

Modélisation Choléra

I] Contexte et motivations de la modélisation

1. Description générale de l'épidémie

Le choléra est une maladie diarrhéique aiguë causée par la bactérie *Vibrio cholerae*. Les personnes infectées peuvent souffrir de diarrhée grave, de vomissements et de déshydratation. La maladie est généralement transmise par l'ingestion d'eau ou d'aliments contaminés par des matières fécales.

Dans les pays pauvres, la maladie du choléra est particulièrement grave en raison de la combinaison de facteurs tels que l'insuffisance de systèmes d'assainissement et de traitement de l'eau, la malnutrition et les carences en vitamines et minéraux, et un accès limité aux soins de santé de qualité.

En raison de ces facteurs, les épidémies de choléra peuvent causer des taux de mortalité élevés, surtout chez les personnes les plus vulnérables, comme les enfants, les personnes âgées et les personnes atteintes de maladies chroniques.

Il est important de noter que le choléra est évitable et traité efficacement avec une prise en charge rapide et une réhydratation adéquate. Des programmes de prévention et de traitement tels que la vaccination, l'amélioration des conditions d'hygiène et de l'accès à l'eau potable, ainsi que la sensibilisation et la formation des communautés peuvent contribuer à réduire la fréquence et la gravité des épidémies de choléra.

2. Contexte historique ayant motivé le modèle

En 1849, Londres a été frappée par une épidémie de choléra qui a causé la mort de plus de 10 000 personnes. A cette époque, la plupart des médecins croyaient que la maladie était causée par des "miasmes" ou des vapeurs putrides qui s'élevaient des quartiers pauvres et malodorants de la ville. Ils ont donc recommandé des mesures pour améliorer l'aération et l'éclairage des quartiers pauvres. Cependant, un épidémiologiste nommé John Snow a eu une tout autre idée et a découvert que la plupart des cas de choléra étaient concentrés autour d'une pompe à eau contaminée dans le quartier de Broad Street. Il a convaincu les autorités de fermer la pompe à eau, ce qui a entraîné une chute rapide du nombre de cas de choléra dans le quartier. Sa découverte a été l'une des premières preuves de la transmission de maladies par voie hydrique, et a conduit à des améliorations significatives dans les conditions sanitaires.

L'idée de cette modélisation du choléra consiste à étudier la propagation de la maladie dans une ville fermée, comme Londres, en prenant en compte les quartiers organisés autour des pompes d'eau qui peuvent être infectées. Cette approche permet de comprendre les caractéristiques uniques de la maladie, notamment sa répartition spatiale, sa grande sensibilité aux conditions initiales et le risque élevé de résurgence.

II]Modèle

1. Introduction

Le modèle proposé est un modèle multi-agents où la population est divisée en 4 compartiments S,E,I,R (sains, exposés, infectés, rétablis). Chaque personne apparaît aléatoirement dans un point de la ville duquel et peut bouger aléatoirement dans toutes les directions sans quitter la ville. Elle va également chaque jour au puit le plus proche de lui-même pour chercher de l'eau. Un puit est initialement sain (sauf le premier puit infecté initialement) et il peut devenir infecté s'il est en contact avec une personne exposée. Les personnes exposées et saines bougent librement alors que les personnes infectées et rétablies sont immobiles.

2. Règle d'évolution des agents

- Une personne saine au jour N en contact avec un puit infecté (le puit le plus proche) devient exposé au jour N+1 avec une probabilité p_e .
- Une personne exposée au jour N en contact avec un puit sain le rend infecté au jour N+1 avec une probabilité p_p
- Une personne exposée au jour N se devient infectée au jour N+1 avec une probabilité p_i
- Une personne infectée au jour N se devient rétablie au jour N+1 avec une probabilité p

3. Règles de mouvement et rôle de la maison

Chaque individu sain et exposé peut se déplacer aléatoirement dans un rayon r autour de sa maison ce qui le rend susceptible d'entrer en contact avec un puit différent. La mise en place de la maison est une conséquence du théorème de Pólya (ou théorème de l'homme ivre) qui stipule qu'un individu qui se déplace aléatoirement va passer un nombre infini de fois dans la zone d'influence du puit infecté donc va presque sûrement devenir infecté ce qui n'est pas ce qu'on observe dans la réalité. En réalité, les personnes restent dans des quartiers et ne s'éloignent pas de chez eux

4. Rôle de la marche aléatoire des exposés

Si un puit unique est infecté l'épidémie va seulement se propager dans sa zone d'influence. Les personnes incubées n'ont pas de symptômes se comportent comme les personnes saines et peuvent contaminer un puit en dehors de son quartier d'origine avec une certaine probabilité.

Comme la durée d'incubation suit une loi géométrique de paramètre p_i on a que la durée d'incubation vaut $E[X]=1/p_i$ dans la réalité cette durée varie entre quelques heures à 5 jours ce qui permet d'estimer p_i

5. Rôle des personnes infectées et surcharge des hôpitaux

Le choléra est une maladie qui peut être facilement traitée en clinique ou à l'hôpital. Le traitement consiste principalement à compenser les pertes en eau et en électrolytes causées par la maladie. Cependant, le choléra peut parfois être très violent et risquer de surcharger les hôpitaux. Sans traitement, il peut entraîner des formes graves et causer la mort dans 25 à 50% des cas, contre 1 à 6% avec un traitement. Dans notre ville, il y a 20 lits disponibles pour

500 habitants, ce qui est considéré comme beaucoup (la moyenne en Afrique est d'environ 2 lits pour 1000 habitants), mais étant donné que le traitement est simple, ce chiffre semble cohérent. De plus, la durée de l'infection est généralement de 1 à 3 jours, ce qui permet d'estimer la probabilité de rétablissement (pr) de la même manière que précédemment. Notre programme va ainsi pouvoir estimer le nombre de morts évitables à cause de la saturation des hôpitaux.

6. Rôle de la vaccination

Il existe un vaccin contre le choléra qui requiert deux doses pour atteindre une efficacité de 90%. Cependant, le déploiement de ce vaccin est relativement limité en Afrique en raison de son coût élevé (20 euros par dose) et de sa diminution rapide d'efficacité au bout de 3 ans, qui nécessite des rappels réguliers. Dans notre programme, nous incluons les personnes vaccinées en les classant directement dans la catégorie des guéris et en veillant à ne pas les inclure dans le calcul du nombre de décès dus à l'épidémie.

III] Résultats des simulations

1. Forte sensibilité aux conditions initiales et au hasard

On constate une grande sensibilité de notre modèle aux conditions initiales, on remarque que si un puits est très isolé, il ne va concerner qu'un nombre faible de personnes. Ainsi l'épidémie a de grands risques de rester localisée autour du puits sans se propager aux autres puits [Fig 1 a,b]. Alors que si un puits infecté couvre une grande partie du territoire, il va être beaucoup plus susceptible d'infecter toute la ville.

2. Caractère imprévisible de l'épidémie

Les résultats de nos simulations montrent que les épidémies de choléra sont imprévisibles. Tant que tous les puits ne sont pas décontaminés, il y a un risque de reprise de l'épidémie, ce qui peut prendre les autorités sanitaires au dépourvu. Comme on peut le voir sur la Fig2, des résurgences de l'épidémie peuvent entraîner des vagues plus importantes que la première. Cet effet est encore plus visible sur la Fig3, où l'on constate qu'après une baisse rapide au début de l'épidémie, il y a une forte reprise 45 jours plus tard, avec un pic de plus de 100 personnes infectées en même temps sur une population totale de 500 personnes. Les autorités sanitaires locales doivent donc rester vigilantes et continuer à prendre des mesures pour empêcher l'accès aux puits infectés et veiller à l'entretien des fosses septiques pour éviter toute contamination par des personnes malades.

Ces grosses vagues épidémiques sont donc le principal danger du choléra parce que c'est une maladie est facile à traiter mais dévastatrice si non-traitée comme vu précédemment. Notre simulation montre donc un calcul de morts évitable à cause de la surcharge des hôpitaux qui est souvent très élevé comme dans la Fig6. Pour calculer cette saturation des hôpitaux on calcule la proportion de personne-jour d'infection qui peut occuper un lit d'hôpital durant toute l'épidémie sur le nombre de personne-jour d'infection total.

3. Rôle de la vaccination

La simulation prend en compte la vaccination d'une partie de la population avec un vaccin ayant une efficacité déterminée. Comme prévu, la vaccination s'avère très efficace pour endiguer l'épidémie. En plus de protéger les personnes vaccinées, le vaccin réduit le nombre de personnes exposées et donc le risque de propagation de la maladie via d'autres puits.

En observant la Fig 4, on constate que pour une simulation où 80% de la population est vaccinée (a), la maladie ne se propage pas, alors qu'avec seulement 30% de personnes vaccinées (b), l'épidémie parvient à se propager dans le temps. Il convient de noter qu'une forte couverture vaccinale ne garantit pas l'éradication complète de l'épidémie, mais elle la limite considérablement.

4. Conclusion et perspectives

Les différentes simulations que l'on a réalisé pour notre modèle montre que pour lutter contre une épidémie de choléra dans les pays pauvres est avant tout de mettre en place une série de mesures visant à améliorer l'accès à l'eau potable et à l'assainissement, à sensibiliser les populations aux bonnes pratiques d'hygiène, à diagnostiquer et traiter rapidement les cas, à vacciner les personnes à risque, et à mettre en place des plans d'intervention pour gérer efficacement une épidémie. L'OMS recommande par exemple la distribution de médicaments (comme les antibiotiques) et de sérums à tous les individus d'une zone touchée pour limiter la propagation de l'épidémie. L'étude montre également qu'il est très important de réagir rapidement face à une épidémie car les épidémies peuvent être imprévisibles.

SOURCES :

<https://hal.science/hal-02460288/document>

<https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/cholera>

https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89pid%C3%A9mie_de_chol%C3%A9ra_de_Broad_Street

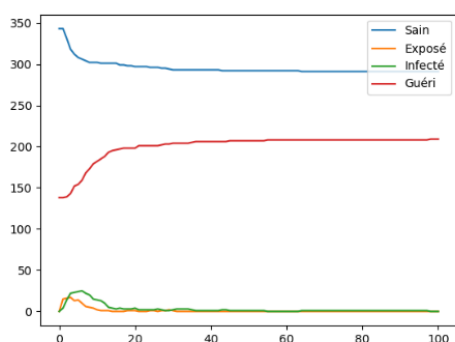


Fig 1a) Evolution de l'épidémie en fonction du temps pour une situation initiale donnée

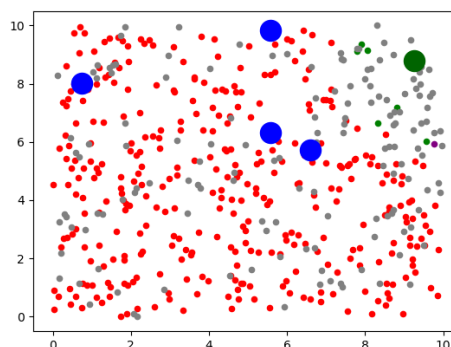


Fig 1b) Représentation de l'épidémie à un instant N donné (les gros points bleus et verts correspondent aux puits sains et infectés)

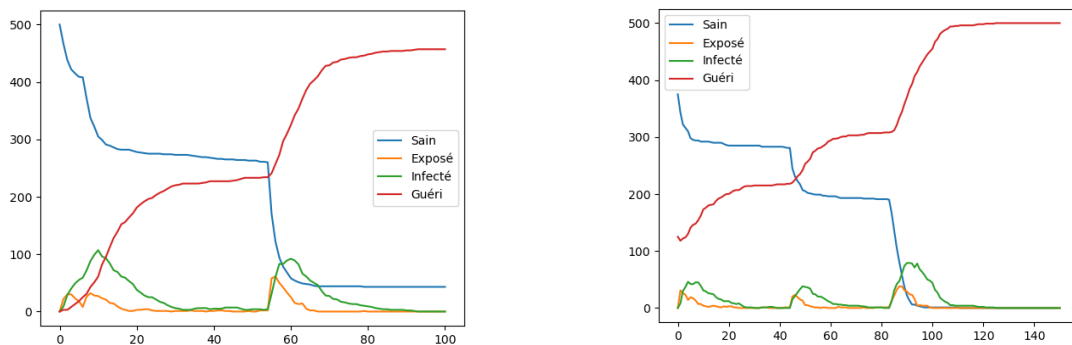


Fig 2 Evolution de l'épidémie à 2(a) et 3(b) vagues épidémiques

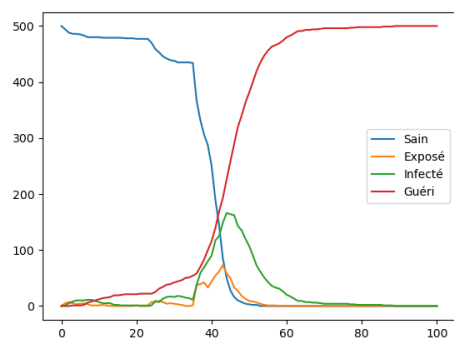


Fig 3 Evolution de l'épidémie avec un pic épidémique élevé 45 jours après le début de l'épidémie

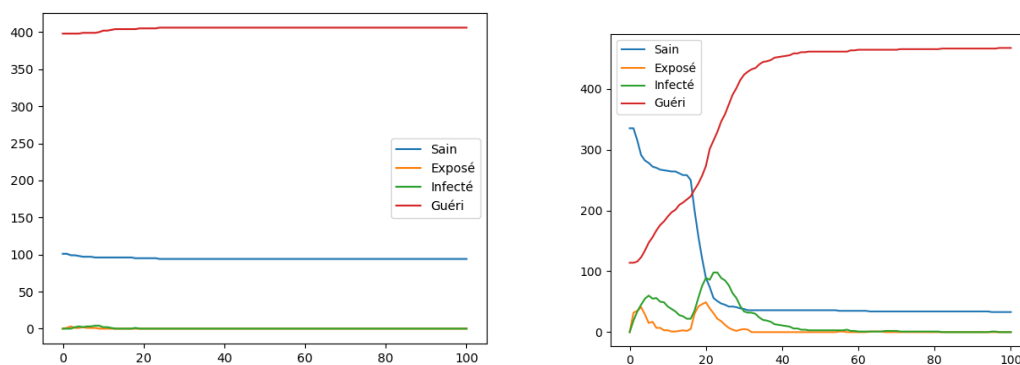


Fig4 : Comparaison de l'évolution de l'épidémie pour une population vaccinée à 80% (a) (l'épidémie ne se propage quasiment pas) et une population vaccinée à 30% (b) (l'épidémie contamine une grande partie de la population totale).

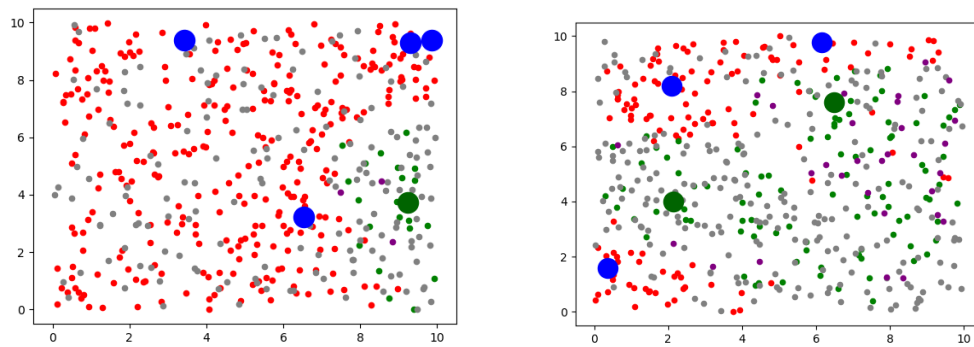


Fig5 : Observation d'une épidémie qui a contaminé 1(a) et 3(b) puits à un instant N

>>> (executing file "code cholera.py")

Le nombre total de puits infectés est 5

A la fin de l'épidémie on obtient environ 61 dont environ 54 morts évitables

Fig6 : Message renvoyé par le programme à la fin de la simulation

```

5 class Personne:
6     def __init__(self, x, y):
7         self.x = x
8         self.y = y
9         if random.random() <= vac*eff:
10             self.state="Recovered"
11         else:
12             self.state="Same"
13         self.maison=x
14         self.maison=y
15
16
17 class Puit:
18     def __init__(self, x, y):
19         self.x = x
20         self.y = y
21         self.state="Same"
22
23
24 puit=[]
25 personnes=[]
26 show=True
27 xmax=10
28 ymax=10
29 n=500
30 N=100
31 n_puits=10
32 puit=[]
33 puit=[]
34 pr=0.15
35 pe=0.1
36 ap=0.1
37 pd_hp=2/100
38 pd_m_hp=25/100
39 vac=0.5
40 eff=0.9
41
42
43 def init(n_puit, xmax, ymax):
44     for i in range(n):
45         puit.append(Puit(random.random()*xmax, random.random()*ymax))
46     for i in range(n_puit):
47         puit[i]=Puit(random.random()*xmax, random.random()*ymax)
48
49
50 init(n_puit, 10, 10)
51 puit[0].state="Infected"
52 fig, ax=plt.subplots()
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98

```

```

96         elif personne[str(i)].state=="Infected":
97             l.append(i)
98         elif personne[str(i)].state=="Exposed":
99             l.append(i)
100         else:
101             R.append(i)
102     for i in range(npuit):
103         if puit[str(i)].state=="Infected":
104             Ip.append(i)
105         else:
106             Is.append(i)
107     return S,E,I,R,Is,Ip
108
109
110
111
112 def Puit_state():
113     Ps,Pi=[],[]
114     for i in range(npuit):
115         if puit[str(i)].state=="Sain":
116             Ps.append(i)
117         else:
118             Pi.append(i)
119     return Ps,Pi
120
121
122
123
124 def move(S,E):
125     for i in E:
126         while ok:
127             ok=True
128             l=round.random()*amax/10
129             theta=round.random()*2*np.pi
130             if personne[str(i)].x+l*np.cos(theta)>amax and personne[str(i)].x+l*np.cos(theta)>0 and personne[str(i)].y+l*np.sin(theta)>ymax and personne[str(i)].y+l*np.sin(theta)>0 and abs(personne[str(i)].x+l*np.cos(theta)-
131             personne[str(i)].maison)>amax/r and abs(personne[str(i)].y+l*np.sin(theta)-personne[str(i)].maison)>ymax/r:
132                 ok=False
133             personne[str(i)].x=personne[str(i)].x+l*np.cos(theta)
134             personne[str(i)].y=personne[str(i)].y+l*np.sin(theta)
135
136     for i in S:
137         ok=True
138         while ok:
139             l=round.random()*amax/10
140             theta=round.random()*2*np.pi
141             if personne[str(i)].x+l*np.cos(theta)>amax and personne[str(i)].x+l*np.cos(theta)>0 and personne[str(i)].y+l*np.sin(theta)>ymax and personne[str(i)].y+l*np.sin(theta)>0 and abs(personne[str(i)].x+l*np.cos(theta)-
142             personne[str(i)].maison)>amax/r and abs(personne[str(i)].y+l*np.sin(theta)-personne[str(i)].maison)>ymax/r:
143                 ok=False
144             personne[str(i)].x=personne[str(i)].x+l*np.cos(theta)
145             personne[str(i)].y=personne[str(i)].y+l*np.sin(theta)
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999

```

Fig 7 : Code python de la simulation du modèle