



ECO-RESPONSABILITE ET AUTOREGULATION DES FLUX  
TOURISTIQUES D'UN SITE TRES FREQUENTE : UNE APPROCHE PAR  
LA DYNAMIQUE DES SYSTEMES

DANIEL THIEL

Revue Francophone du Développement Durable

2024 - n°24 - Octobre

Pages 58 - 76.

ISSN 2269-1464

Article disponible en ligne à l'adresse :

---

<https://erasme.uca.fr/publications/revue-francophone-du-developpement-durable/>

---

Pour citer cet article

---

Thiel D. (2023), Eco-responsabilité et autorégulation des flux touristiques d'un site très fréquenté : une approche par la dynamique des systèmes, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°24, Octobre, p. 58 - 76..

# Eco-responsabilité et autorégulation des flux touristiques autour d'un site très fréquenté : une approche par la dynamique des systèmes<sup>1</sup>

Daniel THIEL

CEPN, UMR-CNRS 7234, Université Sorbonne Paris Nord

*Résumé* : La prise de conscience de l'impact environnemental du tourisme de masse conduit de plus en plus de visiteurs à adopter un comportement éco-responsable qui contribue au développement durable d'un tourisme mieux réparti. Ces touristes organisent leur visite d'un site très fréquenté en fonction des taux de fréquentation et en profitent pour découvrir avant ou après d'autres curiosités situées à proximité. Si le site leur paraît encore trop encombré lors de leur deuxième passage, ils décident de quitter la zone touristique. Nous proposons un modèle de dynamique des systèmes pour simuler l'impact d'un tel comportement sur l'auto-régulation des flux entre un site majeur et un site secondaire. Un résultat de simulation contre-intuitif montre qu'en prenant l'hypothèse d'une croissance progressive du nombre de touristes éco-responsables, le nombre de visiteurs insatisfaits croît jusqu'à une certaine proportion puis décroît progressivement et se stabilise.

*Mots clés* : Surtourisme, tourisme éco-responsable, gestion des flux, dynamique des systèmes, simulation.

## Introduction

Pour répondre à la problématique de gestion des flux dans un contexte de surtourisme (Mihalic, 2020; Pechlaner et al., 2020), des autorités publiques et des décideurs locaux mettent souvent en place des politiques permettant de réduire l'impact environnemental et la saturation de certains sites. Ils font le choix de différentes stratégies que Seraphin et al. (2018) qualifient de *Trexit* (*tourism exit*) comme, parmi d'autres, la limitation du nombre de visiteurs par jour (Peltier, 2018), l'obligation de réserver en ligne ou encore un accès unique par navette à partir d'un parking distant. Par ailleurs, des conseils prodigués par la commission des transports et du tourisme auprès du Parlement Européen (Peeters et al., 2018), visent à stimuler et à aider les organisations NTO/DMO<sup>2</sup> à répartir les visiteurs autour et au-delà des destinations surchargées. Ces préconisations rejoignent les recommandations de la *World Tourism Organization* (UNWTO et al., 2019) invitant les parties prenantes : (i) à créer des événements dans les parties moins visitées de ces lieux et dans les zones voisines, (ii) d'y développer et promouvoir de nouvelles attractions ou installations, (iii) de créer une identité commune de ces destinations avec leurs zones voisines et (iv) de

---

<sup>1</sup> Remerciements. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet LabEx MME-DII « Modèles Mathématiques et Économiques de la Dynamique, de l'Incertitude et des Interactions » (Agence Nationale de la Recherche).

<sup>2</sup> *National Tourism Organization* (NTO) and *Destination Marketing Organizations* (DMO).

commercialiser l'ensemble de la région touristique pour stimuler la fréquentation des parties les moins visitées. Dans notre recherche, nous choisissons de modéliser la dynamique des flux vers un grand site touristique en considérant deux types de touristes : ceux qui arrivent en masse vers un site très fréquenté sans se préoccuper de leur impact environnemental et ceux que nous qualifions de touristes éco-responsables (ERT) ou réflexifs au sens de (Knafo, 2017) qui ont choisi de planifier leur visite de ce même site en fonction du taux de fréquentation et de profiter pour visiter avant ou après un site secondaire situé à proximité (village, musée, attraction, site naturel ou d'autres curiosités). Nous considérons que ces comportements individuels réflexifs permettent d'enrichir voire de se substituer aux mécanismes habituels centralisés de régulation mise en place par les autorités. Il permet notamment de combler des baisses de fréquentation durant la journée et surtout d'éviter des forts taux de fréquentation en lissant la charge d'un site réputé grâce aux alternatives de découvertes de sites secondaires situés à proximité. Au niveau théorique, cette problématique de gestion des flux ne correspond pas à un problème courant d'ordonnement des charges et capacités en fonction de variables de flux d'arrivées de touristes sur différents sites durant une période donnée d'ouverture. Il ne s'agit pas d'optimiser et de planifier les flux de manière centralisée mais d'étudier l'impact de ce type de décision réflexif sur la dynamique des flux autour d'un grand site touristique et sur son auto-régulation.

Pour aborder cette problématique, nous avons choisi une approche de dynamique des systèmes de (Forrester, 1961, 1990) et proposons de dévoiler à travers un modèle de simulation des comportements non-linéaires en s'appuyant, à titre illustratif, sur un jeu de données réalistes. Les flux d'arrivée des touristes pour une journée donnée sont représentés par des courbes d'évolution temporelle émanant de statistiques de fréquentation correspondant à une période donnée de l'année, d'un mois ou d'une semaine. Ces arrivées sont supposées dans un premier temps comme déterministes et indépendantes. Concernant les touristes de type ERT arrivant tout au long de la journée, nous considérons qu'ils choisissent de visiter le site principal si son taux de fréquentation réel est inférieur ou égal à un taux maximum admissible de fréquentation (TMF) qu'ils se sont fixés. Si le site leur paraît trop encombré lors de leur premier passage, ils décident de se diriger vers un site secondaire à proximité puis reviennent tenter leur chance à l'issue de leur visite. S'il est toujours trop saturé, ils quittent définitivement la zone touristique. Cette règle de flexibilité garantit une meilleure répartition de la charge du site principal mais présente cependant un risque de perte de clientèle. En augmentant progressivement la proportion de touristes éco-responsables en réponse à une pression subie et incontrôlable du tourisme de masse, notre modèle permet l'analyse de la dynamique des flux et des mécanismes d'auto-régulation.

Cet article est organisé de la manière suivante. La section 2 développe une revue de littérature portant sur les applications de la recherche opérationnelle et de la dynamique des systèmes dans le secteur touristique. Sur la base d'une situation

réaliste, la section 3 présente à partir d'un exemple illustratif, un modèle de dynamique des systèmes permettant d'analyser l'impact de comportements individuels de touristes réflexifs sur le taux de fréquentation d'un site faisant face au surtourisme. La section 4 présente et discute les résultats de simulation obtenus. La section 5 expose une synthèse de cette recherche, ses limites et des perspectives de recherche.

## Revue de littérature

### Modèles appliqués au tourisme

Les revues de littérature portant sur des modèles de recherche opérationnelle appliqués au secteur touristique sont assez anciennes. Parmi elles, Swart et al. (1978) ont recensé des modèles mathématiques résolvant des problèmes de prévision, de gestion de flux, de planification des décisions ou encore, permettant d'étudier l'impact de nouvelles activités touristiques sur la performance. Ils ont également comparé les approches stochastiques, déterministes et les métamodèles (modèles de substitution ou *surrogate models*) puis cités des modèles prescriptifs et d'optimisation de prise de décision. Dans l'ouvrage collectif coordonné par Ladany (1975), 26 publications sont présentées utilisant différentes approches de modélisation : analyse de régression, simulation, analyse discriminante, analyse de flux de réseau, programmation linéaire et programmation dynamique. Elles sont appliquées à différents secteurs du tourisme comme les activités récréatives en plein air, le camping, les voyages, les sites résidentiels de villégiature.

Sedarati et al. (2019) ont publié une revue de littérature montrant les apports de la dynamique des systèmes (DS) de Forrester (1961, 1990) pour la planification et le développement du tourisme, la gestion intégrée des zones côtières (Walker et al., 1998), la modélisation socio-écologique de la pêche durable (Vugteveen et al., 2015) ou encore, la planification stratégique et la promotion de l'apprentissage organisationnel (Schianetz et al., 2007). Chen (2004) a simulé la dynamique des flux d'arrivée de visiteurs selon différents scénarios de politique d'investissement et de changements environnementaux. Lors d'une communication lors de l'*International System Dynamics Conference (ISDC)* à Gallen en Suisse, Ran (2012) a abordé la question de l'équilibre entre les effets positifs du tourisme sur le développement économique et les effets négatifs sur les environnements naturels et culturels. Il y intègre les intérêts et les valeurs des groupes d'acteurs du tourisme et leurs influences sur le développement. Walsh & Mena (2016) ont étudié la gestion du tourisme aux îles Galapagos et a montré qu'un certain nombre d'effets socio-écologiques choquent gravement l'environnement naturel et saturent la capacité de plusieurs sous-systèmes socio-économiques. Leur modèle s'appuie sur des données réelles pour spécifier les règles, les relations et les fonctions de transfert dérivées de fonctions statistiques et/ou de fonctions spécifiées dans la théorie ou la pratique. Tan et al. (2018) ont simulé la fréquentation de la petite île de Cijin à Taiwan qui attire de nombreux touristes entraînant d'importantes

retombées économiques mais causant de la pollution et dégradant l'environnement côtier et l'écosystème marin. Plus récemment, Pan (2023) a développé un modèle capable de prédire efficacement les arrivées de touristes dans une destination donnée. Gazoni et Silva (2023) ont étudié les relations de cause à effet entre les variables liées au développement du tourisme. Shafiee et al. (2023) ont simulé le développement des destinations touristiques durables grâce aux technologies intelligentes.

A partir de cette revue de littérature sur les modèles de DS appliqués au tourisme, nous constatons qu'aucune recherche n'a abordé la problématique de gestion des flux en pendant en considération des comportements individuels éco-responsables.

## **Modélisation du pilotage et de la planification des flux touristiques**

Nous avons cependant recensé quelques travaux s'intéressant plus particulièrement à la problématique de gestion des flux dans des sites faisant face au surtourisme. Gearing et al. (1976) ont développé un modèle de flux et de planification multi-période pour le développement touristique en prenant l'hypothèse que le développement de nouveaux projets modifiait l'attractivité touristique d'une région et que, par conséquent, les flux existants seraient redistribués pour refléter ce changement. Une notion de capacité de charge, terme défini par l'*Organisation Mondiale du Tourisme*, a été intégrée dans leur modèle en reliant directement les changements potentiels d'attractivité à un indice de saturation du territoire. Dans le cadre d'une approche *surrogate*, ils ont développé un modèle permettant d'éviter une concentration forte dans un même lieu et de mieux répartir les flux en quantifiant l'attractivité touristique par une fonction d'utilité multi-attributs. Par ailleurs, Zhang & Qin (2017) proposent un modèle de programmation touristique multifactoriel des flux de déplacements de loisirs en milieu rural. Un modèle *Logit* propose d'équilibrer les charges de différents sites en prenant en compte deux facteurs, la distance entre les sites et le temps d'attente pour y accéder. Sur la base d'un modèle gravitaire, Xiao et al. (2013) ont développé un *shunt scheduling algorithm* visant à équilibrer les charges entre les sites en prenant également en compte l'attente des clients pour y accéder. Ces deux modèles d'équilibrage des charges ont permis d'augmenter la capacité globale de la zone touristique. Su et al. (2020) optimisé la programmation des flux de passagers d'un tourisme de loisirs rural en dispersant les visiteurs dans une région relativement vaste plutôt que dans des lieux fortement visités surtout les week-ends ou jours fériés. Ils ont cependant observé que peu de touristes sont attirés par d'autres lieux qui ne sont généralement pas loin de ces sites prisés et conseillent aux régulateurs régionaux du tourisme d'offrir à tous les visiteurs une expérience plus large qui permettrait de maximiser le bénéfice d'exploitation de toute la région. Leur algorithme d'optimisation itératif est basé sur la méthode d'optimisation par essais particuliers (Eberhart & Yuhui Shi, 2001) qui permet d'équilibrer la fréquentation des sites en prenant en compte un facteur d'insatisfaction de la clientèle dû à l'attente. L'objectif principal de leur modèle est de calculer la capacité globale à offrir en prenant en compte les

bénéfices attendus, la distance entre les sites mais aussi les départs de touristes insatisfaits. Leur modèle évalue le nombre de touristes dans un endroit surchargé qui devrait être dévié et calcule le besoin en capacité de ces endroits sous-chargés.

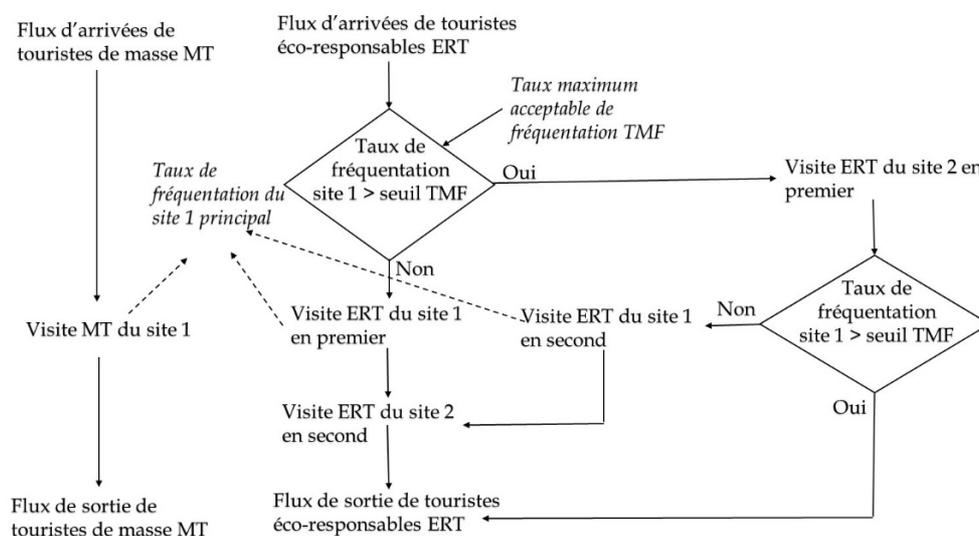
Ces différents travaux ne traitent pas le cas de comportements individuels éco-responsables et s'appuient pour la plupart sur des modes d'organisation et de pilotage centralisés.

## Modèle de dynamique des systèmes à partir d'un cas réaliste

### Règles de décision

Nous considérons deux types de touristes : un touriste de « masse » (MT) qui ne se soucie pas des taux d'affluence d'un site touristique majeur (site 1) et un touriste réflexif éco-responsable (ERT) qui évite la saturation du site 1 en choisissant de visiter avant ou après, un site secondaire (site 2) dans la même zone touristique. La figure 1 présente la logique de la prise de décision de ces ERTs. Les touristes MT arrivent tout au long d'une même journée selon une loi d'arrivée statistiquement connue et ne visitent que le site 1. La capacité d'accueil du site 1 est dimensionnée de telle sorte qu'elle soit supérieure au pic d'une fréquentation journalière correspondant à 100% de touristes MT. Les touristes ERTs arrivent également tout au long de la journée et décident, soit en consultant en temps réel le taux de fréquentation du site 1, soit en l'estimant en arrivant devant le site, de s'y rendre directement ou de visiter le site 2 secondaire dans les environs. Ils basent leur décision sur un taux maximum de fréquentation TMF qu'ils considèrent comme acceptable. Après avoir visité le site 1, ils visitent le site 2 puis quittent la zone touristique ou bien après avoir visité en premier le site 2, ils retournent vers le site 1 et décident, soit de le visiter, soit de quitter définitivement la zone si le taux d'occupation réel est supérieur au TMF.

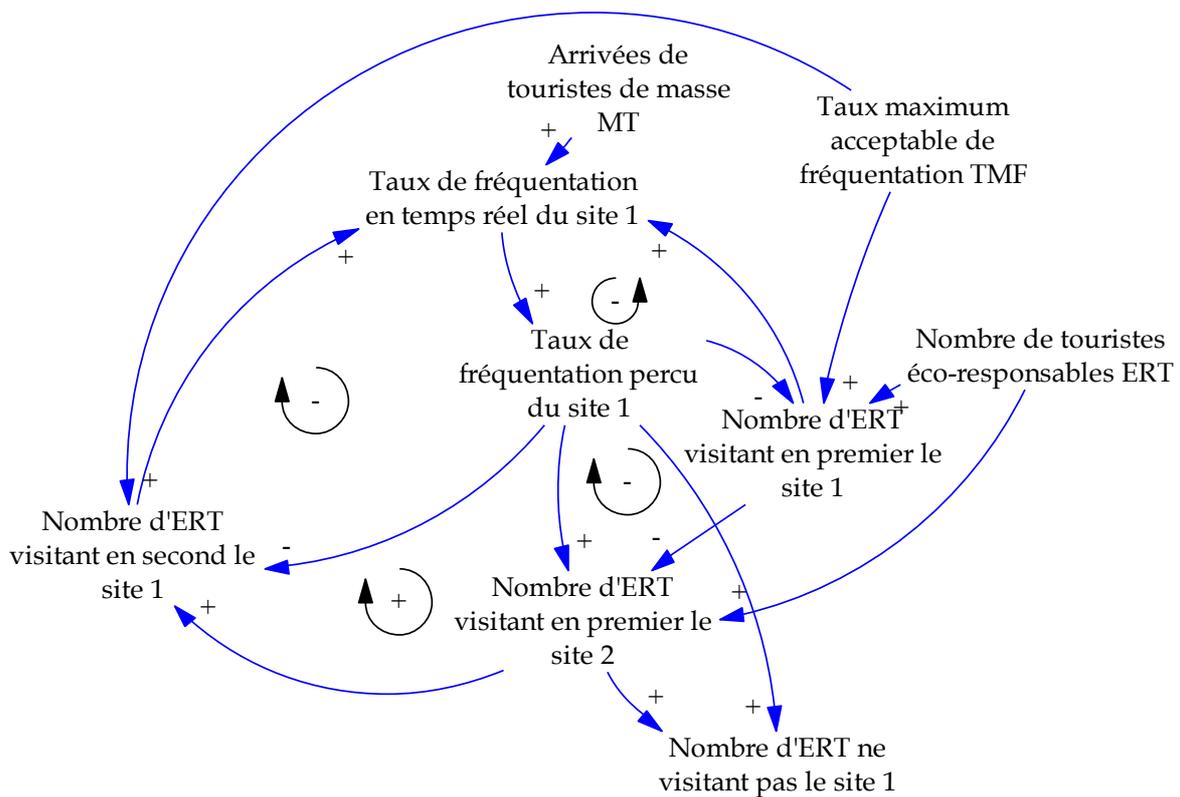
Figure 1 : Arbre de décision des touristes ERT



## Diagramme de causalité

L'un des concepts fondamentaux de la DS est la notion de rétroaction sur laquelle repose tout système dynamique (Richardson, 1991). Nous représentons qualitativement sous forme de diagramme causal (figure 2) les relations causales entre les différentes variables de décision individuelle des ERTs qui permettent d'auto-réguler les flux touristiques. L'indicateur le plus significatif est le taux de fréquentation en temps réel du site 1 principal que l'on cherche à réguler afin de réduire l'impact environnemental d'une sur-fréquentation. Les relations causales sont polarisées avec un signe + signifiant que la conséquence d'une variable causale va dans le même sens ou avec un signe - si l'effet évolue de manière opposée à la cause. Si le produit des signes des relations causales dans une boucle est négatif, il s'agit d'une boucle de rétroaction régulatrice et stabilisatrice (cas des boucles 1, 2 et 3). Si ce produit est positif, la boucle aura tendance à amplifier toute perturbation comme dans le cas de la boucle 4.

Figure 2 : Diagramme causal



Boucle 1 (-) de longueur 2 : Taux de fréquentation en temps réel du site 1 → Taux de fréquentation perçu du site 1 → Nombre d'ERT visitant en second le site 1 → Taux de fréquentation en temps réel du site 1

Boucle 2 (-) de longueur 2 : Taux de fréquentation en temps réel du site 1 → Taux de fréquentation perçu du site 1 → Nombre d'ERT visitant en premier le site 1 → Taux de fréquentation en temps réel du site 1

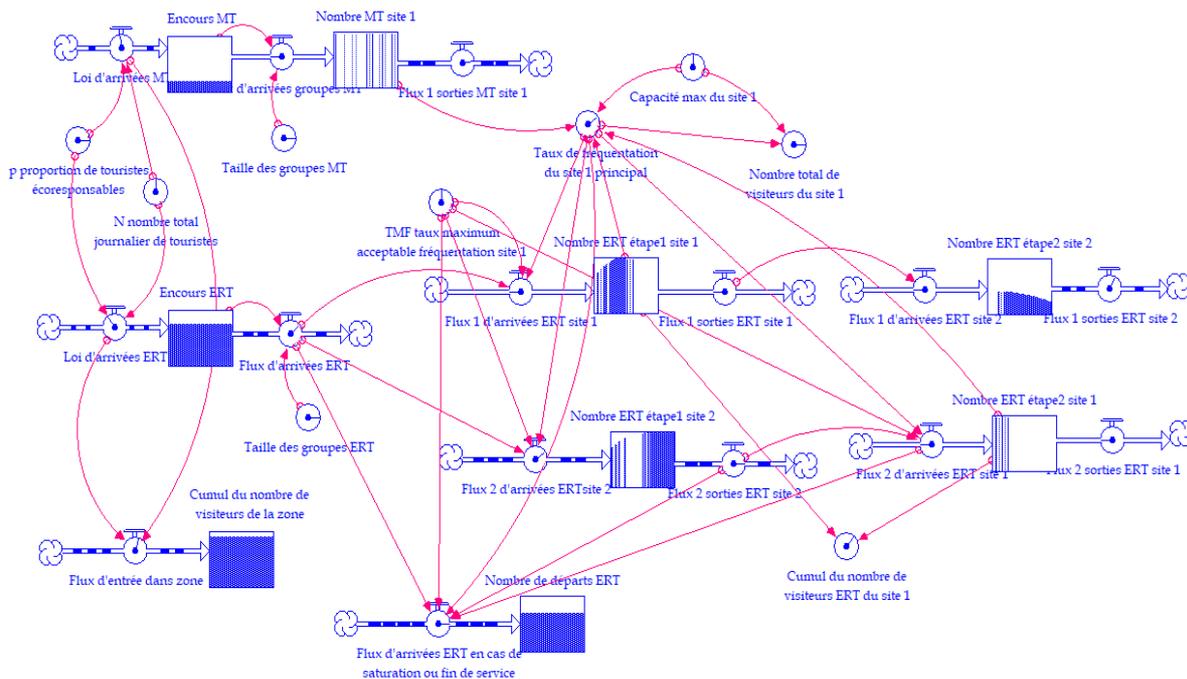
Boucle 3 (-) de longueur 3 : Taux de fréquentation en temps réel du site 1 → Taux de fréquentation perçu du site 1 → Nombre d'ERT visitant en premier le site 2 → Nombre d'ERT visitant en second le site 1 → Taux de fréquentation en temps réel du site 1

Boucle 4 (+) de longueur 4 : Taux de fréquentation en temps réel du site 1 → Taux de fréquentation perçu du site 1 → Nombre d'ERT visitant en premier le site 1 → Nombre d'ERT visitant en premier le site 2 → Nombre d'ERT visitant en second le site 1 → Taux de fréquentation en temps réel du site 1

## Modèle de dynamique des systèmes

Le diagramme causal facilite la construction du diagramme flux-stock (figure 3) à l'aide d'un logiciel de DS disposant d'une interface graphique et permettant de générer des équations aux différences finies (voir annexe 1). Les rectangles représentent les niveaux qui varient dans le temps en fonction des taux d'entrée et de sortie (semblables à des vannes). Les encours de touristes présents sur les deux sites à chaque instant  $t$  sont représentés par des variables de niveau de type « convoyeur » par analogie à une bande transporteuse où un produit se déplace sur la bande puis ressort à l'autre extrémité après un certain de temps de transit. Dans notre exemple, certaines équations évoluent de manière discontinue par morceaux, ce qui rend complexe et impossible à résoudre ce problème analytiquement. Nous avons donc recours à des méthodes de résolution approximatives d'Euler ou de Runge-Kutta intégrées dans le logiciel iThink® que nous avons utilisé pour simuler le modèle durant une période donnée (480 mn) avec un intervalle de temps  $dt = 1$ .

Figure 3 : Diagramme de stock et de flux



## Jeu de données réalistes

Durant une journée type donnée (par exemple durant les weekends ou une période de vacances...), nous supposons que l'arrivée des visiteurs sur un grand site touristique suit une courbe symétrique en forme de cloche avec une faible fréquentation en début et fin de journée, une croissance progressive jusqu'à atteindre le niveau de saturation en milieu de journée suivi par une lente décroissance l'après-midi. Le site principal (site 1) est ouvert de 10h à 18h et a une capacité maximale d'accueil à chaque instant  $t$  de 1400 touristes. Il est visité en moyenne par 3000 touristes par jour. Dans notre exemple, pour simplifier, nous représentons l'évolution  $y$  des arrivées de touristes en fonction du temps  $t$  par une équation parabolique concave :

$$y(t) = at^2 + bt \text{ avec } a = -0,00305 \text{ et } b = 1,098.$$

Les touristes arrivant en masse MT par groupe de 40 personnes, ne visitent que le site 1 pendant une durée moyenne de 2 heures puis quittent la zone touristique. En considérant une proportion  $p$  d'ERTs parmi la population soit  $(1-p)$  de MTs, l'évolution de leurs arrivées peut être représentée par la fonction  $(1-p)y(t)$  variant entre  $t = 0$  (à 10h du matin) et  $t = 360$  mn (à 16h soit deux heures avant la fermeture du site). Si aucun touriste ne se préoccupait du taux de saturation du site (c'est-à-dire si  $p = 0$ ), le site 1 serait très encombré entre 13h15 et 14h50 avec un taux de charge de plus de 95%.

Nous étudions l'impact d'une augmentation progressive de la proportion  $p$  d'ERTs sur le taux de fréquentation du site en considérant que leur flux d'arrivées à deux par véhicule en moyenne, suit la fonction  $p y(t)$ . Si le taux de fréquentation observé à leur arrivée est inférieur à un taux maximal acceptable de fréquentation (TMF) choisi entre 55% et 85%, les ERTs visiteront d'abord le site 1 puis se dirigeront vers le site 2. Dans le cas où le site 1 est saturé, ils iront d'abord visiter le site 2 situé dans la même zone touristique puis retenteront la visite du site 1 ou bien quitteront définitivement la zone si le taux de fréquentation est toujours supérieur au TMF (la priorité étant donnée aux TMs ayant réservé par avance l'horaire de leur visite).

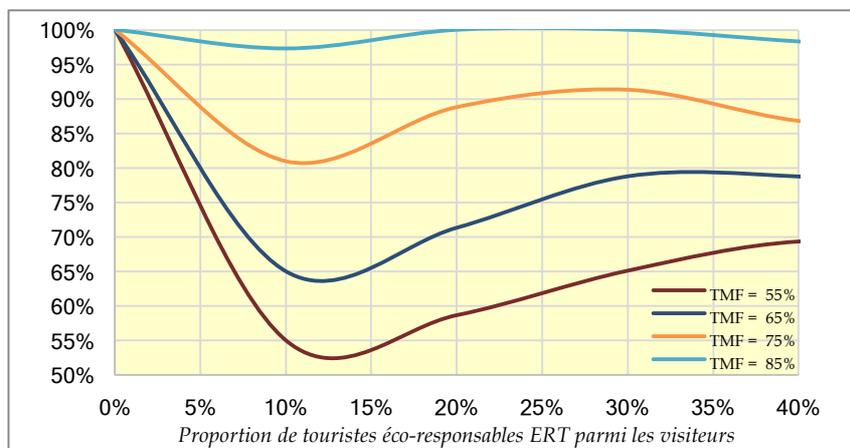
## Résultats de simulation

Les simulations du modèle de DS nous permettent tout d'abord d'évaluer les taux de satisfaction  $\theta$  des ERTs ayant pu visiter le site 1 en fonction de leur proportion  $p$  parmi tous les visiteurs et du choix de leur TMF. Les résultats numériques dépendent évidemment du jeu de données choisi, ce qui nous intéresse ce sont les différences relatives de  $\theta$  par rapport à  $p$  et TMF, deux variables explicatives. Puis nous étudions l'impact de leur comportement éco-responsable sur le taux de fréquentation  $\varphi_1$  du site 1 et enfin, les pertes économiques  $\alpha$  liées à leur refus de visiter le site majeur. Nous discutons également les études de sensibilité que nous avons effectuées sur la base de ce modèle et de son jeu de données réalistes.

## Taux de satisfaction

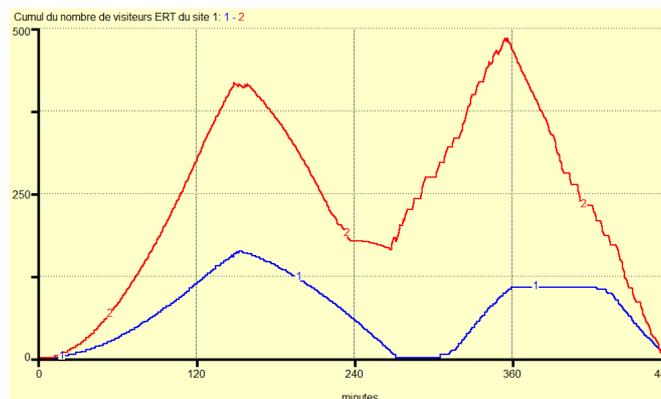
La figure 4 montre que si la proportion  $p$  d'ERTs croît de 0% à environ 12% au détriment des TMs, plus la proportion  $\theta$  parmi eux qui auront choisi de visiter le site 1 baisse et d'autant plus que leur TMF est faible (de 55% pour les plus exigeants). Cependant, au-delà de 12% d'ERTs parmi la population de visiteurs journaliers, le phénomène opposé est constaté et le pourcentage  $\theta$  d'ERTs satisfaits croît. Ce résultat anti-intuitif montre d'une part, une relation non-linéaire entre  $\theta$  et  $p$  et d'autre part, qu'il faut atteindre une proportion  $p$  importante pour que  $\theta$  soit élevé à condition que leur TMF ne soit pas trop faible comme dans le cas de 55%.

Figure 4 : Taux  $\theta$  d'ERTs ayant pu visiter le site 1 pour différents taux TMF

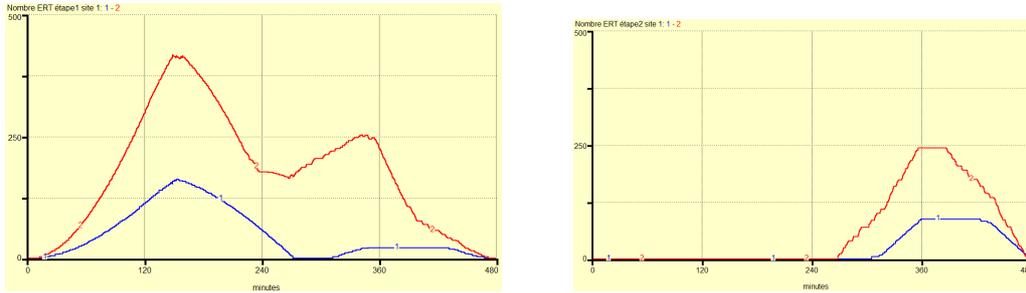


Pour expliquer ce résultat surprenant, la figure 5 montre l'évolution du nombre total d'ERTs sur le site 1 durant la journée. Dans le cas où  $p = 15%$  (taux élevé de pertes d'ERTs), les ERTs arrivent avant ou après leur visite du site 2 devant le site 1 principal (figure 6) au moment où le taux de fréquentation  $\varphi_1$  est élevé (voir figure 7) qui est dû à une proportion  $(1 - p)$  encore importante de TMs de 85%.  $\varphi_1$  étant supérieur au TMF de 75% explique qu'il y ait plus de pertes que dans le cas où  $p = 40%$  par exemple.

Figure 5 : Encours total d'ERTs en visite du site 1 pour  $p = 15%$  (en bleu) et  $40%$  (en rouge) avec un TMF = 75%



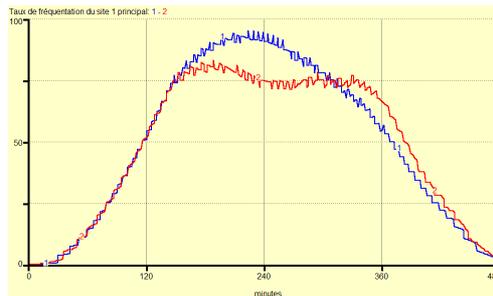
**Figure 6 :** Nombre d'ERTs visitant le site 1 avant le site 2 (à gauche) ou après (à droite) pour  $p = 15%$  (en bleu) et  $40%$  (en rouge) avec un TMF = 75%



### Taux de fréquentation du site principal

Quand  $p$  augmente, la fréquentation du site principal  $\phi_1$  se stabilise aux heures de pointe au niveau du TMF (75% dans l'exemple de la figure 7) réduisant ainsi l'impact environnemental.

**Figure 7 :** Taux de fréquentation  $\phi_1$  du site 1 pour  $p = 15%$  (en bleu) et  $40%$  (en rouge) avec un TMF = 75%



### Pertes économiques

Le comportement éco-responsable des ERTs qui consiste à ne pas se rendre au site 1 s'il est encore trop encombré après leur visite d'un site secondaire 2 conduit à un manque à gagner et une perte croissante de clientèle (voir tableau 1). Cette perte  $\alpha$  est d'autant plus élevée que le degré d'acceptabilité TMF est bas ce qui est logique.

**Tableau 1 :** Pertes  $\alpha$  de touristes ERTs ne visitant pas le site 1 saturé pour différents taux TMF

Nombre total de visiteurs ERP	$p$ proportion d'ERP	TMF =			
		85%	75%	65%	55%
0	0%	0	0	0	0
300	10%	8	58	106	136
450	15%	2	76	145	191
600	20%	0	67	172	248
900	30%	1	79	192	315
1200	40%	22	160	257	370

## Etude de sensibilité du modèle

Dans une situation réelle, le taux de fréquentation  $\varphi$  d'un grand site touristique n'est pas toujours connu de manière précise. Ce constat nous a amené à considérer que  $\varphi$  pourrait être décrit par une variable stochastique  $\varphi'$  qui influe directement les règles de décision des ERTs. Le modèle permettant d'étudier l'impact des comportements d'une proportion  $p$  d'ERTs sur  $\theta$ ,  $\varphi_1$  et  $\alpha$ , est modifié de telle façon que chaque ERT prend sa décision sur la base de données imprécises  $\varphi'_1$  tout en continuant à calculer les taux réels  $\varphi_1$ . Dans ce contexte d'incertitude, certains touristes consultent sur *google* les horaires d'affluence qui ne reflètent pas forcément la réalité. Nous avons simulé des valeurs de taux  $\varphi'_1$  uniformément distribués dans l'intervalle  $[(\varphi_1 - a), (\varphi_1 + a)]$  d'une étendue de  $2a$ . D'autres touristes préfèrent s'approcher du site pour estimer un taux  $\varphi'_1$  en observant le nombre de véhicules sur les parkings ou encore les files d'attente à l'entrée. Pour ce cas, nous avons simulé une distribution normale des valeurs de  $\varphi'_1$  avec une moyenne de  $\varphi_1$  et un écart-type plus ou moins important représentant l'amplitude probable de leurs erreurs d'estimation.

Dans les deux cas, les résultats de simulation bien que numériquement différents n'ont cependant pas modifié les constats précédents qui font l'originalité de cette recherche et qui démontrent également la robustesse du modèle.

## Conclusion

Les modèles de dynamique des systèmes (DS) appliqués au secteur touristique traitent pour la plupart des questions de développement et de durabilité. A notre connaissance, dans la littérature existante, la problématique de régulation des flux n'a été abordée par la modélisation qu'à travers la planification centralisée, l'optimisation mathématique et les méthodes heuristiques (Thiel et al., 2024). Notre recherche ne cherche pas à optimiser la gestion des flux mais à observer et à comprendre à l'aide d'un modèle de DS comment peuvent évoluer les flux au fur et à mesure que de nouveaux comportements réflexifs éco-responsables (ERTs) se développent parmi les visiteurs. Cette auto-régulation induite par des décisions individuelles déconcentrées diffère des courantes politiques de pilotage centralisé menées par les autorités. Plus précisément, il s'agissait d'étudier la transition vers un développement durable d'un tourisme mieux réparti permettant d'éviter des pics de fréquentation. Nous avons pris l'hypothèse que les ERTs décident individuellement d'organiser leur arrivée sur un grand site très prisé en visitant avant ou après un site secondaire à proximité selon le niveau d'affluence du site majeur. A partir d'un jeu de données réalistes et en modifiant certains paramètres de simulation, le modèle de DS nous a permis d'améliorer la compréhension de la dynamique de la gestion des flux en fonction de ce type de décision individuelle des ERTs. Une analyse des relations entre les boucles de rétroaction identifiées a pu, par induction, aisément être reliée aux processus du

monde réel (Richardson, 1996). Un résultat anti-intuitif a montré qu'au fur et à mesure que le nombre d'ERTs croissait au détriment du tourisme de masse, l'efficacité de l'auto-régulation évoluait de manière convexe. Contrairement à un modèle de simulation par événements discrets (Zeigler, 1976) qui aurait permis avec ce jeu de données particulier d'observer le même résultat, un modèle de DS facilite l'explication des causes de cette non-linéarité à l'aide des relations causales entre variables. Il facilite également la compréhension de ce système socio-économique complexe à travers le concept de rétroaction et la combinaison de plusieurs théories, comme la théorie des systèmes, la théorie du contrôle et la théorie de l'information.

Cette recherche présente cependant des limites. La validation du modèle s'est limitée à quelques tests de validation et d'incertitude ainsi que sur la confiance envers le modélisateur (Forrester & Senge, 1980) au niveau du degré de représentativité du modèle par rapport au monde réel. Par ailleurs, Sterman (1983) et Barlas (1996) suggèrent de réaliser des validations comportementale et structurelle des modèles de DS. La validation comportementale de notre modèle s'est basée sur un jeu de données réaliste et non sur des données historiques réelles. Quant à la validation structurelle, le modèle proposé nous a paru logiquement et empiriquement valide. Des tests de robustesse ont également été réalisés en introduisant des variables stochastiques.

Au niveau des perspectives de recherche, ce modèle de DS pourrait être complété par des données qualitatives concernant les comportements et les interactions entre visiteurs en s'appuyant sur des avis publiés en ligne et des taux de fréquentation en temps réel de ces sites. La notion de capacité de charge pourrait également être améliorée selon les recommandations de McCool & Lime (2001) travers le concept de *tourism or recreation carrying capacity*, dont les conditions nécessaires à leur établissement sont rarement réunies dans le monde réel.

En complément à une approche par la dynamique des systèmes, nous proposons d'aborder cette même problématique à l'aide d'une approche dynamique individu-centrée en prenant en compte l'espace. La modélisation multi-agents (MMA) est une classe de modèles informatiques composée d'agents autonomes et d'un environnement dans lequel ils agissent (Gilbert & Doran, 1993). Dans notre cas, les ERTs pourraient être considérés comme des agents indépendants ayant la même règle de décision que celle prise comme hypothèse dans cette recherche. Il serait également aisé de coupler ce modèle MMA avec des données géographiques comme couche d'arrière-plan représentant la zone touristique et les voies d'accès aux sites (Crooks et al., 2019).

## Références bibliographiques

BARLAS Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review*, 12(3), 183-210. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199623\)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199623)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4)

- CHEN K. C. (2004). Decision Support System for Tourism Development: System Dynamics Approach. *Journal of Computer Information Systems*, 45(1), 104-112. <https://doi.org/10.1080/08874417.2004.11645822>
- CROOCKS A., MALLESON N., MANLEY E., HEPPENSTALL A. (2019). *Agent-Based Modelling & Geographical Information Systems: A Practical Primer*. <https://doi.org/10.4135/9781529793543>
- EBERHART & YUHUI S. (2001). Particle swarm optimization: Developments, applications and resources. *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No.01TH8546)*, 1, 81-86. <https://doi.org/10.1109/CEC.2001.934374>
- FORRESTER J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. M.I.T. Press.
- FORRESTER J. W. (1990). *Principles of Systems*. Productivity Press.
- FORRESTER J. W., & Senge, P. M. (1980). Tests for building confidence in system dynamics models. *TIMS Studies in the Management Sciences*, 14, 209-228.
- GEARING C. E., SWART W. W., VAR T. (1976). *Planning for tourism development: Quantitative approaches*. Praeger.
- GILBERT G. N., DORAN J. (Éds.). (1993). *Simulating Societies: The computer simulation of social processes*. UCL Press.
- KNAFOU R. (2017). Le tourisme réflexif, un nouveau fondement d'un tourisme durable. *Arbor*, 193(785), Article 785. <https://doi.org/10.3989/arbor.2017.785n3001>
- LADANY S. P. (Éd.). (1975). *Management science applications to leisure-time operations*. North-Holland Pub. Co. ; American Elsevier Pub. Co.
- McCOOL S. F., LIME D. W. (2001). Tourism Carrying Capacity : Tempting Fantasy or Useful Reality? *Journal of Sustainable Tourism*, 9(5), Article 5. <https://doi.org/10.1080/09669580108667409>
- MIHALIC T. (2020). Conceptualising overtourism : A sustainability approach. *Annals of Tourism Research*, 84, 103025. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2020.103025>
- PAN B. D. (2023). Forecasting Tourist Visitor by System Dynamics Analysis A Case Study in Iran. *International Journal of Industrial Engineering and Operational Research*, 5(4), Article 4.
- PECHLANER H., INNERHOFER E., ERSCHBAMER G. (2020). *Overtourism: Tourism Management and Solutions*. Routledge.
- PEETERS P. & al. (2018). *Research for TRAN Committee – Overtourism: Impact and possible policy responses*. 260.
- PELTIER D. (2018). *Venice Tourism Checkpoints Are a Sign of Europe's Fractured Approach to Overtourism*. <https://skift.com/2018/05/02/venice-tourism-checkpoints-are-a-sign-of-europes-fractured-approach-to-overtourism/>
- RAN W. (2012, juillet 22). *A System Dynamics Approach to Exploring Sustainable Tourism Development*. The 30th International Conference of the System Dynamics Society, St. Gallen, Switzerland.
- RICHARDSON G. P. (1991). System Dynamics : Simulation for Policy Analysis from a Feedback Perspective. In P. A. Fishwick & P. A. Luker (Éds.), *Qualitative Simulation*

*Modeling and Analysis* (p. 144-169). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9072-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9072-5_7)

SCHIANETZ K., KAVANAGH L., LOCKINGTON D. (2007). The Learning Tourism Destination: The potential of a learning organisation approach for improving the sustainability of tourism destinations. *Tourism Management*, 28(6), 1485-1496. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2007.01.012>

SEDARATI P., SANTOS, S., PINTASSILGO P. (2019). System Dynamics in Tourism Planning and Development. *Tourism Planning & Development*, 16(3), 256-280. <https://doi.org/10.1080/21568316.2018.1436586>

SERAPHIN H., SHEERAN P., PILATO M. (2018). Over-tourism and the fall of Venice as a destination. *Journal of Destination Marketing & Management*, 9, 374-376. <https://doi.org/10.1016/j.jdmm.2018.01.011>

SHAFIEE S., JAHANYAN S., GHATARI A. R., HASANZADEH A. (2023). Developing sustainable tourism destinations through smart technologies: A system dynamics approach. *Journal of Simulation*, 17(4), 477-498. <https://doi.org/10.1080/17477778.2022.2030656>

STERMAN J. D. (1983). Appropriate Summary Statistics for Evaluating the Historical Fit of System Dynamics Models. *Dynamica*, 10, 51-66.

SU F., DUAN C., WANG R. (2020). Optimization Model and Algorithm Design for Rural Leisure Tourism Passenger Flow Scheduling. *IEEE Access*, 8, 125295-125305. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007180>

SWART W. W., VAR T., GEARING, C. E. (1978). Operations research applications to tourism. *Annals of Tourism Research*, 5(4), Article 4. [https://doi.org/10.1016/0160-7383\(78\)90321-3](https://doi.org/10.1016/0160-7383(78)90321-3)

TAN W.-J., YANG C.-F., CHATEAU P.-A., LEE M.-T., CHANG Y.-C. (2018). Integrated coastal-zone management for sustainable tourism using a decision support system based on system dynamics: A case study of Cijin, Kaohsiung, Taiwan. *Ocean & Coastal Management*, 153, 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.12.012>

THIEL D., LEROUX, E., LABARBE E. (2024). Optimizing shared recreational vehicle service areas: A multi-strategy approach for economic performance and user satisfaction. *Tourism Economics*, 30(6), 1465-1491. <https://doi.org/10.1177/13548166231214573>

UNWTO, World Tourism Organization. (2019). 'Overtourism'? *Understanding and Managing Urban Tourism Growth beyond Perceptions Volume 2: Case Studies*. Centre of Expertise Leisure, Tourism & Hospitality, NHTV Breda University of Applied Science, & NHL Stenden University of Applied Sciences (Éds.). <https://doi.org/10.18111/9789284420643>

VUGTEVEEN P., ROUWETTE E., STOUTEN H., VAN KATWIJK M. M., HANSEN L. (2015). Developing social-ecological system indicators using group model building. *Ocean & Coastal Management*, 109, 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.02.011>

WALKER P. A., GREINER R., MCDONALD D., LYNE V. (1998). The Tourism Futures Simulator : A systems thinking approach. *Environmental Modelling & Software*, 14(1), 59-67. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00033-4](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00033-4)

WALSH S. J., MENA C. F. (2016). Interactions of social, terrestrial, and marine sub-systems in the Galapagos Islands, Ecuador. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(51), 14536-14543. <https://doi.org/10.1073/pnas.1604990113>

XIAO X. H., GE P., ZHU H. M., REN P. Y., ZHENG W., ZHANG X. (2013). A study of tourists' gravity shunt scheduling model in travel peak season : A case study of Jiuzhaigou Scenic Area. *Tourism Science*, 27(6), Article 6.

ZEIGLER B. P. (avec Internet Archive). (1976). *Theory of modelling and simulation*. New York : Wiley. <http://archive.org/details/theoryofmodellin0000zeig>

ZHANG X. B., QIN Z. X. (2017). The peak period travel route optimization scheduling simulation research. *Computer Simulation*, 34(5), 243-246.

## Annexe 1

### **Encours de visite de touristes réflexifs éco-responsables (ERT)**

Encours\_ERT(t) = Encours\_ERT(t - dt) + (Loi\_d'arrivées\_ERT - Flux\_d'arrivées\_ERT) \* dt

*Valeur initiale*

Encours\_ERT = 0

### *Taux d'arrivée des touristes réflexifs éco-responsables (ERT)*

Loi\_d'arrivées\_ERT = if time <360 then

1.36\*(N\_nombre\_total\_journalier\_de\_touristes\*p\_proportion\_de\_touristes\_écoresponsables\*(-0.00305 \*time^2 + 1.0981\*time)/(10000\*323)) else 0

### *Taux de sortie de la zone touristique des touristes éco-responsables (ERT)*

Flux\_d'arrivées\_ERT = if Encours\_ERT >= Taille\_des\_groupes\_ERT then

Encours\_ERT else 0

### **Encours de visite de touristes de masse MT**

Encours\_MT(t) = Encours\_MT(t - dt) + (Loi\_d'arrivées\_MT -

Flux\_d'arrivées\_groupes\_MT) \* dt

*Valeur initiale*

Encours\_MT = 0

### *Taux d'arrivée des touristes de masse (MT)*

Loi\_d'arrivées\_MT = if time <360 then

1.36\*(N\_nombre\_total\_journalier\_de\_touristes\*(100-p\_proportion\_de\_touristes\_écoresponsables)\*(-0.00305 \*time^2 + 1.0981\*time)/(10000\*323)) else 0

### *Taux de sortie de la zone touristique des touristes de masse (MT)*

Flux\_d'arrivées\_groupes\_MT = if Encours\_MT >= Taille\_des\_groupes\_MT then

Encours\_MT else 0

### **Nombre de touristes éco-responsables ERTs quittant la zone touristique trop saturée**

Nombre\_de\_départs\_ERT(t) = Nombre\_de\_départs\_ERT(t - dt) +

(Flux\_d'arrivées\_ERT\_en\_cas\_de\_saturation\_ou\_fin\_de\_service) \* dt

*Valeur initiale*

Nombre\_de\_départs\_ERT = 0

### *Flux d'arrivée d'ERTs en cas de surfréquentation du site 1 ou de cloture du service*

Flux\_d'arrivées\_ERT\_en\_cas\_de\_saturation\_ou\_fin\_de\_service = if

Taux\_de\_fréquentation\_du\_site\_1\_principal > TMF\_taux\_maximum\_acceptable\_fréqu

entation\_site\_1 then ( if Flux\_2\_d'arrivées\_ERT\_site\_1= 0 then  
Flux\_2\_sorties\_ERT\_site\_2 else 0) else (if time > 360 then Flux\_d'arrivées\_ERT else 0)

**Nombre de touristes éco-responsables ERTs visitant en premier le site 1 principal**

Nombre\_ERT\_étape1\_site\_1(t) = Nombre\_ERT\_étape1\_site\_1(t - dt) +  
(Flux\_1\_d'arrivées\_ERT\_site\_1 - Flux\_1\_sorties\_ERT\_site\_1) \* dt  
INIT Nombre\_ERT\_étape1\_site\_1 = 0

*Valeurs initiales*

Nombre\_ERT\_étape1\_site\_1 = 0

TRANSIT TIME = 120

*Flux d'arrivée d'ERTs au site 1 avant visite du site 2*

Flux\_1\_d'arrivées\_ERT\_site\_1 = if time <= 360 then (if  
Taux\_de\_fréquentation\_du\_site\_1\_principal<=TMF\_taux\_maximum\_acceptable\_fréqu  
entation\_site\_1 then Flux\_d'arrivées\_ERT else 0) else 0

*Flux de sortie ERTs du site 1 et départ vers site 2*

Flux\_1\_sorties\_ERT\_site\_1 = CONVEYOR OUTFLOW

**Nombre de touristes éco-responsables ERTs visitant en premier le site 2 secondaire**

Nombre\_ERT\_étape1\_site\_2(t) = Nombre\_ERT\_étape1\_site\_2(t - dt) +  
(Flux\_2\_d'arrivées\_ERTsite\_2 - Flux\_2\_sorties\_ERT\_site\_2) \* dt

*Valeurs initiales*

Nombre\_ERT\_étape1\_site\_2 = 0

TRANSIT TIME = 120

*Flux d'arrivées ERTs au site 2 après visite du site 1*

Flux\_2\_d'arrivées\_ERTsite\_2 = if  
Taux\_de\_fréquentation\_du\_site\_1\_principal>TMF\_taux\_maximum\_acceptable\_fréqu  
entation\_site\_1 then Flux\_d'arrivées\_ERT else 0

*Flux de sorties d'ERTs du site 2 et départ de la zone touristique*

Flux\_2\_sorties\_ERT\_site\_2 = CONVEYOR OUTFLOW

**Nombre de touristes éco-responsables ERTs sur le site 1 principal après avoir visité le site 2**

Nombre\_ERT\_étape2\_site\_1(t) = Nombre\_ERT\_étape2\_site\_1(t - dt) +  
(Flux\_2\_d'arrivées\_ERT\_site\_1 - Flux\_2\_sorties\_ERT\_site\_1) \* dt  
INIT Nombre\_ERT\_étape2\_site\_1 = 0

*Valeurs initiales*

Nombre\_ERT\_étape2\_site\_1 = 0

TRANSIT TIME = 120

*Flux d'arrivée d'ERTs au site 1 après visite du site 2*

Flux\_2\_d'arrivées\_ERT\_site\_1 = if time <= 360 then (if  
Taux\_de\_fréquentation\_du\_site\_1\_principal <= TMF\_taux\_maximum\_acceptable\_fréq  
uentation\_site\_1 then Flux\_2\_sorties\_ERT\_site\_2 else 0) else 0

*Flux de sortie ERTs du site 1 et départ de la zone touristique*

Flux\_2\_sorties\_ERT\_site\_1 = CONVEYOR OUTFLOW

***Nombre de touristes éco-responsables ERTs sur le site 2 secondaire après avoir visité le site 1***

Nombre\_ERT\_étape2\_site\_2(t) = Nombre\_ERT\_étape2\_site\_2(t - dt) +  
(Flux\_1\_d'arrivées\_ERT\_site\_2 - Flux\_1\_sorties\_ERT\_site\_2) \* dt

INIT Nombre\_ERT\_étape2\_site\_2 = 0

*Valeurs initiales*

Nombre\_ERT\_étape2\_site\_2 = 0

TRANSIT TIME = 120

*Flux d'arrivée d'ERTs au site 2 après visite du site 1*

Flux\_1\_d'arrivées\_ERT\_site\_2 = Flux\_1\_sorties\_ERT\_site\_1

*Flux de sortie d'ERTs du site 2*

Flux\_1\_sorties\_ERT\_site\_2 = CONVEYOR OUTFLOW

***Nombre de touristes de masse MT sur le site 1 principal***

Nombre\_MT\_site\_1(t) = Nombre\_MT\_site\_1(t - dt) + (Flux\_d'arrivées\_groupes\_MT -  
Flux\_1\_sorties\_MT\_site\_1) \* dt

INIT Nombre\_MT\_site\_1 = 0

*Valeurs initiales*

Nombre\_MT\_site\_1 = 0

TRANSIT TIME = 120

*Flux d'arrivée des touristes de masse au site principal*

Flux\_d'arrivées\_groupes\_MT = if Encours\_MT >= Taille\_des\_groupes\_MT then  
Encours\_MT else 0

*Flux de départ des touristes de masse au site principal*

Flux\_1\_sorties\_MT\_site\_1 = CONVEYOR OUTFLOW

### **Variables auxiliaires**

Taux\_de\_remplissage\_site\_1\_principal  
=100\*(Nombre\_MT\_site\_1+Nombre\_ERT\_étape1\_site\_1+Nombre\_ERT\_étape2\_site\_1  
)/Capacité\_max\_du\_site\_1

*Cumul des arrivées de visiteurs dans la zone touristique*

Cumul\_du\_nombre\_de\_visiteurs\_de\_la\_zone(t) =

Cumul\_du\_nombre\_de\_visiteurs\_de\_la\_zone(t - dt) + (Flux\_d'entrée\_dans\_zone) \* dt

INIT Cumul\_du\_nombre\_de\_visiteurs\_de\_la\_zone = 0

*Taux d'arrivée des visiteurs dans la zone touristique*

Flux\_d'entrée\_dans\_zone = Loi\_d'arrivées\_ERT+Loi\_d'arrivées\_MT

*Cumul des arrivées de visiteurs sur le site 1*

Cumul\_du\_nombre\_de\_visiteurs\_ERT\_du\_site\_1 =

Nombre\_ERT\_étape1\_site\_1+Nombre\_ERT\_étape2\_site\_1

*Encours de visiteurs sur le site 1*

Nombre\_total\_de\_visiteurs\_du\_site\_1 =

Taux\_de\_remplissage\_site\_1\_principal\*Capacité\_max\_du\_site\_1

*Encours de visiteurs sur le site 2*

Nombre\_total\_de\_visiteurs\_du\_site\_2 =

Nombre\_ERT\_étape1\_site\_2+Nombre\_ERT\_étape2\_site\_2

### **Constantes**

Capacité\_max\_du\_site\_1 = 1400

N\_nombre\_total\_journalier\_de\_touristes = 3000

p\_proportion\_de\_touristes\_réflexifs = de 0% à 40%

Taille\_des\_groupes\_MT = if time <= 360 then 40 else 0

Taille\_des\_groupes\_ERT = if time <= 360 then 2 else 0

TMF\_taux\_maximum\_acceptable\_fréquentation\_site\_1 = de 55% à 85%