



Une biologie pour le Développement

□ □
François Gros



UNE BIOLOGIE POUR LE DÉVELOPPEMENT

UNE BIOLOGIE POUR LE DÉVELOPPEMENT

François Gros

Préface de Jean-Michel Roy



17, avenue du Hoggar
Parc d'Activité de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Imprimé en France

ISBN: 978-2-7598-0366-8

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les " copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective ", et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, " toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite " (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2009

SOMMAIRE

PRÉFACE	11
INTRODUCTION GÉNÉRALE	21
I. LE FABULEUX DESTIN DE LA BIOLOGIE	
I.1. APERÇUS HISTORIQUES.....	27
I.1.1. La vision des anciens	27
I.1.2. L'épopée naturaliste et la physiologie expérimentale	29
I.1.3. À la recherche d'un formalisme unificateur du vivant (enzyme, métabolismes, bio-énergétique)	33
I.2. LA BIOLOGIE MOLÉCULAIRE ET SES RÉALISATIONS	
I.2.1. La biologie moléculaire du gène (double hélice, expression et régulation génétiques, le « dogme central »)	37
• <i>ADN et double hélice</i>	37
• <i>Fonction des gènes et régulation (premiers concepts)</i> ...	40
I.2.2. Le code génétique – Le transfert de l'information génétique : transcription et traduction du code génétique	42
• <i>L'ARN messenger et le code génétique</i>	44
• <i>Synthèse des protéines</i>	45
I.2.3. Régulation des gènes – Le répresseur – L'opéron lactose.....	47
I.2.4. Le dogme central de la Biologie moléculaire	49
I.3. GÉNIE GÉNÉTIQUE – CONSÉQUENCES À CARACTÈRE FONDAMENTAL – APPLICATIONS.....	51
I.3.1. Génie génétique – Découverte – Biologie des organismes supérieurs	51
I.3.2. Exons-Introns	53
I.3.3. Épissage	54
I.3.4. Ribozymes et monde des ARN	56
I.4. LA COMPLEXITÉ DU MATÉRIEL GÉNÉTIQUE CHEZ LES ORGANISMES « EUCARYOTIQUES »	59
I.4.1. Compaction de la chromatine – Nucléosomes	59
I.4.2. Modifications épigénétiques.....	60
I.4.3. Régulation positive – Promoteurs – Séquences cis-régulatrices	60

I.4.4. ADN codant et non codant	62
I.4.5. Éléments répétitifs.....	63
I.5. GÉNOMIQUE – DONNÉES GÉNÉRALES – CONSÉQUENCES – APPLICATIONS.....	65
I.5.1. Génomique structurale et fonctionnelle	66
● <i>Les « surprises » de la génomique – Le nombre des gènes</i>	67
I.5.2. Polymorphisme génétique – Les SNP	69
I.5.3. Une Biologie des « Ensembles moléculaires » : transcriptomes – protéomes.....	70
● <i>Transcriptomes – Puces à ADN</i>	71
● <i>Protéomes</i>	72
● <i>Interaction des protéines</i>	73
● <i>Du génome au phénomène !</i>	75
I.5.4. Qu'est-ce qu'un gène ? La biologie des systèmes	76
I.6. UN SOUFFLE NOUVEAU EN BIOLOGIE MOLÉCULAIRE – LE MONDE DES ARN ET LES PHÉNOMÈNES D'INTERFÉRENCE – RETOUR EN FORCE SUR L'ÉPIGÉNÉTIQUE	79
I.6.1. Le monde des ARN.....	79
I.6.2. Si-ARN et micro ARN	80
● <i>Formation – Transport et appariements des micro-ARN (Drosha, Exportine, Dicer et Risc)</i>	81
● <i>Applications</i>	83
I.6.3. Retour en force sur l'épigénétique – Quand l'hétérodoxie devient symbole d'ouverture.....	84
● <i>Méthylation de l'ADN</i>	85
● <i>Répression transcriptionnelle des transposons</i>	86
● <i>Empreintes parentales</i>	87
● <i>Inactivation du chromosome X</i>	87
● <i>Modifications des histones et rôle des variants d'histones dans le contrôle épigénétique</i>	88
I.7. DE LA BIOLOGIE CONTEMPORAINE AUX DÉFIS DU DÉVELOPPEMENT	93
I.7.1. Réflexions sur la biologie contemporaine.....	93
I.7.2. Que peuvent les sciences pour un développement durable ? Le rôle de la biologie	95
I.7.3. Santé.....	96
I.7.4. Agriculture	97
I.7.5. Environnement-Biodiversité – Évolution	98
I.7.6. Remarques générales.....	100

II. LA BIOLOGIE ET LES GRANDS DÉFIS DU DÉVELOPPEMENT

II.1. SANTÉ	103
II.1.1. Maladies infectieuses (renouveau de la microbiologie, vaccins, diagnostics et thérapeutiques anti-virales, zoonoses, maladies à prions)	103
II.1.1.1. Le retour des maladies infectieuses – Les maladies de la pauvreté – Maladies tropicales négligées.....	103
II.1.1.2. La microbiologie et son renouveau.....	105
● <i>Considérations générales</i>	105
● <i>Les facteurs d'un renouveau en microbiologie</i>	106
● <i>Génomique et virulence</i>	107
● <i>Les cellules cibles et les mécanismes de pénétration des bactéries pathogènes</i>	108
● <i>Gènes de susceptibilité</i>	110
● <i>Environnement et réservoirs d'agents pathogènes</i>	110
II.1.1.3. Vaccinologie	112
● <i>Aperçus historiques et généralités</i>	112
● <i>Divers types de vaccins</i>	113
● <i>Les défis posés par le SIDA, le paludisme et la tuberculose</i>	115
II.1.1.4. Les zoonoses.....	116
● <i>SIDA (les virus HIV)</i>	117
● <i>SRAS</i>	118
● <i>Ebola</i>	119
● <i>Chikungunya</i>	119
● <i>Grippe aviaire</i>	119
● <i>Marburg, West-Nile</i>	120
● <i>Recherches récentes</i>	120
II.1.1.5. Diagnostics et thérapies des maladies virales – Un aperçu.....	122
● <i>Thérapies antivirales</i>	123
II.1.1.6. Les maladies à prions.....	125
● <i>La protéine « prion » PrPsc</i>	125
● <i>Maladies à prions</i>	127
II.1.2 Maladies génétiques – Thérapie génique.....	131
II.1.2.1. Historique	131
II.1.2.2. L'exemple de la myopathie de Duchenne (DMD) – Un cas d'école.....	133
II.1.2.3. Les affections neurologiques.....	134
II.1.2.4. Gènes de susceptibilité – Polymorphismes et maladies – Gènes du système HLA.....	136
● <i>Système HLA et prédispositions aux maladies</i>	136
● <i>Gènes de susceptibilité et polymorphismes type SNP</i>	137

II.1.2.5. Thérapie génique – Le gène médicament et la chirurgie du gène	138
● <i>Travaux d'A. Fischer et M. Cavazzana Calvo</i>	139
● <i>La stratégie du « saut d'exon »</i>	140
II.1.2.6. Maladies et malformations congénitales de l'enfant	141
II.1.3. Cellules souches et thérapie cellulaire (un espoir pour les maladies dégénératives).....	142
II.1.3.1. Considérations sur la biologie du développement	142
II.1.3.2. Cellules souches adultes	144
● <i>Cellules souches sanguines</i>	144
● <i>Autres types de cellules souches adultes</i>	146
● <i>Cellules souches neurales</i>	146
● <i>Plasticité des cellules souches adultes</i>	147
II.1.3.3. Cellules souches embryonnaires	148
● <i>Historique</i>	148
● <i>Découverte des cellules souches embryonnaires humaines et applications potentielles</i>	149
● <i>Risques</i>	151
● <i>Transfert nucléaire somatique (clonage thérapeutique) – clonage reproductif chez l'animal</i>	151
II.1.3.4. Aspects éthiques dans l'utilisation des cellules souches embryonnaires	153
II.1.4. Vieillesse – Sénescence et mort cellulaire (Apoptose) – Cancers	154
II.1.4.1. Vieillesse – Considérations générales	154
II.1.4.2. Génétique et longévité.....	156
● <i>Relations entre génomique et longévité dans l'espèce humaine</i>	159
● <i>Sur les causes du vieillissement physiologique</i>	160
● <i>Vieillesse moléculaire – Effets des radicaux libres</i>	161
II.1.4.3. Sénescence cellulaire	162
II.1.4.4. Apoptose – Mort cellulaire programmée.....	162
II.1.4.5. Apoptose et cancers	165
II.1.4.6. Mécanismes moléculaires de l'apoptose	167
II.1.4.7. Cancers.....	170
● <i>Données épidémiologiques</i>	170
● <i>Cancers dans le monde et leur incidence grandissante dans les pays en développement</i>	170
● <i>Biologie du cancer – Oncogènes – Gènes suppresseurs – Systèmes de réparation</i>	173
● <i>Gènes sentinelles</i>	175
● <i>Systèmes de réparation et cancers</i>	176

• <i>Facteurs épigénétiques</i>	177
• <i>Contrôle épigénétique du développement des cellules souches cancéreuses</i>	178
II.2. AGRICULTURE – NUTRITION – NOURRIR LES HOMMES – LES DÉFIS DE LA MALNUTRITION – PLANTES TRANSGÉNIQUES (DONNÉES, ESPOIRS ET CRAINTES)	181
II.2.1. Nourrir la communauté des hommes – Les données du problème et les défis à relever	181
II.2.1.2. Une crise alimentaire mondiale – Le « retour de la faim »..	185
II.2.2. Apports de la génomique	187
II.2.3. Les plantes transgéniques – Quelques données générales	188
• <i>Principaux types de modifications introduites par transgénèse végétale à des fins agricoles</i>	190
• <i>Sécheresse et salinité</i>	190
• <i>Autres caractéristiques</i>	192
• <i>Physiologie globale – Qualité nutritive</i>	195
• <i>Transgénèse végétale et santé</i>	196
• <i>Espoirs – Réserves – Risques potentiels</i>	197
II.2.4. L'élevage composante majeure de l'alimentation humaine – Perspectives et effets sur l'environnement	201
• <i>Recherche</i>	202
• <i>Environnement</i>	204
II.3. ENVIRONNEMENT – ÉNERGIES – BIODIVERSITÉ	207
II.3.1. Défis énergétiques – Effets de serre – Énergies renouvelables Biocarburants	207
II.3.1.1. Défis énergétiques – Changements climatiques	207
II.3.1.2. Énergies non émettrices de CO ₂	209
II.3.1.3. Énergies renouvelables	210
• <i>Photovoltaïque</i>	210
• <i>Biomasse</i>	211
• <i>« Carburant contre aliment » (fuel versus food)</i>	211
• <i>Biocarburants de deuxième génération</i>	212
II.3.2. Biodiversité	213
II.3.2.1. Connaissance et protection de la biodiversité	213
II.3.2.1.1. Données générales – Menaces et préoccupations pour un patrimoine commun	213
• <i>Les effets du réchauffement climatique</i>	214
• <i>Urbanisation, déforestation, agriculture extensive</i>	215
• <i>Prises de position et mesures internationales</i>	215
II.3.2.1.2. La variété des espèces vivantes – Une exploration inachevée	216

II.3.2.1.3. Relations phylogénétiques – Comparaisons génomiques.....	218
● <i>Les Archaeas – L'apparition des eucaryotes</i>	219
II.3.2.1.4. Génomique et biodiversité végétale.....	221
II.3.2.1.5. Génomique et biodiversité animale	222
II.3.2.1.6. Biodiversité des microorganismes – Métagénomique..	223
III. CONCLUSION.....	227
BIBLIOGRAPHIE.....	231

PRÉFACE

La progression de la science suit un rythme varié. À des moments de stagnation, voire de revers, succèdent des phases d'embellie où de vieux obstacles paraissent s'effacer comme par magie, libérant soudain à la curiosité du chercheur des espaces nouveaux vers lesquels il s'élançait avec fébrilité. Mais ces périodes d'ardente prospection sont marquées du sceau d'une certaine confusion : l'attention se disperse dans les différentes directions de l'étendue qui s'est révélée, les résultats s'accumulent dans une relative incohérence, les explications discordantes de mêmes faits se multiplient, la divergence des prédictions s'intensifie. Aussi sont-elles également des périodes où la nécessité se fait vive de dresser des bilans réguliers qui permettent de prendre la mesure exacte des progrès accomplis. La communauté scientifique ressent avec force le besoin de comprendre de quelle manière au juste elle est arrivée là, de recenser avec précision les possibilités qui se sont réellement ouvertes à elle, d'établir un inventaire des produits de ses multiples explorations, d'évaluer avec rigueur les promesses de retombées techniques qu'ils autorisent, et de prendre toute la mesure des difficultés de divers ordres qu'il reste à surmonter pour conquérir le nouveau monde du savoir qui est en train d'émerger. Et il ne s'agit là en aucune façon d'une tâche annexe, qui serait en quelque sorte secondaire par rapport au processus de la découverte scientifique. Elle en est au contraire un moment même, qui plus est essentiel, parce qu'il sert à le clarifier et à le guider, et donc à lui permettre de prolonger son élan sur des bases affermisses. Dessiner la carte d'une discipline en train de se transformer est encore œuvrer à cette transformation.

Or la biologie, entendue au sens large de l'ensemble des sciences qui prennent le vivant pour objet, est sans aucun doute un des principaux champs scientifiques à être entré depuis le milieu du siècle dernier dans une telle phase d'accélération, illustrée en particulier par la révolution de la biologie moléculaire, qui a permis de pénétrer au plus profond des fondements du vivant en mettant en lumière certains des principes de fonctionnement et des structures

les plus élémentaires de la cellule. Et que la formidable impulsion que la science du vivant a ainsi reçue ait gardé toute sa force aujourd'hui, c'est ce dont témoigne sans conteste le flux incessant, qui émane de ses laboratoires, de résultats suffisamment décisifs pour trouver un écho presque quotidien dans la presse générale, suscitant dans la société un mélange d'admiration et d'effroi devant les perspectives nouvelles qu'ils ouvrent à l'humanité. Un seul exemple, mais particulièrement saisissant, suffit à se persuader de cette vitalité : des chercheurs viennent de recevoir en Grande-Bretagne, aux fins de mieux comprendre les cellules souches embryonnaires, l'autorisation de créer par clonage des embryons au statut indéterminé, puisque résultant de l'insertion dans un ovocyte animal d'un noyau de cellule somatique adulte humaine, et donc d'un patrimoine génétique humain. En se mettant en mesure de bouleverser ainsi l'une des divisions les plus fondamentales de l'ordonnement des organismes qu'a façonné l'évolution, l'exploration scientifique du vivant ne peut donner meilleure preuve qu'elle a bel et bien franchi la frontière d'un nouveau territoire dont les limites restent aujourd'hui inassignables.

Si la biologie est donc sans conteste l'un de ces champs scientifiques où la nécessité de prendre la mesure exacte de son avancement se fait aujourd'hui sentir de manière la plus pressante, nul n'est à l'évidence plus à même de s'atteler à cette tâche ardue que le biologiste, du moins celui qui est en mesure d'en embrasser avec suffisamment d'envergure l'ampleur et d'en dominer les principales assises théoriques.

C'est précisément à une telle tâche que s'attaque dans cet ouvrage un généticien de renom, en privilégiant tout à la fois la question particulière de l'apport de cet essor sans précédent de la biologie à la résolution des nombreux défis soulevés par le développement des sociétés contemporaines, et la perspective de la génétique qui est son champ d'expertise. Peu sans doute sont mieux qualifiés que lui pour cette entreprise. Non seulement, en effet, François Gros fut un acteur clef de la révolution de la biologie moléculaire par ses travaux sur les ARN messagers notamment, mais il en est aussi l'un des analystes et des historiens les plus accomplis. Des *Secrets du gène* (1969) à ses *Mémoires scientifiques* (2003), en passant par *La civilisation du gène* (1989) ou *Regards sur la biologie contemporaine* (1983), il n'a eu de cesse de mettre en pleine lumière la signification théorique, de même que les implications sociétales, du bouleversement de la connaissance biologique dont il fut à la fois un des agents et un des témoins de premier plan aux côtés de Jacques Monod et de François Jacob. Presque trente ans après le rapport qu'il avait rédigé pour la présidence de la République avec ce dernier et Pierre Royer sur « les conséquences que les découvertes de la biologie moderne sont susceptibles d'entraîner sur l'organisation et le fonctionnement de la société » (*Sciences de*

la vie et société, 1989), il nous livre ici ses dernières analyses sur la manière dont les plus récentes avancées de l'investigation biologique peuvent, et dans quelles limites, se traduire en progrès significatifs sur le plan de la protection de la santé, de la production de nourriture et de l'approvisionnement en énergie, trois secteurs essentiels du développement social. Plus encore, en rappelant au préalable les principaux épisodes de la formidable percée scientifique d'où ces avancées sont issues, il donne à voir avec une clarté particulière le lien qui unit les tâtonnements de la recherche fondamentale aux applications ultérieures qu'elle rend possibles, la façon dont la première fait surgir un potentiel aux limites incertaines dont les secondes, parfois d'une manière imprévisible qui rend plus fabuleuses encore les lointaines découvertes qui en sont la source, dégagent peu à peu les contours effectifs.

L'intérêt des réflexions que nous propose dans les pages qui suivent François Gros ne concerne cependant pas seulement le problème de l'état réel de notre savoir biologique, mais bien entendu aussi la question même du développement et des moyens de la résoudre. Et de ce point de vue, leur intérêt apparaît plus vif encore quand on les lit à la lumière des nouveaux rapports que cette question a commencé de nouer avec la connaissance scientifique.

Car ces rapports ont changé. La société ne demande plus seulement à la science qu'elle l'aide à se développer, mais qu'elle l'aide à se développer autrement. Elle n'attend plus seulement d'elle un surcroît de développement, mais un autre mode de développement. Et lui confère par là un rôle plus essentiel que jamais dans la quête d'un avenir meilleur, qui alourdit d'autant la responsabilité des scientifiques. Pour bien apprécier le poids de ce nouveau fardeau, il est indispensable de faire retour sur la relation étroite qui unit depuis toujours le développement à la science, et la crise sans doute sans précédent dans laquelle cette relation a sombré au cours du dernier quart du xx^e siècle.

Mais de quoi parle-t-on au juste tout d'abord quand on évoque le développement des sociétés ? Si celui-ci se trouve désormais reconnu comme l'objet d'étude spécifique de cette discipline que l'on appelle la théorie du développement, s'il dispose de ses centres de recherche, de ses filières de formation ainsi que d'une myriade d'institutions nationales et internationales à finalité plus pratique, il reste cependant rarement défini. Or, même si elle désigne manifestement à travers tous ses emplois un processus de transformation, la notion de développement n'est pas univoque et la signification qu'elle possède quand on l'applique aux sociétés est relativement singulière. Il est notamment insuffisant d'en faire dans ce contexte un simple synonyme de celle d'accroissement. Car si une population qui augmente est certes une population qui

en un certain sens du terme se développe, cet accroissement est pourtant fréquemment un facteur de sous-développement. Pareillement, un système de transports qui serait parfaitement identique à un autre en termes de points géographiques reliés, de nombre de véhicules en circulation et de quantité de personnes transportées, mais beaucoup plus avantageux en consommation d'énergie et en émissions toxiques, serait clairement considéré comme plus développé que le second par la théorie du développement. La notion sur laquelle celle-ci repose est donc aussi, et même en premier lieu, qualitative. Il semble raisonnable de proposer que, à son niveau le plus général, elle désigne le processus d'amélioration par une société de sa capacité moyenne à satisfaire les besoins et les désirs de sa population et, par voie de conséquence, qu'une différence de degré de développement correspond à une différence d'état d'une telle capacité.

Cette définition se recommande notamment par son aptitude, en parlant de capacité moyenne, à accommoder le fait qu'une société considérée comme ayant atteint un certain degré de développement puisse en réalité présenter des différences importantes dans ses capacités à satisfaire les différents besoins de sa population, par exemple ceux de la santé et ceux du transport. Elle confère aussi à l'idée de développement un caractère relatif bienvenu sans verser dans le relativisme : si le degré de supériorité d'une capacité à satisfaire un besoin par rapport à une autre se laisse en effet largement déterminer au moyen de critères objectifs, il n'en reste pas moins que ce qui apparaît comme développé à un certain stade est destiné à apparaître comme sous-développé à un autre, sauf à ce que toute amélioration soit en fait impossible. Plus encore, elle laisse parfaitement ouverte la possibilité que telle ou telle technique ancestrale, par exemple dans le domaine agricole, doive être estimée de qualité supérieure à une technique moderne dès lors que l'on inclut un critère d'impact écologique, et qu'elle représente de ce fait un plus haut degré de développement qu'elle. Enfin, une telle façon de concevoir l'idée de développement paraît apte à saisir sa spécificité humaine. Car il est patent que les sociétés animales, au sens de la théorie du développement, ne se développent pas. Seules celles des hommes le font. Et ce parce que les sociétés animales sont en fait dépourvues de la faculté de véritablement améliorer leurs capacités à satisfaire leurs besoins et désirs. Les gazelles, depuis qu'elles existent, n'ont toujours rien trouvé de mieux pour éviter de finir dans l'appareil digestif du lion que d'essayer de courir plus vite que lui. Au mieux, un animal se déplace d'un territoire à un autre pour tirer un meilleur parti de la capacité à satisfaire ses besoins dont il est naturellement doté ; mais il ne peut améliorer cette capacité elle-même, et transformer par là sa condition. Et les sociétés humaines que l'on dit primitives sont des sociétés qui peuvent être considérées soit comme engagées de manière particulièrement lente dans un tel processus d'amélioration, soit comme engagées dans

un processus d'amélioration différent de celui qui est devenu prédominant par le biais de l'Europe occidentale.

Or, que certains types d'organisation politique, juridique et économique au sein d'une société donnée, ou au niveau de ses relations extérieures, puissent contribuer directement au développement ainsi entendu semble peu contestable. Mais il ne l'est pas plus qu'il s'agit là néanmoins d'éléments dont le rôle est surtout crucial pour assurer une équitable répartition de l'amélioration qui le définit. Et que celle-ci est en elle-même bien plutôt une affaire de progrès de connaissance, et d'une connaissance qui ne soit ni du genre de la spéculation métaphysique ni de celui de la révélation religieuse, mais de ceux de ces savoirs que l'on appelle scientifique et technique, le second étant généralement fondé sur le premier. C'est même cette contribution décisive à l'amélioration de la capacité des sociétés à satisfaire leurs besoins qui, à partir de la Révolution Scientifique du xvii^e siècle, a assuré le succès de l'entreprise scientifique ; et il ne paraît pas exagéré de dire qu'elle a été progressivement mise tout entière à son service.

Quoiqu'elle ait toujours eu ses critiques, la confiance ainsi placée dans le pouvoir de la science à faire progresser les sociétés dans la satisfaction de leurs besoins et désirs s'est pourtant vue profondément ébranlée dans les trois décennies qui ont clos le second millénaire. Un ébranlement qui trouve sa source dans la prise de conscience que les progrès réalisés s'accompagnaient en fait de graves effets négatifs, et qui est avant tout la conséquence du caractère grandissant de ces effets, dû à son tour à l'essor même des progrès qui en étaient la cause. Le développement est en d'autres termes entré en crise au moment même où il atteignait un point culminant, précisément parce que ses inconvénients furent alors naturellement portés eux-mêmes à un état paroxystique. C'est pourquoi cette crise, en quelque sorte rançon d'un succès, fut concomitante de la transformation industrielle sans précédent de la période qui suivit la Seconde Guerre mondiale, marquée tout à la fois par la reconstruction de l'Europe et par l'industrialisation progressive des pays du tiers-monde, grâce notamment au processus de décolonisation.

Elle trouve une expression très nette au plan des institutions internationales, et de l'Organisation des Nations unies en particulier, même si l'attitude de ces institutions doit beaucoup au travail critique de nombreuses personnalités et associations pionnières. C'est ainsi notamment sous l'influence des avertissements lancés en 1970 par les membres du Club de Rome dans leur célèbre rapport *Halte à la croissance*, que l'ONU formula ses premières grandes inquiétudes et recommandations à l'occasion d'une conférence sur l'environnement organisée en 1972 à Stockholm, dont la déclaration affirme

solennellement qu'« un point a été atteint dans l'histoire où il nous faut désormais, à travers le monde entier, attacher à nos actions une attention plus prudente à leurs conséquences environnementales », car « par ignorance ou indifférence nous pouvons infliger à l'environnement terrestre dont notre vie et notre bien-être dépendent un mal irréversible ». Sa première conséquence fut la création de l'influent *United Nations Environment Program* (UNEP), puis l'instauration de la *World Commission on Environment and Development* qui enquêta de 1983 à 1987 sur l'état du processus de développement dans la planète. Placée sous la direction de l'ancien premier ministre de Norvège Gro Brundlandt, cette commission dégagait en particulier la voie alternative de développement à laquelle l'ONU invita tous les pays du monde à se rallier et ouvrit le chemin de la plus emblématique de ces grandes réunions internationales qui scandèrent la mise en procès de celle au contraire suivie jusque-là, le Sommet de la Terre de Rio de Janeiro de 1992, qui adopta parmi de nombreuses résolutions d'importance le célèbre programme de mesures connu sous le nom d'Agenda 21. La *United Nations Commission on Sustainable Development* (UNCSD) fut créée dans la foulée pour en mettre en œuvre l'application, et en 2002 fut organisé le dernier sommet général onusien en date sur le développement, le *World Summit on Sustainable Development* de Johannesburg, pour mesurer le chemin effectivement parcouru et insuffler un nouvel élan à l'engagement de toutes les nations.

Il importe de souligner la singularité de la critique du développement, et du progrès scientifique qui le sous-tend, qui anime tout ce mouvement. De fait, toute une tradition de réflexion politique, sociologique et philosophique avait de longue date déjà entrepris de jeter sur eux le soupçon. Mais c'était avant tout pour dénoncer une inégalité dans la distribution des bénéfices qu'ils pouvaient et avaient procuré, ou aussi la spoliation des biens et du travail d'une partie de l'humanité dont on les voyait complices. Ou encore, plus tardivement, l'appauvrissement culturel sur lequel ils débouchaient à travers l'instauration d'une société de consommation axée sur la recherche d'un bien-être purement matériel. La critique qui se cristallise au début des années 70 dans le mouvement international qui vient d'être retracé est beaucoup plus radicale, parce qu'elle met en question leur capacité même à assurer le bien-être matériel, au nom des menaces nouvelles qu'ils apportent, aussi puissantes que les maux dont ils étaient censés triompher. D'où l'importance décisive dans son déclenchement de la question de la dégradation de l'environnement, où ces maux se donnent d'abord et de la façon la plus manifeste à lire, et qui est bien reflétée dans la chronologie de la réponse de l'ONU. La conférence de Stockholm qui en marque le point de départ est en effet une conférence sur l'environnement, et débouche sur une déclaration relative à l'environnement. Ce n'est que dans un deuxième temps que la commission Brundtland fait valoir que la question

environnementale ne saurait être séparée de celle de l'équitable répartition des fruits du progrès, en vertu de l'idée qu'un progrès qui ne s'autodétruit pas est non seulement un progrès qui ne détruit pas le capital environnemental où il puise sa source, mais qui sait aussi en distribuer les dividendes à l'ensemble de la population humaine. Le rôle joué par le réchauffement climatique est également parlant à cet égard. Par leur dimension globale et non plus locale, les manifestations accélérées de ce phénomène au cours des dernières années marquent en effet clairement l'apogée de ce mouvement de crise, en même temps que le moment où celle-ci s'empare des esprits à l'échelle planétaire et cesse définitivement d'être l'affaire de seuls groupes écologiquement engagés, montrant par là à quel point elle trouve bien sa source dans les effets délétères du développement sur l'environnement. À quoi bon disposer d'usines qui nous procurent une foison de biens d'équipement ou de véhicules qui nous mènent où bon nous semble, si le prix à payer est un dérèglement climatique qui assèche ou inonde les terres qui nous hébergent et nous nourrissent, nous rendant par là vulnérables à des menaces physiques apocalyptiques et des famines péniblement écartées au fil des siècles ?

Mais en jetant le doute sur la capacité du développement et du progrès scientifique à fournir l'amélioration de bien-être matériel qui est leur objet premier, cette critique est également plus radicale en ce qu'elle revient à douter de leur réalité même. Non pas en niant leurs succès par trop incontestables, mais en invoquant les maux que ces succès ont engendrés, et qui les contrebalancent ou peuvent même aller jusqu'à les défaire. L'idée fondamentale à laquelle elle s'alimente est donc que le processus de développement dans lequel s'est engagée jusqu'ici l'humanité, « parvenue à un certain point de son histoire », a commencé de s'annuler. Que ses victoires aux allures éternelles ne sont en vérité que temporaires, soit qu'elles n'aient éliminé un mal que pour en faire surgir un autre, soit que celui-là même qu'elles semblaient avoir vaincu renaît *in fine* de ses cendres, comme ces bibliques invasions de flots ou ces pénuries alimentaires dont le spectre se profile à nouveau sur l'avenir du XXI^e siècle.

Et c'est pourquoi aussi la revendication fondamentale sur laquelle elle a débouché est celle d'un développement durable. Car qu'est-ce à son niveau le plus essentiel qu'un développement durable, sinon un développement pérenne parce que ne s'annulant pas au fil du temps ? Il serait erroné cependant de voir là une innovation radicale. À certains excès près, le développement a toujours été fondamentalement animé de l'intention d'être durable et d'apporter des bienfaits définitifs. Le problème est bien plutôt qu'il s'est avéré ne pas l'être, et que la décision ne peut plus être retardée de lui en substituer un qui le soit véritablement. Le développement suivi jusqu'ici ne peut

être qualifié de non durable qu'au seul sens où il a simplement eu l'illusion de pouvoir être durable, et non la volonté de ne pas l'être. On peut toutefois indéniablement lui reprocher de s'être bercé d'une telle illusion en partie au moins par insouciance. Et donc de devoir son échec à une certaine inconséquence. C'est pourquoi encore le développement durable ne peut être conçu comme un développement animé d'une intention foncièrement nouvelle que par le fait de manifester un souci beaucoup plus profond de sa durabilité. La revendication du développement durable n'est pas celle d'un développement qui n'offrirait aucun risque de s'annuler, mais celle d'un développement qui prend toutes les précautions possibles pour minimiser ce risque. Et c'est par là seulement qu'il constitue un mode nouveau de développement, mode nouveau qui ne consiste donc au fond en rien d'autre qu'en une conscience beaucoup plus vigilante de ses responsabilités.

Mais comment l'atteindre ? La tentation est toujours grande, face à un échec d'une certaine ampleur, de remettre en cause cela même qui y a conduit. Il s'agit là en vérité d'une attitude parfaitement rationnelle, sauf à verser dans l'excès. Or pouvons-nous renoncer à la connaissance scientifique et défaire le lien séculaire que le développement entretient avec elle ? Il est patent que notre société en est incapable, au-delà de la question de savoir si une société peut en principe même se développer sans science. Elle n'en a plus la possibilité effective, quand bien même elle en aurait la possibilité théorique. Car ce que la déclaration de Stockholm ne dit sans doute pas assez, c'est que le point que nous avons atteint dans l'histoire est aussi à cet égard un point de non retour, et que nous sommes condamnés à conserver l'alliance du développement et de la science. D'abord, parce que la science est seule capable de nous fournir le diagnostic des dommages créés, ainsi qu'en témoignent la multitude d'agences d'expertise qui nous guident désormais sur la pureté de nos eaux, l'innocuité de nos aliments ou la respirabilité de notre air, et dont l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* est devenu aujourd'hui la figure héroïque. Ensuite, parce que la science est indispensable à la réparation de beaucoup de ces dommages, même si tout n'est pas entre ses mains. Enfin, parce que la science seule est capable de fournir la plupart des moyens nécessaires à la survie de l'humanité à laquelle la voie suivie jusqu'ici a donné le jour, sauf à plonger celle-ci dans une régression sans précédent, du type de celle que le Club de Rome voyait précisément nous menacer au bout de cette voie sous le nom d'effondrement. La crise du développement condamne beaucoup moins la science qu'elle ne nous condamne à la science. À poursuivre sa construction, à relancer plus que jamais ses efforts pour parvenir à dépasser ses limites présentes, et par là, à réparer les erreurs passées qu'elle a permises en même temps qu'à dégager des horizons plus solides. Ce qui lui demande de franchir de nouvelles frontières. La société attend par exemple de la science

tout à la fois qu'elle réduise l'excessive concentration atmosphérique de gaz carbonique résultant de l'exploitation de certaines énergies fossiles, qu'elle substitue à ces dernières des énergies propres capables néanmoins de remplir une fonction équivalente, et enfin qu'elle continue à franchir de nouvelles étapes dans la conquête de l'abondance énergétique. Une triple attente qu'elle ne saurait remplir sans pénétrer des mécanismes de la nature dont elle ne sait que fort peu encore. Le défi du développement durable est fondamentalement un défi à l'innovation scientifique et technique, parce qu'il exige que nous sachions faire des choses qui dépassent nos compétences actuelles, et auxquelles seule la recherche peut nous donner accès.

Ce rôle primordial de la connaissance scientifique dans la conquête du développement durable est d'ailleurs très largement reconnu et n'a cessé de se trouver réaffirmé avec une force croissante à chacune des étapes cruciales de la mobilisation qu'il a suscitée depuis près de quarante ans maintenant. Dès 1972, le principe 18 de la déclaration de Stockholm énonce que « la science et la technologie [...] doivent être appliquées à l'identification, le repoussement et le contrôle des risques environnementaux, ainsi qu'à la solution des problèmes qu'ils soulèvent au bénéfice de l'humanité ». Le Sommet de la Terre de Rio avance à son tour au chapitre 35 de l'Agenda 21 que « les sciences sont de plus en plus reconnues comme une composante essentielle de la quête de voies possibles vers le développement durable », et reconnaît officiellement la communauté scientifique et technique comme l'un des neuf groupes sociaux essentiels à la réorientation de notre mode de développement. C'est ainsi que celle-ci fut étroitement associée à la préparation et à la réalisation du sommet de Johannesburg par le biais de l'*International Council for Science (ICSU)* et de la *World Federation of Engineering Organizations (WFEO)*. Le prix Nobel accordé en 2007 à l'IPCC s'inscrit enfin dans la même logique, en même temps qu'il la consacre. Mais peut-être est-ce dans l'allocution présidentielle de la biologiste Jane Lubchenco au congrès annuel de l'*American Association for the Advancement of Science* de 1999, que cette reconnaissance du caractère primordial de la connaissance scientifique a trouvé l'une de ses plus vibrantes expressions. Admettant expressément que « la recherche fondamentale est plus pertinente et nécessaire que jamais auparavant », celle-ci y appela solennellement, au seuil du troisième millénaire, la communauté scientifique et technologique tout entière à passer avec la société un « nouveau contrat », par lequel elle prenait « l'engagement d'harnacher toute la puissance de l'entreprise scientifique [...] à l'effort de la société pour créer une biosphère plus durable ».

Une telle façon de mettre l'entreprise scientifique au service de la poursuite d'un développement soucieux de sa durabilité n'est pas sans implications sur la manière même dont cette entreprise est conduite, et dont, dans la lignée