



Comment le modèle Daisyworld peut-il contribuer à l'hypothèse Gaïa?

Sébastien Dutreuil

► To cite this version:

Sébastien Dutreuil. Comment le modèle Daisyworld peut-il contribuer à l'hypothèse Gaïa?. Franck Varenne et Marc Silberstein. Modéliser & simuler. Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation, tome 1, 2013, Modéliser & simuler. Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation, tome 1, 978-2-919694-37-2. <<http://www.materiologiques.com/Modeliser-simuler-Epistemologies>>. <hal-01109173>

HAL Id: hal-01109173

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01109173>

Submitted on 25 Jan 2015

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.

Comment le modèle *Daisyworld* peut-il contribuer à l'hypothèse Gaïa?

Sébastien Dutreuil

27 décembre 2013

Résumé

Le modèle *Daisyworld* décrit une planète imaginaire sur laquelle une régulation de la température émerge grâce au couplage fort entre la vie et son environnement. Cette simulation numérique était initialement construite pour répondre à une critique théorique visant l'hypothèse Gaïa (HG). En précisant la portée épistémique de *Daisyworld* et la nature des critiques adressées à HG puis à *Daisyworld* nous examinons sous quelles conditions un tel modèle peut contribuer positivement au débat théorique qui l'a fait naître. Nous montrons que certains résultats sont robustes, originaux, et pertinents pour HG.

The *Daisyworld* model describes an imaginary planet on which a regulation of the temperature emerges out of a strong coupling between life and its environment. This numerical simulation was initially created to answer to a theoretical critique addressed to the Gaïa hypothesis (GH). By precisising the epistemic reach of *Daisyworld* and the nature of the critiques made to GH and then to *Daisyworld* we assess under which conditions such a model can contribute to the theoretical debate that brought it to existence. We show that certain results are robust, originals and relevant for GH.

La version définitive et éditée de ce travail se trouve dans le livre *Modéliser et simuler. Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation, tome 1*, sous la direction de Franck Varenne et Marc Silberstein, Editions Matériologiques, 2013.

<http://www.materiologiques.com/Modeliser-simuler-Epistemologies>

Table des matières

1	Nature de la controverse autour de HG	3
1.1	Le projet de HG.	3
1.2	Les deux critiques principales.	4
1.3	Manières de répondre et réponses aux critiques.	4
2	Modèle original : description, résultats, critiques	6
2.1	Description du modèle original	6
2.2	Résultats	8
2.3	Quatre critiques principales, un ajout	9
3	Explanandum de HG, explanandum de Daisyworld	14
3.1	Stabilité, homéostasie, régulation, auto-régulation : un <i>explanandum</i> cybernétique.	14
3.2	De la régulation à l'habitabilité.	17
3.3	Optimisation et asymétrie des rôles de l'environnement et de la vie.	18
3.4	Trois questions centrales à Gaïa, <i>Daisyworld</i> ne peut en adresser que deux	20
4	Evolution de <i>Daisyworld</i> et réponses aux critiques.	21
4.1	Rendre explicites les hypothèses du modèle	22
4.2	Des variantes de <i>Daisyworld</i> importantes mais ne permettant pas de répondre aux critiques	24
4.3	Répondre à la critique C1 sur l'idiosyncrasie du modèle	26
4.4	Répondre à la critique C2 et à celle sur l'altruisme, première tentative : l'introduction de "tricheurs"	30
4.5	Répondre à la critique C2bis et à celle sur l'altruisme, seconde tentative : les produits dérivés de la sélection	31
4.6	Répondre à la critique C3 : simplicité du modèle et complexité du monde	33
4.7	Conclusion partielle : la perspective de HG déduite de l'analyse de ses modèles	33
5	Nature du modèle et portée épistémique	34
5.1	Ce qu' <i>est</i> un modèle, une simulation, une fiction : métaphysique et épistémologie	35
5.2	Ce que fait un modèle	39
5.3	Pourquoi devons-nous avoir confiance dans ce que font les modèles?	41
6	Conclusion	43

L'hypothèse Gaïa (HG) suggère au début des années 1970 que la vie pourrait, par son influence sur l'environnement, participer à la régulation de certaines variables environnementales à l'échelle globale et ainsi contribuer au maintien de l'habitabilité de la planète. HG laisse des impressions contrastées. Elle est controversée par la plupart des philosophes de la biologie et biologistes évolutionnistes qui en retiennent pour l'essentiel une méthodologie douteuse (vitalisme, propos finalistes non légitimes, anti-réductionisme démesuré¹, schèmes explicatifs extravagants²) et un contenu théorique discutabile (une métaphore vague entre la Terre et un organisme plus proche d'une poésie pour *New-Agers* que de la science³). Cela tient pour beaucoup à la critique que Dawkins et Doolittle portent au début des années 1980 : la Terre n'étant pas soumise à sélection et la sélection naturelle étant la seule explication disponible pour rendre compte des régulations fonctionnelles des organismes, HG doit être abandonnée⁴. Les partisans de HG voudraient faire droit aux évolutions qui ont eu lieu depuis. Premièrement l'hypothèse s'est progressivement débarrassée de formules malheureuses (téléologiques, métaphoriques, ...). Deuxièmement elle s'est structurée théoriquement au sein d'une littérature conséquente à laquelle participent géologues, climatologues, écologues, etc., ce qui a donné lieu à des réponses (sérieuses) aux critiques de Dawkins et Doolittle. Enfin, troisièmement, elle est à l'origine de champs disciplinaires nouveaux (et non controversés) en sciences de la Terre, création de disciplines pour laquelle Lovelock reçoit la plus haute distinction de la société géologique de Londres en 2006 (médaille Wollaston).

A la suite de la critique du début des années 1980, l'élaboration de HG s'est faite - principalement en sciences de la Terre - dans trois directions : (i) la création de modèles computationnels initiée par la publication du modèle *Daisyworld* par Watson & Lovelock (1983) - on fera référence au modèle initial publié dans cet article par WL -, (ii) le développement d'arguments théoriques (sur le rôle de la sélection naturelle, ce qu'est une régulation, etc.), et (iii) des découvertes empiriques. Nous nous intéressons ici à la particularité du modèle *Daisyworld* et de ses variantes ainsi qu'au rôle joué par ces modèles relativement aux découvertes empiriques et arguments théoriques⁵.

Daisyworld décrit une planète "imaginaire" ayant un climat proche de celui de la Terre, peuplée de pâquerettes (*daisies*) blanches et noires. Le climat influence la croissance des pâquerettes et est influencé en retour par la proportion relative des pâquerettes qui modifient l'albédo moyen de la planète. Une régulation de la température proche de l' "optimum biologique" émerge de ce système. Le modèle est souvent présenté comme attestant

"qu'une auto-régulation *peut* émerger sans téléologie dans un système de *feedbacks* où la vie est couplée à son environnement abiotique. Cela ne devrait surprendre personne formé en théorie des systèmes. Dans n'importe quel système couplé avec un mélange d'effets positifs et négatifs formant de multiples boucles de rétroaction il y a de bonnes chances que le système se stabilise dans un régime de *feedback* négatif" Lenton & Williams (2009), p. 63, nous soulignons.

A la critique théorique selon laquelle seule la sélection naturelle peut "créer" de l'ordre on oppose une

1. Lewontin (1992, 2001), resp. p. 18 et 109.

2. Godfrey-Smith (2009a), p. 144.

3. Gould (2002), p. 612

4. Dawkins (1982); Doolittle (1981).

5. Il n'est ni une synthèse sur l'ensemble de HG (son évolution historique, les raisons de la controverse, etc.), ni une revue sur *Daisyworld per se* ou sur les modèles en général.

simulation numérique qui semble constituer une preuve de principe qui montre que de l'ordre émerge dans un système cybernétique couplant la vie et son environnement. Une littérature conséquente, exclusivement consacrée à des variations sur *Daisyworld* s'est ensuite développée en parallèle, et parfois en marge de HG.

Je voudrais ici soulever deux types de questions. La première question qui m'intéresse est ce que *peut accomplir* un modèle (computationnel), ce qu'il peut faire, et à quelles conditions il peut faire ce qu'on voudrait qu'il fasse. On peut ensuite (deuxième type de questions) s'interroger sur les raisons que l'on a à produire des modèles (plutôt qu'autre chose : arguments théoriques verbaux, découvertes empiriques) qui accomplissent ce que nous pensons qu'ils accomplissent. Pour résumer : que peut faire un modèle et pourquoi, dans une situation particulière, voulons-nous faire ce que les modèles nous permettent de faire ? La première question empruntera à un terrain relativement balisé de philosophie générale des sciences (qu'est-ce qu'un modèle ou une simulation numérique ? pourquoi devons-nous avoir confiance en certains modèles ? etc.) mais devra aussi s'intéresser de près aux hypothèses qui sont faites par les modèles (suivant ainsi la conception répandue qu'un modèle est aussi bon que ses hypothèses le sont, que l'on montre à peu près ce que l'on veut à condition de bien choisir hypothèses et paramètres, etc.). Le second type de question est plus proche des discussions sur les liens entre théorie et modèle. Il a été proposé et montré ailleurs que les modèles finissent par acquérir une vie propre⁶ (*life of their own*) : certaines techniques de simulation sont réutilisées par une communauté qui se structure autour de cette technique particulière, de ce modèle initial ; ces chercheurs peuvent alors se poser des questions différentes de celle initialement posée, si bien que le modèle acquiert une vie détachée du cadre théorique dans lequel il est né. Je signalerai que *Daisyworld* constitue un excellent exemple de ce genre de parcours mais indiquerai qu'un travail épistémologique sur les modèles ne doit pas se restreindre à la description de cet état de fait mais également participer à étudier la pertinence de certaines variantes du modèle pour la question théorique initiale.

Daisyworld a été originellement créé pour apporter des arguments au sein d'une controverse sur HG : la première section rappelle ce cadre théorique initial. La seconde section décrit le modèle original, ses résultats, et rassemble la diversité de critiques que l'on peut adresser à ce modèle. La troisième section s'attarde sur une des difficultés de HG - la définition de ce qu'elle cherche à expliquer - et montre comment le flou de l'*explanandum*⁷ de HG rejaillit sur celui de *Daisyworld*. Cette section est l'occasion de préciser les questions de HG auxquelles *Daisyworld* a contribué, aurait pu et pourrait encore le faire. Dans la section suivante nous montrons les évolutions de *Daisyworld* et la manière dont celles-ci peuvent (ou non) et ont prétendu (à raison ou à tort) contribuer à répondre à certaines des critiques formulées à l'encontre de WL. La dernière section s'intéresse à la singularité du modèle *Daisyworld* - un modèle simple qui semble décrire des entités fictionnelles (pâquerettes) - et s'attache à comprendre l'intérêt de ce type de modèle

6. e.g. Winsberg (2003).

7. Une distinction classique de philosophie générale des sciences entre le phénomène qu'il y a à expliquer - *explanandum* - et ce qui explique ce phénomène - *explanans* - est utilisée à plusieurs reprises dans ce texte, cf. Hempel & Oppenheim (1948) sur cette distinction.

aussi bien que les raisons pour lesquelles nous pouvons avoir confiance dans certains de ses résultats.

1 Nature de la controverse autour de HG

Cette section vise à exposer les difficultés théoriques que rencontre HG pour comprendre le contexte initial du développement de *Daisyworld* et la portée épistémique qui lui était assignée.

Le parti pris de cet article est que les exposés qui font de HG une hypothèse "aux bordures de la science"⁸ reposent sur une lecture basée pour l'essentiel soit sur une caricature des premiers écrits sur HG⁹, soit sur une lecture de HG qui se résume aux quelques pages, critiques, que Dawkins lui consacre dans *Le Phénotype étendu* ; ou, mieux, s'il est parfaitement *possible* (et facile) d'isoler certaines phrases malheureuses de Lovelock et d'en dresser le portrait et la critique que l'on rencontre fréquemment, cela n'a pu se faire, rétrospectivement, qu'en grossissant artificiellement l'importance de celles-ci et en oubliant certaines originalités et spécificités du projet initial et ne peut se faire, aujourd'hui, qu'au prix d'une méconnaissance des découvertes et avancées des trente dernières années. Les ambitions métaphysiques et méthodologiques ont été largement exagérées (ou si l'on veut, sélectionnées) par une lecture trop "philosophique" au mauvais sens du terme, lecture qui exagère et force les traits pour mieux s'y opposer, qui amplifie et caricature pour mieux critiquer et combattre héroïquement - et à peu de frais - la chimère qu'elle a créée¹⁰. Il ne s'agit pas ici de reconduire une rhétorique de la victime - l'ensemble de la communauté en voudrait à HG pour des raisons qui ne sont pas fondées rationnellement mais qui tiendraient à la fermeture d'esprit de certains chercheurs sur leurs disciplines -, amplement déployée par Lovelock et critiquée non sans raison par Kirchner¹¹, mais de montrer que si justifiées que soient *certaines* critiques il reste bien quelque chose de HG une fois celles-ci prises en compte.

1.1 Le projet de HG.

Moins que d'expliquer le monde à travers une analogie ou un projet métaphysique, l'ambition initiale de Lovelock et Margulis était d'initier de nouvelles questions qui émergeaient d'un rapprochement disciplinaire entre biologie et sciences de la Terre. A la fin des années 1960, Lovelock, impliqué dans un projet de recherche de la NASA visant à trouver des critères permettant de détecter la présence éventuelle de vie sur d'autres planètes, remarque que l'atmosphère terrestre présente un déséquilibre thermodynamique important (du méthane et de l'oxygène y coexistent), contrairement à celles de Vénus et de Mars, et que ce déséquilibre est maintenu par l'influence de la vie sur son environnement. Lovelock et Margulis s'étonneront, plus tard, du fait que la planète soit restée continuellement habitable en dépit de perturbations

8. Sarkar & Plutynski (2010), p.23.

9. Lovelock & Margulis (1974); Lovelock (1979).

10. Pour une analyse du rôle de l'analogie dans le cas de HG, voir Dutreuil (2012b). On trouverait ce même défaut d'exagération et d'amplification conceptuelle qui mène à des oppositions artificielles et des faux débats dans un cas similaire, celui de la vision organismique des communautés que proposait Clements, particulièrement bien analysé par Christopher Eliot (2007, 2011).

11. Kirchner (2003), p.41,42.

externes dont la plus manifeste est l'augmentation continue de la luminosité solaire : depuis la naissance de la Terre la luminosité solaire a augmenté de plus de 30% sans que le climat ne devienne intolérable pour la vie. Ces deux faits invitent les auteurs à suggérer - comme hypothèse, comme source de questions, d'interrogations - que l'influence de la vie sur son environnement *pourrait* permettre une régulation de certaines variables environnementales face aux perturbations et contribuer ainsi à maintenir la planète habitable.

1.2 Les deux critiques principales.

Si l'exposé qu'une partie de la biologie évolutionnaire fait de HG (métaphore extravagante) me semble erroné, les critiques qui sont ensuite portées à HG me paraissent (à condition de les préciser) au moins partiellement légitimes et ont, elles, contribué à l'élaboration théorique de HG.

La première critique concerne le statut de la Terre vis-à-vis de la sélection naturelle. Les prémisses de la critique sont : (i) la reproduction est une condition nécessaire à ce qu'il y ait sélection naturelle, (ii) la sélection naturelle est le *seul* schème explicatif disponible pour rendre compte des régulations fonctionnelles (homéostasie) des organismes. Dawkins rappelle ensuite que la Terre ne se reproduit pas. Pas de reproduction, pas de sélection naturelle; pas de sélection naturelle, pas d'homéostasie : il est vain de chercher des régulations fonctionnelles à l'échelle de la planète. Cet argument est souvent appelé la critique de la téléologie dans la littérature sur HG : l'ordre ne semble pouvoir émerger que par sélection naturelle - à laquelle la Terre n'est pas soumise - ou par les suites de l'action d'un être conscient et planificateur - ce que la Terre n'est pas.

La seconde critique concerne l'idée que chaque être vivant pourrait, par son influence sur l'environnement, contribuer à un bien collectif planétaire (e.g. le maintien de l'habitabilité *via* la régulation de certains paramètres environnementaux). Dawkins rappelle que cette proposition soulève les mêmes difficultés déjà pointées au sein des débats sur l'altruisme et la sélection de groupe en biologie évolutive : l'être vivant qui ne paie pas le coût évolutif lié à la participation au "bien commun" - le tricheur, le *free rider* - possède un avantage sélectif et envahit donc la population, ce qui ruine le bien commun¹²

1.3 Manières de répondre et réponses aux critiques.

On veut maintenant comprendre le rôle que peuvent avoir des modèles pour répondre à ces critiques. Pour cela, on peut essayer de faire une typologie des manières de répondre. Mais avant il est important de comprendre la portée de la critique. Au début des années 1970 Lovelock et Margulis cherchent à *initier un programme de recherche* : la vie semble avoir une influence plus grande qu'on ne l'imaginait à l'échelle du globe, comment cela affecte-t-il les conditions environnementales dans lesquelles elle se perpétue? L'attitude est "je veux faire des recherches". Dawkins et Doolittle répondent par un argument

12. Ces deux critiques sont parfois confondues - e.g. Worden (2010) -, elles ne sont pourtant pas logiquement équivalentes.

méthodologique mêlé d'un argument théorique : "vous ne trouverez rien".

Le premier type de réponse que l'on peut apporter consiste à nier la pertinence de la critique. Concernant la première critique, on pourrait en effet aujourd'hui remettre en question ses prémisses en montrant qu'il n'est pas certain - c'est à discuter - que la reproduction soit une condition nécessaire à la sélection naturelle¹³ ou que la sélection naturelle soit le seul schème explicatif de l'homéostasie des organismes¹⁴. Ce n'est pas ce qu'il s'est passé¹⁵. En revanche la seconde critique a été discréditée à la fin des années 1990. Une réponse a été apportée et nous devons la préciser dès maintenant parce qu'elle nous sera nécessaire pour discuter de certaines hypothèses faites par les modèles. L'idée¹⁶ est qu'une proportion importante - sinon la totalité - des effets que la vie a sur son environnement sont les conséquences de produits dérivés (*by-products*) sur lesquels la sélection n'a pas prise : ce sont des déchets métaboliques (O₂, CO₂) ou des conséquences accidentelles (albédo des forêts, etc.). Ces traits n'ont pas été sélectionnés *pour* les effets qu'ils ont sur l'environnement, mais pour des raisons internes à l'organisme. L'oxygène n'est pas produit parce qu'il modifie la composition de l'atmosphère et l'état redox de la planète, mais parce qu'il est un déchet nécessaire de la photosynthèse : celui qui cesse de le produire ne triche pas mais se condamne. S'il n'est pas pertinent d'importer les débats sur l'altruisme dans le cas de HG dans la mesure où l'on s'intéresse à des traits sur lesquels la sélection n'a pas de prise à l'échelle des unités classiques de sélection (individu, gène) , il reste tout de même à comprendre les raisons pour lesquelles les effets combinés de ces "déchets métaboliques" devraient résulter en une régulation, une stabilisation des conditions plutôt que l'inverse¹⁷ : on en reste alors à la première critique qui indique qu'il faut un principe d'ordre à l'échelle de la Terre.

Le deuxième type de réponse que l'on peut apporter à quelqu'un qui suggère qu'on ne "trouvera rien" est de dire "j'ai trouvé" en montrant que c'est effectivement le cas, sur Terre, que la vie a contribué à maintenir la planète habitable ou à réguler certaines variables. C'est ce que font, par exemple, Schwartzman & Volk (1989), élaborant sur une suggestion de Lovelock & Watson (1982). Ils montrent à l'aide d'un modèle climatique réaliste que l'influence de la vie sur le cycle du CO₂, *via* l'érosion des silicates, a permis de maintenir la température sur Terre au sein des bornes de l'habitabilité.

Le troisième type de réponse - celui initialement apporté par *Daisyworld* - consiste à dire qu'il est en droit possible de trouver ("si, je *peux* trouver!") une régulation de variables environnementales par la vie en exhibant un exemple théorique où une régulation émerge dans un système qui n'est pas soumis à sélection naturelle. C'est d'ailleurs ce que dit très mal le titre, provocateur, de l'article de 1983 de Lovelock (*Daisyworld : a cybernetic proof of the Gaia hypothesis*), mais ce que dit beaucoup mieux le corps de l'article¹⁸ :

"Le but de cet article est de passer en revue les arguments en faveur de Gaia et de pré-

13. Cf. par exemple les travaux de Bouchard (2011) ou de Godfrey-Smith (2009a).

14. En s'appuyant sur une littérature en biologie théorique ancrée sur la cybernétique et la thermodynamique, e.g. Kauffman (1993).

15. Mais cf. Betts & Lenton (2007) pour une tentative récente de ce genre.

16. Apportée dans le débat sur HG par Volk (1998) et indépendamment par Wilkinson (1999) p. 534. Voir également Volk (2003)

17. Williams & Lenton (2008).

18. Ainsi que des ouvrages ultérieurs, e.g. Lovelock (2008), p.43.

senter un modèle simple, nommé *Daisyworld*, développé spécifiquement pour montrer qu'une homéostasie globale ne nécessite pas que la vie prévoit ou planifie." Lovelock (1983), p.67.

Enfin la dernière manière de répondre est d'avancer des arguments théoriques qui montrent qu'on a en fait de bonnes raisons de s'attendre à ce que la vie régule certaines variables de son environnement ou contribue à maintenir la planète habitable ("si, je *dois* trouver"). Ces arguments théoriques sont le fruit soit de discussions verbales, soit de modèles qui s'inscrivent dans le sillage de *Daisyworld*. Ces arguments s'ancrent dans trois traditions différentes : cybernétique¹⁹, évolutionnaire²⁰ et thermodynamique²¹. Les liens entre arguments théoriques verbaux et modèles computationnels sont ici complexes : tantôt les hypothèses théoriques sont suggérées dans un premier temps puis implémentées et testées dans des modèles dans un second temps, tantôt le modèle permet de présenter un nouvel argument.

L'ensemble des modèles hérités de *Daisyworld* peut donc contribuer au troisième et quatrième type de réponse. Des modèles numériques d'un type différent contribuent aux découvertes "empiriques" (second type de réponse), mais leur analyse dépasse l'ambition de ce texte²².

2 Modèle original : description, résultats, critiques

Je décris ici aussi brièvement que possible les caractéristiques principales du modèle, les résultats et les critiques qui en ont été faites. J'essaie de rester au plus proche de la description standard que l'on retrouverait dans une proportion significative des articles sur *Daisyworld* ; je reviendrai plus loin (section 5) sur les problèmes que peuvent soulever un tel résumé et une telle manière de présenter le modèle.

2.1 Description du modèle original

Le modèle original considère ce que ses auteurs décrivent comme une "planète" dont l'évolution de la température ne dépend que de deux paramètres : l'albédo et un forçage externe (la luminosité solaire). Cette planète est peuplée par deux espèces de "pâquerettes" (*daisies*) dont la croissance est affectée par la température. La première espèce est blanche, la seconde est noire : chacune influence l'albédo de la planète et, *in fine* la température de la Terre.

L'équation décrivant la croissance des populations de pâquerettes s'inspire d'équations standards en écologie des populations²³ :

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} = \alpha_w \cdot [\alpha_g \cdot \beta(T_w) - \gamma] \quad (1)$$

19. Cf. les *feedbacks* sur la croissance de Lenton (1998, 2004), la vie comme catalyseur planétaire augmentant la résilience du système Volk (2002), ainsi que certains modèles comprenant des versions récentes de *Daisyworld* McDonald-Gibson et al. (2008); Dyke (2010).

20. e.g. sélection séquentielle, cf. Betts & Lenton (2007) pour la proposition théorique et Worden & Levin (2008) pour le même argument développé grâce à un modèle computationnel, *feedbacks* sélectifs Lenton (1998, 2004), sélection à l'échelle des écosystèmes dans les modèles de Williams & Lenton (2008); Bardeen (2010).

21. e.g. Kleidon (2004, 2010).

22. Ces modèles sont ceux, par exemple, cités par Kirchner dans la critique C4 - section 2 de ce texte - comme "allant dans la bonne direction".

23. L'écriture des équations et les notations ont varié au cours des publications. Dans un souci d'harmonisation je reprends les notations d'une revue récente sur *Daisyworld* - Wood et al. (2008).

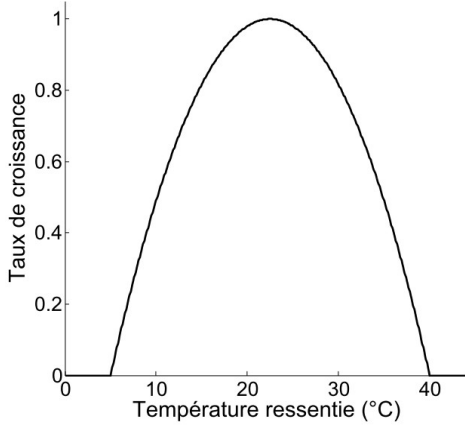


FIGURE 1 – Évolution du taux de croissance en fonction de la température ressentie, valable pour les pâquerettes blanches et noires. Figure produite à partir des équations et valeurs des paramètres de WL.

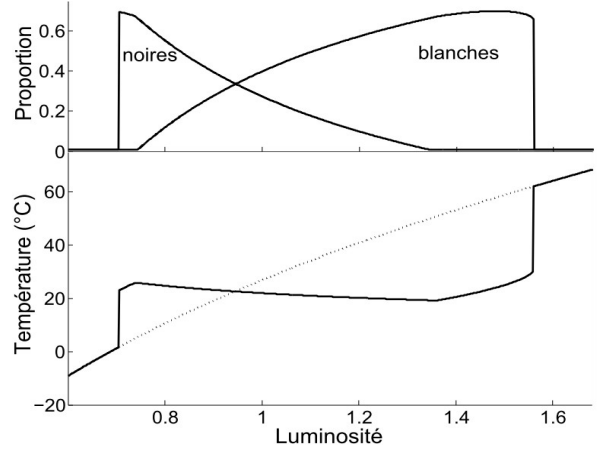


FIGURE 2 – Partie supérieure : proportion du sol couvert par les pâquerettes noires et blanches. Partie inférieure : évolution de la température (°C) en fonction de la luminosité solaire en l'absence de pâquerettes (pointillés) et avec (courbe pleine). Figure produite à partir des valeurs des paramètres, de la description du modèle et de la procédure de résolution des équations décrits dans WL.

$$\frac{\partial \alpha_b}{\partial t} = \alpha_b \cdot [\alpha_g \cdot \beta(T_b) - \gamma], \quad (2)$$

avec α_w (resp. α_b) la proportion de pâquerettes blanches (resp. noires) telles que $\alpha_w + \alpha_b + \alpha_g = 1$, α_g étant la proportion de sol nu (supposé fertile) et "1" la surface, finie, de la planète. Le modèle initial est de dimension nulle (la surface de la planète n'est pas explicitement décrite; on la réduit à des proportions relatives de pâquerettes noires et blanches et de sol nu). β et γ sont les taux de croissance et de mortalité ($\gamma=0.3$ dans la publication originale²⁴). T_w et T_b sont les températures *ressenties* par les deux espèces de pâquerettes. Le taux de croissance des pâquerettes dépend de leur température ressenties (T_i), l'indice i étant remplaçable par b (pâquerettes noires) ou w (blanches) :

$$\beta(T_i) = 1 - k(T_i - T_{opt})^2, \quad \text{si } |T_i - T_{opt}| < k^{-\frac{1}{2}} \quad (\beta = 0 \text{ sinon}) \quad (3)$$

L'équation décrit une parabole concave, symétrique, centrée sur la température ressentie optimale (T_{opt}), cf. fig. 1.

La publication initiale prend $T_{opt} = 22.5^\circ\text{C}$ et choisit le facteur k tel que les températures ressenties au sein desquelles les pâquerettes peuvent survivre sont comprises entre 5°C et 40°C .

Insistons ici sur un point : le taux de croissance des deux espèces différentes de pâquerettes dépend *de la même manière* de la température ressentie - les valeurs des paramètres (k , T_{opt}) de la fonction $\beta(T_i)$ sont les mêmes pour les pâquerettes blanches et noires - mais la température *ressentie* (T_i) n'est pas la même pour l'espèce blanche et l'espèce noire. Précisons pourquoi. La seule caractéristique physique qui distingue les deux espèces est leur albédo. Plus l'albédo (allant de 0 à 1) est élevé plus la lumière

24. Cf. Bardeen (2004) pour une étude sur l'influence d'une variation de ce taux de mortalité.

est réfléchi. Le modèle original fixe $a_w=0.75$, $a_b=0.25$ et $a_g=0.5$ les albédos respectifs des pâquerettes blanches, noires et du sol nu. L'albédo moyen de la planète (A) dépend des albédos respectifs :

$$A = \alpha_w a_w + \alpha_b a_b + \alpha_g a_g \quad (4)$$

Les températures ressenties dépendent de la température globale (T) et de l'efficacité du transfert thermique qui dépend du coefficient de transfert thermique (q) et de l'écart entre l'albédo global (A) et l'albédo local (a_i) :

$$T_i^4 = q(A - a_i) + T^4, \quad (5)$$

avec T la température moyenne de la planète. De la relation d'ordre entre les albédos ($a_b < a_g < a_w$) s'ensuit que la température *locale* (T_i) ressentie par une pâquerette noire est plus élevée que la température moyenne ($T_b > T > T_w$).

La planète est supposée à l'équilibre radiatif (l'énergie absorbée, reçue par le soleil, est égale à l'énergie renvoyée) :

$$S.L.(1 - A) = \sigma T^4, \quad (6)$$

avec $S.L$ le flux solaire incident moyen et L une variable ajustable (normalisée) qui représente la luminosité solaire (augmentant au cours du temps). Le modèle original prend $S=917 \text{ W.m}^{-2}$. σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$).

Le modèle se résume à un système relativement simple d'équations différentielles non linéaires décrivant une variable (T) influençant la vie et influencée par elle, perturbée par un forçage externe (la luminosité solaire). On regarde ensuite si la température est régulée (i.e. si elle reste stable en dépit de perturbations externes).

2.2 Résultats

La simulation est lancée avec et sans pâquerettes (fig : 2). Dans le premier cas on observe, sans surprise, l'augmentation graduelle de la température à mesure que la luminosité solaire augmente. Dans le second cas la température semble "régulée" : elle augmente d'abord brutalement, se stabilise autour de 22.5°C (valeur de T_{opt}) et augmente de nouveau à partir d'une certaine valeur de luminosité. Ce qui explique l'évolution de la température, c'est la dynamique des populations de pâquerettes. Lorsque la température (T) est inférieure à T_{opt} , les pâquerettes noires sont *sélectivement* avantagées car leur albédo moins élevé a pour conséquence d'augmenter la température *locale* (ressentie, T_i) et de favoriser ainsi leur croissance. En colonisant la planète, les pâquerettes noires modifient également l'albédo global et font augmenter la température planétaire plus vite qu'elle ne le ferait sans leur influence (c'est ce qui explique l'augmentation brutale initiale). Une phase stationnaire s'instaure rapidement durant laquelle les deux

populations coexistent, les blanches remplaçant les noires à mesure que la luminosité solaire augmente, balançant ainsi cette perturbation. Les pâquerettes noires finissent par disparaître (les blanches ont un avantage sélectif quand la luminosité est élevée). La fin de la régulation de la température correspond à une luminosité tellement élevée que même une planète entièrement recouverte de pâquerettes blanches ne suffit plus à maintenir la température au sein des bornes qui permettent l'habitabilité.

A nouveau, ce qui explique la croissance plus forte des pâquerettes noires quand la luminosité solaire est faible et celle des blanches dans le cas opposé c'est bien l'avantage *sélectif* que leur procure leur influence sur la température "locale" (ressentie).

2.3 Quatre critiques principales, un ajout

Après avoir commencé comme beaucoup par une présentation du modèle original, je prends à présent le contrepied exact d'une synthèse réalisée récemment sur *Daisyworld* par Wood, Ackland, Dyke, Williams et Lenton²⁵. Leur travail de synthèse est remarquable mais s'inscrit dans une perspective particulière :

"Le champ a désormais mûri à tel point que la viabilité de la théorie Gaïa n'est pas directement liée à la validité du modèle *Daisyworld* comme c'était le cas durant les premières années qui suivirent sa création. Par conséquent nous traitons *Daisyworld* comme un modèle mathématique intéressant en tant que tel. Il peut informer le débat sur Gaïa, mais ils ne sont pas inextricablement liés. Il y a eu beaucoup de bourgeonnements dans d'autres champs scientifiques, incluant la dynamique non-linéaire, les théories sur les réseaux trophiques et les écosystèmes, la théorie de l'évolution, la physiologie, la production maximale d'entropie, la vie artificielle. Grâce à la relative simplicité de sa formulation mathématique, *Daisyworld* est également largement utilisé dans l'enseignement des sciences de la Terre.", p.2.

Les auteurs de cette synthèse s'intéressent donc à *Daisyworld per se*, la question qui m'intéressait initialement était le rôle des modèles computationnels au sein de HG. Il est très clair que certaines variantes du modèle ont porté sur des questions qui n'étaient pas celle posée initialement (questions qui vont de l'écologie²⁶ à des points techniques d'algorithmique²⁷), c'est ce que montre parfaitement le travail de synthèse cité qui pourrait être pris comme un matériel formidable montrant la vie propre ("*life of their own*") que les modèles acquièrent. Mais il est tout aussi clair que *Daisyworld* ou certaines variantes qui s'en sont inspirées cherchent à faire avancer certaines questions théoriques de HG. Un des objectifs du présent chapitre est dès lors de préciser les ambitions des différentes variantes et de faire le départ entre ce qui intéresse HG et ce qui lui est étranger ; l'intuition étant que précisément parce que le modèle acquiert une vie propre (ce qui est très bien) on finit par perdre ou voir se dissoudre les débats internes à HG qui ont initié *Daisyworld* (ce qui est dommage). Plutôt que de reprendre les catégories structurantes de cette synthèse sur les différents types de variantes de *Daisyworld*, je voudrais commencer par un travail qui pourrait être fait sur la base du seul modèle original (WL) et qui consiste d'une part à développer les critiques que l'on pourrait adresser à ce modèle et comprendre les relations qu'entretiennent ces critiques du modèle avec les critiques théoriques que Dawkins et Doolittle adressent à HG, d'autre part à préciser les différents *explanandum* de HG pour comprendre celui auquel s'intéresse *Daisyworld*.

25. Wood et al. (2008).

26. Lovelock (1992).

27. Jascourt & Raymond (1992).

Critique C1 : *Daisyworld* est un cas particulier où certains traits confèrent un avantage sélectif si et seulement s'ils contribuent à la régulation. Kirchner fait remarquer que la régulation n'émerge dans *Daisyworld* que parce que le modèle repose sur un cas particulier au sein duquel certains traits confèrent un avantage sélectif si et seulement s'ils contribuent également à la régulation. On aurait pu faire l'hypothèse opposée dans un *Daisyworld* pathologique : des pâquerettes noires qui font augmenter la température globale tout en ayant un avantage sélectif quand les températures sont élevées - et non basses comme c'est le cas dans le modèle original - et des blanches qui préfèrent un environnement plus froid. Il est clair que ce modèle ne montrerait pas la même régulation que *Daisyworld*. Au lieu d'une température stable autour de T_{opt} un tel système montrerait des transitions brutales entre deux températures d'équilibre (bistabilité) qui sont loin de T_{opt} : un équilibre bas (les pâquerettes blanches, qui ont un avantage sélectif aux basses températures et qui contribuent au refroidissement maintiennent alors la température loin en-dessous de T_{opt}), un équilibre haut²⁸ (situation symétrique pour les noires).

Cette critique du choix idiosyncratique de certaines hypothèses soulève une ambiguïté sur la portée épistémique du modèle :

"*Daisyworld* semble démontrer que *chaque fois* qu'il y a un couplage fort entre des organismes et leur environnement, l'évolution darwinienne générera naturellement un système qui s'auto-régule proche de l'optimum biologique. Ce que *Daisyworld* démontre en fait est qu'il est possible pour un tel système d'émerger par sélection naturelle, dans le cas seulement où les hypothèses spécifiques faites par le modèle sont valides. Parce que ces hypothèses peuvent ne pas être vraies sur la Terre, *Daisyworld* démontre seulement une possibilité théorique plutôt qu'un principe pouvant nous guider dans la nature." Kirchner (2002), p. 401, nous soulignons.

En d'autres termes notre connaissance du monde empirique ne nous incite pas à privilégier les hypothèses faites par WL au détriment de celles qui vaudraient dans le cas d'un *Daisyworld* pathologique : on n'a aucune de raison de penser qu'il y devrait y avoir un couplage entre l'avantage sélectif d'un organisme et la manière dont cet organisme influence son environnement²⁹. La pertinence de cette critique dépend entièrement de la portée épistémique que l'on accorde au modèle. Si l'ambition du modèle est de dire qu'une régulation de propriétés environnementales à l'échelle du globe *peut* émerger dans un monde où la sélection naturelle s'applique à l'échelle des organismes et pas à l'échelle du globe", alors dire que les deux cas (pathologiques et régulation) sont équiprobables ne change rien au fait que le modèle est bien à la hauteur de cette ambition, certes restreinte. Si en revanche l'ambition est de dire qu'à condition qu'il y ait un couplage entre la vie et son environnement, peu importe les détails de ce couplage, une régulation proche de l'optimum biologique *doit* émerger, comme Lovelock paraît le suggérer par endroits³⁰, alors la critique concernant l'idiosyncrasie des hypothèses est pertinente et invite à modifier *Daisyworld*. Le modèle de WL force ainsi la critique à un grain de distinction plus fin : là où Dawkins disait quelque chose comme "aucune régulation globale ne *peut* émerger parce que la Terre n'est pas soumise à sélection", Kirchner raffine : "une régulation est *possible*, montrez-nous qu'elle est plus probable que la situation opposée". S'ensuit une discussion sur la rareté, sur Terre, des cas où "ce qui est bon pour l'individu est

28. Cf. Kirchner (1989) p. 228-231.

29. Cf. également Kirchner (1989) p. 233 pour le développement de cet argument.

30. e.g. Watson & Lovelock (1983), p.288, titre de Lovelock (1983).

bon pour l'environnement global³¹". D'une question théorique on passe soit à une question empirique (un tel couplage où ce qui bénéficie à l'individu bénéficie également à l'environnement global est-il fréquent dans la nature?) soit à une autre question théorique (compte tenu de ce qu'on sait de la vie en général doit-on s'attendre à ce que ce couplage soit plus probable que son contraire?).

Critique C2 : Quid de l'émergence d'un tricheur ? Pour poursuivre sur cette question de l'ambition de *Daisyworld* notons que l'absence de mutation dans WL est révélateur du fait que WL ne cherchait pas à répondre à la critique de Dawkins et Doolittle portant sur l'émergence d'un tricheur - puisqu'elle n'est pas rendue possible dans le modèle - mais bien à la première critique - portant sur l'absence de sélection naturelle à l'échelle du globe. On pourrait reconduire l'argumentaire sur l'altruisme à l'endroit de *Daisyworld* et indiquer qu'une pâquerette tricheuse pourrait très bien émerger dans *Daisyworld* : quelles en seraient les conséquences ?

Critique C2 bis : les traits des organismes ne *devraient* pas avoir de conséquences sélectives.

Souvenons-nous en revanche qu'à la fin des années 1990 Volk et Wilkinson, et à leurs suites les partisans de HG, avaient indiqué qu'HG s'intéressait massivement à des produits dérivés (*by-products*), des déchets métaboliques sur lesquels la sélection n'a pas prise. Dès lors, si l'on pense que *Daisyworld* - ou que certaines versions de *Daisyworld* - doivent avoir un rapport avec HG, ce qui devient problématique ce n'est plus tellement la sélection *positive* de traits contribuant à réguler l'environnement (comme c'était le cas pour la critique C1) que la *sélection* (tout court) de ces traits : influencer son environnement ne devrait pas avoir de conséquences sélectives (positives ou négatives). En somme si l'on veut répondre à l'argumentaire sur l'altruisme il ne faut pas introduire des tricheurs mais se passer de l'hypothèse selon laquelle l'influence d'un individu peut avoir des conséquences sélectives importantes *pour cet individu*.

Critique C3 : un modèle trop simple ? Kirchner reproche également aux auteurs la trop grande *simplicité* du modèle :

"Il n'y a qu'une seule variable environnementale et elle est régulée par un *feedback* extrêmement fort avec la biosphère la plus simple possible. Un modèle aussi simple montre nécessairement un comportement simple. Par contraste, sur la vraie Terre de nombreuses variables environnementales sont couplées simultanément, à travers différentes relations de *feedbacks*, avec une biosphère extrêmement complexe composée d'organismes avec des préférences environnementales diverses (et souvent incompatibles). Un système aussi compliqué peut exhiber de nombreux types de comportements, ce qu'un modèle simple comme l'est *Daisyworld* ne peut faire. Je comprends parfaitement les raisons pour lesquelles on fait des modèles hautement simplifiés, mais la première règle pour construire un modèle est de préserver les propriétés essentielles du système que l'on essaie d'étudier." Kirchner (2003), p.38-39

En d'autres termes l'ajout de variables environnementales et de rétroactions pourrait modifier la *nature* même des phénomènes de régulation mis en jeu, si bien que *Daisyworld* ne pourrait pas nous aider à comprendre les phénomènes dynamiques ayant effectivement lieu sur Terre.

31. Cf., par exemple, Lenton (2004) sur ce point.

Critique C4 : un modèle - ou des questions ? - trop général(es) ? Le dernier point que soulève Kirchner concerne la généralité du modèle ou/et la généralité des questions auxquelles le modèle est censé répondre :

"Premièrement il est important d'aller au-delà de *Daisyworld*. [...] Pour être quelque chose de plus que des illustrations de concepts abstraits en théorie des systèmes, les modèles doivent être, vis-à-vis du système étudié, mécaniquement plausibles et quantitativement réalistes. Autrement, avec une poignée de boucles de rétroactions et des coefficients arbitraires, pratiquement n'importe quel modèle peut produire n'importe quel comportement. Il est également essentiel que le comportement et les échelles des modèles soient comparables à des comportements du monde réel ; autrement les modèles ne peuvent être testés contre des données. Construire et tester quantitativement des modèles appropriés des interactions biosphère-atmosphère du monde réel, bien qu'un travail plus difficile que de construire des hypothétiques *Daisyworld* rapportera probablement plus d'informations pertinentes pour les sciences du système Terre. De récents efforts de modélisation de Lenton et de collègues - Lenton (2001); Lenton & von Bloh (2001); Lenton & Watson (2000) - constituent un pas dans la bonne direction. [...] Deuxièmement il est important d'aller au-delà de la simple théorisation. [...] Troisièmement il est important d'aller au-delà de "généralités à propos de "la vie" et de "l'environnement global". [...] Le séduisant et simple terme "vie" comprend un éventail vaste d'organismes avec des préférences environnementales variées et souvent incompatibles. [...] Par conséquent les tentatives de généralisation à propos de la vie ou de l'environnement peuvent être chargées de difficultés conceptuelles. [...] Nombre de test proposés pour Gaïa sont faits en évaluant si l'environnement de surface de la Terre serait différent en l'absence de vie. Est-ce qu'une Terre abiotique serait moins résiliente ou moins résistante aux perturbations Lenton (2002)? [...] Ces hypothèses ont l'avantage d'être tout à fait précises, mais l'inconvénient de ne pas être testables en pratique. Elles ont également le désavantage plus sérieux d'être très éloignées de problèmes plus pressants en sciences du système Terre - pour les nommer, comment le système climatique marche et comment il va évoluer dans le futur." Kirchner (2003) p. 38-41.

Qu'on me pardonne la longueur de la citation mais Kirchner a l'avantage de prendre au sérieux ce que disent ses collègues - de les lire - tout en étant sceptique sur le fond du programme, ce qui lui permet de porter des critiques très structurantes. On ressort de la lecture de cette citation - et de l'ensemble de l'article - avec, au début, le sentiment que c'est le *modèle* qui est critiqué parce qu'il serait trop général et abstrait. En avançant dans la lecture on réalise en fait que ce sont les *questions* auxquelles *Daisyworld* cherche à répondre qui sont trop générales ("la vie", "l'environnement"). La philosophie des sciences prônée par Kirchner se résumerait ainsi à dire qu'il y a de bonnes (et urgentes) questions - comment le système *actuel* marche (e.g. de combien de degrés la planète va se réchauffer compte tenu des rétroactions physiques, biologiques, etc.)? - et deux types de mauvaises questions, celles qui ne sont pas testables - à quoi ressemblerait la Terre en l'absence de vie? - et celles qui sont trop générales et potentiellement trompeuses - est-ce que "la vie" contribue à réguler certaines variables environnementales? ; une question semble ainsi d'autant plus mauvaise qu'elle s'éloigne d'une description du monde actuel (en s'intéressant à des mondes possibles non actuels ou trop généraux et abstraits).

Je répondrai à cette critique premièrement en explicitant les raisons pour lesquelles HG en est venue à s'intéresser à ces "mauvaises" questions (section 3), deuxièmement en remettant en cause l'idée que les questions et les modèles qui y répondent sont "problématiques", sont des "mauvaises" questions et des "mauvais" modèles (section 5).

Critique C5 : pâquerette, métaphysique et épistémologie. Comment ne pas ressentir un malaise en lisant le titre de l'article du modèle original *Biological homeostasis of the global environment : the parable of Daisyworld* et celui de l'article qui suivra, écrit par Lovelock seul et visant à intégrer le modèle aux élaborations théoriques sur HG "*Daisyworld : a cybernetic proof of the Gaia hypothesis*" ? A peu près tous les articles sur *Daisyworld* reprennent l'idée que ce modèle est :

- **une parabole (*parable*)** : Watson & Lovelock (1983), Lenton & Lovelock (2001), p.288,303, Harvey (2004), p.309, Wood et al. (2006), p.188, 189, 191, Boyle et al. (2011), p.172, 174, 178 Ackland & Wood (2010), p. 178,
- **une planète imaginaire (*imaginary planet*)** Stöcker (1995), p. 495, Pujol (2002), p.53, Harvey (2004), p.309, Boyle et al. (2011), p.172,
- **un modèle-jeu (*toy model*)** Von Bloh et al. (1997), p.250 Von Bloh et al. (1999), p. 187, Wood et al. (2006) p. 188, Boyle et al. (2011), p.172,
- **un monde-pour-jouer (*toy world*)**, Bardeen (2010), p. 542,
- **une caricature du système Terre (*a caricature of the Earth system*)** Von Bloh et al. (1997), p.250,
- **un monde fictif (*fictitious Daisyworld*)** Nevison et al. (1999), p. 813, *fictitious planet* Wood & Coe (2007), p. 191,
- **une métaphore** Boyle et al. (2011), p. 177,

Ce champ sémantique de la fiction, d'un monde que l'on explore pour jouer, s'accompagne de - ou retraduit - l'idée que *Daisyworld* n'est pas censé être un modèle de la Terre bien qu'il puisse nous permettre de tirer des leçons importantes pour celle-ci, introduite dès la publication de *Daisyworld* :

"Que le lecteur soit averti à l'avance : *nous ne sommes pas en train d'essayer de modéliser la Terre*, mais plutôt un monde fictionnel qui arbore une propriété que nous croyons importante pour la Terre." WL, p. 284, nous soulignons,

et inlassablement reprise depuis. Comment une fiction, une parabole, un monde-pour-jouer, un monde imaginaire décrivant des pâquerettes géantes, un modèle qui ne modélise pas la Terre pourrait bien se transformer en une connaissance positive (preuve), en leçons utiles sur le monde ? Cette question que je soulève n'est jamais abordée directement par la littérature sur *Daisyworld*. Remarquons également qu'elle n'est pas équivalente à la critique précédente (on peut être trop "général" ou répondre à des questions contrefactuelles sans décrire des entités aussi étranges que ces pâquerettes). Je ne voudrais pas cependant lui donner trop d'importance et montrerai que l'on peut y répondre simplement.

Il me semble en revanche important premièrement de désamorcer cette critique qui pourrait venir alimenter des débats récents en philosophie générale des sciences sur les relations entre les modèles et les fictions (littéraires), deuxièmement d'élucider la manière dont *Daisyworld* peut nous apprendre quelque chose et s'il diffère en cela singulièrement d'autres modèles.

Nous nous en tiendrons à ces cinq critiques principales, sélectionnées en vertu du lien qu'elles essaient de maintenir entre *Daisyworld* et les questions initiales de HG : d'autres problèmes sont soulevés dans *Daisyworld*, ils m'intéressent moins ici. Les deux premières (C1, *Daisyworld* comme cas particulier et C2 sur la sélection naturelle et l'altruisme) concernent les hypothèses faites par le modèle. C3 semble plus profonde et s'intéresser à la *nature* du modèle. Des outils de philosophie générale des sciences (légitimité et priorité de certaines questions sur d'autres, types de modèles) nous aideront à discuter C4 et C5.

3 Explanandum de HG, explanandum de Daisyworld

Une difficulté centrale émerge à la lecture des différents articles modifiant *Daisyworld* : l'hétérogénéité de la focale d'intérêt, de ce que l'on cherche à expliquer. *Daisyworld* a été initialement créé dans le cadre de HG qui, dit grossièrement, s'intéresse aux conséquences de la vie sur son environnement à l'échelle globale et à l'éventuel bénéfice que la vie pourrait retirer de cette influence. Jusqu'à présent j'ai indiqué que ce bénéfice correspondait à une régulation des variables environnementales, contribuant à maintenir l'habitabilité de la planète ; j'ai précisé ensuite que *Daisyworld* cherchait à montrer que c'était théoriquement possible (ou nécessaire, selon les versions). Cette présentation n'est pas erronée mais je voudrais montrer que l'on peut opérer des distinctions importantes au sein de cet *explanandum*. Si l'on se restreint aux questions que *Daisyworld* pose et qui semblent liées à HG on pourrait les regrouper sous trois types distincts : *régulation*, *habitabilité* et *optimisation*. Je détaille ces *explanandum* et élargis finalement à HG pour comprendre la place qu'y occupe *Daisyworld*.

3.1 Stabilité, homéostasie, régulation, auto-régulation : un *explanandum* cybernétique.

En regardant le graphique de la publication originale (WL), reproduit en fig.2, on peut s'étonner du fait que la température reste *stable*, c'est-à-dire qu'elle reste très proche d'une valeur (ou d'une gamme restreinte de valeurs) lorsque les pâquerettes sont autorisées dans la simulation, ce que Lovelock fait :

"*Daisyworld* illustre comment la puissante capacité qu'a la vie de croître jusqu'à ce qu'une niche soit pleine agit comme un amplificateur, et la sélection naturelle comme un senseur, dans un système de contrôle qui est capable de *réguler* de manière efficace et précise la température de la planète proche de l'optimum pour la forme de vie spécifiée." Lovelock (1983), p.69-70.

Ce qui est intéressant ce n'est pas que le système reste stable *simpliciter*, mais qu'il reste stable *en dépit de perturbations* (externes). Je laisse pour le moment de côté la question de l'optimum et m'attache à montrer que le champ sémantique de *Daisyworld* reste tourné autour de la régulation et de la stabilité pendant une quinzaine d'années au moins³² :

"Peu importe les détails de l'interaction, l'effet des pâquerettes est de *stabiliser* la température" Watson & Lovelock (1983), *abstract* et p. 288

"La stabilité d'un tel système, la qualité de son homéostasie, est mesurée par sa capacité à soutenir des perturbations. [...] L'hypothèse Gaïa prédit que l'environnement a été et sera stable et constant en dépit de perturbations." Lovelock (1983), p.69-70

"*Daisyworld* décrit une situation généralement stable dans laquelle des rétroactions fortes entre la vie et son environnement mènent à un *système stable*" Maddock (1991), p. 337, souligné dans le texte original

"Ce qui est particulièrement remarquable est que durant ce processus la température planétaire reste remarquablement constante." Saunders (1994), p. 370.

Les questions et les termes empruntent à la cybernétique (auto-régulation, homéostasie, ...), aux systèmes dynamiques (stabilité et bi-stabilité, bifurcations³³), et à l'écologie (résistance, résilience). Les

32. Pour d'autres exemples de citations analogues, voir : Von Bloh et al. (1997), p. 251, Cohen & Rich (2000).

33. e.g. Kirchner (1989); Wood et al. (2006) sur le développement de ces concepts dans *Daisyworld*.

concepts de résistance (quelle est la gamme de perturbations que l'on peut soutenir sans s'écarter d'une valeur ?) et de résilience (à quelle vitesse un système perturbé retrouve-t-il son état d'équilibre ?) sont introduits par Harding³⁴. Certains s'intéresseront à la *pente* de la courbe pour juger de l'efficacité de la régulation³⁵. Enfin, il faut signaler la tentative de systématisation des critères pour juger de la régulation de *Daisyworld*, effectuée par Lenton & Lovelock (2001). A la résilience et à la résistance, un autre groupement de critères mesurant l'efficacité d'un *feedback* s'invite (on calcule le gain, l'amplification et l'amortissement) ainsi qu'un dernier critère, hétérogène aux autres : la quantité totale de vie présente sur l'ensemble de la simulation (je reviens plus loin sur ce dernier). On peut regretter que cette explicitation de ce que l'on teste dans *Daisyworld* et des critères pour le faire n'ait dans les faits pas été suivie de très près, laissant à sa place proliférer des modèles testant tantôt l'un, tantôt l'autre, et concluant, de là, à la "validité" de HG, à l'efficacité de *Daisyworld*.

Je reviens désormais à l'optimum que j'avais temporairement laissé de côté. La régulation ou la stabilité de la température peuvent être intéressantes à deux titres : *per se* ou parce qu'elles servent la maximisation ou l'optimisation d'une variable. On trouve en introduction de la quasi-totalité des articles sur *Daisyworld* un résumé de HG qui ressemble généralement à : "l'hypothèse Gaïa propose que la biosphère agit de manière à maintenir des conditions ...", et se termine de manière variable :

"appropriées pour la vie" Stöcker (1995), p. 4964, Cohen & Rich (2000), p. 980, Williams & Noble (2005), p. 332,

"confortables pour la vie" Lovelock (1992), p. 390,

"favorables pour la vie" Robertson & Robinson (1998), p. 129, Dyke & Harvey (2006), p.1,

"optimales pour la vie" Saunders (1994) p. 365, Staley (2002), p.35,

"stable et favorable à la vie" Pujol (2002), p.53,

"régulant l'environnement global" Adams et al. (2003), p. 505,

"dans des limites essentielles pour que la vie existe" Weaver & Dyke (2012b), p.1,

"tolérables pour la vie" Lenton & Lovelock (2000), p.114,

"dans un état habitable" Lenton & Lovelock (2000) p. 109, Pujol et al. (2005) p. 137

"permettant la survie de l'écosphère dans son ensemble" Von Bloh et al. (1997) (*abstract*),

L'existence d'une régulation peut donc être intéressante pour trois raisons distinctes. Elle peut l'être, (i) *per se* (équilibre, stabilité, ...) ou parce qu'elle sert à optimiser quelque chose : (ii) l'*habitabilité* de la planète (tolérable) ou quelque chose comme, (iii), la *santé* de la planète (optimale)³⁶.

Certains semblent s'intéresser à la régulation en tant que telle : ce qui, pour ces auteurs, est surprenant, c'est le fait qu'un système dynamique "aussi complexe" que l'est la Terre possède des états d'équilibre stable³⁷. L'article de Weaver & Dyke (2012b) constitue un bon exemple récent de cette tendance. Les auteurs complexifient le modèle avec un nombre important de variables environnementales et d'espèces et se demandent comment la complexification du modèle affecte le nombre et la qualité des équilibres du système.

34. Harding (1999); concepts empruntés à Pimm (1984) et qui seront ensuite amenés dans la littérature HG par Lenton (2002).

35. Lovelock (1992) p. 387-388.

36. Cf. Lovelock (1992), p. 390 pour l'introduction explicite du terme "healthy".

37. On pourrait lire les articles de Lovelock et Harding dans les années 1990 - Lovelock (1992); Harding & Lovelock (1996); Harding (1999) -, revisitant le débat écologique stabilité-complexité à la lumière de *Daisyworld*, comme s'inscrivant dans cette perspective.

Kirchner fait en revanche remarquer que stabilité et optimisation ne sont pas compatibles : l'optimisation des conditions environnementales pour la vie dans *Daisyworld* n'est permise qu'au prix d'une déstabilisation initiale (la pente est plus forte quand les pâquerettes noires commencent à peupler la planète et permettent ainsi d'atteindre plus rapidement T_{opt}). Il indiquera également que les auteurs de HG s'intéressent à des exemples dans lesquels la vie stabilise et dans lesquels la vie déstabilise l'environnement :

"Si Gaïa stabilise et déstabilise (et puisque Gaïa est un système de feedback dans lequel il n'y a que deux possibilités), est-ce qu'il y a un seul comportement qui ne soit pas Gaïen?" Kirchner (1989), p. 228.

Même si les partisans de HG voulaient peut-être faire droit à l'idée que la stabilité ou l'existence d'états d'équilibres est intéressante *per se* :

"La théorie Gaïa cherche à expliquer les remarquables propriétés de ce système, en particulier son état ordonné loin de l'équilibre thermodynamique, sa stabilité dynamique, son habitabilité, l'épanouissement de la vie et les patrons de changement à travers le temps." Lenton & Van Oijen (2002),

quitte à verser dans des questions probabilistes³⁸, il me semble que cet *explanandum* ne peut persister dans HG que pour deux (mauvaises) raisons : (i) la poursuite d'une erreur de raisonnement couplée à l'insuffisance de connaissances à l'époque, (ii) une intuition métaphysique difficilement justifiable (délicat agencement du monde, *balance of nature*, etc.), intuition sur laquelle *Le Phénotype étendu* est suffisamment revenu. L'erreur, elle, provient certainement de l'article de 1974 qui part du constat de l'habitabilité continue de la planète et de l'existence de perturbations pour en déduire la "nécessaire" existence d'une homéostasie, d'une régulation qui est le *moyen* - et non la fin - par lequel la vie maintiendrait les conditions stables *donc* habitables. On ne savait pas à l'époque la diversité de températures que la Terre avait connue, allant de probables 70°C à des épisodes de Terre gelée sur l'ensemble de la surface³⁹ ; les auteurs ont conclu, à tort mais en cohérence sans doute avec les connaissances de l'époque, de l'habitabilité à la stabilité. Or la planète est bien restée habitable mais n'est pas restée stable. Deux leçons peuvent donc être tirées de la simple lecture du résumé de l'article "*Homeostasis by and for the biosphere*" : (i) l'homéostasie n'était que moyen, on pensait à tort que les conditions étaient effectivement restées stables, (ii) les auteurs sont aujourd'hui obligés de reconnaître que l'existence d'états stables est non seulement triviale mais va en plus de pair avec l'existence, reconnue, d'états instables (transitions, crises) :

"Le fait que Gaïa possède des états stables n'est certainement pas très remarquable, mais le fait que tous ces états stables qui changent avec le temps soient *habitables* et les moyens par lesquels l'auto-régulation est accomplie dans un système aussi complexe sont des questions scientifiques fascinantes.", Lenton (2004), p.16-17, nous soulignons.

Si je prends tant de soin à faire ces allers et retours entre *Daisyworld* et HG c'est bien parce qu'une des difficultés centrales de HG est de savoir ce qu'elle cherche à expliquer⁴⁰. Du flou de l'*explanandum* de HG (stabilité, régulation, habitabilité?) découle un flou sur ce qui doit intéresser *Daisyworld*, flou qui subsiste encore récemment quand de nombreux articles du champ *Daisyworld* s'intéressent à la régulation-stabilité pour elle-même en pensant montrer quelque chose en faveur - ou défaveur - de HG⁴¹.

38. e.g. La vie permet elle de rendre "plus stable" certains états stables?

39. Cf. Robert & Chaussidon (2006) et Kirschvink (1992).

40. Sur ce point Kirchner, comme critique, et Lenton, comme partisan, sont certainement les auteurs les plus clairs.

41. e.g. Williams & Noble (2005); Nørtoft Nielsen & Ditlevsen (2009).

Qu'on comprenne bien que l'étude de la dynamique du système Terre n'est pas en cause en tant que telle - les questions et les outils qu'elle développe sont passionnants. Ce qui est en cause c'est que *seule*, l'étude de cette dynamique ne semble pouvoir suffire à établir un critère normatif valant pour "la vie" : rien ne nous dit qu'un système avec un équilibre ou plusieurs équilibres avec des transitions brutales entre les deux *simpliciter* soit quelque chose d' "optimal" pour "la vie".

3.2 De la régulation à l'habitabilité.

C'est à la fin des années 1990 et au début des années 2000 que la distinction entre régulation et habitabilité est tracée dans la littérature sur HG ⁴². Je voudrais suivre dans la littérature consacrée à *Daisyworld* le glissement qui s'opère de ces questions de régulation centrée autour d'une valeur d'équilibre à la question de l'habitabilité de la planète; suivre comment l'on passe d'un groupe de critères liés à la régulation, groupe de critères comprenant celui de résistance s'intéressant à la gamme de perturbations au sein de laquelle la température reste stable, à l'habitabilité comprise comme gamme de perturbations pendant laquelle de la vie est présente dans le système. On voit alors le contraste entre l'idée d'habitabilité et de régulation : la régulation semble orientée positivement vers une valeur préférentielle (T_{opt}) quand l'habitabilité est définie de manière négative (il y a des valeurs extrêmes, minimale et maximale, qu'il ne faut pas dépasser).

En 1998, Robertson et Robinson publient une variante du modèle où les pâquerettes peuvent modifier leurs préférences environnementales vers les conditions actuelles. Sans adaptation ils retrouvent le résultat de WL. Avec un faible taux d'adaptation la gamme de perturbations pendant lesquelles la température est *régulée* et pendant lesquelles la planète est *habitée* diminue. Avec un plus fort taux de mutation, la régulation disparaît entièrement mais la planète est indéfiniment habitable : l'absence de contraintes sur l'adaptation laisse le temps aux pâquerettes de s'adapter à n'importe quelle condition. Il est significatif que les auteurs ne distinguent pas vraiment les deux derniers résultats : dans les deux cas ce que l'on remarque c'est que la régulation est amoindrie. Lenton et Lovelock ne font pas plus de distinction en 2000 dans la réponse qu'ils font à Robertson et Robinson. La distinction n'interviendra nettement qu'en 2001 ⁴³ :

"Dans le régime confortable, les pâquerettes font se rapprocher la température vers l'optimum de croissance, mais les conditions seraient habitables sans l'influence des pâquerettes. Dans la région de bistabilité, les pâquerettes maintiennent la planète dans un état habitable quand elle ne serait pas habitable autrement." Lenton & Lovelock (2001) p. 291

A réinterpréter Bardeen ⁴⁴, cette simple séparation de l'*explanandum* pourrait inviter à revenir sur la critique C1 portée par Kirchner et l'exemple de *Daisyworld* "pathologique". Le fait, dans ce cas pathologique, d'avoir une bistabilité dans un système et des températures d'équilibre qui sont sous-optimales pour

42. e.g. Watson (1999); Lenton (2002).

43. On pourrait faire commencer le glissement, dans *Daisyworld*, avec l'article de Saunders (1994). Si l'*explanandum* principal reste la régulation, l'auteur fait remarquer que les pâquerettes qui modifient leur environnement (au lieu de s'y adapter en modifiant leurs préférences environnementales) "améliorent significativement leurs chances de survie" p. 372. Je pense, comme explicité ici, qu'il est plus tardif.

44. Bardeen (2009), p. 20 et 36,37.

les pâquerettes dans chacun des équilibres, avec des transitions brutales, atteindrait le premier *explanandum* (stabilité) mais laisse complètement intact le second : même dans le cas pathologique de *Daisyworld* l'habitabilité est augmentée. Moins que d'annuler la portée de la critique de Kirchner je pense que cela invite au contraire à la dédoubler. L'idiosyncrasie du modèle (avantage sélectif individuel et bénéfique global se confondant) a pour conséquence (heureuse) une régulation *et* une augmentation de l'habitabilité. On pourrait imaginer des cas pathologiques où seule la régulation est perturbée et l'habitabilité maintenue - ce que fait Kirchner - et des cas où l'habitabilité est diminuée du fait de l'influence biologique - ce que fait pour la première fois Keeling (1991). Ces deux questions peuvent être liées - si on reste très proche d'une valeur de référence alors, *a fortiori*, on ne dépasse pas certaines valeurs critiques (et c'est la raison pour laquelle ces deux *explanandum* perdurent, l'homéostasie, la régulation est vue comme un *moyen* de garantir l'habitabilité de la planète) - mais ne le sont pas nécessairement - la température pourrait se comporter de manière "chaotique" *entre* les valeurs critiques pour l'habitabilité⁴⁵.

3.3 Optimisation et asymétrie des rôles de l'environnement et de la vie.

On a pour le moment accepté qu'une température planétaire régulée autour de T_{opt} correspondait à un environnement global bénéfique ou "favorable pour la vie"⁴⁶, à une température "idéale"⁴⁷; on a même accepté la critique C1 en disant que "ce qui est sélectionné au niveau individuel est bénéfique pour l'environnement global"⁴⁸. Ce serait manquer de voir que la température ressentie des pâquerettes n'est *pas* la température planétaire⁴⁹. Quand la température planétaire vaut T_{opt} , à l'équilibre, les températures ressenties des pâquerettes sont respectivement $T_b = 300.5K$ et $T_w = 290.5K$. Une température planétaire régulée autour de T_{opt} est donc *sous-optimale* (d'environ 5°C) pour les deux espèces : trop chaude pour les noires, trop froide pour les blanches; si bien qu'on se demande ce que cette température pourrait avoir d'idéal. Lansing et al. (1998) sera le premier à montrer que cette température est celle qui maximise la croissance *totale* (espèces noires et blanches confondues) des pâquerettes.

Cela nous permet de faire remarquer l'asymétrie jouée par la vie et son environnement dans ce modèle qui présente pourtant la vie et son environnement comme formant un système, un tout. La publication originale est symptomatique d'une des singularités de HG : ce qui est intéressant dans WL (et dans les modèles qui suivront) c'est la régulation de la *température* : le graphique représentant la dynamique des populations (espèces blanches et noires) intervient non pas comme quelque chose d'intéressant en soi (tant que la température est optimale, tout est pour le mieux), mais comme *explanans* de la température. En d'autres termes on se sert de la dynamique de la population pour expliquer le comportement de la température qui est l'*explanandum* final. Il est tout à fait remarquable que les modèles initiés par le mouvement sur la construction de niche considèrent les conséquences qu'ont ces interactions pour les

45. Comme c'est le cas, par exemple, dans Wood et al. (2006); Cohen & Rich (2000).

46. Lovelock (1983), p. 68.

47. Ackland et al. (2003).

48. Lenton & Lovelock (2001).

49. Cf. Saunders (1994) pour la clarification de ce point.

organismes : fixation d'allèles délétères, polymorphisme, dynamique évolutive, etc⁵⁰. Là où l'écologie standard étudie les interactions entre populations et éventuellement les conséquences d'une variation de l'environnement sur cette dynamique des populations, HG, davantage portée par les sciences de la Terre que la biologie, commence par faire l'inverse : comprendre l'environnement à partir de l'influence qu'a la vie sur celui-ci.

La biodiversité et l'adaptation des organismes sont les deux *explanandum* majeurs de la théorie de l'évolution ; traditionnellement la biodiversité est donc quelque chose que l'on cherche à expliquer. La perspective est ici complètement renversée. Lovelock prend la biodiversité comme donnée, celle-ci sert ensuite à expliquer un autre phénomène (la finesse de la régulation de la température). La biodiversité était *explanandum* en biologie évolutionnaire standard, elle devient *explanans* dans HG et *Daisyworld*. Ceci est particulièrement manifeste dans les articles de Harding et Lovelock des années 1990 qui entendent revisiter le débat stabilité-complexité-diversité en écologie conventionnelle en introduisant des rétroactions de la vie sur l'environnement. Maddock (1991) est le premier à montrer que même si on autorise plusieurs types de pâquerettes avec des albédos différents dans une simulation il n'y en a que deux au plus qui subsistent à l'équilibre. Lovelock (1992) ajoute ensuite des niveaux trophiques et perturbe brutalement (augmentation soudaine de la luminosité solaire) le système pour observer comment la biodiversité évolue : elle augmente soudainement après la perturbation et diminue pour être réduite au minimum une fois l'équilibre rétabli. Ce qui est intéressant c'est premièrement le constat :

"La biodiversité n'est pas la plus élevée quand tout va bien dans l'écosystème, mais quand un changement rapide de l'environnement matériel, compris dans les limites de ce que le système peut tolérer, vient d'avoir lieu. La biodiversité est moindre quand le système est ou bien tellement perturbé qu'il est au bord de la rupture, ou bien quand il est en bonne santé, mais qu'il y a eu une période prolongée d'équilibre." Lovelock (1992), p.390,

deuxièmement la "leçon" qu'en tire l'auteur :

"La biodiversité est le symptôme d'un changement pendant une période de santé. Ce qui semble important pour la subsistance n'est pas tellement la biodiversité en tant que telle, mais la biodiversité *potentielle*, la capacité d'un système en bonne santé de répondre à travers une diversification quand les besoins émergent." *Ibid.*, p.390.

La biodiversité vient bien ici *jouer le rôle* de tampon face à des perturbations pour permettre à l'ensemble du système vie-environnement de persister (dans sa régulation ou dans son habitabilité). Les résultats seront poursuivis par Harding et Lovelock en 1996 qui modifieront les stratégies de prédation des niveaux trophiques supérieurs et introduiront soudainement certaines espèces, considérées comme des perturbations.

Cela m'amène à signaler certaines variations concernant l'origine et la nature de la perturbation introduite dans le modèle. Les premières publications sur HG s'intéressent au maintien de l'habitabilité et à la régulation de variables environnementales face à une perturbation *externe* et *graduelle* (augmentation de la luminosité solaire) de la température.

Deux évolutions intéressantes la nature de la perturbation sont notables. Certaines variantes de *Daisyworld* étudient la réponse du système à des perturbations *brutales*, des "chocs" (e.g. l'augmentation

50. e.g. Laland et al. (1996, 1999). Sur ce qui sépare la construction de niche et HG, voir Free & Barton (2007); Pocheville & Dutreuil (prep).

brutale de luminosité dont on parlait). Parallèlement certains travaux s'intéressent aux perturbations *internes* du système, initiées par la vie elle-même. Keeling (1991) introduit une troisième espèce qui ruine la régulation et, pour certaines valeurs de luminosité, entraîne la perte d'habitabilité de la planète.

A la publication initiale s'intéressant à une perturbation externe et graduelle s'ajoutent de nouvelles possibilités autorisant des combinaisons variées : perturbation interne, chocs.

3.4 Trois questions centrales à Gaïa, *Daisyworld* ne peut en adresser que deux

J'ai proposé ailleurs⁵¹ une clarification de HG basée sur trois questions distinctes et des remarques méthodologiques (e.g. interdisciplinarité entre biologie et sciences de la Terre) :

- (1) La vie a-t-elle une influence quantitativement dominante - ou en tout cas non négligeable - sur son environnement à l'échelle globale ?
- (2) Si oui, cela a-t-il contribué et contribuera-t-il à augmenter la durée d'habitabilité de la Terre ?
- (3) Peut-on, du fait de cette influence, s'attendre à une optimisation des conditions environnementales qui soit favorable à "la vie" ?

La première question constitue le point de départ de HG : c'est en remarquant le déséquilibre thermodynamique de l'atmosphère (imputé avec raison à l'influence massive de la vie sur son environnement) que Lovelock et Margulis en sont venus à se poser des questions de régulation et d'habitabilité. Cette première question n'est pas du tout prise en compte par Dawkins et Doolittle et, ne soulevant aucun problème normatif, ne tombe pas sous leurs critiques. Néanmoins il me semble qu'il faille faire droit à l'idée que la première question, celle de savoir si la vie peut être considérée comme une "force géologique" pour reprendre l'expression de Westbroek (1992), appartient de plein droit à HG.

Les difficultés théoriques de HG sont concentrées dans les questions (2) et (3) qui ont pour point commun de s'intéresser au *bénéfice*, à l'"optimisation" des conditions "pour la vie" qui pourrait être la conséquence de l'influence de la vie sur son environnement. Pour cette raison sans doute la seconde question est rarement - si toutefois elle l'est - distinguée de la troisième. Les deux questions soulèvent bien des difficultés normatives, mais de nature différente : s'il est *en principe* possible de déterminer (approximativement) les conditions qui empêcheraient la poursuite de *toute* vie, telle qu'on la connaît, sur Terre - e.g. des températures qui empêcheraient la présence d'eau liquide dans les enveloppes superficielles du globe - il est *en principe* plus délicat de définir des conditions "optimales" pour "la" vie telle qu'on la connaît. Cela requiert en effet - et c'est le problème - *a minima* de souscrire à une doctrine donnée - e.g. une certaine forme d'utilitarisme⁵² - qui maximiserait une variable donnée : le nombre d'espèces, la biomasse, la quantité de pingouins⁵³, etc.

51. Dutreuil (2012a).

52. cf. Huneman (2011) sur ce point.

53. Sur les pingouins, cf. Kirchner (1989), p. 233.

Si HG peut effectivement se résumer à ces trois questions⁵⁴ et certaines remarques méthodologiques, alors on peut commencer à circonscrire l'ambition de *Daisyworld* en notant que ce modèle numérique prend comme hypothèse que la vie peut influencer son environnement à des échelles comparables aux phénomènes abiotiques (la modification de l'albédo peut permettre de compenser, au moins jusque certaines limites, l'augmentation de la luminosité solaire), i.e suppose que la réponse à la première question est positive, pour s'intéresser aux questions (2) et, surtout, (3).

Ces trois questions peuvent être posées, d'ailleurs, elles l'ont été, ou bien sur un mode empirique, actuel ou bien sur un mode théorique, général. Le mode actuel s'intéresse à la question de savoir si la vie que l'on connaît sur Terre a bien une influence forte sur son environnement, si elle a bien contribué au maintien de l'habitabilité, etc. La partie théorique se demande s'il est nécessaire, compte tenu de l'idée que l'on a de la vie et de son environnement, que la première influence le second, qu'elle maintienne l'habitabilité⁵⁵, etc.

4 Evolution de *Daisyworld* et réponses aux critiques.

Le modèle initial est à l'origine d'une tradition de modélisation numérique, nommée "*Gaia in the machine*" par Lenton & Williams (2009). Sont inclus dans cette tradition deux types de modèles : ceux qui conservent le "style" *Daisyworld* et ses fondamentaux (pâquerettes, albédo, température, ...), et ceux qui, inspirés par *Daisyworld* construisent de nouveaux modèles visant à explorer certains points théoriques de HG : des modèles qui combinent les styles de *Daisyworld* et de ceux sur la construction de niche⁵⁶, d'autres s'inscrivant dans un style de modélisation de vie artificielle⁵⁷ (*Alife*). Les innombrables variations sur ce thème sont le fruit de mathématiciens, écologues et géologues. La synthèse sur *Daisyworld* de Wood et de ses collègues présente le modèle initial et l'ensemble des variantes de 1983 à 2007 en les structurant selon les directions qui ont été explorées : (i) clarification du modèle initial (solution analytique, simplification des équations, nature de la régulation, ...), (ii) modèles spatiaux de dimension non nulle (permise entre autres par l'utilisation d'automates cellulaires), (iii) introduction d'évolution dans le modèle (mutation, nouvelles espèces), (iv) orientation vers des questions d'écologie (débat stabilité-diversité, etc.), (v) application du modèle (principes de maximisation, thermodynamique, modélisation climatique, physiologie, etc.). Tout en bénéficiant de ces distinctions structurantes, je voudrais présenter une synthèse des travaux qui inclut les modèles publiés au cours des cinq dernières années et qui soit organisée non pas en fonction des thèmes mais en fonction de la manière dont ces travaux peuvent répondre aux critiques adressées au modèle⁵⁸ ou à HG en affaiblissant certaines des hypothèses problématiques. Avant d'examiner les réponses aux

54. Ce que certains disputeront certainement en retirant la première question et en confondant la deuxième et la troisième.

55. Cette distinction entre question actuelle et théorique repose sur une remarque que l'on fait traditionnellement remonter à Watson (1999) qui distingue entre "pur hasard", "Gaia chanceuse" et "Gaia probable", reprise par Wilkinson (2004); Lenton & Wilkinson (2003), distinction qui s'appuie sur le principe anthropique dont l'introduction dans le débat sur HG est attribuée à Levin (1998); Lenton (1998); Watson (1999); Wilkinson (1999) par Wilkinson (2004), mais qui remonte en réalité au moins à Doolittle (1981), p.61.

56. e.g. McDonald-Gibson et al. (2008); Dyke (2010).

57. E.g. Downing & Zvirinsky (1999); Downing (2002) qui ont ensuite inspiré Williams & Lenton (2008).

58. La synthèse citée revient sur cette question en fin d'article. Sur le même point on consultera également McDonald-Gibson et al. (2008); Lenton & Williams (2009).

critiques on essaie de rendre explicites les hypothèses faites par le modèle.

4.1 Rendre explicites les hypothèses du modèle

Je reprends ici, précise et étends le travail d'explicitation d'hypothèses implicites dans WL et ses successeurs⁵⁹. Le tableau de la figure 3 rassemble les principales hypothèses.

- H1 Les organismes peuvent modifier leur environnement.
- H2 Les organismes peuvent survivre seulement dans certaines conditions.
- H3 Le fait, pour un organisme, d'affecter son environnement modifie immédiatement les pressions de sélection.
- H4 Les traits qui confèrent un avantage sélectif à une espèce donnée contribuent à l'amélioration des conditions environnementales pour l'ensemble des espèces.
- H5 Il y a une ségrégation spatiale de l'effet sur l'environnement qui est plus fort localement que globalement.
- H6 Il y a un état fixe et prédéterminé de l'environnement qui maximise la *fitness* (globale).
- H7 Il y a des contraintes ou des limites sur l' "adaptation" (l'évolution des préférences environnementales).
- H8 Il y a des contraintes ou des limites sur l'influence que peut avoir l'ensemble de la biosphère sur son environnement.

FIGURE 3 – Liste des hypothèses souvent faites pour *Daisyworld*.

H1 - les organismes peuvent modifier leur environnement - est implémentée dans le modèle par l'influence que les pâquerettes ont sur l'albédo et *in fine* sur la température. Personne ne contestera *aujourd'hui* - mais c'était peut-être moins évident en 1980 - que la vie puisse influencer un nombre important de variables environnementales à l'échelle globale. H2 - les organismes peuvent survivre seulement dans certaines conditions - est implémentée dans le facteur de croissance : la croissance est nulle au-delà d'une certaine température ressentie. Les hypothèses H3 à H5 sont problématiques, du moins si l'on pense que l'ambition de *Daisyworld* est de montrer quelque chose de plus que "une régulation *peut* émerger sans sélection naturelle à l'échelle du globe". On a vu (critique C2) que H3 - le fait, pour un organisme, d'affecter son environnement modifie immédiatement les pressions de sélection - était faite par l'immense majorité des variantes de *Daisyworld* mais était problématique si l'on pense que HG doit se construire sur des produits dérivés (*by-products*) de la sélection. H4 - les traits qui confèrent un avantage sélectif à une espèce donnée contribuent à l'amélioration des conditions environnementales pour l'ensemble des espèces - est problématique à double titre : elle l'est comme instance de H3 et comme l'expression d'un cas particulier, dénoncé par la critique C1 de Kirchner.

H5 - il y a une ségrégation spatiale de l'effet sur l'environnement qui est plus fort localement que globalement - est beaucoup plus délicate à interpréter. Elle est implémentée dans *Daisyworld* sous la forme des "température ressenties" : le simple albédo des pâquerettes a pour conséquence que la température "locale" (ce qui n'a vraiment de sens que dans les modèles qui décrivent explicitement l'espace, ce que ne fait pas WL) qu'une pâquerette ressent est différente de la température qu'il ferait en l'absence de cette pâquerette au même endroit⁶⁰. Pour faire disparaître cette hypothèse il suffit que l'environnement soit *partagé par tous*, c'est-à-dire que la conduction de la température soit parfaite ($q=0$ dans éq. 5) pour que

⁵⁹. Réalisé en partie dans la discussion de la synthèse de Wood et collègues et systématisé par McDonald-Gibson et al. (2008).

⁶⁰. Voir Wood et al. (2008) pour l'introduction de cette température potentielle et son expression formelle.

la température soit la même partout ($T_i=T$). Sans cette hypothèse aucune régulation ne peut émerger. Cette hypothèse est *nécessaire* dans le modèle original de WL, mais elle l'est pour une raison bien précise : la sensibilité à la température des deux seules espèces présentes est la même (cf. l'équation régissant β). Si les espèces présentes n'étaient pas sensibles à la même variable environnementale ou y étaient sensibles différemment alors même un environnement partagé par tous, sans différence spatiale, pourrait avoir des conséquences sélectives. Deux problèmes théoriques sont donc partie liées dans le modèle initial : celui de l'hétérogénéité de l'environnement et celui de la différence de préférences environnementales des vivants. Et ils sont partie liées parce que le modèle présente une singularité : les deux traits phénotypiques des individus (la température optimale de croissance et la manière dont ils influencent l'environnement) sont inter-dépendants : pour en modifier un il faut modifier l'albédo, ce qui modifie *ipso facto* l'autre. Cette singularité du modèle fait jouer à H5 un rôle ambivalent : elle a pour conséquence que H5 est la condition nécessaire et suffisante à H3 et H4, deux hypothèses dont on souhaiterait par ailleurs se passer. H5 n'est donc pas problématique *per se* mais en tant qu'elle implique des hypothèses plus fortes (H3, H4) à cause d'une singularité du modèle. En tant que telle H5 amène à s'interroger sur des questions définitionnelles qui ont des conséquences théoriques cruciales : doit-on penser l'environnement comme ce qui est également partagé par tous (alors la seule source de variation menant éventuellement à de la sélection devient la sensibilité différentielle à cet environnement global) ? Ou doit-on au contraire autoriser l'environnement à être hétérogène, autorisant *ipso facto* une autre source de variation que la sensibilité à cet environnement, source de variation sur laquelle la sélection peut éventuellement jouer ?

Cette ambivalence théorique de H5 se redouble par ailleurs d'une difficulté d'interprétation aussi bien de la signification de cette température ressentie que des autres équations dans les modèles où la description spatiale n'est pas explicite. Si la description spatiale n'est pas explicite alors les équations peuvent être interprétées comme elles l'ont été, mais rien n'empêche de raconter une autre histoire à partir des mêmes équations. Dans cette seconde interprétation les frontières de l'individu ne sont plus les mêmes : la température ressentie pourrait tout à fait correspondre à la température interne d'un organisme (qui est soit plus élevée, soit plus faible que la température de l'environnement). Ces questions définitionnelles à l'endroit de l'environnement ne sont que la formulation à l'envers de questions classiques d'individuation et des frontières des organismes et des écosystèmes en écologie : Turner (2000); Dawkins (1982, 2004); Huneman (2011).

McDonald-Gibson et al. (2008) trouvent H6 - il y a un état fixe et prédéterminé de l'environnement qui maximise la *fitness* (globale) - problématique. On a vu que T_{opt} était, comme température *planétaire*, sous optimale pour les deux types de pâquerettes mais que cette température maximisait la *fitness* moyenne. Ce que McDonald-Gibson et al. (2008) semblent reprocher c'est que seul un point, fixé dans le modèle, permet de maximiser la *fitness* moyenne globale. Ils voudraient laisser ouverte la valeur qui maximise la *fitness* des individus et la *fitness* moyenne de l'ensemble de la population.

H7 - il y a des contraintes ou des limites sur l' "adaptation" (l'évolution des préférences environnementales) - est implémentée dans WL de manière radicale : il n'y a pas d'évolution des préférences

environnementales (les contraintes sont infinies).

A la liste de McDonald-Gibson et al. (2008) (H1 à H7), j'ai ajouté H8 - il y a des contraintes ou des limites sur l'influence que peut avoir l'ensemble de la biosphère sur son environnement - qui est implicitement faite par l'ensemble des modèles dérivés de *Daisyworld*, y compris par McDonald-Gibson et al. (2008) qui font un nombre plus restreint d'hypothèses. Supposer H8 revient à accepter que dans certaines circonstances, H1 n'est plus valable, i.e. qu'une perturbation environnementale peut être trop forte pour que la vie, quelle que soit son étendue sur la Terre, puisse, par son influence, empêcher que cette perturbation ne sorte la Terre de l'habitabilité. Elle est implémentée par WL dans la finitude de l'espace colonisable par les pâquerettes (et le taux de mortalité) et dans l'absence de mutation possible de l'albédo : la luminosité devient à un moment tellement élevée que même si la couverture de pâquerettes blanches est maximisée (compte tenu de la valeur du taux de mortalité), i.e. que l'influence sur la température est maximale (compte tenu des valeurs de l'albédo assignées aux pâquerettes), la température continue d'augmenter et ne peut plus être régulée.

Enfin, notons que H2, H7 et H8 (empiriquement valides) sont à l'origine des *questions* que HG soulève. C'est bien parce qu'une espèce donnée, et par extension, l'ensemble de la biosphère, ne peut croître que dans certaines conditions (H2) et que les possibilités de modification des préférences environnementales (H7) ainsi que les possibilités de modification de l'environnement (local ou global, H8) sont limitées (finies) que la Terre *peut* cesser d'être habitable suite à une perturbation externe. Ces hypothèses ne sont donc pas censées jouer un rôle explicatif dans HG, elles sont au contraire la source des questions : qu'une (et une seule) de H2, H7 ou H8 soit abandonnée et le problème principal de HG est dissous.

4.2 Des variantes de *Daisyworld* importantes mais ne permettant pas de répondre aux critiques

Un nombre important de publications se sont efforcées de clarifier le modèle initial : en apportant des solutions analytiques, en explicitant les principes à l'origine de la régulation ou en exprimant les conditions de séparabilité d'échelles de temps nécessaires à la régulation.

Les solutions analytiques aux équations initialement proposées par WL ont permis de montrer l'existence de quatre points fixes, correspondant aux quatre situations possibles selon que les pâquerettes noires et blanches sont absentes ou présentes, le point fixe où les deux espèces sont présentes étant stable pour une gamme importante de perturbations⁶¹, ce qui confirme le résultat computationnel de WL. Ces solutions permettent d'assainir les fondations de *Daisyworld* : on s'affranchit ainsi de discussions sur l'implémentation numérique et on peut alors se concentrer sur ce que décrit le modèle.

Par ailleurs certains auteurs ont été inspirés par *Daisyworld* pour extraire des principes très généraux de régulation. *Daisyworld* constituerait un bon exemple de "*rein control*". L'idée est qu'une variable

61. Cf. Wood et al. (2008); Saunders (1994); De Gregorio et al. (1992b); Weber (2001) sur ces points.

(physiologique) peut être régulée de manière extrêmement fine si deux "freins" (*reins*) peuvent s'opposer aux perturbations de cette variable. Chaque frein ne peut influencer la variable que dans une direction (asymétrie de la réponse). Dans le cas du modèle de WL les pâquerettes noires peuvent contribuer à augmenter la température, les blanches à la diminuer. Saunders et al. (1998) montrent les avantages qu'un système composé de deux (et non d'un seul) systèmes de contrôle proportionnel et intégré⁶² qui interfèrent l'un avec l'autre possède pour réguler une variable. La compétition pour l'espace entre les deux pâquerettes permet cette interférence entre les deux systèmes de contrôle⁶³ (pâquerettes blanches et noires). Ces travaux étendent des réflexions initiées par Clynes (1969) pour les généraliser grâce à *Daisyworld* et les appliquer ensuite en physiologie standard (régulation de la glycémie⁶⁴, perception⁶⁵).

Le second moment où l'on extrait - ou en tout cas l'on pourrait extraire - des principes généraux de régulation s'intéresse aux échelles de temps caractéristiques des phénomènes mis en jeu. Ce travail, initié assez tôt a été récemment systématisé. Weaver & Dyke (2012a) modifient légèrement le modèle initial et extraient quatre échelles de temps caractéristiques : τ_H le temps de chauffage (*heating*) de l'atmosphère par les pâquerettes, τ_β le temps d'installation des pâquerettes sur le sol (β référant au taux de croissance), τ_γ le temps d'élimination des pâquerettes et τ_L le temps caractéristique de modification de l'insolation. WL supposait : $\tau_H, \tau_\beta \ll \tau_\gamma \ll \tau_L$. Les auteurs modifient successivement ces conditions de séparabilité d'échelle de temps et font se rapprocher certaines qui étaient supposées éloignées. Ce travail mène à des conclusions qui semblent triviales mais qui sont explicitées et systématisées pour la première fois (e.g. pour que la régulation de la température par les pâquerettes ait lieu il faut que le ratio $\frac{\tau_\gamma}{\tau_L}$ soit suffisamment petit devant un nombre critique), et à d'autres moins intuitives (une réponse plus rapide des pâquerettes peut mener à une persistance plus longue des perturbations). Les auteurs étendent également certains travaux ayant porté sur l'existence d'oscillations dans *Daisyworld*, oscillations qui émergent dans différentes situations : existence d'un délai entre τ_β et τ_H menant à une bifurcation⁶⁶, abandon de l'hypothèse que la Terre est à l'équilibre radiatif⁶⁷, délai entre la réponse des organismes et le changement d'environnement⁶⁸, oscillations forcées par une variation périodique de la luminosité solaire mimant des effets saisonniers⁶⁹. Ce travail sur les échelles de temps réalisé sur la base du modèle *Daisyworld*, qui emprunte à des éléments annoncés en perspective dans Wood et al. (2008) a une portée beaucoup plus large ; il s'étend à l'ensemble des systèmes dynamiques et contraint les conditions nécessaires à ce qu'une auto-régulation émerge dans un tel système⁷⁰. Ces questions sont d'actualité et d'un intérêt particulier

62. Traduction de "*integral control*" : l'erreur par rapport à une variable de référence est virtuellement amplifiée (proportionnelle) pour accélérer la correction et est intégrée par rapport au temps et multipliée par une constante à déterminer, ce qui permet d'éliminer l'erreur par rapport à la variable de référence même quand la perturbation est continue. L'avantage de ce genre de système est qu'à l'équilibre aucune erreur ne subsiste.

63. Wood et al. (2008) rebaptisent ce système "*antagonistic rein control*", pour le distinguer d'un système de "rein control" plus classique au sein duquel les deux "freins" n'interfèrent pas, comme c'est le cas dans le modèle développé par Harvey (2004).

64. Koeslag et al. (1997).

65. Harvey (2004).

66. De Gregorio et al. (1992a).

67. Nevison et al. (1999).

68. Wood et al. (2006); McDonald-Gibson et al. (2008).

69. Biton & Gildor (2012).

70. e.g. Watson et al. (2010).

pour l'écologie et l'évolution où des auteurs montrent à l'aide de clarification conceptuelle⁷¹ l'importance qu'il y a à préciser et prendre en compte les échelles de temps des composants d'un système dynamique.

WL, initialement de dimension spatiale nulle, est étendu à des versions à une et deux dimensions⁷², extensions permises par l'introduction de nouvelles techniques de simulations (automates cellulaires). Ces extensions permettent d'introduire des problèmes nouveaux. En particulier certaines versions montrent l'existence de pâquerettes qui sont sous-adaptées (relativement aux autres présentes dans la simulation) sans que cela n'affecte la régulation de la température et la maximisation de la biomasse, ce qui mène à l'idée que c'est le système *dans son ensemble* qui "s'adapte" et non les pâquerettes individuelles. Ces versions permettent ainsi de rendre plus explicite une hiérarchie d'individus biologiques (pâquerettes, patches de pâquerettes, système entier) et ainsi d'étudier les niveaux auxquels a lieu la sélection⁷³. Ces versions spatiales permettent également d'observer des "transitions de phase" menant à la formation "catastrophique" de déserts⁷⁴.

L'ensemble de ces découvertes et ajouts (solutions analytiques, type de régulation, temporalité, spatialité) contribuent soit à clarifier le modèle initial, soit à poser des problèmes nouveaux mais ne permettent pas, en tant que telles, de répondre aux critiques formulées à l'encontre de *Daisyworld*.

4.3 Répondre à la critique C1 sur l'idiosyncrasie du modèle

Cette section s'intéresse aux modèles permettant de répondre à la critique C1 selon laquelle il faudrait s'affranchir de l'hypothèse du modèle qui confère un avantage sélectif aux pâquerettes si et seulement si elles contribuent à "améliorer" l'environnement. Pour répondre à C1 il faut donc montrer que le phénomène d'intérêt (habitabilité, régulation) est maintenu sous certaines conditions qu'il reste à préciser lorsque l'on se dispense de l'hypothèse H4. Comment s'en dispenser ? On avait vu que H5 impliquait H3 et H4. On peut alors adopter une première stratégie consistant à laisser tomber H5 *pour* laisser tomber H3⁷⁵ (critique C2bis) et H4 (critique C1) ; mais se priver de H5 c'est refuser du même coup d'étudier les conséquences d'hétérogénéités spatiales alors que ces hétérogénéités spatiales ont effectivement lieu sur Terre et alors que leur importance a été mise en évidence, aussi bien par *Daisyworld* et HG qu'en écologie⁷⁶. Une seconde stratégie semble être suggérée implicitement par deux articles critiques : le modèle pathologique de Kirchner inversait les relations entre les deux traits phénotypiques des pâquerettes (préférence environnementale et manière d'influencer la température) pour montrer que la régulation disparaissait (mais nous avons rappelé que l'habitabilité était maintenue) et le modèle de Keeling introduisait une espèce supplémentaire, le Kudzu, avec le même albédo que les pâquerettes noires mais une température optimale de croissance de 33°C, pour montrer que la régulation (et l'habitabilité) disparaissaient alors. Ces modèles faisant une hypothèse symétriquement opposée à H4 suggèrent ainsi que ce qui est problématique c'est

71. Pocheville (2010, prep).

72. e.g. Von Bloh et al. (1997); Adams et al. (2003); Ackland et al. (2003); Ackland & Wood (2010); Bardeen (2010).

73. Sur ce point cf. l'article original de Bardeen (2010).

74. Cf. Ackland et al. (2003); Wilkinson (2003) sur ces points.

75. C'est ce que font Staley (2002); McDonald-Gibson et al. (2008).

76. e.g. Johnson & Boerlijst (2002); Silver & Di Paolo (2006); Kéfi et al. (2007).

le fait qu'on ne peut changer indépendamment les deux traits phénotypiques (température optimale et influence sur l'environnement) car les deux sont liés *via* l'albédo, comme nous l'avions fait remarquer plus haut. Une manière de répondre consisterait donc à ouvrir les possibilités dans *Daisyworld* en autorisant les deux paramètres à évoluer au hasard (mutation possible) *et* indépendamment. Cette seconde stratégie consiste à faire en sorte que H5 n'implique plus immédiatement H3 et H4. Les travaux de Wood et al. (2006) semblent prendre cette seconde option en s'arrangeant pour que les deux traits phénotypiques (influence de la température et température optimale de croissance) ne soient plus corrélés comme ils l'étaient dans WL.

À un modèle statique où les paramètres et la structure sont fixés à l'avance, il faut substituer un modèle où paramètres et éventuellement structure du modèle peuvent évoluer⁷⁷. Nous montrons comment on arrive progressivement à ce type de modèles avec des modèles intermédiaires qui laissent évoluer tantôt un trait, tantôt l'autre. La compréhension parfois flottante dans ces modèles intermédiaires de ce que sont l'évolution et la sélection naturelle invite à la clarification de certains points⁷⁸.

Y a-t-il évolution dans WL? Non si l'on pense à l'évolution des traits car les paramètres sont fixes - mais il y a bien une dynamique de populations. Y a-t-il sélection naturelle? Oui, au moins à certains moments⁷⁹ les deux espèces de pâquerettes se reproduisent de manière différentielle dans des conditions environnementales données. Y a-t-il compétition? Oui il y a dans WL une compétition pour l'espace. Certains auteurs pointeront que la compétition inter et intra-spécifique est cependant la même et introduiront une compétition inter-spécifique plus forte⁸⁰. Ces clarifications sont nécessaires suite à une série d'articles portant sur le caractère "darwinien" de *Daisyworld*. Saunders (1994) commence par laisser la *température optimale* des pâquerettes s'adapter *vers* (la mutation n'est pas aléatoire) les conditions régnant et montre que la régulation s'en trouve diminuée. Stöcker (1995) montre ensuite que si on laisse l'*albédo* évoluer la régulation augmente. Robertson & Robinson (1998) étendent les résultats préliminaires de Saunders portant sur la modification de T_{opt} en indiquant que leur modèle est "darwinien" (mais ils n'autorisent aucune mutation du second trait : la manière dont les pâquerettes influencent leur environnement). Lenton & Lovelock (2000) montrent ensuite que les résultats de Robertson et Robinson ne sont pas reproductibles si on ajoute l'existence d'une *contrainte* sur l'adaptation des pâquerettes (qui pouvaient auparavant s'adapter à n'importe quelle condition). Il faut voir ici que les modifications de Lenton et Lovelock ne consistent pas *seulement* dans l'introduction de *contraintes* sur l'adaptation. Une pure contrainte consisterait à dire qu'il existe certaines températures ressenties auxquelles aucune pâquerette ne peut s'adapter (ce qui correspond au sens strict à l'hypothèse H2). Ce que les auteurs font c'est une réintroduction et un renforcement de l'hypothèse H6. Ils modifient en effet l'équation régissant le facteur

77. Sur la fixité de la structure et des paramètres et l'intérêt des modèles de vie artificielle - *Alife* - on consultera avec fruits Lenton & Van Oijen (2002).

78. Pour une analyse de *Daisyworld* dans un formalisme de génétique quantitative avec une expression de la *fitness*, cf Wood & Coe (2007).

79. En dehors de la situation d'équilibre où les deux espèces sont présentes et ont alors le même taux de croissance.

80. e.g. Cohen & Rich (2000); Pujol et al. (2005). On peut être surpris par cette suggestion d'une compétition inter-spécifique plus forte quand Darwin insistait déjà sur le fait que la lutte pour la survie impliquait une compétition plus forte au sein de la même espèce. Les auteurs de ces modèles justifient leurs choix en rappelant l'existence répandue chez les végétaux de phénomènes d'allélopathie

de croissance comme suit ⁸¹ :

$$\beta(T_i) = [1 - k.(T_i - T_{opt})^2][1 - k'.(T_{opt} - T_{ideal})^2](\beta = 0 \text{ sinon}) \quad (7)$$

Les pâquerettes peuvent donc "s'adapter" au sens où T_{opt} peut être modifiée. Mais une "pénalité de croissance" est introduite si les pâquerettes s'adaptent à des températures qui s'éloignent trop de T_{ideal} : on peut être adapté à (i.e. avoir son maximum de croissance pour) n'importe quelle température comprise entre certaines contraintes (limites de l'habitabilité), mais une pâquerette adaptée à 22.5°C a, quand la température est de 22.5°C, un taux de croissance supérieur à une pâquerette adaptée à 70°C quand la température est de 70°C.

Cette suite d'articles laissant évoluer tantôt un trait tantôt l'autre est l'occasion de rappeler le slogan selon lequel l'ajustement entre les organismes et leur milieu peut être dû à une adaptation des préférences des individus autant qu'à une modification du milieu par les individus. Certains résultats pointent en revanche l'absence de symétrie entre les situations où les pâquerettes modifient leurs préférences environnementales et les situations où elles modifient l'environnement : dans le cas particulier décrit par *Daisyworld* la première situation mène à des comportements linéaires tandis que la seconde donne lieu à la possibilité de comportements non-linéaires ⁸² (transitions de phase, "catastrophes").

Pour ouvrir l'espace des possibles et ainsi répondre à C1, il fallait donc premièrement autoriser des *mutations* dans le modèle (évolution possible) - mais des mutations qui aient lieu *au hasard* et qui ne soient pas, comme dans les premiers modèles, orientées dans une direction préférentielle -, deuxièmement autoriser une évolution *indépendante* des *deux* traits, et non l'évolution d'un seul - ceux voulant plus de régulation laissant évoluer l'influence sur l'environnement, ceux désireux de montrer que la régulation diminue dans certains cas laissant évoluer les préférences environnementales. Quels sont les résultats de ces modèles ? Commençons par ce qui est fréquemment analysé : les conséquences pour la régulation. Le résultat général ⁸³ est que si la dynamique adaptative du trait correspondant à la préférence environnementale est plus rapide que la dynamique du trait influençant l'environnement alors aucune régulation ne peut émerger : les pâquerettes modifient leurs préférences environnementales pour les faire correspondre à l'environnement donné à tout instant. Dans le cas contraire on observe alors des "époques de régulation" autour de valeurs successivement plus grandes de température ⁸⁴. Le résultat concernant l'habitabilité n'est malheureusement pas discuté car l'emphase de ces modèles est placée sur la régulation. A regarder les résultats de ces modèles il semble néanmoins que l'habitabilité est étendue dans trois cas distincts : (i) si une régulation a lieu alors un palier final de régulation permet généralement d'augmenter la durée

81. A nouveau dans un souci d'harmonisation je suis le formalisme de Wood et al. (2008) plutôt que celui de la publication originale dont l'écriture diffère légèrement.

82. Cf. Ackland et al. (2003).

83. Que l'on retrouve dans des modèles aussi différents que Williams & Noble (2005); McDonald-Gibson et al. (2008), le premier conservant H3 et H5, ce que le second ne fait pas.

84. On pourrait retraduire cette condition comme un ratio entre la force de H7 et H8.

d'habitabilité⁸⁵, i.e. les conditions menant à une régulation mènent à une augmentation de l'habitabilité *via* cette régulation, (ii) si la dynamique adaptative des pâquerettes est suffisamment rapide et suffisamment peu contrainte pour suivre l'évolution du forçage externe alors l'habitabilité est maintenue indéfiniment. Le troisième cas, (iii), fait une hypothèse plus forte et suppose encore qu'une valeur donnée T_{opt} maximise le taux de croissance globale même si les différentes espèces de pâquerettes peuvent maximiser leur propre *fitness* dans une large gamme de T_{opt} c'est-à-dire que H6 est conservée (situation décrite ci-dessus à propos des "contraintes" et pénalités de croissance). Dans cette situation les génotypes évoluent indépendamment et l'habitabilité est maintenue⁸⁶.

La conclusion générale est que ces modèles répondent très clairement à la critique la plus forte adressée à WL, la critique C1 de Kirchner, *en exprimant des conditions* (rapport de dynamique entre certaines variables) *qui permettent à une régulation (habitabilité) d'émerger*. Il est crucial de noter ici que ce résultat est *robuste* au sens technique du terme⁸⁷. Pour reprendre les quatre étapes importantes d'une analyse de robustesse telles qu'identifiées par Weisberg (2006b), la régulation de la température (ou le maintien de l'habitabilité qui en est la conséquence) est (i) obtenue dans différents modèles⁸⁸, sous différentes conditions⁸⁹, (ii) pour des raisons clairement identifiées (le rapport de deux dynamiques), (iii) qui ont une interprétation empirique⁹⁰. Enfin, (iv), la régulation n'est plus maintenue au moins dans les cas où ces conditions (sur les rapports de dynamique entre adaptation et influence) ne sont pas le cas⁹¹.

Mais du même coup la force de ces résultats devraient réorienter la perspective de recherche de HG ou de *Daisyworld*. La question n'est plus "à quelle condition une régulation émerge" puisqu'on a désormais de bons éléments déterminant ces conditions. Ils invitent à se poser soit une question de nature empirique : que sait-on de la différence de dynamique d'évolution entre les traits influençant les préférences environnementales et ceux influençant l'environnement ? Ou bien : y-a-t-il une condition environnementale donnée qui maximise le taux de croissance globale même si les différentes espèces sont autorisées à changer leurs préférences environnementales individuelles ? Soit à se poser une question de nature théorique, mais plus précise que la question initiale : à quelles conditions (e.g. d'évolvabilité, de pression de sélection) les dynamiques adaptatives des deux types de traits se séparent-elles ? Bardeen (2010) fait un pas dans cette direction et montre dans un modèle 2D que des pressions de sélection émergeant dans le système peuvent sélectionner des taux de mutation de l'albédo élevé : les patchs de pâquerettes ayant une variabilité de l'albédo très élevée sont en moyenne plus stables que les autres patchs.

85. e.g. fig. 2.a et 3.a de McDonald-Gibson et al. (2008).

86. Wood et al. (2006).

87. Pour une discussion de la notion de robustesse, cf. Levins (1966) pour son introduction, Orzack & Sober (1993) pour une critique et Weisberg (2006b) pour une réponse et une défense de l'intérêt d'une analyse de robustesse.

88. Dans des modèles aussi différents que ceux de McDonald-Gibson et al. (2008) et des versions qui conservent le style de *Daisyworld* en champ moyen ou réalisés à l'aide d'automates cellulaires.

89. Cf. par exemple l'ajout de variables par les modèles discutés dans la section "répondre à la critique C3".

90. On interprète ce rapport entre deux dynamiques de variables du modèle comme reflétant le rapport entre la dynamique qui concerne l'environnement et la manière dont il est influencé par la vie d'un côté et, de l'autre, celle qui concerne la vitesse à laquelle la vie modifie ses préférences environnementales.

91. e.g. les résultats de Robertson & Robinson (1998). Mais la régulation est également perturbée dans d'autres cas, cf. les travaux de Keeling (1991) déjà mentionnés.

4.4 Répondre à la critique C2 et à celle sur l'altruisme, première tentative : l'introduction de "tricheurs"

Nous avons indiqué que WL cherchait à répondre à la première critique de Dawkins et Doolittle (pas de sélection naturelle à l'échelle de la planète). Plus tard Lovelock se servira du modèle pour répondre à la critique de l'altruisme et initiera l'introduction de "tricheurs" dans *Daisyworld* pour voir comment la régulation s'en trouve affectée. Plutôt qu'emprunter un parcours historique je dresserai une taxonomie de ce qui a été appelé tricheur dans la littérature sur *Daisyworld* et montre qu'aucun d'entre eux ne triche au sens évolutif classique du terme.

Le premier moyen d'obtenir un "tricheur" est (i) d'ajouter un *bénéfice de croissance*, allant de quelques pour cents au double du taux initial à l'une des deux espèces (blanche ou noire) : même en doublant le taux de croissance des pâquerettes noires, les blanches continuent à exister et prennent le dessus aux luminosités élevées⁹².

Le deuxième type de tricheur, (ii), consiste en une pâquerette d'*albédo intermédiaire* (disons 0.5 pour fixer les idées, mais n'importe quel albédo entre 0.25 et 0.75 aurait le même comportement). Lovelock (1992) introduisait initialement un bénéfice de croissance de 5% à une pâquerette grise (albédo 0.5) pour ne pas "produire le pigment". Que l'on ajoute en plus un bénéfice de croissance ou non, le "tricheur" envahit la population pour une raison bien précise : l'albédo modifie la manière dont les pâquerettes influencent leur environnement *et* leur température optimale de croissance qui se rapproche ainsi des conditions environnementales.

Enfin le troisième type de tricheur, (iii), correspond aux "espèces pathologiques" initialement proposées par Kirchner en 1989 : des pâquerettes noires avec une température optimale élevée et des blanches avec une température optimale basse. Ces tricheurs ne perturbent pas la régulation⁹³ (si on ajoute des contraintes sur l'adaptation et des "pénalités de croissance" : H6, H7).

Il faut être clair qu'aucun de ces tricheurs (et ce sont, à ma connaissance les seuls types de tricheurs introduits dans *Daisyworld* et annoncés comme tel) ne triche au sens évolutif classique du terme⁹⁴. Le problème typique en théorie de l'évolution posant les bases à une réflexion sur les conditions nécessaires à ce qu'un trait altruiste évolue considère une situation dans laquelle des individus d'une population donnée contribuent à travers une activité métabolique coûteuse à un bien *commun*. Mais ce bien commun est un "bien" et est "commun" précisément parce que la population initiale est homogène au moins du point de vue de certaines préférences environnementales : une activité donnée peut bénéficier à *tous les individus* et à *chacun* des individus de la population sans restriction aucune. La difficulté de *Daisyworld* est la suivante : ce qui est typiquement appelé "bien commun" correspond à une situation qui *moyenne* les préférences *hétérogènes* des différents types d'individus présents. Si la focale d'intérêt est l'habitabilité on maximise la présence de "la vie" sur la planète mais pas d'une espèce particulière ; si la focale d'intérêt

92. Lansing et al. (1998).

93. Cf. Wood et al. (2006).

94. Je remercie Arnaud Pocheville pour la discussion qu'on a eue à ce sujet et ses précieux commentaires qui m'ont aidé à comprendre certains points délicats.

est la régulation en tant qu'elle est favorable à la vie alors ce qui est optimisé, le "bien commun" de *Daisyworld* c'est la biomasse totale.

Cette définition du "bien commun" ne cadre pas avec le problème typique posé par l'émergence de l'altruisme. Ce n'est pas la "réponse" ou la "solution" que propose HG qui est problématique, mais c'est le fait que les deux *problèmes* (*Daisyworld*, l'altruisme en théorie de l'évolution) ne sont pas posés de la même manière. Si on veut - mais rien n'oblige à le faire - réfléchir à des questions d'altruisme avec *Daisyworld* alors il faudrait prendre des populations ayant des préférences environnementales homogènes et préciser qu'on ne peut tricher que *relativement à une espèce de pâquerette donnée*. Il faudrait donc (i) se concentrer sur une espèce donnée ayant les mêmes préférences environnementales (e.g. une espèce de pâquerette blanche dont les individus ont tous la même température optimale de croissance), (ii) qu'une sous population de cette espèce ne "refroidisse" pas son environnement quand la température ambiante est "trop élevée" pour cette espèce, (iii) et que cette sous population ait un bénéfice de croissance (i.e. que l'on suppose qu'influencer son environnement ait un coût).

Cela ne signifie pas que les travaux cités introduisant des tricheurs perdent leur intérêt. Cela signifie seulement que ces "tricheurs" servent à répondre à C1 et non à la critique sur l'altruisme dans la mesure où aucun d'entre eux ne triche au sens évolutif classique du terme; et ce non pas parce que les auteurs de *Daisyworld* ne voudraient pas répondre à cette critique sur l'altruisme, mais parce qu'on s'est trompé en pensant que des problèmes typiques d'altruisme se posaient dans le cadre qui les intéresse.

4.5 Répondre à la critique C2bis et à celle sur l'altruisme, seconde tentative : les produits dérivés de la sélection

La première stratégie pour répondre à la critique sur l'altruisme de Dawkins consistait à introduire des tricheurs et montrer qu'une régulation (habitabilité) perdurait. Mais plutôt que d'accepter la validité de la critique, *Daisyworld* aurait pu suivre certains arguments qui émergent dans la littérature sur HG, présentés en introduction : Gaïa se construit sur des produits dérivés de la sélection, sur des déchets sur laquelle la sélection n'a pas de prise. Il faut alors trouver un mécanisme explicatif qui d'un ensemble désordonné de déchets métaboliques conduit à une régulation globale ou à une augmentation de l'habitabilité. Un premier pas dans cette direction est effectué par Staley (2002) et systématisé par McDonald-Gibson et al. (2008) et Dyke (2010). Ces deux derniers modèles abandonnent H3, H4, H5 et H6. Les évolutions des deux traits phénotypiques sont indépendantes mais surtout l'influence qu'a un organisme sur son environnement est si faible qu'elle ne peut avoir, seule, de conséquence sélective. Dit autrement, compte tenu des valeurs des paramètres choisis par McDonald-Gibson et al. (2008) une espèce a plus de chance de modifier sa *fitness* en mutant ses préférences environnementales qu'en affectant l'environnement. Cela vient de l'absence de ségrégation entre un environnement local et un environnement global : un niveau de ressources est partagé par tous les individus. Ce niveau de ressources est affecté par un forçage externe et par les individus : l'influence d'un individu est négligeable, pas celle de l'ensemble de la population.

Ces travaux expriment à nouveau les conditions d'émergence d'une régulation à partir des dynamiques adaptatives relatives des deux traits phénotypiques.

Une seconde perspective est envisagée dans un modèle de vie artificielle réalisé par Williams et Lenton⁹⁵. Le modèle consiste en une série de "flasques" contenant des micro-organismes qui consomment des ressources et excrètent des déchets métaboliques. L'environnement (concentration en ressources, déchets, etc.) d'une flasque est partagé par tous de la même manière (pas de ségrégation spatiale intra-flasque). Les flasques sont inter-connectées : à chaque pas de temps une fuite d'une flasque à l'autre a lieu (transportant des micro-organismes). Les préférences environnementales des micro-organismes sont les mêmes pour l'ensemble du système. Les organismes peuvent influencer l'environnement dans toutes les directions (mutations aléatoires des ressources consommées et des déchets excrétés), si bien qu'une population moyenne dans une flasque peut aussi bien orienter l'environnement vers le "bien commun" (préférences partagées) que dégrader l'environnement. Un double mécanisme combinant *feedback* sur la croissance et *sélection au niveau de l'écosystème* permet de réguler l'environnement vers les préférences environnementales globales. La notion de "*feedback* sur la croissance" a été développée par Lenton (1998) : une communauté qui dégrade ses conditions dégrade la croissance des individus ce qui limite l'ampleur de la dégradation ; une communauté qui améliore ses conditions stimule sa croissance et améliore ainsi davantage les conditions. Le *feedback* sur la croissance est la première étape nécessaire à l'émergence d'une régulation : si une flasque contient (par hasard) une communauté de micro-organisme qui dégrade l'environnement elle ne pourra supporter que peu de micro-organismes. La seconde est une sélection d'un écosystème (d'une flasque) : au moment du mélange, les flasques contenant des populations améliorant l'environnement global transfèrent *davantage* d'organismes aux autres flasques, ce qui augmente la probabilité que les micro-organismes transférés, en moyenne, contribuent à améliorer les conditions⁹⁶.

Ce modèle est proposé pour faire progresser HG et répondre aux critiques de Dawkins : on cherche un principe d'ordre ne nécessitant pas de sélection à l'échelle de l'ensemble du système mais au niveau intermédiaire, on s'affranchit du problème du tricheur car les préférences environnementales sont les mêmes. Mais il n'y répond que partiellement parce qu'il élimine à la base les problèmes normatifs soulevés par HG en supposant que "la vie" a "une" exigence environnementale donnée et fixe. En effet, le problème principal du "*feedback sur la croissance*" est qu'il suppose nécessairement que les préférences environnementales sont les mêmes pour tous (HG est portée à son maximum). Les auteurs mentionnent néanmoins qu'introduire une mutation des préférences environnementales ne change pas qualitativement les résultats (qui ne sont malheureusement pas montrés) ; certes mais cela change radicalement la manière de les interpréter. Car si les préférences environnementales ne sont pas partagées par tous alors l'influence d'une population moyenne sur l'environnement modifie également les pressions de *sélection* et change ainsi les *proportions* des différentes espèces, donc la manière dont les conditions sont affectées. Dans ce cas les

95. 2007,2008, *Op. Cit.*.

96. Il y a sélection au-delà du niveau de l'individu parce que l'environnement est amélioré au sein d'une flasque suite à la moyenne des contributions hétérogènes des différents individus.

individus qui ont une préférence environnementale qui s'écarte de la majorité sont sélectivement désavantagés et disparaissent. Autrement dit, il n'y a pas croissance égale de l'ensemble de la population mais sélection de certains types d'individus : le mécanisme n'est plus un principe *cybernétique* mais devient un mécanisme *sélectif* où *la majorité l'emporte*. Ces précisions n'enlèvent pas grand chose à la nouveauté de la question et l'intérêt des phénomènes en jeu mais clarifient les termes et la nature des mécanismes ayant effectivement lieu.

4.6 Répondre à la critique C3 : simplicité du modèle et complexité du monde

Dyke et Weaver s'intéressent de près à la critique de Kirchner portant sur la simplicité du modèle (C3). Dyke (2010) montre que l'on peut reproduire et étendre les résultats de *Daisyworld* en ajoutant plusieurs variables environnementales. Dyke reprend pour cela et modifie légèrement la version de McDonald-Gibson et al. (2008) et s'intéresse à la régulation de quatre variables (et non une seule comme dans la majorité des modèles issus de *Daisyworld*). Il montre que le système est régulé face à des perturbations extérieures ce qui invite à repenser la critique de Kirchner⁹⁷. Weaver & Dyke (2012a) montrent par ailleurs que la découverte d'effets spatiaux permises par les automates cellulaires peut en fait être réduite mathématiquement et décrite dans des modèles de dimension nulle, ce qui suggère que l'on peut décrire des comportements pertinents pour un objet complexe avec des modèles très simples⁹⁸. Le fait que l'ajout de variables environnementales ou que la réduction de la complexité (spatialité, etc.) ne change pas significativement les résultats invitent, ensemble, à repenser la critique de Kirchner concernant la trop grande simplicité du modèle.

4.7 Conclusion partielle : la perspective de HG déduite de l'analyse de ses modèles

Nous voudrions ici nous arrêter sur l'intérêt que peut avoir une étude précise des modèles et de leurs hypothèses pour comprendre la perspective adoptée par une discipline donnée. Les modèles mathématiques et computationnels forcent leurs concepteurs à faire des choix : il y a des éléments que vous devez supposer donnés (les hypothèses du modèle) pour en expliquer d'autres (les phénomènes qui vous intéressent). Il peut être ainsi plus aisé de déterminer ce qu'un champ disciplinaire cherche à expliquer et ce qu'il suppose acquis en allant regarder ses modèles plutôt qu'en examinant les arguments théoriques verbaux. Les analyses précédentes nous permettent de tirer deux leçons principales sur la perspective qu'adopte HG, sur ce qu'elle se donne et ce qu'elle cherche à expliquer.

La première leçon est que le "principe d'ordre" - qui permet le maintien de la régulation ou de l'habitabilité sans sélection à l'échelle du système - est à l'œuvre sous certaines conditions que l'on pourrait résumer sous l'idée d'une prodigalité de la vie : plus "la vie" affecte l'environnement relativement à ce

97. Ces résultats sont étendus dans Weaver & Dyke (2012b).

98. Ce qui, en passant, soulève des questions plus générales (sur la notion d'émergence).

qu'elle modifie ses préférences environnementales (ce que l'on a vu dans la réponse à C1), et plus les manières de l'affecter sont diverses (ce que nous avons vu avec les conceptions que Lovelock se faisait de la biodiversité), plus on a de chance de "tomber" (par hasard) sur la bonne combinaison qui mènera à une régulation, et plus l'habitabilité a des chances d'être maintenue. Cette idée de prodigalité est assez manifeste si l'on pense que la majorité des modèles suppose que *tant* que les conditions le permettent la vie est présente et "prête" à coloniser la planète. Dans l'implémentation du code numérique cela se traduit en empêchant la proportion de pâquerettes de descendre en dessous de 0.01. On pourrait également lire l'intuition suivante :

"Dès que les organismes deviennent tellement abondants que les effets dérivés de leurs métabolismes commencent à menacer la vie à une échelle globale, des organismes différents évolueront et les pollueurs ou les polluants deviendront alors des ressources." Lenton & Van Oijen (2002), p. 689,

comme témoignant de cette confiance dans la prodigalité de la vie, de sa capacité à évoluer et affecter l'environnement.

La seconde leçon que l'ensemble des modèles réalisés dans le cadre HG suggère est la suivante : HG ne se soucie pas d'une espèce particulière mais a une position (implicite) consistant à "moyenner" les préférences des vivants, à se satisfaire du simple fait que la vie continue. On a vu cela à l'œuvre à plusieurs reprises. On l'a vu lorsque la dynamique des populations intervenait pour expliquer la régulation de la température et quand on a rappelé que la température "optimale" optimisait la croissance globale mais rendait la croissance de chacune des espèces sous-optimale. On l'a vu également lorsque Lenton & Lovelock (2000) puis Wood et al. (2006) maintenaient l'hypothèse H6 sans la trouver problématique : il y a un état donné fixe qui, même si les espèces évoluent dans le temps, maximise la croissance *globale* de la biosphère. On l'a vu enfin dans ce que Williams et Lenton appellent *feedback* sur la croissance, principe "cybernétique" qui dès lors que l'on prend en compte les différences de préférences environnementales des vivants se révèle être de la sélection classique et correspond à une situation de "tyrannie du groupe".

5 Nature du modèle et portée épistémique

Après avoir examiné en détail les réponses aux critiques C1 (les hypothèses font de WL un cas particulier), C2 (émergence d'un tricheur) et C3 (simplicité du modèle), cette section se concentre sur les critiques portant sur la *nature* du modèle : C3 dans une certaine mesure, C4 (un modèle - ou des questions? - trop général(es)?) et C5 (le caractère "fictif" du modèle).

Comment un modèle décrivant un monde (*fictif*) aussi éloigné de la Terre que peut l'être une planète peuplée de deux espèces de "pâquerettes" et dont la modélisation du climat est tellement *simple* qu'elle ne prend en compte que l'albédo (et néglige, par exemple, l'effet de potentiels gaz à effet de serre), même s'il décrit des relations entre des propriétés (vie, environnement) qui semblent assez générales pour qu'on les rencontre sur Terre, pourrait-il faire avancer notre connaissance sur le monde? Divisons cette question, simple en apparence, en trois problèmes distincts mais liés entre eux. Le premier problème concerne

la *nature* du modèle, ce qu'il *est* : ainsi posée, cette question semble supposer qu'un modèle *est* une *représentation* d'un monde ou d'un système, représentation qui peut être imparfaite (cf. la simplicité du climat) mais doit ressembler par certains aspects (description de propriétés générales comme la vie et son environnement) au monde actuel. Deux points font ici problème : la simplicité et la généralité du modèle d'une part ("la vie"), son caractère fictif de l'autre (les "pâquerettes"). Le caractère fictif en particulier peut soulever des difficultés pour aborder le second et le troisième aspect de la question posée ici, à savoir ce qu'un modèle *fait* et les raisons que nous avons de penser qu'un modèle fait bien ce qu'il est censé faire.

5.1 Ce qu'*est* un modèle, une simulation, une fiction : métaphysique et épistémologie

On retiendra ce qui paraît être l'idée centrale à l'ensemble des conceptions philosophiques sur les modèles : un modèle repose sur une analogie⁹⁹ ; pour comprendre un phénomène dans le monde on étudie un autre système. Cet autre système peut être un modèle physique et concret, un modèle mathématique ou un modèle computationnel, une simulation numérique. Ces trois types de modèle¹⁰⁰ partagent le fait d'être des modèles - et soulèvent donc un corps de difficultés communes - mais ne partagent pas leur support d'implémentation. La possibilité de réaliser des simulations numériques a bouleversé le paysage scientifique des dernières décennies mais soulève en même temps des questions épistémiques singulières¹⁰¹ : opacité épistémique, possibilité d'aboutir à des résultats que nous pourrions obtenir *en principe* mais pas *en pratique* sans ordinateur, particularité des simulations menées avec des automates-cellulaires, etc. Des solutions analytiques ont été trouvées pour le modèle initial (WL) : ceci fait de WL un modèle *mathématique* même s'il est initialement proposé comme simulation. En revanche, certaines variantes de *Daisyworld*, en particulier les modèles utilisant des automates cellulaires pour rendre explicite la description de l'espace, ne peuvent être traitées analytiquement et soulèvent certainement des questions spécifiques à ce titre. Parce que les critiques principales et les problèmes théoriques discutés dans la littérature sur *Daisyworld* concernent davantage la formulation du modèle et ses hypothèses que son support d'implémentation - la découverte de solutions analytiques laisse entièrement intactes les critiques principales -, je laisse ici de côté les problèmes que les variantes de *Daisyworld* pourraient soulever *qua* simulation numérique pour me concentrer sur les problèmes que *Daisyworld* soulève *qua* modèle (mathématique).

On observe un regain d'intérêt pour l'idée que la science basée sur les modèles partage des propriétés intéressantes avec les fictions (littéraires). La pratique des scientifiques consisterait à "imaginer" certaines

99. Je remercie Jean Gayon pour cette intuition qui, si simple qu'elle paraisse, ne m'a jamais semblé aussi claire que lorsque formulée par lui lors d'un cours sur les organismes modèles puis d'une présentation à Genève au cours d'une école d'été de l'EASPLS sur le thème "*Ex vivo, in vivo, in vitro, in silico*, models in the life sciences", Sept. 2012.

100. Cf. Weisberg (2013) pour une discussion autour de la légitimité de cette taxonomie, p.15-22. Je voudrais remercier ici Michael Weisberg de m'avoir fait parvenir une version de son livre en cours d'achèvement.

101. Voir par exemple Grüne-Yanoff & Weirich (2010); Humphreys (2009) pour une revue sur les simulations numériques et des arguments montrant, contre Frigg & Reiss (2009), les problèmes singuliers que les ordinateurs posent.

situations "fictives" (une population infinie, etc.) et s'en servir comme point de départ pour apprendre des choses sur le monde réel; la question qui se pose à nous serait alors de savoir comment l'on passe d'une connaissance détaillée et approfondie d'un monde fictif (le modèle) au moindre début de bout de connaissance sur le monde réel¹⁰². Je ne présenterai pas ces débats¹⁰³ pour une raison très simple : aussi attirante que puisse sembler cette littérature pour résoudre certains problèmes sur la manière dont nous apprenons avec *Daisyworld*, il faut bien remarquer que ces auteurs prennent l'ensemble des modèles pour des fictions. Or ce qui nous intéresse c'est la *particularité* de *Daisyworld*. *Daisyworld* semble différer d'autres modèles utilisés dans les mêmes disciplines et parfois créés par les mêmes auteurs en décrivant des entités qui n'existent pas dans le monde (pâquerettes géantes). Nous montrerons que que *Daisyworld* peut en fait être réinterprété comme un modèle classique : si vous pensez que tous les modèles sont des fictions, alors *Daisyworld* en est une, si vous pensez que les modèles standards ne doivent pas être rapprochés des fictions, alors *Daisyworld* ne doit pas l'être davantage.

Simplicité et généralité du modèle : *Daisyworld* est-il aux sciences du système Terre ce que Lotka-Volterra est à l'écologie ? On aborde ici les problèmes soulevés par la simplicité et la généralité du modèle. Si l'on revient à l'intuition qu'un modèle est une analogie on est amené à constater que tout modèle, quel qu'il soit, ne peut ressembler à sa cible que de manière imparfaite : seules certaines relations (d'intérêt) entre certaines propriétés seront similaires. Un modèle fait donc des idéalizations, des approximations¹⁰⁴ : un modèle simplifie, laisse tomber certains éléments de la cible qu'il modélise. On peut néanmoins faire des modèles de la même cible qui soient plus complexes que d'autres. Il a été assez tôt mentionné que des modèles ne pouvaient maximiser en même temps certains *desiderata* épistémiques (précision, réalisme, généralité) et que l'on devait dès lors adopter des stratégies particulières de modélisation¹⁰⁵. On peut être amené à simplifier la cible qu'on modélise pour deux raisons essentielles¹⁰⁶. Dans le premier cas on vise bien une description aussi précise et fine que l'on peut du monde mais soit parce que c'est plus économe en ressources épistémiques (e.g. on néglige les frottements) soit parce qu'on ne sait pas encore gérer des équations plus fidèles mais plus complexes, on fait le choix de simplifier quelque peu le modèle. Dans d'autres cas on simplifiera pour un second type de raison : parce que l'on veut s'abstraire de certaines propriétés que l'on pense contingentes et mettre en valeur les facteurs causaux minimum essentiels à la production du phénomène d'intérêt ; on ne cherche pas à décrire le monde tel qu'il est mais à produire un modèle qui soit plus *général*. La simplicité voulue de *Daisyworld* répond initialement à ces deux exigences :

"L'environnement et la biosphère terrestre sont extrêmement complexes et il n'y a pas un seul

102. Godfrey-Smith (2009b).

103. Pour des propositions récentes allant dans ce sens, cf. Godfrey-Smith (2006, 2009b); Frigg (2010); Toon (2010). Voir également la collection d'essais dirigé par Suarez en 2009, en particulier les contributions de Morrison (2009a), Winsberg (2009) qui restreignent fortement l'utilisation du terme fiction et celles de Giere (2009) et Teller (2009) qui s'inquiètent pour l'essentiel de l'atteinte que ce développement des fictions en science pourrait porter au réalisme scientifique. Sur le réalisme et une possible voie de sortie, cf. Levy (2012).

104. Je me permets ce flottement sémantique car il est présent dans la littérature et certains auteurs utilisent alternativement abstraction, approximation ou idéalisation pour véhiculer cette idée.

105. Levins (1966). Cf Orzack & Sober (1993); Weisberg (2006a) pour une discussion.

106. Cf. Weisberg (2007a) sur cette distinction.

aspect de leur interaction qui puisse déjà être décrit avec confiance par une équation mathématique. Pour cette raison nous avons choisi d'étudier un monde artificiel qui a une biosphère très simple qui est spécifiquement construite pour exhiber les propriétés qui nous intéressent - pour les nommer, un couplage étroit entre la biosphère et l'environnement global ¹⁰⁷." Watson & Lovelock (1983), p.284

Compte tenu des progrès faits en modélisation d'une part et en compréhension des interactions vie-environnement à l'échelle du globe de l'autre, la première justification n'est plus avancée aujourd'hui mais la seconde l'est :

"L'ordinateur peut sembler être un endroit étrange pour étudier un phénomène de taille planétaire quand on pourrait examiner le vrai monde. Cependant, avec pour seul échantillon disponible la Terre les inférences qui peuvent être faites à propos de la probabilité de certaines caractéristiques sont nécessairement limitées." Lenton & Williams (2009), p.61.

L'ordinateur (ou le modèle mathématique, peu importe ici) sert donc à s'abstraire de propriétés qui sont sans doute contingentes sur Terre (e.g. l'apparition des métazoaires, l'insolation solaire, l'influence de la vie sur tel ou tel gaz à effet de serre) pour déduire des principes généraux. Ces principes généraux sur lesquels on se concentre peuvent tout à fait correspondre à la liste des hypothèses explicitées (section 4.1) qui ressemble assez fortement à des tentatives récentes de théorisation de principes minimaux en écologie ¹⁰⁸. Parce que *Daisyworld* cherche à s'abstraire de propriétés contingentes pour se concentrer sur des propriétés simples et générales, il est rapproché de modèles simples et abstraits tels que ceux de Lotka et Volterra :

"*Daisyworld* est à la modélisation du système Terre ce que le modèle de lapins et de renards de Lotka et Volterra est à la modélisation écologique : une première tentative inspirante." Lenton & Lovelock (2001), p.303

Les modèles de Lotka-Volterra sont des modèles simples constitués de deux équations différentielles décrivant l'évolution de deux variables qui dépendent l'une de l'autre. Ils sont utilisés en biologie des populations : on suppose que ces équations décrivent bien des dynamiques où une proie et un prédateur interagissent. On illustre en général ce modèle en disant que la première variable décrit des lapins, la seconde des renards. On vient ici de présenter trois niveaux : (i) les équations constitutives du modèle qui lient des variables, (ii) l'interprétation des équations comme décrivant la dynamique d'un système composé d'une proie et d'un prédateur, (iii) la précision que la proie pourrait être un lapin et le prédateur un renard. Le modèle au sens strict correspond à (i). (ii) et (iii) sont extrinsèques au modèle. Par ailleurs, (ii) ne représente rien dans le monde : il n'y a rien dans le monde qui ressemble à une "proie en général ¹⁰⁹". Ce niveau (ii) décrit en fait des propriétés que l'on abstrait du comportement d'une collection d'individus qui existent bien dans le monde et qui correspondent au niveau (iii) : lapins et renards, lions et gnous, etc. Pour pousser la comparaison entre *Daisyworld* et les modèles à la Lotka-Volterra, on pourrait dire (i) qu'il y a les équations de *Daisyworld*, (ii) que l'on interprète comme décrivant la dynamique d'un système contraint par une perturbation externe dans lequel la vie et son environnement interagissent. Enfin, (iii), un "bon exemple" qui instancie ces propriétés est constitué par ... des pâquerettes géantes blanches et noires sur une planète fictive.

107. Cf. également Adams et al. (2003), p. 505, Von Bloh et al. (1997), p. 249 sur la simplicité de *Daisyworld*.

108. Cf. Pigliucci (2012) et les références à l'intérieur pour des exemples de ce type.

109. Cf. Weisberg (2013) pour un argument similaire, p.116.

Cette interprétation de *Daisyworld* comme un modèle simple et général qui est aux sciences du système Terre ce que Lotka-Volterra est à l'écologie semble à première vue satisfaisante si l'on pense à la simplicité du modèle et au succès qu'il a eu dans ces disciplines. Elle soulève néanmoins deux difficultés importantes qui correspondent à l'interprétation que l'on fait du modèle pour les niveaux (ii) et (iii).

Premier problème : les pâquerettes. La première difficulté est flagrante : alors que Lotka-Volterra semblait pouvoir *in fine* nous renseigner sur des propriétés d'entités qui existent dans le monde (les lapins et les renards du niveau (iii)), *Daisyworld* a l'air de nous renseigner sur des propriétés de pâquerettes imaginaires. Les pâquerettes de *Daisyworld* ne correspondent en rien aux pâquerettes du monde : l'influence d'un individu sur la température locale est de plusieurs ordres de grandeur supérieure à celle qu'une pâquerette ou même qu'un champ de pâquerettes pourraient avoir dans notre monde.

Les auteurs font le choix de *parler* de pâquerettes mais il faut rappeler à nouveau que le modèle c'est les équations et rien d'autres que les équations : les pâquerettes ne sont pas *dans* le modèle. Or, si l'on souhaite à tout prix donner une interprétation empirique aux équations (chercher des instances du modèle dans le monde), on peut en trouver. On pourrait en effet les considérer comme une abstraction des propriétés d'un écosystème terrestre, par exemple une forêt boréale ou tropicale, dont on sait¹¹⁰ l'influence qu'ils ont sur le climat et les rétroactions qui existent entre leur influence sur le climat et leur croissance¹¹¹. Ce premier problème tient donc moins aux équations et ce qu'elles sont et décrivent qu'à l'histoire qu'on est libre de raconter pour illustrer, faire comprendre ces équations¹¹².

Second problème : peut-on interpréter l'ensemble des équations du modèle comme décrivant des propriétés générales ?

Le second problème soulevé par une interprétation de *Daisyworld* comme un modèle de type Lotka-Volterra est plus profond. *Daisyworld* ne nous dit pas "imaginons le système le plus simple avec une ressource R influencée et influençant la vie". Le modèle initial et nombre de ses variantes comportent une quantité importante de précisions et de détails "réalistes" (directement implémentés dans les équations) qui semblent entièrement superflus et ne pas cadrer avec la "généralité" du modèle. On peut ici penser au réalisme de la description de la luminosité solaire et de la diffusion thermique dans le modèle (ne suffisait-il pas de faire varier une variable abstraite de 0 à 100 comme dans McDonald-Gibson et al. (2008)?), au choix des températures pour le facteur de croissance qui correspondent aux températures de croissance de la moyenne des plantes terrestres (abondamment discutés par Lenton & Lovelock (2000) par exemple). Ne doit-on pas précisément s'affranchir de ce genre de détails et troquer les valeurs actuelles des températures de croissance contre la simple idée qu'il *existe* des limites, des contraintes, pour la croissance des organismes ?

Des variantes tardives s'affranchissent de ce problème en simplifiant le modèle initial et en se concentrant sur des propriétés plus générales¹¹³. Parce que des variantes tardives dépassent ces difficultés une

110. Ou plutôt dont on saura plus tard, cf. Lenton (1998) et références citées par l'article.

111. Cf. Baldocchi et al. (2005) pour l'utilisation de *Daisyworld* pour modéliser un cas empirique précis.

112. Pour un argument similaire dans un autre contexte, voir Wheeler et al. (2002).

113. Cf. par exemple Harvey (2004); Williams & Noble (2005); Dyke & Harvey (2006); McDonald-Gibson et al. (2008)

option consisterait alors à négliger celles-ci. Mais alors on manque de voir que d'autres variantes sont publiées dans le même "style" (pâquerettes et détails réalistes¹¹⁴), et on abandonne l'idée que le modèle initial pouvait être rapproché d'un modèle simple et général.

Une solution est néanmoins envisageable. Il suffirait de considérer que *Daisyworld* fonctionne en plusieurs temps : (i) on construit un modèle simple et *précis* que l'on maîtrise¹¹⁵, (ii) ce modèle sert ensuite de base à partir de laquelle on effectue une induction : on généralise le comportement à partir de cet exemple artificiel que l'on s'est donné, (iii) l'induction nous a permis de nous donner des principes généraux qui peuvent - c'est à vérifier à chaque fois - être instanciés sur Terre¹¹⁶.

5.2 Ce que fait un modèle

On peut considérer qu'un modèle est un système qui nous donne un tableau de valeurs de sortie quand on lui en donne un en entrée. Partant, on peut utiliser les modèles pour *faire* essentiellement deux choses : expliquer ou prédire (si l'on pense que ces deux activités sont distinctes). La conception que Kirchner semble avoir à l'esprit des modèles est la suivante : la comparaison entre les valeurs de sortie d'un modèle et les valeurs que l'on peut effectivement mesurer dans le monde, si elle est bonne, nous permet de proposer que le système causal du modèle (les relations entre les propriétés du modèle) peuvent être des bons candidats pour représenter le monde. Si l'on passe pour le moment sur la validation du modèle (à quelles conditions considère-t-on que le modèle est "bon"?) on fait remarquer que cette vision donne une portée *explicative* aux modèles : la structure causale du modèle est considérée comme une bonne candidate pour représenter la structure causale du monde et explique alors le phénomène à expliquer (les valeurs de sortie).

Parfois le même modèle peut être utilisé alternativement pour l'une ou l'autre de ces activités : proposer une explication potentielle et prédire. Les modèles météorologiques sont de bons exemples : les modèles prédisent des champs de température et de pression pour une semaine. Une fois que la semaine s'est déroulée dans le monde on peut récupérer les données (issues de satellites, ballon sondes, mesures LIDAR, etc.) et comparer ces données mesurées aux données prédites pour affiner le modèle (assimilation de données) ce qui nous permet d'un côté de mieux comprendre le fonctionnement de l'atmosphère et de mieux la décrire, de l'autre d'effectuer des meilleurs prédictions.

Mais il faut bien reconnaître qu'il y a des cas où l'on ne *peut* pas comparer les valeurs prédites par le modèle avec des valeurs empiriques "réelles", et ce précisément parce que le but que sert le modèle est exactement de nous donner ces valeurs, de *prédire* des comportements et non de les expliquer : certains

pour une simplification progressive du modèle.

114. E.g. Boyle et al. (2011); Biton & Gildor (2012); Weaver & Dyke (2012a).

115. On pourrait justifier le fait de passer par un modèle précis, concret, avec des détails, par des raisons psychologiques. Raconter une histoire, plutôt que de rester général, permet de fixer les idées, d'avoir un exemple commun que l'on reprend et que l'on peut discuter. On peut ici penser aux expériences de psychologie qui montrent les erreurs triviales de logique qui sont faites par des personnes quand les tests portent sur des propositions générales, par opposition au succès de ces mêmes personnes aux mêmes problèmes logiques formulés avec un contenu plus concret, e.g. Griggs & Cox (1982).

116. C'est ce que semblent indiquer certains passages. Ainsi : "Si nous pouvons supposer que le monde réel est jusqu'à une certaine mesure régulé comme *Daisyworld*, alors cela fournit certaines informations sur les problèmes environnementaux posés par la biodiversité." Lovelock (1992), p. 390.

modèles ne peuvent être que prédictifs. Quand des proxies directs manquent pour évaluer la concentration en O₂ et CO₂ dans l'atmosphère au cours des 500 derniers millions d'années on est obligé de se rabattre vers un modèle qui rassemble les connaissances disponibles sur les *flux* de carbone et d'oxygène qui existent entre les différents réservoirs (croûte terrestre, atmosphère, etc.), et à partir d'un modèle en boîte de ces flux, on peut calculer ("prédire") les variables d'intérêt¹¹⁷. Les prédictions faites par le modèle dépassent en quantité et en précision de plusieurs ordres de grandeur n'importe quelle information que l'on pourrait obtenir à l'aide de proxies empiriques ; elles sont, pour le moment mais peut-être à jamais, notre seule source de connaissance. Certains auteurs tirent les conséquences de la qualité prédictive de certains modèles pour les rapprocher d'instruments de mesure¹¹⁸. De fait, si on prend conscience qu'aucune mesure n'est une mesure *directe* - e.g. une données satellitaire brute est traitée par des modèles numériques pour acquérir un sens - alors il faut accepter l'idée que certains modèles peuvent être considérés comme des instruments de mesure (à condition que les valeurs d'entrée soient le résultat d'une interaction causale avec le monde).

Nous venons de tracer une distinction entre deux choses que l'on peut faire avec un modèle : prédire et expliquer. Prédire ne renvoie pas ici à la description d'un état futur du monde mais à l'idée que l'on cherche l'état final de l'évolution d'un système causal donné avec des conditions initiales fixées. Par expliquer nous entendons ici l'activité symétrique : on a un phénomène donné, on cherche le système causal qui a pu l'engendrer. Mais certains modèles nous permettent de faire des choses plus étranges. Certains permettent d'étudier le comportement de phénomènes qui ne sont pas seulement une abstraction de phénomènes ayant lieu sur Terre mais qui parfois sont (volontairement) en contradiction avec le monde réel : certaines propriétés que nous jugeons essentielles au monde sont délibérément supprimées. C'est ce genre d'activité que Kirchner reprochait aux modèles comme *Daisyworld* et à certaines questions théoriques posées par HG : à quoi ressemblerait le monde si la vie n'avait aucune influence sur celui-ci ? Seuls les modèles peuvent nous permettre d'explorer ces questions. Avant d'étudier les raisons pour lesquelles nous devons avoir confiance dans ce que font les modèles je décris l'intérêt que peuvent avoir ces questions contrefactuelles : "*what if...?*" :

"Le besoin d'avoir une biosphère qui participe à un tel système est illustré de la meilleure manière en considérant les conséquences de son absence." Lovelock (1983), p.72.

"La beauté de *Daisyworld* est sa simplicité qui en fait un excellent modèle "tutoriel" pour répondre à des questions "*What if...?*" concernant les interactions des organismes avec leur environnement." Lenton & Lovelock (2001), p.289

Il faut alors se rappeler qu'une des forces de *Daisyworld* résulte de la *comparaison* de la courbe d'évolution de la température dans un monde où les pâquerettes n'influencent par leur environnement (et contredisent ainsi une propriété jugée essentielle sur Terre) avec celle où les pâquerettes l'influencent. Le modèle fonctionne bien en deux temps : on prédit le comportement d'un modèle dans lequel on supprime délibérément une propriété (on supprime une équation du modèle, on fait tendre un paramètre vers zéro ou l'infini, etc.), puis on compare les résultats de cette prédiction avec les prédictions faites

117. Cf. Berner (2004) pour une synthèse sur ces modèles dont il est l'initiateur au début des années 1980.

118. Cf. Morrison (2009b).

par le même modèle dans lequel on a laissé intacte la propriété qui nous intéresse. On a le sentiment que la comparaison de ces deux prédictions nous permet de "comprendre", d'expliquer le rôle que joue cette propriété. L'originalité de *Daisyworld* tient donc à la combinaison et la comparaison de deux types d'activités de modélisation. Le premier type correspond à la courbe "avec pâquerettes" : on cherche une *explication possible* de la stabilité de la température sur Terre¹¹⁹. Le second type correspond à une activité de "modélisation hypothétique"¹²⁰ : on supprime volontairement une propriété importante dans le monde pour étudier les conséquences de son absence (courbe "sans pâquerettes") et on montre que sans cette propriété on ne reproduit pas le phénomène d'intérêt (stabilité de la température). Fisher disait ainsi qu'il n'y avait pas de meilleur moyen de comprendre les raisons pour lesquelles il n'y avait que deux sexes en biologie que de construire un modèle d'une population avec trois sexes¹²¹.

Reste que Kirchner condamnait ces *questions* parce qu'elles n'étaient pas testables d'une part et qu'elles étaient éloignées de questions plus pressantes. Je passe sur le goût de Kirchner pour certaines questions particulières et "pressantes" qui ne peut être justifié qu'au nom de considérations éthiques et éventuellement morales pour me concentrer sur la seconde critique relevant de critères épistémiques ("non testable"). On pourrait reformuler une partie de la critique C4 de Kirchner comme une demande de raisons et d'arguments pour lesquels nous devrions croire les réponses apportées par les modèles à ces questions "*what if...?*". La section suivante s'attache à résoudre ce problème qui s'applique à - mais dépasse très largement - *Daisyworld*.

5.3 Pourquoi devons-nous avoir confiance dans ce que font les modèles ?

Kirchner semble supposer, en creux, que les raisons pour lesquelles nous devons faire confiance aux modèles est que l'on peut comparer ce qu'ils prédisent avec des valeurs empiriques. Je laisse de côté le goût pour les prédictions quantitatives plutôt que qualitatives que Kirchner exprime ; cela a été en partie discuté dans la section sur les stratégies de modélisation.

Commençons par pousser la conception de Kirchner jusqu'au bout et concentrons-nous sur les modèles explicatifs quantitatifs pour lesquels il semble avoir une préférence. Il faudrait alors rappeler que la comparaison entre les données prédites par le modèle et des valeurs empiriques ne nous dit pas que la structure causale du modèle reflète bien celle du monde¹²². Cette activité ne nous dit pas que le modèle réussit à décrire ce qu'*est* le monde, elle peut au mieux nous dire que compte tenu de ce que l'on sait du monde (et des valeurs mesurées dans le monde que l'on a comparées avec celles prédites par le modèle) alors les relations causales du modèle constituent une explication *possible* de ce phénomène¹²³.

Par ailleurs, croire que la seule source de confiance et de testabilité des modèles réside dans la comparaison de leurs prédictions avec des valeurs empiriques range la totalité des modèles prédictifs aux

119. Pour des détails sur les "*How-possibly explanation*", cf. à nouveau Weisberg (2013), p.118.

120. Ibid., p. 121.

121. cité par Weisberg (2007b), p.19.

122. Pour une discussion un peu plus fine de la manière dont la comparaison entre les données prédites et empiriques permet de nous renseigner sur la pertinence du modèle et une application de cette question aux problèmes spécifiquement posés par les sciences de la Terre - problèmes inverses, etc. - cf. Oreskes et al. (1994).

123. Cf. Huneman (2012) pour un argument similaire.

frontières de la science. Si on ne veut pas de cela on peut indiquer que la confiance peut venir d'autre part. Pour revenir au modèle prédisant la quantité de CO₂ et d'O₂ dans l'atmosphère, nous avons confiance dans ce modèle non pas parce que nous avons pu comparer les prédictions avec des valeurs mesurées mais parce que nous avons confiance dans les valeurs d'entrée (qui, elles, sont "mesurées") et dans la structure du modèle (nous croyons que les flux et les boîtes que nous isolons ressemblent suffisamment au monde réel parce que cette connaissance a été validée par ailleurs). La confiance dans la structure du modèle peut, elle, venir de découvertes empiriques, de lois connues par ailleurs, de théories profondément ancrées (mécanique classique, etc.), de contraintes logiques, etc. Cela nous permet ainsi de répondre à l'argument selon lequel les questions de type "*what if...*" ne seraient pas testables. Entre un modèle climatique qui prédit les températures sur Terre en fonction des scénarios d'émission de gaz à effet de serre (*Quelle température en 2050 si tant de CO₂ est émis?*) et un modèle qui se demande à quoi ressemblerait aujourd'hui la topographie terrestre *si* la vie n'avait aucune influence sur celle-ci¹²⁴, la différence n'est que de degrés. Si nous avons confiance dans ce que décrit un modèle prédictif quand celui-ci cherche à représenter fidèlement le monde - si nous croyons donc aux valeurs qu'il prédit - nous devons certainement avoir autant de raisons de croire aux valeurs que ce même modèle donne quand on retire artificiellement une propriété (e.g. la rétroaction de la vie sur son environnement) pour explorer une question contrefactuelle.

Une autre source de confiance dans certains modèles a également été mentionnée plus haut : l'analyse de robustesse. Cette source de confiance intervient en particulier pour les modèles qualitatifs qui ne nous donnent pas de valeurs quantitatives qui pourraient être comparées à des données empiriques ; c'est cette absence de comparaison qui inquiétait Orzack et Sober dans le cadre général d'une discussion de l'analyse de robustesse et Kirchner dans le cadre plus précis de *Daisyworld*. Il a été très justement noté que cette absence de confrontation entre les prédictions du modèle et des données empiriques ne signifie en aucun cas que le "modèle" n'est jamais comparé au "monde empirique" : une analyse de robustesse n'est *pas* une confirmation qui n'aurait aucun rapport avec le monde empirique¹²⁵. Or nous avons montré ici que certains résultats de *Daisyworld* étaient bien robustes au sens technique du terme et apportaient une contribution pertinente au débat sur HG¹²⁶.

Certains modèles servent à prédire, d'autres à expliquer. Certains sont quantitatifs, d'autres qualitatifs. *Daisyworld* est à rapprocher de ces modèles qualitatifs. Il a tantôt été utilisé pour "expliquer" : certains phénomènes périodiques sur Terre peuvent être expliqués par l'introduction d'un délai entre une perturbation et la réponse à cette perturbation¹²⁷ (Milankovich, El-nino, etc.). Tantôt pour "prédire" : si la biosphère et son environnement sont couplés de telle manière et dans telles conditions, alors on peut s'attendre à une régulation de variables environnementales ou à des transitions brutales, etc. Mais sa force réside essentiellement dans la comparaison entre deux comportements du modèle, selon que la vie est présente ou absente, dans l'exploration de mondes possibles non actuels. La particularité de *Daisy-*

124. e.g. Dietrich & Perron (2006).

125. Pour un développement de ce point, cf. à nouveau Weisberg (2006b).

126. Cf. la section "répondre à la critique C1".

127. Cf. Nevison et al. (1999) et les autres articles décrivant des oscillations dans *Daisyworld*.

world s'efface ainsi progressivement. Il n'est ni le seul modèle simple et qualitatif cherchant à s'abstraire de propriétés contingentes pour étudier des mondes possibles plus généraux que la Terre, ni le seul modèle prédictif, explicatif. Il n'est pas non plus le seul - même si c'est une particularité assez remarquable qui n'est peut-être pas si fréquente - à poser des questions conditionnelles "what if..." : quel visage aurait la Terre si la vie n'influçait pas l'environnement ?

6 Conclusion

Nous nous sommes posés deux questions. La première question consiste à se demander ce que peut accomplir un modèle donné. Un modèle a nécessairement une portée restreinte - il ne peut remplir qu'un nombre fini d'objectifs - compte tenu des hypothèses qu'il fait. Nous avons alors vu comment en abandonnant certaines hypothèses des variantes de *Daisyworld* permettaient au modèle de proposer qu'une régulation (habitabilité) *devait* - et non plus seulement *pouvait* - émerger sous certaines conditions. Mais la portée épistémique d'un modèle, ce qu'il peut faire, dépend également de la nature de ce modèle - et non seulement des hypothèses. *Daisyworld* peut apparaître comme une manière étrange d'apprendre des choses sur le monde; nous avons essayé de lever certaines ambiguïtés sur la nature de ce modèle. Nous avons vu que les problèmes posés par le fait qu'il semblait décrire un monde fictif et trop général pouvaient être contournés. *Daisyworld* décrit un monde où certaines propriétés générales essentielles à la Terre sont instanciées, le comportement de ce monde simple et contrôlé permet ensuite d'extrapoler et d'obtenir des "principes généraux conditionnels" (si certaines relations entre propriétés ont lieu, alors le comportement du système sera de telle ou telle nature). Les résultats principaux proviennent d'une *comparaison* entre deux mondes possibles explorés, l'un étant une abstraction de relations entre propriétés que l'on pense importantes sur Terre, l'autre étant un monde possible non actuel dans lequel certaines de ces propriétés (rétroactions de la vie sur son environnement) sont supprimées. Contrairement à ce qui a été indirectement suggéré par Kirchner, il ne semble pas y avoir de raison de principe d'accorder une légitimité épistémique moindre aux modèles de type *Daisyworld* que celle que l'on accorderait à des modèles quantitatifs explicatifs. Nous avons rappelé que l'analyse de robustesse constituait une source importante de confiance dans des modèles comme *Daisyworld*. Or nous avons montré que certains résultats, originaux et pertinents pour HG (exprimant les conditions sous lesquelles une régulation ou un maintien de l'habitabilité sont obtenues), étaient bien *robustes* au sens technique du terme. Ces résultats forts nous invitent à suggérer une réorientation possible des questions théoriques pour HG : la question pourrait ne plus être "sous quelles conditions une régulation émerge (ou l'habitabilité est maintenue) ?" (on a la réponse) mais deviendrait celle des conditions qui peuvent contraindre le rapport entre deux dynamiques (celle des préférences environnementales et celle de l'influence sur l'environnement) à ne pas dépasser une certaine valeur.

La deuxième question qui nous a intéressée dans ce texte concernait les raisons qui nous poussent, dans certaines situations, à créer et utiliser des modèles : pourquoi voulons-nous accomplir ce que nous

pensons que les modèles accomplissent ? Deux directions ont été suivies. La première suivait l'idée qu'un modèle a été créé dans un contexte théorique initial et que, partant, même si un modèle pouvait acquérir une vie propre et être utilisé pour répondre à d'autres problèmes théoriques, il est sans doute important de se demander si le modèle et ses variantes ont répondu avec succès au problème théorique initialement posé. Cela nous a mené à structurer une partie du texte autour d'une clarification des questions auxquelles les modèles cherchaient à répondre d'une part, et des conditions nécessaires à ce qu'ils puissent effectivement y répondre de l'autre. Nous avons également fait remarquer l'intérêt que peuvent avoir des modèles par rapport à des arguments théoriques verbaux. Cette seconde direction correspond sans doute à quelque chose qui pourrait être rangé sous l'idée répandue que les modèles ont un rôle "heuristique". Ils permettent à la fois de rendre plus *précis* certains arguments verbaux et de faire des découvertes en chemin. Les découvertes ce sont par exemple la mise au jour de l'importance de problèmes liés à l'existence d'hétérogénéités spatiales permise par une technique de simulation particulière (automates cellulaires). L'intérêt des modèles pour rendre précis certains arguments et clarifier la posture générale adoptée par les auteurs de HG a, lui, été mis en évidence à plusieurs reprises. Cette précision est la conséquence directe du fait que certaines incompatibilités théoriques ne sont pas forcément visibles quand elles sont présentées verbalement mais sont manifestes quand elles doivent être implémentées dans des modèles mathématiques ou algorithmiques (parce que certains *choix* doivent être faits au moment de l'écriture de l'algorithme). L'ensemble de *Daisyworld* et ses variantes est alors un matériel formidable pour voir (i) ce que les auteurs entendent par "optimal" : dans ce système couplé vie-environnement "la vie" est ce qui explique le comportement de l'environnement qui lui est "optimal" quand la croissance *globale* est maximisée, (ii) que la stabilité est souvent considérée comme quelque chose de souhaitable *per se* alors que les fondements théoriques et normatifs qui justifieraient ce choix axiologique sont relativement flous, (iii) que HG semble se reposer sur l'intuition que la vie, bien que limitée dans les conditions qu'elle peut accepter pour survivre, est relativement prodigue dans ses capacités à influencer l'environnement (elle peut le faire dans de nombreuses directions à des niveaux comparables aux perturbations abiotiques), à modifier la manière dont elle l'influence au cours du temps (à travers une dynamique de populations ou un taux de mutation élevé du trait influençant l'environnement) et éventuellement à s'adapter aux conditions qu'elle contribue à créer.

Remerciements : Ce texte a très largement bénéficié de la relecture et des suggestions d'Arnaud Pocheville, de Daniel Duprez, Philippe Huneman et Jean Gayon que je tiens à remercier.

Références

- Ackland, G., Clark, M., & Lenton, T. (2003). Catastrophic desert formation in daisyworld. *Journal of theoretical biology*, 223(1), 39–44.
- Ackland, G. & Wood, A. (2010). Emergent patterns in space and time from daisyworld : a simple evolving

- coupled biosphere–climate model. *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1910), 161–179.
- Adams, B., Carr, J., Lenton, T., & White, A. (2003). One-dimensional daisyworld : spatial interactions and pattern formation. *Journal of theoretical biology*, 223(4), 505–513.
- Baldocchi, D., Krebs, T., & Leclerc, M. (2005). Wet/dry daisyworld : a conceptual tool for quantifying the spatial scaling of heterogeneous landscapes and its impact on the subgrid variability of energy fluxes. *Tellus B*, 57(3), 175–188.
- Bardeen, M. (2004). The value of death in evolution : A lesson from daisyworld. In *Artificial Life IX : Proceedings of the Ninth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems* (pp. 292–296).
- Bardeen, M. (2009). *Lesson from Daisyworld survival of the stable*. PhD thesis, University of Sussex.
- Bardeen, M. (2010). Patch-level selection in darwinian daisyworld. *Proceedings of the Alife XII Conference, Odense, Denmark*.
- Berner, R. (2004). *The Phanerozoic carbon cycle : CO₂ and O₂*. Oxford University Press, USA.
- Betts, R. & Lenton, T. (2007). Second Chances For Lucky Gaia : A Hypothesis Of Sequential Selection. *Gaia Circular*, (pp. 4–6).
- Biton, E. & Gildor, H. (2012). The seasonal effect in one-dimensional daisyworld. *Journal of Theoretical Biology*, (314), 145–156.
- Bouchard, F. (2011). Darwinism without populations : a more inclusive understanding of the "survival of the fittest". *Studies in History and Philosophy of Science Part C : Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 42(1), 106–114.
- Boyle, R., Lenton, T., & Watson, A. (2011). Symbiotic physiology promotes homeostasis in daisyworld. *Journal of theoretical biology*, 274(1), 170–182.
- Clynes, M. (1969). Cybernetic implications of rein control in perceptual and conceptual organization. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 156, 629–690.
- Cohen, J. & Rich, A. (2000). Interspecific competition affects temperature stability in daisyworld. *Tellus B*, 52(3), 980–984.
- Dawkins, R. (1982). *The extended phenotype : The gene as the unit of selection*. Oxford University Press, USA.
- Dawkins, R. (2004). Extended phenotype—but not too extended. A reply to Laland, Turner and Jablonka. *Biology and Philosophy*, 19(3), 377–396.

- De Gregorio, S., Pielke, R., & Dalu, G. (1992a). A delayed biophysical system for the earth's climate. *Journal of Nonlinear Science*, 2(3), 293–318.
- De Gregorio, S., Pielke, R., & Dalu, G. (1992b). Feedback between a simple biosystem and the temperature of the earth. *Journal of Nonlinear Science*, 2(3), 263–292.
- Dietrich, W. & Perron, J. (2006). The search for a topographic signature of life. *Nature*, 439(7075), 411–418.
- Doolittle, W. (1981). Is nature really motherly. *CoEvolution Quarterly*, 29, 58–63.
- Downing, K. (2002). The simulated emergence of distributed environmental control in evolving microcosms. *Artificial Life*, 8(2), 123–153.
- Downing, K. & Zvirinsky, P. (1999). The simulated evolution of biochemical guilds : reconciling Gaia theory and natural selection. *Artificial Life*, 5(4), 291–318.
- Dutreuil, S. (2012a). L'hypothèse Gaia : pourquoi s'y intéresser même si l'on pense que la Terre n'est pas un organisme? . *Le Bulletin d'histoire et d'épistémologie des sciences de la vie*, 19(2).
- Dutreuil, S. (2012b). L'hypothèse Gaia : quelle analogie de la Terre avec un organisme? . *Analogia et Mediação, Transversalidade ne Investigação em Arte, Filosofia e Ciência, ouvrage dirigé par José Quaresma*, (pp. 137–157).
- Dyke, J. (2010). The daisystat : A model to explore multidimensional homeostasis. *Artificial Life XII : Twelfth International Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems, Odense, Denmark, 19 - 23 Aug 2010*.
- Dyke, J. & Harvey, I. (2006). Pushing up the daisies. *Artificial Life X, Proceedings of the Tenth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems*.
- Eliot, C. (2007). Method and metaphysics in clements's and gleason's ecological explanations. *Studies in History and Philosophy of Science Part C : Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 38(1), 85–109.
- Eliot, C. (2011). The legend of order and chaos : communities and early community ecology. *Handbook of the Philosophy of Science. Volume 11 : Philosophy of Ecology.*, Volume editors : Kevin deLaplante, Bryson Brown, and Kent A. Peacock. General editors : Dov M. Gabbay, Paul Thagard and John Woods., 49–107.
- Free, A. & Barton, N. (2007). Do evolution and ecology need the Gaia hypothesis? *Trends in Ecology & Evolution*, 22(11), 611–619.
- Frigg, R. (2010). Models and fiction. *Synthese*, 172(2), 251–268.

- Frigg, R. & Reiss, J. (2009). The philosophy of simulation : hot new issues or same old stew? *Synthese*, 169(3), 593–613.
- Giere, R. (2009). Why scientific models should not be regarded as works of fiction. *Fictions in science : Philosophical essays on modeling and idealization*, (pp. 248–258).
- Godfrey-Smith, P. (2006). The strategy of model-based science. *Biology and Philosophy*, 21(5), 725–740.
- Godfrey-Smith, P. (2009a). *Darwinian populations and natural selection*. Oxford University Press, USA.
- Godfrey-Smith, P. (2009b). Models and fictions in science. *Philosophical Studies*, 143(1), 101–116.
- Gould, S. (2002). *The structure of evolutionary theory*. Belknap Press.
- Griggs, R. & Cox, J. (1982). The elusive thematic-materials effect in wason’s selection task. *British Journal of Psychology*, 73(3), 407–420.
- Grüne-Yanoff, T. & Weirich, P. (2010). The philosophy and epistemology of simulation : A review. *Simulation & Gaming*, 41(1), 20–50.
- Harding, S. (1999). Food web complexity enhances community stability and climate regulation in a geophysiological model. *Tellus B*, 51(4), 815–829.
- Harding, S. & Lovelock, J. (1996). Exploiter-mediated coexistence and frequency-dependent selection in a numerical model of biodiversity. *Journal of theoretical biology*, 182(2), 109–116.
- Harvey, I. (2004). Homeostasis and rein control : From daisyworld to active perception. In *Proceedings of the Ninth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems, ALIFE*, volume 9 (pp. 309–314).
- Hempel, C. & Oppenheim, P. (1948). Studies in the logic of explanation. *Philosophy of science*, 15(2), 135–175.
- Humphreys, P. (2009). The philosophical novelty of computer simulation methods. *Synthese*, 169(3), 615–626.
- Huneman, P. (2011). About the conceptual foundations of ecological engineering : Stability, individuality and values. *Procedia Environmental Sciences*, 9, 72–82.
- Huneman, P. (2012). Computer science meets evolutionary biology : Pure possible processes and the issue of gradualism. *Special Sciences and the Unity of Science*, (pp. 137–162).
- Jascourt, S. & Raymond, W. (1992). Comments on ‘chaos in daisyworld’ by x. zeng et al. *Tellus B*, 44(3), 243–246.
- Johnson, C. & Boerlijst, M. (2002). Selection at the level of the community : the importance of spatial structure. *Trends in Ecology & Evolution*, 17(2), 83–90.

- Kauffman, S. (1993). *The origins of order : Self organization and selection in evolution*. Oxford University Press, USA.
- Keeling, R. (1991). Mechanisms for stabilization and destabilization of a simple biosphere : Catastrophe on daisyworld. *Scientists on Gaia*, (pp. 118–120).
- Kéfi, S., Rietkerk, M., van Baalen, M., & Loreau, M. (2007). Local facilitation, bistability and transitions in arid ecosystems. *Theoretical Population Biology*, 71(3), 367–379.
- Kirchner, J. (1989). The Gaia hypothesis : can it be tested. *Rev. Geophys*, 27(2), 223–235.
- Kirchner, J. (2002). The Gaia hypothesis : Fact, theory, and wishful thinking. *Climatic Change*, 52(4), 391–408.
- Kirchner, J. (2003). The Gaia hypothesis : conjectures and refutations. *Climatic Change*, 58(1), 21–45.
- Kirschvink, J. (1992). Late Proterozoic low-latitude global glaciation : the snowball Earth. *The Proterozoic Biosphere*, (pp. 51–52).
- Kleidon, A. (2004). Beyond Gaia : thermodynamics of life and Earth system functioning. *Climatic Change*, 66(3), 271–319.
- Kleidon, A. (2010). Life, hierarchy, and the thermodynamic machinery of planet earth. *Physics of life reviews*, 7(4), 424–460.
- Koeslag, J., Saunders, P., & Wessels, J. (1997). Glucose homeostasis with infinite gain : further lessons from the daisyworld parable? *Journal of endocrinology*, 154(2), 187–192.
- Laland, K., Odling-Smee, F., & Feldman, M. (1996). The evolutionary consequences of niche construction : a theoretical investigation using two-locus theory. *Journal of Evolutionary Biology*, 9(3), 293–316.
- Laland, K., Odling-Smee, F., & Feldman, M. (1999). Evolutionary consequences of niche construction and their implications for ecology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96(18), 10242.
- Lansing, J., Kremer, J., & Smuts, B. (1998). System-dependent selection, ecological feedback and the emergence of functional structure in ecosystems. *Journal of Theoretical Biology*, 192(3), 377–391.
- Lenton, T. (1998). Gaia and natural selection. *Nature*, 394(6692), 439–447.
- Lenton, T. (2001). The role of land plants, phosphorus weathering and fire in the rise and regulation of atmospheric oxygen. *Global Change Biology*, 7(6), 613–629.
- Lenton, T. (2002). Testing Gaia : the effect of life on Earth’s habitability and regulation. *Climatic Change*, 52(4), 409–422.

- Lenton, T. (2004). Clarifying Gaia : regulation with or without natural selection. *Scientists Debate Gaia : The Next Century. The MIT Press, Cambridge, MA, USA*, (pp. 15–25).
- Lenton, T. & Lovelock, J. (2000). Daisyworld is Darwinian : constraints on adaptation are important for planetary self-regulation. *Journal of theoretical Biology*, 206(1), 109–114.
- Lenton, T. & Lovelock, J. (2001). Daisyworld revisited : quantifying biological effects on planetary self-regulation. *Tellus B*, 53(3), 288–305.
- Lenton, T. & Van Oijen, M. (2002). Gaia as a complex adaptive system. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B : Biological Sciences*, 357(1421), 683.
- Lenton, T. & von Bloh, W. (2001). Biotic feedback extends the life span of the biosphere. *Geophys. Res. Lett*, 28(9), 1715–1718.
- Lenton, T. & Watson, A. (2000). Redfield revisited : 1. Regulation of nitrate, phosphate, and oxygen in the ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(1), 225–248.
- Lenton, T. & Wilkinson, D. (2003). Developing the Gaia Theory. A Response to the Criticisms of Kirchner and Volk. *Climatic Change*, 58(1), 1–12.
- Lenton, T. & Williams, H. (2009). Gaia and Evolution. *Gaia in Turmoil : Climate Change, Biodepletion, and Earth Ethics in an Age of Crisis*, (pp. 61–85).
- Levin, S. (1998). Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems. *Ecosystems*, 1(5), 431–436.
- Levins, R. (1966). The strategy of model building in population biology. *American Scientist*, 54(4), 421–431.
- Levy, A. (2012). Models, fictions & realism : Two packages. *Philosophy of science*, 79(5), 738–748.
- Lewontin, R. (1992). *Biology as ideology : The doctrine of DNA*. Harper Perennial.
- Lewontin, R. (2001). *The triple helix : Gene, organism, and environment*. Harvard University Press, USA.
- Lovelock, J. (1979). *A new look at life on earth*. Oxford University Press, Oxford.
- Lovelock, J. (1983). Daisy world - a cybernetic proof of the gaia hypothesis. *Coevol. Quarterly*, Summer 1983(38), 66–72.
- Lovelock, J. (1992). A numerical model for biodiversity. *Philosophical Transactions : Biological Sciences*, 338(1286), 383–391.
- Lovelock, J. (2008). *La revanche de Gaïa : préserver la planète avant qu'elle ne nous détruise*. J'ai lu.

- Lovelock, J. & Margulis, L. (1974). Atmospheric homeostasis by and for the biosphere : the Gaia hypothesis. *Tellus*, 26(1-2), 2–10.
- Lovelock, J. & Watson, A. (1982). The regulation of carbon dioxide and climate : Gaia or geochemistry. *Planetary and Space Science*, 30(8), 795–802.
- Maddock, L. (1991). Effects of simple environmental feedback on some population models. *Tellus B*, 43(3), 331–337.
- McDonald-Gibson, J., Dyke, J., Di Paolo, E., & Harvey, I. (2008). Environmental regulation can arise under minimal assumptions. *Journal of theoretical biology*, 251(4), 653–666.
- Morrison, M. (2009a). Fictions, representations, and reality. *Fictions in science : Philosophical essays on modeling and idealization*, (pp. 110–135).
- Morrison, M. (2009b). Models, measurement and computer simulation : the changing face of experimentation. *Philosophical Studies*, 143(1), 33–57.
- Nevison, C., Gupta, V., & Klinger, L. (1999). Self-sustained temperature oscillations on daisyworld. *Tellus B*, 51(4), 806–814.
- Nørtoft Nielsen, P. & Ditlevsen, P. (2009). On the homeostasis and bistability on a gaian planet. *Planetary and Space Science*, 57(4), 491–497.
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K., Belitz, K., et al. (1994). Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science*, 263(5147), 641–646.
- Orzack, S. & Sober, E. (1993). A critical assessment of levins's the strategy of model building in population biology (1966). *Quarterly Review of Biology*, 68(4), 533–546.
- Pigliucci, M. (2012). On the different ways of 'doing theory' in biology. *Biological Theory*, (pp. 1–11).
- Pimm, S. (1984). The complexity and stability of ecosystems. *Nature*, 307(5949), 321–326.
- Pocheville, A. (2010). *La niche écologique : concepts, modèles, applications*. PhD thesis, Ecole Normale Supérieure, Ecole doctorale Frontières du Vivant.
- Pocheville, A. (In prep.). What niche construction is not? *In prep.*
- Pocheville, A. & Dutreuil, S. (In prep.). Organism-environment interactions : why are niche construction and Gaia hypothesis different? . *In prep.*
- Pujol, T. (2002). The consequence of maximum thermodynamic efficiency in daisyworld. *Journal of theoretical biology*, 217(1), 53–60.
- Pujol, T., Fort, J., & Méndez, V. (2005). Consequences of inter-specific competition among multiple adaptive species in daisyworld. *Theoretical and applied climatology*, 81(3), 137–147.

- Robert, F. & Chaussidon, M. (2006). A palaeotemperature curve for the Precambrian oceans based on silicon isotopes in cherts. *Nature*, 443(7114), 969–972.
- Robertson, D. & Robinson, J. (1998). Darwinian daisyworld. *Journal of theoretical biology*, 195(1), 129–134.
- Sarkar, S. & Plutynski, A. (2010). *A Companion to the Philosophy of Biology*. Wiley-Blackwell, USA.
- Saunders, P. (1994). Evolution without natural selection : further implications of the daisyworld parable. *Journal of Theoretical Biology*, 166(4), 365–373.
- Saunders, P., Koeslag, J., Wessels, J., et al. (1998). Integral rein control in physiology. *Journal of theoretical biology*, 194(2), 163–173.
- Schwartzman, D. & Volk, T. (1989). Biotic enhancement of weathering and the habitability of Earth. *Nature*, 340, 457–460.
- Silver, M. & Di Paolo, E. (2006). Spatial effects favour the evolution of niche construction. *Theoretical population biology*, 70(4), 387–400.
- Staley, M. (2002). Darwinian selection leads to Gaia. *Journal of theoretical biology*, 218(1), 35–46.
- Stöcker, S. (1995). Regarding mutations in daisyworld models. *Journal of theoretical biology*, 175(4), 495–501.
- Teller, P. (2009). Fiction, fictionalization, and truth in science. *Fictions in science : Philosophical essays on modeling and idealization*, (pp. 235–248).
- Toon, A. (2010). The ontology of theoretical modelling : models as make-believe. *Synthese*, 172(2), 301–315.
- Turner, J. (2000). *The Extended Organism : The physiology of animal-built structures*. Harvard Univ Pr.
- Volk, T. (1998). *Gaia's body*. Copernicus.
- Volk, T. (2002). Toward a future for Gaia theory. *Climatic Change*, 52(4), 423–430.
- Volk, T. (2003). Natural selection, Gaia, and inadvertent by-products : A reply to Lenton and Wilkinson's response. *Climatic Change*, 58(1), 13–19.
- Von Bloh, W., Block, A., Parade, M., & Schellnhuber, H. (1999). Tutorial modelling of geosphere–biosphere interactions : the effect of percolation-type habitat fragmentation. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 266(1), 186–196.
- Von Bloh, W., Block, A., & Schellnhuber, H. (1997). Self-stabilization of the biosphere under global change : a tutorial geophysiological approach. *Tellus B*, 49(3), 249–262.

- Watson, A. (1999). Coevolution of the Earth's environment and life : Goldilocks, Gaia and the anthropic principle. *Geological Society London Special Publications*, 150(1), 75.
- Watson, A. & Lovelock, J. (1983). Biological homeostasis of the global environment : the parable of Daisyworld. *Tellus B*, 35(4), 284–289.
- Watson, R., Mills, R., Buckley, C., Penn, A., Davies, A., Noble, J., & Bullock, S. (2010). Adaptation without natural selection. *Artificial Life XII : Twelfth International Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems, Odense, Denmark, 19 - 23 Aug 2010.*, (pp. 80–81).
- Weaver, I. & Dyke, J. (2012a). The importance of timescales for the emergence of environmental self-regulation. *Journal of Theoretical Biology*, 313(21), 172–180.
- Weaver, I. & Dyke, J. (2012b). A novel approach to analysing fixed points in complex systems. *European Conference for Complex Systems 2012, Bursseles*.
- Weber, S. (2001). On homeostasis in daisyworld. *Climatic Change*, 48(2), 465–485.
- Weisberg, M. (2006a). Forty years of 'the strategy' : Levins on model building and idealization. *Biology and Philosophy*, 21(5), 623–645.
- Weisberg, M. (2006b). Robustness analysis. *Philosophy of Science*, 73(5), 730–742.
- Weisberg, M. (2007a). Three kinds of idealization. *Journal for the Philosophy of Science*, 58, 207–233.
- Weisberg, M. (2007b). Who is a modeler? *The British journal for the philosophy of science*, 58(2), 207–233.
- Weisberg, M. (2013). *Simulation and Similarity : Using Models to Understand the World*.
- Westbroek, P. (1992). *Life as a geological force : dynamics of the earth*. Norton.
- Wheeler, M., Bullock, S., Di Paolo, E., Noble, J., Bedau, M., Husbands, P., Kirby, S., & Seth, A. (2002). The view from elsewhere : perspectives on alife modeling. *Artificial Life*, 8, 87–100.
- Wilkinson, D. (1999). Is Gaia really conventional ecology? *Oikos*, 84(3), 533–536.
- Wilkinson, D. (2003). Catastrophes on daisyworld. *Trends in Ecology & Evolution*, 18(6), 266–268.
- Wilkinson, D. (2004). Homeostatic Gaia : an ecologist's perspective on the possibility of regulation. *Scientists debate gaia : the next century*, (pp. 71–76).
- Williams, H. & Lenton, T. (2008). Environmental regulation in a network of simulated microbial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(30), 10432.
- Williams, H. & Noble, J. (2005). Evolution and the regulation of environmental variables. *Proceedings of VIIIth Conference on Artificial Life*, (pp. 332–341).

- Winsberg, E. (2003). Simulated experiments : Methodology for a virtual world. *Philosophy of Science*, 70(1), 105–125.
- Winsberg, E. (2009). A function for fictions : expanding the scope of science. *Fictions in science : Philosophical essays on modeling and idealization*, (4), 179–189.
- Wood, A., Ackland, G., Dyke, J., Williams, H., & Lenton, T. (2008). Daisyworld : A review. *Reviews of Geophysics*, 46(1).
- Wood, A., Ackland, G., & Lenton, T. (2006). Mutation of albedo and growth response produces oscillations in a spatial daisyworld. *Journal of theoretical biology*, 242, 188–198.
- Wood, A. & Coe, J. (2007). A fitness based analysis of daisyworld. *Journal of theoretical biology*, 249(1), 190–197.
- Worden, L. (2010). Notes from the greenhouse world : A study in coevolution, planetary sustainability, and community structure. *Ecological Economics*, 69(4), 762–769.
- Worden, L. & Levin, S. (2008). A simple dynamic argument for self-regulation in model biospheres. *Unpublished material*.