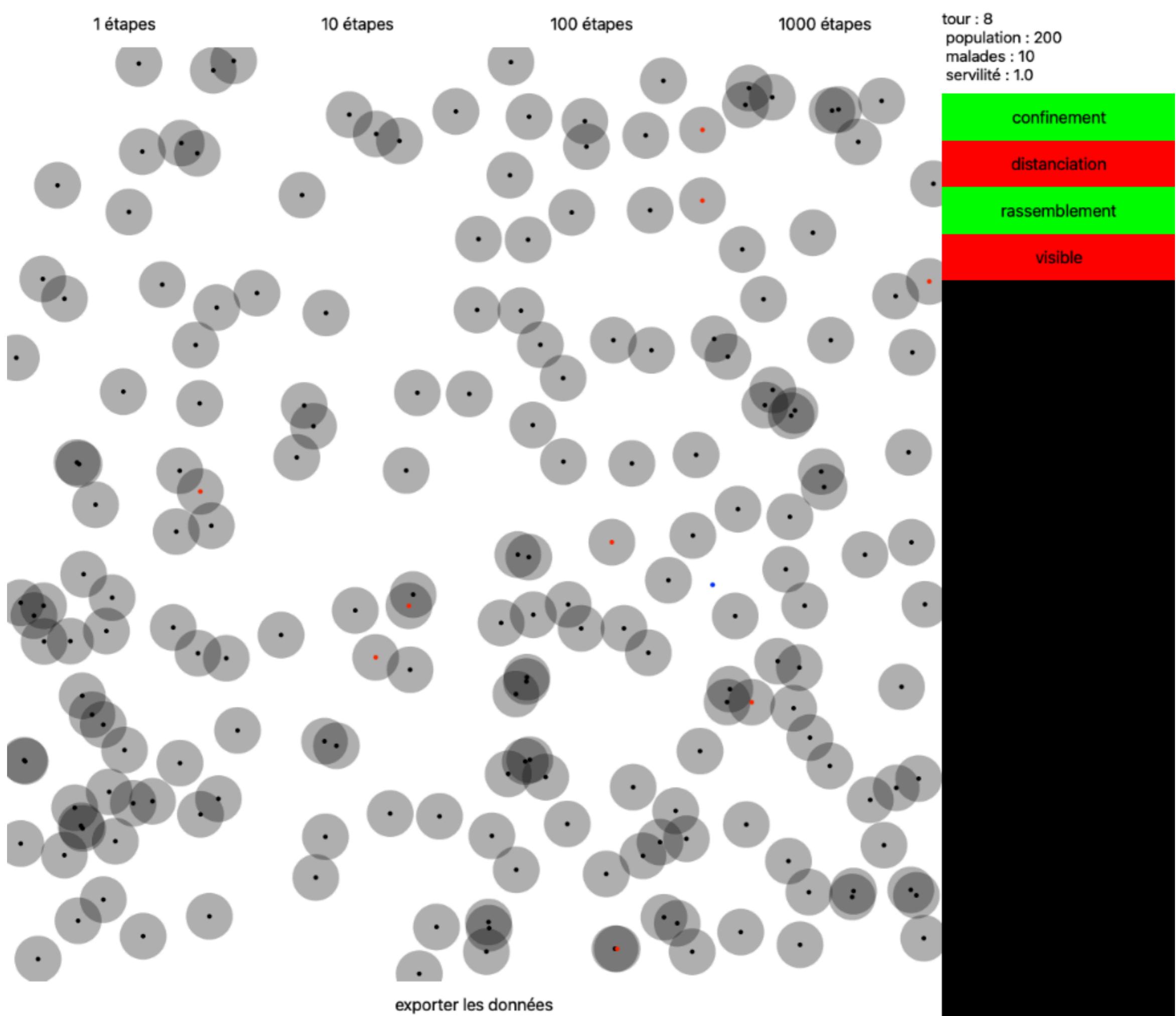
Rapegno Virgile - n° 2879

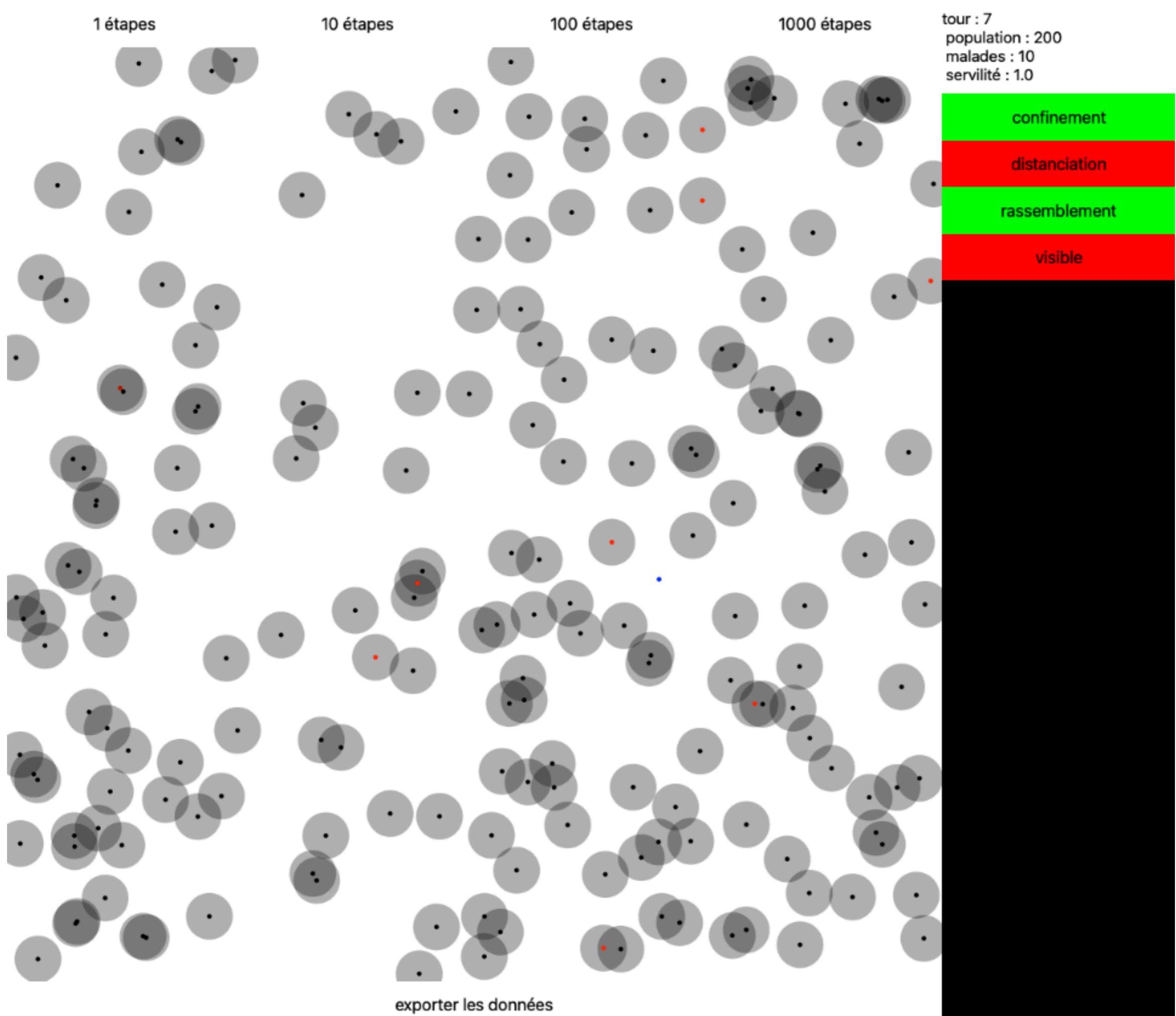


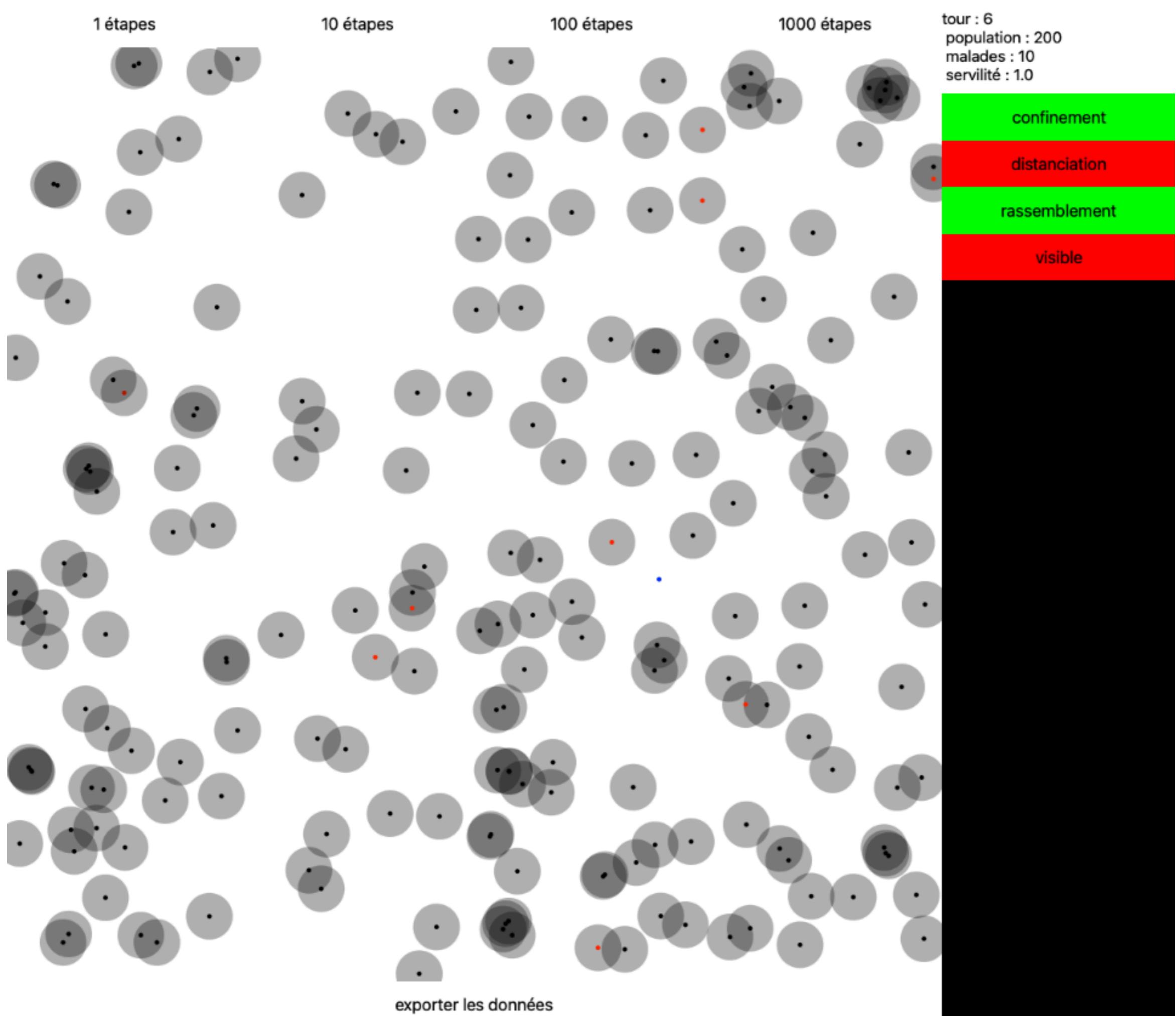


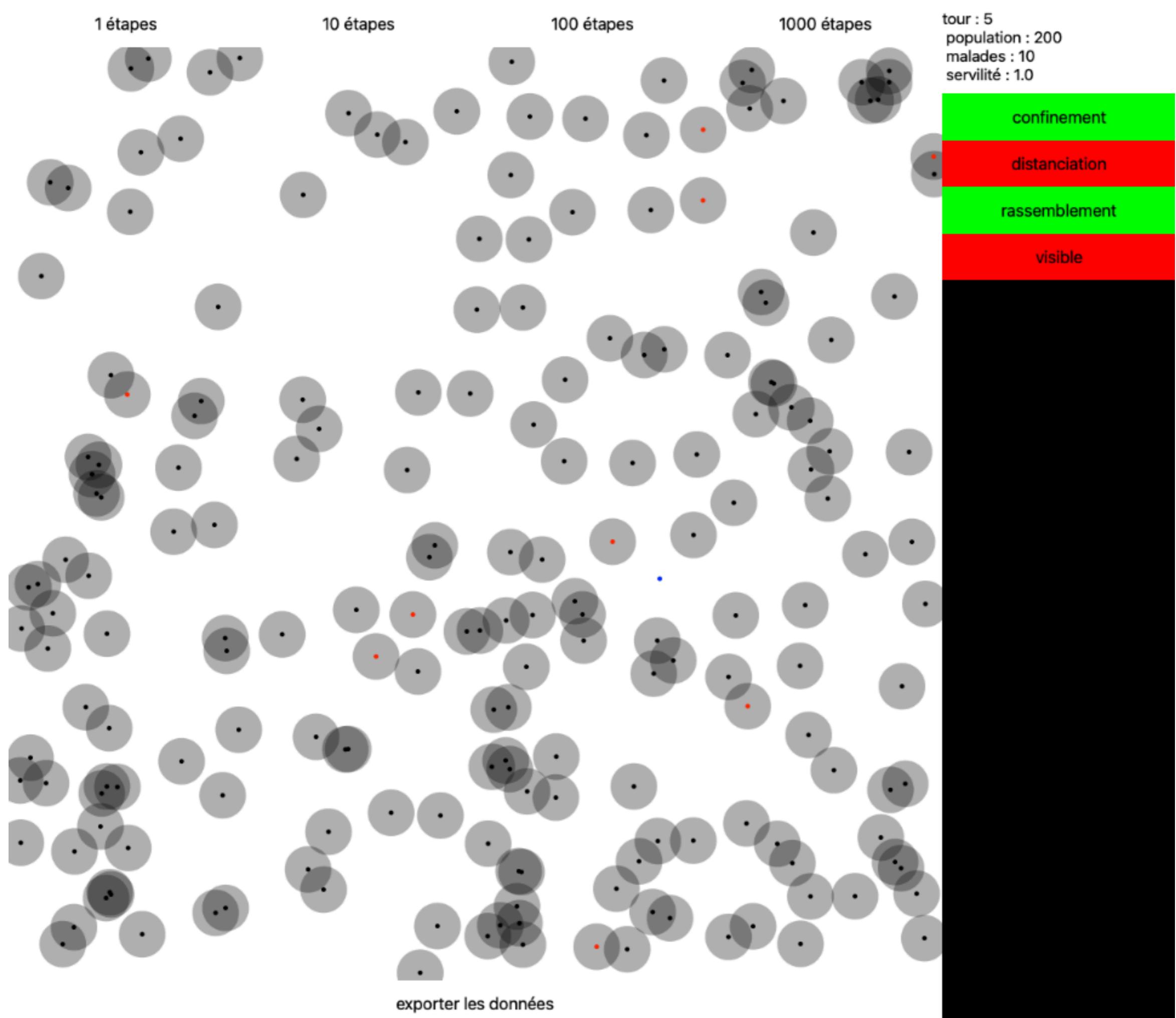


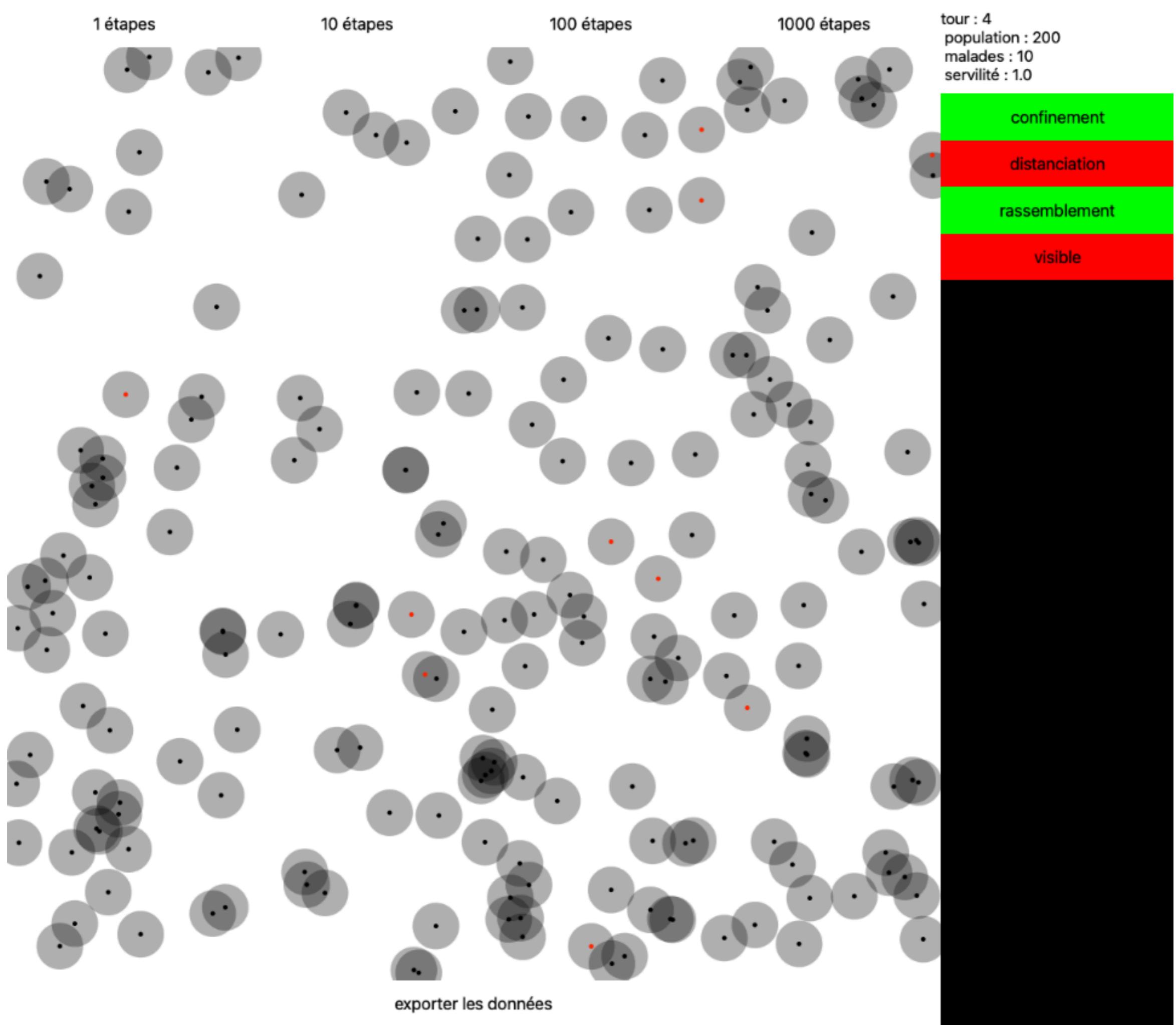


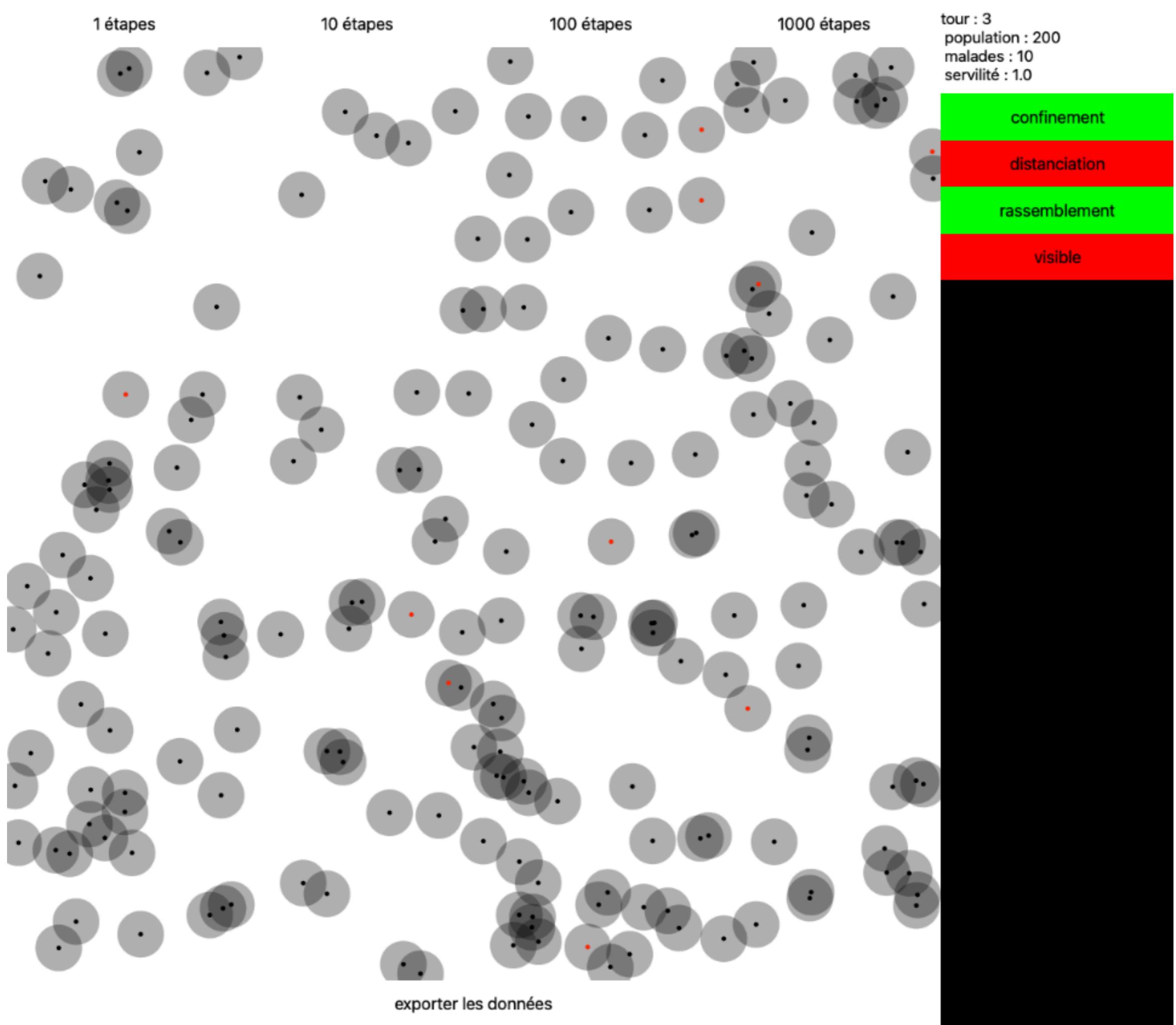


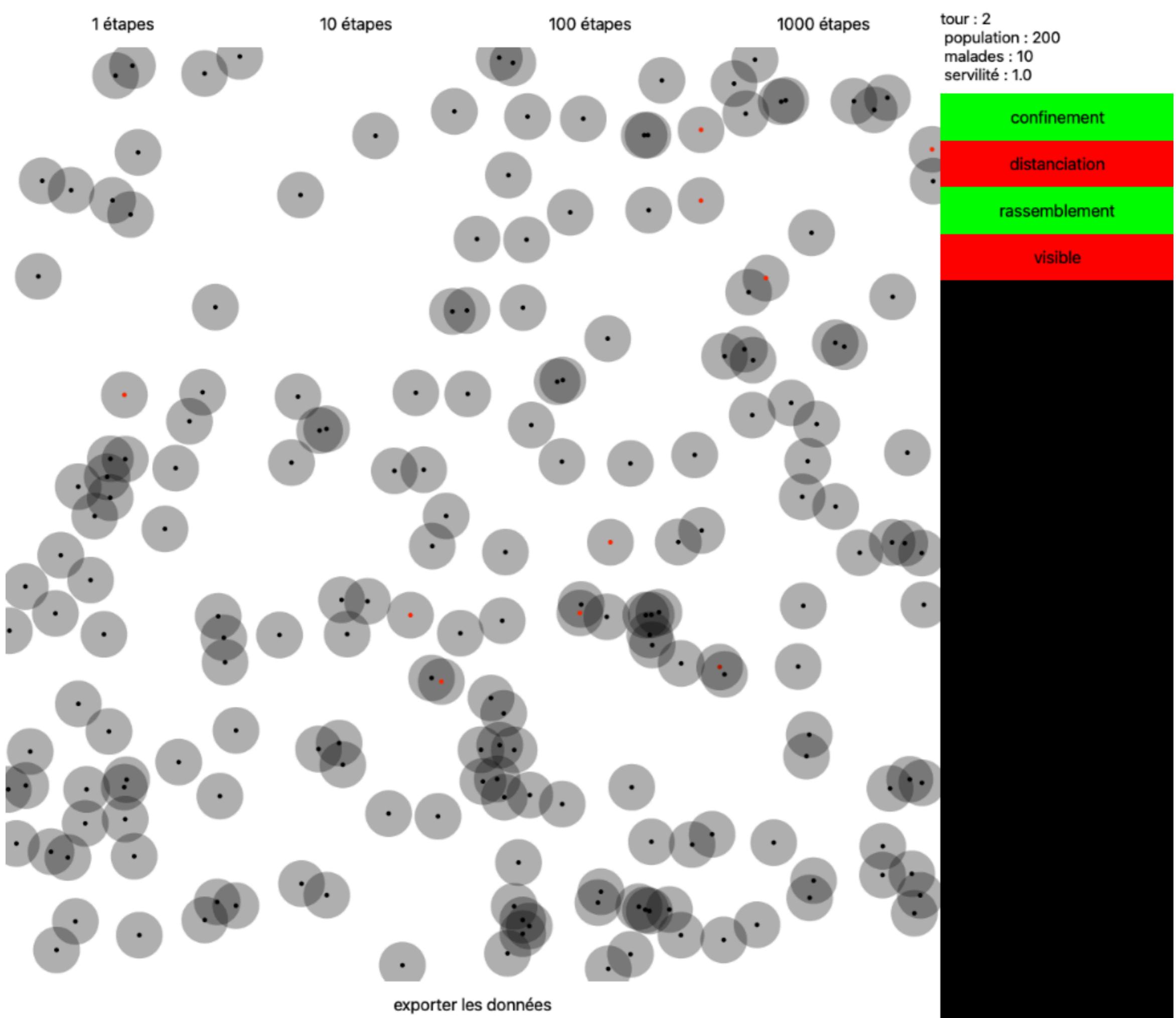


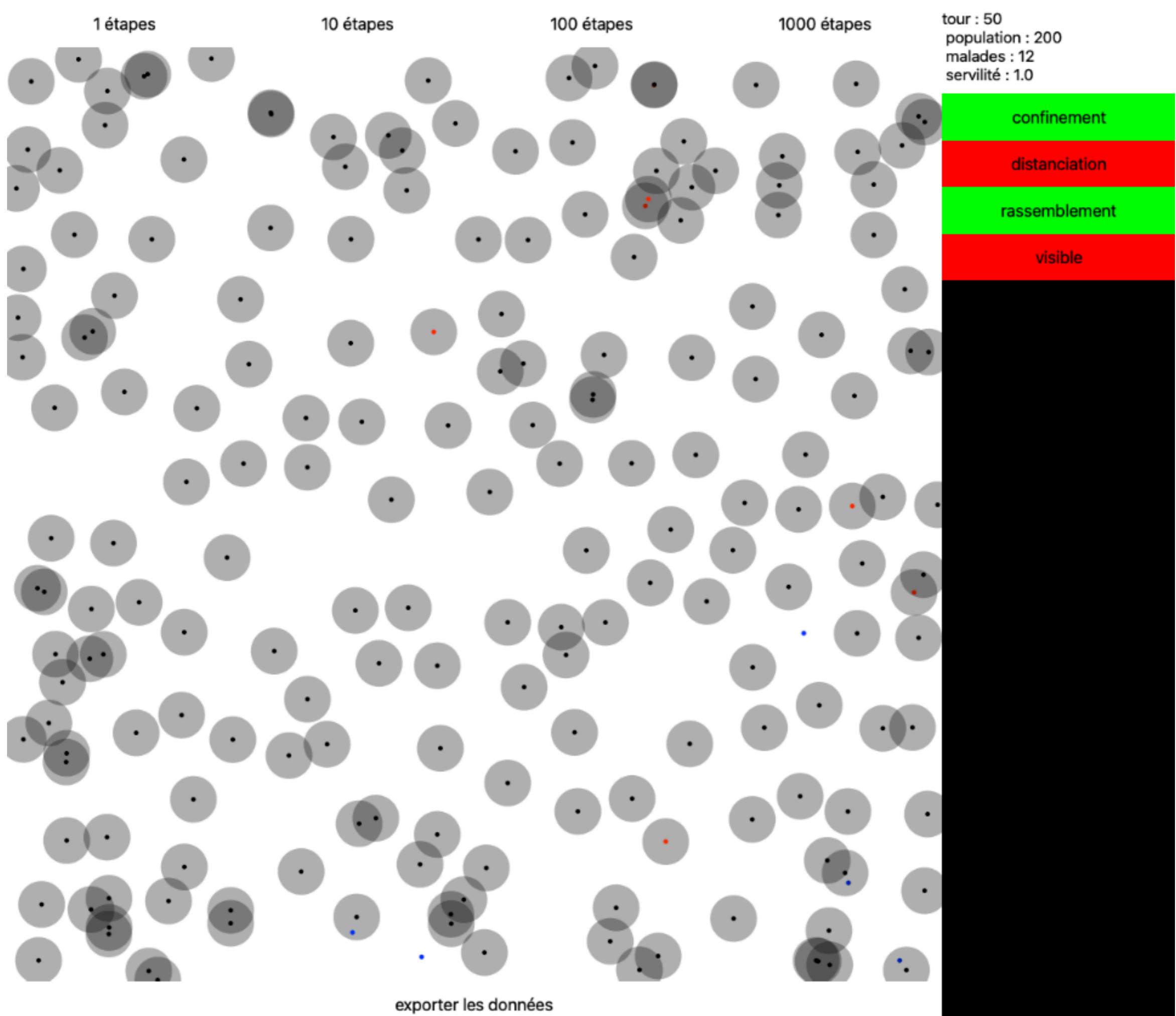






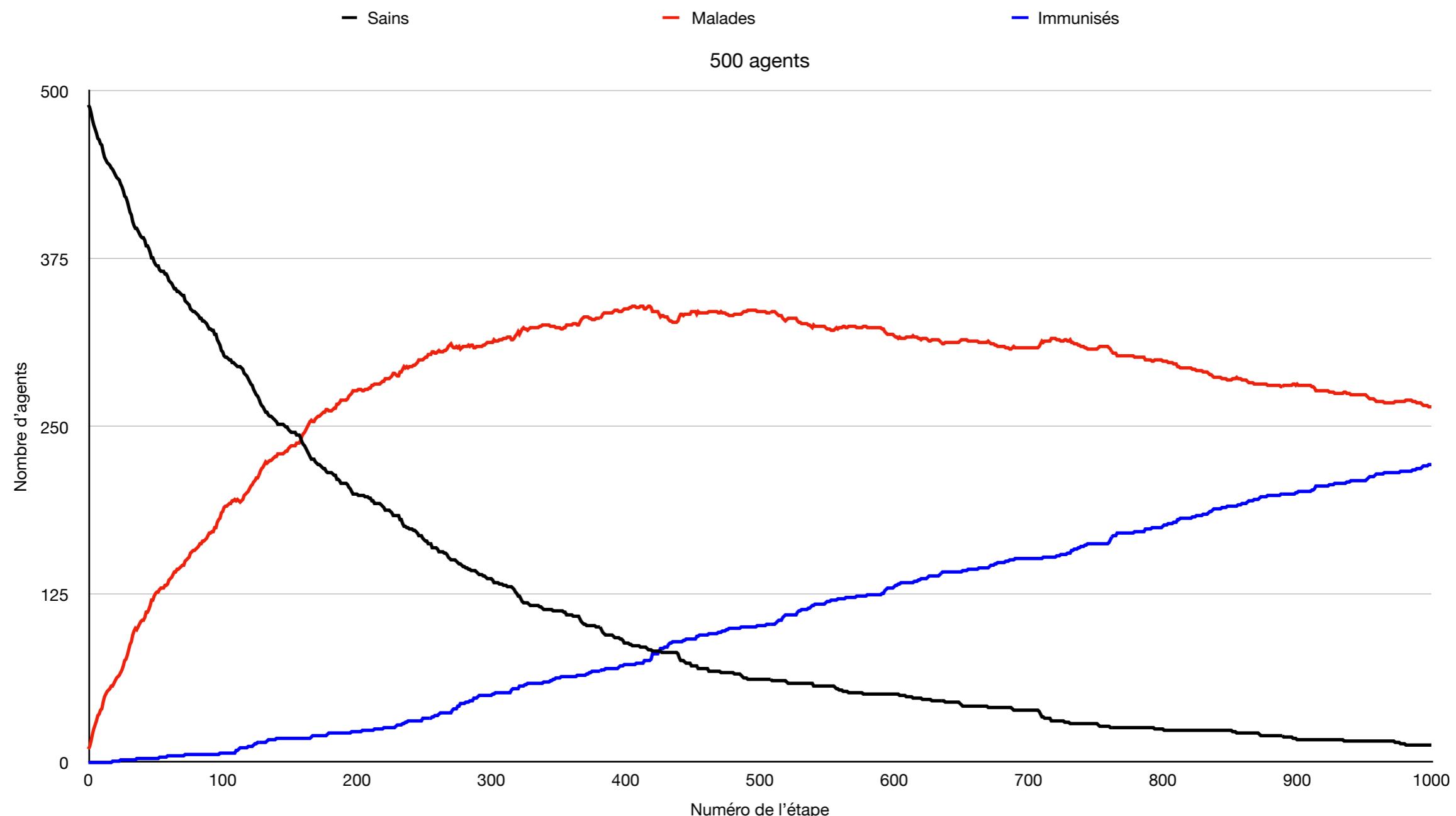






Comparaison des résultats

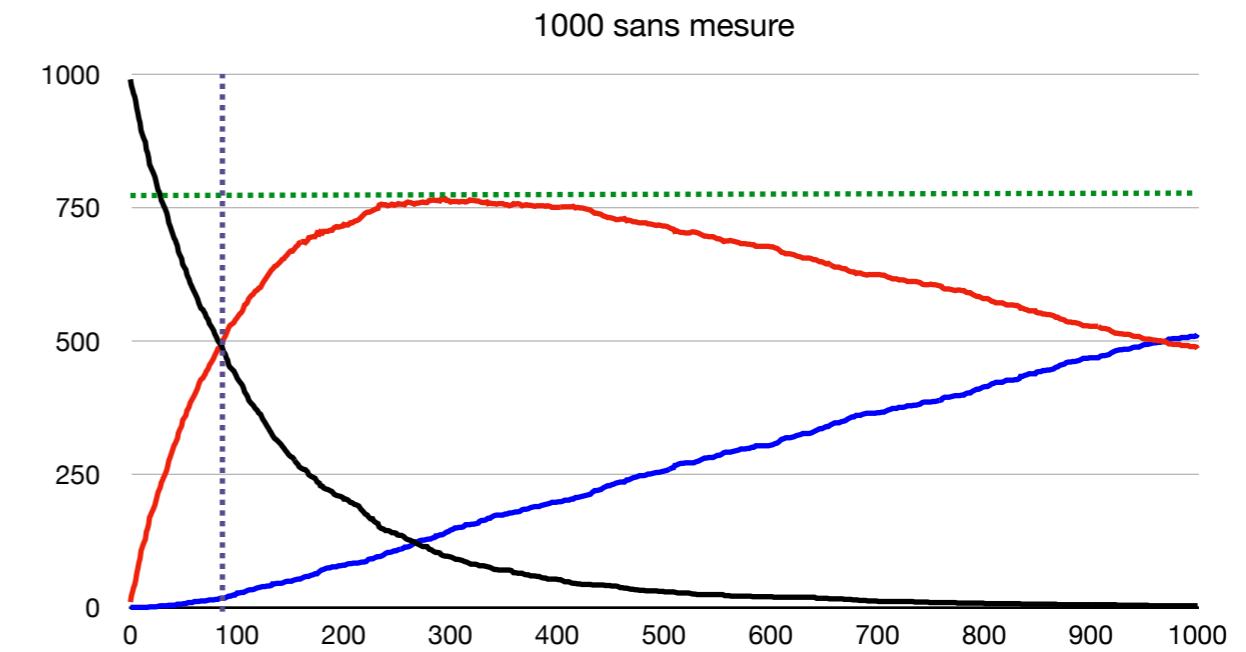
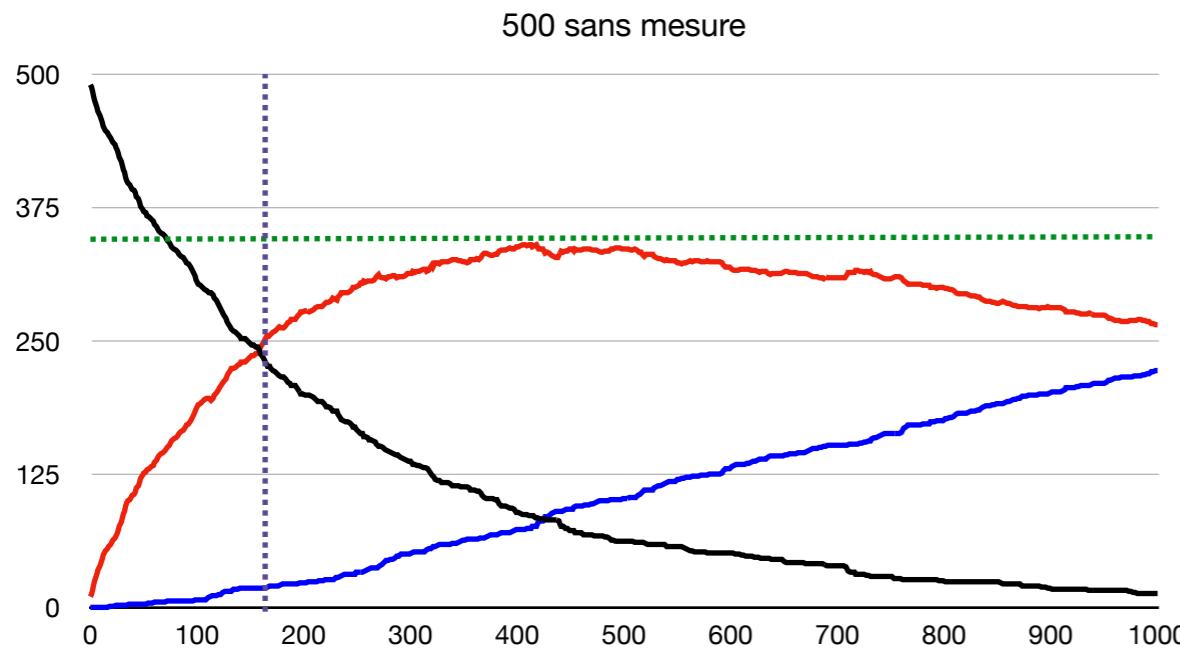
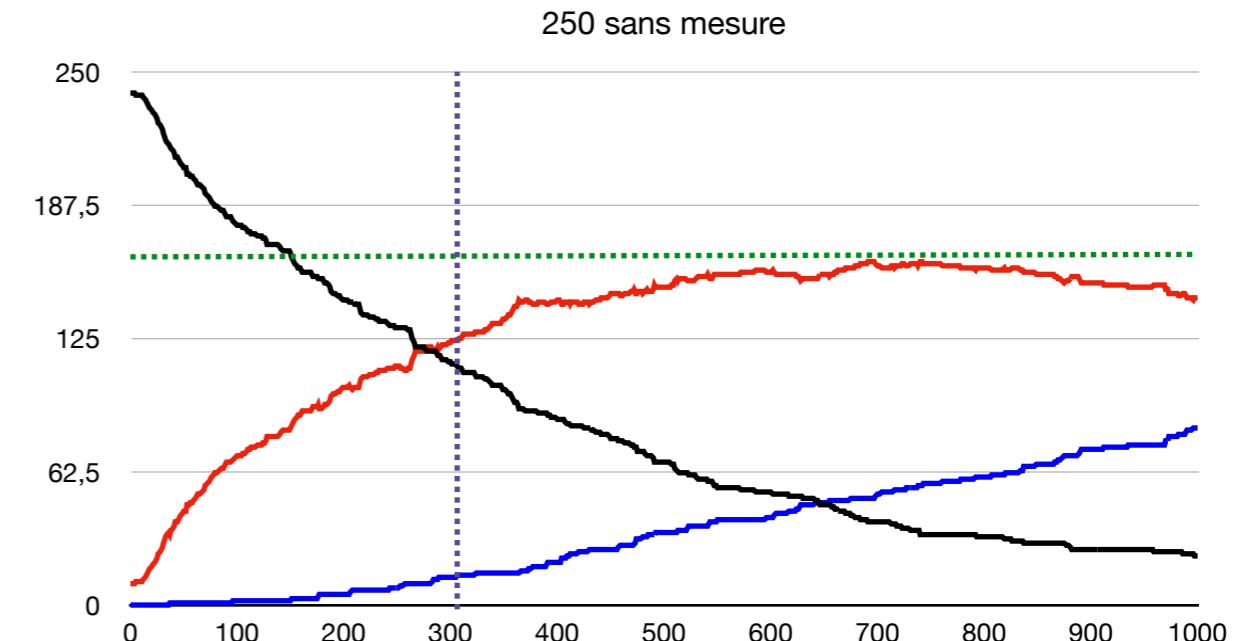
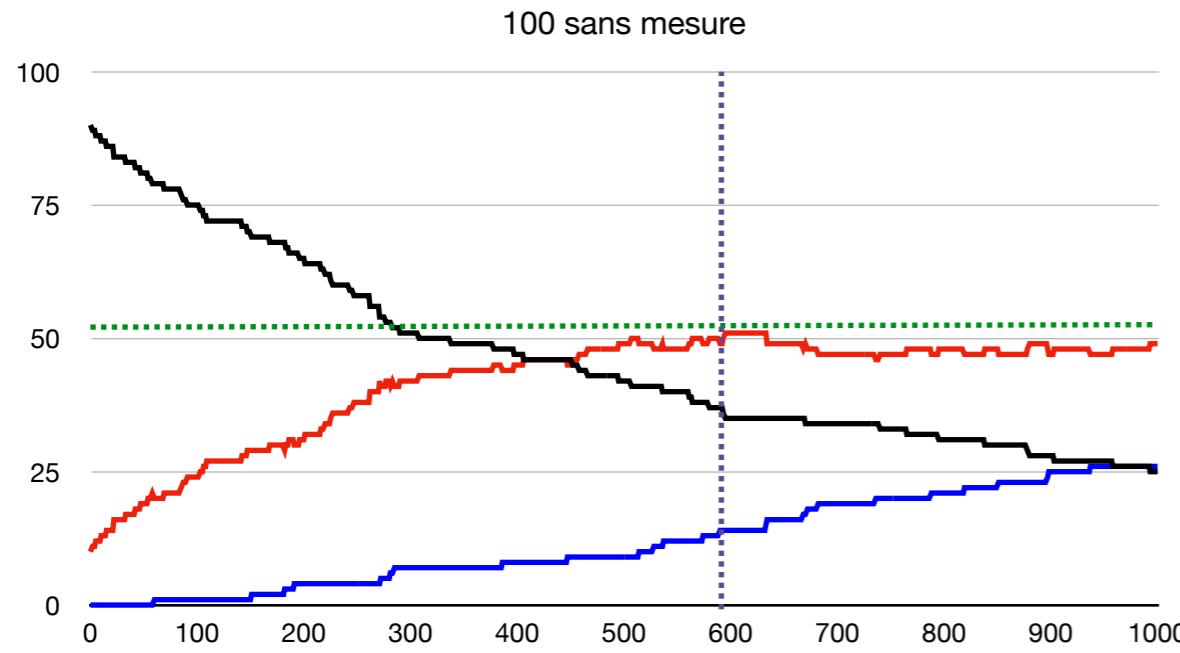
Aucune mesure appliquée



Rapegno Virgile - n° 2879

Comparaison des résultats

Aucune mesure appliquée



Rapegno Virgile - n° 2879

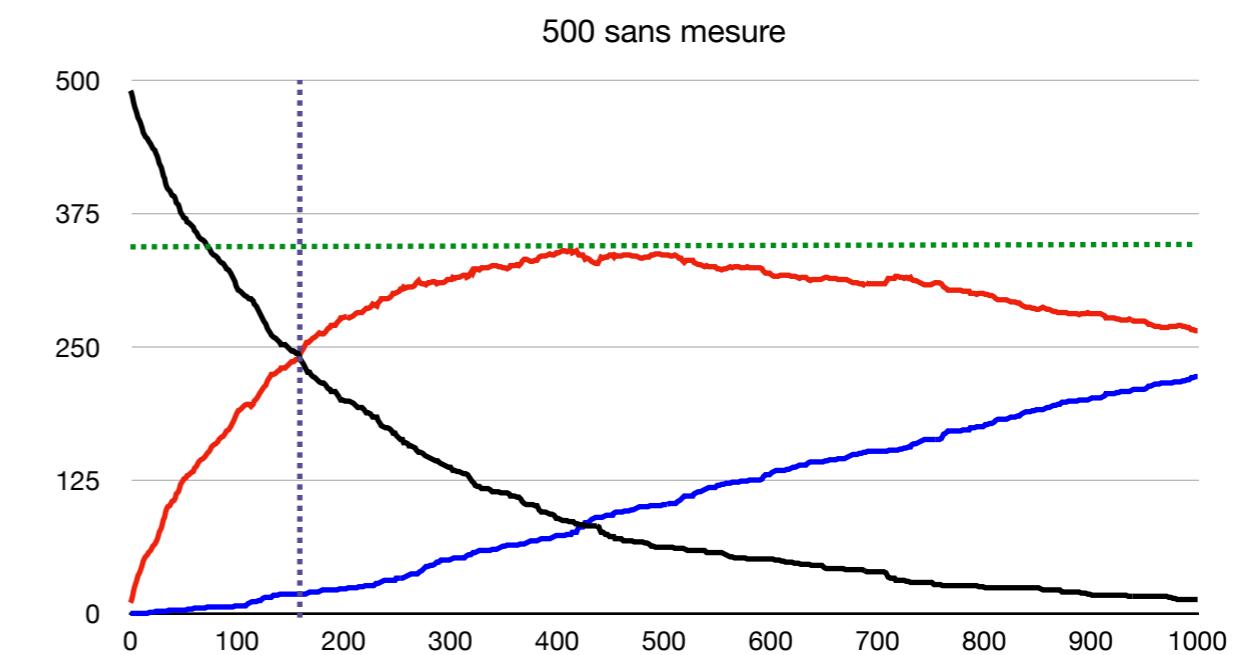
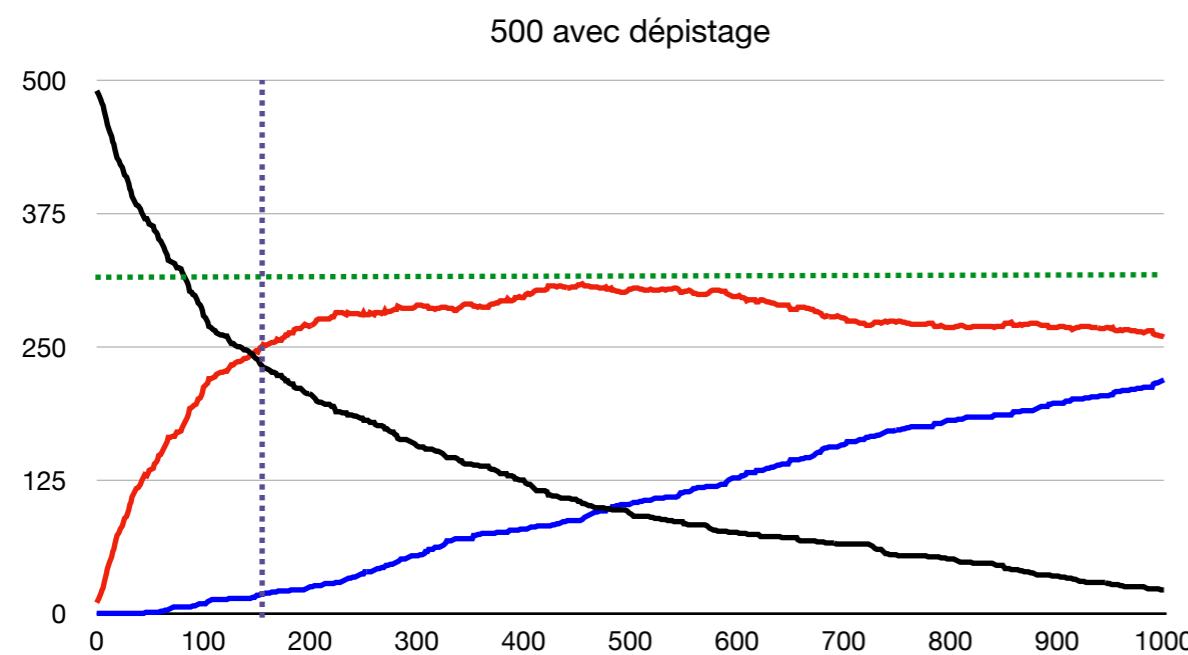
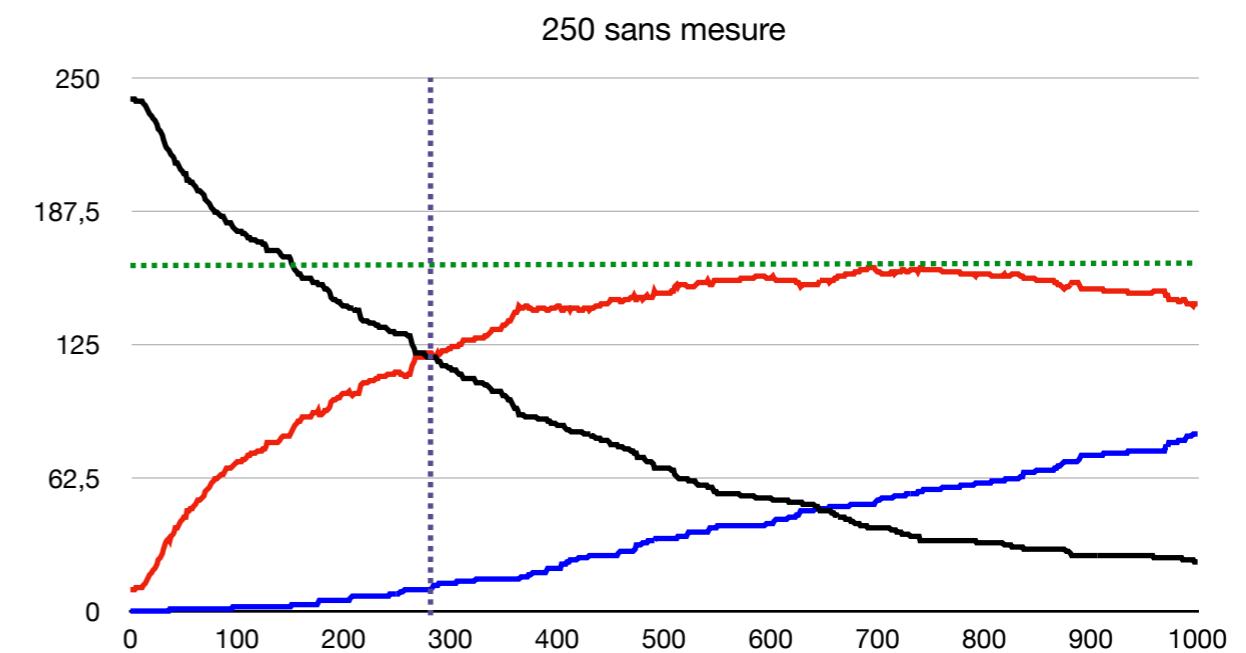
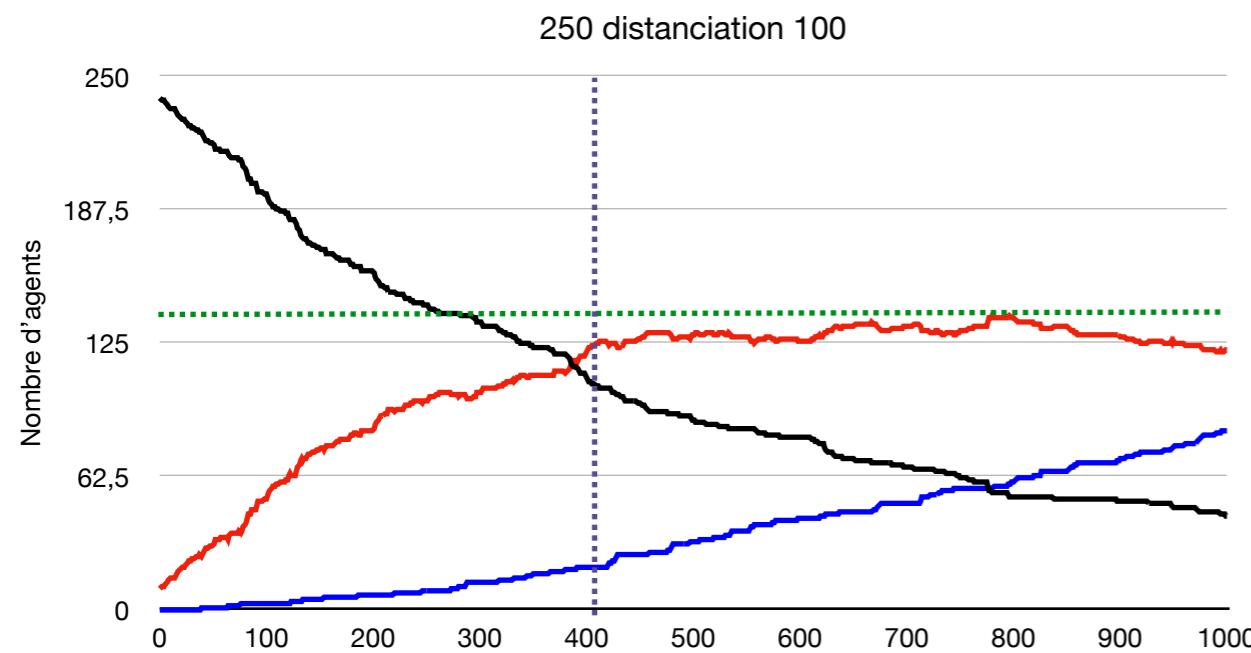
Comparaison des résultats

Aucune mesure appliquée

Nombre d'agents	100	250	500	1000
Date 50% de malades	680	300	170	100
Proportion malades simultanés maximal	50	65	70	75
Proportion totale malades 1000 jours	75	80	95	100

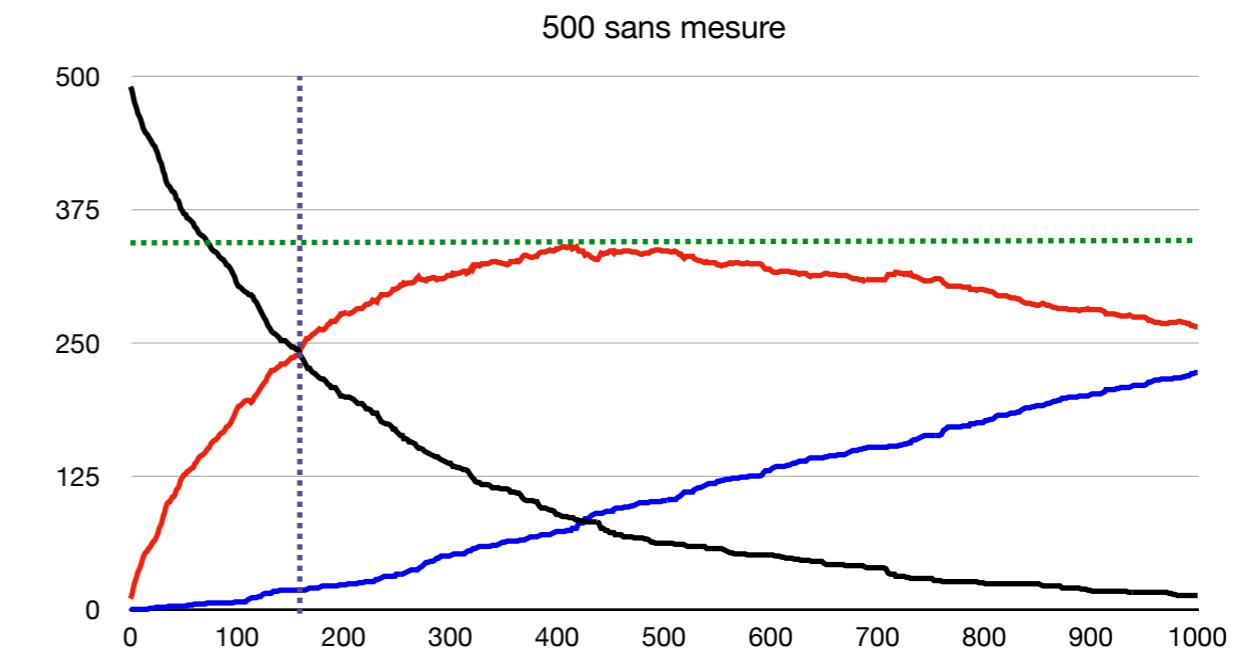
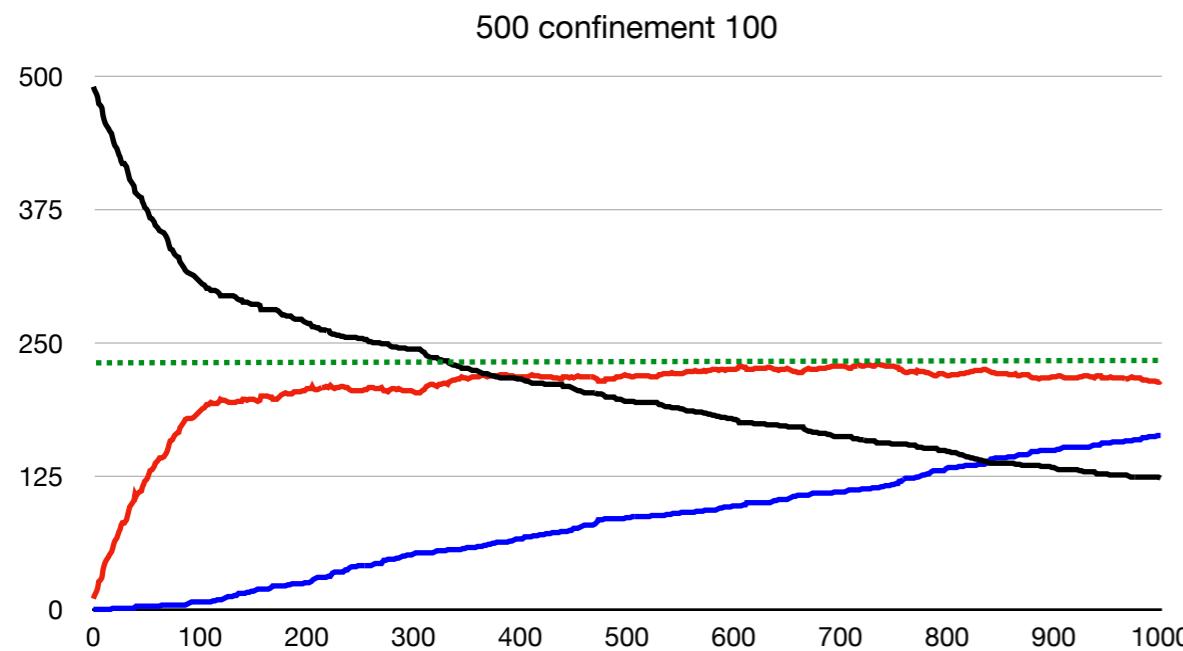
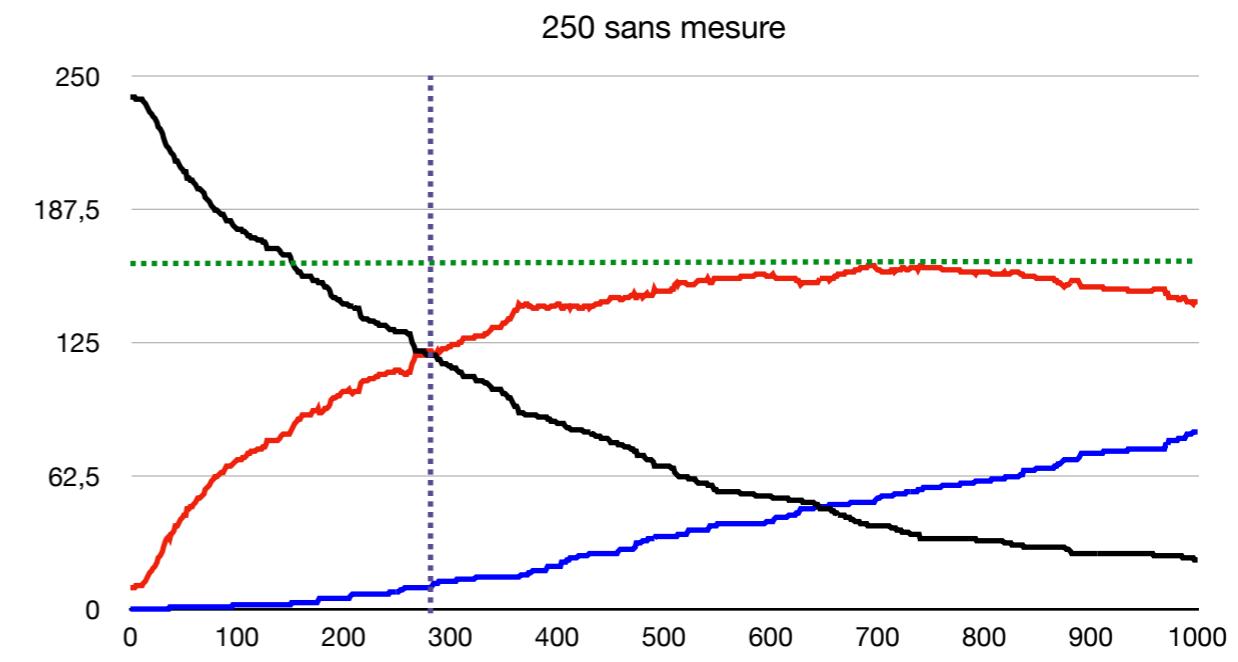
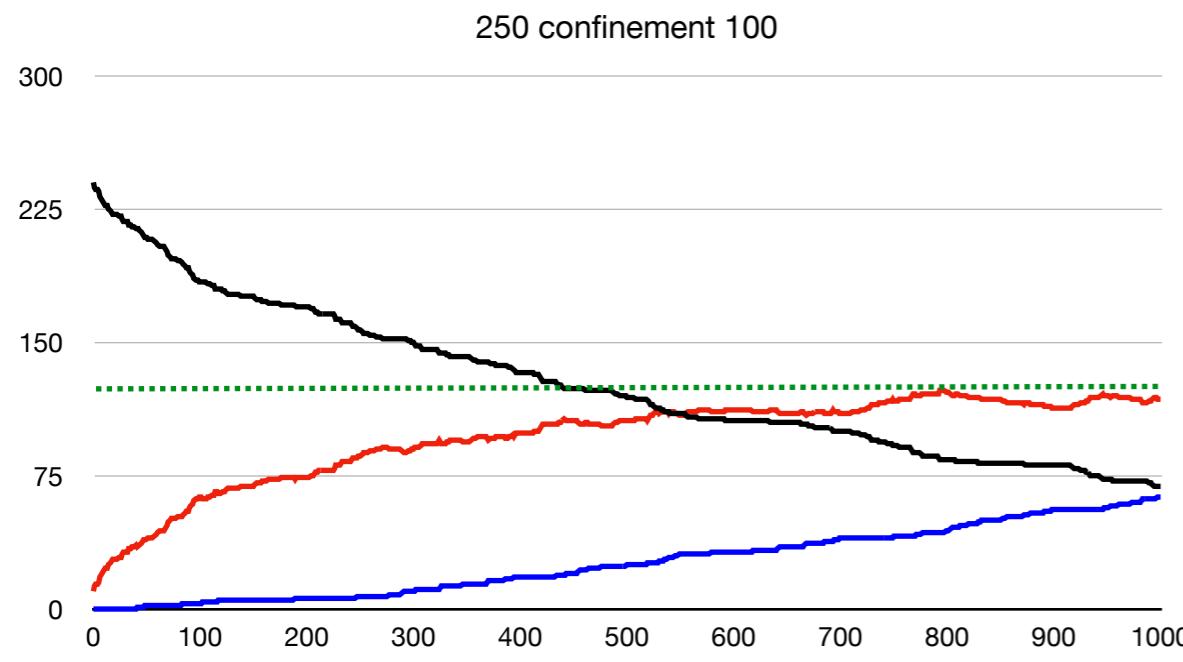
Comparaison des résultats

Population poussée au dépistage



Comparaison des résultats

Confinement après 100 tours



Comparaison des résultats

Dépistage / Confinement

Dépistage :

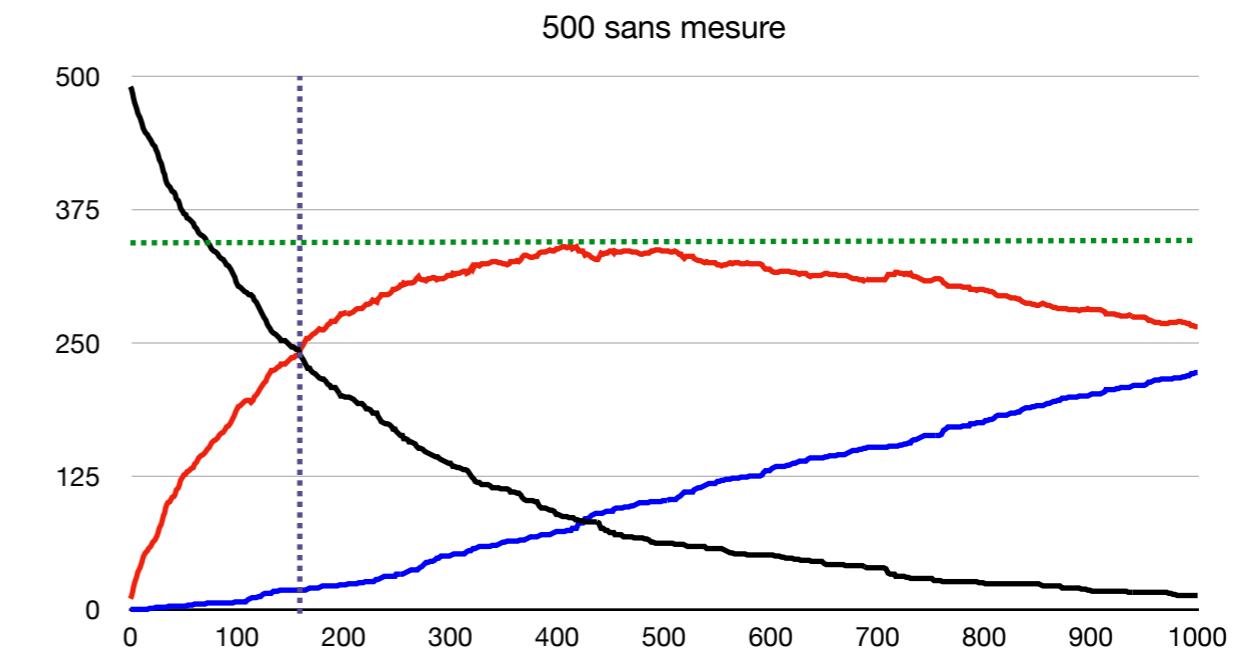
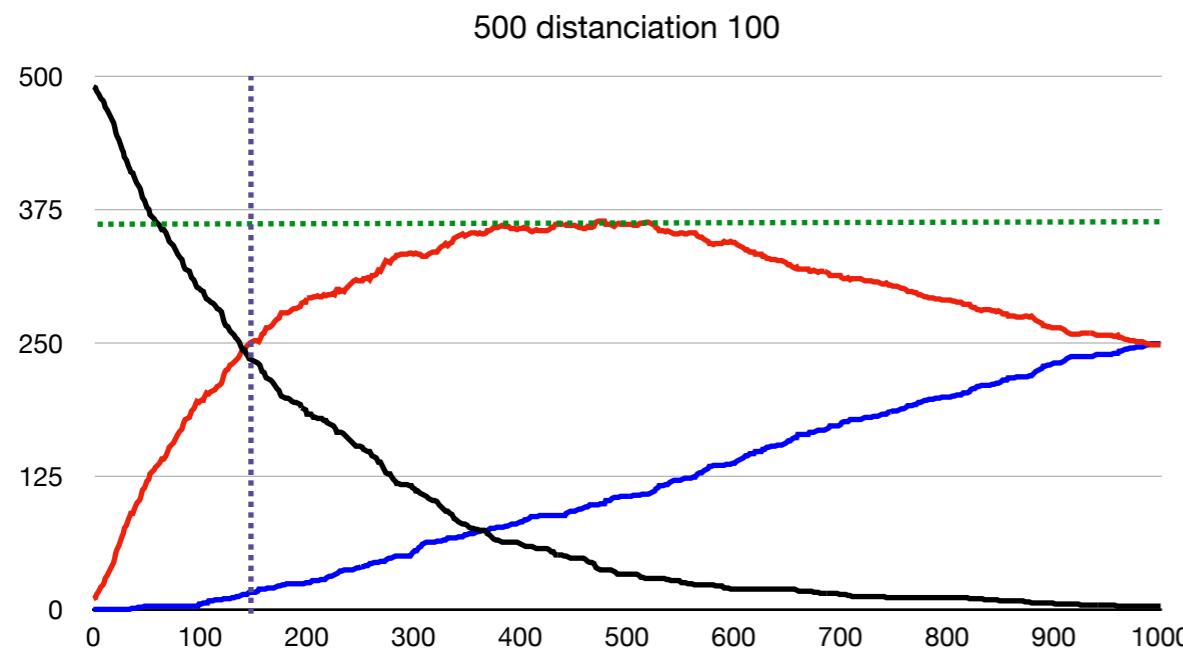
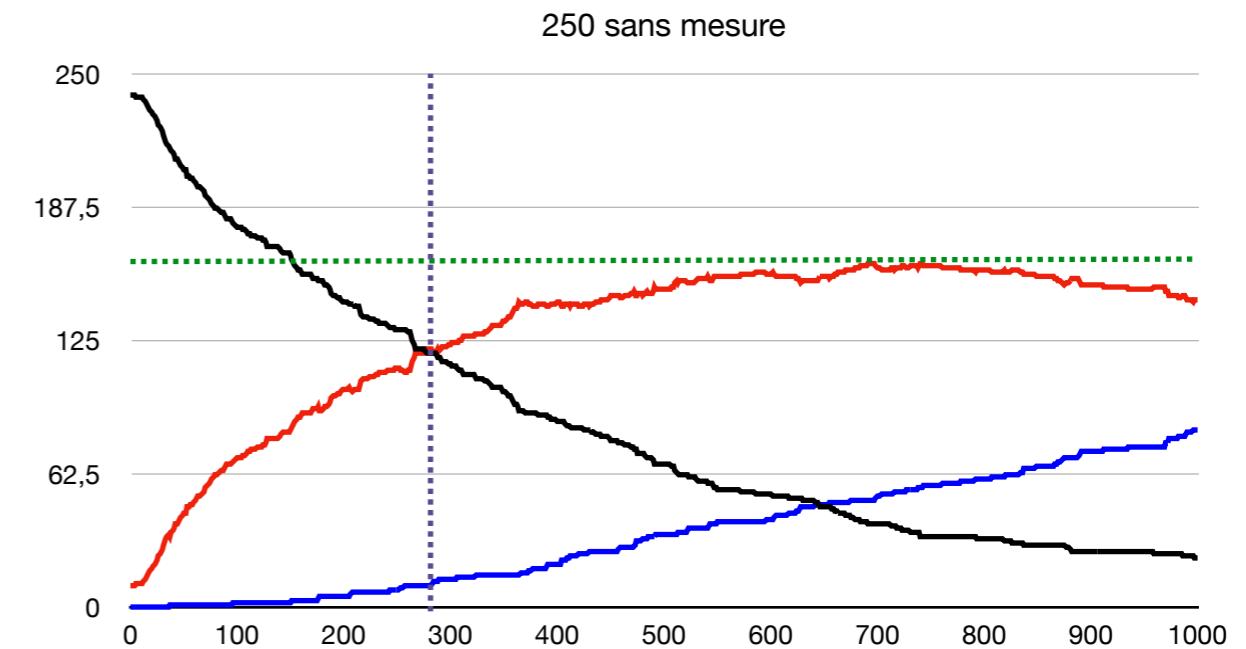
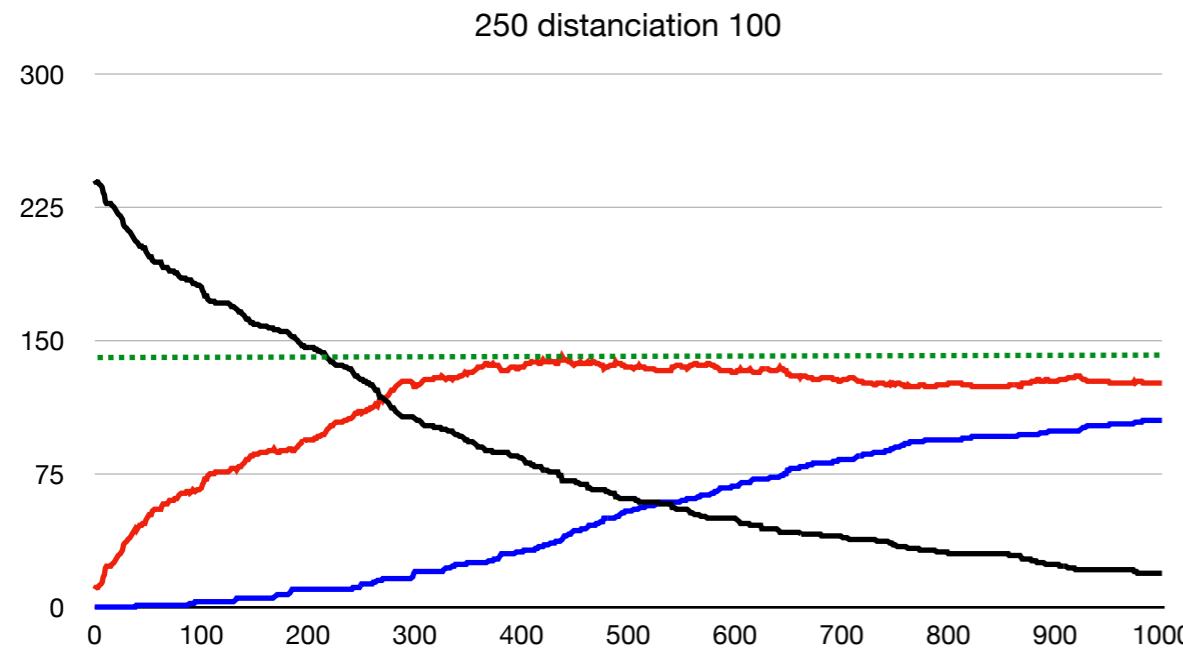
- Décalage d'une centaine de jour des 50% de malades simultanés
- Plateau vite réalisé
- Sensiblement autant d'agents jamais infectés
- Maintient de l'immunité collective

Confinement :

- Évitement de la bar des 50 % de malades simultanés
- Plateau vite réalisé
- Maintient de l'immunité collective
- 2 à 3 fois plus de patients jamais infectés après 1000 jours

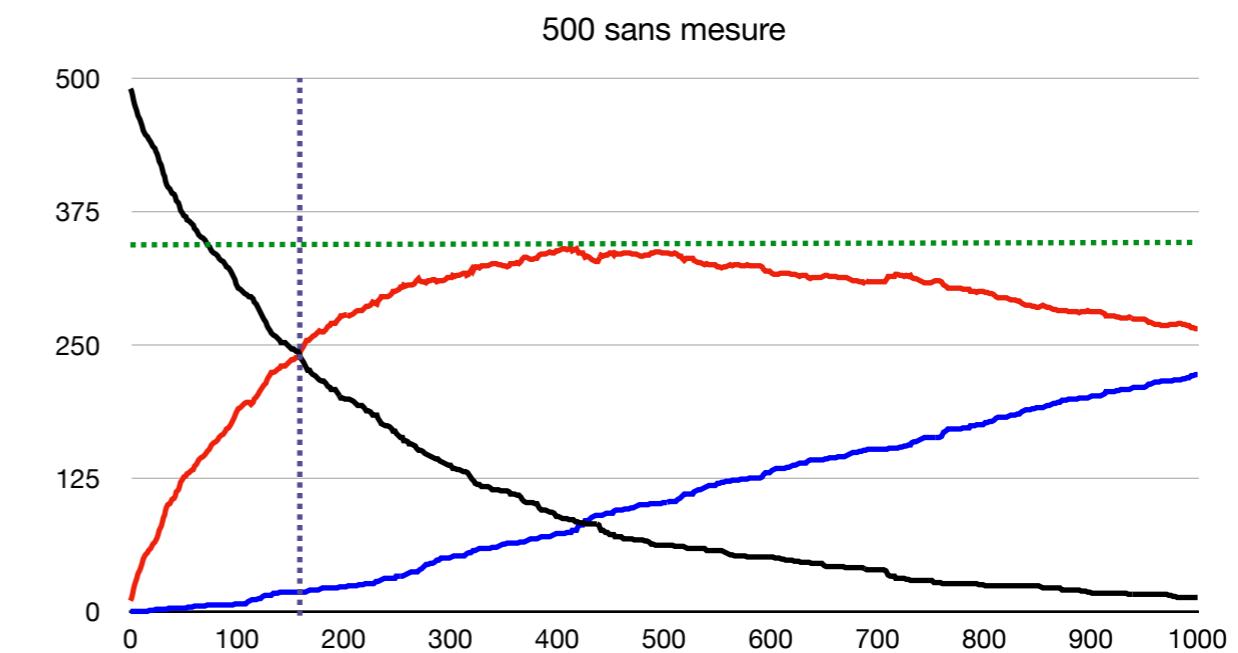
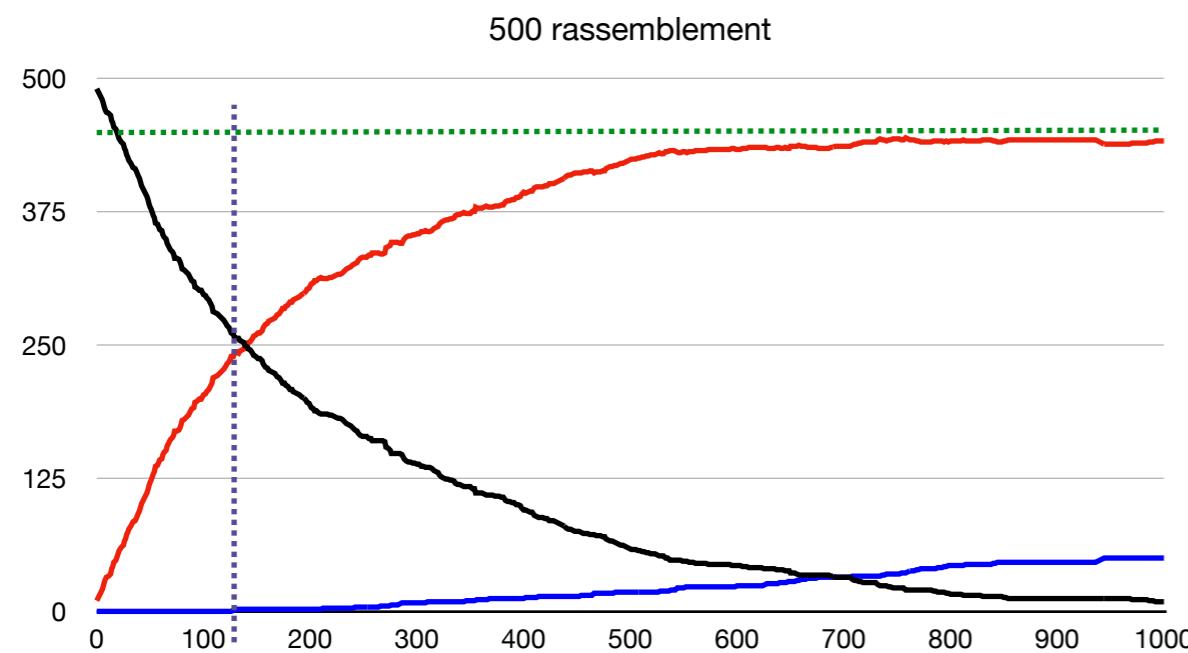
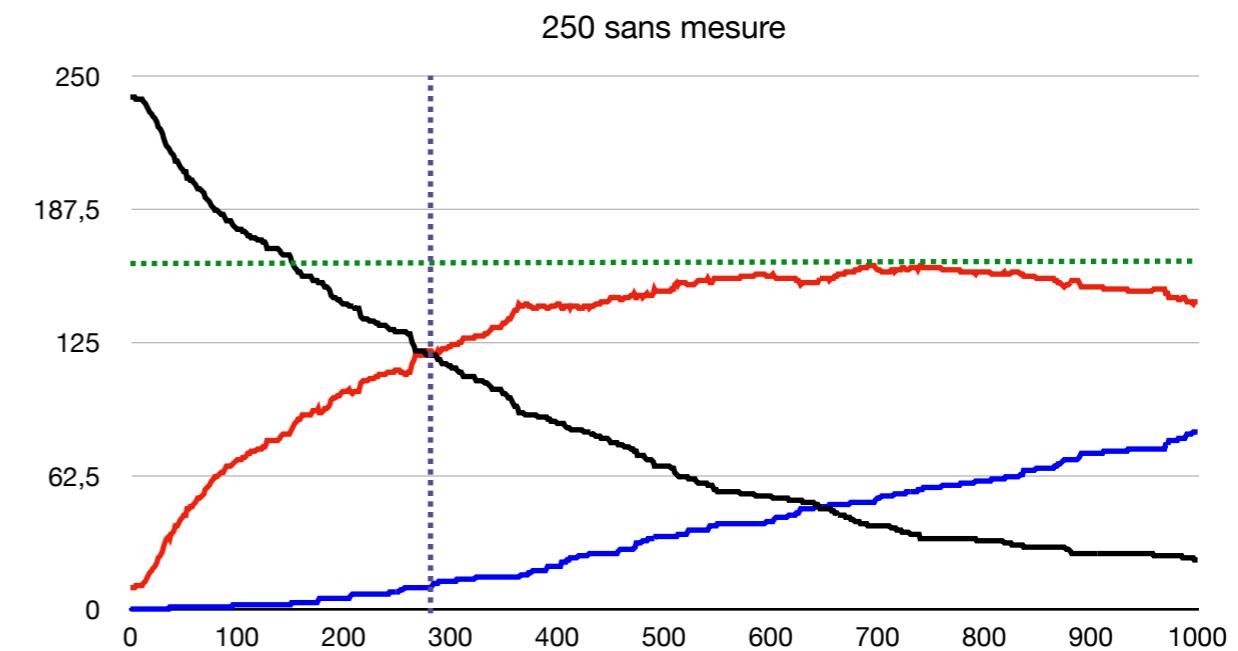
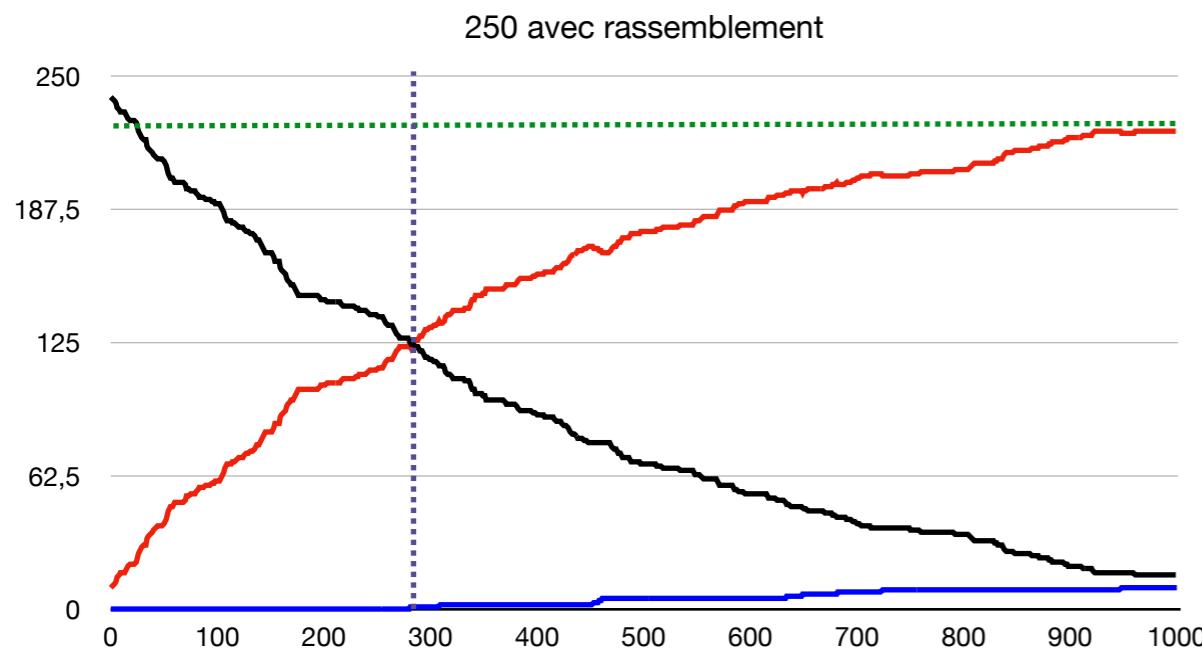
Comparaison des résultats

Distanciation après 100 tours



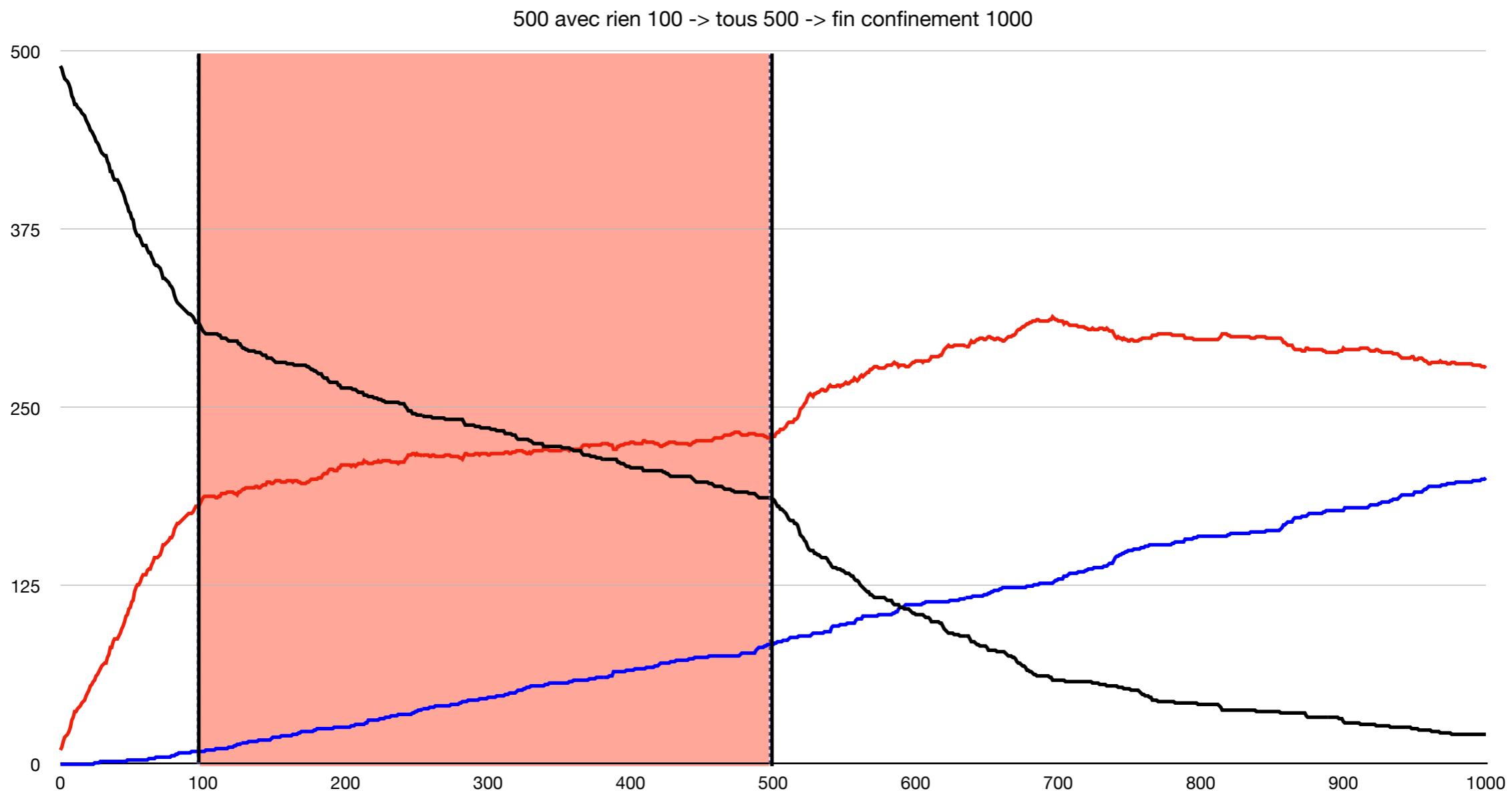
Comparaison des résultats

Point de rassemblement



Comparaison des résultats

Scénario déconfinement



Rapegno Virgile - n° 2879

Conclusion

Classement des méthodes

1. Confinement

Retarde grandement le pic et aplatis la courbe en dessous des 50% simultanés

2. Distanciation

Aplatit la courbe, mais requiert de l'espace

3. Dépistage

Retarde seulement le pic, peu d'efficacité sur le nombre de malades simultanés

Conclusion

Points faibles favorisant l'épidémie

1. Les rassemblements

Augmente le nombre de malades simultanés et rapproche le pic

2. La densité de population

La transmission de proche en proche influe beaucoup sur le nombre de malades

3. Déconfinement

Reprise de la propagation rapidement, mais l'immunité collective acquise ralentit la transmission car elle diminue fictivement la densité

Fin

Rapegno Virgile - n° 2879