

Evolutie, complexiteit en creativiteit

Bart De Moor, Professor, Faculteit Ingenieurswetenschappen, K.U.Leuven

πάντα ῥεῖ

Herakleitos

Wie al eens een huis heeft gebouwd, weet hoe ingewikkeld dat is. Het begint bij boekjes kijken, dagdromen en beurzen bezoeken. Grond wordt gekocht, ideeën geschetst, budgetten bijeengeschraapt vooraleer een architect alles herleidt tot meer realistische proporties. Dan komen de aannemer, de metsers, de dakwerkers, de stukadoors, de vloerders, de ververs, de electriciens, de loodgieters, de binnenhuisarchitect, de schrijnwerkers en meubelmakers al dan niet in de juiste volgorde. Maar dat is maar klein bier vergeleken bij het ontwerp van de nieuwe Boeing 777. Die bestaat uit meer dan 150000 subsystemen, georganiseerd in hiërarchische lagen en bestuurd door ongeveer 1000 computers. Eigenlijk is de Boeing 777 een immens groot regelsysteem en computernetwerk, dat toevallig ook vliegt. De passagiers – en ook de piloten – zien bijna niets van die complexiteit. Dat hebben de ontwerpers zo gewild. De piloten kunnen zich zo concentreren op hun kerntaken. Voor de passagiers primeert het comfort. Zij kunnen slapen, naar een film kijken of van een “lekkere” vliegtuigmaaltijd genieten. Terwijl zij dit doen, ontplooit het vliegtuig intern een duizelingwekkende activiteit, aerodynamisch, thermodynamisch, elektronisch en informatie-technologisch. Het aantal data dat tijdens testen wordt verzameld per minuut, is even groot als de informatie-inhoud van het volledige menselijke genoom, namelijk 750 megabyte. Dit kan juist op 1 CD-ROM.

Ontwerpen, bouwen, maken: Het zijn allemaal manifestaties van menselijke creativiteit, die bijdragen tot een steeds grotere culturele verscheidenheid en rijkdom. Ingenieurssystemen zijn daarvan uitstekende voorbeelden. Maar er zijn er vele andere: artistieke, culturele, politieke, sportieve, sociologische, religieuze, juridische. Toch neemt de technologie – in brede zin – een speciale plaats in, omdat zij de creativiteit in die andere dimensies faciliteert, maar ook omdat zij onze levensomstandigheden verzacht. Een belangrijke drijfveer voor de evolutie van technologische systemen, is simpelweg onze drang naar comfort, in de vele betekenissen van het woord zoals levenskwaliteit, veiligheid, rust en duurzaamheid als levenskwaliteit voor toekomstige generaties. Deze evolutie gaat in de richting van toenemende complexiteit. Slechts honderd jaar hebben we er over gedaan om het vliegtuig van de gebroeders Wright om te vormen tot een Space Shuttle en een Boeing 777. In de micro-electronica leert de wet van Moore ons dat de dichtheid van transistoren per oppervlakte silicium om de 18 maanden verdubbelt. Daardoor verdubbelt ook de reken capaciteit van onze computers om het anderhalf jaar. Op een bankrekening zou dit overeen komen met een intrestvoet van 56 %.

Dit zijn maar enkele voorbeelden die aantonen hoe de technologische evolutie op vele terreinen de creativiteit van de mens in zijn culturele evolutie, faciliteert. De technologische ontwikkelingen versnellen de trans-biologische evolutie in het verlengde van de biologische. Daarover straks meer.

In deze bijdrage zullen we het hebben over *creativiteit*. We veralgemenen het concept tot de kosmos, de natuur en het biologisch leven in het algemeen. Creativiteit schept diversiteit. We zullen uitleggen hoe in de kosmos, in de natuur en in onze samenleving een grote diversiteit is ontstaan in

kosmologische structuren, levensvormen en culturele organisatie. We zullen ook een kwantitatieve maat bespreken die toelaat om de complexiteit van structuren over al deze dimensies heen, met mekaar te vergelijken. We zullen zien hoe de kosmologische, biologische en menselijke evolutie gepaard gaan met steeds grotere complexiteit, grotere verscheidenheid en bijgevolg steeds meer creativiteit en creaties. Dit ‘nieuwheid denken’ is geen prerogatief van de mens alleen. Het zit ingebakken in de kosmos, in de natuur, in ons biotoop. Daarover willen we het in deze bijdrage hebben.

De taal van evolutie en complexiteit

Hoe beschrijven we complexe systemen en de evolutie ervan ? De taal bij uitstek die we daarvoor gebruiken, is deze van de wiskunde. Wat door sommigen ‘*the unreasonable effectiveness of mathematics*’ wordt genoemd, mag een klein (of beter, groot) mirakel heten. Onze menselijk geest is in staat om zulldanige abstracties en veralgemeningen te maken, dat in vele gevallen de wiskundige beschrijvingen beter te begrijpen zijn dan de realiteit zelf. Ze zijn vooral ook nuttiger voor het maken van voorspellingen. Zo bijvoorbeeld beschrijven de huidige snaar- en braan-theorieën in de fysica de fysische werkelijkheid niet langer in de vier dimensies van de algemene relativiteitstheorie, maar wel in de elf dimensies van ‘abstracte’ wiskundige ruimtes. Tegenintuïtief, maar wel efficiënt !

De wiskunde kent vele subdisciplines, zoals de getallenleer, algebra, analyse, integraalrekenen, meetkunde, topologie, enzovoort. Maar van bijzonder belang is toch het differentiaalrekenen, en meer bepaald daarin de differentiaalvergelijkingen. Deze werden ontdekt door Newton en Leibniz in de zeventiende eeuw. Het zijn wiskundige vergelijkingen die de evolutie beschrijven, als functie van de tijd, van de toestand van een dynamische systeem. Iedereen kent wel de tweede hoofdwet van Newton: $F = m \times a$. Wanneer een kracht F wordt uitgeoefend op een voorwerp met massa m , resulteert dit in een versnelling a . De versnelling a geeft weer hoe de snelheid v verandert als functie van de tijd. En de snelheid v geeft dan weer aan hoe de positie x van het voorwerp verandert als functie van de tijd. Wiskundig zegt men dat de snelheid de eerste afgeleide is van de positie naar de tijd, en de versnelling de tweede afgeleide van de positie naar de tijd. M.a.w., $F = m \times a$ is een tweede orde differentiaalvergelijking, die beschrijft hoe een voorwerp met massa m zich als functie van de tijd verplaatst ten gevolge van een kracht F . Omdat dit een tweede orde differentiaalvergelijking is, heeft het systeem twee toestanden, in dit geval de positie x en de snelheid v . Alle differentiaalvergelijkingen waarin afgeleiden naar de tijd voorkomen, beschrijven de evolutie van een bepaalde grootte als functie van de tijd. Wanneer er ook positie-afhankelijke evoluties zijn, gebruikt men een veralgemening van de ‘gewone’ differentiaalvergelijkingen, die men partiële differentiaalvergelijkingen noemt. Zo bijvoorbeeld wordt het klimaat beschreven door dergelijke vergelijkingen: de temperatuur, vochtigheid en druk in onze atmosfeer zijn niet alleen functie van de tijd, maar ook functie van de positie.

Sinds de ontdekking van Newton en Leibniz heeft de fysica een immense ontwikkeling doorgemaakt. Maar of we nu praten over kosmologie, mechanica, vloeistofdynamika, kwantummechanica, thermodynamica, de algemene relativiteitstheorie of de snarentheorie, steeds weer wordt de werkelijkheid en de evolutie ervan, beschreven d.m.v. gewone en partiële differentiaalvergelijkingen. Voor een uitermate boeiend overzicht van de verschillende ideeën, wiskundige inzichten, de inspiratie en de transpiratie, verwijzen we graag naar Penrose, die dit alles op meesterlijke wijze heeft samengevat [Penrose, 2004]. Om de evolutie van toenemende complexiteit goed te begrijpen, is één welbepaalde discipline van bijzonder belang: de thermodynamica. De naam alludeert op het dynamische gedrag van systemen onder invloed van warmte. Het beschrijft fenomenen die we elke dag ervaren. Wanneer we in de winter een venster openzetten, wordt het binnen vlug koud. De warmte-energie stroomt weg naar buiten. Van warm naar koud. Het omgekeerde gebeurt nooit. Als het

buiten kouder is dan binnen, wordt het binnen nooit spontaan warmer wanneer we het venster openen. Uit de studie van dit soort observaties, en ook omdat men wou begrijpen hoe een stoommachine eigenlijk werkte, is in de 18^{de} en 19^{de} eeuw de thermodynamika ontstaan. Daarin worden de fundamentele concepten van energie en entropie bestudeerd. Eigenlijk zijn er twee basiswetten. De Eerste Hoofdwet is de wet van behoud van energie. De Tweede Hoofdwet beschrijft dat de entropie, een maat voor de ‘wanorde’ in een systeem, alleen maar kan toenemen in een van de omgeving geïsoleerd systeem. Deze basiswetten bepalen het dynamisch gedrag van de meest diverse systemen zoals van onze koelkasten, van de verouderingsprocessen in levende wezens maar ook de dynamiek van het uitdijende heelal.

Volgens de Eerste Hoofdwet kan energie niet gecreëerd worden, hoogstens getransformeerd van de ene vorm in een andere. Om Lavoisier te citeren: *Rien ne se crée, rien ne se perd*. Een beroemd voorbeeld is de equivalentie van massa en energie volgens de meest bekende formule ooit, Einstein’s $E = m c^2$. Een ander voorbeeld is de (kern)energie die we halen uit radioactieve elementen. Nog een ander voorbeeld is de potentiële energie van een (water)massa die in een turbine wordt omgezet in kinetische bewegingsenergie, en vervolgens in elektrische energie in een alternator. Energie is een concept dat aan de basis ligt van ons inzicht in vele fysische fenomenen. Het is een maat voor de capaciteit van een dynamisch systeem om verandering aan te brengen in ofwel de eigen toestand, ofwel in de toestand van zijn omgeving, ofwel in beide tegelijkertijd. De Eerste Hoofdwet is niet zozeer een mathematische wetmatigheid: hij moet eerder worden beschouwd als een fundamenteel axioma.

De Tweede Hoofdwet stelt dat de entropie in een adiabatisch geïsoleerd systeem (d.w.z. een systeem dat geen warmte-uitwisseling met de omgeving heeft), altijd toeneemt. De entropie van een systeem is een maat voor de moleculaire wanorde ervan. Anders gezegd, de Tweede Hoofdwet stelt dat de hoeveelheid *bruikbare* ‘nuttige’ energie in een geïsoleerd systeem altijd vermindert, hoewel de totale energie in het systeem constant blijft. Hoewel we de precieze wetenschappelijk-technische definitie van ‘nuttige’ energie hier even in het midden laten, kunnen we stellen dat in een gesloten systeem, de ‘nuttige’ energie ‘degradeert’: Hoogwaardige energie takelt af naar laagwaardige. De kinetische energie van onze fiets wordt omgezet in warmte wanneer we remmen. Hoewel nog altijd energie, kunnen we deze warmte niet nog eens gebruiken om ons voor te bewegen. We zouden wel nog een deel ervan (niet alles) kunnen gebruiken om een kopje thee te verwarmen, hoewel dat, rijdend op een fiets, niet voor de hand zou liggen. Een ander voorbeeld: Van de potentiële energie van een watermassa, wordt uiteindelijk maar een deel omgezet in elektrische energie, omdat er wrijvings- en warmteverliezen zijn in de turbine, en elektrische weerstandsverliezen in de vorm van warmte in de alternator. De Tweede Hoofdwet zegt bijgevolg dat het rendement van dergelijke omzettingen nooit 100 % kan zijn, maar altijd (veel) lager. De Tweede Hoofdwet impliceert dat het *perpetuum mobile* niet bestaat. Een ander rechtstreeks gevolg is dat van de *irreversibiliteit (onomkeerbaarheid) van dynamische processen*. Een dynamisch systeem dat op één of andere wijze een transformatie ondergaat van de ene toestand in een andere, kan nooit in de oorspronkelijke toestand hersteld worden, waarbij tegelijkertijd ook de omgeving in haar oorspronkelijke toestand zou worden hersteld. Dit alles wordt uitgedrukt in een grootheid die men *entropie* noemt. Daar waar energie de toestand van een systeem beschrijft, is de entropie een maat voor de verandering van de ene toestand naar een andere. De entropie is een maat voor de interne ‘wanorde’ van een systeem, een maat ook voor de mate waarin de nuttige energie in een systeem is ‘gedegraded’ in de transformatie van een toestand naar een andere. Recent (zie [Haddad, 2005]) werd het concept van *ectropie* gedefinieerd. Het is complementair aan entropie en fungeert als een maat die weergeeft hoe een dynamisch systeem nuttige arbeid kan verrichten en meer gestructureerd kan raken.

De Tweede Hoofdwet impliceert dat een adiabatisch gesloten systeem, dat dus geen warmte-uitwisseling heeft met zijn omgeving, altijd zal evolueren naar een toestand van maximale entropie. Voor zover we kunnen veronderstellen dat ons universum een dergelijk gesloten systeem is, is het ultieme noodlot ervan dat het een koude dood zal sterven. Dat is slecht nieuws.

Maar de ‘nuttige’ energie is ‘nuttig’, omdat ze orde schept, ‘georganiseerde’ structuren bewerkstelligt en zelfs leven in stand houdt. Deze inzichten danken we aan de Belgische Nobelprijswinnaar Prigogine. In zijn overbekende wetenschappelijk werk ontwikkelde Prigogine de notie van *dissipatieve structuren*. Deze ontstaan in open dynamische systemen die zich ver van hun thermodynamisch evenwicht bevinden. Een open systeem is een systeem dat interageert met zijn omgeving, door energie ervan te ontvangen, eventueel op te slaan of een deel ervan in een meer ‘laagwaardige’ vorm terug af te geven. Wanneer bepaalde kritische niveau’s van energietoevoer worden overschreden, ontstaan in dergelijke systemen verrassend coherente gedragingen. De graad van wanorde vermindert. De mate van ordelijkheid neemt toe. Dergelijke systemen exporteren een stukje van hun entropie waardoor deze lokaal gezien daalt. Dicht tegen de evenwichtsituatie, voor een quasi gesloten systeem, worden ‘random’-fluctuaties, bijvoorbeeld in temperatuur, weggebalanceerd door de Tweede Hoofdwet. Maar wanneer deze systemen door grote energiestromen uit evenwicht worden gebracht, ontstaan interessante interne macroscopische dynamische structuren. Kunnen de inzichten van Prigogine ons helpen bij het verklaren van de evolutie? Hoe is het mogelijk dat leven ontstaan is in een universum dat geregeerd wordt door een Tweede Hoofdwet, die eigenlijk het ontstaan zelf van leven uitsluit? Hoe verzoenen we de inherente constructiviteit van de biologische evolutie met de genadeloze destructiviteit van de Tweede Hoofdwet?

De kosmologische evolutie

Dat de kosmologische evolutie begint bij de Big Bang, of zijn moderne veralgemening, de inflatietheorie van Guth en Linde (zie [Van Loocke, 2008] of [Christian, 2004]), is algemeen aanvaard. Deze hypothese is consistent met de talloze observaties van verre galaxieën die van ons wegvluchten, met de microgolf achtergrondstraling van het heelal, en nog veel meer experimentele waarnemingen. In dit expanderend heelal is er een enorme hoeveelheid ‘vrije’ of ‘nuttige’ energie, die zo genoemd wordt omdat ze systemen vormt, in stand houdt en ook vernietigt. In het prille begin was er enkel stralingsenergie met een onwaarschijnlijke energiedensiteit. Het Universum was dermate heet en de dichtheid zo immens dat enige structuur totaal afwezig was. Het prille Universum was uniform, symmetrisch, in relatief evenwicht en daarom uitermate vervelend. Door de snelle expansie daalde de temperatuur en splitsten de vier natuurkrachten die tot dan toe geünificeerd waren. Zo konden elektrische geladen deeltjes andere capteren om neutrale atomen te vormen, de simpelste van alle structuren. De wording van materie was een feit en de initiële symmetrie van het heelal doorbroken. Ook begon de gravitatiekracht haar werk te doen, trouwens een andere vorm van energie waardoor geordende structuren ontstaan. Na enkele tienduizenden jaren waren de stralingsenergiedensiteit (Joule per kubieke meter, proportioneel met de vierde macht van de temperatuur) en de massa-energiedensiteit (die we niet helemaal kennen, omdat er een ongekende hoeveelheid ‘donkere’ materie zit in het heelal) wellicht aan mekaar gewaagd. Vandaag overtreft de massa-energiedensiteit deze van de straling. De gravitatie is niet voldoende om de expansie te stoppen waardoor het volume van het heelal toeneemt. Daarom ook dalen beide densiteiten exponentieel. Maar ook de vrije energie begon te stromen. De volgende miljarden jaren werden emergente structuren gevormd, quasars, protomelkwegen, galaxieën, sterren en planeten. Het is toch merkwaardig dat de initiële kwantumfluctuaties in materiedichtheid aan de bron liggen van alle kosmische structuren die we vandaag de dag zien. Hetzelfde onzekerheidsprincipe van Heisenberg dat op een electron van toepassing is, is verantwoordelijk voor Andromeda.

In het prille begin, vlak na de Big Bang, was de actuele entropie grosso modo gelijk aan de maximale, door de alles overheersende stralingsenergiedensiteit. Maar door de expansie daalde de temperatuur, ontstond ook materie, en werd de symmetrie doorbroken. De omgevingsomstandigheden werden steeds gunstiger voor de groei van 'structuren'. Dit komt omdat in het expanderend Universum, de eigenlijke, actuele entropie S minder vlug stijgt dan de maximum mogelijke entropie S_{max} door de ontkoppeling van straling en materie. S_{max} is groter dan S , en het saldo $S_{max} - S$ zouden we het *entropie-krediet* kunnen noemen. Dit 'krediet' kan geïnterpreteerd worden als het potentieel voor 'ordelijke structuren' (of negatief uitgedrukt, het gebrek aan maximale wanorde). Bovendien nemen zowel de actuele entropie S zelf, als de maximale entropie S_{max} , beide toe als functie van de tijd. En als klap op de vuurpijl, ook het saldo $S_{max} - S$. M.a.w., er is een toenemende beschikbaarheid aan entropie-krediet om ordelijke structuren te creëren.

Door de Tweede Hoofdwet van de thermodynamika is het uitgesloten dat dynamische systemen uit zichzelf evolueren naar een grotere orde, wanneer ze afgesloten zijn van hun omgeving. Geïsoleerde systemen zijn gedoemd om te evolueren naar maximale entropie. Dat is dan dan ook het ultieme en trieste lot van het Universum. Maar de deelsystemen binnen dat Universum interageren met hun omgeving. Het zijn geen gesloten, maar wel open dynamische systemen, waardoorheen de vrije energie rijkelijk vloeit. Onze aarde is een dergelijk open dynamisch systeem, die 'nuttige' vrije energie van de zon ontvangt in de vorm van straling, en ook energie verliest aan de koude ruimte in de vorm van warmte. Ten opzichte van die koude, ons omgevende ruimte, is de aarde werkelijk atypisch. Al was het maar door de temperatuur van onze atmosfeer. De dampkring, die op haar plaats wordt gehouden door de gravitatie, is als een deken dat zorgt voor een behaaglijke, gemiddelde kamertemperatuur. Deze is tientallen graden hoger dan buiten de atmosfeer. M.a.w., thermodynamisch is de aarde niet in evenwicht met de omliggende ruimte. Het is een voorbeeld van een open dynamisch systeem, dat ver van zijn evenwicht zit, door de energiestromen die we krijgen van de zon. Precies in dergelijke open systeem, ver uit evenwicht, bevoorrad door 'nuttige' energie, zijn allerlei complexe dynamische structuren ontstaan, zoals een dampkring, zeeën, klimaat, eencelligen, planten, dieren en de mens. Dit alles met toenemende complexiteit. Maar vooraleer we de biologische evolutie beschrijven, zullen we eerst een maat voor complexiteit bespreken.

Een maat voor complexiteit

Op het eerste zicht is complexiteit een subjectief gegeven. Wat voor de ene persoon ingewikkeld is, is het voor de andere niet. Voor sommigen is de motor van de auto iets wat onder een kofferdeksel zit, dat nooit opengaat. Voor anderen zijn de werkingsprincipes ervan glashelder. Maar zelfs indien we erin slagen om één en ander te objectiveren, dan nog hangt complexiteit af van de context. Wanneer de baan van de maan beschreven wordt vanuit het geocentrisch standpunt van Ptolemaïus, leidt dit tot een 'complexer' wiskundig model, dan wanneer diezelfde baan beschreven wordt vanuit een Copernicaans, heliocentrisch referentiekader. In deze zin is complexiteit zelfs een maatstaf voor de kwaliteit van een wetenschappelijke theorie: Hoe 'eenvoudiger' de theorie met eenzelfde verklarende kracht, hoe beter ! Dit is een illustratie van het zogenaamde 'scheermes van Ockham': Eenvoudige verklaringen, die gebruik maken van zo weinig mogelijk premissen, zijn te verkiezen boven ingewikkelde. Complexiteit in de wetenschappen is echter geen eenduidig begrip. Het kan ook slaan op het aantal differentiaalvergelijkingen, en bijgevolg het aantal toestanden, dat nodig is om een bepaald dynamisch fenomeen te beschrijven. Zo is een systeem dat beschreven wordt door een eerste-orde gewone differentiaalvergelijking (zoals bijvoorbeeld de aangroei van een bankrekening door de intresten), eenvoudiger dan de tweede orde differentiaalvergelijking $F = m \times a$ van Newton, die dan weer op haar beurt eenvoudiger is dan onze klimaatmodellen, waarvoor honderden differentiaalvergelijkingen nodig zijn. Complexiteit kan ook slaan op de moeilijkheid om een

wiskundig geformuleerd probleem op te lossen. In de wiskunde bestaat een taxonomie van soorten problemen, die gaan van gemakkelijke, waarvoor men bijvoorbeeld kan bewijzen dat er maar één oplossing bestaat, tot moeilijke, waarbij het aantal oplossingen of het aantal bewerkingen dat men moet doen om tot een oplossing te komen, exponentieel toeneemt met het aantal variabelen. De notie van complexiteit wordt ook gebruikt in de context van 'complexe systemen'. Dit zijn dynamische systemen met niet direct voor de hand liggend gedragingen zoals *chaotische systemen*. Deze worden beschreven door niet-lineaire maar deterministische dynamische vergelijkingen. Ze vertonen een grote gevoeligheid voor de precisie waarmee een initiële toestand gespecificeerd wordt. Daardoor is de facto hun dynamisch gedrag op termijn onvoorspelbaar. Een andere manifestatie van complexiteit is *emergent gedrag*. Dat ontstaat typisch in gelaagde, hiërarchisch georganiseerde systemen, waarbij het dynamisch gedrag op een hoger niveau, niet zondermeer verklaard kan worden vanuit het gedrag van de subsystemen op een lager niveau. Een klassiek voorbeeld is een zwerm spreeuwen, waarvan de grillige vluchtpatronen niet zomaar voorspelbaar zijn vanuit het gedrag van elke spreeuw afzonderlijk. Andere voorbeelden van emergentie vinden we bij sociale insecten, zoals mieren en bijen. Of de vele voorbeelden van synchronizatie in de natuur, zoals dat van kolonies van vuurvliegjes, die allemaal synchroon gaan pinken, of de twee klokken van Huygens (zie [Strogatz, 2003] voor talloze voorbeelden). Ook de entropie van een dynamisch systeem is een voorbeeld van emergent gedrag: Het is een kwantitatieve maat voor de (wan-)orde op moleculair niveau, waarvoor niet het gedrag van elk individueel deeltje op zich belangrijk is.

Over complexiteit en de kwantitatieve maten waarmee ze gekarakteriseerd kan worden, is in de wetenschappelijke literatuur ongelooflijk veel gepubliceerd. Maar één welbepaalde maat lijkt wel bijzonder geschikt om de complexiteit van open systemen te karakteriseren aan de hand van de vrije energie die ze verwerven, opslaan, 'consumeren' en terug vrijlaten, en waardoor in meer of mindere mate welbepaalde, goed-georganiseerde structuren kunnen ontstaan. Deze complexiteitsmaat [Chaisson, 2003] beschrijft de hoeveelheid vrije energie, per eenheid van tijd, die transieert doorheen een open systeem, genormaliseerd per eenheid van massa. Zij wordt uitgedrukt in de eenheden van energie (Joule (J)) per eenheid van tijd (seconde (s)) per eenheid van massa (kilogram (kg)). Omdat energie per eenheid van tijd ook wel 'vermogen' wordt genoemd, kunnen we ook spreken over het 'genormaliseerd vermogen', waarbij de normalisatie slaat op de massa. De eenheid van vermogen is de Watt (W), zodat de eenheid waarin onze complexiteitsmaat wordt uitgedrukt, Watt per kilogram is (W/kg). We vergelijken dus het vermogenverbruik van structuren en organismen, per kilogram. Het is vrij verrassend hoe deze maat goed overeenstemt met ons intuïtief aanvoelen van complexiteit wanneer we bepaalde open dynamische systemen met elkaar vergelijken. Het genormaliseerd vermogen voor een jonge protoster is 0.00005 W/kg, een ster in mid-life 0.0002 W/kg en een oude rode reus 0.01 W/kg, vergelijkbaar met dat van een gemiddelde planeet. De complexiteitsmaat neemt duidelijk toe in functie van de kosmologische, evolutionaire leeftijd.

Onze complexiteitsmaat blijkt ook goed te werken voor de evolutie van technologische systemen. Het vliegtuig van de gebroeders Wright heeft een maat van 100 W/kg, een Boeing 747 van 1000 W/kg en een Stealth bommenwerper van 10 000 W/kg. Het succesmodel van Ford, de Ford T van 100 jaar geleden, zat aan 10 W/kg en een hypermoderne SUV aan 100 W/kg. De onwaarschijnlijke ontwikkeling van de micro-electronica in de laatste 50 jaar, wordt weerspiegeld door de complexiteit van de chips van vandaag, namelijk 1 000 000 W/kg. Dit komt door de enorme warmte-dissipatie op een chip, versterkt door de exponentiële miniaturisatie van geïntegreerde elektronische schakelingen en is als dusdanig een overschatting van de complexiteit. Een andere interpretatie is dat de chip 'onnatuurlijk' veel energie vraagt voor de inherente complexiteit waar hij voor staat.

Verderop passen we deze complexiteitsmaat toe op biologische systemen, maar daarom moeten we het eerst even hebben over biologie.

De biologische evolutie

Dat biologische systemen, zelfs de meest eenvoudige, complex zijn, hoeft geen betoog. Ze zijn veelal modulair opgebouwd, met ingenieuze hiërarchieën van protocollen en terugkoppelsystemen. Ze zijn, net als de Boeing 777, uitgerust met sensoren, informatieverwerkende units, en actuatoren.

Laten we eens een minder voor de hand liggend voorbeeld nemen, dat van kanker, waarvan vandaag al meer dan 100 verschillende soorten zijn geïnventariseerd. Kanker is natuurlijk een vreselijke pathologie, maar vanuit systeembioologisch standpunt, zeer interessant. De pathologie zelf en het ontstaan ervan (carcinogenese) vertonen namelijk alle karakteristieken van een complex systeem. Zoogdieren zijn uiterst complexe dynamische systemen, met een anatomische hiërarchie van genen, sub-cellulaire entiteiten, cellen, weefsels, organen, systemen en uiteindelijk het hele organisme. Op al deze niveaus zijn er complexe interacties, maar ook ertussen. Bovendien is het anatomisch geheel ook nog eens ingebed in een macro-omgeving die het gehele gedrag ervan, op alle niveaus, beïnvloedt. De carcinogenese speelt zich af op alle niveaus: Op het genetisch niveau van oncogenen en tumoronderdrukkende genen, is er sprake van twee belangrijke vormen van genetische instabiliteit: *Microsatelliet-instabiliteiten* leiden tot een verhoogd aantal punt-mutaties, en *chromosoom-instabiliteit* duidt op een verhoogde mate waarin grote chromosomale aberraties worden geaccumuleerd. Op subcellulair niveau kunnen er veranderingen ontstaan in de mitochondrieën en in de celkernen. Op celniveau kunnen er problemen ontstaan in de processen van apoptose en in de celkinetica. Op weefselniveau ontstaan er problemen in de bloedvatvorming (angiogenese), op orgaaniveau zijn er uitzaaiingen (metastasis) en de werking van bepaalde systemen, zoals bvb. het immuunsysteem, kan zwaar gehypothetiseerd worden. Kanker is dus een dynamisch systeem met tientallen dynamische variabelen, die evolueren op verschillende schalen in tijd (10 tot 12 grootteordes: voor de diffusie in de ionkanalen: 1 miljoenste seconde, voor de celdeling: 1 tot 100 seconden, voor de kankerdynamica: 100 miljoen seconden) en ruimte (cellen, weefsels, organen,...), in verschillende fases (initiatie, progressie, metastase). De belangrijkste stap in carcinogenese is het resultaat van een irreversibele kwalitatieve verandering in één of meer genetische karakteristieken van kankercellen. Er is duidelijk sprake van emergent gedrag, waarbij dan nog eens een grote autonomie ontstaat van het kankersysteem als geheel, waardoor therapieën niet voor de hand liggen. Bovendien is elke tumor min of meer uniek, omdat er een zeer grote variabiliteit kan zijn in elk van de hierboven beschreven hiërarchische lagen. Een kanker bevat ook alle kenmerken van niet-lineaire ‘complexe’ systemen, waarin periodes van ogenschijnlijk inactiviteit, ineens worden afgewisseld met periodes van nieuwe en drastische veranderingen. Alle eigenschappen van een kankersysteem zijn bovendien merkwaardig robuust, wat meteen een extra uitdaging betekent voor het ontwerpen van therapieën en medicijnen. Samengevat kan men stellen dat kanker als ziekte een voorbeeld is van een complex dynamisch systeem, dat emergent gedrag vertoont. Deze systeembioologische visie biedt hopelijk op termijn ook de nodige inzichten voor het ontwikkelen van geschikte therapieën.

De evolutie naar steeds grotere complexiteit is iets wat technologische systemen delen met biologische systemen. Er is echter een belangrijk verschil. Vooreerst natuurlijk de tijdschaal. De technologische evolutie ontrolt zich veel sneller dan de biologische. Dit komt omdat wij zelf, als soort, in ons bewust streven naar steeds groter comfort, aan de basis liggen van de toenemende complexiteit en sofisticatie van de technologie. De evolutie van biologische soorten daarentegen ontstaat uit heel andere mechanismen. Biologische organismen hebben een systeem van *genetische software*, het genoom van de soort, dat bij elke volgende generatie mee wordt gekopieerd. Bij het kopiëren treden echter toeval-

mutaties op, waarbij, meestal met een zeer kleine kans, uiterst kleine hoeveelheden van informatie, worden vergeten, gedupliceerd in meerdere kopies, of eenvoudigweg veranderd. In de meeste gevallen zijn deze mutaties onschuldig. Af en toe zijn ze fataal, omdat de genetische software het organisme niet meer juist laat functioneren. En nu en dan leidt het tot een veranderende eigenschap, die de volgende generatie niet deelt met de vorige. Het is dit mutatie-mechanisme dat doorheen de geschiedenis geleid heeft tot een steeds grotere biologische diversiteit. Door de waarschijnlijkheid in te schatten waarbij mutaties optreden, en vervolgens ook de gemiddelde leeftijd van de organismen van een bepaalde soort af te schatten, kan men als het ware terugkijken in de tijd, en uitmaken wanneer ongeveer twee verschillende soorten in het verleden zijn ontstaan uit een gemeenschappelijke voorvader. Op deze manier herziet men de dag van vandaag de eeuwenoude taxonomie van Linnaeus, die voornamelijk gebaseerd was op externe kenmerken, en niet op genetische verwantschap. De genetische diversiteit binnen een bepaalde soort is ook belangrijk. Zij kan bijvoorbeeld gebruikt worden om de grootte van de populatie ervan (bvb. het walvisbestand), op een bepaald moment, in te schatten. Toevalsmutaties bij het kopiëren van het genoom van de ene generatie op de andere, liggen dus aan de basis van de huidige, grote, biodiversiteit. Mutatie is de drijvende kracht van de dynamische evolutie van de genetische software van soorten doorheen de tijd.

Maar er is een andere vorm van dynamika die minstens even belangrijk is. Elk biologisch organisme is een dynamisch open systeem dat interageert met zijn omgeving, en ook met andere biologische organismen, bijvoorbeeld in de voedselketen, met de natuur (bvb. het klimaat) en de kosmos (bvb. kosmische straling, neerstortende meteorieten). Bepaalde mutanten in een populatie zijn beter bestand tegen de confrontatie met de omgeving dan andere, omdat ze ‘sterkere’ genen hebben (en alles wat daarvan het gevolg is). Door de mechanismen van genetische overerving gaan die eigenschappen over op nakomelingen die beter bestand zijn tegen de omgeving. Uiteindelijk gaan deze sterke eigenschappen domineren in de (sub-)populatie. Mutanten die de ‘verkeerde’ of ‘zwakkere’ eigenschappen hebben, worden in hun confrontatie met de omgeving geleidelijk aan geëlimineerd. Het is moeilijk in te beelden dat deze interactie gebeurt, op elk moment, op elke plaats, tussen miljoenen soorten en de natuur. De co-evolutie van biologische soorten is het gevolg van recurrente mutatie van de ene op de andere generatie in een bepaalde soort, maar ook van een ongelooflijke wirwar van interacties van alle organismen van alle soorten met mekaar en de omgeving. We kunnen ons deze gigantische complexiteit amper voorstellen. Bovendien is deze biologische evolutie al miljarden jaren aan de gang. Erik Lander, één van de drijvende krachten achter het Human Genome Project, waarbij voor het eerst een volledig menselijk genoom werd in kaart gebracht, zegt het als volgt: “*For the last three and a half billion years, evolution has been taking notes. It tries experiments. It wakes up each morning, does a little mutagenesis, changes a nucleotide here and there and sees how it works. If it’s a success, it keeps the notes. In this notebook, we have all the information of the greatest experimental tinkerer ever.*” Dit citaat beschrijft de natuur als een gigantische experimenteermachine, waarin elke dag miljarden genetische experimenten tegelijkertijd plaatsvinden, en dit reeds gedurende miljarden jaren. Op elk moment is er een eliminatie van die varianten die minder bestand zijn tegen de agressiviteit van de biologische en natuurlijke omgeving.

Wanneer we over de biologische evolutie spreken, moeten we erg opletten in ons taalgebruik. We zeggen wel eens dat een soort zich ‘aanpast’ aan de veranderende omgeving, net alsof ze dat intentioneel en bewust zou doen. Zo bijvoorbeeld sprak een recent krantenartikel “*over het aanpassingsvermogen van het vleugelstreepzaad, een plantje uit de familie van de paardenbloemen, dat zich in amper twaalf jaar tijd, zou hebben aangepast aan het leven in de stad. De soort kan zich op twee manieren voortplanten: met de bekende pluisjes die meewaaien met de wind, en gewoon door zaadjes naast zich te laten vallen. Omdat de planten in de betonnen stad bijna uitsluitend langs bomen*

of in grote plantenbakken kunnen groeien, heeft het wegwaaien van zaden niet veel zin: ze komen meestal toch slecht terecht. Recent onderzoek zou aantonen dat stadsplantjes dubbel zoveel vallende zaden produceren als hun collega's op het platteland.” Let op het suggestief taalgebruik van “aanpassingsvermogen” of “het feit dat wegwaaien van zaadjes ‘zinloos’ is”. De realiteit is dat ‘mutanten’ en ‘genen’, die omwille van hun genetische constitutie organismen voortbrengen die minder goed aangepast zijn aan de veranderde omgeving, onder druk komen te staan in de procreatiemechanismen, om in de populatie vervangen te worden door genen die fittere organismen tot stand brengen. De strijd om de ‘survival of the fittest’, is er dus een van winnende genen in een veranderende omgeving, versus verliezende genen. Het zogenaamde aanpassingsvermogen is niets anders dan eliminatie van mutanten die minder geschikt zijn om te overleven in een veranderde omgeving. Zo ook schijnt het woord selectie een soort doelgerichtheid te suggereren, of ook de rol van een mediator die selecteert. Zoals hierboven uitgelegd, zou *niet-toevallige eliminatie* een beter woord zijn dan selectie. Wat we adaptatie noemen, is eigenlijk een vorm van verlies aan biodiversiteit.

De discussie over de onafhankelijkheid tussen mutatie en selectie heeft bij evolutiebiologen al veel stof doen opwaaien. Een bekend experiment over virusresistentie van Salvador Luria en Max Dulbrück in 1943 (zie [Verstrepen, 2008]) leek het neo-darwinisme te bevestigen: de evolutie is het gevolg van geheel toevallige veranderingen in het DNA. Dit experiment was belangrijk omdat het de eerste evolutietheorie, uitgewerkt door Jean-Baptiste Lamarck in het begin van de negentiende eeuw, hypothekeerde. Lamarck erkende de mogelijkheid dat levende wezens veranderen en evolueren naar een steeds grotere complexiteit. Volgens Lamarck was de drijvende kracht hiertoe ‘l’influence des circonstances’: levende wezens evolueren omdat de omgeving hen daartoe dwingt. Het gekende voorbeeld hier is dat griaffen een lange nek hebben, omdat ze doorheen de opeenvolgende generaties geleerd hebben hun nek te strekken. Het Lamarckisme suggereert dus het bestaan van erfelijkheid van leergedrag van organismen naar volgende generaties, m.a.w. het bestaan van een rechtstreekse ‘feedback’ van de omgeving op wat via erfelijke weg kan worden doorgegeven. Het experiment van Luria en Dulbrück sluit deze feedback echter uit. Giraffen hebben een lange nek, omdat de lengte van hun nek genetisch wordt bepaald en een groot voordeel biedt bij het vinden van voedsel, ten nadele van soortgenoten met erfelijke kortere nek, die het moeilijker hadden bij het vinden van voedsel.

De biologische evolutie zelf wordt dus beschreven door meerdere lagen van dynamika. Er is de dynamika van het dagdagelijkse leven van een organisme. Er is de dynamika van de overerving van genetisch materiaal, verstoord door kleine mutaties. Er is de dynamika van de eliminatie van eigenschappen, organismen en soorten. En er is de dynamika van de veranderende biologische en natuurlijke omgeving. Dit volledige biotoop, dat we aarde noemen, is dus een onbeschrijflijk complex dynamisch systeem met vele lagen, die elk nog met elkaar interageren.

Van materie over leven naar bewustzijn

Om ons verhaal van evolutie van de Big Bang tot nu rond te krijgen, moeten we nog twee grote sprongen kunnen verklaren. De eerste is deze van materie naar leven. De tweede is deze van leven naar bewustzijn. Het vinden van een mogelijke verklaring voor de eerste sprong is het gemakkelijkste. Eerst moeten we bepalen wanneer leven ‘leven’ is. Volgens Monod worden levende wezens gekenmerkt door drie belangrijke kenmerken: autonome morfogenese, invariante reproductie en teleonomie. Met autonome morfogenese wordt bedoeld dat de organismen van een bepaalde soort, zichzelf zo kunnen organiseren dat ze zelf hun specifieke vorm en functionaliteit aannemen, zonder hulp van ‘buitenaf’ (tenzij natuurlijk de vrije energiestromen die ze nodig hebben om tot die structuur te komen). Voor een meer wiskundige beschrijving verwijzen we naar [Thom, 1975]. De invariante

reproductie slaat op alle mechanismen waarmee de organismen van een soort zich voortplanten en die we hierboven hebben overlopen. Teleonomie, een term bedacht door de cyberneticus Norbert Wiener in 1943, slaat op een ogenschijnlijke doelgerichtheid in structuren en functies in levende organismen, zoals kan worden afgeleid uit hun evolutie en ‘aanpassing’ aan de omgeving. Dit slaat op alle activiteiten van een organisme die te maken hebben met de instandhouding van de soort. Zo bijvoorbeeld zullen hogere zoogdieren met hun welpen spelen, een activiteit die van belang is voor de psychische ontwikkeling en de sociale integratie in de groep. Daarom ook heeft deze activiteit teleonomische waarde, omdat het een voorwaarde is voor overleving en uitbreiding van de soort.

De laatste tientallen jaren zijn verschillende plausibele hypothesen naar voor geschoven, die verklaren hoe geleidelijk aan er een evolutie is geweest van materie naar leven. De wetenschap waarin dit bestudeerd wordt, heet *abiogenese*. Misschien wel het bekendste experiment is dat van Stanley Miller uit 1953, hetzelfde jaar waarin Crick en Watson hun artikel publiceerden over de chemische en geometrische dubbele helix structuur van het DNA. Door de gepaste thermodynamische omstandigheden konden op aarde verschillende chemische elementen worden gevormd. Er ontstonden een dampkring en oerzeeën. Vulkaanuitbarstingen op een geologisch nog erg actieve aarde, brachten de nodige chemische elementen in grote concentraties in de atmosfeer. Voortbouwend op dit gegeven, definieerden Miller en collega's een beroemd geworden experiment, waarbij ze vertrokken van water, methaan, ammoniak en waterstof. Het water werd verwarmd zodat het kon verdampen, en tussen twee electrodes werden elektrische vonken getrokken die de bliksem in de oeratmosfeer moesten simuleren. Na niet meer dan één week vond Miller dat ongeveer 10 tot 15 % van de koolstof uit het methaan, tevoorschijn kwam in de vorm van organische componenten. Er waren ook aminozuren gevormd, alsook bepaalde suikers en bouwblokken van DNA en RNA. Op zijn minst toonde het experiment aan dat de vorming van organische componenten, die de basisblokken zijn van het leven zoals wij dat kennen, perfect mogelijk was in een wereld die enkel uit materie en energie bestaat. Miller's experiment is sindsdien vele malen herhaald, ook met andere initiële chemische elementen. Zo bijvoorbeeld toonde Juan Oro in 1961 aan dat aminozuren ook kunnen worden gemaakt van waterstofcyanide en ammoniak in een waterige oplossing. Ook één van de DNA bases, adenine, werd in verbazende hoeveelheden gevormd. Adenine is bovendien één van de componenten van adenosine triphosphate of ATP, een molecule die enorm belangrijk is voor de energievoorziening in een cel.

Maar er is meer. In ongeveer 100 kilogram materiaal van een komeet die in 1969 neerstortte in Australië, werden heel wat aminozuren aangetroffen. Vandaag de dag kennen we meer dan 90 verschillende aminozuren, waarvan er 20 vertegenwoordigd zijn in het leven op aarde. M.a.w., als aminozuren bestand zijn tegen een tocht in extreme condities doorheen de ruimte, is het ook niet uit te sluiten dat zij reeds aanwezig waren in de materie waaruit uiteindelijk de aarde is gevormd. Of misschien ontstonden ze door een combinatie van de twee fenomenen.

De *abiogenese* is echter daar wat blijven steken. Tot op de dag van vandaag heeft niemand al, via een zogenaamde *bottom-up* approach, een ‘proto-cel’ gemaakt, vertrekkende van bijvoorbeeld de aminozuren uit de experimenten van Miller en Oro. Wel weten we steeds meer over de mogelijke ontstaansgeschiedenis van de verschillende noodzakelijke ingrediënten van de biologische evolutie, zoals bijvoorbeeld het principe van genetische overerving. Eén van deze modellen is de ‘genen-eerst’-hypothese. Hierin wordt gepostuleerd dat relatieve korte RNA molecules er op een bepaald moment in geslaagd zijn om hun eigen, recurrenente replicatie, te organiseren, een experiment dat al gelukt is in gecontroleerde labo-omstandigheden. RNA kan ook genetische informatie stockeren en als catalysator optreden bij bepaalde chemische reacties die noodzakelijk zijn in de genetische processen. Gesloten cellmembranen zouden gevormd kunnen worden uit proteïnoïdes, die ontstaan wanneer aminozuren verwarmd worden.

Eén van de andere voortrekkers van het Menselijk Genoom Project, Craig Venter, volgt een *top-down* benadering in een poging om het 'bestaan' van leven te verklaren. Hij vertrekt van bestaande bacteriën, waarbij één voor één genen worden uitgeschakeld, om op die manier het minimum aantal genen te bepalen waarbij leven nog mogelijk is. We weten nu dat minimaal cellulair leven ongeveer 300 genen vergt, maar een bacterie zoals *Escherichia coli* heeft er ongeveer 4000. Een voor de hand liggend verklaring is dat deze 'extra' 3700 genen 'nodig' zijn om het organisme van een grote robuustheid tegenover een veranderende omgeving te voorzien. Het woordje 'nodig' is hier bewust tussen aanhalingstekens gezet. Het is niet de bacterie zelf, noch een soort collectief geheugen in deze soort, die deze complexiteit heeft toegevoegd. Zij is wel het resultaat van miljoenen jaren van evolutie, waarbij opeenvolgende generaties van bacteriën door mutaties of mengen met andere bacteriën, nieuwsoortige mechanismen van feedback, verstoringsonderdrukking en robuustheid, verworven hebben. De complexiteit van het leven ontstaat dus door een systeem van 'high-throughput' experimenten in parallel, precies zoals in het citaat van Lander.

Bekijken we nog even de eerder gedefinieerde complexiteitsmaat voor enkele biologische structuren. Het vermogen per eenheid van massa voor een plant, ligt op de grootte-orde van 0.1 W/kg. Het fotosyntheseproces bij gras ligt op 0.05, bij de den op 0.3 en bij gecultiveerde mais op 0.6 W/kg. De complexiteitsmaat voor microben ligt gemiddeld rond 0.1, met uitschieters tot 100 W/kg (dit is dan wel een piekvermogen). Voor koudbloedige reptielen ligt het verbruik op 1 W/kg, bij warmbloedige zoogdieren op 5 W/kg. Een zittende, werkende en fietsende mens gebruiken resp. 2, 6 en 10 W/kg. Alleen al onze hersenen hebben een complexiteitsmaat van 10 W/kg, en een samenleving staat op 100 W/kg. Interessant is ook dat de menselijke evolutie kan worden afgemeten aan de hand van deze complexiteitsmaat. De complexiteitsmaat voor de samenleving van de jager-verzamelaar van tienduizenden jaren geleden wordt geschat aan 1 W/kg; De sedentaire landbouwer-samenleving van enkele duizenden jaren geleden aan 10 en de samenleving in de eerste industriële revolutie staat op 50 W/kg. De huidige Amerikaanse samenleving staat op 300 W/kg.

De tweede belangrijke sprong in de biologische evolutie, is deze van leven naar bewustzijn. Deze sprong verklaren is een ander paar mouwen. Bewustzijn en vrije wil, het zijn twee onderwerpen die lange tijd tot het domein van de filosofie behoorden, maar de voorbije decennia door de wetenschap zijn ingepalmd. Maar precies hier is onze wetenschappelijke ignorantie nog ontzettend groot. We hebben nog altijd geen afdoende evolutionaire verklaring van het ontstaan van bewustzijn. Om te overleven, hebben we het niet echt "nodig". En sommigen, zoals David Chalmers, hebben het dan weer meer voor het idee van *panprotopsyche*, waarbij de hele wereld een soort bewustzijn zou hebben. De stand van zaken van inzicht in het bewustzijn, is wellicht te vergelijken met het inzicht dat de presocratici hadden in de materie. Volgens sommigen is bewustzijn een voorbeeld van emergentie, waarbij de bewustzijns-capaciteit ontstaat in een laag die zich bevindt boven verschillende mentale en neuro-fysiologische lagen, maar die hieruit, met de huidige beperkte kennis van zaken, niet onmiddellijk kan verklaard worden. Ons brein is immers één van de meest complexe systemen in de kosmos. In de Engelse literatuur spreekt men van een *explanatory gap* tussen de beschrijving van het materiële brein en die van het bewustzijn. [Van Loocke, 2008] geeft een exhaustief overzicht over theorieën en speculaties i.v.m. het ontstaan van bewustzijn tijdens de evolutie. Sommigen beweren zelfs dat de evolutieleer het bewustzijn niet kan verklaren. Anderen, zoals Penrose in zijn beroemde boek [Penrose, 1989] speculeren dan weer op kwantummechanische effecten die aan de basis zouden liggen van bewustzijn en beslissingsprocessen. Colin McGinn vat de stand van zaken over het onderzoek naar het bewustzijn als volgt samen: "Op een of andere wijze, zo voelen we, wordt het water van het fysieke brein getransformeerd in de wijn van het bewustzijn, maar we hebben volledig het raden naar de aard van die conversie". We weten dus niet wat het bewustzijn is. Een coherente

evolutionaire verklaring blijkt nog niet te bestaan, als ze al ooit zou worden gevonden. We zitten dus met een hiaat tussen de biologische evolutie en de technologische evolutie, omdat we het bewustzijn, waarin onze menselijke creativiteit ontstaat, vooralsnog niet begrijpen. Nochtans heeft dit bewustzijn ons een groot competitief voordeel opgeleverd t.o.v. andere soorten. Immers, door de gelaagdheid van onze mentale processen, moeten we ons niet echt iets aantrekken van de lagere functies in ons lichaam. Net zoals de piloten en passagiers van de Boeing 777. Daardoor komt er meer energie vrij voor andere zaken, met het gekende gevolg.

Een ander interessant vraagstuk is natuurlijk hoe de evolutie van ons bewustzijn de biologische evolutie beïnvloedt. We kunnen niet langer ontkennen dat de mens duchtig ingrijpt op zijn biotoop. In een vorige bijdrage [De Moor, 1994] hebben we dit nieuwsoortig biotoop, waarin technologie hoe langer hoe meer het ‘natuurlijke’ biotoop beïnvloedt, betiteld als de *technotoop*. Men kan zich dus de vraag stellen of er niet stilaan een soort genetische robuustheid aan het ontstaan is in de menselijke populatie, of anders gezegd, in hoeverre zijn we als menselijke soort in staat om zelf onze genetische selectiemechanismen te gaan beïnvloeden. Is de genetische evolutie van de mens gestopt door de culturele [Moore, 2008] [Stock, 2008] ? Het feit dat wij zelf materie en energie gaan manipuleren, onze aardse omgeving en die onmiddellijk daarbuiten, tot onze eigen genen toe, zal niet zonder gevolgen blijven. Wij zijn zelf agenten geworden van de veranderende omgeving waarin we leven. Eén van de Nobelprijswinnaars Geneeskunde van 2002, Sydney Brenner, gaat er van uit dat de menselijke biologische evolutie zo’n 100 000 geleden gestopt is door onze culturele evolutie. Daardoor is ons huidig biologisch systeem slecht aangepast aan onze omgeving: Mutaties zijn blijven werken, maar de selectie doet niet langer haar werk. Dat heeft zo zijn gevolgen. De ontrafeling van de ontstaansprocessen van ziektes (bvb. carcinogenese) is niet langer een biologisch probleem op zich is, dan wel een probleem van inzicht in de interactie tussen het biologisch systeem en zijn omgeving. Maar de grote genetische variabiliteit die ontstaan is in de menselijke populatie, biedt ook enorme opportuniteiten. Zij bevat immers een schat aan informatie. In zekere zin zijn we allemaal mutanten, en bestaat er geen menselijk ‘consensus’-genoom. M.a.w., alle mensen samen zijn het resultaat van 6 miljard experimenten die quasi tegelijkertijd plaatsvonden. En binnen afzienbare tijd zullen we voor 1000 dollar per run, eenieders individueel genoom kunnen sequencen. Dat biedt heel wat perspectieven op wetenschappelijke doorbraken in de ontrafeling van ziektepatronen en het op punt stellen van een geïndividualiseerde therapie.

Nieuwheid denken: het creatieve aspect van de werkelijkheid

In zijn culturele evolutie heeft de mens een lange weg afgelegd om dit alles te kunnen begrijpen. Van mythes over religies tot wetenschappen: allen droegen zij bij tot onze wereldbeelden, die zelf continue evolueren, naarmate onze wetenschappelijke inzichten veranderen. Die wetenschappen zijn onze instrumenten om de immense complexiteit van de werkelijkheid, te ontrafelen. Ook zij zijn in volle evolutie. Niet alleen genereren wetenschappelijke disciplines zelf nieuwe disciplines, bovendien weten we sinds Popper dat ook onvolledigheid en imperfectie wetenschappelijk kunnen zijn. Een theorie is immers pas wetenschappelijk wanneer ze in zich de kiemen draagt, waarmee ze kan worden ontkracht. En dat doen we als wetenschapper dan ook regelmatig. Op die manier is Popper’s falsificatiecriterium een drijvende kracht voor het wetenschappelijk onderzoek. Het zet de deur op een kier voor nieuwe, betere en allesomvattendere theorieën. Merkwaardig genoeg formuleerde Popper zijn inzichten ook als een evolutionair proces waarbij wetenschappelijke vooruitgang ontstaat in de interactie tussen hypothesen (‘conjectures’) and eliminatie (‘refutation’), net zoals de biologische evolutie gebeurt door genetische variatie en natuurlijke eliminatie.

Niettegenstaande de steeds diepere specializatie in vele takken van de wetenschap, kent de studie van de evolutie geen disciplinaire grenzen. Ze doet een beroep op fysica, wiskunde, astronomie, geologie, chemie, biologie en antropologie en nog veel meer. Voorwaar niet gemakkelijk. En ook jammer dat niet meer wetenschappen durven grensoverschrijdend te werken.

Plato wist het al: “*Niets is ooit, maar alles wordt*”. Evolutie speelt een steeds belangrijker rol in de biologie, maar ook in de fysica van de kosmos, van sterren en planeten, en in de studie van de menselijke cultuur en alles wat daar mee samenhangt. Dat de kosmos zou evolueren, is misschien een *overstatement*. Hij evolueert niet in biologische zin. Het is wellicht preciezer te spreken over de *ontwikkeling* ervan, volgens de wetmatigheden van de fysica en de thermodynamika. De biologische evolutie is (neo-)Darwiniaans. Zij ontstaat doordat de *genetische software* van generatie op generatie wordt overgeërfd, weliswaar met kleine toevals-mutaties. Hierdoor ontstaat diversiteit, die vervolgens wordt gefilterd in de confronterende interactie met de omgeving. De culturele evolutie is dan weer eerder Lamarckaans. Van generatie op generatie geven we niet alleen de biologische *systemssoftware* door, maar ook ervaringen en gewoontes, die we van onze ouders en elkaar geleerd hebben, en de geplogenheden van onze en andere culturen. In elk van deze, op het eerste zicht, gescheiden werelden, vinden we de creatieve aspecten van de werkelijkheid terug. Van big bang naar materie en energie, van materie naar leven, van leven naar bewustzijn en vrije wil. En steeds weer lijkt toeval een rol te spelen. De toevallige, materiële ‘kristallisaties’ in de oersoep vlak na de big-bang, de toevalligheid die mutaties kenmerkt, en de toevalligheid waarmee we gedachten formuleren, beslissingen nemen en nieuwe ideeën lanceren en waarachter men de wetten van de kwantummechanica vermoedt. Het lijkt wel of deze ‘toevalligheden’ een fundamentele eigenschap zijn van de werkelijkheid, of reflecteren ze eerder ons onvermogen om diezelfde werkelijkheid te beschrijven? Alvast Einstein, met zijn ‘*God does not play dice*’, vond de noodzaak van het toeval als element in een wetenschappelijke theorie, een verarming. Tot de kwantummechanica op de proppen kwam, werd in de wetenschappen immers het strikte concept van deterministische logica gehanteerd.

Uit de kosmologische, biologische en culturele evolutie is een grote diversiteit ontstaan en de emergentie van steeds complexere structuren. We kunnen de complexiteit van al deze structuren meten volgens de maat waarin vrije energie per eenheid van tijd en massa wordt geconsumeerd. Dit alles in een uitdijend Universum dat niet in evenwicht is. In die zin is het ontstaan van ‘intelligent’ leven een logische voortzetting van de kosmologische evolutie over de biologische naar de culturele. In die evolutie en in de wetten van de natuur, zit een soort ingebakken ‘voortbestemdheid’. Misschien een beetje radicaal, maar we zouden de evolutie kunnen vergelijken met een voetbalspel. In elke match wordt meestal gescoord, op onvoorspelbare tijdstippen en soms eerder toevallig. Maar dat er gescoord wordt, zit ingebakken in de regels van het voetbal zelf. Er is geen kracht nodig van buitenaf die voetballers zou moeten laten scoren. Op dezelfde manier moeten we geen beroep doen op een ‘intelligent designer’ om de evolutie van kosmos, biologie en cultuur te verklaren. De regels van de natuur zorgen zelf voor diversiteit en creativiteit, vanuit de ijzeren logica en de ultieme consequenties van de wetten van energie en entropie. Zij zijn de ultieme bron van alle creativiteit en diversiteit, en ook van de teloorgang ervan. Want thermodynamisch staan we in het rood. We beschikken weliswaar nog over een immens entropie-krediet, maar vroeg of laat zullen we onze thermodynamische schuld moeten afbetalen.

Deze visie noopt ons tot grote bescheidenheid. Wij zijn het voorlopige resultaat van eonen van evolutie, van miljarden parallelle, gelijktijdige en consecutieve experimenten en toevalligheden. Het is ook een geruststelling. De kosmische religiositeit van Spinoza en Einstein wordt nog versterkt door recente inzichten uit de biologie. Wij zijn onderdeel van een reusachtig kosmologisch, biologisch,

organisch geheel, waarin alle ingrediënten, groot en klein, met mekaar interageren en evolueren naar steeds grotere diversiteit, met een impact die zich uitstrekt over miljoenen millenia en lichtjaren.

Referenties

[Chaisson, 2003] E.J. Chaisson. A unifying concept for astrobiology. *International Journal of Astrobiology* 2 (2):91-101, 2003.

[Christian, 2004] David Christian. *Maps of time. An introduction to big history.* University of California Press, 2004, 642 pp.

[De Moor, 1994] Bart De Moor. Wereldbeelden, wetenschap en technologie. In: *Cirkelen om de wereld. Concrete invullingen van het wereldbeelden-project.* Uitgeverij Pelckmans, 1994, 282 pp.

[Haddad, 2005] Wassim H. Haddad, VijaySekhar Chellaboina, Sergey G. Nersesov. *Thermodynamics. A dynamical systems approach.* Princeton University Press, 2005, 187 pp.

[Moore, 2008] Andrew Moore. The future of our species. Will there be a sustainable evolution of humanity in the twenty-first century ? *EMBO reports*, Vol. 9, 2008, p.51-53.

[Nelissen, 2005] Mark Nelissen. *De bril van Darwin. Op zoek naar de wortels van ons gedrag.* Lannoo, 2005, 355 pp.

[Penrose, 1989] Roger Penrose. *The emperor's new mind. Concerning computers, minds and the laws of physics.* Oxford University Press, 1989, 602 pp.

[Penrose, 2004] Roger Penrose. *The road to reality. A complete guide to the laws of the universe.* Random House, 2004. 1099 pp.

[Stock, 2008] Jay T. Stock. Are humans still evolving ? *EMBO Reports*, Vol.9, 2008, p.551-554.

[Strogatz, 2003] Steven Strogatz. *SYNC. The emerging science of spontaneous order.* Hyperion Books, 2003, 338 pp.

[Thom, 1975] René Thom. *Structural stability and morphogenesis.* W.A. Benjamin Inc., 1975, 348 pp.

[Verstrepen, 2008] Kevin Verstrepen. Evolutie van een leer: Van Lamarck over Darwin naar Weisman—en terug ? *Karakter, tijdschrift van wetenschap.* Academische Stichting Leuven, nr. 22, 2008, p. 18-21.

'Structuur' 'Organisme' 'Technologie'	Complexiteit J/s/kg = W/kg
Protoster	0.00005
Mid-life ster	0.0002
Rode reus	0.01
Planeet	0.01
Fotosynthese gras	0.05
Plant	0.1
Gemiddelde microbe	0.1
Fotosynthese den	0.3
Fotosynthese mais	0.6
Koudbloedig reptiel	1
Zittende mens	2
Warmbloedig zoogdier	5
Werkende mens	6
Fietser	10
Menselijke hersenen	10
Ford T	10
Vliegtuig Wright	100
SUV	100
Boeing 747	1 000
Stealth bommenwerper	10 000
Chip 2008	1 000 000