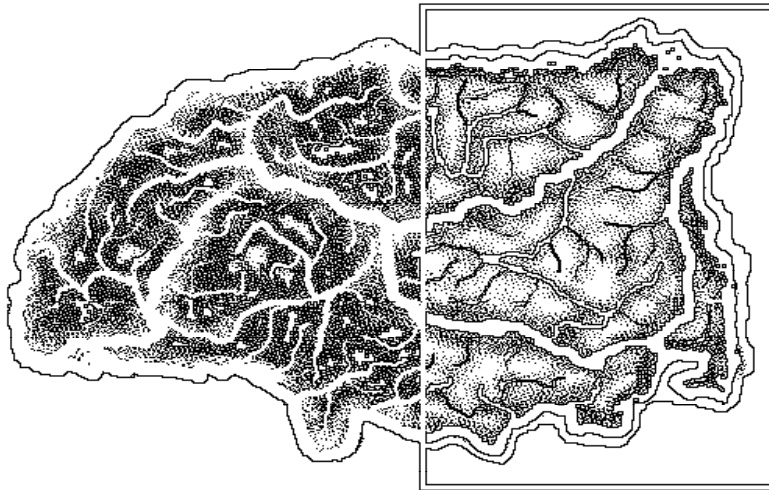


Complexiteit en Evolutie

**basisconcepten van een nieuw
wetenschappelijk wereldbeeld**



Francis Heylighen

Cursusnota's 2008-2009

Voorwoord

Gedurende de laatste twintig jaar is er een stille revolutie in de wetenschap aan de gang geweest. Wetenschappers uit zeer uiteenlopende disciplines, van de natuurwetenschappen via de informatietechnologie tot de humane wetenschappen zijn zich meer en meer bewust geworden van de tekortkomingen van het gangbare Newtoniaanse paradigma. Het is hen duidelijk geworden dat het onderliggende wereldbeeld veel te statisch, simplistisch en reductionistisch is om complexe, dynamische fenomenen, zoals levende organismen, mens en maatschappij, te vatten. De alternatieve benaderingen zijn zich stilletjes aan beginnen groeperen onder de hoofding van “complexiteitswetenschap”. Dit is een gebied dat nog niet zeer goed afgebakend is, en dat alsnog meer lijkt op een allegaartje van metaforen, methoden en modellen uit de meest uiteenlopende disciplines en tradities. Nochtans hebben deze verschillende benaderingen een eigen manier van denken gemeen, die een heel nieuw licht werpt op aloude filosofische en wetenschappelijke problemen. Het is deze manier van denken die ik in dit boek op een zo eenvoudig en samenhangend mogelijke manier probeer naar voor te brengen, in de vorm van wat ik het “evolutionair-systemisch wereldbeeld” noem.

Dit boek is gegroeid uit mijn eigen onderzoek, en poogt een synthese te geven van de verschillende wetenschappelijke (en filosofische) domeinen waarop ik actief ben. Ik ben als “onderzoeksprofessor” verbonden aan het Centrum Leo Apostel van de Vrije Universiteit Brussel, waar ik de onderzoeksgroep leidt over “Evolutie, Complexiteit en Cognitie”. Het doel van dit Centrum, geformuleerd door de bekende wijsgeer Leo Apostel, is de transdisciplinaire integratie van de verschillende exacte en humaan-wetenschappelijke disciplines, en in het bijzonder de constructie van integrerende wereldbeelden. Daarnaast ben ik als “editor” verantwoordelijk voor het internationale Principia Cybernetica Project (<http://pcp.vub.ac.be/>), dat zich tot doel stelt een wereldbeeld te ontwikkelen dat specifiek gebaseerd is op de evolutie van complexe systemen. Dit onderzoek heeft praktische toepassingen, onder andere in het ontwikkelen van een intelligent, zelf-organiserend web. Meer info over mijn werk vind je op mijn “homepage”: <http://pcp.vub.ac.be/HEYL.html>.

De inhoud van dit boek reflecteert mijn persoonlijke benadering, niet altijd de wetenschappelijke consensus. De reden is dat het gebied “complexiteit en evolutie” nog grotendeels in het onderzoeksstadium is, en dat de verschillende ideeën en benaderingen nog nooit systematisch tot een samenhangende theorie werden uitgewerkt. Er bestaan echter verschillende “deeltheorieën” (bijvoorbeeld de biologische evolutieleer), en vooral een aantal fundamentele concepten (bijvoorbeeld toestandsruimte, feedback en fitnesslandschap) die ondertussen stevig verankerd zijn in het wetenschappelijke denken. Het boek wil vooreerst deze

fundamentele ideeën op een overzichtelijke en eenvoudig begrijpbare manier naar voren brengen. Daarnaast is dit boek een eerste poging om de deelbenaderingen te integreren en te veralgemenen.

Het boek is georganiseerd als een tekstboek, dat oorspronkelijk gebruikt werd bij de cursus “Complexiteit en Evolutie” die ik doceer aan de Vrije Universiteit Brussel als keuzevak voor eerstejaarsstudenten wijsbegeerte. Dit betekent dat het boek geen gespecialiseerde voorkennis vereist buiten die verkregen in het algemeen secundair onderwijs. Hoewel het domein van de “complexiteitswetenschappen” dikwijls zeer technisch is, met gebruikmaken van ingewikkelde wiskundige formalismen, zijn de basisideeën relatief eenvoudig. Het zijn deze basisconcepten die ik hier heb proberen uiteen te zetten op een breed toegankelijke manier, zonder te vervallen in simpele vulgarizatie. Dit wil zeggen dat ik de concepten zo veel mogelijk uitleg aan de hand van concrete voorbeelden, illustraties en diagrammen, en het gebruik van wiskundige symbolen tot een minimum beperk. Nochtans lijkt het mij nodig om toch een idee te geven van hoe wiskunde kan helpen om complexiteit voor te stellen, bijvoorbeeld met behulp van de concepten toestandsruimte en entropie. De wiskunde die hiervoor nodig is blijft echter beperkt tot de elementaire verzamelingenleer zoals die in het middelbaar onderwijs onderwezen wordt.

Om het lezen verder te vergemakkelijken voor lezers zonder wetenschappelijke achtergrond bevat de tekst een aantal secties (aangegeven door een *) en paragrafen (in kleinere druk) die minder belangrijke of meer ingewikkelde toepassingen behandelen, en die bij het lezen zonder problemen kunnen overgeslagen worden. Het is wel de moeite waard deze secties te lezen, omdat zij kunnen bijdragen tot het begrip van de basisconcepten. De kernbegrippen zelf worden in de tekst gedrukt in **vetjes (“bold”)**, zodat ze goed herkenbaar zijn. Ze kunnen ook teruggevonden worden in de alfabetische index op het einde.

Francis Heylighen

Inhoudstafel

Hoofdstuk 1. Wereldbeelden	1
1.1. Fundamentele filosofische vragen	1
1.2. De religieuze wereldbeelden.....	2
1.3. Het Newtoniaanse wereldbeeld.....	3
1.4. Het evolutionair-systemische wereldbeeld	6
Hoofdstuk 2. Evolutietheorie.....	8
2.1. Darwin en de oorsprong van de soorten.....	8
2.2. Hoe werkt evolutie?	9
2.3. Het toenemende belang van de evolutionaire benadering	11
2.4. Wat ontbreekt er nog in de evolutionaire benadering?.....	15
Hoofdstuk 3. Zelforganisatie en Chaos.....	16
3.1. Introductie.....	16
3.2. Voorbeelden: magnetisatie en Bénard convectie.....	16
3.3. Globale ordening.....	18
3.4. Niet-lineariteit.....	19
3.5. Chaos	20
3.6. Systemen ver van het evenwicht.....	21
3.7. Bifurcaties*.....	22
Hoofdstuk 4. Systeemtheorie.....	24
4.1. Holisme en emergentie.....	24
4.2. Wat is systeemtheorie?.....	25
4.3. Basiscomponenten van een systeem	26
4.4. Subsystemen en supersystemen	28
Hoofdstuk 5. Cybernetica.....	30
5.1. Doelgerichtheid.....	30
5.2. Feedback.....	31
5.3. Controle	33
5.4. Een voorbeeld: de thermostaat.....	34
5.5. Basiscomponenten van een controlesysteem.....	35
5.6. Controlehiërarchie.....	36
5.7. De drie fundamentele controlemechanismen	38
5.8. Kennis.....	40
Hoofdstuk 6. Complexe Adaptieve Systemen	42
6.1. Achtergrond	42
6.2. Agenten.....	42
6.3. Wat is een complex adaptief systeem?.....	43
6.4. Cellulaire automaten	44
6.5. Zwermen.....	45

6.6.	Artificieel leven.....	47
6.7.	Gesimuleerde maatschappijen	49
6.8.	Gesimuleerde cultuur	52
Hoofdstuk 7. Complexiteit: fundamentele concepten		53
7.1	Een relationele ontologie.....	53
7.2	Distincties	54
7.3	Connecties	55
7.4	Orde.....	57
7.5	Wanorde	59
7.6	Complexiteit	61
7.7	Differentiatie en integratie.....	62
7.8	Organisatie.....	63
Hoofdstuk 8. Toestandsruimten.....		65
8.1	Modellen.....	65
8.2	Objecten.....	66
8.3	Eigenschappen	67
8.4	Toestanden.....	68
8.5	Toestandsruimte	70
8.6	Afstandsmaat*	71
	Dynamische systemen.....	73
Hoofdstuk 9. Informatie en Entropie.....		76
9.1	Inleiding.....	76
9.2	Variëteit	77
9.3	Dwang	78
9.4	Entropie	80
9.5	Informatie	83
9.6	Beperkingen.....	86
Hoofdstuk 10. Variatie- en Selectieprincipes.....		87
10.1	Dynamica van distincties.....	87
10.2	Variatie zonder selectie: drift.....	89
10.3	De tweede wet van de thermodynamica.....	91
10.4	Selectie door asymmetrische voorkeur.....	94
10.5	Orde uit de chaos.....	97
10.6	Het stapsteenprincipe	100
10.7	Exaptatie en de paradox van de irreduciebele complexiteit.....	105
Hoofdstuk 11. Fitness.....		109
11.1	Recapitulatie: variatie en selectie.....	109
11.2	De tautologie van de natuurlijke selectie.....	109
11.3	Definitie van fitness	111
	Dimensies van fitness	112
11.4	Fitnesslandschappen.....	116
11.5	Lokale en globale maxima.....	118
11.6	Attractoren en bassins*.....	120

Hoofdstuk 12. Systeembenadering van de evolutie	123
12.1 Inleiding.....	123
12.2 Sequentiële ↔ parallelle variatie en selectie.....	123
12.3 Interne ↔ externe variatie	126
12.4 Interne ↔ externe selectie	126
12.5 Veralgemeende evolutietheorie	127
Hoofdstuk 13. Supersysteemtransities	129
13.1 Hoe leidt evolutie tot complexere systemen?	129
13.2 Interacties.....	129
13.3 Bindingen.....	130
13.4 Systeem als dwang op subsystemen.....	131
13.5 Sluiting*.....	133
13.6 Selectie van stabiele combinaties.....	134
13.7 Hiërarchische architectuur	135
13.8 Bijna decomposeerbare systemen	137
13.9 Besluit: toename van de structurele complexiteit	137
Hoofdstuk 14. Metasysteemtransities	139
14.1 Aanpassingsvermogen.....	139
14.2 Metasystemen	140
14.3 Hiërarchieën van metasystemen.....	141
14.4 Metasysteemhiërarchie van Turchin	143
14.5 Het ontstaan van het leven*	146
14.6 Oorsprong van controle*	148
Hoofdstuk 15. Besluit: het evolutionair-systemische wereldbeeld.....	151
15.1 Ontologie	151
15.2 Epistemologie	152
15.3 Ethiek.....	153
15.4 Antwoorden op de fundamentele vragen.....	155
Literatuur	162
Werken voor een breed publiek.....	162
Meer technische werken.....	164
Index	167

Hoofdstuk 1. Wereldbeelden

1.1. Fundamentele filosofische vragen

De mens heeft zich sinds eeuwen een aantal fundamentele vragen gesteld over zijn bestaan en positie in het universum. Dit zijn in essentie variaties op het eeuwige “waarom?”:

- Waarom is het universum zoals het is, en niet anders?
- Waar komt alles vandaan?
- Wie zijn wij ?
- Waar komen wij vandaan?
- Waar gaan wij naartoe?
- Wat is de zin van het leven?

In een meer moderne, wetenschappelijke terminologie zouden we deze vraagstelling kunnen samenvatten als: hoe en waarom ontstaan complexe, en in het bijzonder doelgerichte, systemen, zoals levende wezens, mens en maatschappij? En in welke richting gaat hun verdere evolutie? Zoals we verder zullen zien, hangen deze vragen verder ook samen met de klassieke vragen die de traditionele domeinen van de filosofie afbakenen:

- Wat is? (ontologie, metafysica)
- Wat is waar en wat is onwaar? (epistemologie, kennistheorie)
- Wat is goed en wat is kwaad? (ethiek, axiologie)

De antwoorden op al deze vragen tezamen bepalen een **wereldbeeld**, dit wil zeggen een allesomvattend filosofisch systeem, een samenhangende visie op het geheel, zoals gedefinieerd door de bekende wijsgeer Leo Apostel en zijn medewerkers in hun boek “Wereldbeelden: van fragmentatie tot integratie” (zie bibliografie). Een wereldbeeld geeft betekenis aan onze handelingen, en biedt ons een leidraad om de wereld rondom ons te begrijpen. Een samenhangend wereldbeeld is bijzonder belangrijk in het huidige tijdperk van steeds snellere wetenschappelijke, culturele en sociale ontwikkelingen, waarin alle oude zekerheden in vraag worden gesteld. De verwarring en fragmentatie die hiermee gepaard gaat, leidt dikwijls tot pessimisme en onzekerheid, en de behoefte aan een psychologische houvast in de vorm van een gemakkelijk te vatten denkkader.

Spijtig genoeg wordt zulk kader maar al te vaak gevonden in fundamentalistische ideologieën of in irrationele geloven en bijgeloven. De wetenschap zou ons wapen bij uitstek moeten zijn in de strijd tegen irrationaliteit en fundamentalisme. Helaas

lijkt de huidige wetenschap echter meer bij te dragen tot de verwarring door de stortvloed aan dikwijls tegenstrijdige observaties en theorieën waarmee ze ons overlaadt. Een van de belangrijkste oorzaken daarvan is de neiging van klassieke wetenschap om alle problemen te analyseren in deelproblemen, die op hun beurt gereduceerd worden tot nog meer gespecialiseerde deelproblemen, enzovoort. Het resultaat is een overvloed aan zeer gespecialiseerde informatie waaraan elke samenhang lijkt te ontbreken.

Nochtans zijn er in de moderne wetenschap ook tegengestelde tendensen, die proberen om de verschillende disciplines en specialisaties weer te integreren. De drijvende krachten hierachter zijn de concepten van (complex) *systeem* en van *evolutie*. Het idee van systeem benadrukt dat elementen niet op zich staan maar een coherent geheel vormen. Het idee van evolutie merkt op dat de verschillende systemen een gemeenschappelijke oorsprong en dynamiek hebben. Deze ideeën worden in dit boek in detail ontwikkeld in de vorm van een **evolutionair-systemisch** wereldbeeld, dat in staat is de fundamentele vragen aan te pakken. Inderdaad, al deze vragen kunnen herleid worden tot vragen over het ontstaan en de verdere evolutie van systemen: atomen, moleculen, sterrenstelsels, cellen, planten, dieren, mensen, hersenen, maatschappijen, beschavingen, enz.

Een aantal min of meer recent ontwikkelde wetenschappelijke inzichten laten ons toe antwoorden op deze vragen te geven. Deze antwoorden zijn soms zeer abstract en algemeen, soms meer gedetailleerd. Ze kunnen in principe in wiskundige vorm geformuleerd worden, hoewel dat in de praktijk niet altijd zinvol is. Deze wetenschappelijke fundering maakt ze tot meer dan alleen filosofische bespiegelingen: ze leiden immers ook tot concrete waarnemingen (bijvoorbeeld van levende wezens of maatschappelijke ontwikkelingen) en toepassingen (bijvoorbeeld computersystemen voor complexe probleemoplossing, of het ontwerp en management van organisaties).

De volgende secties behandelen in het kort de historische ontwikkeling van wereldbeelden.

1.2. De religieuze wereldbeelden

De eerste wereldbeelden, van prehistorische beschavingen tot en met de Middeleeuwen, kunnen gevat worden onder de noemer “religieus”. Hun antwoord op de vraag “waarom?” is simpel: omdat God of de goden het zo gewild hebben. De goden worden hier gezien als gepersonaliseerde krachten met eigen doelen en voorkeuren, eerder dan als onpersoonlijke, natuurlijke mechanismen. Voor elk verschijnsel in de natuur (bijvoorbeeld de bliksem, de seizoenen) of de maatschappij (bijvoorbeeld een hongersnood, een overwinning in de oorlog) is de verklaring steeds een goddelijke interventie.

Toegepast op het ontstaan van complexe systemen werd deze verklaring het duidelijkst geformuleerd door de 18e eeuwse theoloog, Bisschop Paley, in zijn befaamde parabel van de uurwerkmaker. Veronderstel dat je al wandelend een complex, georganiseerd systeem vindt, zoals een uurwerk. Waar komt het vandaan? Dit kan daar niet zo maar toevallig ontstaan zijn, zoals een rots of een hoopje zand. Gezien het duidelijk op een knappe manier in elkaar gestoken is, moet het ontworpen of gebouwd zijn door een intelligent wezen: in dit geval door een *uurwerkmaker*. De verschillende levende wezens rondom ons zijn zulke systemen, dus moeten ze ontworpen zijn door een intelligent persoon: *God*.

Het probleem met zulke verklaring is echter dat ze geen echte verklaring is: we weten immers nog steeds niet waarom God de dingen precies op die manier in elkaar gestoken heeft. We weten ook niet wie of wat God dan wel gecreëerd heeft. Bovendien heeft deze verklaring geen enkele voorspellende kracht, gezien per definitie niemand de intenties van God kan doorgronden, en dus kan te weten komen wat deze nu van plan is.

1.3. Het Newtoniaanse wereldbeeld

Gedurende de Renaissance en de daaropvolgende periode van de Verlichting werden puur religieuze verklaringen langzaam aan vervangen door wetenschappelijke verklaringen. Dit culmineerde in de 19e eeuw in een nieuw omvattend wereldbeeld, dat we **Newtoniaans** of mechanistisch zullen noemen, omdat het gebaseerd is op de theorie van de klassieke mechanica waarvan de basisprincipes geformuleerd werden door de natuurkundige Isaac Newton.

Het Newtoniaans beeld kan nog best samengevat worden als het **uurwerkuniversum**: het heelal loopt zoals een mechanisch uurwerk. Alle radertjes passen perfect ineen. Het uurwerkmechanisme loopt volmaakt regelmatig en voorspelbaar, en valt nooit stil. De inspiratie voor dit beeld komt van de beweging van de planeten rondom de zon, die inderdaad uiterst regelmatig en voorspelbaar is. God heeft dit “uurwerk” wellicht ooit gebouwd en in gang gezet, maar houdt er zich hoe dan ook nu niet meer mee bezig. Goddelijke interventie is dus niet langer nodig om specifieke verschijnselen te verklaren.

Dit nieuwe inzicht kan geïllustreerd worden aan de hand van een befaamde anecdote over de wiskundige Laplace—naast Newton een van de belangrijkste grondleggers van het mechanistische wereldbeeld. Toen Laplace zijn theorie over de werking van het heelal uiteenzette aan Napoleon Bonaparte vroeg deze laatste hem wat de rol van God was in deze constructie. Laplace antwoordde simpelweg: “Ik heb geen behoefte aan deze hypothese”.

Anderzijds wordt het belang van dit inzicht geïllustreerd door de verschillende wegen van de Westerse en de Islamitische wetenschap. Hoewel de Islamitische wetenschap in de vroege middeleeuwen ver vooruit was op die in Europa is haar

ontwikkeling rond de 11e-12e eeuw stilgevallen. Een plausibele verklaring hiervoor is de theologische doctrine van het “occasionalisme” die op dat ogenblik dominant werd binnen de Arabische wereld. Volgens deze filosofie intervenueert God op elk ogenblik in elk proces, en zal een oorzaak tot een gevolg leiden enkel omdat God dit zo gewild heeft. Als men deze filosofie letterlijk neemt, dan heeft het geen zin meer om te zoeken naar wetenschappelijke wetten: God doet immers toch waar Hij zin in heeft, en maakt op die manier elke menselijke voorspelling onbetrouwbaar...

De oorsprong van de Newtoniaanse wetenschap kan dan weer gezocht worden in de vrijmetselarij. Deze lag aan de basis van het allereerste wetenschappelijke genootschap, de Royal Society of London, opgericht in 1660, waarvan Newton lid en later (1703-1727) ook voorzitter was. De vrijmetselaars zagen God als de Opperbouwmeester of “Grote Architect” van het heelal. Dit impliceert dat God de wereld volgens rationele, geometrische principes heeft ontworpen, en eenmaal de wereld geschapen hoeft Hij daar niet meer in tussen te komen. Het bouwplan dat God daarbij gebruikt heeft, is in principe kenbaar dankzij wetenschappelijke waarnemingen en redeneringen. Het kan geformuleerd worden in een wiskundige vorm, zoals Newton dat gedaan heeft in zijn meest befaamde werk, “*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*” (wiskundige principes van de natuurfilosofie).

De invloed van dit mechanistische wereldbeeld op de moderne maatschappij, in het bijzonder tijdens en na de industriële revolutie, was zo groot dat het door velen nog steeds wordt gezien als “het” wetenschappelijke wereldbeeld. Nochtans is de onderliggende theorie op dit ogenblik bijna volledig achterhaald door 20^e-eeuwse ontwikkelingen, zoals de kwantummechanica, relativiteitstheorie en chaostheorie (zie later). Het biedt nochtans een simpele, logische en coherente visie, die nog steeds van nut is in bepaalde, wel afgebakende gebieden. Laat ons de basisprincipes van dit wereldbeeld even op een rijtje zetten:

- **reductionisme**

Alle verschijnselen of systemen (planeten, levende wezens, maatschappijen, ...) kunnen geanalyseerd of herleid (“gereduceerd”) worden tot hun kleinste componenten: atomen, of (in de meer recente benaderingen) elementaire *deeltjes*. Dit zijn permanente, ondeelbare brokjes materie (*materialisme*). Deze bewegen door de ruimte, voortgestuwd door krachten. Alle veranderingen die we rondom ons waarnemen kunnen herleid worden tot het effect van zulke bewegingen, die niet meer doen dan de componenten van het systeem van plaats te doen verschuiven.

- **determinisme**

Alle beweging, en dus alle verandering, is onderworpen aan de *wetten van de natuur*. Deze wetten zijn absoluut en permanent. Als men de krachten, snelheden en posities van de deeltjes op een bepaald ogenblik kent (die tezamen de **toestand** van het systeem definiëren), dan kan men hun bewegingen *volledig voorspellen* door

deze wetten toe te passen. Er is dus geen onzekerheid over wat er in de toekomst zal gebeuren: alles is van te voren bepaald (“gedetermineerd”). Er is ook geen vrijheid om de loop der gebeurtenissen te veranderen of te beïnvloeden.

Als we de toestand s beschrijven in functie van de tijd t , dan volgt het systeem een curve of **baan** in de ruimte van de toestanden (zie hoofdstuk 8). Het volstaat de toestand in het heden te kennen ($t = 0$), om de toestand op alle latere tijdstippen ($s(t > 0)$) te bepalen.

- **reversibiliteit**

Men kan de banen niet alleen doortrekken naar de toekomst ($t > 0$) maar ook naar het verleden ($t < 0$), en dus de toestand van het systeem bepalen op om het even welk tijdstip in het verleden. Elke beweging is omkeerbaar (reversibel). In zekere zin is er geen echt verschil tussen toekomst, heden en verleden. Er is ook geen *voortgang* of evolutie, want verandering heeft geen voorkeursrichting: elke beweging had even goed in de omgekeerde zin kunnen plaatsvinden. Bijvoorbeeld een planeet kan rond de zon draaien in wijzerzin of in tegenwijzerzin, een kanonskogel kan van links naar rechts geschoten worden of van rechts naar links: voor de Newtoniaanse natuurwetten zijn beide mogelijkheden gelijkwaardig.

Tekortkomingen

Hoewel meer diepgaand en meer praktisch dan het religieuze wereldbeeld, biedt het Newtoniaanse nog steeds geen volledige verklaring: de fundamentele elementen (ruimte, tijd, deeltjes, krachten, wetten) worden immers *a priori* gepostuleerd, zonder echte motivatie. Dit wereldbeeld biedt geen plaats voor doelgerichtheid, waarde, of zin: alles wordt herleid tot doelloze mechanismen. Er is ook geen ruimte voor creativiteit, nieuwe fenomenen, of verrassingen.

In de praktijk werkt deze reductionistische benadering alleen voor eenvoudige mechanische verschijnselen: de banen van kanonskogels, biljartballen, of planeten rond de zon, ... Meer complexe systemen, zoals levende wezens, mensen, of maatschappijen, worden niet verklaard. Zoals aangetoond door de kwantummechanica, is het zelfs voor de meest eenvoudige fenomenen, zoals atomen en deeltjes, tekort geschoten. Deze zijn immers onderworpen aan het onzekerheidsprincipe van Heisenberg, dat stelt dat bewegingen van microscopische deeltjes intrinsiek onvoorspelbaar zijn. In conclusie is het Newtoniaans wereldbeeld totaal onbevredigend om leven, mens, of maatschappij te verklaren, hoewel het ons helpt om bepaalde fysische deelaspecten (bijvoorbeeld het effect van zwaartekracht op ons lichaam) te begrijpen.

1.4. Het evolutionair-systemische wereldbeeld

Sinds het midden van de 19e eeuw met de evolutietheorie, maar vooral sinds het midden van de 20e eeuw met de cybernetica, systeemtheorie en zelforganisatie, zien we de eerste tekenen verschijnen van een nieuw wereldbeeld, dat de tekortkomingen van het Newtoniaanse opheft. Laat ons in het kort de innovaties van dit evolutionair-systemische wereldbeeld (ESW) op een rijtje zetten, om deze dan in de rest van het boek in meer detail te gaan analyseren en motiveren.

In het ESW is er niet langer nood aan God als schepper van het heelal. Complexe organisatie ontstaat immers *spontaan*, door toevallige combinaties van elementen, zonder te moeten beroep doen op een intelligente ontwerper of “uurwerkmaker”. Wat telt, is natuurlijke selectie: welke combinaties zullen blijven bestaan en welke niet? Dit is in het algemeen niet bij voorhand vastgelegd, maar afhankelijk van toevallige, onvoorspelbare factoren. De mens is daarom vrij om zijn eigen keuzen te maken: er is immers geen determinisme of voorbeschiktheid. Er is ook geen sturing, beloning of bestraffing van hogerhand (God). Deze keuzen moeten echter leefbaar zijn, anders wordt ook de mensheid weggeselecteerd.

Dankzij de evolutietheorie kunnen we het ontstaan van alle complexe fenomenen verklaren door evolutie uit vroegere, in het algemeen meer eenvoudige, systemen. Bijvoorbeeld, bacterie-achtige cellen evolueerden uit chemische cycli, complexe cellen uit bacteriën, meercelligen uit complexe cellen, complexe dieren uit eenvoudige, mensen uit dieren, maatschappijen uit groepjes mensen. De postmodernistische filosofen hebben het “einde der grote verhalen” aangekondigd, waarmee zij bedoelen dat alle verklaringsmodellen, wetenschappelijk of religieus, relatief zijn. Volgens het ESW is er wel degelijk een verhaal of een ontstaansgeschiedenis: het is alleen veel omvattender en ingewikkelder dan de traditionele mythen.

Het ESW is intrinsiek samenhangend. Er zijn geen strikt gescheiden verschijnselen of categorieën, zoals materie en geest, of ruimte en tijd: elk fenomeen is immers verbonden met andere fenomenen, en komt uit andere fenomenen voort. Deze interacties maken het geheel tot meer dan de som van de delen. Er is continuïteit tussen mens, dier, plant en mineraal.

De ESW visie is fundamenteel optimistisch. De essentie is zelforganisatie, of de spontane ontwikkeling van meer complexe en beter aangepaste systemen. Fouten of slechte ontwikkelingen blijven niet duren, want ze worden geëlimineerd door de natuurlijke selectie. De “natuur” is creatief en vindt vroeg of laat altijd een oplossing. Zelfs als men de dingen aan hun lot overlaat, komt het vroeg of laat toch goed (hoewel het uiteraard beter is vroeg in te grijpen dan laat). Ook in de maatschappij is er een duidelijke trend naar vooruitgang. Er is echter geen ultiem doel of eindpunt voor deze evolutie: alles kan steeds beter.

Hoewel evolutie onvoorspelbaar is, heeft ze een voorkeursrichting: toegenomen “fitness” (zie verder). Dit kan ons helpen onze toekomst te begrijpen en te sturen, en om keuzen te vermijden die niet leefbaar zijn. Fitness is geen doel maar een impliciete waarde van alle leven en materie. Deze geeft in zekere mate “zin” aan het leven.

We zullen nu de historische ontwikkeling van het evolutionair-systemische wereldbeeld schetsen, door de kernideeën te introduceren van elk van de complementaire ontwikkelingen die aan de basis liggen van het ESW: Evolutietheorie, Zelforganisatie en Chaostheorie, Systeemtheorie, Cybernetica, en Complexe Adaptieve Systemen.

Hoofdstuk 2. Evolutietheorie

2.1. Darwin en de oorsprong van de soorten

In het religieuze wereldbeeld (en impliciet ook in het Newtoniaanse) ging men ervan uit dat de soorten waarin planten en dieren worden opgedeeld onveranderlijk zijn: de nakomelingen en afstammelingen van katten zijn steeds katten—geen honden of koeien—en hun voorouders moeten dus ook katten geweest zijn. Katten kunnen dus niet geëvolueerd zijn uit een andere soort dieren, zoals bijvoorbeeld tijgers. God heeft de verschillende soorten geschapen zoals ze nu zijn, en zo zullen ze ook blijven.

Deze aanname kwam onder druk te staan toen paleontologen fossielen van niet langer bestaande diersoorten terugvonden in oude geologische lagen. Daarbij bleek dat hoe ouder (dieper) de laag, hoe “primitiever” (eenvoudiger) de fossielen. Dit zette biologen ertoe aan om na te denken welke mechanismen verantwoordelijk zouden kunnen zijn voor deze ontwikkeling van simpele naar complexe soorten. Van de verschillende verklaringen was het tenslotte de theorie van evolutie door natuurlijke selectie, ontdekt door Charles Darwin, die het meest aannemelijk bleek.

Deze theorie was aanvankelijk heel controversieel, gezien ze in tegenspraak was met het religieuze wereldbeeld, en de Bijbel die stelt dat God mensen en dieren op één dag creëerde. De angst voor deze controversie bracht Darwin ertoe om decennia te wachten met de publicatie van zijn theorie, tot zijn collega Wallace met een gelijkaardig idee op de proppen kwam en dreigde hiermee Darwin’s primeur af te snoepen. Ook na de publicatie hield Darwin zich zo veel mogelijk afzijdig van de discussie en liet het aan anderen, zoals Huxley, over om de verdediging van zijn theorie op zich te nemen. Hoewel we ons dergelijke emotioneel geladen discussie nog moeilijk kunnen voorstellen, blijft de evolutietheorie nog steeds anathema voor bepaalde groepen fundamentalistische christenen en moslims, de zgn. “creationisten”, die het Scheppingsverhaal letterlijk nemen. Dit is vooral een probleem in de USA, waar volgens statistieken meer dan de helft van de bevolking een vorm van creationisme aanhangt en slechts een derde in de evolutietheorie gelooft. (De katholieke kerk daarentegen heeft intussen de evolutietheorie officieel aanvaard als zijnde wetenschappelijk onderbouwd.)

Deze creationisten zijn heel gedreven (en soms heel creatief) in het formuleren van argumenten om de evolutietheorie te weerleggen, hoewel deze argumenten bij nader inzien simplistisch en misleidend blijken. Zo wordt bijvoorbeeld de aanwezigheid van eenvoudiger organismen in diepere lagen verklaard vanuit het Bijbels verhaal over de zondvloed: toen het water begon te wassen waren de primitieve dieren de eerste om te verdrinken, terwijl de meer gesofisticeerde slim

genoeg waren om hun heil te zoeken in hoger gelegen land dat pas later overstroomde. Het hoeft geen betoog dat dergelijke verklaring bij evolutionaire biologen vooral op de lachspieren werkt...

De theorie van Darwin stuit ook nog steeds op onbegrip bij vele, al dan niet religieus of filosofisch geïnspireerde, personen, die niet kunnen aanvaarden dat blinde, onpersoonlijke mechanismen tot functionele organisatie kunnen leiden. Sommigen hiervan hebben wetenschappelijk proberen aan te tonen dat de complexe systemen die we rondom ons zien niet kunnen geëvolueerd zijn volgens Darwinistische mechanismen, omdat de waarschijnlijkheid dat zulk proces tot een goed einde zou komen veel te klein zou zijn. Deze benadering heeft recent geleid tot een meer gesofisticeerde variant op het creationisme, de zogenaamde “intelligent design” theorie, die stelt dat een ongespecificeerde intelligente kracht op tijd en stond heeft ingegrepen om de evolutie in goede banen te leiden. We zullen dit argument later in detail analyseren.

Ook vele progressieve denkers en sociale wetenschappers staan kritisch tegenover Darwinistische verklaringen. Dit berust echter grotendeels op een misverstand, waarbij de evolutietheorie wordt verantwoordelijk gesteld voor de voorbijgestreefde ideologie van het “sociaal Darwinisme”. Deze ideologie paste Darwin’s idee van de “overleving van de sterkste” (*survival of the fittest*) toe op de maatschappij, om aldus een vergoelijking te vinden voor een klassenmaatschappij waarin de armen of de gehandicapten aan hun lot worden overgelaten. Meer recente toepassingen van de evolutietheorie vinden echter integendeel dat sociale systemen moeten evolueren naar meer onderlinge hulp en solidariteit om succes te hebben, zoals we verder in detail zullen aantonen.

Binnen de natuurwetenschappen is de evolutietheorie algemeen aanvaard, hoewel sommige wetenschappers de kanttekening maken dat we ook rekening moeten houden met andere mechanismen, zoals zelforganisatie en symbiose, naast natuurlijke selectie. We zullen ook deze kritiek in latere hoofdstukken uitdiepen.

2.2. Hoe werkt evolutie?

Darwins inspiratie voor zijn theorie van de natuurlijke selectie kwam van de manier waarop tuinbouwers of fokkers nieuwe rassen of variëteiten van planten en dieren kweken. Er bestaan bijvoorbeeld honderden hondenrassen, van de minuscule Chihuahua tot de reusachtige Ierse Wolfshond, en van de logge, samengedrukte bulldog, tot de slanke, elegante windhond, die allemaal afstammelingen zijn van eenzelfde wolfachtige basisvorm. Als een kweker een ras met een speciaal kenmerk (bijvoorbeeld niet blaffen) wil creëren, dan vertrekt hij van een bestaande groep honden, en selecteert daaruit degene die het kenmerk het dichtst benadert (die het minst geneigd zijn om te blaffen). Van de nakomelingen van deze eerste generatie

zullen sommigen wat meer blaffen, andere wat minder. De fokker selecteert opnieuw degene die minst blaffen, en laat deze een nieuwe generatie nakomelingen voortbrengen. Hieruit selecteert hij weer degene die het minst blaffen, enzovoort. Na ettelijke generaties zal hij tenslotte een groep dieren hebben die nooit blaffen. De verdere afstammelingen van deze groep zullen normaal gezien de neiging om niet te blaffen van hun voorouders erven. Aldus is een nieuw, niet-blaffend hondenras ontstaan.

Het geniale idee van Darwin was om dit mechanisme van “artificiële” selectie te veralgemenen tot een situatie waar er geen kweker voorhanden is om bepaalde kenmerken eruit te pikken. Darwin merkte op dat er in de natuur ook selectie is: in het algemeen brengt een organisme veel meer nakomelingen voort dan in de gegeven omgeving kunnen overleven. Er is immers altijd een beperkte hoeveelheid voedsel, en er zijn tal van ziekten, roofdieren en andere gevaren. De meeste organismen sterven dan ook voor zij de kans gekregen hebben om zelf nakomelingen voort te brengen. Degene die hier wel in slagen zijn geselecteerd uit de initiële groep, de andere zijn geëlimineerd. Die selectie gebeurt spontaan, door de “natuur”, en daarom heet dit mechanisme **natuurlijke selectie**. De natuur selecteert echter niet voor een specifiek kenmerk, zoals niet blaffen, maar voor de algemene capaciteit om te overleven en zich voort te planten—wat we later “**fitness**” zullen noemen. Deze capaciteit zal afhangen van de specifieke omgeving, en zal in verschillende omgevingen verschillende kenmerken vereisen.

Laat mij dit illustreren met het klassieke probleem: hoe komt het dat giraffen zulke lange nek hebben? Laten we vertrekken van een voorouder van de giraf, een soort antilooptachtig dier dat nog een korte nek had. De nakomelingen van deze proto-giraf hebben allemaal lichtjes verschillende genen, elk een unieke combinatie van de genen die van ze vader en moeder geërfd hebben. Sommige van die genen geven aanleiding tot een iets langere nek dan andere. Giraffen met een langere nek kunnen de bladeren eten van hogere bomen, en hebben dus meer voedsel tot hun beschikking. In tijden van schaarste, waar bijna alle bomen kaalgevreten zijn, zullen enkel die nakomelingen met de langste nek aan voldoende voedsel geraken en dus overleven. Hun nakomelingen erven de genen voor een lange nek, maar opnieuw met kleine variaties tussen de verschillende kinderen van een gegeven ouderpaar. Hiervan zullen opnieuw die met de genen voor de langste nek de grootste kans hebben om te overleven. Aldus worden opeenvolgende generaties geselecteerd voor een steeds langere nek.

Laat ons nu echter veronderstellen dat sommige van deze proto-giraffen uitgezwermd zijn naar een omgeving waar geen bomen groeien, maar enkel lage struiken. In deze omgeving heeft een lange nek geen voordeel, integendeel. Natuurlijke selectie zal hier eerder leiden naar het vermogen om “laag bij de grond” te eten. Deze groep proto-giraffen zal dus evolueren naar een variëteit met korte nek en poten, en gaandeweg steeds meer beginnen te verschillen van hun neven met een lange nek. Na enkele honderden generaties zal het verschil zodanig groot

geworden zijn dat we de twee variëteiten als twee soorten gaan onderscheiden, die vanwege het verschil in lichaamsbouw niet meer met elkaar kunnen paren, en dus geen “kruisingen” of intermediaire vormen kunnen voortbrengen. Op die manier ontstaan aparte soorten, elk aangepast aan zijn eigen omgeving.

Laten we uit deze voorbeelden nu het algemene mechanisme afleiden:

- probeer blindelings allerlei variaties op een bepaalde basisvorm uit
- elimineer de variaties die minder goed werken of slecht aangepast zijn (fouten)
- behoud en/of reproduceer degene die beter werken
- begin opnieuw

Deze zichzelf herhalende “trial-and-error” procedure (“algoritme”) leidt vanzelf tot een voortdurende, onomkeerbare verbetering, waarbij het systeem zich steeds beter aanpast aan de vereisten van zijn omgeving. Hiervoor zijn twee essentiële componenten nodig:

- **variatie:** De individuen waaruit geselecteerd wordt moeten verschillend zijn, en bij elke nieuwe generatie moeten nieuwe verschillen naar voren komen. In biologische evolutie wordt deze variaties gegenereerd door mutaties (toevallige fouten in het kopieerproces) in de genen, en door de recombinatie van de genen van vader en moeder.
- **selectie:** De “beste” variaties moeten eruit gepikt worden. Wat “werkt”, blijft behouden. Wat minder goed werkt, wordt geëlimineerd. De mate waarin iets “werkt” of “aangepast” is noemt men **fitness**.

2.3. Het toenemende belang van de evolutionaire benadering

Het idee van evolutie door variatie en selectie is universeel, en beperkt zich niet tot de biologie of de oorsprong van de soorten. Steeds meer wetenschappelijke disciplines zien er het belang en nut van in. In de laatste jaren zou men zelfs kunnen denken dat het Darwinisme een modeverschijnsel is, als het niet was dat de trend zeer diepe wortels heeft. Laat ons enkele voorbeelden schetsen:

- psychologie

Onze denkprocessen en emoties blijken steeds beter verklaard te kunnen worden vanuit de veronderstelling dat ze het resultaat zijn van selectie voor fitness. Bijvoorbeeld de emotie “jaloezie” zorgt ervoor dat mannen hun partner in het oog houden, zodat ze zeker zijn dat de kinderen van hun vrouw ook hun eigen nakomelingen zijn, en niet die van een rivaal. Mannen die deze emotie niet kenden, hadden minder nakomelingen, en dus werden hun genen weggeselecteerd. De

aantrekking van mannen voor vrouwen met lange benen en grote borsten kan dan weer verklaard worden door het feit dat dit tekenen zijn van seksuele rijpheid, en dus van het vermogen om nakomelingen voor te brengen. Jonge meisjes die nog niet geslachtsrijp zijn hebben daarentegen korte benen en platte borsten, wat als minder aantrekkelijk ervaren wordt.

Voor wat betreft denkprocessen blijken mensen dikwijls fouten te maken in logische deducties (“syllogismen”), wat begrijpelijk is gezien de natuurlijke selectie onze hersenen niet op dit soort abstracte redeneringen heeft voorbereid. Indien het syllogisme echter wordt geformuleerd als een sociaal probleem, dan blijkt iedereen onmiddellijk het juiste antwoord te geven. Sociale interacties zijn immers zeer belangrijk voor het overleven in groep, en daarom zijn onze hersenen speciaal aangepast aan de problemen die daarmee samenhangen.

- sociologie

De “sociobiologie” verklaart het ontstaan van sociale systemen vanuit de manier waarop deze bijdragen aan de fitness van hun leden. Bijvoorbeeld, vampiervleermuizen die erin geslaagd zijn veel bloed te zuigen, geven een deel van deze opbrengst door aan minder fortuinlijke collega’s, in de verwachting later ook op hun *wederzijdse hulp* of solidariteit te kunnen rekenen. Aldus lopen de vleermuizen minder risico om van hongersnood te komen wanneer het toevallig eens tegen zit. Mierenkolonies vormen één reusachtige, geïntegreerde maatschappij waarin elke werker bereid is zijn leven te geven voor de kolonie. De reden is dat alle leden van de kolonie kinderen zijn van eenzelfde “koningin”, en dus voor een groot deel dezelfde genen hebben. Deze genen zijn geselecteerd om de ganse “familie” in stand te houden eerder dan een enkel individu. We zullen deze toepassingen op sociale systemen later in meer detail bespreken.

- geneeskunde

Onze vatbaarheid voor, en immuniteit tegen, ziektes kan verklaard worden vanuit de natuurlijke selectie zowel van mensen (die een efficiënt verdedigingsmechanisme nodig hebben om te kunnen overleven) als van ziektekiemen (die zo besmettelijk mogelijk moeten zijn om zich wijd te kunnen reproduceren, maar hun gastheer lang genoeg moeten in leven houden om besmetting van anderen mogelijk te maken). Bijvoorbeeld, de AIDS- en verkoudheidsvirussen zijn zo succesvol omdat ze de geïnfecteerden niet onmiddellijk aan hun bed kluisteren, maar hen de kans geven via contacten met anderen (seks, of niezen in de nabijheid van anderen) het virus te verspreiden. Anderzijds is het weinig waarschijnlijk dat het Ebolavirus wijd zou verspreid raken, omdat geïnfecteerden bijna onmiddellijk doodziek vallen.

Een ander voorbeeld: dioxines zijn uiterst giftig voor proefdieren, maar veel minder voor de mens. Na de Seveso catastrofe in 1976, waarbij een fabrieksexplosie in Italië reusachtige hoeveelheden dioxines had doen vrijkomen, bleek er onder de

mensen in de omgeving geen enkel dodelijk slachtoffer te zijn (hoewel een aantal huidproblemen had opgedaan). Dieren zoals konijnen stierven echter massaal. Een plausibele verklaring is dat mensen reeds sinds honderdduizenden jaren vuur gebruiken, en houtrook bevat nu eenmaal heel wat dioxines. Genen die hier niet tegen bestand waren zijn ondertussen dus weggeselecteerd.

- economie

De concurrentie tussen bedrijven, waarbij de meest succesvolle groeien en nagebootst worden, en de minder succesvolle verdwijnen, vertoont grote analogie met de natuurlijke selectie tussen organismen. De markt speelt hierbij de rol van de omgeving die bepaalt welke bedrijven aangepast zijn aan het spel van vraag en aanbod en welke niet. Nieuwe bedrijfjes met nieuwe ideeën of producten worden voortdurend opgericht, terwijl bestaande bedrijven geregeld nieuwe methoden, diensten of technologieën uittesten (variatie). De meeste nieuwe bedrijven gaan echter vroeg of laat failliet (natuurlijke selectie). De meest succesvolle ondernemers zijn dikwijls degene die een “gat in de markt” (wat we later een **niche** zullen noemen) ontdekt hebben. Dit wil zeggen: een manier om producten of diensten te verkopen waar grote vraag naar is, maar waar voorlopig nog geen concurrenten in actief zijn.

- cultuur

Culturele verschijnsels zoals modes, tradities, wetenschappelijke theorieën en godsdiensten kunnen beschreven worden als ideeën die overgedragen worden van persoon tot persoon. Zulke stukjes informatie die zichzelf “voortplanten” zijn in dat opzicht analoog aan onze genen en worden daarom *memen* genoemd. Memen zijn in een voortdurende concurrentiestrijd gewikkeld: we worden voortdurend blootgesteld aan veel meer informatie dan we kunnen onthouden of doorgeven aan anderen. Slechts een klein percentage van de ideeën die we horen, lezen of zien zullen we onthouden en aan anderen communiceren. Er is dus een sterke natuurlijke selectie van memen. Bovendien zullen we in het algemeen kleine variaties introduceren wanneer we bijvoorbeeld een anecdote, mop of gerucht aan een andere verder vertellen. De combinatie van variatie en selectie leidt ertoe dat memen zich beter en beter aanpassen aan de voorkeuren van de maatschappij.

De meest “fite” memen geraken wijd verspreid en krijgen de tenslotte de status van een legende, traditie, of algemeen aanvaarde kennis—zelfs als ze niet op feiten gebaseerd zijn. Een voorbeeld is het zogenaamde Mozarteffect: het geregeld weer opduikende idee dat je baby intelligenter zou worden als hij regelmatig naar klassieke muziek luistert. Deze “stadslegende” vindt zijn oorsprong in de verkeerde weergave van een experiment waarin *volwassenen* naar muziek luisterden, en onmiddellijk nadien op bepaalde psychologische tests beter bleken te scoren (wellicht gewoon omdat de muziek hen ontspannen had). Van volwassenen is het

een kleine variatie naar kinderen, en van kinderen naar baby's. En gezien ouders nu eenmaal graag horen dat ze door zulke simpele interventie als het opzetten van een Mozart-CD hun baby slimmer zouden kunnen maken, is deze laatste versie zeer populair geworden in kranten en weekbladen. Hierbij citeert de ene journalist de andere, zonder dat iemand zich nog afvraagt wat de wetenschappelijke grond van deze bewering is.

- informatica

Computers kunnen complexe problemen oplossen door willekeurige kandidaat-oplossingen te genereren, hiervan enkel de best over te houden en deze te laten reproduceren. Hierbij wordt variatie geïntroduceerd analoog aan die in biologische evolutie. Elke potentiële oplossing wordt voorgesteld als een keten ("string") van "letters" of "bits", gelijkaardig aan de DNA-ketens die de genetische informatie van een organisme dragen. Tijdens de "voortplanting" worden enkele letters willekeurig vervangen door andere (mutaties). Anderzijds worden de ketens van twee oplossingen (een "ouderpaar") gerecombineerd tot een nieuwe keten, die bijvoorbeeld bestaat uit de eerste helft van de eerste keten gevolgd door de tweede helft van de tweede keten. Dit is het equivalent van seksuele voortplanting. De cyclus wordt herhaald, zodat steeds nieuwe generaties ontstaan, waarvan enkel de beste zich mogen voortplanten. Dit gaat door tot een bevredigende oplossing gevonden is. Deze methode heet *genetische algoritmen*, of *evolutionary computation*. Ze blijkt zeer nuttig te zijn om allerlei praktische problemen op te lossen die te ingewikkeld zijn voor klassieke methoden, zoals het ontwerpen van een "zenuwstelsel" voor een autonome robot, of van een aërodynamische vorm voor een auto.

- scheikunde

Men kan moleculen met specifieke eigenschappen creëren door een variëteit aan kandidaatmoleculen te genereren en hieruit herhaaldelijk de beste te filteren. Dit heeft directe toepassingen in de farmacie: een geneesmiddel is een molecule die een bepaalde biologische functie (bijvoorbeeld pijn of koorts) moet onderdrukken of stimuleren. Dit gebeurt typisch door het opvullen van een "receptor" voor bepaalde signalen in ons lichaam, om alzo het stimuleren van die receptor door bijvoorbeeld hormonen te blokkeren—of juist te vergemakkelijken. Receptoren hebben typisch zeer complexe vormen, wat het moeilijk maakt om een molecule te vinden die als een sleutel precies in dat slot past. Door kandidaatmoleculen in grote getale langs receptoren te laten passeren vinden we automatisch welke aangepast zijn (degene die aan de receptor blijven "kleven") en welke niet (degene die weggespoeld worden). De best aangepaste kunnen tenslotte in grote hoeveelheden aangemaakt worden om dan in pil- of druppelvorm verkocht te worden als nieuw geneesmiddel.

2.4. Wat ontbreekt er nog in de evolutionaire benadering?

Ondanks de vele successen is de Darwinistische benadering op zich nog te beperkt om een echt nieuw wereldbeeld voort te brengen.

Enerzijds is de theorie nog te reductionistisch. Organismen (in Darwin's oorspronkelijke theorie), genen (in de modernere, "neo-Darwinistische" theorie) of memen (in de culturele variant) worden beschouwd als de primitieve elementen of "eenheden van selectie" waartoe alles moet herleid worden. Als gevolg wordt er in het algemeen te weinig aandacht besteed aan de interactie tussen deze eenheden (bijvoorbeeld de symbiose tussen verschillende organismen, of de onderlinge coöperatie tussen genen), of aan de systemen (bijvoorbeeld maatschappijen) die zij tezamen vormen. In plaats daarvan wordt de complexe invloed van een veelheid aan andere eenheden herleid enkel tot de invloed van de "omgeving".

Anderzijds verklaart het Darwinisme niet echt hoe complexiteit ontstaat. Aanpassing of fitness kan immers bereikt worden zowel door heel eenvoudige (virussen, bacteriën...) als door heel ingewikkelde systemen (mensen, maatschappijen...). Toename van fitness impliceert dus niet automatisch toename van complexiteit, en vele biologen, waaronder de paleontoloog Stephen Jay Gould, hebben dan ook betoogd dat de toename van de complexiteit zoals we die in fossielen terugvinden eigenlijk maar een toevallig, "neveneffect" is van variatie en selectie, geen fundamenteel mechanisme. Mijn stelling in dit boek is precies het tegengestelde: evolutie produceert automatisch meer complexiteit, en de gevallen waarin dit niet lijkt te gebeuren (bvb. virussen) zijn uitzondering eerder dan regel.

Om deze problemen fundamenteel aan te pakken moeten we een aantal nieuwe concepten toevoegen aan die van de evolutietheorie, zoals zelforganisatie, emergentie, en co-evolutie. Om deze goed te begrijpen zullen we nu een aantal complementaire benaderingen bestuderen.

Hoofdstuk 3. Zelforganisatie en Chaos

3.1. Introductie

In de natuur vinden we talrijke voorbeelden van het spontaan ontstaan van geordende structuren, zoals bijvoorbeeld zoutkristallen in een oplossing, sneeuwkrystallen in de atmosfeer, of ijsbloemen op een ruit. Hier komt geen intelligente ontwerper of “uurwerkmaker” bij te pas, maar er is ook geen duidelijke invloed van de omgeving, zoals in de evolutietheorie van Darwin. Daarom wordt het fenomeen **zelforganisatie** genoemd.



Wat de zaak nog paradoxaler maakt is de tweede wet van de thermodynamica (zie 10.3), die zegt dat entropie (“wanorde”) van zichzelf alleen maar kan toenemen, niet afnemen. Dit komt ook overeen met onze alledaagse ervaring: als we zelf niet interverniëren neemt de wanorde alleen maar toe: kamers worden vuil en ongeordend, apparaten verslijten of gaan kapot en herstellen zichzelf niet.

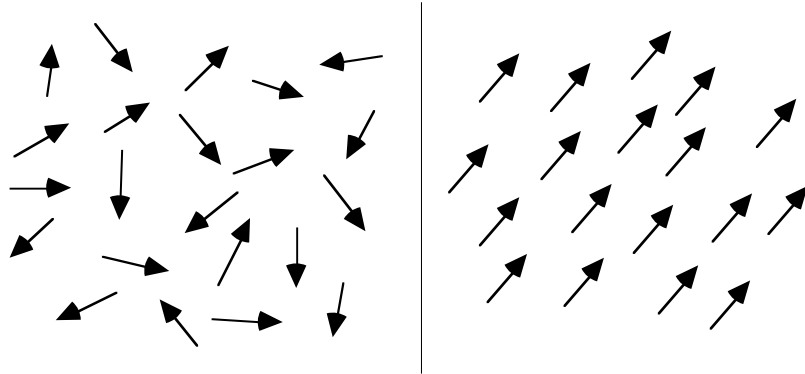
Deze thermodynamische paradox werd meest diepgaand bestudeerd door Ilya Prigogine van de Université Libre de Bruxelles, die hiervoor in 1977 de Nobelprijs scheikunde kreeg. De voornaamste bijdrage van Prigogine en zijn medewerkers—de “Brusselse school” voor complexe systemen—is het concept van **dissipatieve structuren**. Dit zijn vormen van spontane orde of structuur die zichzelf in stand houden door entropie uit te voeren (te “dissiperen”). We zullen nu de inzichten van Prigogine en anderen over zelforganisatie, en het hiermee verwante fenomeen van chaos, illustreren aan de hand van enkele voorbeelden.

3.2. Voorbeelden: magnetisatie en Bénard convectie

- **magnetisatie**

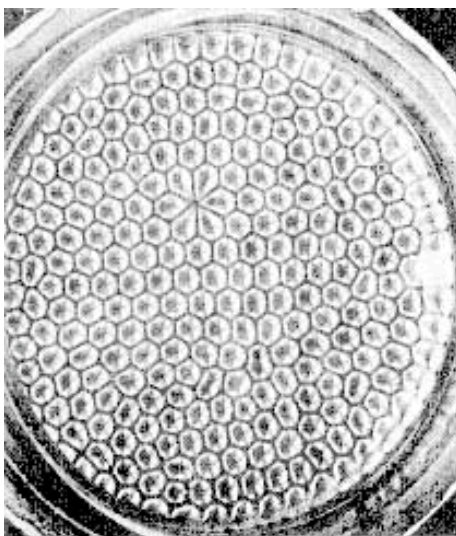
Wellicht het eenvoudigste voorbeeld van zelforganisatie is de magnetisatie van een materiaal zoals ijzer. Men kan magnetisatie verkrijgen door met een magneet over een speld te strijken, waarna de speld zelf magnetisch wordt en in staat om andere spelden aan te trekken. De verklaring is eenvoudig: magnetiseerbaar materiaal bestaat uit moleculen die elk een individueel magnetisch veld hebben, met een welbepaalde richting (aangeduid door een pijl in de tekening hieronder). Deze moleculen kunnen beschouwd worden als minuscule magneetjes. Aanvankelijk

wijzen al deze magneetjes echter in verschillende, willekeurige richtingen (tekening links). Aldus heffen de verschillende magnetische velden of aantrekkingskrachten elkaar op, zodat het totale magnetisme nul is. Wanneer het materiaal gemagnetiseerd wordt, bijvoorbeeld door het te onderwerpen aan een extern magnetisch veld, dan gaan alle magneetjes in dezelfde richting wijzen (tekening rechts), zodat de magnetische velden elkaar versterken, leidend tot een duidelijk waarneembare totale aantrekkingskracht.



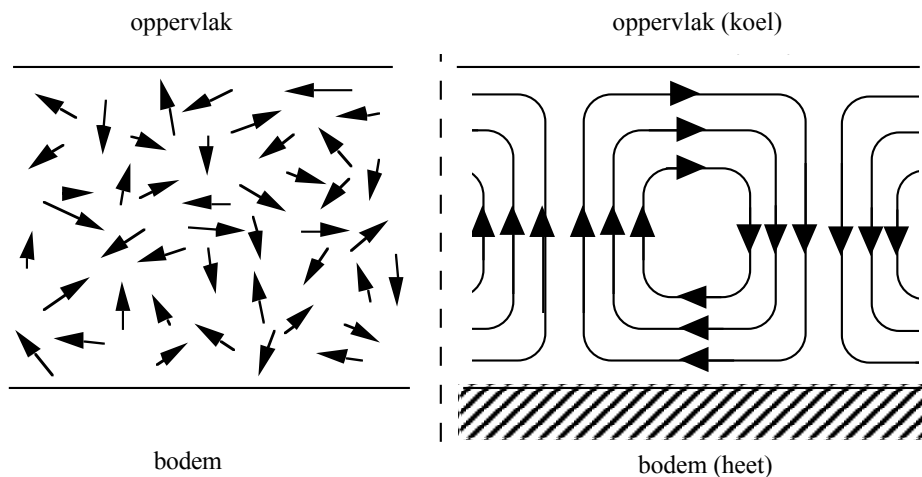
Het interessante is nu dat magnetisatie in bepaalde omstandigheden ook spontaan kan ontstaan, zonder de tussenkomst van een extern veld. Dit is een duidelijk geval van zelforganisatie: de aanvankelijk ongeordende magneetjes (links) gaan zichzelf mooi aligneren (rechts). De reden dat de magneetjes deze geordende configuratie “verkiezen” is dat magneten die in tegengestelde richting wijzen (bijvoorbeeld Noordpool van één magneet tegenover Noordpool van een andere) elkaar afstoten. Enkel wanneer ze allemaal in dezelfde richting wijzen zijn er geen “afstotingsverschijnselen”, en is het systeem in evenwicht.

- **Bénard convectie**



Een iets meer complex verschijnsel is het ontstaan van zogenaamde Bénard cellen of rollen in een vloeistof. De vloeistof wordt van onder gelijkmatig verwarmd (bijvoorbeeld op een elektrische kookplaat), terwijl ze van boven gelijkmatig afkoelt (bijvoorbeeld aan de lucht). (Je kan het experiment proberen na te doen met een vlakke pan waarin je een bodempje olie giet.) Als het temperatuurverschil tussen onder- en bovenkant groot genoeg is, ziet men een honingraatpatroon van zeshoekige

“cellen” (zie foto), of een gestreept patroon van parallelle “rollen” ontstaan in de vloeistof. We zullen hieronder het geval van de rollen bespreken omdat dit het eenvoudigste is.



Zoals het magnetisch materiaal bestaat de vloeistof uit moleculen. Gezien het hier geen vaste stof betreft, zullen de moleculen echter constant ten opzichte van elkaar bewegen. Normaal is deze beweging willekeurig, en elke molecule beweegt in zijn eigen richting, onafhankelijk van de andere (aangeduid door een pijltje in de tekening links). Deze moleculen botsen dan ook voortdurend tegen elkaar, zodat de netto beweging nul is: de vloeistof staat stil.

Wanneer de onderkant nu verwarmd wordt, gaat de vloeistof hier uitzetten en dus lichter worden. De vloeistof aan de bovenkant is kouder en dus zwaarder. De warme vloeistof zal normaal opstijgen en de koude zinken. Hier ontstaat echter een probleem gezien de warme vloeistof zich een weg naar boven tracht te banen terwijl de koude vloeistof op dezelfde plaats naar beneden wil. Dit zal alleen lukken als er een vorm van *coördinatie* optreedt, zodat de twee bewegingen elkaar niet in de weg zitten. Wat we zien gebeuren is dat op een bepaalde plaats alle moleculen een opwaartse beweging zullen maken tot ze aan het oppervlak komen. Daar koelen ze af waarna ze iets verder weer gaan dalen. Op de bodem warmen ze weer op, verschuiven terug naar hun oude plaats en gaan weer stijgen, waarna de cyclus herbegint (zie tekening rechts). Het netto resultaat is de vorming van een soort ronddraaiende stroming of “rol” van gesynchroniseerd bewegende moleculen. De stroming veroorzaakt door temperatuurverschillen noemt men “convectie”. De vloeistof in zijn geheel gaat zich opsplitsen in een reeks parallelle rollen, waarbij een rol die draait in wijzerzin steeds wordt gevolgd door een rol die beweegt in tegenwijzerzin, en vice-versa (zie tekening). Opnieuw herkennen we zelforganisatie: ongecoördineerde moleculen gaan hun bewegingen spontaan ordenen, tot ze allemaal mooi in de maat bewegen.

3.3. Globale ordening

Wanneer we in meer detail willen begrijpen hoe dergelijke systemen tot zelforganisatie komen, dan moeten we vertrekken van de interacties tussen de verschillende componenten (moleculen in deze voorbeelden). Elke molecule

interageert (via zijn magnetisch veld of door botsing) aanvankelijk enkel met de moleculen in zijn onmiddellijke omgeving, en is onafhankelijk van de verder af gelegen moleculen. Door die interacties of andere toevallige bewegingen kan het nu echter gebeuren dat enkele naburige moleculen gealigneerd geraken, dit wil zeggen in dezelfde richting wijzen of bewegen. De andere moleculen in die omgeving zullen nu ook geneigd zijn om zich hieraan te aligneren of aan te passen, om afstoting of botsing te vermijden. Deze zullen op hun beurt de moleculen in hun buurt tot alignatie brengen. Op die manier plant de ordening of alignatie zich voort van molecule tot molecule, tot ze tenslotte het volledige systeem beslaat. Aldus wordt een toevallig ontstane, *lokale* orde gepropageerd doorheen het materiaal tot het tenslotte in een *globale* ordening van alle moleculen resulteert.

Deze ordening beheerst of controleert nu het gedrag van alle componenten: individuele moleculen kunnen zich niet meer veroorloven om tegen de orde in te gaan (bijvoorbeeld naar beneden bewegen als alle anderen in de buurt omhoog gaan, of naar links wijzen als het totale magnetische veld naar rechts wijst), omdat de collectieve invloed van de andere moleculen te sterk is. Deze ordening of beheersing is *collectief*, of *gedistribueerd* over alle componenten: er is geen centrale “leider” of “directeur” die bepaalt wat de andere componenten moeten doen. Alle moleculen dragen in gelijke mate hun steentje bij tot het in stand houden van de organisatie. Een meer complex voorbeeld van dergelijke gedistribueerde organisatie vindt men in de hersenen: de hersenen werken als een geheel; er is geen hersendeel of neuron dat zegt wat de andere delen moeten doen.

Een groot voordeel van dergelijke gedistribueerde ordening is *robuustheid*: het systeem kan tegen een stootje, en zal niet gemakkelijk uit zijn evenwicht gebracht worden. Dit is omdat het systeem *redundant* is: als een component het laat afweten, blijven er genoeg gelijkaardige componenten over om de taak over te nemen. Als bijvoorbeeld een magneetje uit zijn richting wordt geslagen, zal het weer rechtgetrokken worden door de anderen. Beschadiging van een deel van de hersenen, bijvoorbeeld wanneer een tumor weggesneden wordt, laat mensen in staat om toch nog een grotendeels normaal leven te leiden, omdat de andere hersendelen voor de verloren functies invallen. Anderzijds leidt beschadiging van een computer of computerprogramma in het algemeen tot een compleet stilvallen. De reden is dat een computer niet zelforganiserend is, maar afhankelijk van de gedetailleerde instructies van de programmeur. Als daar iets mee mis loopt, kan het systeem zichzelf niet herstellen.

3.4. Niet-lineariteit

In de wiskunde zegt men dat een functie *f* **lineair** is als het resultaat van de functie toegepast op een som gelijk is aan de som van de resultaten voor elk van de componenten:

$$f(a+b) = f(a) + f(b)$$

Hieruit volgt:

$$f(2a) = f(a+a) = f(a) + f(a) = 2f(a)$$

Meer algemeen betekent dit dat als we een component vermenigvuldigen met een willekeurig getal k , dat we het nieuwe resultaat kunnen vinden door simpelweg het oude resultaat te vermenigvuldigen met k :

$$f(k.a) = k.f(a)$$

Toegepast op concrete systemen betekent lineariteit dat het resultaat of gevolg $[f(a)]$ van een proces *proportioneel* is aan de oorzaak $[a]$. Bijvoorbeeld als we een auto tweemaal zo hard duwen (of met twee mensen duwen in plaats van één), dan gaat hij twee maal zo snel vooruit. Dit betekent dat kleine oorzaken noodzakelijk tot kleine gevolgen leiden, en grote tot grote.

In de meeste kwantitatieve modellen (zoals in de mechanica van Newton) probeert men zo veel mogelijk uit te gaan van lineariteit omdat dit de berekeningen gemakkelijker maakt. In de praktijk zijn de meeste systemen, en in het bijzonder de zelforganiserende systemen, echter **niet-lineair**. Dit betekent dat het gevolg sneller of trager toeneemt dan de oorzaak.

In het geval van de magneet bijvoorbeeld kan een kleine fluctuatie (drie of vier magneetjes die zich toevallig aligneren) tot een zeer groot resultaat leiden (het materiaal dat in zijn geheel magnetisch wordt). Omgekeerd kan een grote oorzaak (bijvoorbeeld een zware schok die duizenden magneetjes van richting doet veranderen) tot een onmerkbaar resultaat leiden (omdat de overblijvende gealigneerde magneetjes de anderen weer op hun plaats trekken).

3.5. Chaos

Het geval waarin kleine oorzaken grote gevolgen hebben noemt men *sensitieve afhankelijkheid van de beginvoorwaarden*. De beginvoorwaarden spelen hier de rol van oorzaak, of toestand van het systeem aan het begin van het proces dat men wil bestuderen. Men noemt het systeem sensitief of gevoelig omdat het sterk reageert op de kleinste variatie in die beginvoorwaarden. Met andere woorden, de kleinste, nauwelijks zichtbare fluctuatie kan tot een totaal verschillend resultaat leiden.

Voorbeelden:

- een potlood dat recht op zijn punt staat, zal bijna onmiddellijk naar één kant of een andere naar beneden vallen. De kleinste storing (een zuchtje wind, een onregelmatigheid in het tafelloppervlak, enkele luchtmoleculen meer die er van links tegen aanbotsen dan van rechts) is voldoende om het evenwicht te verbreken en het potlood in een welbepaalde richting te doen overhellen en

vallen. We kunnen echter in het algemeen niet voorspellen welke richting dat zal zijn.

- Een ander klassiek voorbeeld is het befaamde “vlindereffect” (*butterfly effect*). Het systeem van vergelijkingen dat op basis van luchtdruk, temperatuur en windrichting toelaat om het weer te voorspellen is in hoge mate niet-lineair. Daarom is het weer sterk afhankelijk van kleine schommelingen in de beginvoorwaarden, zoals een beetje meer wind hier of daar. In principe kan het fladderen van een vlinder in Tokyo dan ook een orkaan veroorzaken in New York.

Systemen waarvan het gedrag op zulke sensitieve manier afhankelijk is van de kleinste schommelingen noemt men *chaotisch*. Dit betekent dat ze plots zeer sterk kunnen veranderen door een minimale beïnvloeding, en zich dus gedragen op een zeer onregelmatige, onvoorspelbare manier. Voorbeelden hiervan vindt men in de turbulente stromingen aan de voet van een waterval, of het weer, dat van dag tot dag verandert, zonder dat men meer dan een paar dagen op voorhand kan voorspellen hoe het zal veranderen, zelfs met de meest krachtige computers.

Het bestaan van dergelijke niet-lineariteit of **chaos** heeft een belangrijke implicatie voor het Newtoniaanse wereldbeeld: zelfs systemen die in principe deterministisch zijn (dit wil zeggen dat hun verdere evolutie volledig bepaald is door hun begintoestand), zijn in de praktijk fundamenteel *onvoorspelbaar*, gezien we die begintoestand nooit perfect nauwkeurig zullen kunnen vaststellen, en gezien de kleinste fout tot zeer grote afwijkingen kan leiden.

3.6. Systemen ver van het evenwicht

In de thermodynamica heten systemen **gesloten** als ze geen materie of energie met de buitenwereld uitwisselen. Dergelijke systemen evolueren vanzelf naar een evenwichtstoestand van maximale entropie of wanorde (de 2de wet van de thermodynamica, zie 10.3).

Zelforganisatie impliceert de vermindering van wanorde en is dus in principe onmogelijk in een gesloten systeem. Zelforganiserende systemen moeten daarom op zijn minst entropie kwijtraken, wat typisch gebeurt in de vorm van warmte (energie met hoge entropiegraad) die wordt afgegeven aan de omgeving. Zulke uitvoer van entropie noemt men “*dissipatie*”. Eens alle beschikbare energie aldus in de vorm van warmte is afgegeven, valt het systeem stil en bereikt aldus een evenwicht. Dit is wat gebeurt bij magnetisatie zodra alle magneetjes gealigneerd zijn: er is geen verdere beweging meer.

Een andere manier om zelforganisatie mogelijk te maken is om voortdurend energie of materie met een lage graad van entropie in te voeren. (Men kan dit ook beschrijven als de invoer van “negentropie”, dit wil zeggen negatieve entropie, oftewel orde.) Deze wordt door de normale processen binnenin het systeem

omgezet naar hoge entropie, die dan weer moet uitgevoerd worden. Zulke systemen bereiken nooit een thermodynamisch evenwicht gezien ze entropie blijven produceren en exporteren. Daarom noemt men ze “ver-van-het-evenwicht”. Zulke systemen blijven “ bezig”, en vallen niet stil. De dynamische organisatie die hen kenmerkt noemt men een **dissipatieve structuur**.

De Bénard convectie vormt het eenvoudigste voorbeeld: de rollen of cellen vormen een duidelijke organisatie of structuur, maar deze is niet statisch maar gebaseerd op de voortdurende, circulerende beweging van de vloeistof. Energie met lage entropie wordt binnengebracht door de verwarming langs onder. Deze wordt in hoge entropie vorm weer afgegeven of gedissipeerd aan het koelere oppervlak. Andere voorbeelden zijn draaikolken, vlammen, oceaanstromingen (zoals de Golfstroom) en windhozen: dit zijn dynamische structuren die slechts kunnen blijven bestaan door een invoer van energie (zonnewarmte, brandstof, of stromend water). Belangrijker nog, alle levende wezens zijn dissipatieve structuren: ze kunnen immers slechts overleven door een voortdurende opname van materie en energie in de vorm van voedsel, die dan weer wordt uitgescheiden in de vorm van afvalstoffen en warmte.

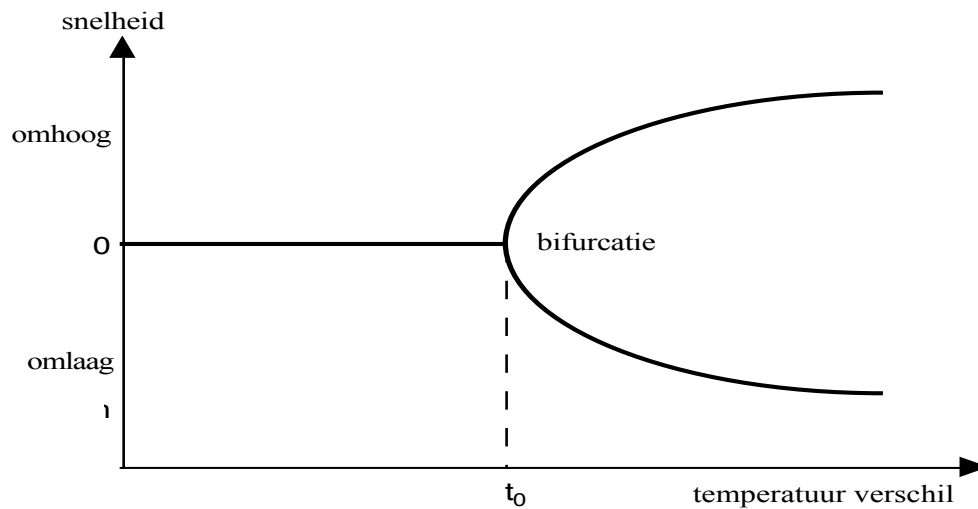
Systemen ver van het evenwicht zijn niet-lineair: de invoer van energie versterkt bepaalde gevolgen, terwijl het verlies (dissipatie) van energie andere gevolgen verzwakt. Dit maakt het systeem in het algemeen onvoorspelbaar of chaotisch: hoe verder van het evenwicht (hoe meer energie geïnjecteerd wordt), hoe chaotischer. Dit is eenvoudig waar te nemen bij een waterkraan: hoe meer men de kraan openzet, hoe sneller het water naar beneden geperst wordt, hoe meer energie de beweging heeft, maar dus hoe onregelmatiger of turbulenter de stroming wordt.

3.7. Bifurcaties*

Voor niet lineaire systemen bestaat er in het algemeen meer dan één mogelijke oplossing van het stelsel vergelijkingen dat het systeem beschrijft. Dit betekent dat er meer dan één stabiele situatie of “stationaire toestand” is waarin het systeem kan terechtkomen. Hoe verder van het evenwicht, hoe meer mogelijke oplossingen. Het verschijnen van zulke keuzemogelijkheid wanneer het systeem verder van het evenwicht geraakt noemt men een *bifurcatie*.

Voorbeeld: Bénardrollen: aanvankelijk, als het temperatuurverschil tussen boven- en onderkant nog klein is (dicht bij het evenwicht) blijft de vloeistof onbeweeglijk. Als het temperatuurverschil toeneemt, dan zullen plots de rollen ontstaan. Voor een gegeven rol zijn er echter 2 mogelijke draairichtingen, namelijk wijzerzin of tegenwijzerzin. Dit wil zeggen dat op een gegeven plaats de vloeistof moet “beslissen” of ze nu gaat beginnen op te stijgen of te dalen. Het systeem heeft geen a priori voorkeur, maar moet toch kiezen. De uiteindelijke “keuze” hangt af van toevallige factoren. Deze zijn in het algemeen te klein om waargenomen te worden,

en daarom is het resultaat (het pad dat het systeem kiest wanneer het op de splitsing of bifurcatiepunt komt) onvoorspelbaar.



Hoe verder van het evenwicht het systeem geraakt, hoe meer bifurcaties het ondergaat, en dus hoe meer keuzemogelijkheden het krijgt. Complete chaos ontstaat wanneer er een oneindig aantal keuzemogelijkheden is, en het systeem voortdurend en op een onvoorspelbare wijze van de ene naar de andere overspringt. Dergelijke turbulentie ontstaat wanneer de verwarming onder de Bénardrollen alsmaar verder opgevoerd wordt, tot de vloeistof begint te koken.

Hoofdstuk 4. Systeemtheorie

4.1. Holisme en emergentie

Een fundamenteel probleem van de theorieën van zowel zelforganisatie als evolutie is dat ze eigenlijk niet uitleggen wat organisatie of complexiteit nu juist is. De reden van deze tekortkoming is dat ze impliciet nog steeds uitgaan van de reductionistische benadering, volgens dewelke elk verschijnsel kan herleid worden tot zijn kleinste, materiële componenten: elementaire deeltjes. Per definitie zijn deeltjes niet complex, en vertonen dus ook geen organisatie. De organisatie die wij zien, lijkt dan niet meer dan een oppervlakteverschijnsel waarvoor in het Newtoniaans wereldbeeld geen plaats is.

Om dit probleem op te vangen zullen we nu twee nauw verwante benaderingen introduceren, de systeemtheorie en de cybernetica, die zich beide gebogen hebben over organisatie, zij het vanuit complementaire hoeken. Tegenover het reductionisme plaatst de systeemtheorie het **holisme**, dat de nadruk legt op het *geheel* eerder dan op de *delen*. Met andere woorden de samenhang is belangrijker dan de individuele componenten.

De eenvoudigste manier om dit uit te drukken is de bekende uitspraak: *het geheel is meer dan de som van de delen*. De vraag die zich hierbij echter stelt is *wat* er nu juist meer is. Het antwoord is: **emergentie**. Emergente eigenschappen zijn eigenschappen van een geheel die niet herleidbaar of reducibel zijn tot eigenschappen van de delen. Dit kan best verklaard worden aan de hand van enkele voorbeelden.

Voorbeelden:

- Een auto in zijn geheel heeft de eigenschap dat die kan rijden. Geen enkele van de afzonderlijke onderdelen, zoals carrosserie, wielen, motor of assen, kan echter op zich rijden. Kunnen rijden is dus een emergente eigenschap. Het gewicht van de auto is daarentegen geen emergente eigenschap, gezien het niet meer is dan de som van de gewichten van alle onderdelen.
- Volgens hetzelfde principe kunnen we stellen dat een dier de eigenschap “leven” heeft. De verschillende moleculen waaruit dat beest bestaat op zich zijn echter dode materie.
- Keukenzout heeft de eigenschappen van kristallen te vormen, eetbaar te zijn, en een zoute smaak te hebben. Keukenzout (in scheikunde bekend als Natrium Chloride) is een verbinding van de elementen Natrium (een explosief reagerend metaal) en Chloor (een giftig gas). Geen van deze onderdelen heeft de eigenschappen van keukenzout.

- Een muziekstuk heeft de eigenschappen van ritme, harmonie en melodie. De afzonderlijke noten waaruit dat muziekstuk bestaat bezitten deze eigenschappen echter niet.

Zelforganisatie wordt typisch gekenmerkt door het verschijnen van emergente eigenschappen. Zoals we gezien hebben, zijn Bénard rollen gekenmerkt door hun draairichting: wijzerzin of tegenwijzerzin. Deze rollen bestaan echter uit moleculen die afzonderlijk van elkaar in rechte lijn bewegen tot ze met elkaar botsen. De moleculen hebben dus geen draairichting.

4.2. Wat is systeemtheorie?

De ideeën van emergentie en holisme werden eerst geformuleerd rond 1925 in het werk van auteurs zoals Smuts en Whitehead. Deze ideeën bleven echter erg vaag, ietwat mystiek getint, en dus niet erg wetenschappelijk. De bioloog Ludwig von Bertalanffy introduceerde daarop het idee van een systeem als een samenhangend geheel dat in principe in een exacte, wiskundige vorm kan worden beschreven. Rond 1955 creëerde hij dan, samen met wetenschappers zoals Boulding en Rapoport, de *Society for General Systems Research* (die nu nog bestaat als de *International Society for Systems Science*, of ISSS). Deze vereniging stelde zich tot doel een *algemene* systeemtheorie te ontwikkelen, dit wil zeggen een theorie die op alle mogelijke soorten van systemen van toepassing zou zijn, of dit nu fysische, levende, sociale of intellectuele systemen zijn. Aldus zou de algemene systeemtheorie leiden tot een unificatie van de wetenschap, die tot dan toe gefragmenteerd was in een veelheid van disciplines: natuurkunde, scheikunde, biologie, psychologie, sociologie, enz.

Om dit te begrijpen moeten we de basisfilosofie van de systeemtheorie even naar voren brengen. Een **systeem** wordt gedefinieerd als een verzameling van componenten verbonden door relaties. Deze componenten kunnen van de meest uiteenlopende aard zijn: atomen, moleculen, cellen, transistors, neuronen, mensen, bedrijven, symbolen, concepten, enz. Relaties representeren de invloed van één component op het gedrag van een ander. Bijvoorbeeld, een atoom oefent een elektromagnetische kracht uit op een ander atoom, een manager geeft bevelen aan een ondergeschikte, een neuron geeft een elektrische impuls aan een ander neuron. Het systeem als geheel heeft bovendien een eigen *identiteit*, die het onderscheidt van zijn omgeving of achtergrond. Voorbeelden van systemen zijn: een organisme, organisatie, planeet, computer, fiets, getallensysteem, of het periodiek systeem van de elementen in de scheikunde.

Een algemeen systeem is intrinsiek abstract, onafhankelijk van de concrete materie waaruit zijn componenten bestaan. Dit betekent dat fysiek zeer verschillende systemen *isomorf* kunnen zijn, dit wil zeggen een zelfde structuur of organisatie hebben. Bijvoorbeeld, een maatschappij is in bepaalde opzichten isomorf aan een organisme, en een computer gedraagt zich in bepaalde opzichten gelijkaardig aan

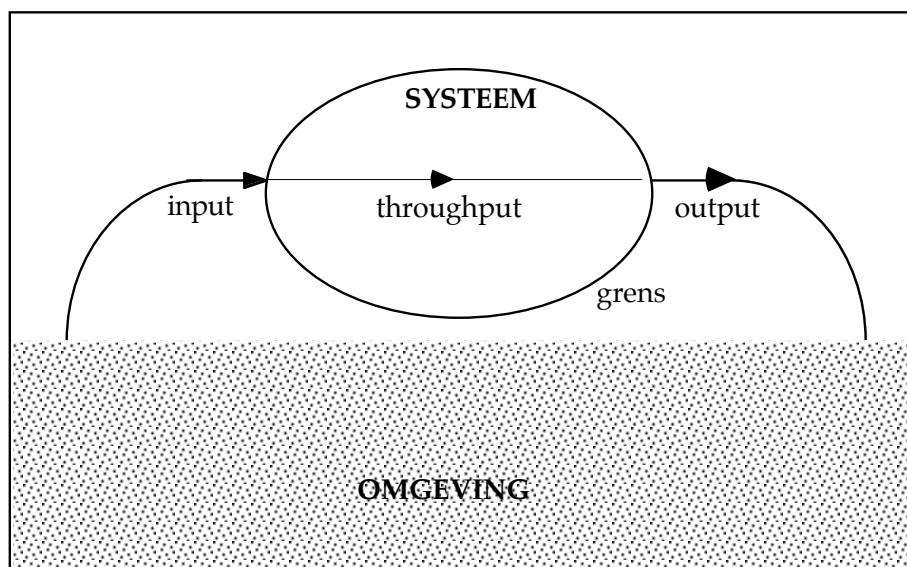
de hersenen. Dergelijke analogieën of isomorfieën helpen ons om complexe systemen, zoals de hersenen, beter te begrijpen. Gezien de organisatie abstract gedefinieerd wordt, zijn wiskundige modellen van systemen in principe mogelijk.

Door dit parallellisme tussen systemen met componenten van verschillende soorten wordt het nu mogelijk de barrières tussen de disciplines te overstijgen: door abstractie te maken van het materiaal of de concrete componenten kunnen we de fenomenen (bijvoorbeeld leven, denken, maatschappijen,...) nu immers begrijpen als verschillende instantiaties of verwezenlijkingen van dezelfde fundamentele organisatie.

De algemene systeemtheorie is in feite geen theorie in de strikte zin, maar eerder een manier van denken. Ze wordt daarom dikwijls aangeduid met termen zoals systeembenadering, systeemwetenschap, systeendenken, of systeemonderzoek. We kunnen ze ook beschouwen als een poging om een universele taal te scheppen, die ons zou toelaten alle mogelijke systemen te beschrijven, of nog als een conceptueel kader met zeer brede toepassingen waaronder de analyse van systemen, de oplossing van problemen, het ontwerp van systemen (bijvoorbeeld technologische systemen, organisaties), en de integratie van gegevens uit verschillende disciplines

4.3. Basiscomponenten van een systeem

Het inzicht dat aan de basis lag van von Bertalanffy's benadering is dat reële systemen, zoals levende wezens, steeds **open** zijn: zij wisselen materie, energie en/of informatie uit met hun omgeving. Snij een organisme volledig af van zijn omgeving (bijvoorbeeld in een luchtdichte doos) en het zal binnen de kortste keren kapot gaan door zuurstofgebrek, honger en dorst. In het Newtoniaans wereldbeeld ging men er daarentegen impliciet van uit dat de bestudeerde systemen (bijvoorbeeld het zonnestelsel) **gesloten** zijn: alle materie en energie die van invloed zijn op het systeem behoren reeds tot het systeem en zullen daar ook blijven; men hoeft dan ook geen rekening te houden met een omgeving.



De stap van gesloten naar open systemen vereist de invoer van een aantal nieuwe, fundamentele begrippen. Het systeem is gescheiden van zijn omgeving door een **grens**. Per definitie, wat zich binnen deze grens bevindt, behoort tot het systeem; wat zich erbuiten bevindt, behoort tot de omgeving. Bijvoorbeeld, voor een mens vormt de huid de grens tussen systeem en omgeving. Elk systeem interageert daarbij met zijn omgeving door de uitwisseling van materie, energie en of informatie over deze grens heen. De invoer of binnenkomende interacties noemt men **input**. De uitvoer of buitengaande interacties noemt men **output**

De input wordt normaal binnenin het systeem op de een of andere manier verwerkt, en het resultaat van die verwerking vormt de basis van de output. Het systeem kan dus gezien worden als een proces dat input transformeert tot output. Dergelijke “doorvoerfunctie” noemt men soms ook *throughput*.

Voorbeelden van input-output systemen:

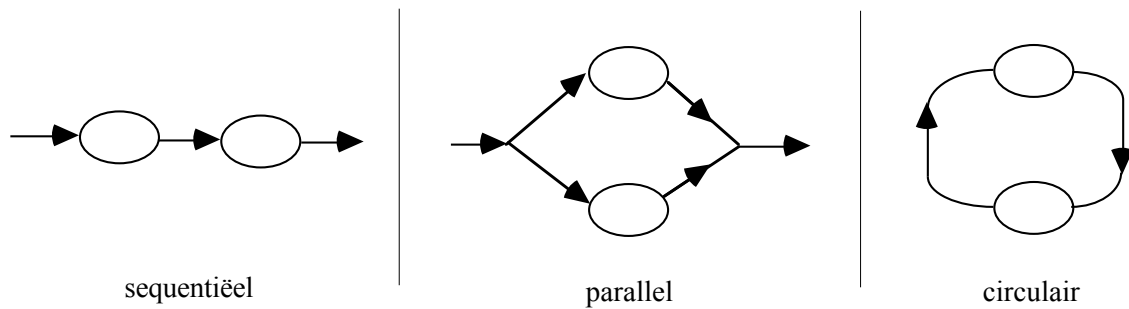
- *lichaam*: voedsel, drank, zuurstof = input; uitwerpselen, urine, CO₂ = output; vertering en verbranding = throughput
- *hersenen*: waarnemingen, stimuli = input; beslissingen, acties = output; verwerking van de ingekomen informatie = throughput
- *computer*: bewegingen van toetsenbord en muis = input; informatie geproduceerd op scherm of printer = output

4.4 Koppeling van systemen

Input en output maken het mogelijk om verschillende systemen aan elkaar te *koppelen*, door (een deel van) de output van één systeem te gebruiken als input voor een ander systeem. Bijvoorbeeld, de bessen van planten (output) worden opgegeten door vogels (input), terwijl de mest van de vogels (output) dan weer mineralen opleveren die opgenomen worden door de planten (input). Gekoppelde systemen zijn in zekere mate van elkaar afhankelijk.

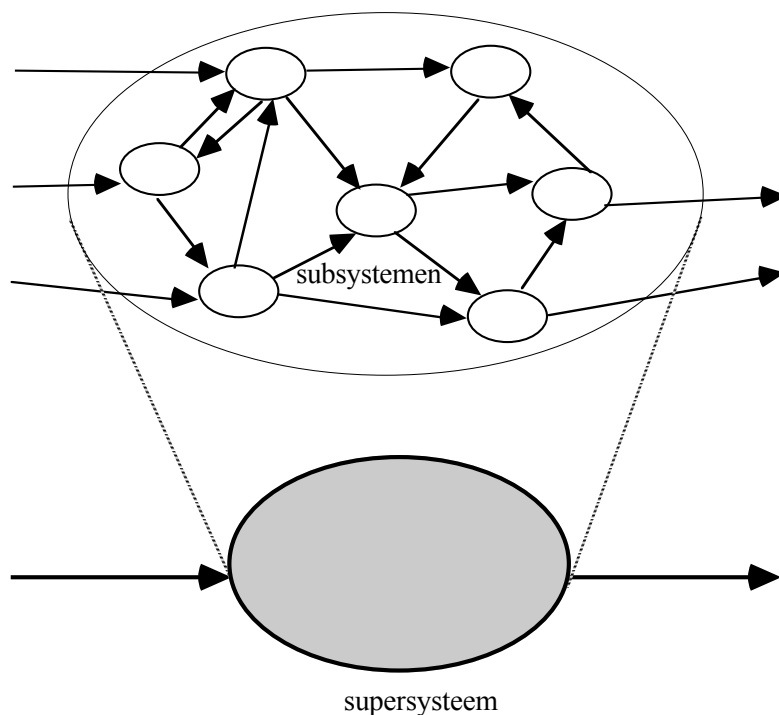
Er zijn drie elementaire vormen van koppeling tussen twee systemen:

- 1) **sequentieel** (of serieel): de output van het eerste vormt de input van het tweede; de systemen volgen elkaar op in een ondubbelzinnige volgorde
- 2) **parallel**: beide systemen krijgen input uit dezelfde bron (een ongespecificeerd derde systeem) en leveren output aan dezelfde bestemming; ze werken naast mekaar, in parallel
- 3) **circulair**: de input van het ene systeem vormt de output van het andere en vice-versa; ze “voeden” elkaar en vormen tesamen een lus; dit heet ook *terugkoppeling* en zal meer diepgaand besproken worden in het volgende hoofdstuk.



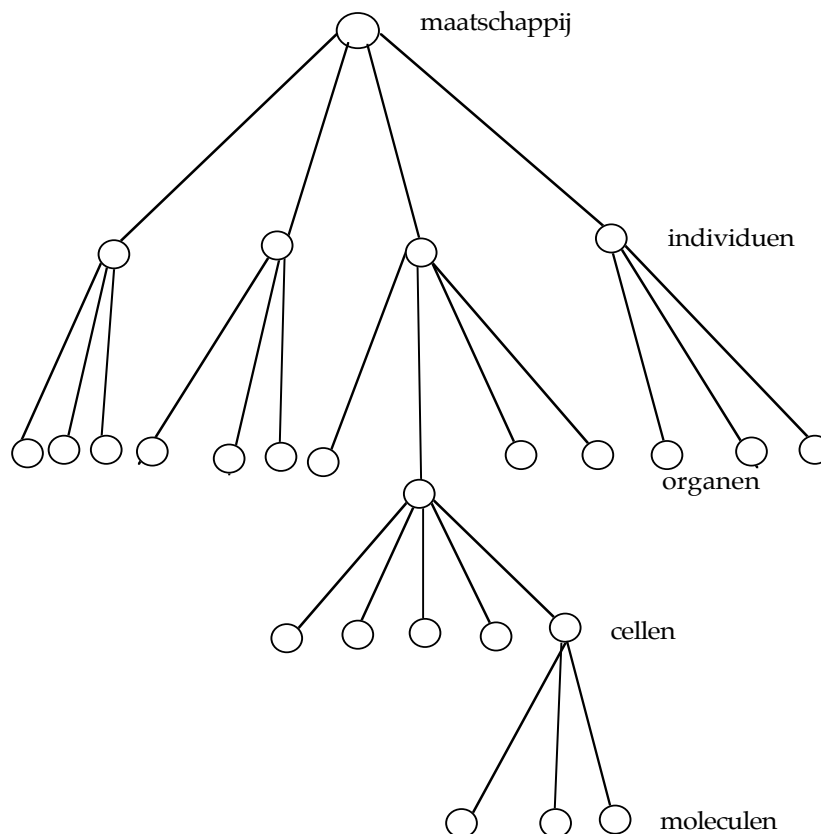
4.5. Subsystemen en supersystemen

Wanneer we met een meer complexe combinatie van op allerlei manieren aan elkaar gekoppelde systemen te maken hebben, dan spreken we van een *netwerk*. Wanneer de systemen in een netwerk een samenhangend geheel vormen, dat duidelijk kan onderscheiden worden van zijn omgeving, dan definieert dit een groter, omvattend systeem: een **supersysteem**.



Op de figuur ziet men een netwerk van aan elkaar gekoppelde systemen (boven), elk met hun input en output. Dit complexe geheel wordt beneden vereenvoudigd voorgesteld als één enkel, overkoepelend systeem, het supersysteem, dat ook zijn input en output heeft. In dergelijke voorstelling gedraagt het supersysteem zich als een zogenaamde *black box*, een zwarte doos waar men niet in kan kijken om de interne structuur of componenten te zien, maar die men nog wel kan bestuderen door het verband tussen input en output te observeren.

Op hun beurt zijn de componenten of delen van een systeem in het algemeen zelf systemen: **subsystemen**. In het algemeen bevat elk systeem subsystemen, terwijl het zelf omvat is in één of meer supersystemen. Bijvoorbeeld, voor het systeem “mens” is de maatschappij een supersysteem, terwijl het hart en de hersenen elk subsystemen zijn. Deze organen bestaan zelf uit cellen, die nu subsystemen zijn van het subsysteem. De cellen hebben moleculen als subsystemen. Zulke supersystemen en subsystemen vormen tezamen een **hiërarchie**, waarbij elk systeem op een bepaald niveau van de hiërarchie uit een aantal systemen bestaat van het daaronder liggende niveau, zoals afgebeeld hieronder.



Deze hiërarchische organisatie van complexe systemen betekent dat men steeds kan “inzoomen” (vergroten, bijvoorbeeld met een microscoop) om de kleinere subsystemen te bestuderen, wat betekent dat men naar beneden gaat in de hiërarchie. Men kan ook “uitzoomen” (van op grotere afstand bekijken, als het ware met een “macroscoop”, zoals gesuggereerd door J. de Rosnay) om de grotere supersystemen beter te zien. Dit betekent dat men naar boven gaat in de hiërarchie. Beide zijn bewegingen in de “schaaldimensie”. Dit wil zeggen dat men continu de schaal van de voorstelling wijzigt, zoals een satelliet die foto’s met kleinere (bijvoorbeeld van een werelddeel) of grotere schaal (bijvoorbeeld van een stad) maakt.

Hoofdstuk 5. Cybernetica

5.1. Doelgerichtheid

De cybernetica (“stuurkunde”) is ontstaan rond dezelfde periode als de systeemtheorie, met gelijkaardige bedoelingen om tot een universele theorie van organisatie te komen die in alle disciplines van toepassing is. Enkele van de meest bekende grondleggers van de benadering zijn Norbert Wiener, W. Ross Ashby, Heinz von Foerster en Gregory Bateson. Cybernetici en systeemtheoretici hebben dan ook samengewerkt, en mekaar sterk beïnvloed. Het verschil is dat systeemtheorie zich in de eerste plaats richt op de **structuur** van een systeem (“hoe zit het in mekaar?”), en de cybernetica op de **functie** (“waartoe dient het?”).

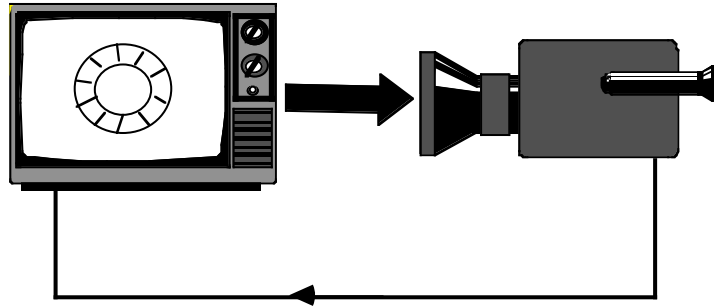
De functie van een systeem of subsysteem kan gedefinieerd worden als het **doel** dat dit systeem probeert te verwezenlijken en waarvoor het gecreëerd is. In de praktijk zien we dat veel systemen doelgericht zijn: mensen, automaten, organisaties, dieren, en in feite alle levende wezens. Bijvoorbeeld, planten streven ernaar om zoveel mogelijk licht op te vangen, en zullen dus hun bladeren doen groeien in de richting van de zon. Leeuwen stellen zich tot doel om een prooi te vangen, en zullen dus hun handelingen (bijvoorbeeld besluipen, naar toe rennen, erop springen, doodbijten) hierop afstellen. De subsystemen van het systeem “leeuw” (bijvoorbeeld tanden, klauwen, ogen) dragen elk hun steentje bij tot het bereiken van dat doel, en hebben dus hun specifieke functie.

Bij doelgericht handelen veronderstellen we dat het doel niet noodzakelijk bereikt wordt, of, als het bereikt wordt, dat we in het algemeen niet weten wanneer het zal bereikt worden. In het Newtoniaanse wereldbeeld is er echter geen ruimte voor “proberen”, “slagen” of “mislukken”, gezien de uitkomst van elke handeling reeds van te voren vastligt. De cybernetica heeft daar geen problemen mee, omdat ze veronderstelt, zoals de evolutietheorie en andere theorieën voor haar, dat we de toekomst toch niet kunnen voorspellen en dus moeten berusten op “trial-and-error”.

Een meer fundamenteel probleem is dat een doel per definitie in de *toekomst* ligt, maar toch het gedrag in het heden bepaalt. Dit is in tegenspraak met de Newtoniaanse mechanica, die er immers van uitgaat dat gevolgen reeds volledig bepaald zijn door hun begintoestand of oorzaak, die per definitie in het *verleden* ligt. (Het religieuze wereldbeeld heeft geen a priori probleem met doelgerichtheid, gezien het ervan uitgaat dat God zelf doelgericht is en Zijn doelen in zekere mate aan de wereld heeft opgelegd). De cybernetica heeft deze paradox opgelost door *circulaire* causaliteit in te voeren: feedback.

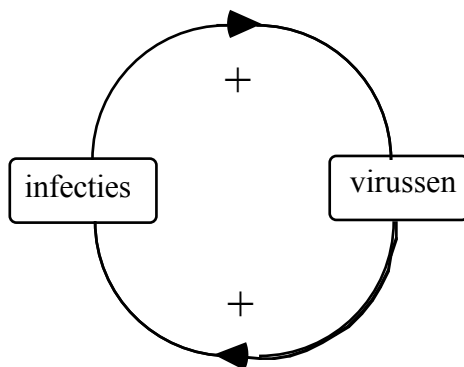
5.2. Feedback

Feedback of *terugkoppeling* kan gedefinieerd worden als een proces waarbij het gevolg teruggeleid wordt naar—of een invloed heeft op—zijn eigen oorzaak. In termen van systemen zou je het kunnen zien als een situatie waarbij de output van een systeem opnieuw (rechtstreeks, of via één of meer intermediaire systemen) in hetzelfde systeem ingevoerd wordt, zodat het tegelijkertijd de rol van input speelt. Wat we circulaire koppeling hebben genoemd is hiervan een voorbeeld.



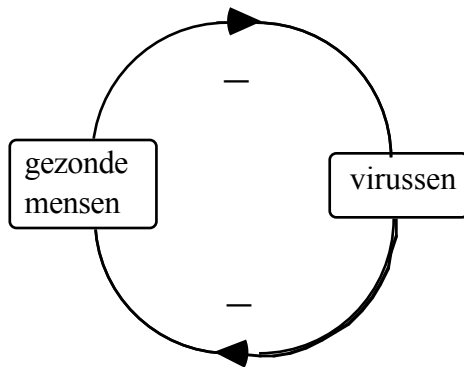
Illustratie: Stel je een videocamera voor die een beeld (oorzaak, input) registreert, en dat beeld doorstuurt naar een televisiescherm waarop het beeld geprojecteerd wordt (gevolg, output). Stel je nu voor dat de camera gericht wordt naar het beeld op het televisiescherm. In deze situatie is het televisiebeeld zowel oorzaak als gevolg van het proces! In de praktijk zal zulk beeld allerlei bizarre, abstracte patronen vertonen, die kunnen begrepen worden als resultaat van een soort zelforganisatie.

Er zijn twee bijzondere, fundamentele gevallen van feedback: positief en negatief. Bij **positieve feedback** zal een oorzaak zichzelf *versterken*. Laat ons dit uitleggen met een voorbeeld: de feedbackrelatie tussen mensen met een verkoudheid en de verspreiding van virussen. Hoe meer mensen geïnfecteerd zijn (oorzaak), hoe meer virussen er zullen verspreid worden door niezen en hoesten (gevolg). Hoe meer virussen er verspreid worden, hoe meer mensen er zullen geïnfecteerd worden (terugkoppeling naar de oorzaak). Meer infecties leiden dus via meer virussen opnieuw naar meer infecties. Het totaal aantal geïnfecteerde personen zal dus steeds toenemen, tot iedereen die vatbaar was voor infectie ook geïnfecteerd is.



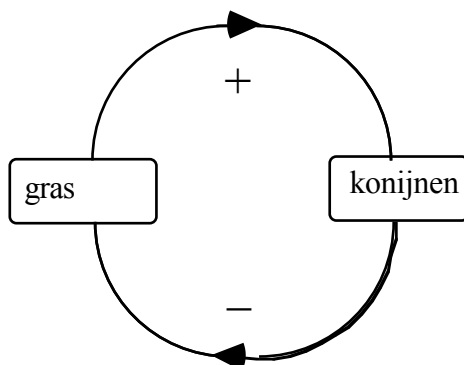
Dergelijke positieve feedback *vergroot dus de afwijking* van de begintoestand (niemand geïnfecteerd). Dit leidt tot een explosieve, alsmaar sneller gaande groei, die pas tot stilstand komt wanneer alle beschikbare “grondstof” voor het proces (in dit geval nog niet geïnfecteerde mensen) is uitgeput. Andere voorbeelden hiervan zijn de kettingreacties die tot kernexplosies leiden, sneeuwbal effecten, zoals de toenemende schuld die leidt tot

hogere interestbetalingen en dus een verder toenemende schuld, of vicieuze cirkels, zoals armoede die leidt tot gebrekkige opleiding en dus slecht betaalde jobs of werkloosheid, en daarom meer armoede. Positieve feedback ligt typisch aan de oorsprong van wat we sensitieve afhankelijkheid van de beginvoorwaarden hebben genoemd, en kan gezien worden als dat aspect van niet-lineariteit dat kleine oorzaken naar grote gevolgen doet leiden.



In het schema hierbij wordt een positieve causale invloed (meer $\rightarrow$ meer, of eventueel minder $\rightarrow$ minder) aangegeven door een pijl vergezeld van een + teken. De twee circulair gekoppelde pijlen hebben allebei een positief teken, wat betekent dat de feedbacklus in zijn geheel positief is. Hetzelfde resultaat zou bekomen worden voor twee negatieve

pijlen die elkaars invloed immers opheffen (min maal min geeft plus). Bijvoorbeeld, indien we het aantal infecties zouden vervangen door het aantal gezonde (nog niet geïnfecteerde) mensen, dan zou de invloed van de virussen hierop negatief zijn, terwijl het aantal gezonde mensen een negatieve invloed zou hebben op het aantal virussen. Het netto effect blijft echter dezelfde positieve feedback: meer virussen leidt tot minder gezonde mensen, en dus tot meer virussen. Meer algemeen is een circulaire koppeling positief als het aantal mintekens even (of nul) is.



De tegengestelde situatie, waarbij een oorzaak zichzelf verzwakt en afwijkingen dus afnemen, heet **negatieve feedback**. Dit is het geval voor een circulaire koppeling met één (of een oneven aantal) negatieve invloeden. Een voorbeeld hiervan is de relatie tussen konijnen en gras. Als er meer gras groeit, dan is er

meer voedsel voor de konijnen, en dus zal het aantal konijnen toenemen. Dit is een positieve invloed, zoals in het vorige voorbeeld. De terugkerende invloed is echter negatief: meer konijnen eten meer gras, zodat minder gras overblijft. Dit doet op zijn beurt het aantal konijnen verminderen, zodat minder gras gegeten wordt, en het gras de kans krijgt weer te vermeerderen.

Elke afwijking (meer of minder) leidt dus naar zijn tegengestelde (minder of meer). Negatieve feedback *onderdrukt* dus afwijkingen. Negatieve feedback kan gezien worden als een niet-lineair mechanisme dat grote oorzaken tot kleine gevolgen

herleidt. Dit leidt in het algemeen tot een *stabiel* evenwicht, gezien elke afwijking van dat evenwicht weer wordt ongedaan gemaakt, en het systeem naar zijn evenwichtstoestand terugkeert. Zulk evenwicht kan gezien worden als een soort impliciet “doel” waar het systeem steeds naar terugkeert. Een ander voorbeeld vindt men in het marktmechanisme: als er een tekort aan een bepaald product ontstaat, zal de prijs van dat product toenemen (negatieve invloed van aanbod op prijs). De producenten zullen dus meer geld ontvangen, en zullen daarom meer van dat product op de markt brengen (positieve invloed van prijs op aanbod), wat de prijs opnieuw zal doen zakken.

Opmerking*: negatieve feedback leidt niet altijd tot een evenwicht: als er een *vertraging* optreedt zodat de onderdrukking van de afwijking een stuk later komt dan de afwijking zelf, dan krijgt de afwijking de tijd om te groeien, en zal de correctie te groot zijn, zodat nu een afwijking in de andere richting ontstaat. Deze nieuwe afwijking zal op haar beurt met vertraging naar de andere richting omslaan, enzovoort. Het resultaat is een oscillatie of cyclische beweging rond het evenwicht. Dit is een voorbeeld van een limietcyclus (zie 11.6).

5.3. Controle

Het kernbegrip van de cybernetica is wat we **controle** zullen noemen. Andere namen voor dit begrip zijn *regulatie*, *sturing*, of *beheersing*. Een controlesysteem is een doelgericht systeem dat afwijkingen van zijn doel probeert onder controle te houden door alle verstoringen te onderdrukken. Het doel is een toestand of een verzameling toestanden waar het systeem op de één of andere manier een voorkeur voor heeft, en die het dus zal proberen te bereiken als het er nog niet is, en er te blijven als het er reeds is. Controle is een *actieve* vorm van negatieve feedback. Dit wil zeggen dat de doeltoestand niet op zichzelf een evenwichtstoestand is, waar het systeem spontaan in terechtkomt (zoals een bal vanzelf in een put rolt en daar blijft liggen), maar een toestand “ver van het evenwicht” (zie 3.6), waarvoor het systeem actief moet ingrijpen en energie verbruiken om deze te bereiken en in stand te houden.

Het systeem moet dus **acties** ondernemen om elke afwijking van de doeltoestand tegen te gaan. In cybernetica heet dit “**compensatie** van **perturbaties**”: de perturbaties zijn alle obstakels, problemen, fluctuaties of storingen die het systeem doen afwijken van zijn doel. Deze zijn het gevolg van allerlei onbeheersbare of onvoorspelbare factoren, zoals bijvoorbeeld ongevallen, interferenties, conflicten, fouten of weersveranderingen. Deze moeten geneutraliseerd of gecompenseerd worden door de juiste tegenacties.

Voorbeeld: Als ik in mijn motorbootje probeer de aanlegsteiger te bereiken aan de andere kant van de rivier, dan zal ik geconfronteerd worden met allerlei perturbaties die de boot van zijn gewenste koers doen afwijken: windvlagen, stromingen, gevaarlijke rotsblokken, enz. Om mijn doel te bereiken zal ik voortdurend moeten

bijsturen. Als de wind bijvoorbeeld het bootje te veel naar links blaast, dan zal ik het roer naar rechts moeten draaien om deze storing te compenseren. Als daarop een plotse stroming mij naar rechts meesleurt, zal ik weer meer naar links sturen om op de juiste koers te kunnen blijven. Zonder deze voortdurende, actieve correctie zal het bootje nooit zijn doel bereiken, maar ongecontroleerd rondzwalpen, ten prooi aan weer en wind. Het is deze metafoor van de stuurman (*kybernetes* in het Grieks) die de cybernetica haar naam gegeven heeft.

Wat is er verder nodig om op een efficiënte manier naar het doel te sturen?

- **waarneming:** om perturbaties te kunnen onderdrukken moet men ze eerst waarnemen; er zijn dus “zintuigen” of sensoren nodig. Deze leveren informatie over de toestand van het systeem en zijn omgeving, en deze informatie moet geïnterpreteerd of verwerkt worden om te bepalen op welke manier er juist van het doel wordt afgeweken
- **kennis:** om te beslissen welke actie adequaat is voor welke afwijking heeft men kennis nodig. Om een motorbootje te sturen is die kennis eerder simpel. Als ik echter een zeilboot, een auto of een vliegtuig zou willen besturen, dan zal ik daarvoor een langdurig leerproces moeten ondergaan.

5.4. Een voorbeeld: de thermostaat

Laat ons het concept van een controlesysteem verduidelijken aan de hand van een zeer eenvoudig, concreet voorbeeld: de thermostaat die ervoor zorgt dat het in ons huis lekker warm blijft, ondanks weer en wind. De thermostaat is het klassieke prototype van een doelgericht, cybernetisch systeem. De werking is uiterst simpel: een sensor in de thermostaat reageert op veranderingen in temperatuur. Als de temperatuur hoger is dan een bepaalde, door de gebruikers ingestelde waarde (bijvoorbeeld 21° C), dan gebeurt er niets. Als de temperatuur echter onder die waarde zakt, dan schakelt de thermostaat de verwarmingsinstallatie aan (bijvoorbeeld door een elektrisch contact te sluiten). Dit verwarmt de kamer en doet de temperatuur weer stijgen. Zodra de temperatuur hoger wordt dan 21°, schakelt de thermostaat de verwarming weer uit, zodat de kamer vanzelf kan afkoelen. Wanneer deze afkoeling de temperatuur onder de 21° doet geraken, wordt de verwarming weer ingeschakeld, en zo begint de cyclus opnieuw. Het netto resultaat is dat de temperatuur van de kamer voortdurend rond de ingestelde temperatuur blijft, en maar heel weinig schommelt, of het buiten nu warm of koud is. De thermostaat reguleert of controleert dus de temperatuur van de kamer, en maakt deze onafhankelijk van de buitentemperatuur.

Laat ons de cybernetische kernbegrippen terugvinden in dit voorbeeld:

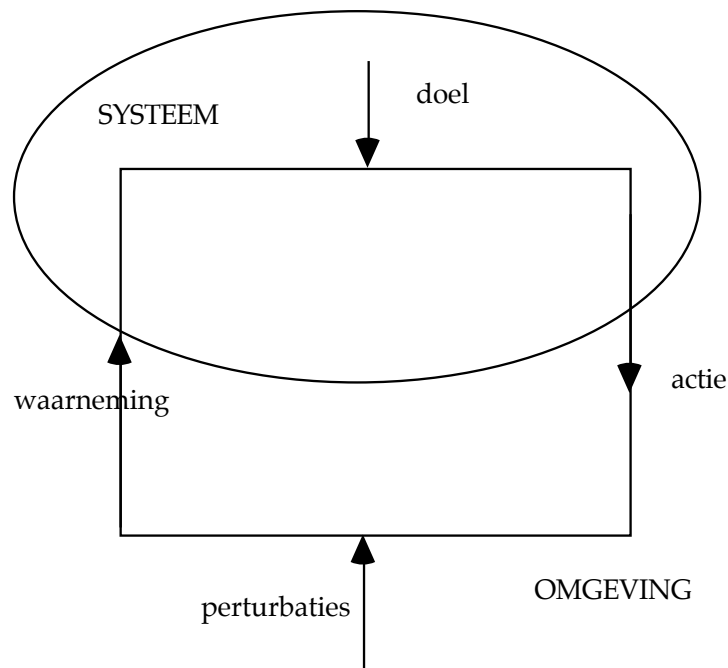
- het **doel** (of de functie) van de thermostaat is om de ingestelde temperatuur te bereiken en in stand te houden

- de **perturbaties** of storingen zijn de veranderingen in de buitentemperatuur die dreigen de binnentemperatuur te doen afwijken van het doel
- de **waarneming** is de door de sensor geregistreerde binnentemperatuur
- de **actie** van de thermostaat bestaat in het aan- of uitschakelen van de verwarming
- de **kennis** van de thermostaat bestaat erin te weten dat hij de verwarming moet aanschakelen als de temperatuur lager is dan het doel, en uitschakelen in het andere geval (stel je voor dat de thermostaat het omgekeerde zou doen: blijven verwarmen als het reeds warm genoeg is, en laten afkoelen als het te koud is!)
- de **feedback** zit hem erin dat het resultaat (bijvoorbeeld temperatuurstijging) van de actie (output) opnieuw door de thermostaat waargenomen wordt (input),

Deze feedback is **negatief** omdat elke waargenomen afwijking gecompenseerd wordt door een actie in de *tegengestelde* richting (bijvoorbeeld verwarming uitschakelen als het te warm wordt). Moest de actie in dezelfde richting gaan, zoals we hierboven suggereerden, dan zou de feedback **positief** zijn, en de mensen in de kamer zouden ofwel bevroren, ofwel zich doodzweten.

5.5. Basiscomponenten van een controlesysteem

We zullen nu het voorbeeld van de thermostaat veralgemenen en de fundamentele componenten van een willekeurig doelgericht systeem overlopen aan de hand van de figuur hieronder. Dit schema is een bijzonder geval van het elementaire input-output schema in sectie 4.3, waar waarneming nu de rol speelt van input en actie die van output, en waar nu het doel, en de terugkoppeling van actie naar waarneming expliciet zijn toegevoegd. Omdat actie weer naar waarneming leidt vormt het schema een gesloten lus. Omdat de waarneming echter niet alleen afhangt van de actie maar ook van wat in de omgeving gebeurt, moeten we een bijkomende input in de lus aanduiden, namelijk de perturbaties.



Voorbeeld:

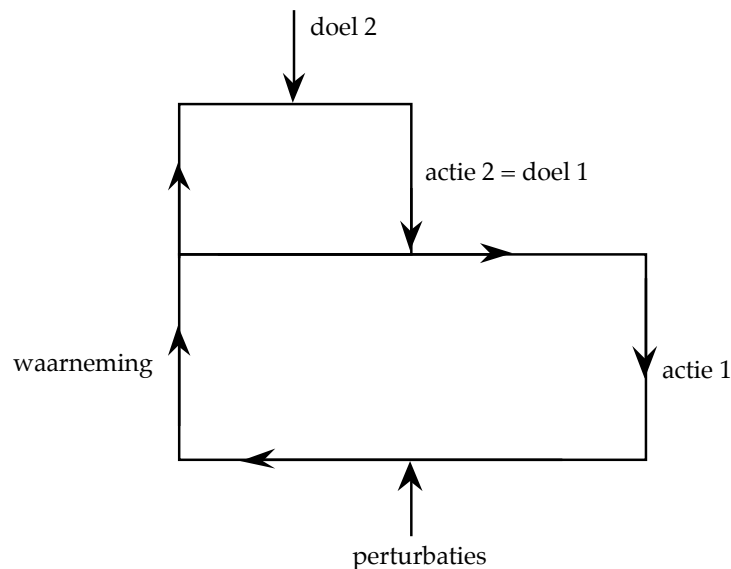
Om te illustreren dat dit schema perfect algemeen is, zullen we nu een veel complexer voorbeeld bespreken: een multinationalaal bedrijf. Zulk bedrijf is een controlesysteem waarvan het doel is om zo veel mogelijk winst te maken op lange termijn. Het bedrijf beschikt over een zeer grote verscheidenheid aan acties om dit doel te bereiken: publiciteitscampagnes opstarten, managers aanwerven, overtollig personeel afdanken, productielijnen automatiseren, lobbyen bij politici, enz. De perturbaties zijn alle gebeurtenissen in de omgeving waar het bedrijf geen directe controle over heeft, maar die wel het verwezenlijken van zijn doel beïnvloeden: de activiteiten van concurrenten, de vragen van klanten, het fluctuerende economische klimaat, natuurrampen die het transport bemoeilijken, beslissingen van regeringen om belastingen te heffen, veranderingen in de prijzen van grondstoffen, enz. Acties en perturbaties tezamen bepalen hoe succesvol het bedrijf is in het bereiken van zijn doelstellingen. Om dit in te schatten (waarneming) moet het bedrijf zo veel mogelijk informatie verzamelen over een verscheidenheid van factoren: marktaandeel, verkoop, productiekosten, naambekendheid en reputatie bij het grote publiek, motivatie van het personeel, enz. Op basis van deze informatie, en de ervaring en kennis van het management, zal het bedrijf beslissen om zijn acties aan te passen aan de omstandigheden, en bijvoorbeeld de afdankingen stop te zetten omdat er werd waargenomen dat dit het moreel van het personeel en de reputatie te zeer aantast, terwijl het te weinig bijdraagt tot de vermindering van de kosten.

5.6. Controlehierarchie

Het schema hierboven is te eenvoudig in de zin dat het geen rekening houdt met het feit dat een systeem in het algemeen meerdere doelen heeft, waarvan sommige *ondergeschikt* zijn aan andere. Ondergeschikte doelen of subdoelen zijn doelen die

niet zozeer op zich belangrijk zijn, maar enkel omdat ze bijdragen tot het bereiken van een hoger of meer algemeen doel. Voor een leeuw bijvoorbeeld is het meest algemene doel om te overleven en zich voort te planten. Hieraan ondergeschikt is het doel om zijn honger te stillen. Op een nog lager niveau leidt dit tot het doel om op een bepaalde prooi, bijvoorbeeld een zebrajong, te jagen. Ondergeschikt hieraan zijn de doelen om naar de zebra toe te rennen, erop te springen, in de nek te bijten, enz. Aldus vormen doelen en subdoelen een complexe hiërarchie van ondergeschiktheid of afhankelijkheid.

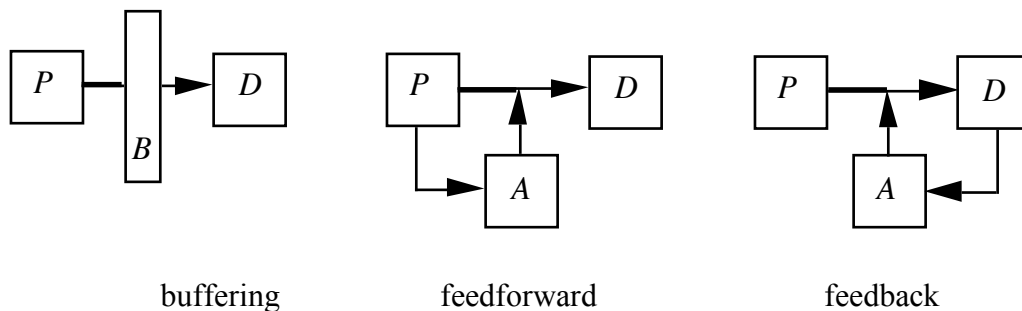
Het schema hierboven kan gemakkelijk uitgebreid worden om zulke hiërarchie voor te stellen. Het volstaat een tweede controlelus bovenop de eerste te plaatsen, zodat het eerste, ondergeschikte doel in feite het resultaat wordt van de actie van het tweede, hogere doel. Dit wil zeggen dat de hogere orde controlelus als actie de doelen van de ondergeschikte lus instelt naargelang van de waargenomen omstandigheden. Dit kan opnieuw best worden geïllustreerd aan de hand van de thermostaat.



Het doel van de thermostaat is om een bepaalde temperatuur T te bereiken en te behouden. Ons overkoepelende doel echter is om de temperatuur comfortabel te houden voor de bewoners van het huis, maar zonder energie te verspillen. We kunnen hiervoor een hogere orde controlesysteem bouwen dat de thermostaat controleert door de doeltemperatuur T te variëren afhankelijk van de bewoning. Bijvoorbeeld, als er mensen in de kamer zijn, stel T dan gelijk aan 21° . Als de kamer leeg is, stel dan $T = 16^\circ$ om energie te sparen. Een infraroodsensor kan nagaan of iemand de kamer binnenkomt. Als de sensor personen detecteert, wordt de doeltemperatuur verhoogd. Als ze de kamer weer verlaten, gaat de doeltemperatuur naar omlaag. Zulk controlesysteem kan meerdere kamers tegelijk reguleren, en voor elke kamer afzonderlijk de thermostaat instellen. Dit controlesysteem is een “metasysteem” (zie 14.2) met twee niveaus: controle van de temperatuur binnen een kamer, en controle van de doeltemperatuur over alle kamers.

5.7. De drie fundamentele controlemechanismen

We hebben het tot nu toe enkel gehad over controle door (negatieve) **feedback**. Hoewel dit mechanisme het meest essentiële is, zijn er nog twee andere belangrijke controlemechanismen: **buffering** en **feedforward**. Laat ons de kenmerken en de voor- en nadelen van elk op een rijtje zetten. Zoals duidelijk wordt uit de tekening hieronder zijn deze mechanismen bijzondere gevallen van respectievelijk sequentiële, parallelle en circulaire koppelingen. In deze tekening staat P voor perturbatie, B voor buffer, A voor actie en D voor doel. De dikte van de pijlen staat voor de grootte van de invloed: de taak van het controlesysteem is om de invloed van P op D zo klein mogelijk te maken.



• Buffering

Perturbaties P worden passief geabsorbeerd of gedempt door een “buffer” B . Er wordt dus niet actief ingegrepen. Dit heeft het voordeel dat het controlesysteem geen energie verspilt in het voorbereiden en uitvoeren van compenserende acties.

Voorbeelden van buffers:

- schokdempers en bumpers in een auto vangen schokken op
- een goed geïsoleerde muur zal de kamer afschermen van temperatuurschommelingen. Dit verlicht het werk van de verwarming.
- een waterreservoir vangt schommelingen (bijvoorbeeld droogteperiodes) in de hoeveelheid beschikbaar water op

Nadeel: buffering kan alleen het effect van ongecoördineerde fluctuaties verminderen, maar kan het systeem niet systematisch naar een doel sturen dat zelf geen evenwichtstoestand is. Bijvoorbeeld, een geïsoleerde muur alleen kan de kamer niet warm houden: er is input van energie (in de vorm van brandstof of elektriciteit) nodig voor de verwarming, gezien de evenwichtstoestand degene is waarbij de temperatuur binnen en buiten dezelfde zijn. Schokdempers alleen kunnen de auto niet op de gewenste koers houden: daarvoor zijn een motor en een bestuurder nodig.

- **Feedforward**

Perturbaties P worden gecompenseerd door acties A *vòòr* ze het doel D kunnen beïnvloeden. Het controlesysteem **anticipeert** dus het effect van perturbaties op het doel. Dit is belangrijk in situaties waar het tijd vraagt om de nodige acties uit te voeren: door reeds op voorhand te beginnen compenseren vermijdt het controlesysteem dat de afwijking te lang zou duren of te groot zou worden. Feedforward is cruciaal voor afwijkingen die ten allen koste moeten vermeden worden, bijvoorbeeld omdat ze het systeem kunnen vernietigen.

Voorbeelden:

- een thermostaat met een *externe* temperatuursensor kan de verwarming aanschakelen als het buiten koud wordt, *vòòr* dat ook de kamer afkoelt.
- als een multinational verneemt dat hun concurrent een grote publiciteitscampagne voorbereidt, zullen zij anticiperen dat dit kan leiden tot verlies van marktaandeel, wat moeilijk weer goed te maken is. Om dit probleem *vòòr* te zijn, kunnen zij zo snel mogelijk zelf een campagne opstarten.
- een zebra kan het zich niet veroorloven om door een leeuw besprongen te worden, gezien deze aanval wellicht fataal is. Daarom doet de zebra er best aan de aanval te anticiperen, en reeds te vluchten wanneer de leeuw zich nog op een veilige afstand bevindt.

Nadeel: het is niet mogelijk om altijd exact te anticiperen hoe de waargenomen perturbaties zullen inwerken op het doel. Bijvoorbeeld, als iemand de oven aanzet in de kamer zal dit meer dan genoeg zijn om de afkoeling buiten tegen te gaan, en dus hoeft de verwarming niet aan. Het gerucht over de nieuwe publiciteitscampagne kan ongegrond blijken, en de leeuw heeft misschien geen honger. Dergelijke fouten in de anticipatie leiden niet alleen tot een verspilling van energie, maar mogelijk tot een overcompensatie, zoals een kamer die *té* warm wordt.

- **Feedback**

Perturbaties P worden pas gecompenseerd door acties A *nadat* ze een afwijking van de doeltoestand D hebben teweeggebracht. Het voordeel is dat we nu zeker weten welke afwijking precies plaatsgrijpt. We hoeven daarbij niet te weten wat de afwijking veroorzaakt heeft om op basis daarvan de mogelijke gevolgen te gaan anticiperen: het enige wat we moeten weten is welke actie dergelijke afwijking kan compenseren. Dit maakt het controleprobleem veel eenvoudiger.

Voorbeelden:

- de thermostaat zal normaal pas de verwarming aanschakelen nadat de temperatuur onder de doeltemperatuur is gezakt zodat er geen twijfel meer is aan het nut van extra verwarming.

- de centrale bank van een land zal de economische groei nauwgezet controleren. Als deze te ver afwijkt van de doelstellingen, zal ze ingrijpen door de interestvoeten ofwel te doen stijgen, wat de groei afremt, of te doen dalen, wat de groei stimuleert. Het is daarvoor niet nodig om de zeer complexe en moeilijk voorspelbare factoren en interacties te kennen die de economische groei beïnvloeden.

Nadeel: er moet eerst een afwijking van de doeltoestand zijn vòòr de storing kan onderdrukt zijn. Feedbackcontrole is dus nooit perfect: er zullen altijd afwijkingen plaatsgrijpen. Door zo snel mogelijk in te grijpen kunnen we die wel zo klein mogelijk proberen te houden.

5.8. Kennis

Om storingen actief te onderdrukken moet een controlesysteem:

- 1) een voldoende grote verscheidenheid of variëteit (zie 9.2) aan acties kunnen uitvoeren om elke perturbatie aan te kunnen. Dit is Ashby's wet van de benodigde variëteit (*law of requisite variety*).
- 2) weten welke actie juist gepast is voor welke perturbatie. Dit is de wet van de benodigde kennis.

Dit betekent dat hoe groter de verscheidenheid aan perturbaties waarmee het systeem geconfronteerd wordt, hoe groter het repertoire aan benodigde acties, maar dan ook hoe meer kennis het systeem nodig heeft. Complexe, variabele omgevingen vereisen dus hoog ontwikkelde systemen, die heel uiteenlopende problemen aankunnen.

Op het meest fundamentele vlak wordt **kennis** uitgedrukt in de vorm van een **conditie-actieregel**: ALS een bepaalde perturbatie wordt waargenomen, DAN voer bepaalde, hieraan aangepaste actie uit. Korter: ALS conditie, DAN actie. Of nog korter:

conditie → actie

Voorbeeld: voor de thermostaat gelden de regels:

temperatuur te laag (lager dan doeltemperatuur) → schakel verwarming aan

temperatuur hoog genoeg → schakel verwarming uit

voor de thermostaat gecontroleerd door een aanwezigheidssensor:

iemand in kamer → stel doeltemperatuur in op 21°

kamer leeg → stel doeltemperatuur in op 16°

Als het systeem feedforward gebruikt, zal kennis ook in de vorm van *voorspellingen* worden uitgedrukt, waarbij een conditie die op zich geen afwijking

met zich meebrengt een andere conditie aankondigt, die mogelijk wel een afwijking is, en waar het systeem dan eventueel anticiperend kan op reageren.

conditie 1 → conditie 2

Voorbeeld: thermostaat met externe temperatuursensor

temperatuur buiten daalt → temperatuur zal binnen dalen

In combinatie met de eerste regel van de thermostaat impliceert dit:

temperatuur buiten daalt → schakel verwarming aan

Een systeem van voorspellingsregels noemt men een **model**. Het model representeert processen in de omgeving op een abstracte, vereenvoudigde manier. Het model laat het systeem toe om perturbaties of gebeurtenissen te *anticiperen*. Een model is echter geen objectieve afspiegeling van de werkelijkheid. Het is een subjectieve voorstelling van die aspecten die het systeem direct aanbelangen, en die dient om het doelgericht systeem toe te laten zijn persoonlijke doelen te bereiken.

Hoofdstuk 6. Complexe Adaptieve Systemen

6.1. Achtergrond

Begin de jaren '80 werd in Nieuw Mexico het Santa Fe Instituut voor de wetenschappen van de complexiteit opgericht. De doelstelling was om tot een interdisciplinaire studie van complexe systemen te komen, door wetenschappers uit verschillende middens voor korte tijd rond dit thema te laten samenwerken. Enkele van de bekendste wetenschappers die aan het SFI zijn verbonden geweest: John Holland, Stuart Kauffman, Brian Arthur, en Chris Langton. De ideeën van deze onderzoekers zijn intussen in de wetenschappelijke wereld meer en meer populair geworden. Dit heeft geleid tot een studiedomein dat gewoonlijk wordt aangeduid met de term **complexe adaptieve systemen** (CAS), en meer recent met de term complexiteitswetenschap(pen).

Deze benadering is verwant aan en beïnvloed door de voorgaande benaderingen, zij het conceptueel echter nog minder goed uitgewerkt. De belangrijkste nieuwe begrippen van de CAS benadering, zoals “zelfgeorganiseerde criticaliteit”, “percolatie” of “N-K netwerken”, zijn dan ook ingewikkelder en hebben minder voor de hand liggende toepassingen dan die van de systeemtheorie en cybernetica. We zullen ze in dit inleidend boek dan ook niet behandelen. Veel van die concepten geraken trouwens na enkele jaren van populariteit ook weer uit de mode als blijkt dat ze toch niet zo algemeen bruikbaar zijn als eerst gedacht—dit in tegenstelling tot begrippen zoals emergentie, fitness en feedback, die tot het algemeen wetenschappelijk gedachtegoed zijn gaan behoren.

De reden voor de populariteit van de CAS benadering ligt vooral in haar innoverende methode om complexe systemen te bestuderen: het gebruik van *computersimulaties*. Dit maakt het mogelijk om meer complexe, minder geïdealiseerde systemen te bestuderen. Ten tijde van de voorgaande benaderingen waren computers immers gewoon nog niet krachtig genoeg om echt complexe systemen te simuleren, zodat de meeste resultaten door puur theoretisch redeneren bereikt werden.

6.2. Agenten

De computermodellen van de CAS benadering zijn typisch gebaseerd op het concept van een **agent**, als elementaire, actieve component van het systeem dat gemodelleerd wordt. Voorbeelden van agenten zijn cellen in een lichaam, individuen in een maatschappij, vogels in een zwerm, kopers en verkopers op de beurs, mieren in een mierennest, autonome robots in een labo, of moleculen in

een chemische reactie. Hoewel er geen algemeen aanvaarde definitie bestaat van een agent, wordt hiermee gewoonlijk een elementair, doelgericht systeem bedoeld dat verschillende acties kan ondernemen. Het doel kan expliciet of impliciet zijn, maar komt er gewoonlijk op neer dat de agent zijn “opbrengst”, “succes” of “fitness” tracht te maximaliseren. Wanneer verschillende agenten hetzelfde doel nastreven zullen ze in het algemeen in concurrentie treden, maar potentieel ook in staat zijn tot samenwerking.

In reactie op waarnemingen (binnenkomende informatie) voert de agent bepaalde acties uit. Hij volgt hierbij simpele *conditie-actieregels*. Bijvoorbeeld, ALS de agent een brok voedsel vindt, DAN eet hij die op. Agenten kunnen soms individueel leren of evolueren, en aldus hun gedragsregels aanpassen. Bijvoorbeeld, als voedsel met een blauwe kleur slecht blijkt te smaken, dan wordt de regel aangepast, zodat de agent nog enkel niet-blauw voedsel zal proberen op te eten.

Hun acties hebben een invloed op andere agenten, die op hun beurt reageren met acties. Bijvoorbeeld, als een agent zich naar een brok voedsel begeeft, maar ziet dat een andere agent hem voor is en de brok reeds heeft opgegeten, zal hij van richting veranderen naar een verder afgelegen brok. Dit kan de aandacht trekken van een derde agent zodat deze zich nu ook naar die brok begint te begeven. Op die manier zal een gebeurtenis of actie ergens in het systeem (bvb. een brok voedsel die verschijnt of opgegeten wordt) in het algemeen verschillende agenten in beweging brengen, wat op zijn beurt anderen tot actie aanzet. Deze activiteit kan onbeperkt doorgaan, of tot stilstand komen in een evenwichtsconfiguratie.

6.3. Wat is een complex adaptief systeem?

Een **complex adaptief systeem** is een collectief bestaande uit een groot aantal interagerende agenten. (Meer recent wordt hiervoor ook wel de term *multi-agent systeem* (MAS) gebruikt). Uit de individuele acties emergeren collectieve patronen van activiteit, en het systeem is in belangrijke mate zelforganiserend. Het systeem in zijn geheel is ook adaptief: een verandering in de omgeving leidt tot een verandering in het systeem. Het systeem *past zich aan* aan de nieuwe omstandigheden, en bereikt er in het algemeen een evenwicht mee, zelfs al zijn de individuele agenten niet noodzakelijk adaptief. Een typisch systeem van dit type vertoont in verschillende mate de voornaamste mechanismen die we besproken hebben in eerdere hoofdstukken, zoals **variatie, natuurlijke selectie, niet-lineariteit, zelforganisatie, feedback, anticipatie en hiërarchie**, maar dit in een complex kluwen van interacties waarvan de gevolgen in het algemeen moeilijk voorspelbaar zijn.

Voorbeelden van zulke CAS:

- *Markten*: afhankelijk van de prijzen gevraagd door andere agenten kunnen agenten beslissen om te kopen of te verkopen. Dit heeft op zijn beurt invloed

op de prijzen, en dus op de gedragingen van andere agenten. Dit kan leiden tot collectieve fenomenen, zoals evenwicht, inflatie, of speculatie.

- *Zelforganiserende scheikundige reacties*: de agenten hier zijn interagerende moleculen die zich kunnen organiseren tot dissipatieve structuren.
- *Historische beschavingen*: individuen interageren met elkaar en met hun omgeving (gewassen, vee, ...). Dit kan leiden tot groei of integendeel tot hongersnood en verdwijnen van de beschaving (bijvoorbeeld de ineenstorting van het Mayarijk).
- *Ecosystemen*: de acties van bepaalde planten of diersoorten hebben invloed op anderen, wat kan leiden tot emergente verschijnselen zoals symbiose, parasitisme, uitsterven, enz.

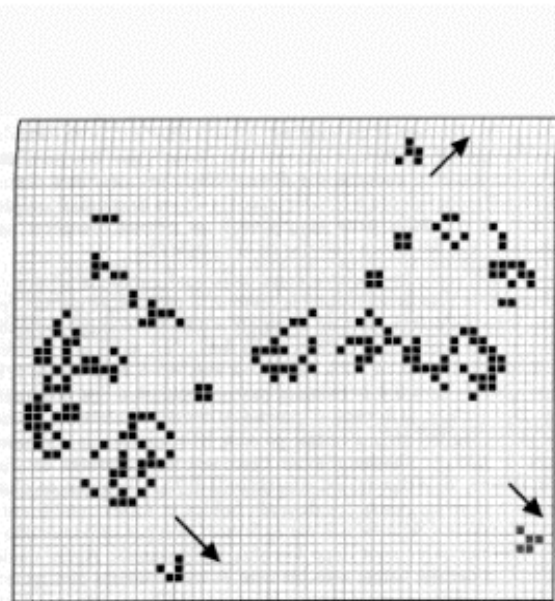
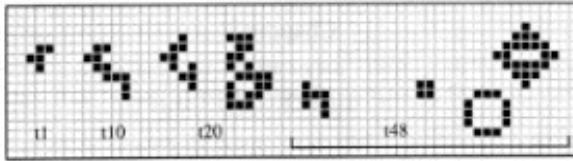
Computersimulaties laten ons toe beter te begrijpen wat er gebeurt—of zou kunnen gebeuren—met dergelijke systemen onder diverse omstandigheden. De veronderstellingen achter deze simulaties (gedragsregels) zijn echter meestal tamelijk gesimplificeerd en artificieel. Ze bieden daarom weinig garantie dat de resultaten van de simulatie zullen overeenkomen met de resultaten in de echte wereld. Gezien zelfs heel eenvoudige uitgangshypothesen tot heel complexe gedragingen kunnen leiden, is het ook niet altijd evident hoe men die resultaten moet interpreteren. Anderzijds kenmerkt dit complexe gedrag ook reële systemen, en dat is één van de redenen dat de CAS simulaties zo veel mensen fascineren. Laat ons ter illustratie enkele typische voorbeelden van zulke simulaties bespreken.

6.4. Cellulaire automaten

Een cellulaire automaat is een zeer vereenvoudigde voorstelling van bepaalde dynamische processen, die echter onverwacht complex gedrag kunnen vertonen. Een agent komt hier overeen met een “cel” op een soort van geometrisch rooster van cellen (in 1, 2 of meer dimensies). Een cel interageert enkel met zijn aangrenzende cellen. Bij elke stap of opeenvolgend tijdstip verandert elke cel automatisch van toestand, afhankelijk van de toestand van de aangrenzende cellen. De toestand kan zijn “actief” of “niet actief”, maar ook een keuze uit een meer ingewikkelde reeks opties. Hoewel simpel en deterministisch voor elke cel afzonderlijk, is de evolutie van het geheel van cellen in de praktijk in het algemeen zeer ingewikkeld en onvoorspelbaar (chaotisch), en vertoont ze een quasi onbegrensde variëteit aan gedragingen.

Deze rijkdom aan vormen en gedragingen heeft de wiskundige Stephen Wolfram er toe geleid om te claimen dat alle natuurlijke fenomenen en het universum in zijn geheel te herleiden zijn tot cellulaire automaten. Hoewel zijn (zeer lijvige) boek “A New Kind of Science” tal van inspirerende voorbeelden geeft van cellulaire automaatmodellen van natuurverschijnselen, heeft zijn stelling alsnog weinig indruk gemaakt in de wetenschappelijke wereld. Een reden is dat cellulaire automaten nog te dicht aanleunen bij het Newtoniaans reductionisme, en

voorbijgaan aan de meer complexe, asynchrone en indeterministische interacties die in de reële wereld optreden.



Voorbeeld: “game of life”

Dit is een tweedimensionaal “schaakbord” met vierkante cellen, die actief (zwart in de tekening hiernaast) of inactief (wit) kunnen zijn. De regels zijn de volgende:

- als een cel inactief is en 3 van haar naburen (van de 8 aangrenzende cellen) zijn actief, dan wordt ze in de volgende stap actief (“levend”)
- een cel blijft actief als 2 of 3 naburen actief zijn,
- in alle andere gevallen wordt (of blijft) de cel inactief.

Als men het spel vanuit verschillende beginconfiguraties laat evolueren, ziet men allerlei patronen van activiteit die zich stabiliseren, herhalen, voortbewegen, reproduceren, “uitsterven”, en andere gedragingen vertonen die doen denken aan levende wezens, maar die in feite uiterst eenvoudig zijn. Vanwege deze eindeloze variatie is het spel lang populair geweest als “screensaver”. Voor een interactieve demonstratie, zie: <http://www.bitstorm.org/gameoflife/>.

6.5. Zwermen

Een zwerm (“swarm”) is een simpele maar realistische voorstelling van het collectief gedrag van dieren die zich in groep bewegen, zoals vluchten vogels, scholen vis, zwermen bijen of kuddes schapen. De agenten (individuele dieren) worden voorgesteld als puntjes die zich verplaatsen in een twee- (of drie-) dimensionale ruimte. Voor een mooie interactieve demonstratie kan je terecht op de website:

<http://www.red3d.com/cwr/boids/applet/>

- gedragsregels voor een agent in een kudde:
 - de agent probeert altijd naar de plaats te bewegen waar de meeste andere agenten zitten

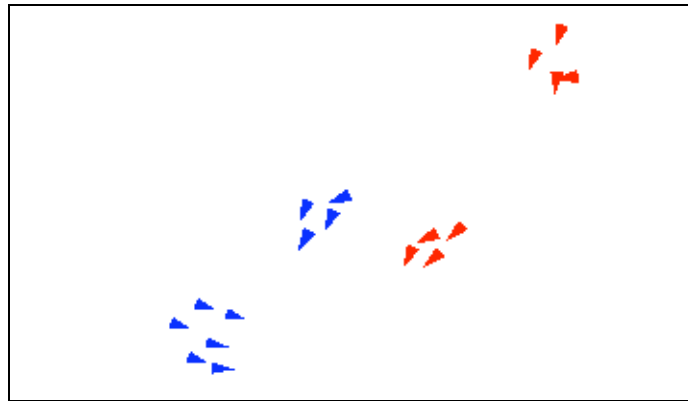
- de agent probeert een minimale afstand te bewaren van andere agenten

Resultaat: de agenten vormen een onregelmatige kudde waarbij degenen aan de rand voortdurend meer naar het midden proberen te komen, maar aldus andere agenten “wegduwen”. Dit is een realistische voorstelling van het gedrag van grote groepen herbivoren (bvb. schapen, zebra’s, wildebeesten) in een open vlakte waar ze kunnen belaagd worden door roofdieren, zoals leeuwen. Degene aan de buitenkant of rand van de kudde zijn immers meest kwetsbaar voor aanvallen, terwijl die in het midden het kleinste risico lopen. Anderzijds mogen ze ook niet te dicht op elkaar gepakt zijn want dan is er niet voldoende gras per individu om te eten.

- bijkomende gedragsregels voor een agent in een zwerm:

- de agent probeert in dezelfde richting en met dezelfde snelheid te bewegen als de gemiddelde beweging van zijn burens
- de agent bewaart een minimale afstand van obstakels

Resultaat: de agenten vormen een sierlijk bewegende, mooi gesynchroniseerde zwerm, die geregeld van richting verandert, en rond obstakels heen vliegt door zich te splitsen in twee subzwermen die na het obstakel weer ineenvloeien. Dit is een eenvoudige voorstelling van het collectief gedrag van “kuddedieren” die constant in beweging blijven, zoals vliegende vogels of zwemmende vissen.



- mogelijk bijkomende gedragsregels met twee soorten agenten:

- de “roofdier” agenten vliegen naar de dichtstbijzijnde prooi
- de “prooi” agenten vluchten weg van de roofdieren

Resultaat: de simulatie produceert adembenemende collectieve “jachttaferelen”. Hierbij kunnen we denken aan een school kleine vissen, zoals haringen, die aangevallen wordt door een groep haaien of tonijnen. De haringschool waaiert uiteen als ze een tonijn in hun midden ontwaren, maar wordt af en toe weer bijeengedreven wanneer de tonijnen hen vanuit verschillende richtingen insluiten. Daarbij proberen individuele haringen wel steeds te midden van zo veel mogelijk

andere haringen te blijven, omdat zo de kans kleiner is dat ze er door een tonijn worden uitgepikt.

- een ongewone variatie op de zwermregels

We veronderstellen weer dat agenten zich laten leiden door de gemiddelde snelheid en richting van hun burens en daarbij een minimale afstand bewaren om botsingen te vermijden, en dat ze hierbij twee verschillende doelen nastreven: de “rode” agenten proberen zo veel mogelijk naar boven te gaan, de “blauwe” naar beneden. Rode en blauwe agenten zitten elkaar dus “in de weg” en zullen daarom geneigd zijn zich aan te sluiten bij hun eigen soortgenoten, die wel de juiste richting volgen. Wanneer een rode agent erin slaagt de bovenste laag te bereiken, verandert hij echter in een blauwe agent. Op dezelfde manier verandert een blauwe agent die in de onderste laag geraakt in een rode agent.

Wie opmerkzaam is, zal hierin wellicht een vroeger voorbeeld herkennen: het ontstaan van convectiestromingen in een vloeistof die van onder verwarmd wordt, waarbij de rode agenten staan voor warme deeltjes vloeistof en de blauwe voor koude. Hoewel ik dergelijke simulatie nog niet gezien heb, zou ik verwachten dat mits een nauwkeurig afstellen van de regels (bvb. wat betreft snelheid en onderlinge afstand) het resultaat inderdaad zou zijn dat de “zwerm” zich organiseert in een regulier, ronddraaiend patroon van Bénard rollen. Dit illustreert hoe het concept van agent universeel is, en zich niet beperkt tot de representatie van levende wezens. Daarnaast toont het dat de “thermodynamische” benadering van zelforganisatie en de modernere CAS benadering perfect compatibel zijn.

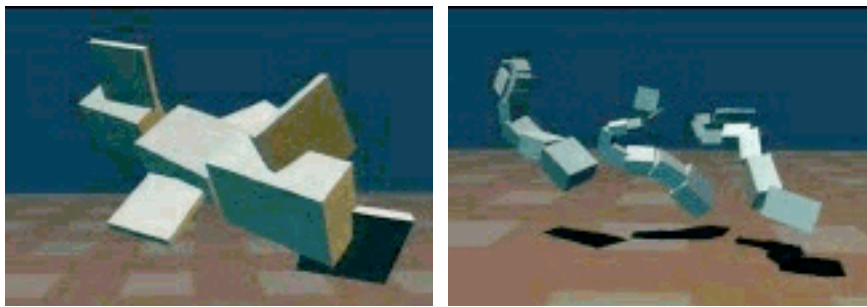
6.6. Artificieel leven

Het domein van “artificial life” probeert via computersimulaties (of soms kleine robotjes) de fundamentele gedragingen en evolutie van levende wezens en ecosystemen te begrijpen. Er zijn zeer veel verschillende manieren waarop dit kan gebeuren.

Een klassieke, maar nog steeds zeer indrukwekkende, illustratie vind je in het werk van de computerkunstenaar Karl Sims (zie <http://biota.org/ksims/>). Deze heeft in een virtuele, 3-dimensionale omgeving wezens laten evolueren die zo goed mogelijk bepaalde fysische activiteiten moeten uitvoeren, zoals zwemmen, lopen, springen, of strijd leveren voor voedsel. De gesimuleerde omgeving is onderhevig aan realistische fysische krachten, zoals zwaartekracht op het land en viscositeit (vloeistofweerstand) onder water. De lichamen van de agenten bestaan uit een combinatie van rechthoekige blokken van verschillende groottes en vormen, die met “gewrichten” aan elkaar vastzitten zodat de ene ten opzichte van de andere kan bewegen. De bewegingen worden gestuurd door een elementair “zenuwstelsel”, dat waargenomen condities verbindt met mogelijke acties. De structuren van lichaam

en zenuwstelsel zijn aanvankelijk willekeurig, maar evolueren dan onder invloed van variatie en selectie.

In het eenvoudigste geval is het selectie criterium de snelheid waarmee het wezen erin slaagt zich voort te bewegen, rekening houdend met de fysische weerstand. Op het land leidt dit tot creaturen die lopen op twee of meer “poten”, die voortschuifelen zoals een slang, of zelfs die zich herhaaldelijk laten kantelen en “omvallen”, zoals een acrobaat die een rad maakt door van de voeten op de handen en van daar weer op de voeten terecht te komen. Onder water leidt dit gelijkerwijze tot een verscheidenheid aan zwemstijlen, die meestal lijken op die van bestaande dieren, maar die soms geheel origineel zijn—zij het dat ze nog steeds natuurlijk of plausibel overkomen. In de illustratie hieronder zie je enkele van de “zwemmende” creaturen (een snapshot uit de animatiefilmpjes die je op het web kan downloaden). In de “gevechtssituatie” moeten de agenten zo snel mogelijk een brok voedsel naar zich toe trekken, vóór hun concurrent ermee aan de haal is. De evolutie leidt hier weer tot verschillende strategieën, soms gebaseerd op pure snelheid, soms op spitsvondige tactieken om de tegenstander toch nog een reeds vastgenomen brok afhandig te maken.



De meeste artificial life simulaties zijn echter meer abstract, en geïnteresseerd in algemene evolutie en overlevingsstrategieën in een gesimplificeerde omgeving. Deze heeft dikwijls de vorm van een tweedimensionaal rooster, zoals bij een cellulaire automaat, waar agenten over de verschillende cellen verspreid zijn, en zich kunnen verplaatsen door telkens weer “over te stappen” naar een naburige cel, zich hierbij baserend op conditie-actieregels. Een bekend voorbeeld hiervan is de Sugarscape omgeving, waar voedsel (“suikerklontjes”) verspreid is over een tweedimensionaal landschap, en waar de agenten ernaar streven om zo veel mogelijk voedsel buit te maken.

De meest algemene situatie, die voor het eerst in detail werd geprogrammeerd door de bioloog Tom Ray in zijn bekende *Tierra* simulatie, is de volgende:

- agenten proberen “voedsel”, “energie” of “grondstoffen” te verzamelen. Er is een beperkte hoeveelheid voedsel in omloop, en agenten kunnen voedsel van elkaar “afpakken”, of elkaar zelfs “opeten”, om aldus de voedselreserves van anderen te recupereren.
- agenten die onvoldoende voedsel vinden om te overleven sterven af, zodat er een natuurlijke selectie plaats grijpt en enkel de best aangepaste overblijven.

(Deze selectie is meer “natuurlijk” dan die van Sims omdat er niet concreet gespecificeerd wordt *wat* de agenten moeten doen (bvb. zwemmen of lopen) om geselecteerd te worden.)

- agenten die meer dan een minimum hoeveelheid voedsel vinden hebben een overschot aan energie en zijn daarmee in staat om zich voort te planten
- bij de voortplanting worden kleine “mutaties” ingevoerd in de gedragsregels volgens dewelke de nakomelingen aan voedsel proberen te raken

Resultaat: we zien de evolutie van een groeiende verscheidenheid aan agenten van verschillende “soorten”, die bijvoorbeeld leven als “plant”, “herbivoor”, “parasiet” of “carnivoor”, en daarbij met elkaar concurreren of coöpereren. Deze zijn elk op hun eigen manier aangepast zijn aan het ecosysteem dat ze met zijn allen vormen.

Een fundamentele vraag die zich hierbij stelt is in hoeverre de agenten en/of het ecosysteem complexer worden naarmate de gesimuleerde evolutie langer duurt. Bij een voldoende gesofisticeerde simulatieomgeving (zoals Tierra) zien we het ecosysteem en sommige van de agenten inderdaad complexer worden, maar bereikt dit proces na verloop van tijd een limiet waarboven de complexiteit niet meer lijkt toe te nemen. Tot nu toe zijn de virtuele organismen dan ook nog steeds veel eenvoudiger dan het eenvoudigste levend wezen. Dit heeft artificial life onderzoekers ertoe gebracht om meer fundamenteel te beginnen nadenken over de evolutie van de complexiteit, in de hoop te komen tot een “open-ended” (onbegrensde) simulatie van evolutie. Deze zou op zijn minst in staat moeten zijn om opeenvolgende hiërarchische systeemniveaus (bvb. cellen en multicellulaire organismen) voor te brengen. We zullen dit probleem later op een meer theoretische manier behandelen wanneer we het over supersysteemtransities hebben.

6.7. Gesimuleerde maatschappijen

Multiagent simulaties zijn recent erg populair geworden in wetenschappen zoals economie, sociologie en psychologie, om sociale interacties en de vorming van markten en maatschappijen te begrijpen. Het uitgangspunt is gelijkaardig aan dat van een artificieel ecosysteem, behalve dat de agenten nu allemaal tot dezelfde “soort” behoren, en dus niet verondersteld worden om elkaar “op te eten” of uit te schakelen. De agenten streven niet zozeer naar “voedsel”, maar naar “winst” of “beloning” (wat in de simulatie grotendeels op hetzelfde neer komt). De nadruk ligt op de strategieën die agenten gebruiken om met elkaar transacties uit te voeren, en hoe uit die individuele strategieën collectieve of sociale organisatie ontstaat. Dergelijke strategieën om uit de interactie met anderen zoveel mogelijk “winst” te behalen werden reeds wiskundig beschreven in de zogenaamde speltheorie, ontwikkeld in 1947 uit een samenwerking tussen de cyberneticus-wiskundige John von Neumann en de econoom Oskar Morgenstern. Maar zodra er meerdere agenten deelnemen die zich niet allemaal aan dezelfde regels houden, wordt de situatie te

complex om wiskundig te kunnen beschrijven. In dat geval stapt men over op simulaties.

Het meest gebruikte uitgangspunt is het spel van het “*dilemma van de gevangenen*” (Prisoners’ dilemma), met de volgende regels:

- een agent kan een andere agent helpen (“coöpereren”) of bedriegen (“defecteren”)
- als beiden helpen, worden beiden beloond
- als beiden bedriegen, worden beiden bestraft
- als één agent helpt, en de andere bedriegt, dan gaat de bedrieger echter met de winst lopen (groter dan wanneer hij niet zou bedrogen hebben), terwijl de helper benadeeld wordt (meer dan wanneer hij niet zou geholpen hebben)

De bedoeling is dat een agent zoveel mogelijk voordeel, en zo weinig mogelijk nadeel accumuleert. Verschillende agenten hebben verschillende gedragsregels of strategieën om het spel te spelen: afhankelijk van wat de andere agent in de vorige “zetten” deed (helpen of bedriegen), beslist de agent hoe hij zich nu zal gedragen.

Het probleem met het Prisoners’ Dilemma is dat de collectief beste strategie is als beiden elkaar zou helpen, terwijl de individueel beste strategie is om zelf te bedriegen, en te hopen dat de andere dat niet zal doen. Het doel van de simulatie is om na te gaan of collectieve samenwerking kan ontstaan zelfs als individuele profiteurs op korte termijn het grootste voordeel boeken. Deze simulatie werd als eerste opgezet door de politieke wetenschapper Robert Axelrod, zoals beschreven in zijn boek “The Evolution of Cooperation” (1984). Axelrod maakte er een toernooi van, waarbij verschillende specialisten in speltheorie werden uitgenodigd om strategieën te bedenken om over de opeenvolgende rondes van het spel (waarbij een agent steeds met andere deelnemers geconfronteerd wordt) zo veel mogelijk voordeel te behalen.

Resultaat: de agenten die de zeer simpele “tit for tat” strategie volgen (als jij helpt, help ik ook; als jij bedriegt, bedrieg ik ook), doen het gemiddeld het beste (en wonnen dus het toernooi). De reden is dat profiteurs geen voordeel halen als ze tegen een “tit for tat” agent spelen omdat ze van hetzelfde laken een broek krijgen, terwijl “tit for tat” agenten die tegen helpers of tegen elkaar spelen voordeel halen uit hun samenwerking.

Om te zien of ook de lange termijn evolutie tot meer samenwerking leidt, voeren we enkele meer complexe variaties in: de agenten die veel voordeel halen reproduceren, de andere sterven uit. Resultaat: alleen “tit for tat” blijft tenslotte over, en iedereen helpt iedereen.

Als bij de reproductie mutatie van de gedragsregels toegelaten is, ontstaan er ook agenten die in alle omstandigheden helpen. Deze doen het binnen een “tit for tat” populatie immers even goed, omdat iedereen toch iedereen helpt. De aanwezigheid

van deze “te brave” agenten schept nu echter een kans voor de evolutie van bedriegers die hen zonder beperking kunnen uitbuiten, wat het aantal brave agenten doet verminderen. De bedriegers hebben als gevolg weer bijna uitsluitend af te rekenen met “tit for tat”, wat hun winstkansen onderdrukt. Resultaat: “tit for tat” blijft in de meerderheid, maar met fluctuerende subpopulaties van pure helpers en pure bedriegers.

Dit lijkt een eenvoudige maar realistische voorstelling van de situatie in onze maatschappij: de meeste mensen zijn wel bereid mee te werken, maar verwachten daarvoor vroeg of laat ook iets terug te krijgen (wederzijds altruïsme). Als deze verwachting niet gerealiseerd wordt, stopt hun bereidwilligheid. Sommige mensen daarentegen zijn naïef of braaf genoeg om in alle omstandigheden behulpzaam te blijven. Dat maakt het mogelijk voor een kleine schare bedriegers om toch voordeel te halen zonder daar iets voor terug te doen. Het zijn deze valsspelers die de meerderheid eraan herinneren dat ze moeten voorzichtig blijven, zelfs al gaan ze ervan uit de meeste mensen eerlijk zijn.

Laten we nog enkele meer complexe variaties bekijken. Als de agenten enkel interageren met hun onmiddellijke burens, dan ontstaan er zones waarin iedereen elkaar helpt, en zones waarin iedereen elkaar bedriegt, met tussenin overgangszones waarin zowel coöperatie als misbruik van vertrouwen voorkomen. Dit lijkt een niet onrealistische voorstelling van de huidige wereld, waarin de meeste landen een sociaal, economisch en wettelijk systeem hebben dat betrouwbare, coöperatieve transacties garandeert, maar waarin enkele gebieden zoals Somalië of Afghanistan leven onder een anarchie waar enkel het recht van de sterkste geldt.

Als de agenten opgedeeld wordt in verschillende “groepen” of “families” (herkenbaar aan specifieke labels), dan zullen ze typisch leden van de eigen groep vertrouwen en helpen, zelfs als ze nog niet de kans hebben gehad hun gedrag te observeren, terwijl ze leden van andere groepen a priori wantrouwen. De reden is dat leden van dezelfde groep normaal ook dezelfde regels volgen, zodat men erop kan vertrouwen dat ze coöperatief gedrag op dezelfde wijze zullen beantwoorden. Het wantrouwen van andere groepen waarvan men de regels niet kent is een voorzorgsmaatregel die ertoe leidt dat groepen met bedriegers geen kans maken en tenslotte zullen weggeselecteerd worden, terwijl groepen met allemaal helpers voordeel accumuleren en dus groeien. Dit verklaart wellicht waarom “mislukte staten” zoals Somalië en Afghanistan een zeer kleine minderheid vormen, die waarschijnlijk ook niet lang in die toestand zullen blijven, ten dele omdat individuen wanneer ze de kans krijgen uit die regio’s emigreren naar meer coöperatieve gebieden.

6.8. Gesimuleerde cultuur

Een andere interessante, maar alsnog minder gekende, toepassing van de computersimulatie van agentsystemen is het ontstaan van cultuur. Cultuur kan hierbij gedefinieerd worden als kennis of gedragingen die van agent tot agent overgedragen worden. Naar mijn weten werd de eerste zulke simulatie, “Meme and Variations” geprogrammeerd door Liane Gabora, een Canadese onderzoekster die enkele jaren aan het Centrum Leo Apostel aan de VUB verbonden is geweest. De basisregels van deze en gelijkaardige simulaties zijn de volgende:

- de agenten zoeken de beste oplossing van een probleem
- zij kunnen zelf een oplossing proberen te vinden door “trial-and-error”,
- ze kunnen ook de oplossing van de beste van hun buuragenten overnemen door deze na te bootsen

Resultaat: de groep vindt de beste oplossingen als ze deels anderen nabootsen, deels individueel uitvinden. Als ze enkel imiteren, is er geen creativiteit en kan de bestaande oplossing niet verbeterd worden. Als ze enkel individueel proberen, wordt er veel energie verspild aan mislukte pogingen en nodeloze herhalingen, en moeten ze elk opnieuw “het warm water uitvinden”. In het ideale geval, dat bereikt wordt door te experimenteren tot men de optimale proportie van imitatie tot innovatie gevonden heeft, zullen goede oplossingen zeer snel over de “bevolking” verspreid worden, maar zonder dat dit verhindert dat bepaalde agenten toch nog met een betere afkomen.

In een meer complexe variant, zullen de agenten niet zo maar slaafs hun burens nabootsen, maar verschillende ideeën afkomstig van verschillende agenten op basis van verschillende criteria beoordelen. Ze zullen daarbij de meest “overtuigende” ideeën overnemen, en die zelf aan anderen proberen over te dragen. De meest overtuigende ideeën zullen zich op die manier snel verspreiden over de groep, maar daarbij met elkaar in concurrentie treden wanneer het ene idee in contradictie is met het andere. Als we nu ook nog variatie van de zich verspreidende ideeën (memen) toelaten, krijgen we een simulatie van een culturele evolutie, zoals we die bijvoorbeeld zien bij de diffusie van modeverschijnselen, moppen, of geruchten.

Mijn VUB-collega, de sociaal psycholoog Frank Van Overwalle, heeft, met mijn inbreng, hiervoor een psychologisch realistisch simulatiemodel ontwikkeld, “Talking Nets”, dat bijzonder belang hecht aan het onderling vertrouwen tussen de agenten. Het basisidee is dat je weinig geloof zal hechten aan de uitlatingen van iemand met wie je het in het verleden vaak oneens bent geweest, terwijl je wel goed zal luisteren naar de ideeën van iemand met wie je het normaal steeds eens bent. Anderzijds zal degene die je niet vertrouwt, je scepticisme kennende, geneigd zijn om extra moeite te doen om je toch proberen te overtuigen. Het resultaat is een complexe dynamiek die kan leiden tot het opsplitsen van een groep in “subculturen”, die er zeer verschillende opvattingen op na houden.

Hoofdstuk 7. Complexiteit: fundamentele concepten

7.1 Een relationele ontologie

Na het voorgaande overzicht van de verschillende historisch ontwikkelde benaderingen van het probleem van complexiteit en evolutie, is het tijd om—gebruik makend van de inzichten die we verworven hebben—naar de fundamentele van de problematiek af te dalen. Dit zal ons toelaten de kernideeën te formuleren die expliciet of impliciet in deze verschillende benaderingen kunnen worden teruggevonden. Voortbouwend op deze grondslagen kunnen we dan proberen om stap voor stap te werken naar een coherente aanpak van de meest geavanceerde problemen, zoals het ontstaan van het leven, van de maatschappij, of van de menselijke intelligentie.

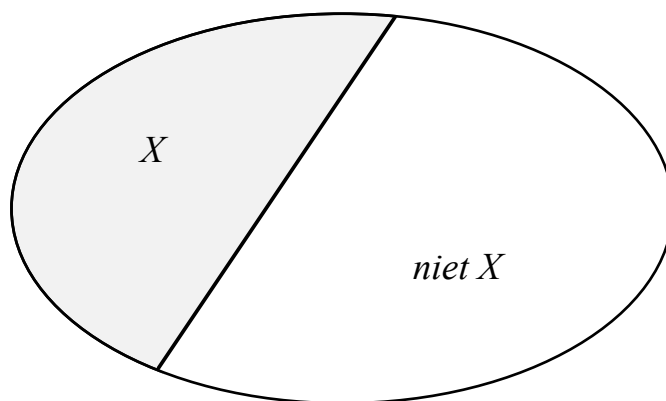
Ontologie of “zijnsleer” kan gedefinieerd worden als de tak van de filosofie die de meest fundamentele categorieën of verschijnselen bestudeert, dit wil zeggen de essentie of het *zijn* zelf. Met andere woorden we gaan hier op zoek naar de basiscomponenten of elementen van de werkelijkheid. In het Newtoniaanse wereldbeeld zijn dit *deeltjes*, dit wil zeggen kleine stukjes materie, en energievelden of *krachten*, die de deeltjes doen bewegen volgens welbepaalde banen in ruimte en tijd. De Newtoniaanse ontologie is dus *materialistisch*.

In het evolutionair-systemisch wereldbeeld is dit uitgangspunt onbruikbaar. We willen immers *emergente* eigenschappen en *organisatie* onafhankelijk van de materiële componenten kunnen beschrijven. We moeten daarom naar meer abstracte elementen zoeken. Deze abstracte elementen moeten van in den beginne complexiteit mogelijk maken, in plaats van deze onmiddellijk te reduceren tot onafhankelijke bouwstenen. Toch moeten de elementen zelf zo eenvoudig mogelijk zijn, want anders lopen we het risico om van in den beginne te verdrinken in de complexiteit.

Dit kan opgevangen worden door de elementen *relationeel* te maken, dit wil zeggen intrinsiek van elkaar afhankelijk of aan elkaar gekoppeld, in plaats van op zichzelf staand. Elk element kan enkel bestaan *in relatie tot* een andere element, en het netwerk van relaties dat aldus ontstaat, zal de basis vormen van complexe organisaties.

7.2 Distincties

Wellicht onze meest fundamentele handeling is *onderscheiden*. Een onderscheid of **distinctie** verdeelt de wereld in twee delen: wat tot de onderscheiden categorie behoort, en wat er niet toe behoort. Enkele voorbeelden: groot—klein, licht—donker, links—rechts, levend—dood, mooi—lelijk.... Onderscheiden fenomenen worden beschouwd als *verschillend* in tenminste één betekenisvol aspect. Fenomenen die niet onderscheiden worden, worden impliciet beschouwd als *gelijk*, dit wil zeggen behorende tot dezelfde categorie, met dezelfde eigenschappen. Een distinctie is geen “ding”, geen op zichzelf staand element (zoals een elementair deeltje), maar een relatie, namelijk de relatie tussen een categorie verschijnselen met een bepaalde eigenschap en de ontkenning of afwezigheid van die eigenschap.



Zonder distincties te maken zou het onmogelijk zijn om in onze waarneming of ervaring enige structuur te herkennen, of er iets zinvols over te zeggen. Met andere woorden, zonder distincties wordt elke vorm van waarnemen, denken of communiceren onmogelijk. Men kan aan een fenomeen slechts een betekenis geven door het in een bepaalde categorie X te plaatsen (dit wil zeggen de eigenschap X toe te kennen), en aldus aan te geven hoe het verschilt van andere fenomenen die niet tot X behoren. Een verschil of distinctie is daarom het meest primitieve element van elke beschrijving of theorie.

Merk op dat een distinctie niet exact of absoluut hoeft te zijn: er zijn intermediaire gevallen mogelijk waarbij we niet met zekerheid kunnen zeggen of iets nu al dan niet tot categorie X behoort, hooguit dat het in zekere mate de eigenschap X heeft. Bijvoorbeeld, is een man van 1m75 nu “groot” of “niet groot” (klein)? We kunnen hooguit zeggen dat hij toch niet zo klein is, hoewel we hem niet echt “groot” durven noemen. Een man van 2m20 daarentegen zullen we zonder aarzelen als “groot” classificeren. Dergelijke categorieën noemt men in de wiskunde *vaag* (“fuzzy” in het Engels): de scheidingslijn tussen X en niet- X is wazig, en waar we ze leggen zal dikwijls afhangen van de context.

De abstracte notie van distinctie vindt men terug in alle algemene voorstellingsvormen, zoals taal, logica, wiskunde of systeemtheorie, als fundament waarop meer concrete beschrijvingen gebouwd worden. Enkele voorbeelden van zulke fundamentele, abstracte distincties:

taal:	ja $\leftrightarrow$ nee
kennis:	waar $\leftrightarrow$ vals
informatica:	1 $\leftrightarrow$ 0
logica:	propositie $\leftrightarrow$ negatie
wiskunde:	verzameling $\leftrightarrow$ complement
topologie:	binnen $\leftrightarrow$ buiten
systeemtheorie:	systeem $\leftrightarrow$ omgeving
waarneming:	figuur $\leftrightarrow$ achtergrond

Hoewel deze klassieke voorstellingsvormen, die onder andere aan de basis liggen van het Newtoniaanse wereldbeeld, expliciet uitgaan van distincties, vergeten ze in het algemeen erbij te vertellen dat distincties niet los van elkaar kunnen bestaan. Het Newtoniaanse wereldbeeld is immers analytisch of reductionistisch: het verklaart complexe verschijnselen door deze op te splitsen in verschillende elementen of eigenschappen. Naast deze reductionistische methode hebben we ook nood aan een holistische aanpak, die de onderscheiden elementen weer tot een geheel samenbindt. Dit brengt ons tot het tweede type relationeel element in onze ontologie: connecties.

7.3 Connecties

Distincties zijn pas zinvol als ze leiden tot andere distincties. Dit wil zeggen dat er een verband of **connectie** moet bestaan tussen distincties of categorieën, zodat onze kennis over de ene categorie ons ook iets kan zeggen over de andere. We kunnen dergelijke connectie het gemakkelijkste uitdrukken in de vorm van de conditie-conditie regels die we vroeger hebben geïntroduceerd, waarbij een conditie uitdrukt dat een waarneming tot een bepaalde categorie behoort. Bijvoorbeeld:

- ALS iets tot categorie X behoort, DAN behoort het ook tot categorie Y : $X \rightarrow Y$
- ALS iets een banaan is, DAN is het krom: $\text{banaan} \rightarrow \text{krom}$.
- ALS je een zwaar voorwerp loslaat, DAN valt het: $\text{loslaten} \rightarrow \text{vallen}$.

Zulke connectie laat ons toe om een categorie in verband te brengen met een andere, en onze kennis over de ene te gebruiken om iets dat we nog niet wisten af te leiden over de andere. Connecties representeren dus de *onderlinge afhankelijkheid* tussen distincties.

Merk op dat connecties, net zoals distincties, vaag kunnen zijn: gegeven de eerste categorie (ALS), kunnen we wel iets zeggen over de tweede categorie (DAN), maar niet met zekerheid. Bijvoorbeeld: *banaan* → *geel*. Niet alle bananen zijn geel (sommige zijn groen of bruin), maar gegeven dat een object een banaan is, is er toch een meer dan gewone waarschijnlijkheid dat dat object een gele kleur heeft. Zoals we later zullen zien, betekent zulke conditionele waarschijnlijkheid dat de connectie ons wel degelijk **informatie** geeft over dat object, zelfs al hebben we geen zekerheid.

Een onderscheid dat niet tot enig ander onderscheid leidt, is waardeloos, onbruikbaar, of zinledig, omdat ze geen betrekking heeft tot de rest van de wereld. Vanuit een cybernetisch oogpunt zouden we kunnen zeggen dat de functie van waarneming of communicatie is om ons potentieel nuttige informatie te geven, waarmee we bijvoorbeeld zouden kunnen beslissen welke actie te ondernemen, of te voorspellen welke andere conditie nu ook zou optreden. In de woorden van de cyberneticus Bateson: *een verschil moet een verschil maken* wil het ons enige informatie te verschaffen.

Op ontologisch vlak werd dit idee het meest expliciet geformuleerd door de filosoof Leibniz als het principe van de **identiteit van de ononderscheidbaren**. Het principe zegt dat als twee veronderstelde fenomenen *a* en *b* op generlei wijze onderscheidbaar zijn, dan zijn ze identiek ($a = b$), en is er dus in feite maar één fenomeen. Onze aanvankelijke theorie die over twee fenomenen sprak, kan dus vereenvoudigd worden door er maar één over te houden. Dit is een zeer belangrijk kennistheoretisch én ontologisch principe, dat echter dikwijls verwaarloosd wordt, ook door zeer intelligente denkers.

Voorbeeld: de “zombie”

Dit voorbeeld werd bedacht door de filosoof Chalmers om te proberen aan te tonen hoe moeilijk het is om het bewustzijn te begrijpen. Chalmers definieert een zombie als een wezen dat er exact hetzelfde uitziet als een mens, en dat zich in alle mogelijke opzichten gedraagt als een mens, maar dat echter geen gevoel of “bewustzijn” heeft bij zijn handelingen—een beetje zoals een robot die taken mechanisch uitvoert volgens het ingevoerde programma, zij het zonder enige emoties. “Wat is het nu juist dat een echte mens meer heeft dan een zombie?”, vraagt Chalmers zich dan af. Hij definieert dit als het “moeilijke probleem van het bewustzijn (“the hard problem of consciousness”), dat per definitie niet op een wetenschappelijke manier kan opgelost worden gezien de wetenschap alleen maar met waarneembare verschillen werkt.

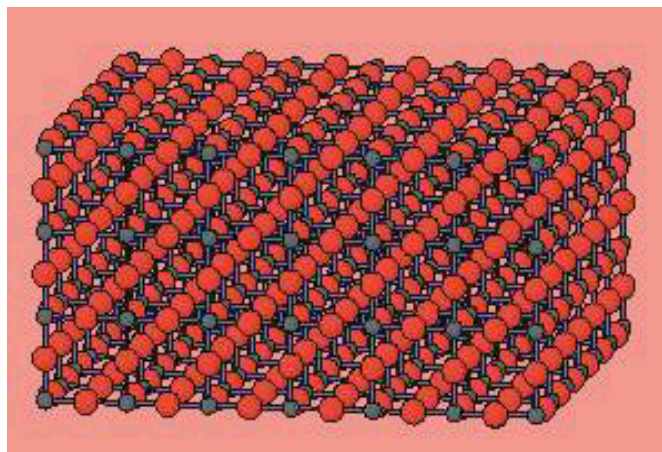
Als we het principe van Leibniz volgen, zijn gewone mensen en zombies echter identiek, want het is onmogelijk de ene van de andere te onderscheiden. De distinctie “bewustzijn ↔ geen bewustzijn” is pas zinvol als wezens zonder bewustzijn op de één of andere manier onderscheidbaar zijn van anderen,

bijvoorbeeld in de manier waarop ze zich gedragen. Dit is bijvoorbeeld hoe wij zelf vaststellen of iemand bij bewustzijn is, of dat iemand zich bewust is van een bepaalde situatie, zoals een aanstormende auto. Als we dat niet zouden doen, dan zouden we even goed kunnen veronderstellen dat alle mensen behalve wijzelf zombies zijn, gezien we toch nooit zeker kunnen weten of ze nu echt wel dezelfde gevoelens hebben als wij, of deze alleen maar simuleren. Chalmers' "moeilijke probleem van het bewustzijn" is volgens het principe van Leibniz dus een schijnprobleem, dat de zaken alleen maar nodeloos ingewikkeld voorstelt.

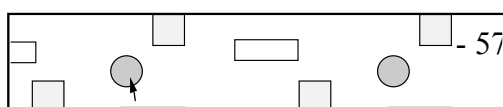
Hoewel het misschien niet voor iedereen evident is dat distincties enkel zin hebben als ze geconnecteerd zijn, spreekt de omgekeerde vaststelling vanzelf: connecties hebben pas zin als er verschillende fenomenen zijn om te connecteren. We kunnen dus besluiten dat distincties en connecties allebei nodig zijn om de werkelijkheid te beschrijven.

7.4 Orde

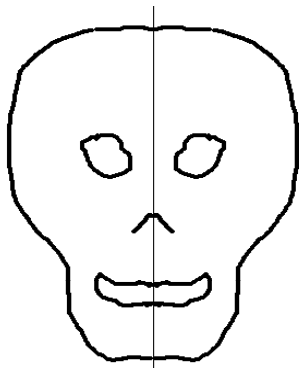
Een begrip dat altijd weer opduikt in discussies over complexiteit, zelforganisatie en aanverwante fenomenen is het concept **orde**. In de praktijk blijkt niemand dit begrip echter goed te definiëren. Intuïtief associëren wij orde met regulariteit of regelmaat, dit wil zeggen het volgen van vastgestelde regels. Bijvoorbeeld, de magneetjes in het gemagnetiseerde materiaal (sectie 3.2) wijzen allemaal mooi in dezelfde richting, zonder dat er één afwijkt. In een kristal (een ander resultaat van zelforganisatie) bevinden alle moleculen zich op exact dezelfde afstanden van elkaar, in een perfect geometrisch patroon (zie tekening hieronder).



De wiskunde biedt ons een exact gedefinieerd begrip om dit soort situaties te beschrijven, namelijk *symmetrie*. Een patroon is symmetrisch als het invariant is onder bepaalde transformaties. Een transformatie is een wiskundige bewerking die één deel van het patroon op een ander deel afbeeldt. Invariantie betekent dat dergelijke interne verplaatsing niets verandert aan het patroon. Dit is enkel mogelijk als de verschillende onderdelen van het patroon aan elkaar gelijk zijn.



Dit wordt best duidelijk gemaakt aan de hand van een illustratie. In de tekening hierbij zie je een regelmatig patroon dat eventueel op een stuk behangpapier zou kunnen voorkomen. Dit patroon is symmetrisch omdat we het kunnen verschuiven volgens de aangeduide pijlen, zonder het uitzicht te veranderen. Dit is omdat de cirkels, vierkanten en andere elementen van het patroon herhaald worden op even afstanden, in de richting van de pijlen. Dit is dezelfde soort “translatiesymmetrie” die men vindt in behangpapier of kristallen.



Een ander voorbeeld is spiegelsymmetrie, zoals in de tekening van de schedel hiernaast, waar de linkerhelft exact dezelfde is als de rechterhelft, op een spiegeling na. Symmetrie betekent dat het volstaat een deelpatroon te kennen om ook de andere delen van het patroon te kunnen reconstrueren. Bijvoorbeeld, de linkerhelft van de schedel is voldoende om ook de rechterhelft te kunnen reconstrueren, terwijl voor het “behangpapier” een deelpatroon met één cirkel, vierkant en rechthoek voldoende is om door verschuivingen over regelmatige afstanden de rest te genereren.

Het ene basispatroon bepaalt of determineert de configuratie van alle andere, op een kleine “verschuiving” na. Dit is een speciaal geval van **connectie**: de ene component bepaalt de andere. ALS we de configuratie van het eerste patroon kennen, DAN kennen we ook die van al de volgende. De zich herhalende patronen zijn allemaal geconnecteerd, maar intrinsiek verschillen ze weinig.

Als we deze vaststelling nu veralgemenen tot orde in het algemeen, dan komen we tot de volgende conclusie: *orde wordt gekenmerkt door veel connecties, maar weinig distincties*. In een geordend systeem zijn de componenten homogeen of repetitief. Het prototype van zulk systeem is een *kristal*: hier zijn alle moleculen identiek, georiënteerd in dezelfde richting, en gepositioneerd op dezelfde afstanden van elkaar. Als je de configuratie van één molecule kent, dan ken je ze allemaal.

Als we deze vaststelling nu veralgemenen tot orde in het algemeen, dan komen we tot de volgende conclusie: *orde wordt gekenmerkt door veel connecties, maar weinig distincties*. In een geordend systeem zijn de componenten homogeen of repetitief. Het prototype van zulk systeem is een *kristal*: hier zijn alle moleculen identiek, georiënteerd in dezelfde richting, en gepositioneerd op dezelfde afstanden van elkaar. Als je de configuratie van één molecule kent, dan ken je ze allemaal.

Laat ons deze definitie van orde doortrekken tot de *limiet van maximale orde*, dit wil zeggen alleen connecties, geen distincties. Dit betekent dat elk deel gelijk is aan elk ander deel, hoe klein het beschouwde deel ook is. Met andere woorden: er is geen enkele distinctie of differentiatie, alles is perfect homogeen, men kan niets onderscheiden van zijn omgeving. Dit betekent zo veel als perfecte *leegte* of vacuüm. Dit volgt uit het principe van de identiteit der ononderscheidbaren: als er geen componenten of delen kunnen onderscheiden worden, dan zijn er geen delen, en dus is er niets.

7.5 Wanorde

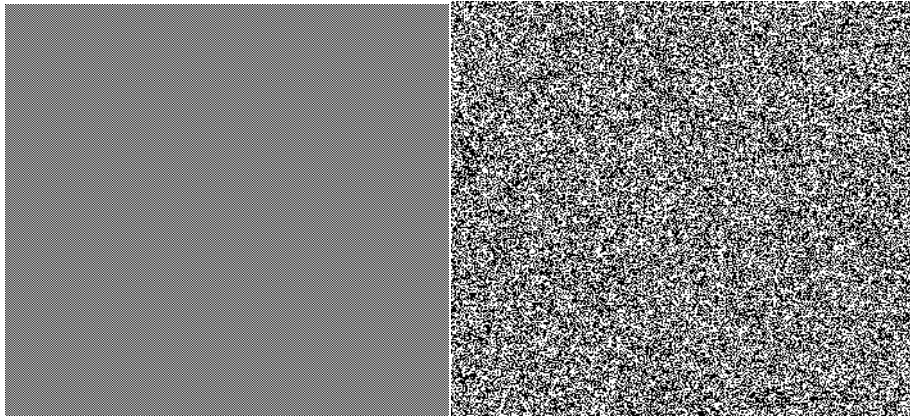
Wanorde, een ander kernbegrip in de complexiteitsstudies, kan nu gedefinieerd worden als het tegengestelde van orde. Dit wil zeggen: *wanorde wordt gekenmerkt door veel distincties, maar weinig connecties*. In een wanordelijk systeem zijn de onderdelen verschillend en onafhankelijk van elkaar. Het prototype van zulk systeem is een *gas*: de gasmoleculen bewegen volledig onafhankelijk van elkaar, en hebben allemaal verschillende snelheden, richtingen, posities en onderlinge afstanden. Zelfs als je perfect de toestand van één gasmolecule kent, dan weet je hiermee nog niets over de andere moleculen.

Het eigenaardige is nu echter dat een gas *statistisch* homogeen is: de *waarschijnlijkheid* om een bepaalde molecule in een bepaalde plaats aan te treffen is dezelfde voor alle plaatsen. Moest dit niet het geval zijn dan is er per definitie statische afhankelijkheid en dus connectie. De wet van de grote getallen zegt dat als we een zeer groot aantal gevallen beschouwen, dan wordt wat waarschijnlijk is ook wat in de praktijk het geval is: omdat er zo veel moleculen zijn, is het gemiddelde (verwachte) aantal moleculen in een bepaald gebied in de praktijk zo goed als gelijk aan het feitelijke aantal moleculen. Gezien de waarschijnlijkheden en dus de gemiddelden homogeen verdeeld zijn, betekent dit dat ook de moleculen zo goed als homogeen verdeeld zijn. Een gas heeft dan ook geen enkele structuur of vorm.

Laten we nu ook naar de *limiet van maximale wanorde* gaan: allemaal distincties, geen connecties. Dit wil zeggen dat elke deel, hoe klein ook, verschillend en onafhankelijk is van elk ander deel. Zulke situatie kunnen we ons moeilijk voorstellen. Toch is dit een goede beschrijving van het vacuüm zoals dit gepostuleerd wordt in de kwantummechanica. Volgens deze theorie produceren kwantumfluctuaties constant en in elke plaats van de lege ruimte “virtuele deeltjes”, die quasi onmiddellijk weer verdwijnen, zonder enig spoor na te laten. Elk punt van de ruimte varieert dus voortdurend, onafhankelijk van elk ander punt. Toch ziet dergelijke ruimte er in de praktijk even leeg uit als de lege ruimte van de Newtoniaanse mechanica.

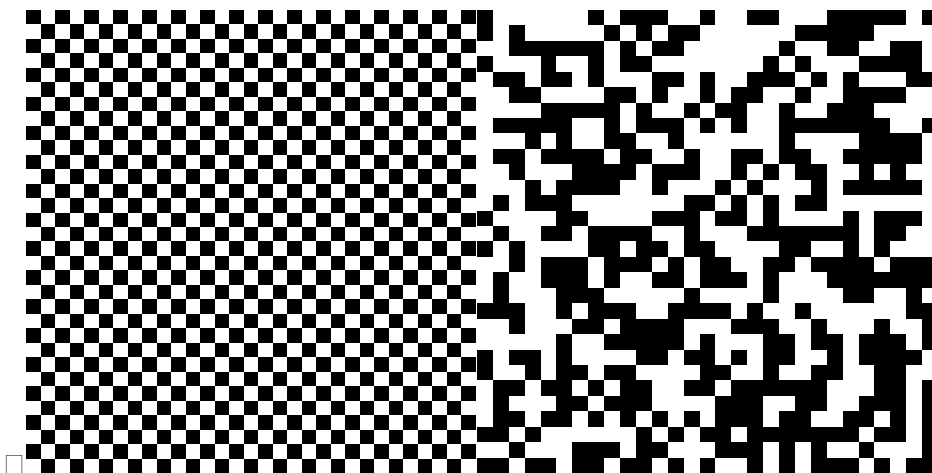
Een meer concrete illustratie is het patroon van “sneeuw” dat je soms ziet op een televisiescherm wanneer dit geen beeldsignaal ontvangt. In dit geval probeert de televisie uit de “ruis” van elektromagnetische golven op de achtergrond toch een beeld op te bouwen. Hierbij is elke pixel (beeldpunt) onafhankelijk van elke andere, en verandert de kleurwaarde van deze pixel voortdurend en op onvoorspelbare wijze, wat de indruk geeft van door elkaar warrelende donkere en lichte stippen. Als je het scherm echter van voldoende ver bekijkt zodat je de afzonderlijke beeldpunten niet meer kan onderscheiden, lijkt het scherm uniform grijs. Het bijhorende geluid heet (witte) ruis. Wanneer zulke ruis niet te luid staat, zullen je hersenen er al snel geen aandacht meer aan besteden, zodat het is alsof er helemaal geen geluid meer is.

Conclusie: in de limiet krijgen we weer leegte. Dit betekent dat de limieten van maximale orde en maximale wanorde in elkaar vloeien. Het is pas als orde of wanorde niet perfect zijn dat we ze duidelijk kunnen onderscheiden.



Illustratie: orde (links) en wanorde (rechts) produceren een uniform grijs wanneer ze van voldoende ver bekeken worden

Als je nu echter inzoomt (tekening hieronder) en deze zelfde patronen van dichterbij bekijkt, dan wordt het duidelijk dat het linkse perfect voorspelbaar of regelmatig is, en het rechtse geheel onvoorspelbaar.



7.6 Complexiteit

- Wat is **complexiteit**?

Het woord “complex” is afgeleid van het Latijnse *complexus*, wat zoveel betekent als samengevouwen, verstrengeld of omhelzend. Dit betekent dat iets complex of “ingewikkeld” is als het twee of meer delen heeft die zodanig met elkaar verbonden of verstrengeld zijn dat ze moeilijk uit elkaar te halen zijn. Dit wil zeggen: onderscheidbare componenten die toch aan mekaar vastzitten. Een complex is dus gekenmerkt door zowel **distincties** als **connecties**. Later heeft “complex” ook de betekenis “moeilijk” gekregen, gezien systemen of problemen met veel, onderling afhankelijke componenten moeilijk te analyseren en dus te begrijpen of op te lossen zijn.

We kunnen hieraan toevoegen dat iets meer complex wordt naarmate het meer distincties en meer connecties heeft. Vanuit onze voorgaande analyse kunnen we dan besluiten dat complexiteit *tussen orde* (veel connecties) *en wanorde* (veel distincties) *in* bestaat. In de CAS benadering noemt men dit tussengebied ook wel “de rand van de chaos” (“the edge of chaos”), dit wil zeggen het niemandsland tussen starre, “bevroren” orde, en turbulente, chaotische wanorde. Dit is het gebied waar de “interessante” verschijnselen plaatsgrijpen: zelforganisatie, leven, evolutie, denken... Noch een kristal, waar alles netjes op zijn plaats blijft zitten, noch een gas, waar alles ongecontroleerd door elkaar warrelt, zijn echt interessant.

Dit is niet enkel een subjectieve beoordeling. Zoals blijkt uit de illustraties van orde en wanorde zijn onze hersenen zo ingesteld dat ze al snel geen aandacht meer besteden aan uniforme patronen, of deze nu intrinsiek ordelijk of wanordelijk zijn. Een perfect zuivere toon (sinusoïde) of een zeer regelmatig gebrom (zoals het zoemen van een ijskast) zal je al snel niet meer horen, evenmin als een voortdurend geruis. Dit soort van achtergrondgeluiden zullen je typisch pas opvallen wanneer ze plotseling stoppen, dit wil zeggen wanneer de homogeniteit doorbroken wordt. Je oog zal evenmin blijven stilstaan bij een uniforme, onveranderlijke achtergrond, maar zich direct richten op datgene wat het patroon doorbreekt, wat eruit springt als zijnde anders of onverwacht. Hoe complexer de structuur, hoe meer ze zal de aandacht trekken—en dit bewust of onbewust.

- Voorbeelden van complexe systemen:

- het regenwoud: miljoenen verschillende soorten planten en dieren (distincties), die allemaal op een of andere manier van elkaar afhankelijk zijn (connecties)
- de hersenen: miljarden neuronen (distincties), verbonden door biljoenen synapsen (connecties).

- de maatschappij: miljarden individuen die allemaal een andere activiteit ontplooiën (distincties), maar die toch op de meest uiteenlopende manieren met elkaar wisselwerken (connecties).

- Hoe complexiteit meten?

Er zijn tientallen pogingen geweest om complexiteit te definiëren op een meetbare, kwantificeerbare manier, zodat we van een willekeurig verschijnsel zouden kunnen bepalen hoe complex het nu juist is. Geen enkele van die definities is echter algemeen bruikbaar.

Eén van de bekendste definities is *de lengte van de kortst mogelijke beschrijving* van het verschijnsel. Het idee is dat hoe ingewikkelder een fenomeen, hoe lastiger het wordt om het in zijn geheel te beschrijven. In deze definitie zit echter een probleem: welke taal gebruik je voor de beschrijving? Sommige talen (bijvoorbeeld de wiskunde) zijn zeer efficiënt om bepaalde verschijnselen te beschrijven (bijvoorbeeld een ingewikkelde geometrische figuur zoals een fractaal), maar zeer inefficiënt voor andere (bijvoorbeeld romantische gevoelens). Voor een gegeven beschrijving weet je nooit zeker dat die beschrijving niet kan ingekort worden door een andere, meer efficiënte taal te gebruiken.

De reden voor deze moeilijkheden is dat complexiteit niet echt meetbaar is. Er zijn immers veel verschillende manieren om distincties en/of connecties toe te voegen en dus complexiteit te doen toenemen, maar deze zijn niet onderling vergelijkbaar. Het totaal aantal distincties en connecties proberen te tellen is een beetje zoals appels en citroenen optellen. Bijvoorbeeld, is een helikopter complexer dan een vliegtuig of dan een tank? Deze fenomenen zijn niet echt vergelijkbaar. Een motorfiets, anderzijds, is complexer dan een fiets, gezien deze alle onderdelen van de fiets bevat, maar plus nog een boel extra onderdelen. We mogen besluiten dat complexiteit hooguit een *partiële* orderrelatie bepaalt. Dit wil zeggen dat niet alles kan geordend worden volgens graad van complexiteit: A kan complexer zijn dan B , of omgekeerd, maar A en B kunnen ook onvergelijkbaar zijn.

7.7 Differentiatie en integratie

We zijn echter niet zozeer geïnteresseerd in de statische complexiteit van een fenomeen, maar in de evolutie ervan. We willen in het bijzonder nagaan of de complexiteit eerder toeneemt of afneemt. Complexiteit neemt toe volgens onze definitie als het aantal distincties en/of het aantal connecties toeneemt.

Toename van distincties met afname van connecties betekent toename van wanorde, niet van complexiteit. Een voorbeeld is het smelten van ijs, waarbij de watermoleculen die aanvankelijk aan mekaar vastzaten in het ijskristal nu onafhankelijk beginnen te bewegen. Een ander voorbeeld is het desintegreren van een maatschappij en het daarbij horende leger in een aantal concurrerende fracties,

zoals bijvoorbeeld in Somalië gebeurd is. Waar de verschillende groepen aanvankelijk aan elkaar verbonden waren door sociale regels en conventies, werken ze nu ieder voor zich, wat de toestand in het land chaotisch en onvoorspelbaar maakt.

Toename van connecties met afname van distincties daarentegen impliceert toename van orde. Een voorbeeld is magnetisatie waarbij onafhankelijk georiënteerde moleculen zich nu allemaal in dezelfde richting aligneren. Een sociaal voorbeeld is het ontstaan van een totalitair systeem dat afwijkende meningen, onafhankelijke partijen, en privé-initiatieven verbiedt en iedereen aan dezelfde strikte regels onderwerpt. Dit maakt de maatschappij veel stabiel en meer voorspelbaar, maar leidt tot stagnatie omdat vernieuwing belemmerd wordt.

Toename van distincties noemen we **differentiatie**, dit wil zeggen: toename van de interne verscheidenheid zodat meer verschillende soorten onderdelen kunnen onderscheiden worden. Toename van connecties heet dan **integratie**, dit wil zeggen: de onderdelen worden meer afhankelijk van elkaar, en vormen meer een samenhangend geheel. **Complexificatie** (complexer worden) kan dan gedefinieerd worden als :

differentiatie + integratie

Een fysisch voorbeeld is de Bénard zelforganisatie: de aanvankelijk onafhankelijke vloeistofmoleculen gaan hun bewegingen coördineren tot één coherente beweging (integratie); anderzijds splitst de homogene vloeistof zich op in afzonderlijke cellen of rollen, elk met hun eigen stromingspatroon (differentiatie). Een biologisch voorbeeld is hoe een embryo zich ontwikkelt van een homogeen hoopje cellen tot een baby klaar om geboren te worden: de cellen gaan zich opsplitsen in verschillende types (bvb. huidcellen, zenuwcellen, botcellen, ...) en aldus organen produceren, die een gecoördineerd, samenhangend geheel vormen. Op historisch vlak zien we dergelijke complexificatie in de evolutie van groepjes jagers-verzamelaars naar agrarische en later industriële samenlevingen: de aanvankelijk verwisselbare individuen gaan steeds meer gedifferentieerde, gespecialiseerde functies vervullen (bvb. krijger, priester, handelaar, notaris, architect, ...), maar worden anderzijds meer van elkaar en van de maatschappelijke structuren afhankelijk (een notaris kan bvb. niet zijn eigen voedsel produceren, maar moet daarvoor beroep doen op een netwerk van landbouwers, transporteurs, winkels, enz.).

7.8 Organisatie

Een laatste term die veel gebruikt wordt in de context van complexe systemen is **organisatie**. We kunnen deze definiëren als:

structuur met functie

Een voorbeeld is een menselijke organisatie, die bestaat uit individuen die volgens bepaalde communicatiekanalen interageren (structuur), en dit met een bepaald economisch of sociaal oogmerk (functie). Een structuur bestaat uit een aantal onderscheidbare onderdelen die met elkaar verbonden zijn. “Structuur” impliceert dus een minimale graad van complexiteit, dit wil zeggen zowel distincties als connecties, maar zonder dat we daarom de nadruk leggen op *veel* distincties of connecties. “Functie” betekent dat deze structuur bovendien een bepaalde doelstelling heeft, een zeker nut beoogt.

Voorbeelden:

- de hersenen zijn duidelijk doelgericht, het regenwoud is dat niet
- een machine (bijvoorbeeld een uurwerk) heeft een functie, een ingewikkelde assemblage van losse onderdelen heeft die niet

Zowel de hersenen als een uurwerk vertonen dus organisatie. Hoewel het regenwoud veel complexer is dan een uurwerk, is het echter niet georganiseerd. Merk op dat volgens deze definitie de traditionele voorbeelden van **zelforganisatie**, zoals kristallisatie, magnetisatie, of Bénard convector, beter onder de noemer “zelfordening” of “zelfcomplexificatie” zouden geplaatst worden, gezien de voortgebrachte structuren niet doelgericht zijn.

Opmerking: De meeste reële complexe systemen hebben echter op zijn minst een impliciet doel: overleven. Zonder deze eigenschap zou natuurlijke selectie ze al lang geëlimineerd hebben. De verschillende onderdelen en verbindingen van zo’n systeem kunnen dan geïnterpreteerd worden als elk op hun eigen manier bijdragend tot dat doel. In die zin vertoont het systeem niet alleen complexiteit, maar ook organisatie. In deze bredere zin kunnen zelfs het regenwoud of de Bénard rollen als “organisaties” beschouwd worden. Het begrip “functie” en het daarmee samenhangende begrip “organisatie” zijn dus in zekere mate vaag, afhankelijk van wat we als “doelgericht” beschouwen.

Hoofdstuk 8. Toestandsruimten

8.1 Modellen

Het is nu onze bedoeling om de intuïtieve concepten “distinctie” en “connectie” te gebruiken als de basiselementen waarmee we een wetenschappelijk model van een willekeurig systeem kunnen bouwen. Een model is een gesimplifieerde voorstelling van een systeem, gemaakt door een agent, die in dit geval de wetenschappelijke waarnemer is. Een concreet voorbeeld van een model is een pop die een baby voorstelt, of een kaart die een stad representeert. Volgens de wetenschappelijke methode is zo’n model in principe bedoeld om het systeem exact en ondubbelzinnig te beschrijven, liefst kwantitatief, hoewel deze beschrijving in de praktijk altijd een benadering zal blijven.

Voor complexe systemen in het bijzonder zal deze benadering maar een heel ruwe, bijna karikaturale schets geven van wat het systeem te bieden heeft. Zo zegt het stratenplan van een stad absoluut niets over de mensen die in deze stad wonen of het klimaat dat er heerst, terwijl ze het culturele leven reduceert tot de inplanting van de voornaamste musea en concertgebouwen. Deze vereenvoudiging van de werkelijkheid is een essentieel kenmerk van een model: als het model even complex zou zijn als het systeem zelf, dan zou het ons geen enkel voordeel bieden en in de praktijk onbruikbaar zijn. Stel je een plattegrond voor van een stad met schaal 1/1, waarbij elke vuilnisbak, steen of paardebloem op ware grootte zou afgebeeld zijn!

Deze simplificatie houdt in dat verschillende waarnemers die in verschillende aspecten van het systeem geïnteresseerd zijn ook verschillende, onderling moeilijk te vergelijken modellen zullen maken. Zo zullen de plannen gebruikt door geologen rekening houden met hoogtelijnen, waterbekkens en bodemsamenstelling, maar niet met straatnamen of functies van gebouwen, terwijl de plannen van sociologen de inkomenscategorieën of etnische samenstelling van de bevolking in de diverse wijken van de stad zullen aangeven.

Het feit dat een model intrinsiek beperkt en subjectief is, betekent echter nog niet dat het wetenschappelijk onbetrouwbaar of nutteloos zou zijn. De voornaamste functie van een model is om voorspellingen te maken over hoe het systeem zich zal gedragen in verschillende omstandigheden, en aldus te helpen om problemen op te lossen of doelen te bereiken. Een stratenplan laat je bvb. toe om te voorspellen dat als je de tweede straat links neemt, en dan de eerst rechts dat je dan oog in oog komt te staan met het operagebouw waarnaar je op zoek bent.

Het is in dit boek niet echt de bedoeling om dergelijke voorspellingen te maken, maar enkel om de basiselementen van een model aan de hand van enkele zeer

eenvoudige voorbeelden illustreren. Dit maakt het mogelijk een aantal fundamentele concepten te begrijpen en te definiëren. Het is ook niet de bedoeling om in technische details te treden of ingewikkelde berekeningen te maken. Het zal volstaan om aan te tonen dat dit in principe mogelijk is, voor degenen die een systeem accuraat willen beschrijven, voorspellen, ontwerpen, of simuleren. Aldus krijgen we een basis om bestaande wetenschappelijke modellen beter te begrijpen.

8.2 Objecten

Elk model van een systeem start met één of meerdere objecten. Objecten zijn de primitieve componenten van een systeemmodel, de stabiele “dingen” of elementen waarin men geïnteresseerd is. Een **object** is een distinctie van het type “systeem-omgeving”, waarin het voorwerp van studie (systeem) onderscheiden wordt van al wat niet tot het studiedomein behoort (omgeving). Een object is dus zelf een systeem, maar zonder dat we de subsystemen daarvan in aanmerking nemen. De eerste simplificatie van het model bestaat erin de objecten als enkelvoudig te beschouwen, zonder deelobjecten. Enkele voorbeelden van mogelijke objecten, afhankelijk van het type model, zijn: “gebouw”, “persoon”, “deeltje”, “auto”.

Om tot het type “object” te behoren moet een distinctie *stabil* zijn. Objecten blijven gelijk aan zichzelf. Ze zijn invariant, dit wil zeggen, ze veranderen niet onder de invloed van allerlei transformaties of manipulaties uitgevoerd op het systeem. Hoewel de toestand of de eigenschappen van een object kunnen variëren, blijft het object per veronderstelling zelf bestaan. Bijvoorbeeld, een auto kan van plaats veranderen, sneller of trager rijden, of zelfs herschilderd worden, maar blijft toch dezelfde auto.

Voorbeeld: De biljartbal

Biljartballen die zich bewegen over een biljarttafel vormen een heel eenvoudig voorbeeld dat we in detail zullen bespreken om de eigenschappen van een model te verduidelijken. Een individuele biljartbal is duidelijk een object: de distinctie tussen binnen- (“systeem”) en buitenkant (“omgeving”) van de biljartbal blijft bestaan, wat ook de positie of beweging van de bal is. Ik kan de bal op allerlei manieren manipuleren, maar de bal zelf blijft bestaan.

Merk op dat een bal in principe ook in stukken kan breken, smelten of verdampen (dit wil zeggen opgesplitst worden in zijn moleculaire componenten). Dit is echter zeer onwaarschijnlijk, en een typisch model van een biljartspel zal met deze mogelijkheden dan ook geen rekening houden. Objecten zijn—zoals alle elementen van een model—geïdealiseerde, vereenvoudigde voorstellingen van een oneindig complexe werkelijkheid.

In een complex systeem kan men in het algemeen *verschillende* objecten of elementaire subsystemen onderscheiden. Bijvoorbeeld, de verschillende

biljartballen op een tafel vormen tezamen een systeem. Enkelvoudige systemen, zoals elementaire deeltjes, hebben geen subsystemen, en vormen een object op zichzelf.

8.3 Eigenschappen

Eigenschappen kunnen gedefinieerd worden als distincties, geattribueerd aan een of meerdere objecten, die variëren van situatie tot situatie. Deze worden ook wel *vrijheidsgraden* (“degrees of freedom”) genoemd, omdat een object de “vrijheid” heeft om verschillende waarden van een eigenschap aan te nemen. Bijvoorbeeld, iemands gewicht (eigenschap) kan variëren van week tot week, maar de persoon (object) blijft daarbij zichzelf. De positie (eigenschap) van een auto varieert met elke verplaatsing, maar het object “auto” blijft invariant. Laat ons de voornaamste types van eigenschappen overlopen.

- Binaire eigenschappen

Dit zijn eigenschappen die het object op een bepaald ogenblik al dan niet heeft. De eigenschap heeft dus twee mogelijke waarden: *aanwezig* of *afwezig*. In logica komt een binaire eigenschap overeen met een elementair predikaat P dat aan een object (soms genoemd subject) o wordt toegekend of geattribueerd: $P(o)$.

Voorbeelden: van binaire eigenschappen: “rood”, “zwaar”, “hoog”, “mooi”...

- “Attributen”

Dit zijn eigenschappen met meer dan twee mogelijke waarden

Voorbeeld: Temperatuur met waarden “ijzig”, “koud”, “lauw”, “warm” en “heet”, of waarden: ... 5° C, 6 °C, 7°C, ...

Het aantal mogelijke waarden van een eigenschap kan *eindig* of *oneindig* zijn. Een oneindig aantal waarden kan *aftelbaar* (discreet) of *continu* zijn. Bijvoorbeeld, de natuurlijke getallen: 1, 2, 3, 4, ..., zijn aftelbaar oneindig: er zijn onderbrekingen tussen opeenvolgende waarden, zodat we ze één na één kunnen opsommen of aftellen. Bij de reële getallen zijn er echter geen onderbrekingen tussen opeenvolgende waarden: ze volgen elkaar continu op, en kunnen dus niet afgeteld worden.

Voorbeeld: de positie van een biljartbal op een biljarttafel in de lengterichting heeft in principe een continu oneindig aantal waarden.

- Relaties

Relaties zijn predikaten met meer dan één object: $P(a, b, \dots)$. Typische relaties hebben twee objecten, waartussen ze een verband leggen.

Voorbeelden:

- *Bijt (man, hond)*; dit betekent: de man (object) bijt (relatie) de hond (ander object).
- *Links (a, b)*, bal a bevindt zich links van bal b
- bal a beweegt sneller dan bal b , bal a bevindt zich op afstand x van bal b

8.4 Toestanden

Een object a kan op een bepaald ogenblik al dan niet een gekenmerkt zijn door een bepaalde eigenschap E hebben. Dit bepaalt een elementaire uitspraak of *propositie*:

$E(a)$: “ a heeft eigenschap E ”

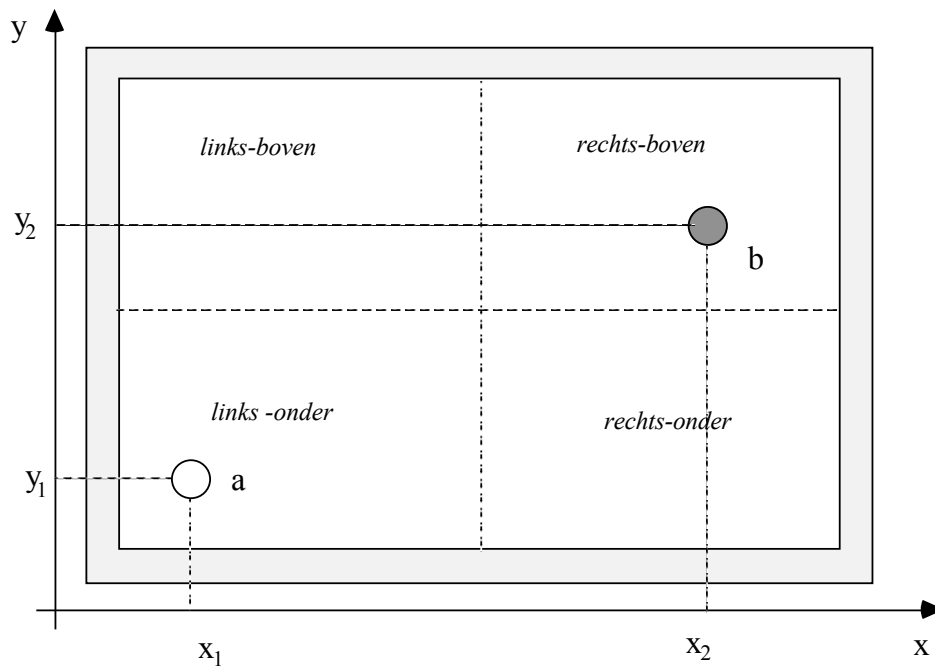
Deze propositie is *waar* als a inderdaad eigenschap E heeft, *vals* in het andere geval.

Een systeem op een bepaald ogenblik kan beschreven worden door een aantal van zulke elementaire uitspraken, die elk eigenschappen toeschrijven aan objecten die deel uitmaken van het systeem.

In geval er maar één object is, mag men het object in kwestie weglaten, want dan corresponderen proposities eenduidig met eigenschappen.

Voorbeeld: de propositie “bal a bevindt zich linksonder” kan men afkorten tot “linksonder” als er maar één bal is, en er dus geen dubbelzinnigheid is voor wat betreft welk object zich nu linksonder bevindt

Elementaire proposities kunnen gecombineerd worden met logische operatoren: conjunctie (“en”), disjunctie (“of”), negatie (“niet”). De conjunctie van alle proposities die op een bepaald ogenblik waar zijn voor het systeem, definieert de **toestand** van het systeem. Bijvoorbeeld, “bal a bevindt zich op positie (x_1, y_1) ”, en “bal b bevindt zich op positie (x_2, y_2) ”



De toestand van een systeem geeft ons alle *relevante informatie* over het systeem op dat ogenblik. “Relevant” betekent hier: nodig om problemen op te lossen of voorspellingen te maken aangaande het systeem. De relevantie hangt af van het model en de specifieke problemen die het adresseert. Bijvoorbeeld, de snelheid van een bal is relevant als we willen weten waar die bal zich het volgende ogenblik zal bevinden, de kleur van de bal is daarvoor echter irrelevant. In een model van een biljartbal dat enkel geïnteresseerd is in de fysische bewegingen van de ballen zal de toestand dus normaal niet de eigenschap “kleur” omvatten. Als we echter ook geïnteresseerd zijn in de regels van het spel, en welke stoten door welke biljartspelers worden uitgevoerd, dan is de kleur wel relevant en zal ze dus deel uitmaken van het model.

De definitie van een toestand hangt dus af van welke problemen men wil oplossen. Als de toestand onvoldoende informatie geeft om de gestelde vragen te beantwoorden, dan moet men in het algemeen bijkomende eigenschappen (of eventueel objecten) onderscheiden, en aan het model toevoegen. Bijvoorbeeld, de positie van een bal alleen is onvoldoende om bewegingen te voorspellen: men heeft ook de snelheid (of impuls) van de ballen nodig. Positie en impuls tezamen bepalen de toestand van een biljartbal in dit geval. In het Newtoniaanse wereldbeeld gaat men ervan uit dat men *alle* relevante distincties kan maken zodat het model deterministisch wordt en alle vragen kan beantwoorden. Latere theorieën, zoals de kwantummechanica en de chaostheorie, hebben echter duidelijk gemaakt dat men nooit de volledige informatie over een systeem kan hopen te verwerven, en dat een model dus altijd een onvolledige voorstelling van het gedrag van een systeem blijft.

8.5 Toestandsruimte

De **toestandsruimte** van een systeem is *de verzameling van alle mogelijke toestanden waarin het systeem zich kan bevinden*. Dit is een veralgemening van ons intuïtieve concept van de concrete, driedimensionale ruimte, waarin we ons vrij kunnen verplaatsen, naar de abstracte verzameling toestanden waartussen een systeem zich kan “verplaatsen” wanneer zijn eigenschappen variëren. De toestandsruimte wordt soms ook *faseruimte* of *configuratieruimte* genoemd.

De toestandsruimte (“state space”) wordt in het algemeen aangeduid met de hoofdletter S , en de individuele toestanden (“states”) met kleine letters: $s_1, s_2, s_3, \dots$

$$S = \{s_1, s_2, s_3, \dots\}$$

Stel dat er in ons model N elementaire proposities zijn, dan zijn er 2^N (2 tot de macht N) mogelijke “waar-vals” combinaties, en dus toestanden.

Voorbeeld: 1 object met 3 binaire eigenschappen: “links-recht”, “boven-onder”, en “voor-achter”, dan zijn er $2^3 = 2 \times 2 \times 2 = 8$ mogelijke combinaties van de verschillende waarden van deze eigenschappen, en dus toestanden:

- 1) links- boven- voor
- 2) links- boven- achter
- 3) links- onder- voor
- 4) links- onder- achter
- 5) rechts- boven- voor
- 6) rechts- boven- achter
- 7) rechts- onder- voor
- 8) rechts- onder- achter.

Meer algemeen: beschouw één object met verschillende eigenschappen, elk met aantal waarden $n_1, n_2, n_3, \dots$, dan is het aantal toestanden gelijk aan het product van het aantal mogelijke waarden voor elke eigenschap: $n_1 \times n_2 \times n_3 \times \dots$

- **Systeem bestaande uit meerdere objecten**

Beschouw meerdere objecten $a, b, c, \dots$ elk met één eigenschap met aantal mogelijke waarden $n_a, n_b, \dots$, dan is opnieuw het aantal toestanden gelijk aan het product van de mogelijke waarden: $n_a \times n_b \times n_c \times \dots$

Voor meerdere objecten $a, b, c, \dots$ elk met meerdere eigenschappen $n_{a1}, n_{a2}, n_{a3}, \dots, n_{b1}, n_{b2}, n_{b3}, \dots$, is het aantal toestanden opnieuw het product van het aantal waarden voor alle objecten en alle eigenschappen: $n_{a1} \times n_{a2} \times n_{a3} \times \dots \times n_{b1} \times n_{b2} \times n_{b3} \times \dots$

Elke eigenschap voor elk object bepaalt een dimensie van de ruimte. Het aantal dimensies (dimensionaliteit) van de toestandsruimte is dus gelijk aan het aantal eigenschappen of vrijheidsgraden. Bijvoorbeeld, een biljartbal die zich op de tafel

van links naar rechts (richting van de x-as) en van boven naar onder kan bewegen (richting van de y-as) heeft twee onafhankelijke eigenschappen (de snelheid eventjes niet meegeteld) en beweegt dus in een twee-dimensionale toestandruimte. Een systeem bestaande uit *twee* zulke ballen heeft echter $2 \times 2 = 4$ dimensies of vrijheidsgraden. Hoe meer objecten een systeem telt (of hoe meer eigenschappen een object heeft), hoe meer dimensies de toestandruimte heeft.

Wiskundig kunnen we dit op de volgende manier formuleren:

de toestandruimte S van het samengestelde systeem is het *Cartesisch product* van de toestandruimten $S_a, S_b, \dots$ van de individuele objecten:

$$S = S_a \times S_b \times S_c \times \dots$$

een individuele toestand s wordt dan gerepresenteerd als:

$$s \in S = (s_a, s_b, s_c, \dots) \text{ met } s_a \in S_a, s_b \in S_b, \text{ enz.}$$

Ter herinnering: het Cartesisch product van twee verzamelingen $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots\}$ en $B = \{b_1, b_2, \dots\}$ is gelijk aan de verzameling van alle mogelijke koppels gevormd door combinatie van een element uit de eerste verzameling met een element uit de tweede verzameling:

$$A \times B = \{(a_1, b_1), (a_1, b_2), (a_1, b_3), \dots, (a_2, b_1), (a_2, b_2), \dots\}$$

Een toestand van een willekeurig systeem kan dus steeds geschreven worden als een lijst (“vector”) bestaande uit de opeenvolgende waarden van elk van de eigenschappen voor elk van de objecten.

$$s = (s_{a1}, s_{a2}, s_{a3}, \dots, s_{b1}, s_{b2}, s_{b3}, \dots)$$

8.6 Afstandsmaat*

Een toestandruimte is meer dan een verzameling losse, onafhankelijke toestanden: toestanden kunnen zich meer of minder “ver” van elkaar bevinden. Er is een onderscheid tussen toestanden die zich dichtbij (“in de buurt”) en veraf bevinden. Het bestaan van zulk onderscheid tussen dichtbij en veraf noemt men een topologische structuur. Dit verandert de verzameling in een elementaire “ruimte”.

Het is mogelijk een elementaire maat (wat men in de wiskunde “metriek” noemt) te definiëren tussen toestanden s_1 en s_2 die de “afstand” $d(s_1, s_2)$ tussen deze toestanden uitdrukt als een getal. Dit drukt onze intuïtie uit dat het meer tijd of moeite vraagt om een grotere dan een kleinere afstand tussen toestanden te overbruggen.

De simpelste afstandsmaat is gelijk aan *het aantal distincties of verschillen tussen toestanden*. Deze maat komt overeen met het minimum aantal elementaire veranderingen dat men moet aanbrengen om s_1 in s_2 te transformeren.

Voorbeeld: de toestand links-boven-voor bevindt zich op afstand 1 van de toestand links-boven-achter, maar op afstand 3 van de toestand rechts-onder-achter.

Het omgekeerde van afstand is *similariteit*: hoe dichter bij elkaar twee toestanden in de toestandsruimte, hoe meer ze op elkaar lijken, dit wil zeggen hoe minder verschillen ze vertonen.

Toepassing: als men de genetische codes (DNA) van twee individuen met elkaar vergelijkt, dan kan men tellen hoeveel verschillen er juist zijn. Dit komt overeen met het minimum aantal mutaties (elementaire wijzigingen in het DNA) dat nodig is om het ene DNA in het andere te veranderen. Dit geeft ons een aanduiding van hoeveel tijd er nodig is geweest om de ene vorm uit de andere te laten evolueren, of—meer precies—hoeveel tijd er is nodig geweest voor beide om te evolueren uit een gemeenschappelijke voorouder. Op die manier kan men bijvoorbeeld bepalen hoe lang geleden mensen en chimpansees een gemeenschappelijke voorouder hadden (ongeveer 5 miljoen jaar).

In geval van eigenschappen met meer dan twee waarden zal men meer ingewikkelde afstandsmaten definiëren, zoals bijvoorbeeld de traditionele Euclidische of vectorafstand. Voor 3 dimensies heeft deze de volgende vorm:

$$d(x,y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + (x_3 - y_3)^2}$$

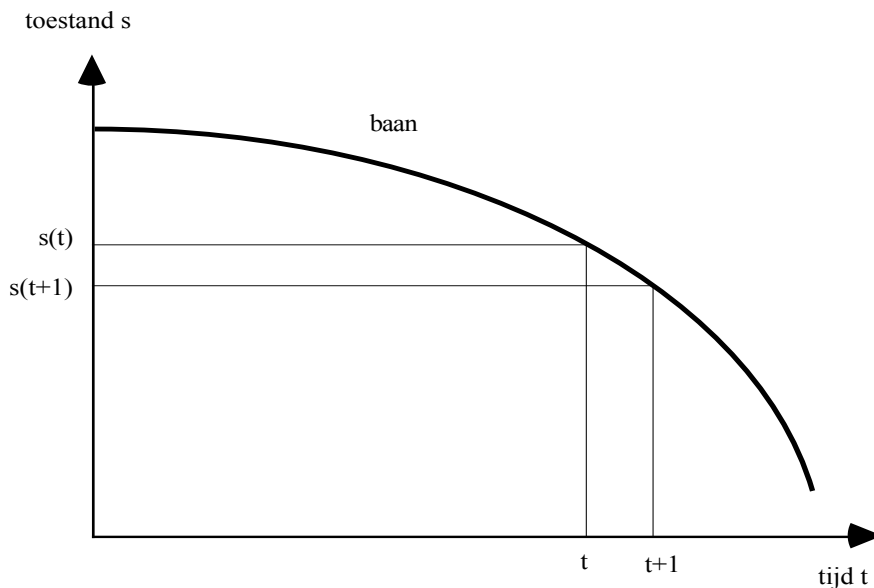
Toepassing: als men informatie zoekt op het Internet dan is het nuttig te weten in hoeverre twee teksten op elkaar lijken (similair zijn). Dit laat bijvoorbeeld toe om eens men een interessant document gevonden heeft via een “zoekmotor” (bvb. Google) om direct andere documenten te vinden die daaraan gelijkaardig zijn. Meer algemeen is het zoeken zelf gebaseerd op similariteit, in dit geval tussen de tekst die men in de zoekmotor typt (bestaande uit het woord/ de woorden die best de interesse weergeven, bvb. “complexiteit evolutie”) en de tekst van alle documenten die beschikbaar zijn. De beste resultaten van de zoektocht zijn de documenten die meest lijken op de tekst van de vraagstelling, d.w.z. die de grootste frequentie aan zoektermen bevatten. Eén manier om dit probleem aan te pakken is door een toestandsruimte te definiëren van alle mogelijke teksten, waarbij een toestand overeenkomt met een lijst van de frequenties van alle mogelijk woorden in de tekst. Elk woord bepaalt dus een eigenschap of dimensie, en het relatieve aantal keer dat dat woord voorkomt in de tekst bepaalt de waarde van die eigenschap voor deze tekst. Door de afstand (of soms de hoek) tussen de vectoren die twee teksten voorstellen te berekenen kan men dan bepalen hoe similair of verschillend deze teksten zijn. Op die manier maken vectorafstanden het mogelijk om snel informatie terug te vinden.

8.7. Dynamische systemen

De belangrijkste toepassing van toestandsruimten is het voorspellen van veranderingen, t.t.z. het bepalen hoe de toestand verandert in de loop van de tijd. Op elk tijdstip t bevindt het systeem zich in een welbepaalde toestand $s(t)$. Vanuit die toestand kan het een *transitie* doen naar één of meer andere toestanden $s(t+1)$ (of eventueel ter plaatse blijven). Welke nieuwe toestand gekozen wordt, hangt af van de *dynamica*: het geheel van “krachten” die inwerken op het systeem, en het doen evolueren. Deze dynamica wordt over het algemeen voorgesteld aan de hand van een zogenaamde differentiaalvergelijking, die de snelheid van variatie ds/dt van de toestand over de tijd uitdrukt als functie van de huidige toestand. Zulke differentiaalvergelijking veronderstelt dat de toestandsruimte continu oneindig is, wat de zaken ingewikkelder maakt. Een eenvoudigere vorm, toepasbaar op discrete of eindige toestandsruimten, is de differentievergelijking. Deze duidt het verschil aan tussen de toestand $s(t)$ en de daaropvolgende toestand $s(t+1)$, en heeft typisch de volgende vorm:

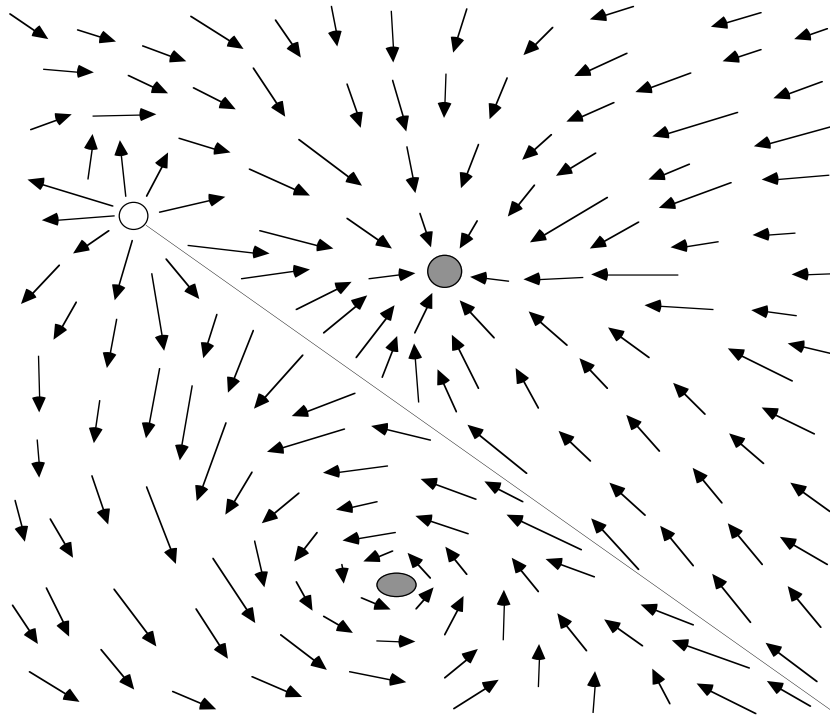
$$s(t+1) = s(t) + f(s(t))$$

Hierbij is f een bepaalde functie van de huidige toestand die de verschillende “krachten” voorstelt die deze toestand naar een nieuwe toestand doen overgaan. Gezien dit boek de nadruk legt op de concepten, en niet op de wiskundige technieken om berekeningen te maken, zullen we deze functies en vergelijkingen niet verder behandelen. Het volstaat op te merken dat er zeer gesofisticeerde methoden bestaan om op die manier de evolutie van een toestand te bepalen voor systemen die niet te complex zijn, en waarvan we alle objecten, eigenschappen en krachten exact kennen. Zulke systeem, waarvan we de verdere beweging door de toestandsruimte perfect kunnen voorspellen vertrekkende van de huidige toestand, noemt men een **dynamisch systeem**.



We zullen ons hier beperken tot een overzicht van de kwalitatieve eigenschappen van dynamische systemen en hun beweging door de toestandruimte. Vanuit de nieuw bereikte toestand $s(t+1)$ zal het opnieuw overgaan naar een volgende toestand $s(t+2)$, enzovoort. Zulke opeenvolging van transities kan voorgesteld worden als een curve of **baan** (“trajectory”) in de toestandruimte. Deze loopt van vroegere over de huidige naar latere toestanden. Een baan wordt gevormd door de sequentie $s(t)$ van alle in de tijd t opeenvolgende toestanden van het systeem. Bijvoorbeeld, een kanonskogel die wordt afgeschoten beschrijft een welbepaalde baan door de lucht, afhankelijk van de kracht van de ontploffing, de oriëntatie van het kanon en de inwerking van de zwaartekracht. Een baan kan in een toestandruimte voorgesteld worden door een min of meer gebogen of kronkelende lijn, die van de vroegere over de huidige naar de toekomstige toestanden loopt.

De basisveronderstelling achter een dynamisch systeem is dat de volgende toestand volledige gedetermineerd is door de huidige of begintoestand. Dit wil zeggen dat er door een bepaalde toestand slechts één (toekomstige) baan kan lopen: er is immers geen twijfel of onzekerheid mogelijk over wat de volgende toestand zal zijn. Dit laat ons toe om de dynamica of mogelijke evolutie van het systeem op een zeer handige manier voor te stellen. Als we toestandruimte op een blad papier afbeelden, waarbij elk punt een toestand voorstelt, dan kunnen we bij deze toestand ook aangeven in welke richting de baan door die toestand verder loopt, met behulp van een pijltje (zie tekening). Het geheel van alle pijltjes geeft dan visueel aan hoe de evolutie plaatsgrijpt in de verschillende regionen van de toestandruimte. We kunnen dan bijvoorbeeld direct zien of de banen door twee nabijgelegen toestanden naar elkaar toelopen, of integendeel steeds verder uiteengaan. We zien soms ook ingewikkeldere patronen zoals spiralen of lussen, waarbij de banen cirkelen rond een centrale regio. Zulke visuele voorstelling van een dynamisch systeem noemt men een **faseportret** (“phase portrait”).



Van bijzonder belang zijn de regio's waar de pijltje wel naar binnen wijzen maar niet naar buiten. Dit wil zeggen dat een baan wel vanuit een ander deel van de toestandsruimte in deze regio kan terecht komen, maar eenmaal binnen is er geen enkele baan die weer naar buiten leidt. De kern van zulke regio noemt men een **attractor**, gezien deze de banen als het ware naar zich toe trekt (grijze vlekken in de tekening hierboven). Het bestaan van attractoren maakt het voorspellen van de verdere evolutie veel gemakkelijker: het volstaat immers te weten dat een begintoestand zich in het **bassin** van een attractor bevindt (de regio rondom de attractor vanwaar uit alle pijlen en banen naar de attractor leiden) om te weten dat het systeem noodzakelijk ook in die attractor zal terecht komen. We zullen deze begrippen later meer concreet uitdiepen wanneer we de verwante visuele voorstelling van een fitnesslandschap zullen introduceren. Een repulsor, aan de andere kant, is een regio waar alle pijlen naar buiten leiden (witte schijf in de tekening).

Hoofdstuk 9. Informatie en Entropie

9.1 Inleiding

Entropie en informatie zijn zonder twijfel de belangrijkste kwantitatieve begrippen uit de wetenschap van de complexiteit. Zoals we eerder hebben aangetoond is complexiteit zelf een kwalitatief begrip, dat niet op een ondubbelzinnige manier meetbaar is omdat het de tegengestelde polen van orde en wanorde, of distinctie en connectie combineert. Als we echter alleen maar naar distincties kijken, kunnen we wel een ondubbelzinnige maat bepalen, die we **variëteit** zullen noemen, en die het totaal aantal distincties in een model meet. Hoewel variëteit weinig gebruikt wordt in de wetenschap (het begrip werd geïntroduceerd door de cyberneticus Ashby) is het een zeer eenvoudig en intuïtief concept, dat een goede basis biedt van waaruit we de meer bekende, maar ook ingewikkeldere, concepten van dwang, entropie en informatie zullen afleiden, door stap voor stap te veralgemenen.

Informatie en entropie spelen in het nieuwe, systemische wereldbeeld een rol die even centraal is als die van materie en energie in het oude, mechanistische wereldbeeld. Vele wetenschappers zijn dan ook geneigd om **informatie** te postuleren als de derde fundamentele substantie—na materie en energie—waaruit het universum is opgebouwd. Deze voorstelling is echter misleidend en produceert veel verwarring omdat informatie geen “substantie” is. Om te beginnen wordt informatie, in tegenstelling tot materie en energie, niet behouden: ze kan verloren gaan (bvb. als we iets vergeten), of ze kan in onbeperkte mate bijgecreëerd worden (bvb. als we iets observeren). Daarbij komt dat informatie altijd in zekere mate subjectief is: ze hangt af van de waarnemer, voor wie een bepaald signaal informatief kan zijn of juist niet, afhankelijk van de doelstellingen en vooraf opgedane kennis. Informatie, zoals de distincties en connecties waarvan ze een maat is, is fundamenteel relationeel en dus in zekere mate relatief.

Entropie en informatie zijn subtiële begrippen met verschillende facetten. Ze worden dan ook dikwijls verkeerd geïnterpreteerd, ook door wetenschappelijke experts. **Entropie** wordt gewoonlijk voorgesteld als een maat voor de wanorde in een systeem, maar zoals we zullen zien ligt de zaak iets subtieler. Entropie dankt haar faam aan de beruchte tweede wet van de thermodynamica, die stelt dat de entropie in een gesloten systeem alleen maar kan toenemen in de loop van de tijd. Aldus luidde deze wet als eerste de “doodsklok” voor het Newtoniaans wereldbeeld, dat immers stelt dat elke verandering omkeerbaar is, wat impliceert dat entropie constant moet blijven. We zullen deze wet later in detail bespreken, maar om dat grondig te kunnen doen, moeten we hier eerst de betekenis van entropie verduidelijken.

Informatie lijkt op het eerst zicht een meer vanzelfsprekend begrip, gezien het aan de basis ligt van de informatietechnologie waar we ondertussen allemaal mee vertrouwd zijn. De meeste informatici zijn echter de oorsprong van dat concept vergeten, en het feit dat de definitie ervan rechtstreeks gebaseerd is op die van entropie. Alle subtiliteiten en misverstanden verbonden aan het entropiebegrip vinden we dan ook terug in het begrip informatie. De verwarring is zo groot dat het kan gebeuren dat de ene wetenschapper een definitie postuleert die het tegengestelde is van die van de andere. We zullen dit probleem van het “teken” (positief of negatief) vermijden door informatie te definiëren als een verschil, dat positief zowel als negatief kan uitvallen, afhankelijk van het uitgangspunt. Meer algemeen zullen we klaarte proberen te scheppen in deze cruciale maar verwarrende materie door systematisch voort te bouwen op onze ontologie van distincties, wat ons rechtstreeks leidt tot het begrip *variëteit*.

9.2 Variëteit

De **toestandsruimte** is, zoals we zagen, de ruimte van alle mogelijkheden die het systeem ter beschikking heeft. Hoe groter de toestandsruimte, hoe meer mogelijkheden, “ruimte”, of “vrijheid” het systeem ter beschikking heeft, maar ook hoe groter de verscheidenheid of “variëteit” (“variety”) van toestanden of verschijningsvormen die het systeem kan aannemen.

Variëteit is een maat voor de *grootte van de toestandsruimte*, of het aantal onderscheiden mogelijkheden. Variëteit V wordt gedefinieerd als het logaritme volgens basis 2 van het aantal elementen $|S|$ van de toestandsruimte S :

$$V = \log_2 |S|$$

Ter herinnering: logaritme van x volgens basis 2 is de omgekeerde functie van 2 tot de macht x , dit wil zeggen $\log_2(2^x) = x$

Hieruit volgt dat als $|S| = 2^N$, dan is $V = N$.

V is dus gelijk aan het *aantal binaire distincties* (zie 8.5).

V is echter ook bruikbaar voor eigenschappen die niet binair zijn. Bijvoorbeeld, voor één eigenschap met 5 mogelijke waarden is $V = \log_2 5 \approx 2,322$.

Opmerking: V moet echter anders gedefinieerd worden als het aantal waarden oneindig is, want het logaritme van oneindig is steeds oneindig. Eenvoudigste geval: $V =$ aantal dimensies (“vrijheidsgraden”).

De eenheid van variëteit is de **bit**. Een systeem met variëteit van één bit wil zeggen dat er voor het systeem exact *twee* toestanden of twee mogelijkheden zijn (“1” of “0”, “ja” of “nee”). Variëteit van N bit wil zeggen 2^N mogelijkheden

- Waarom gebruikt men een logaritme?

De essentiële eigenschap van het logaritme is dat het een product tot een som herleidt:

$$\log(a.b) = \log a + \log b$$

Zoals we zagen in 8.5 is het aantal toestanden in een toestandruimte gelijk aan het product van het aantal waarden voor elke eigenschap, of van het aantal toestanden voor elk object. De variëteit van zulke “product” toestandruimte is daarom gewoonweg de som van de variëteiten voor elk van de deelttoestandruimten. Dit wil zeggen dat als men objecten of eigenschappen aan het model toevoegt dat men gewoon de variëteit van die nieuwe elementen moet bij de rest optellen. Het feit dat men met sommen kan werken maakt de berekeningen veel eenvoudiger.

Voorbeeld: als één biljartbal een variëteit V heeft, dan heeft een biljartspel met twee biljartballen variëteit $V + V = 2V$

- als een biljartbal variëteit V_b heeft en een biljartkeu variëteit V_k , dan heeft een spel bestaande uit één bal en één keu variëteit: $V_b + V_k$
- 3 ballen en 2 keus, dan is de variëteit: $3V_b + 2V_k$

9.3 Dwang

Dwang (“constraint”) is het tegengestelde van vrijheid: het is datgene wat het aantal opties of mogelijkheden inperkt. Een betere Nederlandse term voor het Engelse “constraint” zou in feite “beperking” of “begrenzing” zijn, gezien deze vrijheidsbeperking in het algemeen niet met kracht opgelegd wordt, maar intrinsiek is aan het systeem. Toch zullen we “dwang” blijven gebruiken omdat dat de term is die ingeburgerd is geraakt.

Definitie: er bestaat dwang op een systeem als niet alle denkbare combinaties van eigenschappen ook in de praktijk mogelijk zijn. Dit wil zeggen dat de feitelijke verzameling van mogelijke toestanden slechts een deel is van de volledige toestandruimte.

- Voorbeeld: biljart met één bal

De toestandruimte voor de bal bestaat uit alle mogelijke posities op de biljarttafel. Voer een dwang in: leg een lat in het midden van de tafel, zodat de bal zich nog alleen in de linkerhelft kan bewegen. De bal wordt “gedwongen” links te blijven, hij is “beperkt” of “begrensd” tot de linkerhelft. Het aantal mogelijke toestanden is nu gehalveerd. De variëteit is afgenomen met 1 bit (logaritme van de factor twee).

- Voorbeeld: toestandsruimte van een bes

Laat ons veronderstellen dat het model van een bes twee binaire eigenschappen onderscheidt: *kleur* met waarden “rood” of “groen”, en *grootte* met waarden “groot” of “klein”. Twee eigenschappen met elk twee waarden betekent $2 \times 2 = 4$ toestanden, en dus $V = 2$ bit. In de praktijk echter blijken alle groene bessen klein (want onrijp) en alle rode bessen groot te zijn, en vice versa. Dit betekent dat er maar twee toestanden in de praktijk mogelijk zijn: (groen, klein) en (rood, groot). Dit betekent: $V = 1$ bit. Er is dus een dwang of beperking, die de combinaties (groen, groot) en (rood, klein) uitsluit of verbiedt.

- Voorbeeld: biljart met twee ballen

De toestandsruimte voor twee ballen is het product van de twee individuele toestandsruimten, dit wil zeggen de verzameling van alle koppels van de vorm (positie 1, positie 2) waarbij positie 1 een willekeurige positie aanduidt op de tafel voor bal 1. Voer nu een dwang in: kleef de ballen aan elkaar. De eerste bal kan nog steeds een willekeurige positie op de tafel aannemen. De tweede bal is nu echter ten zeerste beperkt in de keuze van overblijvende posities, gezien hij noodzakelijk op dezelfde afstand van de eerste bal moet blijven. De toestandsruimte voor de twee aaneenklevende ballen is veel kleiner dan die voor twee losse ballen

Dwang C wordt gedefinieerd als de maximale variëteit min de feitelijke variëteit:

$$C = V_{\max} - V$$

Dit wil zeggen: C representeert het verlies aan variëteit of vrijheid ten opzichte van de best denkbare situatie.

Voorbeeld: bessen: $C = 2 - 1 = 1$ bit, biljarttafel in twee gedeeltes: $C = 1$ bit

Dwang lijkt misschien negatief voor het systeem, gezien het zijn vrijheid beperkt, maar is in het algemeen positief voor de waarnemer. De waarnemer weet nu immers beter *waar* het systeem zich bevindt, en heeft er dus meer vat op, of controle over. Bij het voorbeeld van de bessen volstaat het te weten dat een bes klein is (bijvoorbeeld door ze vast te nemen) om te kunnen afleiden dat ze ook groen is, zelfs als het donker is en men de kleuren niet kan onderscheiden.

Dwang op een systeem bestaande uit verschillende objecten leidt in het algemeen tot een relatie of afhankelijkheid tussen de objecten. Bijvoorbeeld, bij de aaneengekleefde ballen is de positie van de ene bal afhankelijk van de positie van de andere bal. In het voorbeeld van magnetisatie is de richting van elk magneetje bepaald door de richting van de andere. Dwang kan dus gezien worden als een maat van orde: onderlinge afhankelijkheid of connectie.

9.4 Entropie

Stel nu dat we niet de juiste toestand s van een systeem kennen, maar enkel de waarschijnlijkheid of probabilliteit $P(s)$ dat het systeem in toestand s zou zitten. Dit is normaal het geval voor systemen met een groot aantal componenten, waar we niet voor elke component alle eigenschappen kunnen bepalen. In dat geval heeft het geen zin om de variëteit te bepalen door de verschillende mogelijke toestanden op te tellen, gezien verschillende toestanden in het algemeen verschillende waarschijnlijkheden hebben. We kunnen het begrip variëteit echter gemakkelijk veralgemenen voor dit meer complexe geval, leidend tot wat de **entropie** H wordt genoemd. Voor de waarschijnlijkheidsdistributie $P(s)$ wordt deze op de volgende manier gedefiniëerd:

$$H(P) = - \sum_{s \in S} P(s) \cdot \log P(s)$$

Entropie wordt dus berekend als de som over alle toestanden van de logaritmes van de waarschijnlijkheden van deze toestanden, vermenigvuldigd met dezelfde waarschijnlijkheden. Het logaritme wordt nog steeds bepaald volgens basis 2. Aan deze som wordt een minteken toegevoegd omdat het logaritme van een getal kleiner dan 1 (wat per definitie geldt voor de waarschijnlijkheid $P(s)$) negatief is. Anders zou de som negatief zijn. Hoewel deze formule er ingewikkeld en weinig intuïtief uitziet, is ze zo belangrijk dat we ze toch even moeten exploreren.

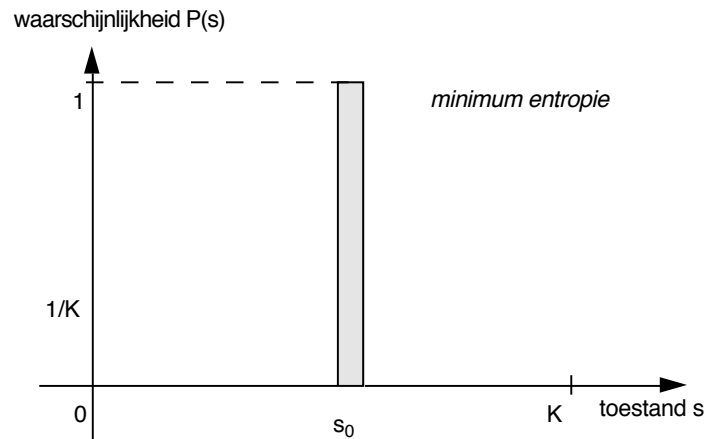
Entropie is een maat voor onze **onzekerheid**, of ons gebrek aan kennis aangaande de toestand van het systeem: hoe minder we weten, hoe groter de entropie. Dit wordt best verduidelijkt aan de hand van enkele bijzondere gevallen.

- Minimale entropie:

Als we zeker zijn dat het systeem zich in toestand s_0 bevindt, dit wil zeggen $P(s_0) = 1, P(s \neq s_0) = 0$, dan is:

$$H(P) = 1 \cdot \log 1 + 0 \cdot \log 0 + 0 \cdot \log 0 + \dots = \log 1 = 0.$$

Dit wil zeggen minimale entropie of geen onzekerheid. We hebben met andere woorden volledige kennis of informatie aangaande de toestand. Als we de corresponderende waarschijnlijkheidsverdeling uittekenen (hieronder) zien we één piek voor s_0 , waar de maximale waarde 1 wordt bereikt, terwijl alle andere toestanden vlak op nul blijven staan.

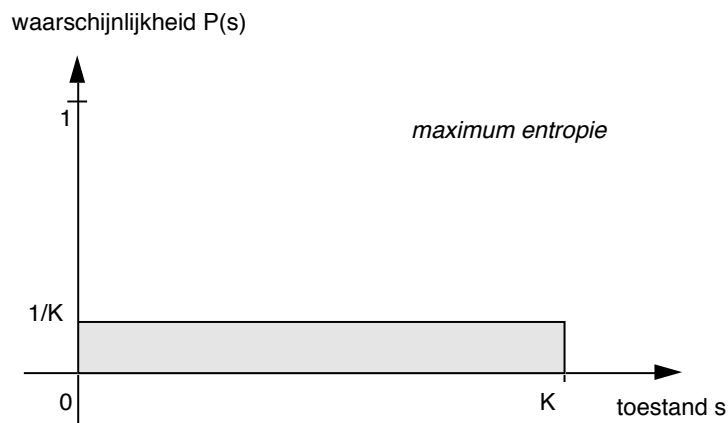


- Maximale entropie:

Stel nu dat we geen enkele aanwijzing hebben dat enige toestand s_i in enige mate meer of minder waarschijnlijk zou zijn dan een andere toestand. Dit wil zeggen: alle toestanden hebben dezelfde waarschijnlijkheid: $P(s) = 1/K$, met $K = |S|$ = aantal toestanden in toestandruimte S . Dan is

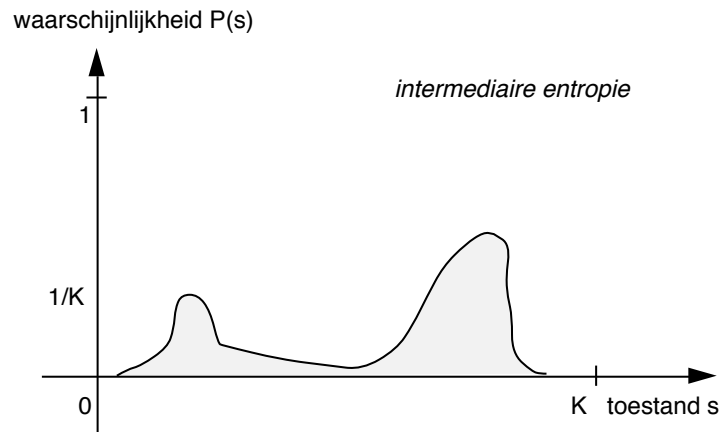
$$H(P) = - K \cdot (1/K) \cdot \log(1/K) = \log K = V.$$

Dit wil zeggen: de entropie wordt herleid tot het logaritme van het aantal toestanden, oftewel de (maximale) variëteit V . De entropie bereikt hier haar maximum. Dit is de situatie waarin we absoluut geen kennis of informatie over de toestand van het systeem hebben, en waar onze onzekerheid dus het grootst is. Uitgetekend levert dit een volledig vlakke, homogene waarschijnlijkheidsverdeling op, met alle toestanden dezelfde waarde $1/K$.

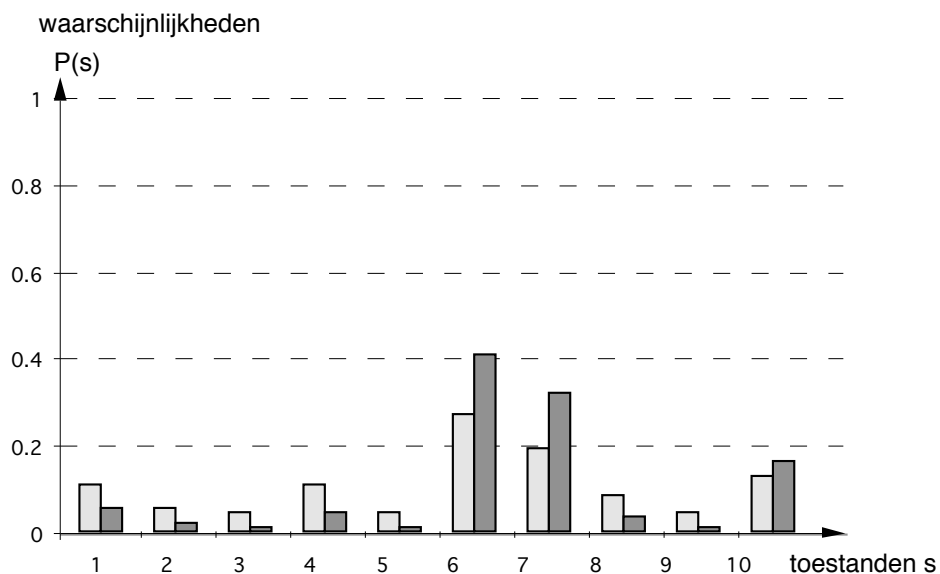


- Intermediaire entropie:

In het tussenliggende geval, dit wil zeggen waarschijnlijkheden die verschillend van elkaar zijn maar niet de maximale waarde 1 bereiken, heeft de entropie een waarde intermediair tussen de twee voorgaande: $V > H > 0$.



Hoe vlakker of *homogener* de waarschijnlijkheidsverdeling (dit wil zeggen hoe minder verschil tussen de waarschijnlijkheden voor de verschillende toestanden), hoe groter de entropie H . Hoe *heterogener* de verdeling (dit wil zeggen hoe hoger en smaller de “pieken” van toestanden met hoge waarschijnlijkheid ten opzichte van van andere toestanden), hoe lager de entropie. In de tekening hieronder worden twee waarschijnlijkheidsverdelingen op een toestandruimte met 10 toestanden (maximaal: $H = \log_2 10 = 3,32$) naast elkaar geplaatst. Voor de meer “vlakke” verdeling aangeduid met lichtgrijze balken is $H = 3,04$, voor de meer “gepiekte” aangeduid door donkergrijze balken vinden we de kleinere waarde $H = 2,33$



- Interpretatie

Entropie is een directe veralgemening van variëteit. Dit wil zeggen dat het kan opgevat worden als een maat voor de vrijheid van het systeem om verschillende toestanden aan te nemen. Het kan ook gezien worden als een maat voor ons gebrek aan kennis (onzekerheid) over het systeem. Over de toestand van een systeem met hoge entropie kunnen we dus in feite weinig zeggen.

Entropie kan ook gezien worden als een maat van wanorde. Vrijheid voor het systeem betekent onafhankelijkheid voor zijn componenten, en dus distinctie maar geen connectie. Zelfs als we de toestand van een deel van een systeem met hoge entropie kennen, dan weten we in het algemeen nog niets over de andere delen. Omgekeerd betekent dit dat een systeem met lage entropie zou kunnen gezien worden als geordend: aangezien we bijna alles reeds weten, is het wellicht voldoende de toestand van een klein deeltje te kennen om ook de toestand van de rest te kunnen bepalen.

Merk wel op dat deze interpretatie in termen van orde veronderstelt dat er connecties tussen de delen van het systeem zijn die verantwoordelijk zijn voor het verminderen van onze onzekerheid. In ons formalisme van de toestandsruimte tot nu toe hebben we echter enkel aandacht besteed aan de distincties, en de connecties spelen dan ook geen expliciete rol in de definitie van variëteit en entropie. Dit is een tekortkoming van de voorstelling van een systeem in termen van toestandsruimten, die dan ook de (courant gebruikte) interpretatie van entropie als wanorde precair maakt. Het is dan ook beter zich te houden aan de interpretatie in termen van onzekerheid.

- Belangrijke opmerking: thermodynamische entropie

Het bovenstaande is een definitie van de zogenaamde “statistische” entropie (dit wil zeggen gebaseerd op waarschijnlijkheden). Deze werd geïntroduceerd door de fysicus Boltzmann, en veralgemeend door de cyberneticus Shannon. Er bestaat echter ook een “thermodynamische entropie” (cfr. 3.1), die een maat is voor de verspreiding of **dissipatie** van energie in de vorm van warmte. In veel gevallen (zoals oorspronkelijk voorzien door Boltzmann) vallen statistische en thermodynamische entropie samen, gezien verspreiding betekent dat de verdeling van energie meer homogeen wordt. Statistische entropie is echter een meer algemeen concept: het kan ook gebruikt worden in modellen waarin warmte of energie niet gedefinieerd zijn. Statistische entropie hangt af van onze kennis, en kan dus veranderen wanneer onze kennis af- of toeneemt, zonder dat de thermodynamische entropie daarom noodzakelijk verandert.

9.5 Informatie

Informatie is datgene wat ons gebrek aan kennis of onze onzekerheid opheft. Informatie kan dus gedefinieerd worden als *afname van entropie*. Stel dat een systeem aanvankelijk entropie $H(\text{voor})$ heeft, en dat we informatie I over het systeem krijgen (bijvoorbeeld door het te observeren, of door een inlichting die iemand ons geeft). Dit leidt tot de nieuwe, lagere entropie $H(\text{na})$. De verkregen informatie is dan:

$$I = H(\text{voor}) - H(\text{na})$$

Bijzondere gevallen:

- stel dat $H(\text{na}) = 0$ (we zijn nu zeker over de toestand van het systeem), dan is: $I = H(\text{voor})$.
- stel echter dat $H(\text{voor}) = 0$ (we *waren* zeker over de toestand van het systeem), dan is: $I = -H(\text{na})$, met andere woorden de verkregen informatie is negatief, we hebben informatie verloren.

Deze bijzondere gevallen verklaren waarom sommige auteurs informatie definiëren als gelijk aan entropie, en andere net als het tegengestelde van entropie. We kunnen informatie echter niet definiëren als op zichzelf staand, zoals we entropie en variëteit hebben gedefinieerd. Informatie geeft het resultaat aan van een proces (typisch een waarneming of communicatieproces) waarbij onze kennis verandert. Dit impliceert dus de vergelijking tussen twee situaties, vóór en na—of, met en zonder—de verkregen inlichting.

Net zoals voor variëteit, dwang, en entropie is de eenheid van informatie de **bit**. Dit is dezelfde bit waarmee de geheugencapaciteit van een computer, of de transmissiesnelheid van een modem of communicatienetwerk wordt gemeten. De formule voor informatie en de bitmaat voor informatietransmissie werd ontwikkeld door Shannon om de capaciteit van communicatiekanalen (bijvoorbeeld telefoonlijnen) meetbaar te maken. Hierbij de definities van enkele meer courante eenheden van informatieopslag of –transmissie afgeleid van de bit:

1 Byte = 8 bit (typische lengte van 1 karaktersymbool, in het ASCII alfabet)

1 Kilobyte (KB) = duizend (of meer precies $1024 = 2^{10}$) Byte

1 Megabyte (MB) = 1 miljoen Byte

1 Gigabyte (GB) = 1 miljard Byte

56.6 Kbps = 56 600 bit per seconde

• Voorbeelden

- Het antwoord op een binaire of “ja-nee” vraag (bijvoorbeeld “Regent het?”) geeft je 1 bit informatie—tenminste in de veronderstelling dat de twee antwoorden dezelfde waarschijnlijkheid hebben
- Als de waarschijnlijkheden verschillend zijn, is de verkregen informatie echter kleiner dan 1 bit. Bijvoorbeeld, veronderstel dat je de vraag “Regent het?” stelt in de Sahara, dan is de kans op het antwoord “ja” zeer klein. In de meeste gevallen zal het antwoord “nee” alleen maar je verwachtingen bevestigen en dus amper enige informatie geven. Enkel in het uitzonderlijke geval dat het antwoord “ja” is, heb je echt significante informatie gekregen. Onderstel $P(\text{nee}) = 0,99$ (dit wil zeggen 99% kans dat het niet regent), en dus $P(\text{ja}) = 0,01$, dan is:

$$I = -0,99 \cdot (\log_2 0,99) - 0,01 \cdot (\log_2 0,01) = 0,08 \text{ bit}$$

Dit kan ook gezien worden als het gemiddelde (gewogen volgens de waarschijnlijkheid) van $I(\text{nee}) = -\log_2 0,99 = 0,014$, en $I(\text{ja}) = -\log_2 0,01 = 6,64$. $I(\text{nee})$ is dus veel kleiner dan $I(\text{ja})$, maar omdat “nee” veel meer voorkomt dan “ja” weegt het veel sterker door in de gemiddelde informatie die je krijgt.

- het antwoord op een vraag met meer dan 2 mogelijke antwoorden geeft je in het algemeen meer dan 1 bit informatie. Bijvoorbeeld, als de mogelijkheden zijn “zonnig”, “half bewolkt”, “bewolkt”, “buien”, en “onweer” met dezelfde waarschijnlijkheid, dan geeft het weerbericht je $\log_2 5 = 2,322$ bit informatie

- Toepassing: compressie van gegevens

De meeste gegevens (bijvoorbeeld in natuurlijke taal) bevatten veel minder feitelijke informatie dan je zou verwachten als je het aantal lettertekens zou tellen (op een computer komt 1 letterteken of karakter typisch overeen met 1 byte). De reden is dat de waarschijnlijkheden van het voorkomen van letters in taal allesbehalve homogeen zijn. Bijvoorbeeld, “e” komt in het Nederlands veel meer voor dan “q”, “ij” komt veel meer voor dan “uj”, “het” komt veel meer voor dan “hte”. In principe kan een tekst in zulke taal gehercodeerd worden, zodat dezelfde informatie met minder letters kan worden voorgesteld. De meest efficiënte code is deze waarbij elk teken dezelfde waarschijnlijkheid zou hebben om voor te komen, want dan is de oorspronkelijke entropie $H(\text{voor})$ maximaal (homogene waarschijnlijkheidsverdeling), en dus ook de verkregen informatie I voor een bericht van een bepaalde lengte.

Concreet zouden we dat kunnen benaderen door veel voorkomende combinaties van letters te vervangen door één enkel, nieuw teken, wat het aantal benodigde tekens sterk vermindert. Om niet te veel nieuwe tekens te moeten creëren (wat het aantal distincties en dus de entropie zou doen toenemen), kunnen zelden voorkomende letters of combinaties vervangen worden door een combinatie van andere, bestaande tekens. Dit maakt de tekst weer iets langer, maar per definitie gebeurt dit toch zelden, dus maakt het weinig uit.

Dit soort hercodering noemt men compressie, omdat het de “ruimte”, gemeten in bits, die gegevens innemen op de harde schijf van de computer of gedurende de transmissie reduceert, zodat meer informatie kan opgeslagen of doorgegeven wordt. Het is dankzij compressie dat we complexe bestanden, zoals muziekstukken, foto’s en films, toch zonder al te lang wachten van het Internet kunnen downloaden en opslagen op schijven met een beperkte capaciteit. Het theoretische probleem met compressie is dat we eigenlijk niet weten wat de meest efficiënte manier van comprimeren is: als we wat verder zoeken, vinden we altijd wel weer een nog kortere, nog meer gecomprimeerde codering. Dit is hetzelfde probleem dat we reeds vermeldten bij de pogingen om complexiteit te definiëren als de lengte van de kortst mogelijke beschrijving.

Anderzijds is het niet echt aan te bevelen om de meest efficiënte codering te vinden. Een niet efficiënte codering heeft wat men noemt *redundantie*: er zitten meer tekens in dan nodig, en daarom is het niet erg als er per ongeluk een teken wordt weggelaten of verkeerd gelezen tijdens de transmissie. Redundante coderingen (zoals natuurlijke taal) hebben het voordeel van robuustheid: fouten kunnen over het algemeen gemakkelijk gecorrigeerd worden omdat de overblijvende, correcte tekens ons genoeg informatie verschaffen om de ontbrekende of foute tekens toch juist in te schatten. Zelfs een tekst vol spelinsvoute knuen twee nrmal noh lzn...

Interpretatie: Informatie kan weer geïnterpreteerd worden als een maat van dwang of van orde: hoe meer informatie we hebben over de toestand van een systeem, hoe minder mogelijkheden er overblijven voor het systeem.

Opmerking: Informatie of entropie kan ook gebruikt worden om de *onderlinge afhankelijkheid* van componenten te meten. Hiervoor vertrekt men niet van $P(s)$, maar van $P(s_a|s_b)$, dit wil zeggen de conditionele waarschijnlijkheid dat component a in toestand s_a is, gegeven dat b in toestand s_b is.

Dit definieert $H(a|b)$, dit wil zeggen de onzekerheid over de toestand van a , gegeven de toestand van b . Hoe kleiner $H(a|b)$, hoe zekerder we zijn over de toestand van a als we die van b reeds kennen, dit wil zeggen hoe meer informatie b ons geeft over a . $H(a|b)$ kan dus beschouwd worden als een maat voor de (afwezigheid van) connectie tussen b en a .

9.6 Beperkingen

In hoeverre kunnen variëteit, dwang, entropie of informatie gebruikt worden om de complexiteit te meten? Variëteit en entropie meten de graad van wanorde of onbepaaldheid. Dit wordt soms “ongeorganizeerde complexiteit” genoemd, maar is niet echt complex. Dwang en informatie meten de graad van orde of bepaaldheid. Dit kan misschien beschouwd worden als een primitieve maat van afhankelijkheid, maar niet van complexiteit.

Complexiteit stijgt in feite enkel als zowel entropie als informatie stijgen. Dit lijkt paradoxaal gezien toename van het ene gedefinieerd werd als afname van het andere. Toch kunnen we ons een situatie indenken waarin beide in zekere zin toenemen. Dit vereist echter een uitbreiding van de toestandsruimte met bijkomende distincties (objecten en of eigenschappen). Een grotere toestandsruimte impliceert grotere variëteit/entropie. Tezelfdertijd moeten de connecties (relationele dwangen) tussen de componenten (objecten of eigenschappen) toenemen. Om dit soort processen te beschrijven hebben we echter een distinctiedynamica nodig, dit wil zeggen een theorie die verklaart hoe distincties kunnen toenemen of afnemen in de loop van de tijd.

Hoofdstuk 10. Variatie- en Selectieprincipes

10.1 Dynamica van distincties

We zijn nu geïnteresseerd in de evolutie van een systeem in de loop van de tijd. We hebben gezien in de sectie over dynamische systemen dat deze kan voorgesteld worden aan de hand van een **baan** door de toestandruimte. Dit is een klassieke manier om verandering te beschrijven, die kan teruggevoerd worden tot de Newtoniaanse mechanica. De vraag die we ons nu echter stellen is: hoe verandert complexiteit, en de ermee verbonden fenomenen van variëteit, entropie en informatie? Om deze vraag te kunnen beantwoorden moeten we de Newtoniaanse visie op banen uitbreiden, en banen toelaten die niet uniek gedetermineerd zijn.

- Newtoniaanse dynamica

In de mechanica van Newton wordt elke toestand ondubbelzinnig opgevolgd door één welbepaalde andere toestand. Er is geen onzekerheid of onvoorspelbaarheid, gezien de begintoestand (oorzaak) de volgende toestand (gevolg) volledig bepaalt, en vice versa. Dit impliceert dat de banen door de verschillende begintoestanden steeds parallel blijven: ze snijden elkaar niet. Anders zou op het snijpunt (**bifurcatie**, zie 3.7) de verdere beweging niet gedetermineerd zijn, gezien de toestand in dat punt de keuze zou hebben uit twee verschillende banen.

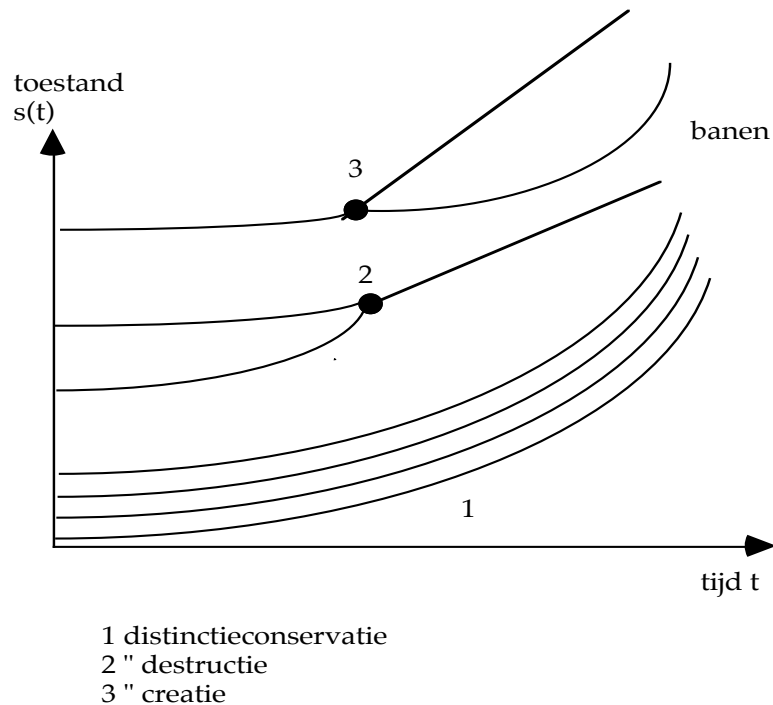
Alle distincties blijven dus bewaard: twee verschillende begintoestanden komen overeen met twee verschillende eindtoestanden, en vice versa. Ook variëteit, entropie, of informatie zijn dus constant. Onze kennis over de begintoestand is niet groter of kleiner dan onze kennis over de eindtoestand. *Informatie blijft bewaard*: ze neemt noch toe, noch af. We kunnen deze vorm van dynamica of evolutie samenvatten als: **distinctieconservatie**.

- Attractordynamica

Voorbeeld: een bal rolt in een put. Vanwaar de bal ook wordt losgelaten, hij rolt altijd naar het diepste punt en komt daar tot stilstand. De toestand op het diepste punt speelt dus de rol van een **attractor**. De bal kan niet op eigen krachten weer uit de put: de beweging is onomkeerbaar.

Distincties worden hier uitgewist. Verschillende begintoestanden of banen komen immers tezamen in dezelfde attractor of eindtoestand. Variëteit wordt dus kleiner. Informatie neemt toe. We wisten eerst niet precies waar de bal lag, maar zijn nu zeker dat hij in het diepste punt ligt. Dit is een vorm van **selectie**: van de verschillende mogelijke toestanden worden de meeste geëlimineerd en blijft er

tenslotte slechts één over. Selectie kan dus gezien worden als het dynamisch equivalent van dwang: de toestandsruimte wordt door het proces beperkt tot een deelruimte (in dit geval met slechts één toestand). We kunnen dit soort van evolutie of dynamica samenvatten als: **distinctiedestructie**.



- Stochastische dynamica

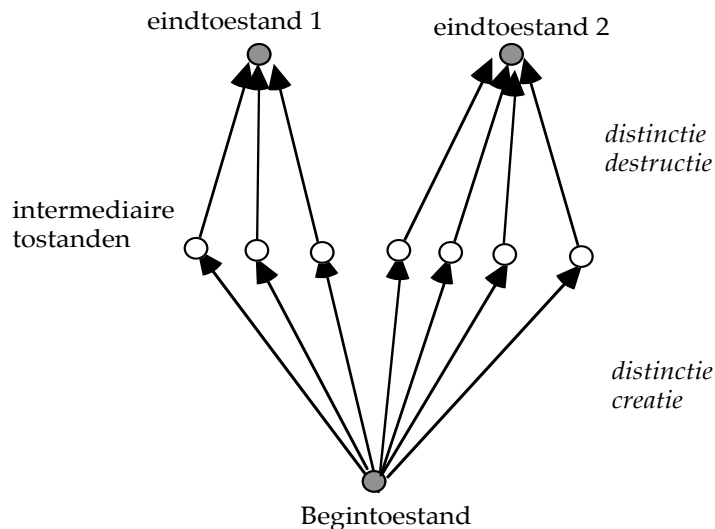
Voorbeeld: een potlood staat verticaal op zijn punt. Wanneer het potlood wordt losgelaten, valt het om, in een richting die we niet kunnen voorspellen. Het proces is stochastisch, dit wil zeggen niet deterministisch.

Distincties worden hier gecreëerd. Dezelfde begintoestand zal immers tot een verscheidenheid aan mogelijke eindtoestanden leiden. Als het experiment herhaald wordt, zal de uitkomst steeds verschillend zijn. Variëteit of entropie neemt toe, en informatie neemt af. Eerst wisten we precies waar het potlood zich bevond, nadien weten het niet juist meer. Dit is het equivalent van **variatie**: het produceren van extra mogelijkheden. We kunnen dit soort van evolutie/dynamica samenvatten als: **distinctiecreatie**.

- Algemene evolutie

Een algemeen proces zal een combinatie zijn van deelprocessen gekenmerkt door distinctiecreatie (variatie), distinctiedestructie (selectie) en distinctieconservatie (causale evolutie). Bepaalde distincties zullen geconserveerd/ gecreëerd/ vernietigd worden op bepaalde ogenblikken, afhankelijk van de krachten die op het systeem inwerken.

Als we vertrekken van één toestand (één distinctie), dan kan deze alleen bewaard blijven of splitsen (distinctiecreatie) en aldus tot verschillende mogelijke toestanden aanleiding geven. Zodra er meerdere distincties (toestanden) zijn, dan kunnen deze opnieuw geheel of gedeeltelijk samensmelten (distinctiedestructie). Dit is een algemeen schema van een willekeurig proces vertrekkende van een gegeven begintoestand, waarin we dus de opeenvolgende fasen van distinctiecreatie en distinctiedestructie kunnen herkennen (zie figuur).



In de praktijk zullen beide fasen voortdurend door elkaar lopen, maar door ze conceptueel te scheiden hopen we een beter inzicht te krijgen in de componenten van het proces. Een theorie (“dynamica”) van zulke processen zal ons een idee moeten geven van de “krachten” of “mechanismen” die deze fasen sturen. We zullen nu de meest fundamentele van deze mechanismen bespreken aan de hand van voorbeelden en fundamentele principes.

10.2 Variatie zonder selectie: drift

Een systeem dat aan zijn lot wordt overgelaten zal in het algemeen willekeurig variëren, onder invloed van allerlei onbekende storingen. We veronderstellen dat er geen systematische kracht of voorkeur is die het in een welbepaalde richting stuwt. We kunnen de baan van het systeem in de toestandruimte dan ook niet op voorhand bepalen. Dit betekent dat we *informatie verliezen* over het systeem: als we eerst wisten in welke toestand het systeem zich bevond, dan weten we dat niet langer nadat onbekende storingen de toestand hebben gewijzigd.

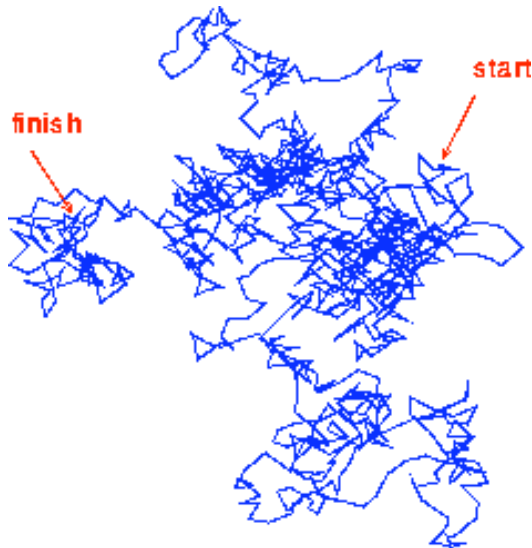
- Voorbeeld: een fles in zee geworpen

De fles is ten prooi aan de golven, stromingen, wind, etc. Hoe langer de fles “op drift” is, hoe verder ze in het algemeen zal verwijderd zijn van de plaats waar we ze in zee gooiden. We weten echter niet in welke richting de fles zal bewegen of waar

ze zal terechtkomen. Hoe langer we wachten, hoe groter onze onzekerheid wordt over waar de fles zich bevindt.

- Voorbeeld: Brownse beweging

Een minuscuul stofdeeltje in een stilstaande vloeistof zal toch op een onvoorspelbare manier bewegen. Dit is zichtbaar onder de microscoop. De verklaring is dat vloeistofmoleculen botsen tegen het deeltje vanuit willekeurige richtingen. Elke botsing doet het deeltje een beetje bewegen.



Dit soort van beweging wordt ook wel een *random walk* genoemd, dit wil zeggen een willekeurige, onvoorspelbare ‘wandeling’. Dit is vergelijkbaar met de baan van een dronkelap die rondwaggelt zonder doel of richting. In de figuur hiernaast zie je een simulatie van een random walk, van het beginpunt (start) tot het punt waar de simulatie werd stopgezet (finish).

- Voorbeeld: neutrale evolutie

Een populatie van dieren of planten kan evolueren zelfs zonder natuurlijke selectie. Door toevallige factoren zullen er nu eens meer dieren zijn met gen A, dan met gen B. Als er toevallig eens geen dieren geboren worden met gen B, dan verdwijnt dit gen definitief uit de populatie. Dit noemt men **genetische drift**. Op die manier kan een soort evolueren zelfs onafhankelijk van de omgeving.

Wanneer er ook toevallige mutaties van de genen zijn zonder dat deze een voordeel of nadeel bieden wat betreft overlevingskansen, dan spreekt men over **neutrale evolutie**: de genetische samenstelling, en dus de organismen zelf, veranderen in de loop van de tijd, maar zonder dat deze evolutie gestuurd wordt door natuurlijke selectie. Dit komt veel voor bij bacteriën en virussen, die immers gemakkelijk muteren. Het effect kan men gemakkelijk visualiseren in een toestandsruimte: een basisvorm (initiële toestand) die zich vermenigvuldigt, zal nakomelingen en afstammelingen produceren die allemaal een beetje verschillen van hun voorouders, zij het op een willekeurige manier. Hoe meer generaties, hoe meer mutaties, en dus in het algemeen hoe meer verschillen. Als men deze afstammelingen aanduidt door punten in een toestandsruimte, dan ziet men eerst een geconcentreerde “cluster” rond de basisvorm die dan geleidelijk uiteenwaaiert tot een wazige “wolk”, die een steeds grotere regio beslaat. Omdat men in zulke wolk moeilijk scheidslijnen of grenzen kan trekken die de ene soort of variant van de andere onderscheidt, noemt men dergelijke verdeling van verwante, maar verschillende types een **quasi-soort**.

10.3 De tweede wet van de thermodynamica

De voorgaande observatie over de spontane afname van informatie onder invloed van willekeurige variaties kan expliciet geformuleerd worden als een wet:

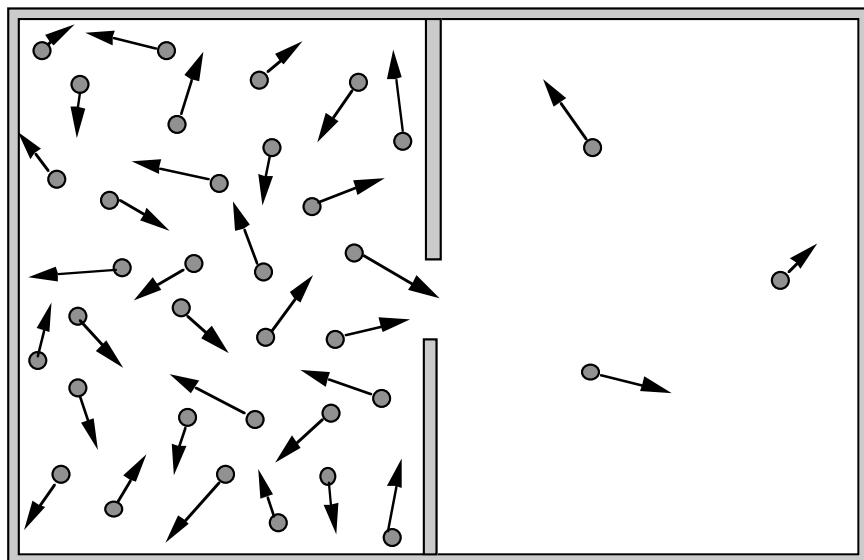
in een systeem zonder selectie kan de entropie slechts toenemen of gelijk blijven, maar nooit afnemen.

Entropie of onzekerheid streeft in zekere zin naar een maximale waarde. Pas wanneer het die bereikt heeft, stopt de evolutie en komt het systeem tot evenwicht. Dit impliceert dat zulke evolutie onomkeerbaar (**irreversibel**) is: de entropie kan nooit weer afnemen tot zijn oorspronkelijke waarde. Dit is een alternatieve formulering van de befaamde 2de wet van de thermodynamica. Laat ons deze wet illustreren met een klassiek voorbeeld.

- Voorbeeld: de doos met twee compartimenten

Beschouw een luchtdichte doos met 2 compartimenten, gescheiden door een wand. In het linkercompartiment bevindt zich een gas—dit wil zeggen een verzameling moleculen die zich in willekeurige richtingen bewegen. Het rechtercompartiment is aanvankelijk leeg. Veronderstel nu dat een opening wordt gemaakt in de scheidingswand. Wat gebeurt er? Het gas stroomt spontaan in het lege compartiment tot beide compartimenten homogeen gevuld zijn. Daarna verandert er niets meer: het systeem is tot evenwicht gekomen.

De entropie is duidelijk toegenomen. Eerst wisten we zeker dat een willekeurige gasmolecule zich links bevond: $P(\text{links}) = 1$, $P(\text{rechts}) = 0$. Nadien hebben we fifty/fifty kans om de gasmolecule links of rechts te vinden: $P(\text{links}) = P(\text{rechts}) = 0,50$. Onze onzekerheid over de locatie van de moleculen is dus toegenomen, terwijl de dwang op de moleculen is afgenomen: ze zijn niet langer beperkt tot het linkercompartiment.

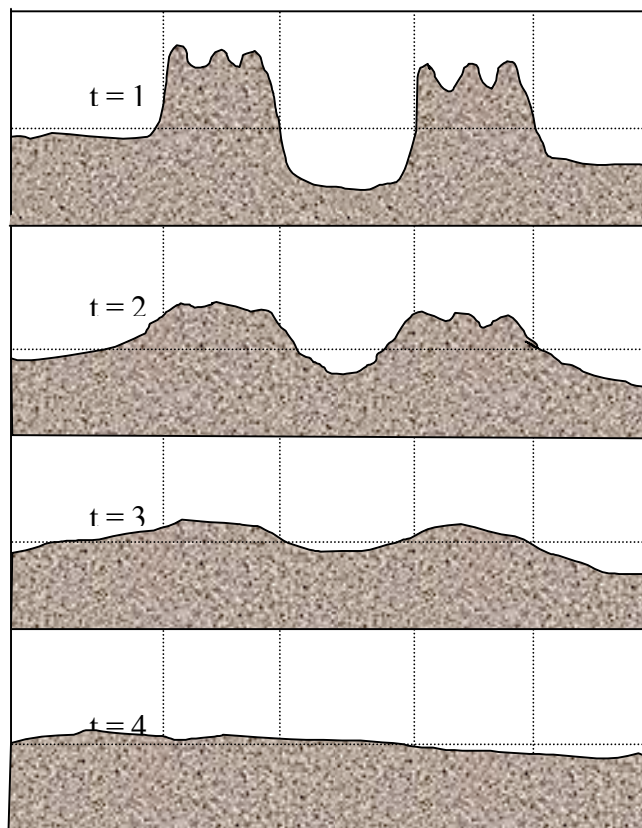


Verklaring: Een molecule in het linkercompartiment die ter hoogte van de opening naar rechts vliegt, zal in het rechtercompartiment terechtkomen. Een molecule rechts die ter hoogte van de opening naar links vliegt, zal in het linkercompartiment terechtkomen. De kans dat dit zou gebeuren is even groot voor links als voor rechts. Er zijn echter aanvankelijk veel meer moleculen links, en dus ook veel meer moleculen die door het gat naar rechts vliegen. Gemiddeld zullen dus veel meer moleculen links → rechts vliegen dan omgekeerd. *Daarom zal het aantal moleculen rechts toenemen.* Wanneer beide compartimenten echter even vol zijn geraakt, zal het gemiddelde aantal moleculen die bewegen links → rechts en rechts → links even groot zijn. Daarom blijft het aantal moleculen links of rechts vanaf nu gelijk.

Ditzelfde mechanisme grijpt plaats in alle systemen waarvan de componenten niet homogeen verdeeld zijn, en die onderhevig zijn aan willekeurige bewegingen of fluctuaties. Een groter aantal componenten zal de meer dichtbevolkte regio's verlaten om in de minder dichtbevolkte terecht te komen, dan omgekeerd. De inhomogeniteit, en de daarmee gepaard gaande structuur, organisatie of **differentiatie**, zal dus spontaan verdwijnen of uitgewist worden.

• Voorbeelden:

- een druppel inkt in een glas water verspreidt zich tot de vloeistof uniform lichtblauw gekleurd is
- een ijsblokje in een glas water smelt, en warm en koud water mengen zich tot alles dezelfde temperatuur heeft



- een zandkasteel valt geleidelijk uiteen onder invloed van weer en wind tot het strand weer praktisch egaal is. Merk op dat de hoogte van het zand in de horizontale positie s proportioneel is met de waarschijnlijkheid $P(s)$ om een zandkorrel te vinden in die positie: hoe hoger het zand opgehoopt, hoe meer zandkorrels, en dus hoe groter de waarschijnlijkheid. De verdeling van de zandkorrels is dus analoog met een waarschijnlijkheidsverdeling. Het

afkalven en ineenzakken van het zandkasteel komt dan overeen met de evolutie van de waarschijnlijkheidsverdeling van één met lage entropie (d.w.z. pieken

en dalen) naar één met hoge entropie (d.w.z. vlak). Dit wordt duidelijk als je de tekening hiernaast, die de opeenvolgende stadia van erosie toont, vergelijkt met de entropieverdelingen in sectie 8.4. De horizontale lijn stelt hierbij de evenwichtsverdeling voor, waarbij alle waarschijnlijkheden dezelfde zijn.

- Betekenis:

In systemen die aan hun lot worden overgelaten, heeft de wanorde de neiging toe te nemen. Alle complexe systemen zijn onderhevig aan slijtage, d.w.z. aan het graduele verlies van structuur. Voorbeelden hiervan zijn de accumulatie van stof en vuil, erosie en verval, roest, vergeten (spontaan vervagen van informatie in het geheugen), aftakeling en veroudering eindigend in de dood.

Toegepast op het universum in zijn geheel lijkt deze vaststelling te impliceren dat alle organisatie of structuur tenslotte zal verdwijnen. Dit toekomstbeeld heet de *warmtedood* van het universum, omdat in thermodynamica toename van de entropie gepaard gaat met dissipatie van energie in de vorm van warmte. In de uurwerkmetafoor (sectie 1.3) is de warmtedood de situatie waar de batterij van het uurwerk is leeggelopen, en er geen bruikbare energie meer voorhanden is om het uurwerk (het universum) verder te laten functioneren. Alles is uniform, grijs, homogeen geworden: er is geen vorm, verandering of structuur meer; elke complexiteit of differentiatie is verloren gegaan.

Indien men deze interpretatie als een absolute wet van de natuur beschouwt, dan is er geen ruimte voor zelforganisatie, leven, of vooruitgang. Dit leidt tot een pessimistisch en fatalistisch wereldbeeld. De enige overblijvende verklaringen voor het leven of de organisatie die we rondom ons zien zijn dan de volgende:

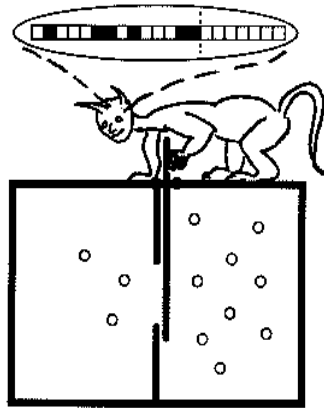
- a) het resultaat van een ongelooflijk toeval (cf. de benadering van de bioloog J. Monod in zijn klassiek boek “Le hasard et la nécessité”)
- b) of de creatie van één of andere bovennatuurlijke kracht die in staat is de natuurlijke toename van de entropie tegen te gaan (bijvoorbeeld de “*élan vital*” of levenskracht gepostuleerd door de filosoof H. Bergson)

Wij zullen in dit boek een meer realistische interpretatie van de tweede wet van de thermodynamica verdedigen: de toename van de entropie door willekeurige variatie is slechts één zijde van de medaille; er is een complementair mechanisme, namelijk selectie, dat het omgekeerde effect heeft.

We moeten hierbij wel een belangrijke opmerking maken. De traditionele formulering van de 2de wet zegt dat de entropie niet kan afnemen *in een gesloten systeem*. “Gesloten” betekent hier: geen uitwisseling met de omgeving. Deze wet is algemeen geldig voor thermodynamische entropie (dissipatie van warmte). We zullen nu echter tonen dat ze niet noodzakelijk geldig is voor statistische entropie (onzekerheid). De nodige voorwaarde voor toename van statistische entropie is niet dat er geen uitwisseling is met de omgeving, maar dat er geen selectie is.

10.4 Selectie door asymmetrische voorkeur

- De demon van Maxwell

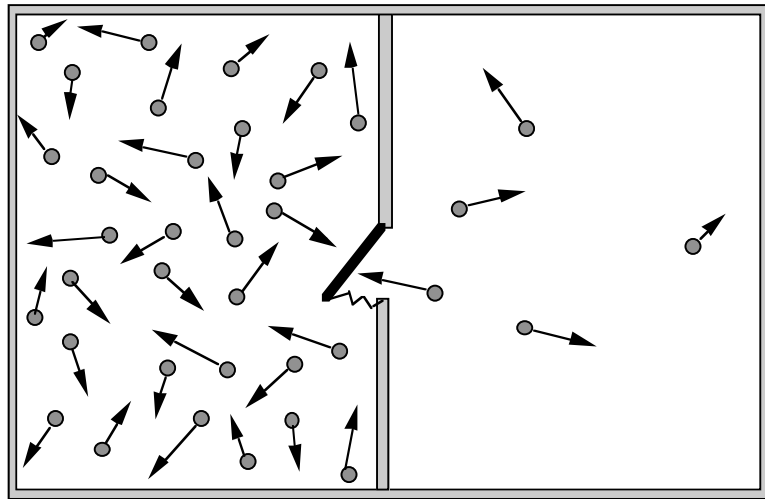


Beschouw opnieuw de doos met twee compartimenten, met een opening in de scheidingswand. Beide compartimenten bevatten eenzelfde hoeveelheid gas. Veronderstel nu echter dat er op de opening een deurtje zit. De 19^e-eeuwse fysicus Maxwell vroeg zich af wat er zou gebeuren als er een klein duiveltje bij die deur zou zitten dat deze deur enkel zou opendoen voor de moleculen die van rechts komen. Dus:

- beweging links → rechts: deur toe. De molecule blijft dus links.
- beweging rechts → links: deur open. De molecule verlaat dan het rechtse compartiment en komt het linkse binnen.

Resultaat: het rechtercompartiment ledigt zich in het linker, en de entropie neemt af.

Dit is in tegenspraak met de statische interpretatie van de 2de wet van de thermodynamica. Tal van wetenschappers hebben daarom geargumenteed dat zulke demon niet kan bestaan. We kunnen de demon echter vervangen door een simpel mechanisme: een veer die de deur open laat gaan als een molecule er van rechts tegen aanbotst, maar die anders de deur dichttrekt (zie tekening hieronder).



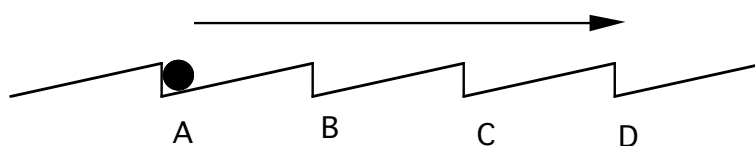
In beide gevallen, demon of veer, is het principe het zelfde: om de entropie te doen afnemen, volstaat het een voorkeur of *asymmetrie* aan te brengen in de bewegingen: rechts $\rightarrow$ links wordt verkozen boven, of is gemakkelijker dan, links $\rightarrow$ rechts.

Opmerking: dit gedachte-experiment is niet in tegenspraak met de 2de wet van de thermodynamica in haar oorspronkelijke betekenis. De *thermodynamische* entropie neemt wel degelijk toe: warmte wordt gedissipeerd, gezien de botsingen van de moleculen tegen de wanden en de deur warmte-energie afgeven. De *statistische* entropie (onzekerheid) wat betreft de posities van de moleculen neemt echter af.

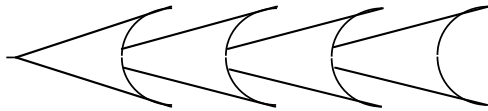
- Voorbeeld : het magische tapijt

Hier is een eenvoudig experiment dat je zelf kan doen. Leg diverse kleine, zware voorwerpen (muntstukken, bouten, steentjes, ...) op een los stuk tapijt. Beweeg het tapijt dan heen en weer in beide richtingen. Ondanks de willekeurige verschuivingen van de tapijt, blijken de voorwerpen bij voorkeur in een welbepaalde richting te bewegen (bijvoorbeeld naar rechts, afhankelijk van de tapijt). Als je de heen-en-weer beweging lang genoeg volhoudt, glijden ze tenslotte allemaal van hetzelfde rechteruiteinde van de tapijt af.

De reden is dat de haartjes van de tapijt in een bepaalde richting wijzen (in dit geval naar links), en aldus bewegingen in de tegengestelde richting bemoeilijken. Gemiddeld genomen zal een willekeurige beweging ("random walk", drift) dus omgezet worden in een gerichte beweging. Alle objecten worden door deze beweging meegesleurd tot aan het eindpunt, waar ze zich ophopen. Er is dus weer afname van de entropie: verspreide systemen concentreren zich in een klein deel van de toestandruimte.



Het principe kan eenvoudig geïllustreerd worden met de tekening hierboven. Wanneer het getande oppervlak willekeurig geschud wordt (bewegingen in beide richtingen even waarschijnlijk), dan zal de bal toch enkel in de richting van de pijl bewegen: $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow \dots$. Een beweging van rechts naar links wordt geblokkeerd door de steile trap, terwijl een beweging van links naar rechts vlot over de zachte helling gaat.



Een ander voorbeeld is een korenaar (hierboven schematisch afgebeeld). Deze dringt gemakkelijk de kleding (bijvoorbeeld een wollen trui) binnen met zijn scherpe punt. Eenmaal in de kleding is het echter zeer moeilijk om de aar er weer uit te trekken vanwege de weerhaken. De enige manier om van dit lastige ding weer af te geraken zonder de trui te beschadigen is door de aar met zijn punt verder naar binnen te trekken, tot deze helemaal door het weefsel heen is. Een gelijkaardig mechanisme wordt gebruikt door verschillende zaden, die zich met weerhaken vastkleven aan kledij of dierenpels, en aldus van de verplaatsingen van het dier profiteren om nieuwe gronden te bereiken waar ze kunnen kiemen.

- **Asymmetrische evolutie**

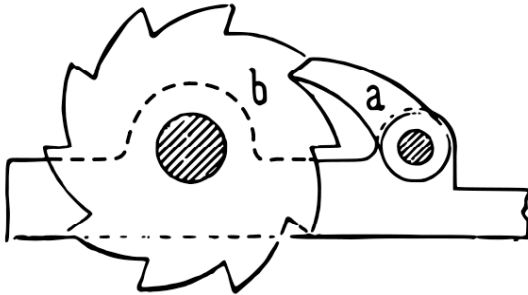
Deze voorbeelden illustreren een algemeen evolutieprincipe: de overgang van een toestand a naar een toestand b is in het algemeen niet even waarschijnlijk of gemakkelijk als de overgang van b naar a . Transities zijn in het algemeen **asymmetrisch**: $a \rightarrow b$ en $b \rightarrow a$ zijn niet evenwaardig. Één van beide is in het algemeen verkieslijk.

In dit geval mogen we spreken van **selectie**: er bestaat een “voorkeur” voor een bepaalde richting en dus voor één van de twee toestanden. Stel dat $a \rightarrow b$ gemakkelijker is dan omgekeerd, dan zullen de meeste systemen a verlaten en in b terechtkomen. Stel dat er geen andere toestand c is zodat $b \rightarrow c$ de voorkeur krijgt boven $c \rightarrow b$, dan zullen de systemen zich in b ophopen. Toestand b fungeert als een **attractor**, een regio in de toestandsruimte die het systeem naar zich “aantrekt”.

- **Het palradeffect**

Sommige bewegingen zijn alleen mogelijk in één richting. Bijvoorbeeld, een fiets kan je door trappen alleen vooruit laten gaan, niet achteruit. Het mechanisme dat zulke eenzijdige beweging mogelijk maakt heet een *palrad* (“ratchet” in het Engels). Een palrad is gewoon een rond radertje (b in de tekening hieronder) waarvan de tanden asymmetrisch zijn zoals in de voorgaande tekening. Wanneer een pal (a) dan met een veer tegen de steile kant van een tand wordt aangeduwd,

verhindert dit elke beweging van het rad naar de pal toe (wijzerzin in de tekening), maar niet van de pal weg.



Willekeurige variatie in zulke situatie zal geblokkeerd worden in de ene richting, vergemakkelijkt in de andere. Het resultaat is dat willekeurige variatie wordt omgezet in gerichte, onomkeerbare verandering. Dit stuwt evolutie in een welbepaalde richting: “vooruitgang”, zonder de mogelijkheid om weer achteruit te gaan. Dergelijke onomkeerbaarheid van evolutie vanwege een asymmetrische voorkeur noemen we het **palradeffect** (in het Engels, “ratchet effect”). (Of de richting “vooruit” ook effectief de richting van “verbetering” is, zullen we later bestuderen.)

- Conclusie

Bij willekeurige, onbekende (“random”) storingen hebben alle mogelijke verplaatsingen in de toestandruimte dezelfde waarschijnlijkheid. Dit leidt tot een diffusie van een klein deel van de toestandruimte naar een groter deel, en dus een toename van de entropie. In vele gevallen echter is de waarschijnlijkheid van verplaatsingen niet uniform. Verplaatsingen in één richting zijn gemakkelijker dan in de andere: er is een selectieve voorkeur. In dat geval zullen systemen zich accumuleren in de regio van de toestandruimte waar ze gemakkelijkst in kunnen (en moeilijkst uit). Entropie kan dus zowel af- als toenemen, afhankelijk van de aanwezigheid van selectie.

10.5 Orde uit de chaos

Willekeurige variatie produceert entropie of wanorde. Selectie produceert informatie of orde. Beide tezamen produceren ze echter meer orde. Inderdaad, selectie blokkeert variaties in de “verkeerde” richting, maar laat variaties in de “goede” richting toe. Toename van de willekeurige variatie leidt dus tot:

- 1) meer wanorde als er geen selectie is.
- 2) meer orde als er wel selectie is

Met andere woorden: als er een selectieve voorkeur is voor bepaalde configuraties, zal *meer* ongecontroleerde variatie (chaos, ruis = “noise”, storingen, fluctuaties) tot

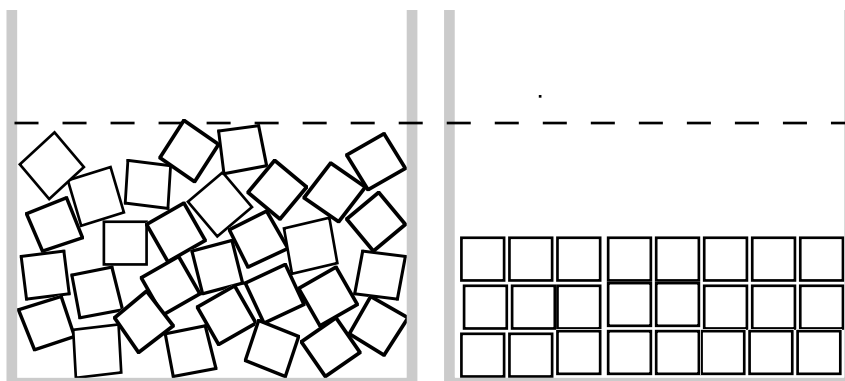
meer orde leiden. Dit lijkt paradoxaal maar is een zeer fundamenteel principe met een grote toepasbaarheid, in het bijzonder op alle vormen van zelforganisatie. Dit principe is door verschillende wetenschappers onder verschillende benamingen naar voren gebracht, onder andere:

- *Order from noise* (von Foerster)
- *Order through fluctuations* (Prigogine)

- Voorbeeld: schudden produceert volumevermindering

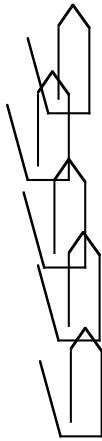
Schudt een pot die je gevuld hebt met een materiaal dat bestaat uit vele kleine brokjes of stukjes, zoals theeblaadjes, spijkers, zandkorrels, of zout. Hoe meer je schudt, hoe lager het niveau van het materiaal komt te liggen. De pot die eerst vol leek, blijkt nu nog heel wat extra ruimte te bieden om verder bijgevuld te worden. De selectieve voorkeur is de volgende: brokjes die dichter tegen de bodem en dichter tegen elkaar liggen zullen moeilijker weer omhoog komen bij het schudden dan brokjes die losser tegen elkaar liggen. Daarom “streven” alle stukjes naar een zo dicht mogelijke concentratie op de bodem. Meer schudden (meer variatie) leidt tot een kleiner volume (meer orde).

Als de brokjes allemaal exact dezelfde vorm en afmetingen hebben, dan is de meest compacte configuratie normaal één waarin de brokjes op exact dezelfde afstanden van elkaar liggen, zoals in een kristal. Inderdaad, veronderstel dat brokjes *a* en *b* op een kleinere afstand van elkaar liggen dan *c* en *d*: dit impliceert dat de afstand tussen *c* en *d* niet minimaal is, want wat *a* en *b* kunnen, kunnen *c* en *d* in principe ook. De optimale configuratie is er dus één waarin geen enkele relatie tussen brokjes afwijkt van de andere. Dit principe is geïllustreerd in de tekening hieronder. Links zie je een ongeordende opeenhoping van kleine blokken in een rechthoekige doos. Rechts zie je dezelfde blokken maar nu regelmatig gealigneerd, met een minimale tussenafstand. Het is duidelijk dat de blokken in de rechtse doos veel minder volume innemen. In het geval van identieke componenten, zoals atomen en moleculen, is de geselecteerde configuratie dus zeer duidelijk geordend, in de zin van symmetrisch of regelmatig.



- Toepassing: harden van metaal

Om metaal hard te maken probeert men een zo regelmatig mogelijk kristalstructuur te bekomen voor de metaalmoleculen. Inderdaad, een afwijking van deze orde impliceert dat sommige moleculen verder van elkaar liggen dan andere, en dus gemakkelijker ten opzichte van elkaar zullen verschuiven wanneer het metaal onder spanning komt te staan. Dergelijke onregelmatigheden vormen de zwakke plekken waar het metaal eerst zal breken. Wapensmeden, die zwaarden probeerden te maken die maximaal bestand waren tegen bruto geweld, hebben proefondervindelijk geleerd hoe ze een maximale hardheid konden bekomen. De techniek bestaat erin het metaal verschillende malen te verhitten en langzaam weer te laten afkoelen. Hoge temperaturen doen de moleculen meer ten opzichte van elkaar bewegen en leiden dus tot meer variatie. Deze verbreekt zwakke verbindingen en geeft ze de kans om een meer stabiele configuratie te ontdekken. Gedurende de afkoeling valt de variatie geleidelijk stil, zodat het metaal kan “settelen” in de meest regelmatige, en ook meest stabiele structuur.



Experiment: zelforganisatie van paperclips

vul een doos met paperclips die lichtjes geopend zijn, zodat ze in elkaar kunnen schuiven. Schud nu de doos. Resultaat: de paperclips organiseren zichzelf in gevorkte kettingen. Verklaring: het is gemakkelijker voor twee losse paperclips om in elkaar te schuiven dan om weer los te komen. Het selectieprincipe is dus: in elkaar geschoven paperclips verdienen de “voorkeur”. Hoe harder en hoe langer je de doos schudt (meer variatie), hoe meer paperclips op het einde aan elkaar vasthangen.

- Blinde variatie

In evolutietheorie spreekt men dikwijls over “**blinde**” of “willekeurige” (*random*) variatie. De mutaties in de genen zijn in het algemeen puur toevallig of onvoorspelbaar. De essentie van de Darwinistische evolutietheorie is dat dit voldoende is voor evolutie, zolang er ook selectie is. Dit betekent dat de variaties niet moeten gericht zijn om toch een gerichte evolutie voort te brengen. De variaties hebben geen “voorkennis” van wat de juiste evolutierichting is; ze kunnen niet “vooruitzien”; ze zijn “blind”. De voorbeelden die we besproken hebben, maken het duidelijk dat we inderdaad niet meer nodig hebben voor gerichte evolutie.

Dit sluit echter niet uit dat variaties gericht *kunnen* zijn, wat in vele situaties ook het geval is. Het fundamentele inzicht is echter dat evolutie zou werken *zelfs* indien variaties 100% blind waren. Dit laat ons toe om organisatie te verklaren zonder beroep te moeten doen op een reeds bestaande orde of intelligentie (“God”) die het

proces stuurt. (We moeten nog wel verklaren waar precies de selectieve voorkeur vandaan komt, wat we zullen doen door het concept “fitness” te introduceren).

Een andere manier om “blindheid” te formuleren is dat variatie niet “weet” welke de voorkeur is van selectie: variatie- en selectiemechanismen zijn in het algemeen onafhankelijk van elkaar. Bijvoorbeeld, mutaties in het DNA zijn onafhankelijk van de omgeving waaraan het organisme zich probeert aan te passen. Bijvoorbeeld, de bewegingen van het tapijt zijn onafhankelijk van de richting van de haartjes op het tapijt.

- Evolutie als probleemoplossing

Een universele methode om problemen op te lossen is de volgende: probeer iets (trial), en als het niet lukt (error), probeer dan iets anders, tot je tenslotte je doel bereikt hebt. Dit is de methode die de evolutie gebruikt om te zoeken naar systemen die “de voorkeur verdienen”.

Indien je al eerder gelijkaardige problemen hebt opgelost, zal je in het algemeen echter niet puur willekeurig iets uitproberen, maar beginnen met dingen waarvan je uit ervaring weet dat ze een grotere kans van slagen hebben. In dit geval is je zoektocht niet echt “blind”, maar anderzijds weet je ook niet zeker hoe je naar je doel moet. Dit heet *heuristische* probleemoplossing: er is weliswaar geen garantie op succes, maar je beschikt toch over een min of meer efficiënte methode of intuïtie die je toelaat je doel wat sneller te bereiken. Zoals we verder zullen zien hebben veel systemen in de loop van de evolutie vormen van zulke “heuristische” kennis ontwikkeld, zodat ze niet langer blind in het rond moeten tasten. Ze hebben daarmee echter nog geen duidelijk zicht op de toekomst. In dit geval blijft het algemene idee van (niet-blinde) variatie en selectie bruikbaar om het proces te beschrijven, eerder dan een visie uitgaande van voorbestemdheid of determinisme.

10.6 Het stapsteenprincipe

We hebben gezien dat meer variatie de kans om de oplossing van een probleem te vinden groter maakt. Dit helpt echter weinig als de kans op succes a priori onnoemelijk klein is. Typische organismen zijn immens complexe systemen, die maar kunnen overleven in zeer specifieke situaties. “Zeer complex” betekent veel componenten en eigenschappen en dus een zeer grote toestandsruimte. “Zeer specifieke situatie” betekent dat slechts een zeer klein deel van de toestandsruimte levensvatbaar is. Het percentage levensvatbare toestanden is dus infinitesimaal klein. De vraag die rijst is dan: hoe is blinde variatie erin geslaagd net die specifieke toestanden te ontdekken?

- Voorbeeld:

Beschouw een denkbeeldig organisme met een DNA streng van 1000 “woorden” lang. (Dit is in feite veel eenvoudiger dan de eenvoudigste organismen die we kennen.) Elk “woord” representeert hier één aminozuur (bouwsteen van de proteïnen die de cel vormen). Er zijn 20 aminozuren die door het leven op Aarde gebruikt worden. Deze vormen de “woordenschat” van de genen. De toestandsruimte voor dit systeem bestaat uit alle mogelijke “zinnen” die we kunnen maken van 1000 woorden lang, waarbij elk woord gekozen wordt uit de 20 mogelijkheden. Het aantal mogelijke toestanden is dan 20^{1000} , of ongeveer 10^{1301} (1 gevolgd door 1301 nulletjes)!

Veronderstel dat slechts één toestand de juiste is. Hoe lang duurt het dan voor je die toestand kan vinden door variatie en selectie? Als je elke seconde een kans krijgt om te raden, en zo bezig blijft van het begin van het universum (zo’n 10 miljard jaar geleden) tot nu, dan heb je minder dan 10^{17} pogingen gehad, wat maar een minieme fractie is van wat je nodig hebt. Sneller raden (bijvoorbeeld duizend maal per seconde) maakt het niet minder hopeloos. Conclusie: hoe veel variatie er ook is, je zal nooit de juiste oplossing vinden enkel door blind te raden.

- Voorbeeld: de Boeiing van Hoyle

Stel dat een orkaan door een vuilnisbelt raast. Hoe groot is de kans dat blinde variatie verschillende stukken metaal zou assembleren in de vorm van een Boeing 747? Opnieuw is de kans zo goed als nul, onafhankelijk van de tijdsduur of de kracht van de orkaan.

Dergelijke voorbeelden worden typisch aangehaald door mensen die sceptisch staan tegenover de evolutietheorie van Darwin. (Dit voorbeeld is afkomstig van de astrofysicus Fred Hoyle, die meende dat het leven niet op aarde kan ontstaan zijn, maar een buitenaardse oorsprong moet hebben). Volgens hen is de kans om door blinde variatie een levend wezen te assembleren zodanig klein dat we wel een ander soort mechanisme moeten postuleren om het leven te verklaren, zoals een ingreep door God, door buitenaardsen, of door een soort kracht (zelforganisatie, élan vital, ...) die door Darwin niet voorzien werd. De goddelijke verklaring komt in twee versies:

- 1) *creationisme*: God heeft alle levende wezens direct gecreëerd, zoals in de Bijbel staat. Probleem: hoe verklaar je dan de fossielen van primitieve diersoorten? En wie heeft God gecreëerd?
- 2) *“intelligent design”*: een ongespecificeerde intelligentie heeft op tijd en stond in de evolutie ingegrepen en ze in de goede richting gestuurd. Dit is moeilijker te weerleggen, maar geeft nog steeds geen echte verklaring: Van waar komt die intelligentie? Hoe werkt ze? Waarom grijpt ze in?...

Het hierna volgende **stapsteenprincipe** geeft echter een veel eenvoudigere verklaring.

- Voorbeeld: de parabel van de brandkastkraker

Het volgende voorbeeld werd gegeven door H.A. Simon. Beschouw een brandkast met een cijferslot bestaande uit 6 cijfers. Om ze te openen moet je de juiste cijfercombinatie vinden. Zes cijfers elk met 10 mogelijke waarden geeft $10^6 = 1$ miljoen mogelijke toestanden. Dit is veel kleiner dan de toestandsruimte van een organisme, maar nog steeds veel te groot om in de praktijk de oplossing te vinden door erop los te raden.

Hoe doet de brandkastkraker het? Elk van de radertjes van het cijferslot heeft 10 posities. Één van die posities, de juiste, is veel gebruikt, en dus lichtjes uitgesleten. Wanneer het radertje door die positie gaat, hoor je een lichte “klik” (dit is de reden dat brandkastkrakers nauwkeurig met een stethoscoop luisteren). Je weet dan dat dit radertje juist zit en dat je kan verder gaan met het volgende. Na maximum 6×10 pogingen zitten alle radertjes op de juiste plaats.

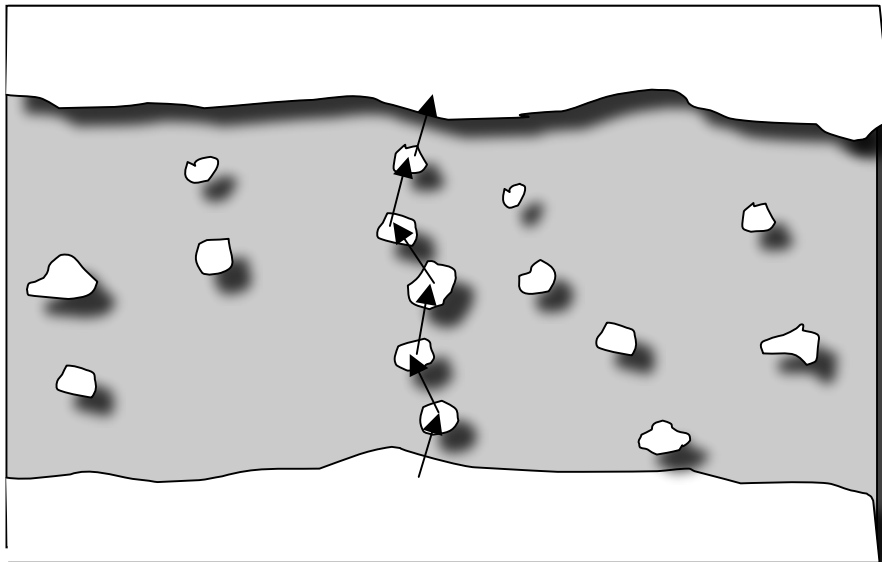
Dus: in plaats van 1.000.000 pogingen te moeten doen, ben je er geraakt met maximum 60. De cruciale stap is het horen van de “klik”. Deze geeft je aan dat je op de juiste weg zit, en je nu kan concentreren op het volgende radertje. Je hoeft dus niet alle mogelijke combinaties meer uit te proberen, gezien je de reeds geteste radertjes op hun plaats kan laten zitten.

In essentie: de “klik”, dit wil zeggen de informatie dat je op de goeie weg zit, dat je een deel van de oplossing hebt, herleidt het aantal uit testen mogelijkheden van een vermenigvuldiging ($10 \times 10 \times 10 \times \dots$) tot een optelling ($10 + 10 + \dots$). Het aantal mogelijkheden neemt dus niet langer exponentieel toe, maar lineair.

Voorbeeld: laat ons dezelfde veronderstelling toepassen op het denkbeeldig organisme uit het vorige voorbeeld: $20 + 20 + 20 \dots = 20 \times 1000 = 20.000$ in plaats van 20^{1000} . Met 20.000 pogingen ben je dus zeker om de oplossing te vinden. Voor de evolutie is dit triviaal. Er zijn immers miljarden organismen gedurende miljarden jaren geweest om de diverse mogelijkheden uit te proberen.

Beschouw nu een meer realistisch organisme met 1 miljoen woorden in het DNA, dan hebben we 20×1 miljoen = 20 miljoen pogingen nodig. Dit is nog steeds zeer weinig naar evolutionaire normen.

In de praktijk krijgen we natuurlijk geen “klik” na elk juist geraden woord. We vinden echter wel gedeeltelijke oplossingen: “tussenstappen” naar het verder afgelegen doel.

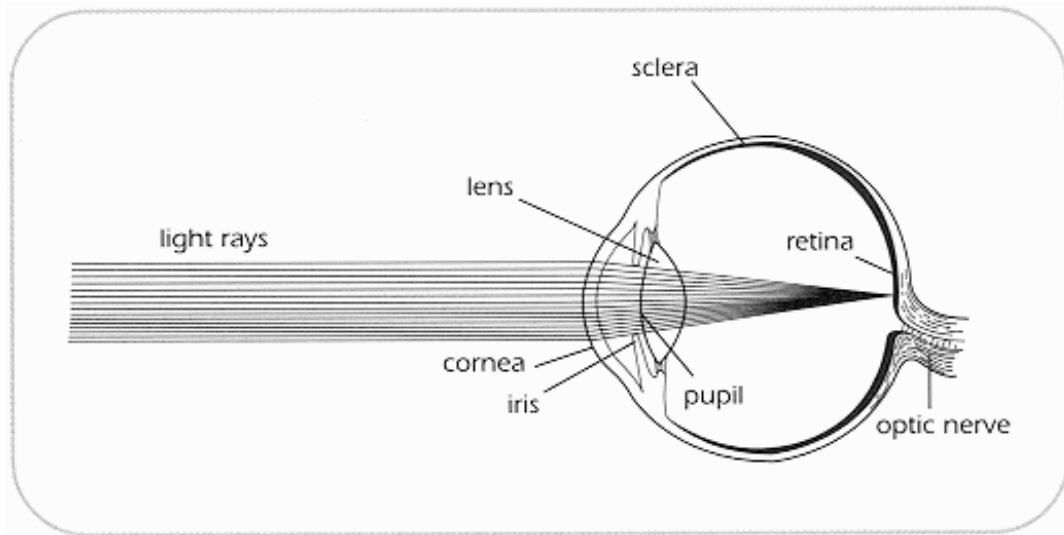


- De metafoor van de rivier

Stel dat een rivier 6 meter breed is—dit wil zeggen te breed om over te steken zonder nat te worden. Stel nu dat er ongeveer om de meter een grote steen boven het water uitsteekt. We kunnen dan van steen naar steen stappen tot we de rivier over zijn. Aldus fungeren partiële oplossingen als “stapstenen” naar de volledige oplossing, die een schijnbaar onoplosbaar probleem bijna triviaal maken. (Merk wel op dat er in de evolutie uiteraard geen “volledige” of finale oplossing is: er zijn alleen partiële oplossingen, en alles kan altijd verder verbeterd worden.)

In de tekening hierboven wordt een toestandruimte 2-dimensionaal voorgesteld. Witte vlakken (“stenen”) representeren toestanden die leefbaar of fit zijn, grijze vlakken (“water”) de toestanden die niet fit zijn, en waar het systeem dus zou geëlimineerd worden. Variaties kunnen over grijze vlakken heen springen op voorwaarde dat de sprong niet te lang is. Het volstaat dat er voldoende witte vlakken (“stapstenen”) zijn die niet te ver van elkaar liggen, om de evolutie toe te laten om via enkele kleine sprongen (pijlen in de tekening) de grote grijze zone (“rivier”) over te steken.

Voorbeeld*: evolutie van het oog in 6 “stappen”



De complexe organisatie van het oog is een andere voorbeeld dat de critici van de evolutietheorie graag gebruiken. Door componenten blind door elkaar te gooien is de kans uiterst klein dat je een werkbaar oog krijgt. Op het eerste zicht zijn er ook geen partiële oplossingen: wat kan je immers doen met een kwart of een half oog? Nochtans is het heel simpel om een sequentie van tussenstappen te bedenken in de evolutie van het oog:

- 1) een deel van de huid wordt lichtgevoelig: het dier kan nu nacht van dag onderscheiden.
- 2) het lichtgevoelig deel zakt weg in een holte die een simpele “camera obscura” vormt, zodat het licht door de opening (“pupil”) geprojecteerd wordt op het lichtgevoelig deel (“retina”) en aldus een wazig beeld vormt. Het dier kan nu onderscheiden uit welke richting het licht komt.
- 3) de holte wordt afgesloten door een stukje transparante huid dat over de opening is gegroeid; het lichtgevoelige weefsel is nu beschermd tegen stof, hitte en koude.
- 4) de transparante huid ontwikkelt een verdikking in het midden: dit vormt een simpele lens die het licht focust, zodat het beeld scherper wordt.
- 5) spiertjes trekken aan de lens om ze dikker of dunner te maken: het oog kan nu focussen zowel dichtbij als veraf.
- 6) de lichtgevoelige cellen muteren in verschillende types, gevoelig respectievelijk voor blauw, groen en rood licht: het oog kan nu kleuren onderscheiden.

Elk van deze stappen is een onmiskenbare verbetering, die de voorkeur verdient boven de vorige, en die dus zal geselecteerd worden. Deze evolutionaire sequentie is realistisch gezien er diersoorten bestaan die elk van de 6 ontwikkelingsstadia vertonen.

10. 7 Exaptatie en de paradox van de irreduciebele complexiteit

Ondanks al deze argumenten geven de tegenstanders van de evolutietheorie zich nog niet gewonnen, en blijven zij zoeken naar een of andere vorm van hogere intelligentie die de evolutie zou sturen. Het tot nu toe meest gesofisticeerde argument van het “intelligent design” kamp werd verwoord door de biochemicus Michael Behe. Hij definieert een systeem als “irreduciebel complex” wanneer het weglaten van ook maar één enkel onderdeel maakt dat het systeem niet langer functioneert. Dit impliceert dat de functie van het systeem emergeert uit het *geheel* van al zijn componenten, en dus niet kan gereduceerd worden tot een combinatie van de functies van afzonderlijke onderdelen. Naast een aantal ingewikkelde voorbeelden van biochemische reacties in levende organismen, illustreert Behe dit aan de hand van een muizenval. Een nog eenvoudiger voorbeeld van een “irreduciebel complex systeem” is een wasknijper. Deze bestaat uit twee houten latjes die tegen elkaar aan gedrukt worden door een metalen veer. Het is duidelijk dat de wasknijper totaal nutteloos wordt als één van deze componenten zou verdwijnen: zonder veer vallen de latjes los van elkaar, en als we één latje weghalen is er niets waar het andere latje tegen kan gedrukt worden.

Volgens het stapsteenprincipe zal een complex systeem evolueren via een aantal tussenstappen. Behe gaat ervan uit dat elke stap één component van het systeem produceert, gezien het onwaarschijnlijk is om door blinde variatie meer dan één component tegelijk te creëren. Bij een irreduciebel complex systeem zijn echter alle componenten tegelijk nodig om het systeem te laten functioneren, en dus hebben de afzonderlijke stappen geen enkel voordeel: zij produceren immers toch maar componenten die alsnog nutteloos zijn. Daarom zal natuurlijke selectie ze niet weerhouden. Volgens Behe kan natuurlijke selectie in dit geval alleen werkzaam zijn als alle componenten tegelijkertijd zouden op de juiste plaats terechtkomen. Zoals de Boeing van Hoyle illustreert, is de kans dat dit gebeurt door blinde variatie echter onnoemelijk klein, en dus moeten we wel een intelligente kracht postuleren die de componenten op de juiste manier heeft bijeengebracht.

De fout die Behe maakt is om te veronderstellen dat de functie van een component in een systeem zoals we dat nu kennen ook de functie was op het ogenblik dat die component eerst verscheen. Dit zou betekenen dat evolutie doelgericht tewerk gaat en de componenten één voor één aanbrengt met het oog op hun toekomstige functie—net zoals een timmerman een poot aan een plank vastschroeft met de bedoeling dat hieruit, na toevoeging van nog drie ander poten, tenslotte een tafel zou te voorschijn komen. Op het ogenblik dat er nog maar één poot is, kan deze nog niet zijn functie vervullen om het tafelblad te ondersteunen, gezien er minstens drie nodig zijn om een stabiel geheel te vormen. Variatie is echter een “random walk” die nu eens die richting uitgaat, dan een andere, en enkel pauzeert indien het een

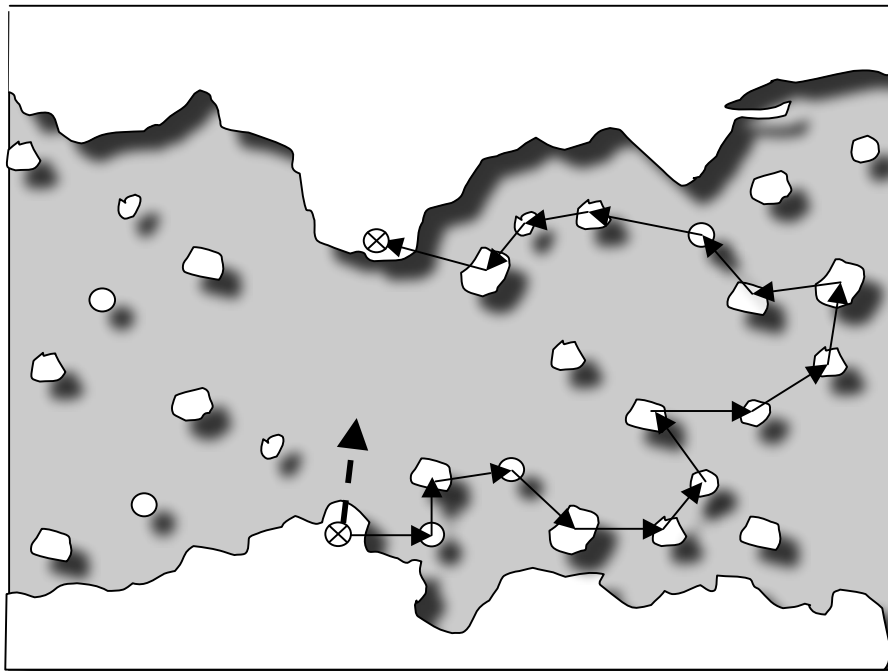
stabiele, “fitted” configuratie tegenkomt. Deze “tussenstappen” liggen dus allesbehalve op een rechte lijn die van vertrekpunt naar doel leidt.

In vele gevallen zullen de tussenstappen fit zijn door het vervullen van totaal andere functies dan degene waar het proces tenslotte is terechtgekomen. Naargelang de evolutie verder gaat, zullen de aldus gevormde componenten geregeld van functie veranderen als blijkt dat ze ook nog een ander nut hebben. Dit noemt men **exaptatie**: een component die oorspronkelijk aangepast was om een bepaalde functie te vervullen (adaptatie), blijkt later nuttig gebruikt te kunnen worden om een totaal andere functie te vervullen—waarbij de oorspronkelijke functie bijkomstig of misschien zelfs nutteloos wordt. Evolutie is *opportunistisch*: ze gebruikt de mogelijkheden die zich op dat ogenblik voordoen, zonder vooruit te blikken of te plannen, of te proberen de kortste weg te vinden naar een verafgelegen doel. Laat ons dit illustreren met enkele voorbeelden.

Voorbeelden: zwemblazen en veren

De zwemblaas die vissen toelaat om onder water hun verticale positie te reguleren was oorspronkelijk een primitieve long die longvissen toeliet om lucht boven het wateroppervlak te happen wanneer er onvoldoende zuurstof in het water te vinden was. De meeste moderne vissen leven in voldoende zuurstofrijk water en hebben dus geen behoefte meer om lucht in te ademen. Hun longfunctie is daarom verdwenen. Hun afstamming van de longvissen heeft hen echter een duidelijk voordeel opgeleverd tegenover meer primitieve vissen zoals haaien en roggen, die geen zwemblaas hebben en dus voortdurend moeten in beweging blijven willen ze niet naar de bodem zakken.

We vinden een gelijkaardige vorm van exaptatie terug in wat op het eerste zich een voorbeeld van irreduciebele complexiteit lijkt: de veren van vogels. Vogels kunnen vliegen dankzij de opmerkelijke structuur van hun veren die gedurende een vleugelslag wel lucht doorlaten als de vleugel naar boven beweegt, maar niet wanneer die naar beneden gaat. Het is algemeen aanvaard dat vogels geëvolueerd zijn uit kleine dinosaurussen, die noch vleugels noch veren hadden. Om te leren vliegen zoals vogels moesten die dinosaurussen zowel vleugels als veren ontwikkelen, gezien elk van deze componenten op zich niet voldoende is. (Merk op dat er vliegende reptielen bestonden zonder veren, maar dat deze op een gans andere manier vlogen—of eerder *zweefden*). We kunnen het probleem echter eenvoudig oplossen door op te merken dat veren nog een andere functie hebben dan vliegen: ze zijn namelijk uitermate geschikt om de lichaamswarmte te bewaren, zoals iedereen zal beamen die reeds onder een donsdeken heeft geslapen. Het is dus waarschijnlijk dat veren eerst ontstonden als bescherming tegen koude, en pas veel later, nadat de voorouders van vogels hadden leren zweven van boom tot boom en aldus vleugelachtige ledematen hadden ontwikkeld, hun specifieke vliegfunctie hebben verworven.



Het belang van omwegen

Deze voorbeelden zijn zeer eenvoudig omdat ze niet meer dan twee componenten of functies omvatten, maar dezelfde redenering is van toepassing op veel complexere systemen met tientallen componenten. De voorbeelden van “irreduciebele complexiteit” die Behe in zijn boek heeft naar voren gebracht, zijn allemaal weerlegd aan de hand van evolutionaire “stappenplannen” die gebruik maken van **exaptatie**.

Hierbij moeten we nog opmerken dat evolutie een systeem niet altijd complexer maakt, maar soms een ingewikkeld ontwerp stroomlijnt en vereenvoudigt omdat het aldus efficiënter te bouwen en te gebruiken valt. Stel dat een ingewikkelde reeks tussenstappen leidt tot de evolutie van een systeem met 20 componenten, die elk op een zeker ogenblik een nuttige bijdrage leverden. Nu deze componenten echter perfect met elkaar samenwerken aan hun collectieve functie blijkt echter dat deze functie ook met minder elementen kan uitgevoerd worden. Selectie voor grotere efficiëntie zal er in het algemeen toe leiden dat de niet langer nuttige componenten gradueel verdwijnen, tot elke overblijvende component echt noodzakelijk is. Een volgeling van Behe zal dan wellicht constateren dat het systeem irreduciebele complexiteit vertoont, en daaruit besluiten dat het niet via tussenstappen kan ontstaan zijn.

Dit is begrijpelijk wanneer men redeneert als een ingenieur of ontwerper die een duidelijk doel voor ogen heeft en zich de kortste of meest logische weg inbeeldt die naar dat doel leidt. Maar wat wij, achteraf gezien, de meest logische weg vinden, is onafhankelijk van de weg die de evolutie gevolgd heeft. De toestandsruimte voor een complex evoluerend systeem is zo onnoemelijk groot dat wij ons nog geen

fractie kunnen voorstellen van de mogelijke paden die leiden van toestand A naar toestand B. Onze natuurlijke tendentie is om enkel naar de kortste of meest directe paden te kijken. Als we onvoldoende stapstenen op dit pad vinden, zullen we geneigd zijn te concluderen dat evolutie nooit op eigen kracht deze afstand kan overbruggen. Blinde variatie is echter niet onderhevig aan dergelijke vooroordelen, en zal er dus niet voor terugdeinzen om de meest ingewikkelde kronkels en omwegen te volgen, tussendoor nog een half dozijn functies verkennend die achteraf helemaal niet meer nodig blijken te zijn, om tenslotte toch in B aan te komen, zij het vanuit een gans andere richting dan wij verwachtten.

Hoofdstuk 11. Fitness

11.1 Recapitulatie: variatie en selectie

Variatie is het verkennen van nieuwe toestanden, zonder vooringenomenheid of gerichtheid. Door variatie zullen de mogelijke banen door de toestandsruimte divergeren of uiteenwaaieren, resulterend in een groeiende variëteit van mogelijke toestanden (distinctiecreatie). Variatie doet dus de variëteit of entropie toenemen, en de informatie die wij over het systeem hebben afnemen.

Variatie hoeft niet echt verklaard te worden. We kunnen ze zien als het gevolg van willekeurige, ongecoördineerde invloeden of storingen. Zolang het universum niet totaal verstard of bevroren is, zijn er altijd bronnen van variatie. Elk systeem waarvan de temperatuur boven het absolute nulpunt ligt (-273°C) ondergaat thermische fluctuaties (kleine, willekeurige bewegingen van de moleculen). Volgens de kwantummechanica zal zelfs het vacuüm (dat per definitie op het absolute nulpunt ligt) kwantumfluctuaties ondergaan. De chaostheorie voegt daar aan toe dat dergelijke microscopische fluctuaties steeds macroscopische gevolgen kunnen hebben (het vlindereffect). Gezien een systeem per definitie interageert met de rest van het universum zal het noodzakelijk de invloed van dergelijke toevallige (of niet toevallige) veranderingen ondergaan, en dus spontaan van toestand veranderen.

Om een constructieve evolutie te krijgen moet variatie echter gecombineerd worden met selectie. **Selectie** is het verkiezen van bepaalde toestanden of variaties, en het elimineren van de andere. Selectie is aldus de directe tegenhanger of complement van variatie, die het aantal toestanden en dus de variëteit of entropie doet verminderen. Selectie is wat een verspreide “wolk” van toestanden beperkt of doet convergeren naar een bepaalde regio van de toestandsruimte, een attractor. Selectie vermindert aldus onze onzekerheid, en doet de informatie toenemen.

Maar wat wordt er precies geselecteerd? De vraag is waarom bepaalde toestanden de voorkeur verdienen boven anderen. Waar zit hem het verschil? Welke zijn de “krachten” of de dynamica die het systeem in die bepaalde richting stuwen? Het antwoord is **fitness**: toestanden met een hogere fitness worden verkozen. Het probleem is nu om te begrijpen wat fitness juist is, waar het vandaan komt, en hoe het het evolutionaire proces voortstuwt.

11.2 De tautologie van de natuurlijke selectie

Natuurlijke selectie kan worden gedefinieerd als “survival of the fittest”: de meest fitte worden behouden, de minder fitte worden geëlimineerd. Dit kan echter gezien

worden als een *tautologie*, dit wil zeggen een uitspraak die noodzakelijk, per definitie waar is. Inderdaad, de meest algemene definitie van “*fit*” is “dat wat overleeft”. (De meer traditionele interpretatie van “survival of the fittest” als “overleving van de sterkste” blijkt niet te kloppen, want “kracht” heeft niet veel te maken met evolutionair succes). Volgens deze interpretatie betekent natuurlijke selectie niet meer dan: *wat overleeft, overleeft*.

Zulke uitspraak lijkt triviaal of zinledig, en verschillende denkers hebben om die reden natuurlijke selectie verworpen als algemeen verklaringsmodel. De interpretatie van natuurlijke selectie als tautologie is niet strikt verkeerd, maar de conclusie dat het principe van natuurlijke selectie daarom nutteloos is, slaat de bal mis. De wetten van de logica en van de wiskunde zijn immers allen tautologieën. Dit betekent echter niet dat logica en wiskunde triviaal of zinledig zijn: de stellingen die op basis van deze axioma's kunnen bewezen worden zijn dikwijls zeer complex en contra-intuïtief, en hun toepassingen in het maken van berekeningen of deducties zijn legio.

Voorbeelden:

- *als A waar is, en als A B impliceert, dan is B waar*. Dit is de meest fundamentele inferentieregels uit de logica, de zgn. *modus ponendo ponens*. Deze regel lijkt de evidentie zelve, gezien de implicatie juist gedefinieerd is door de eigenschap dat je de waarheid van het tweede lid (B) kan afleiden uit de waarheid van het eerste (A). Toch is de *modus ponendo ponens* een nuttige en fundamentele regel, die zowel studenten als computerprogramma's helpt om de juiste inferenties te maken.
- het axioma van de contradictie: $A \ \& \ \text{niet } A = \text{vals}$
- de basis van de optelling: $1 + 1 = 2$

Het nut van dergelijke op het eerste zicht triviale afleidingen of gelijkheden is de connectie tussen twee verschillende voorstellingen, zienswijzen of aspecten van het zelfde fenomeen (bijvoorbeeld $1 + 1$ en 2). Als je de ene voorstelling kent, dan kan je er de andere uit deduceren. De verandering van voorstelling laat je dikwijls toe om niet-triviale voorspellingen of inzichten af te leiden.

We kunnen dezelfde redenering maken voor natuurlijke selectie: wat geselecteerd wordt en wat fit is, zijn twee zienswijzen op hetzelfde fenomeen. “Fit” kijkt eerder naar de eigenschappen van het systeem in relatie tot zijn omgeving. “Selectie” kijkt eerder naar wat er met het systeem op langere termijn gebeurt. De regel “wat fit is, wordt geselecteerd” (en vice versa) helpt ons om juiste deducties te maken, en om tot conclusies te komen die in het algemeen helemaal niet vanzelfsprekend zijn. In het voorbeeld van de giraffen en hun lange nek zullen we ons bij de vraag “wat maakt een giraf fit?” al snel hun specifieke omgeving, een savanne met hoge bomen, voor de geest halen. Uit de algemene kennis dat een dier om te overleven voldoende eten moet vinden, kunnen we dan afleiden dat fitness in dit specifieke geval een voldoende lange nek vereist. Aldus is het principe van de natuurlijke

selectie in de eerste plaats een heuristiek, dit wil zeggen een denkgeregule die ons helpt om complexe problemen op te splitsen in meer bevattelijke deelproblemen.

Het voordeel van een tautologie is dat dergelijke uitspraak niet gejustificeerd dient te worden: deze is per definitie waar. Als men een verschijnsel heeft herleid tot natuurlijke selectie, dan heeft men het in zekere zin *volledig verklaard*. Als men een verschijnsel daarentegen heeft herleid tot de wetten van de natuur of de wil van God, dan moet men nog steeds verklaren waarom God dat juist gewild heeft, of waarom de natuurwetten juist die vorm hebben.

11.3 Definitie van fitness

De intuïtie die we willen uitdrukken is de volgende: fitte systemen of toestanden worden meer talrijk; onfitte systemen worden minder talrijk en verdwijnen tenslotte. We kunnen dit op de volgende manier kwantificeren:

$$F(s) = \frac{N(s, t+1)}{N(s, t)}$$

Dit wil zeggen de fitness F van de toestand / het systeem s is gelijk aan het aantal verschijningen N van s op tijdstip $t+1$ (toekomstige generatie) gedeeld door het aantal N op tijdstip t (huidige generatie). Dit is de definitie die gebruikt wordt in de genetica. We kunnen de volgende bijzondere gevallen onderscheiden:

- $F(s) = 1$ wil zeggen dat het aantal verschijningen N constant blijft.
- $F > 1$ wil zeggen dat het aantal toeneemt.
- $F < 1$ wil zeggen dat het aantal afneemt, en dat systemen van het type s tenslotte zullen uitsterven.

Er zijn verschillende mechanismen die bepalen of het aantal “verschijningen” af- of toeneemt:

- **Overleving:** als niet alle verschijningen overleven, neemt het aantal af, wat leidt tot een lage fitness.
- **Voortplanting:** als elk systeem veel nakomelingen produceert, neemt het aantal toe, wat leidt tot hoge fitness.
- **“Spontane generatie”:** als systemen van een bepaald type uit zichzelf ontstaan (dus niet door reproductie van een bestaand systeem), neemt het aantal toe, wat leidt tot hoge fitness.

Levende organismen ontstaan *niet* spontaan, maar bepaalde fysische systemen (bijvoorbeeld moleculen, sneeuwvlokjes, kristallen, enz.) wel. Sommige hiervan (bvb. autokatalytische moleculen, zie 14.5, kristallen) kunnen zich zowel vermeerderen door reproductie van een basisvorm (bijvoorbeeld een zoutkristal dat men laat vallen in een gesatureerde zoutoplossing) als door spontane generatie (ook zonder toegevoegd kristal zullen zoutkristallen zich tenslotte in de oplossing

vormen). We moeten hierbij wel opmerken dat gezien de meeste toepassingen van fitness en van evolutie uit de biologie komen, spontane generatie in het algemeen wordt over het hoofd gezien als fitnessmechanisme.

Tot besluit: fitte verschijningen sterven niet te snel af, en worden ofwel op tijd gereproduceerd of ontstaan spontaan.

Er zijn echter wel verschillende “strategieën” om hoge fitness te verwerven, naarmate meer of minder nadruk wordt gelegd op één van de drie mechanismen: overleving, reproductie, spontane generatie. Het is inderdaad in het algemeen niet mogelijk voor een systeem om uit te blinken in alle drie de eigenschappen. Bijvoorbeeld, systemen zoals organismen zijn te complex om spontaan, door zelforganisatie gegenereerd worden. Dankzij hun complexe organisatie kunnen ze echter wel een subsysteem onderhouden dat gespecialiseerd is in efficiënte reproductie: de voortplantingsorganen. We zullen nu dit idee van verschillende strategieën veralgemenen.

Dimensies van fitness

Gezien elk systeem en elke omgeving uniek zijn, heeft fitness in principe een oneindig aantal verschillende aspecten of dimensies: de eigenschappen die bijdragen tot fitness voor het ene type systeem (bvb. een lange nek voor giraffen) zijn in het algemeen irrelevant voor een ander type systeem (bvb. virussen), waar totaal verschillende eigenschappen dan weer cruciaal zijn (bvb. het vermogen om het immuunsysteem van de gastheer te omzeilen). Toch kunnen we vanuit onze abstracte definitie van fitness enkele universele “dimensies” onderscheiden volgens dewelke fitness kan variëren.

r-K selectie

Bij organismen onderscheidt men twee algemene strategieën om fitness te verwerven. (De labels r en K komen van een gekend mathematisch model van populatiegroei).

r-selectie is gekenmerkt door snelle voortplanting en groei, maar korte levensduur. Voorbeelden van organismen die deze strategie volgen zijn bacteriën, insecten, muizen, en onkruid. Deze organismen zijn typisch klein, kwetsbaar, en niet heel gesofisticeerd. r-selectie grijpt plaats in omgevingen waar volop voedsel aanwezig is om snel te kunnen groeien en zich voort te planten, maar waar het leven gevaarlijk en onvoorspelbaar is (bijvoorbeeld vanwege roofdieren, ziekten, of sterke fluctuaties in de hoeveelheid voedsel), zodat het geen zin heeft om op de lange termijn te mikken. Gezien het in het algemeen van oncontroleerbare, toevallige factoren zal afhangen of een bepaald individu zal overleven of niet, is het best om zo veel mogelijk nakomelingen te produceren in de hoop dat er tenminste eentje van zou overleven. Natuurlijke selectie gaat hier voor kwantiteit eerder dan

voor kwaliteit: het heeft geen zin om veel energie te investeren in individuele nakomelingen, bvb. door deze groot en sterk te maken of een lange leerschool te laten doorlopen, gezien er vanwege de grote risico's in de omgeving toch geen garantie is dat deze extra troeven de kansen op overleving verbeteren.

K-selectie is het andere uiterste van het continuüm voortplanting <-> overleving. Deze strategie is gericht op lange levensduur, maar met als keerzijde trage voortplanting en groei. Voorbeelden zijn mensen, schildpadden, olifanten, eiken en andere bomen met hard, duurzaam hout. Dergelijke organismen zijn typisch groot, goed beschermd, en zijn door hun lange leven in staat om veel ervaring op te doen. Hun omgeving is relatief veilig of stabiel, maar door de onderlinge concurrentie is de hoeveelheid voedsel en grondstoffen beperkt, zodat het geen zin heeft om veel nakomelingen te produceren. De selectie gaat hier eerder voor kwaliteit dan voor kwantiteit, en de ouders investeren veel energie om hun nakomelingen individueel zo fit mogelijk te maken zodat ze maximaal de concurrentie met anderen van hun soort aankunnen.

De verschillen tussen r- en K-selectie vindt men niet alleen tussen verschillende soorten, maar ook binnen een soort, waarbij het nuttig is voor een individu om de strategie te kiezen die best aangepast is aan de individuele situatie. Een voorbeeld dat ik net opmerkte terwijl ik door mijn tuin wandelde is het volgende. Sommige planten vermeerderen zich vegetatief vanuit hun wortelstokken, die onder de grond lange uitlopers vormen die dan plots een meter of verder van de ouderplant naar boven schieten en een nieuwe stam vormen. Het was mij al opgevallen dat deze nieuwe stammen veel vroeger in de lente verschijnen en veel sneller groeien dan de ouderplant. Dit is op het eerste zich paradoxaal, gezien men kan verwachten dat het grootste deel van de voedselreserves zich nog steeds in de oude wortelstok bevindt. Vanuit een r-K logica is dit echter een efficiënte strategie: de oude wortelstok bevindt zich in een relatief veilige, voorspelbare omgeving, waar de plant immers al sinds jaren zonder problemen overleeft; de nieuwe stammen daarentegen bevinden zich op onbekend terrein, waar wellicht een tekort is aan licht, voedsel of water, en een gevaar voor wegdringing of overschaduwning door andere planten. De uitlopers moeten daarom zo snel mogelijk het terrein veroveren, zelfs al moet ze daarvoor het risico lopen om te vroeg bladeren te vormen, en deze aldus bloot te stellen aan late vorst (r-strategie). De ouderplant daarentegen heeft weinig te vrezen van wegdringing, en kan zich dus veroorloven om trager te groeien (K-strategie). Dit helpt om het risico op bevrozing te beperken, en om kwalitatief sterkere stammen en bladeren te vormen.

Een meer interessante (en controversiële) toepassing van de r-K logica is menselijk voortplantingsgedrag. Het is een ijzeren wet van de demografie dat de rijke, ontwikkelde landen een kleiner geboortecijfer én sterftcijfer hebben dan de armere Derde Wereldlanden. Bovendien dalen beide cijfers spectaculair naarmate een land meer ontwikkeld geraakt—wat men de demografische transitie noemt. Het lagere sterftcijfer is gemakkelijk te verklaren: in meer ontwikkelde landen wordt meer

geïnvesteed in voorzieningen zoals voedselproductie, gezondheidszorg en veiligheid, zodat het risico op courante doodsoorzaken zoals hongersnood, ziekten, ongevallen of oorlog sterk vermindert. Het lagere geboortecijfer is echter veel minder evident: het is paradoxaal dat juist in de armste landen waar er amper genoeg voedsel is om de mensen in leven te houden zeven of acht kinderen per vrouw de norm is, terwijl in landen waar alle voorzieningen zijn om voor kinderen te zorgen het geboortecijfer tussen 1 en 2 kinderen per vrouw ligt. Bovendien blijken het in de rijke landen juist de meest kansarme of onderdrukte bevolkingsgroepen te zijn die het meeste kinderen hebben. Voorbeelden hiervan zijn de zwarten en Spaanssprekenden in de VS, de islamitische immigranten in West Europa, de zigeuners in Oost Europa, en de Palestijnen in Israël.

Als we echter veronderstellen dat mensen in moeilijke omstandigheden (onbewust) een r-strategie volgen, dan volgt daaruit onmiddellijk dat juist deze bevolkingsgroepen het meeste nakomelingen zouden hebben. Ook andere typische kenmerken van (kans)arme groepen volgen het patroon van r-selectie: babies hebben een kleiner geboortegewicht; vrouwen worden op een jongere leeftijd zwanger; adolescenten en volwassenen zijn gemakkelijker geneigd om risico's te nemen, zoals roken, druggebruik, onveilig vrijen of autorijden, deelname in misdaad of oorlog..., in de hoop op korte termijn voordelen; ze zijn echter minder geneigd om op lange termijn te plannen of te investeren, bvb. in een universitaire opleiding; en tenslotte is hun levensverwachting lager.

Omgekeerd zullen mensen die opgegroeid zijn in een veilige, betrouwbare omgeving onbewust een K-strategie volgen. Dit impliceert dat ze weinig kinderen op de wereld brengen, maar wel zeer veel investeren op lange termijn in de gezondheid, welzijn en opvoeding van die zeldzame nakomelingen, en daarbij zo veel mogelijk alle risico's uit de weg gaan.

De evolutionaire antropoloog Chisholm heeft geargumenteed dat deze onbewuste strategieën zouden gereguleerd worden door hormonen: de onveilige omgeving waarin kansarme kinderen opgroeien leidt tot een hogere productie van het stresshormoon cortisol; dit zou op zijn beurt de productie van de sekshormonen oestrogeen en testosteron stimuleren. Deze laatste leiden dan tot de hoge fertiliteit van vrouwen en het typische "haantjesgedrag" van jonge mannen.

- de twee aspecten van fitness

De reden dat we in dit boek het Engelse "fitness" gebruiken, is omdat deze term in feite onvertaalbaar is. De oorzaak ligt in de tweevoudige betekenis van het Engelse woord "fit", waarbij elke betekenis een complementair aspect van het selectieproces vat:

- 1) *aangepast, passend, geschikt*: Evolutionair kunnen we dit interpreteren als dat een fit systeem past in zijn specifieke omgeving, en daar optimaal gebruik van

maakt, dit wil zeggen het overleeft externe selectie door de omgeving (zie 12.4). Dit is het externe of relatieve aspect van fitness.

2) *robuust, gezond, in goede conditie* (zoals het Nederlandse woord “fit”): Dit betekent dat het systeem zelfstandig in staat is om te overleven, onafhankelijk van de omgeving, dit wil zeggen het overleeft interne selectie (zie 12.4). Dit is het interne of absolute aspect van fitness.

- externe of relatieve fitness

Voorbeelden: een stukje van een legpuzzel “past” (“*fit*”) in het juiste gaatje. Eenmaal op de juiste plaats komt het nog moeilijk los. Een sleutel “past” in het slot. De molecule van een geneesmiddel past in de juiste receptor in ons lichaam.

Dit type fitness is relatief ten opzichte van de omgeving, en meer bepaald ten opzichte van van de specifieke “positie” die het systeem inneemt in zijn omgeving, of rol die het in die omgeving vervult. Men noemt zulke situatie binnen de grotere omgeving waaraan een systeem zich specifiek kan aanpassen een **niche**. Een niche is een specifieke levenswijze die gebruikt maakt van bepaalde dingen die de omgeving te bieden heeft om te overleven.

Voorbeeld. Koala’s leven enkel van de bladeren van de eucalyptusboom. Zonder deze bomen zouden koala’s niet overleven. In dezelfde omgeving leven echter ook andere organismen, zoals kangoeroes, die geen nood hebben aan eucalyptusbomen. De kangoeroes vullen een andere niche dan de koala’s.

Voorbeeld: Binnen onze economie bestaat er een niche voor reparateurs van auto-uitlaten. Zonder auto’s zouden deze bedrijven niet kunnen overleven.

Mikken op relatieve fitness leidt in het algemeen tot specialisatie, om de specifieke eigenschappen van de niche zo efficiënt mogelijk uit te buiten. Bijvoorbeeld, auto-uitlaatbedrijven zijn efficiënter in hun specifieke niche dan algemene autoreparateurs.

- interne of absolute fitness

Het tweede type fitness is absoluut, onafhankelijk van de omgeving, of de niche die het systeem daarin inneemt. Één manier om absolute fitness te bereiken is intrinsieke stabiliteit of rigiditeit. Bijvoorbeeld, een diamant is zeer hard en dus quasi onverwoestbaar, in om het even welke omgeving. Een andere manier echter is intrinsieke flexibiliteit of aanpassingsvermogen. Bijvoorbeeld, ratten, mensen, en kakkerlakken passen zich aan aan de meest diverse omgevingen. Dit soort fitness bevoordeelt de “generalisten”, die van alle markten thuis zijn. Generalisten doen het in het algemeen beter in een omgeving die veel verandert zodat er steeds opnieuw aanpassing nodig is, specialisten in een omgeving die zeer stabiel is, waar zij echt het onderste uit de kan kunnen halen.

- De richting van de evolutie

Hoewel evolutie in het algemeen onvoorspelbaar is, zal ze per definitie steeds de voorkeur geven aan systemen met hogere fitness. *Daarom zal de gemiddelde fitness in het algemeen toenemen.*

Op korte termijn, in stabiele omgevingen, leidt dit tot toenemende specialisatie en dus relatieve fitness. Op langere termijn echter, wanneer de omgeving drastische wijzigingen ondergaat (bijvoorbeeld klimaatveranderingen) zijn de specialisten de eerste die uitsterven omdat ze niet langer aangepast zijn, zodat de generalisten het overnemen. Bijvoorbeeld, stel dat door nieuwe milieuwetten enkel nog auto's zonder uitlaatgassen toegelaten zijn, dan verdwijnt de niche voor uitlaatspecialisten terwijl die voor algemene herstellende blijft bestaan. Hoewel deze generalisten snel weer een diversiteit aan specialisten zullen voortbrengen om al de niches van de nieuwe omgeving op te vullen (dit heet adaptieve radiatie) behouden ze in het algemeen de essentie van hun aanpassingsvermogen (zie 14.1), en aldus leidt hun selectie tot toegenomen absolute fitness.

We moeten nog verduidelijken hoe het kan dat evolutie intrinsiek chaotisch en onvoorspelbaar is, maar toch een vaste voorkeursrichting heeft. Dit wordt best uitgelegd met een analogie:

De metafoor van de berg

Laat een bal los van op de top van een steile, onregelmatige berg. De bal rolt naar beneden, botsend op rotsen en andere obstakels, zodat zijn baan zeer onvoorspelbaar is. Je kan niet zeggen waar de bal juist tot stilstand komt. Je weet echter zo goed als zeker dat de bal tot stilstand komt op een positie *lager* dan de vertrekpositie. De richting van deze evolutie is dus onvoorspelbaar in de horizontale richtingen (Oost-West of Noord-Zuid) maar voorspelbaar in de verticale richting (naar beneden, niet naar boven).

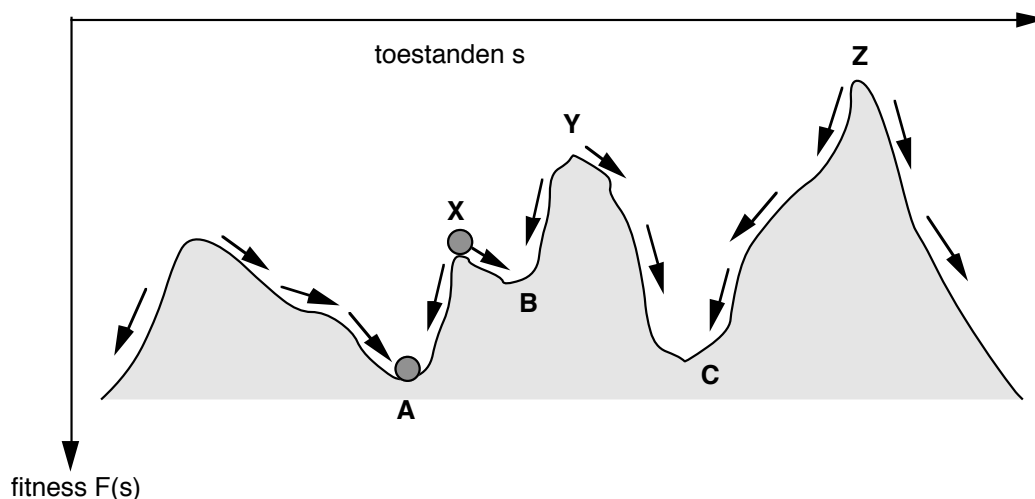
We zullen deze metafoor nu uitwerken tot een exact, wiskundig model, waarbij fitness de rol van de verticale dimensie speelt.

11.4 Fitnesslandschappen

Beeld je de toestandruimte van een systeem in als een tweedimensionaal, horizontaal vlak (in het algemeen heeft een toestandruimte veel meer dimensies, maar dit is moeilijk om te visualiseren). Veronderstel dat we voor elke toestand s de fitnesswaarde $F(s)$ kennen. Stel $F(s)$ nu voor in de verticale dimensie, dit wil zeggen dat we elk punt s verticaal gaan verschuiven over de afstand $F(s)$. $F(s)$ is dus de “hoogte” van het punt boven (of onder) het oorspronkelijke vlak. Hiermee hebben we de toestandruimte omgevormd tot een **fitnesslandschap**. Dit wil

zeggen dat we in plaats van een vlakke, uniforme ruimte nu een geaccidenteerd landschap met bergen en dalen krijgen.

Conventie: om bij onze bergmetafoor te blijven, zullen we *hoger* als *minder fit* beschouwen eerder dan als meer fit. Dit is niet meer dan een afspraak die niets verandert aan de bruikbaarheid van de voorstelling. Merk op dat in biologie en de CAS benadering de traditionele conventie omgekeerd is: hier komt een “fitness peak” (piek, bergtop) overeen met hoge fitness. Deze conventie is eigenlijk iets minder intuïtief om de evolutie in een fitnesslandschap te begrijpen, want het systeem moet actief “klimmen” naar de top in plaats van spontaan naar beneden te rollen. In de natuurkunde daarentegen (waar men over een *potentiaalfunctie* spreekt in plaats van een fitnessfunctie) gebruikt men dezelfde conventie als in de bergmetafoor, dit wil zeggen de voorkeursrichting voor evoluerende systemen is *naar beneden*.



In de tekening hierboven representeren we de toestandruimte als 1-dimensionaal (x-as, horizontaal,) omdat dit eenvoudiger te tekenen is. De fitness komt dan overeen met de verticale dimensie (y-as). Volgens onze conventie komen de bergtoppen (punten X, Y, Z) overeen met lage fitness, de dalen (punten A, B, C) met hoge fitness.

Per definitie zal een systeem steeds een fittere toestand verkiezen boven een minder fitte. Dit betekent dat variatie en selectie de baan van het systeem zullen leiden van de minder naar de meer fitte toestanden. Men kan zich dit voorstellen als een bal die naar beneden rolt van de berg (bijvoorbeeld X), het dal (bijvoorbeeld A) in, en daar tot stilstand komt. Hoe steiler de helling, hoe sneller de bal (het systeem) naar beneden zal gaan. De pijltjes in de tekening duiden aan in welke richting de evolutie zal gaan voor de verschillende gebieden in de toestandruimte, bijvoorbeeld van X naar A of B, van Y naar B of C.

Vanuit elke toestand zal het systeem naar de aangrenzende toestand gaan met de hoogste fitness. Het kan echter niet *over* de aangrenzende toestanden *heen springen*, naar een verder afgelegen toestand, zelfs als deze nog fitter is. De reden is

dat variatie in het algemeen klein is: slechts één of enkele eigenschappen tegelijk worden gevarieerd. Een bal in B kan bijvoorbeeld niet over X heen naar A rollen, zelfs al ligt A lager. Dit heeft belangrijke implicaties:

11.5 Lokale en globale maxima

Elke bodem van een dal (bijvoorbeeld B) is een **lokaal maximum** van de fitness functie. Dit wil zeggen dat geen enkele toestand in de onmiddellijke nabijheid van B een grotere fitness heeft dan B (met andere woorden lager ligt). Een systeem dat in de nabijheid van B komt, moet noodzakelijk in B eindigen. Eens in B kan het noch verder, noch terug, gezien elke aangrenzende toestand nu een kleinere fitness heeft, en dus minder goed is dan B . De bal kan enkel naar beneden rollen, niet naar boven. Het systeem kan vanuit B dus A of C niet bereiken, zelfs al hebben deze toestanden een grotere fitness.

Het **globaal maximum** is de toestand met de hoogste fitness van allemaal. Het is in het algemeen echter zeer moeilijk voor een systeem om dit globaal maximum te bereiken. Het systeem kan immers alleen lokaal, in zijn onmiddellijke nabijheid, de plaatselijk meest fitte toestand proberen te vinden. Variatie is immers **blind**: ze kan niet vooruitzien naar verder afgelegen bergkammen en dalen, en kan alleen “op de tast” de beste weg trachten te vinden. De kans is groot dat het systeem blijft vastzitten in een lokaal maximum met een in feite zeer povere fitness, gewoonweg omdat er geen beter alternatief in de buurt is. Zelfs al lag een toestand met zeer goede fitness “net om het hoekje”, dan nog zou het systeem niet weten hoe het dit maximum moest vinden.

Conclusie: evolutie optimaliseert (vindt de best oplossing) niet, het probeert alleen lokaal de toestand te verbeteren, tot het niet meer verder geraakt.

Deze voorstelling lijkt te impliceren dat zodra het systeem een lokaal maximum heeft bereikt, de evolutie stil valt, en er geen verdere verbeteringen mogelijk zijn. Toch zien we in de praktijk dat systemen niet eeuwig in het dal blijven zitten, maar er vroeg of laat in slagen om toch een grote stap vooruit te zetten. Hoe geraakt een systeem dan uit de vallei? Hiervoor bestaan twee mogelijke mechanismen:

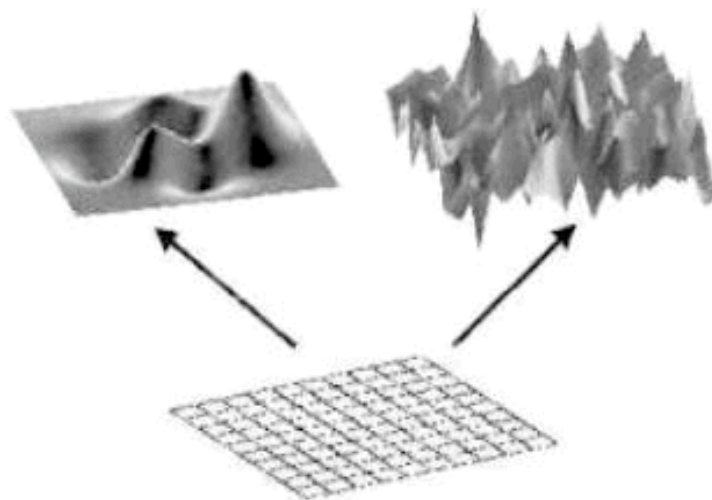
1) “Orde uit chaos” principe: toename van de variatie maakt het mogelijk om grotere “sprongen” te maken, en dus eventueel over een kleine bergkam heen te springen. In het algemeen zijn variaties (bijvoorbeeld mutaties) klein, zodat ze in de onmiddellijke nabijheid blijven. Als er in deze omgeving geen fittere toestanden te vinden zijn, komt het systeem altijd terug naar het lokaal maximum. Af en toe gebeurt er echter een grote variatie (bijvoorbeeld een “macromutatie”), die mogelijk in een diepere vallei terechtkomt, bijvoorbeeld een sprong van B over X in vallei A . Dit gebeurt echter zelden omdat het risico op drastische vermindering van de fitness (“fouten”) veel groter is voor grote dan voor kleine sprongen.

2) Verandering in de structuur van het fitnesslandschap: bergen kunnen wegzinken of oprijzen uit dalen ten gevolge van veranderingen in de omgeving. Toestanden die voordien een lage fitness hadden kunnen nu een hogere fitness krijgen, en vice-versa.

Voorbeeld: een ijsbeer die iets donkerder is dan zijn soortgenoten valt op temidden van een ijsvlakte en zal dus minder succesvol zijn in het vangen van zeehonden. Wanneer het klimaat verandert, en het ijs verdwijnt, wordt de minder witte pels echter geen nadeel meer, maar een voordeel, en zullen alle beren snel evolueren naar een donkere kleur aangepast aan die van de nieuwe omgeving. De witte toestand ligt niet langer op de bodem van de fitnessvallei, maar is door de klimaatverandering op een berg terechtgekomen.

De structuur van het fitnesslandschap verklaart waarom de snelheid van de evolutie dikwijls zeer onregelmatig is: soms zeer snel, soms quasi stilstaand. Men noemt dit patroon van verandering “punctuated equilibrium”: het grootste deel van de tijd is er een evenwicht en gebeurt er zo goed als niets, maar dit evenwicht wordt op gezette tijdstippen “gepunctueerd” of onderbroken door plotse, catastrofale veranderingen naar nieuwe vormen of soorten. Een positie temidden van een brede en diepe vallei (bijvoorbeeld C) doet de evolutie stilvallen, gezien elke normale variatie ook een verslechtering (afname van fitness) met zich meebrengt, en dus weggeselecteerd wordt. Een positie aan de rand van een diepe vallei (bijvoorbeeld X dichtbij vallei A) kan echter resulteren in een plotse, zeer snelle afdaling in die vallei.

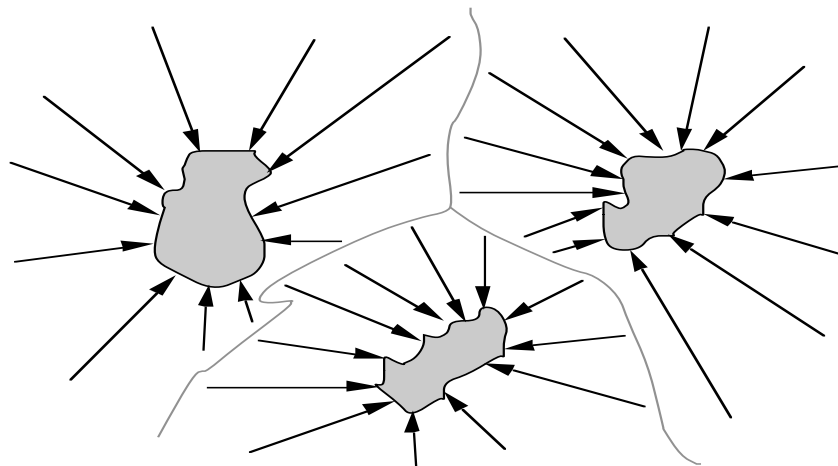
Een belangrijk aspect is de graad van oneffenheid, geaccidenteerdheid of ruigheid (“ruggedness”) van het landschap. Een landschap kan zacht glooiend zijn met slechts enkele toppen en dalen, of het kan zeer grillig zijn met een groot aantal hogere en diepere pieken en ravijnen. De tekening hieronder illustreert hoe eenzelfde twee-dimensionale toestandsruimte (onder) aanleiding kan geven tot ofwel een glooiend (links) of een grillig (rechts) fitnesslandschap. Hoe grilliger het landschap, hoe onregelmatiger en onvoorspelbaarder de evolutie, en hoe moeilijker het is om het globaal maximum te vinden.



11.6 Attractoren en bassins*

Een fitnessvallei kan gezien worden als een **attractor** in de toestandsruimte: een gebied waar het systeem wel vanzelf binnen kan geraken, maar niet op eigen krachten weer uit kan. De hellingen die de vallei omringen vormen het **bassin** van de vallei: alle plaatsen in de toestandsruimte vanwaar de verdere evolutie normaal in de vallei of attractor terechtkomt. De verschillende bassins worden van elkaar gescheiden door “bergkammen”: randgebieden vanwaar je ofwel naar beneden gaat in de ene vallei, ofwel in de andere. Bijvoorbeeld, in de 1-dimensionale tekening: X en Y zijn bergkammen die de valleien A , B en C van elkaar scheiden

De tekening hieronder, die je kan zien als een fitnesslandschap dat van boven wordt bekeken of als **faseportret** van een dynamisch systeem, illustreert het principe. De grijze gebieden zijn valleien of attractoren, de witte gebieden daarbuiten zijn bassins. De pijlen duiden de richting van evolutie aan, en de onregelmatige scheidingslijnen representeren de “bergkammen” tussen de bassins in. De naam “bassin” komt van de analogie met waterbekkens: de attractoren kunnen gezien worden als meren in een berglandschap. De pijlen duiden dan de richting waarin het regenwater langs de bergwanden naar beneden stroomt, en de scheidingslijnen duiden de afgrenzingen tussen de waterbekkens of bassins aan.



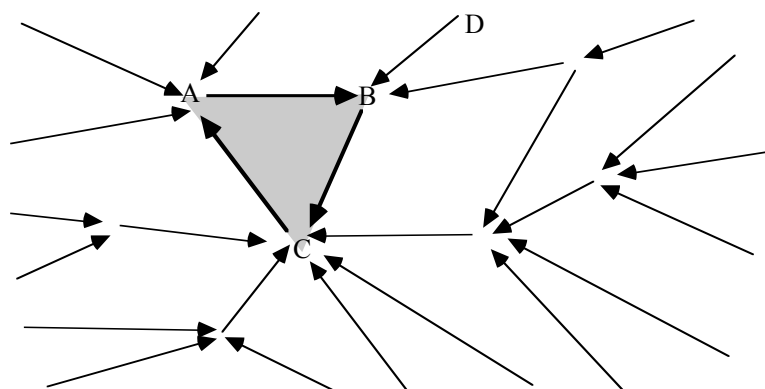
Het moet opgemerkt worden dat de concepten van attractor en bassin meer algemeen zijn dan die van fitnesslandschap. Ze kunnen immers gedefinieerd worden ook voor processen waarvoor geen vaste fitnesswaarde bepaald is. Attractoren kunnen ook veel ingewikkeldere vormen of gedragingen vertonen dan simpele maxima van de fitness functie. Bijvoorbeeld, een “limietcyclus” is een gesloten lus in de toestandsruimte langs waar het systeem voortdurend ronddraait, zonder ooit tot rust te komen. De definiërende eigenschap van een attractor is echter nog steeds die van een gebied in de toestandsruimte waar het systeem wel in, maar niet meer uit kan. In die zin is een attractor dus een essentiële illustratie van het principe van selectie of van asymmetrische transitie: bepaalde transities krijgen de voorkeur boven andere, zelfs al kan je geen vaste fitnesswaarde plakken op de resulterende toestand.

Fitness, zoals alle concepten in het boek, is relationeel gedefinieerd, wat wil zeggen dat het altijd bepaald is *ten opzichte van* iets anders. Men kan nooit over de objectieve, absolute fitness van een systeem of toestand spreken, enkel van zijn fitness ten opzichte van een andere toestand en ten opzichte van een bepaalde omgeving. Hogere fitness van toestand A ten opzichte van van toestand B wil zeggen dat selectie de voorkeur geeft aan A boven B, en dat de kans dat B vervangen wordt door A groter is dan de kans dat A vervangen wordt door B (wat in 10.4 een “asymmetrische transitie” genoemd werd).

Voorbeeld: een konijn dat 30 km/u kan lopen in een omgeving waar de vossen slechts 20km/u halen zal beduidend fitter zijn dan een konijn dat slechts 15km/u haalt. Dat betekent dat de kans groter is dat dit konijn en zijn nakomelingen zullen overleven en de plaats innemen van de tragere konijnen, dan omgekeerd.

Als we deze relatieve waarschijnlijkheden van overleving kennen, dan kunnen we daaruit in het algemeen een absolute waarschijnlijkheid van overleving op lange termijn berekenen, en dus een fitnesswaarde. Als we voor elke toestand een fitnesswaarde kunnen bepalen, kunnen we deze geometrisch voorstellen als een fitnesslandschap. In dit fitnesslandschap zal een evoluerend systeem steeds de richting “naar beneden” kiezen, om tot rust te komen op de bodem van een vallei.

Stel nu echter dat we wel de relatieve voorkeuren kennen van A over B, van B over C, enz., maar dat zich de volgende situatie voordoet: B wordt verkozen over A, C over B, maar A opnieuw over C. Veronderstel dat we een fitnessmaat F zouden kunnen bepalen voor elk van de toestanden, dan zou dit impliceren: $F(A) < F(B) < F(C) < F(A)$. Dit betekent dat $F(A) < F(A)$: de fitness van A is tegelijk groter en kleiner dan zichzelf. Dit is duidelijk onmogelijk, en dus kan er geen absolute fitnessmaat $F(A)$ bepaald worden.



In deze situatie kunnen A, B, en C echter nog wel deel uitmaken van een attractor, dit wil zeggen een verzameling van toestanden die *in hun geheel* verkozen worden, zelfs al is er geen permanente keuze meer mogelijk tussen de individuele toestanden binnen de attractor. Het simpelste geval is een zgn. limietcyclus, waarbij het systeem voortdurende de transities $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow \dots$ doorloopt, en dus steeds opnieuw in dezelfde toestanden terugkeert. Hoewel het niet mogelijk is te zeggen dat één van deze drie toestanden fitter is dan de twee andere, is het wel

mogelijk dat elk van deze drie toestanden absoluut fitter is dan een vierde toestand D, omdat A, B, of C altijd de voorkeur krijgen over D, en het systeem nooit vanuit A, B of C terug naar D zal gaan. Merk op dat zulke limietcyclus per definitie op een systeem ver van het evenwicht wijst (zie 3.6), gezien het systeem nooit tot stilstand komt.

Voorbeeld: Beschouw het systeem bestaande uit konijnen en vossen tesamen. Als we nu niet meer de fitness van een individueel konijn willen bepalen, maar van het volledige systeem, dan vinden we een situatie gelijkaardig aan die van de limietcyclus, waarbij het systeem periodiek door de 4 toestanden gaat:

(veel konijnen, weinig vossen) → (veel konijnen, veel vossen) → (weinig konijnen, veel vossen) → (weinig konijnen, weinig vossen) → (veel konijnen, weinig vossen) → ...

De reden is dat een toename in de konijnenpopulatie door de overvloed aan voedsel met vertraging tot een toename in de vossenpopulatie leidt, die op haar beurt echter leidt tot een afname in de konijnenpopulatie omdat er meer konijnen door vossen worden opgepeuzeld, gevolgd door een afname in de vossenpopulatie omdat er niet genoeg konijnen meer over zijn om alle monden te voeden. Het systeem komt dus niet tot stilstand in een evenwichtstoestand, maar blijft cyclisch van de ene naar de andere terugkeren. We kunnen dus geen absolute fitness bepalen voor elk van deze vier toestanden. We kunnen ons echter wel toestanden indenken die minder fit zijn dan deze vier toestanden. Bijvoorbeeld, een toestand (heel veel konijnen, heel veel vossen) zal snel verdwijnen omdat de konijnen afsterven zowel omdat ze door vossen worden opgegeten, als omdat er te weinig gras is, en dergelijke toestand zal in normale omstandigheden nooit terugkomen.

Hoofdstuk 12. Systeembenadering van de evolutie

12.1 Inleiding

Zoals we eerder opmerkten (2.4) is het probleem met de traditionele Darwinistische of neo-Darwinistische theorie dat deze te reductionistisch is, en enkel oog heeft voor een gegeven elementaire component (organisme of gen) in een gegeven omgeving. Zelforganisatie, systeemtheorie en de CAS benadering hebben de aandacht getrokken op andere, meer holistische verschijnselen die ook van belang zijn in de evolutie van de complexiteit. De nadruk ligt hier op de manier waarop verschillende componenten interageren en co-evolueren, waarbij ze tezamen een groter geheel vormen.

De vraag is echter hoe we al deze benaderingen en verschijnselen kunnen integreren in één samenhangend denkkader. De Oostenrijkse theoreticus Riedl heeft gesuggereerd dat we dit probleem kunnen oplossen door een *systeemtheorie van de evolutie* te ontwikkelen, waarbij de concepten van variatie en selectie in een meer holistisch of systemisch kader worden geplaatst. De moeilijkheid hierbij is dat naarmate we meer componenten en meer interacties beschouwen dat het model dan complexer wordt, en dat het moeilijker wordt om voorspellingen of verklaringen te produceren. De CAS benadering heeft dit opgevangen met computersimulaties, maar is daardoor de conceptuele klaarheid en het intuïtief begrip ten dele kwijtgeraakt. De systeemtheorie biedt echter enkele zeer eenvoudige conceptuele hulpmiddelen, zoals de subsysteem-supersysteem distinctie, die rechtstreeks kunnen toegepast worden op de processen van variatie en selectie. Zoals we nu zullen tonen, laat dit toe om de verschillende soorten evolutionaire processen op een simpele manier te classificeren en met elkaar in verband te brengen. In het volgende hoofdstuk zullen we dan de omgekeerde weg bewandelen, en de evolutionaire benadering toepassen om te begrijpen waar diverse soorten systemen vandaan komen.

12.2 Sequentiële ↔ parallele variatie en selectie

We zullen beginnen door het onderscheid tussen sequentieel en parallel (sectie 4.4) toe te passen op de elementaire processen van de evolutie. Dit levert de volgende klassen op:

- sequentieel

Sequentiële variatie betekent dat de ene toestand de andere opvolgt. Er is een strikte sequentie of opeenvolging van verschillende toestanden. Er wordt maar één toestand op een gegeven ogenblik uitgeprobeerd.

Voorbeeld: een fles in de zee wordt door wind en golven voortgestuwd. De fles kan maar op één plaats tegelijk zijn.

Sequentiële selectie betekent dan dat één van de toestanden in de sequentie behouden blijft, zodat de sequentiële variatie stopt. Dit wil zeggen dat alle andere toestanden van de sequentie “verworpen” of geëlimineerd worden.

Voorbeeld: de fles spoelt aan op een eilandje, en blijft liggen. De aangespoelde toestand wordt geselecteerd, de rondrijvende toestanden worden geëlimineerd

- parallel

Parallele variatie betekent dat verschillende toestanden in parallel, *gelijktijdig* worden uitgeprobeerd. Dit veronderstelt dat er op een gegeven ogenblik verschillende exemplaren of kopies van het systeem bestaan, elk in zijn eigen toestand. *Parallele selectie* elimineert de onaangepaste exemplaren en behoudt de aangepaste.

Voorbeeld: bacteriën ontwikkelen resistentie tegen een antibioticum.

Op elk ogenblik zijn er in het lichaam van de patiënt miljarden bacteriën aanwezig die allemaal afstammen van één of enkele binnengebrachte kiemen. Deze bacteriën planten zich voortdurend voort door splitsing. Elke nieuwe bacterie is potentieel een variatie op de andere, door het optreden van mutaties: kleine foutjes in het kopiëren van het DNA van de bacterie. Allemaal tezamen vormen de bacteriën een enorm aantal variaties op het basispatroon. Sommige van deze variaties zijn beter bestand tegen het antibioticum en zullen dus langer overleven. Als de bacteriën erin slagen voldoende nakomelingen met voldoende variaties voort te brengen, zullen ze vroeg of laat een toestand ontdekken die resistent is, en die zich dus verder zal blijven voortplanten.

- Relatie tussen beide types

Parallele variatie is de typische vorm van variatie zoals die door Darwin en de biologen wordt gebruikt. Men gaat ervan uit dat levende organismen meerdere nakomelingen hebben die allemaal verschillend zijn. Deze nakomelingen leven naast elkaar (parallel), en in concurrentie met elkaar. Hoe groter het aantal parallele varianten (aantal nakomelingen, populatie), hoe groter de kans dat één of meerdere ervan een toestand zullen hebben die geselecteerd wordt. Op hoe meer paarden je tegelijk wedt, hoe groter de kans dat één ervan zal winnen.

Om die reden is parallelle variatie dus intrinsiek efficiënter dan sequentiële variatie. Dit betekent echter niet dat sequentiële variatie niet tot snelle evolutie kan leiden. Sequentiële variatie kan efficiënter gemaakt worden door de snelheid van de variatie op te voeren (dit wil zeggen meer verschillende toestanden per tijdseenheid doorlopen). Dit vinden we bijvoorbeeld in het “orde uit chaos” principe: hoe harder de doos met paperclips geschud wordt, hoe sneller we een toestand bereiken waar de paperclips allemaal aan elkaar hangen.

Sequentiële variatie is meer typisch voor fysische, computer- of mentale systemen. Bewust denken verloopt grotendeels sequentieel: we kunnen ons slechts op één mogelijke oplossing tegelijkertijd concentreren, en, als blijkt dat ze niet voldoet, onze aandacht richten op een volgende variatie, enz.

Evolutie van de kennis gebeurt zowel parallel als sequentieel:

- Sequentieel: een wetenschapper of filosoof beschouwt verschillende mogelijke oplossingen voor een probleem de ene na de andere (variatie), tot er eentje wordt gevonden die het probleem oplost (selectie).
- Parallel: verschillende denkers zoeken gelijktijdig naar een oplossing van een probleem; als één van hen succes heeft, en (een deel van) de oplossing vindt, zullen de anderen in het algemeen deze oplossing overnemen en met hun eigen resultaten combineren.

De meeste computers werken nog steeds sequentieel: ze kunnen niet meer dan één instructie tegelijk uitvoeren. Het is echter courant om parallelle processen te simuleren op computers. Bijvoorbeeld, je computer kan verschillende programma's tegelijkertijd laten lopen. In feite lopen ze niet echt synchroon, maar besteedt de processor enkele milliseconden aan het eerste, dan aan het volgende, dan aan het volgende, ... , om weer terug te komen bij het eerste, enzovoort. Dit overspringen gaat zo snel dat het lijkt alsof de verschillende programma's gelijktijdig worden uitgevoerd. Doordat de huidige processors zo enorm snel zijn, kunnen ze op enkele seconden tijd een “populatie” van parallel variërende systemen simuleren, bijvoorbeeld een artificieel ecosysteem met virtuele organismen die in parallel evolueren.

Traditionele evolutietheoretici, die vanuit een biologisch geïnspireerd kader denken, hebben gewoonlijk geen oog voor sequentiële variatie en selectie. Voor hen is nog steeds “replicatie” (het maken van (parallelle) kopieën met lichte variaties) nodig om evolutie te hebben. Het feit dat computers sequentieel werken en toch buitengewoon effectief zijn in het simuleren van parallelle evolutie toont echter aan dat er geen fundamenteel onderscheid is tussen beide types.

12.3 Interne ↔ externe variatie

Een andere fundamentele distinctie uit de systeembenadering, namelijk die tussen wat zich binnen de systeemgrens bevindt (intern, systeem) en wat zich erbuiten bevindt (extern, omgeving), levert ook een interessante analyse op van verschillende soorten evolutionaire processen.

Variatie is in het algemeen *intern*: dit wil zeggen dat de componenten of eigenschappen van het systeem op zichzelf variëren, zonder input van buitenaf. Voorbeelden zijn mutaties in het DNA van een organisme en denkprocessen in een brein. Dit betekent in essentie dat het systeem verschillende toestanden van zijn eigen, van te voren gedefinieerde, toestandsruimte doorloopt. De meeste evolutionaire theorieën gaan uit van interne variatie, omdat deze gemakkelijker te beschrijven is.

Variatie kan echter ook *extern* zijn, dit wil zeggen dat er een uitwisseling is van componenten met een ander systeem. In dit geval ontstaat er in zekere zin een nieuw systeem, met nieuwe componenten, en dus een nieuwe toestandsruimte.

Voorbeeld: Seksuele voortplanting: stukjes DNA van de moeder en de vader worden gerecombineerd om het DNA van het kind te vormen. Opmerking: omdat het DNA van vader en moeder sterk op elkaar lijken (tot hetzelfde type systeem behoren), kan men in de praktijk recombinatie beschrijven op dezelfde manier als mutatie, dit wil zeggen als interne variatie binnen een gegeven toestandsruimte.

Voorbeeld: **symbiose**: twee organismen van een verschillende soort leven in onderlinge afhankelijkheid, en hebben zich door co-evolutie zodanig aan elkaar aangepast aan dat ze als het ware een nieuw organisme vormen, bijvoorbeeld:

- korstmoss is een symbiose van een soort alg en een soort schimmel
- eukaryoten (complexe cellen, zoals die van ons lichaam) bevatten mitochondriën, energieproducerende organellen, die afstammelingen zijn van vrij levende bacteriën die de cel binnengedrongen zijn
- in onze darmen leven bacteriën die nodig zijn voor onze spijsvertering

Voorbeeld: chemische reacties: twee moleculen komen in contact en wisselen elektronen en/of atomen uit, resulterend in één, twee, of meer moleculen van een nieuw type.



12.4 Interne ↔ externe selectie

In traditionele evolutietheorieën gaat men ervan uit dat selectie extern is, dit wil zeggen bepaald door wat buiten het systeem gebeurt. Dit betekent de eliminatie van toestanden die niet aangepast zijn aan de *omgeving*. Bijvoorbeeld, een langharige

mammoet in een warm klimaat, of een wit konijn in een donker bos zijn slecht aangepast en zullen dus weggeselecteerd worden, ten voordele van kortharige of donkergekleurde varianten.

Selectie kan echter ook intern zijn: toestanden die *intrinsiek* onstabiel zijn, verdwijnen. Zulke toestanden worden geëlimineerd onafhankelijk van de omgeving. Bijvoorbeeld, een onregelmatig gemagnetiseerd stuk ijzer waarvan de magneetjes in tegengestelde richtingen wijzen is onstabiel.

Interne selectie is typisch voor **zelforganisatie**: het is het systeem zelf dat bepaalt welke toestand “werkt” en welke niet. Bijvoorbeeld, alle interne magneetjes parallel is een toestand die verkozen wordt boven andere. Interne selectie vinden we ook in de biologie. Bijvoorbeeld, een niet levensvatbaar embryo wordt spontaan geaborteerd, vòòr het in contact komt met de omgeving.

Interne selectie is essentieel in de mentale evolutie. Een wetenschapper die een probleem probeert op te lossen zal het merendeel van de potentiële oplossingen (variaties) reeds verwerpen op basis van eigen, interne selectiecriteria (bijvoorbeeld incoherent, te ingewikkeld, in contradictie met gekende feiten, enz.). Pas als het idee deze interne selectie overleefd heeft, zal het in de buitenwereld uitgetest worden, bijvoorbeeld door een wetenschappelijk experiment. Dit is de fase van externe selectie.

In het algemeen zal elke variatie intern geselecteerd worden vòòr ze met de buitenwereld in aanraking komt en daar externe selectie ondergaat. Dit verklaart waarom veel variaties (in het bijzonder mentale) doelgericht of vooruitziend lijken. De oorspronkelijke variaties waren blind, maar de meeste hiervan zijn geëlimineerd door interne selectie op basis van vroeger vergaarde kennis, zodat alleen de beste overblijven.

12.5 Veralgemeende evolutietheorie

De traditionele Darwinistische, biologische visie van evolutie gaat uit van *parallèllisme*, *interne variatie* en *externe selectie*. Dit is echter een zeer beperkte visie: men moet ook rekening houden met sequentiële processen, externe variatie, en interne selectie. Als men dat doet, blijken allerlei processen die niet in het strikt Darwinistische kader passen toch perfect te beschrijven door variatie en selectie: bijvoorbeeld zelforganisatie, symbiose, denkprocessen, chemische reacties, etc.

Het feit dat de meeste auteurs geen onderscheid maken tussen deze verschillende klassen van processen leidt tot veel onnodige discussie en spraakverwarring. Bijvoorbeeld, sommigen beschrijven zelforganisatie aan de hand van selectie, anderen beweren dat zelforganisatie tot een totaal verschillende categorie behoort die niets met selectie te maken heeft. Het begrip “*natuurlijke selectie*” (selectie door de natuur, dit wil zeggen de omgeving) wordt dikwijls gebruikt om de

klassieke Darwinistische selectie aan te duiden, maar eigenlijk helpt dit weinig om de spraakverwarring te voorkomen, gezien zelforganisatie evenzeer een “natuurlijk” proces is

Meer fundamenteel moeten we opmerken dat er vanuit een systeemtheoretisch perspectief *geen strikt onderscheid is* tussen de verschillende klassen: wat extern is voor een subsysteem, is in het algemeen intern voor het supersysteem dat dit subsysteem omvat, en vice-versa.

Voorbeeld: een embryo dat niet overleeft omdat het niet in staat is zich te implanten in de baarmoeder is het slachtoffer van externe selectie: het was niet aangepast aan zijn omgeving (de baarmoeder). Vanuit het standpunt van de moeder (het supersysteem) echter is de mislukte zwangerschap een voorbeeld van interne selectie: het embryo werd geëlimineerd vòòr het in contact kwam met de buitenwereld.

Voorbeeld: inbreng van DNA van de vader via sperma is externe variatie voor de moeder (systeem), maar interne variatie voor de soort waartoe moeder en vader behoren (supersysteem).

Een verzameling subsystemen die in parallel evolueren, kunnen formeel ook gezien worden als één supersysteem dat sequentieel evolueert, en vice-versa. De toestand van het supersysteem is eenvoudigweg het Cartesisch product van de toestanden van de parallel evoluerende subsystemen (zie 8.5).

Voorbeeld: men kan de bewegingen van twee biljartballen op een tafel beschrijven door twee parallelle banen, elk in een tweedimensionale toestandruimte (x -coördinaat = lengterichting tafel, y -coördinaat = breedte), of door één, sequentiële baan in een vierdimensionale toestandruimte (x -coördinaat bal 1, y -coördinaat bal 1, x -coördinaat bal 2, y -coördinaat bal 2).

Intern of extern, sequentieel of parallel, is dus enkel een kwestie van gezichtspunt. In de praktijk zijn de gezichtspunten echter belangrijk, omdat ze de beschrijving ondoenbaar ingewikkeld of juist heel eenvoudig kunnen maken.

Voorbeeld: Als men een kolonie van een biljoen bacteriën, elk met honderd genen die kunnen variëren, zou beschrijven als één sequentieel evoluerend supersysteem, dan zou men een toestandruimte met honderd biljoen dimensies nodig hebben. Het is veel eenvoudiger het systeem te beschrijven vanuit het standpunt van één bacterie die een honderddimensionale toestandruimte exploreert, en te veronderstellen dat de andere bacteriën hetzelfde doen in parallel.

Algemene conclusie: vanuit een systeemtheoretisch perspectief kunnen *alle* evolutionaire processen begrepen worden als een resultaat van variatie en selectie. Dit omvat zowel fysische, biologische, mentale als socio-culturele processen. Deze filosofie wordt ook wel *selectionisme*, of (*universele*) *selectietheorie* genoemd.

Hoofdstuk 13. Supersysteemtransities

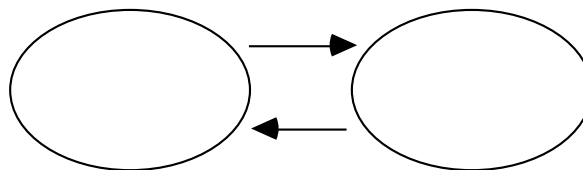
13.1 Hoe leidt evolutie tot complexere systemen?

In den beginne (net na de Big Bang die het universum gecreëerd heeft) waren er enkel elementaire deeltjes, geen atomen, moleculen of andere, meer complexe systemen. Naarmate de evolutie vorderde kwamen er echter steeds complexere systemen bij. We zullen nu de basismechanismen onderzoeken die tot deze complexificatie hebben geleid. We zullen ons in dit hoofdstuk concentreren op de structurele complexiteit, dit wil zeggen de statische structuur van systemen, niet op hun dynamisch gedrag of functie. De vraag die we zullen behandelen is: hoe komen een aantal componenten (subsystemen) tezamen om een supersysteem te vormen? Deze evolutionaire sprong naar een hoger niveau van complexiteit is wat we een **supersysteemtransitie** zullen noemen.

13.2 Interacties

Alle systemen of componenten zijn in staat tot *interacties* of wisselwerkingen met andere systemen. Indien dat niet het geval zou zijn, zouden we deze systemen nooit of op generlei wijze kunnen waarnemen. Volgens het principe van de identiteit der ononderscheidbaren komt dat erop neer dat ze in de praktijk gewoon niet zouden bestaan.

Interactie kan gezien worden als actie gevolgd door reactie: de toestand van het ene systeem beïnvloedt de toestand van het andere systeem; output van het ene wordt input van het andere. De toestand van het andere systeem beïnvloedt in het algemeen op zijn beurt de toestand van het ene.



Voorbeelden:

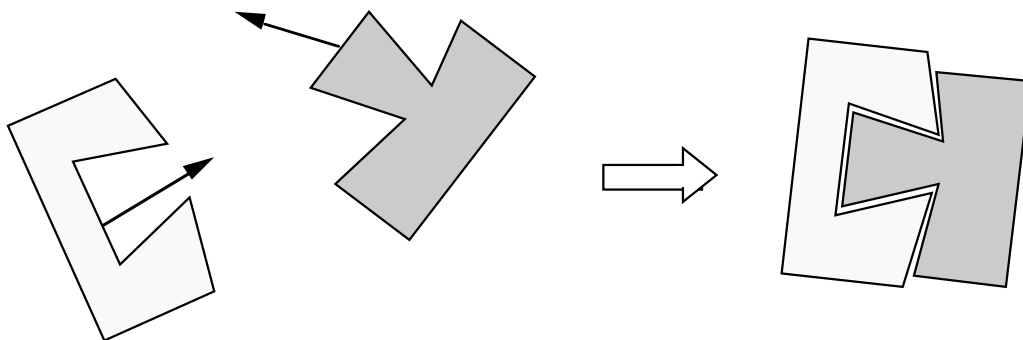
- Twee magneten trekken elkaar aan/stoten elkaar af. De Noordpool van elke magneet oefent een aantrekkingskracht uit op de Zuidpool van de andere magneet, maar stoot diens Noordpool af.
- Touwtrekken: twee groepen trekken aan de twee uiteinden van een koord, om te proberen de anderen over de lijn te krijgen.

- Een discussie of onderhandeling tussen twee personen. De ene zegt iets, de andere antwoordt. Argument of voorstel wordt gevolgd door tegenargument of tegenvoorstel.

Een interactie is een proces van variatie, maar waarbij nu *twee* systemen betrokken zijn. Het proces kan beschreven worden als een baan in hun gezamenlijke toestandsruimte (Cartesisch product van individuele toestandsruimten). Bijvoorbeeld, touwtrekken kan beschreven worden als een variatie van het middenpunt van het touw ten opzichte van de lijn die beide partijen scheidt. Interactie is dus fundamenteel equivalent aan andere vormen van variatie, en zal dus aan dezelfde evolutionaire principes moeten voldoen. Dit wil zeggen dat interactie in het algemeen onderhevig zal zijn aan selectie: bepaalde van de gezamenlijke toestanden van de twee systemen zullen fitter zijn, en dus bij voorkeur behouden blijven.

13.3 Bindingen

De variatie stopt wanneer ze een gezamenlijke toestand (of verzameling toestanden) bereikt heeft die stabiel is (dit wil zeggen een vallei of attractor in het fitnesslandschap gedefinieerd op de gezamenlijke toestandsruimte). Op dat ogenblik is de interactie gestabiliseerd. De gezamenlijke toestand is “gefixeerd”. De systemen hebben zich onderling aan elkaar *aangepast* (de ene “fit” of past in de andere).



Voorbeelden:

- de twee magneten hechten zich aan elkaar vast, Noordpool van de ene aan Zuidpool van de andere.
- de discussie eindigt wanneer beide gesprekspartners het met elkaar eens zijn geworden (of de moed hebben opgegeven om elkaar te overtuigen, dit wil zeggen, ze zijn het eens geworden dat ze het met elkaar oneens zijn: “agree to disagree”).
- twee symbiotische organismen (bijvoorbeeld een heremietkreeft en de zeeanemoon die op haar schelp groeit) hebben een stabiel samenwerkingsverband ontwikkeld.

- het meest traditionele voorbeeld is een molecule, waarin de atomen aan elkaar gebonden zijn. Atomen zelf bestaan uit aan elkaar gebonden elementaire deeltjes: protonen, neutronen en electronen.

Zulke gezamenlijke, stabiele toestand zullen we een **binding** noemen. De twee systemen zijn aan elkaar gebonden: de ene kan niets doen zonder de andere met zich “mee te trekken”. Per definitie kan de ene niet meer variëren onafhankelijk van de andere: als de ene varieert moet de andere mee.

Voorbeelden:

- als de ene magneet verplaatst wordt, sleept hij de andere magneet mee.
- als twee personen een overeenkomst hebben afgesloten, en de ene doet iets dat deze overeenkomst aanbelangt, dan zal hij of zij de andere daar moeten bij betrekken.

Een binding is een relatieve **dwang**, dit wil zeggen een beperking van de vrijheid van variatie in de gezamenlijke toestandruimte, in het bijzonder de vrijheid van beweging *ten opzichte van* elkaar. Een binding vermindert dus de vrijheid van de systemen, maar verhoogt de voorspelbaarheid van hun gedrag.

13.4 Systeem als dwang op subsystemen

We kunnen het idee van een binding tussen twee systemen veralgemenen tot een binding tussen verscheidene systemen. Bijvoorbeeld, een complexe molecule verbindt een groot aantal atomen, terwijl mensen in een vereniging of organisatie aan elkaar gebonden zijn door de collectieve regels waaraan ze zich onderwerpen. Deze regels houden in het algemeen in dat een lid bepaalde acties niet kan ondernemen zonder dat de anderen daarmee akkoord gaan.

Het is de binding of dwang die de componenten tot een (super)systeem verbindt. Als de componenten onafhankelijk van elkaar kunnen variëren, dan is er in feite niets dat ze samenhoudt. Ze vormen dan geen systeem maar een **aggregaat**.

Voorbeelden:

- zand is een aggregaat van zandkorrels. Zandsteen is een binding (en dus een systeem) van zandkorrels.
- mensen die toevallig over hetzelfde plein wandelen vormen een aggregaat. De leden van een voetbalploeg die op datzelfde plein spelen vormen echter een systeem. De bewegingen van de spelers zijn immers van elkaar afhankelijk.

De dwang is wat het systeem onderscheidt van zijn omgeving: wat zich aan de regels houdt, behoort tot het systeem; wat zich er niet aan houdt, behoort er niet toe.

Voorbeelden:

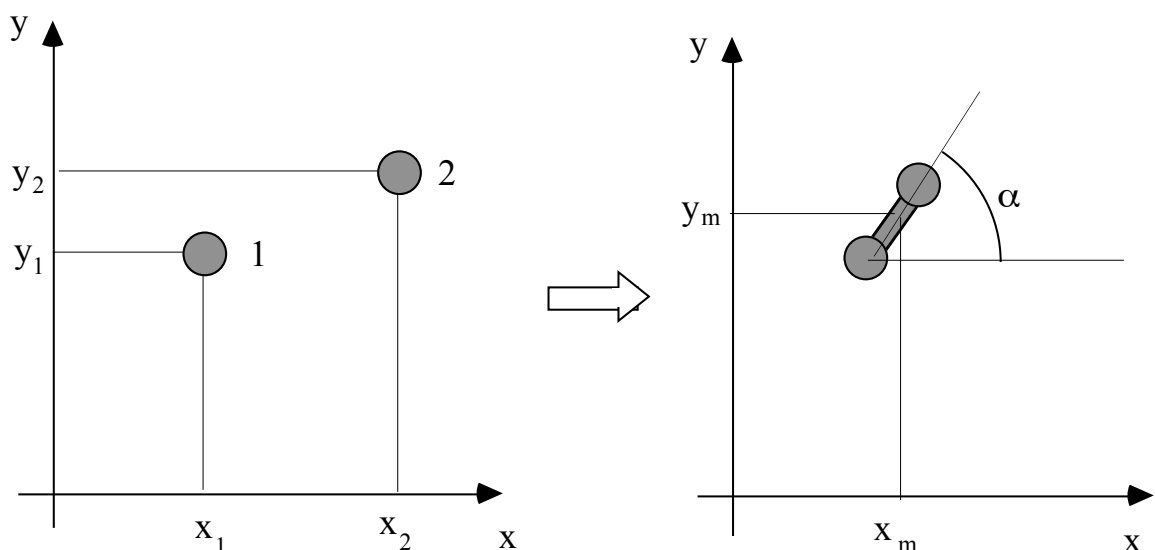
- een brok zandsteen onderscheidt zich duidelijk van het los zand waarin het ligt

- individuen die zich niet aan de regels houden worden uit de vereniging gezet

Het ontstaan van een gezamenlijke dwang op een verzameling losse componenten is dus de essentiële stap in de creatie van een systeem. Bijvoorbeeld, de essentie van de overgang van losse bakstenen naar een bouwwerk (systeem) is het aan elkaar metselen van de stenen. Een systeem is een geheel met emergente eigenschappen. Deze eigenschappen kenmerken de relaties tussen de componenten, eerder dan de individuele componenten. Het is dankzij bindingen dat deze relaties stabiel, en dus belangrijker of kenmerkender, worden dan de eigenschappen van de individuele componenten.

Voorbeeld:

wanneer we twee losse biljartballen aan elkaar vastmaken door middel van een staaf, dan verliezen de individuele ballen de vrijheid om om het even welke positie in te nemen, gezien de ene steeds op een vaste afstand moet blijven van de andere. Als we het nieuwe systeem gevormd door de verbonden ballen (een soort halter) willen beschrijven, dan zullen we over het algemeen niet meer de individuele coördinaten (x_1, y_1) en (x_2, y_2) gebruiken, maar de coördinaten (x_m, y_m) van het middelpunt of zwaartepunt van de halter, tezamen met de hoek α waaronder de halter georiënteerd is, gezien deze de enige overblijvende vrijheidsgraden representeren. De coördinaten van het zwaartepunt zijn niet echt emergent, gezien ze bepaald zijn als het gemiddelde (afgeleid van de som) van de individuele coördinaten. De hoek is echter een emergente eigenschap, die geen simpele som is van enige individuele eigenschappen.



Elk proces van onderlinge variatie en selectie van componenten zal dus vroeg of laat een systeem voortbrengen. Een interessante vraag hierbij is *hoeveel* componenten in het algemeen nodig zijn om een systeem te vormen.

13.5 Sluiting*

Het kan gebeuren dat twee interagerende systemen die tot een binding komen hun interactiecapaciteit “opgebruikt” hebben, dit wil zeggen dat de individuele systemen niet langer met andere individuele systemen kunnen interageren.

Voorbeelden:

- $\text{Na} + \text{Cl} \rightarrow \text{NaCl}$: de NaCl molecule (keukenzout) kan geen verdere atomen meer opnemen
- $\text{H}_2 + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ (waterstofmolecule + zuurstofatoom geeft watermolecule). De H_2O molecule kan echter nog een bijkomend zuurstofatoom opnemen. Dit produceert waterstofperoxide: H_2O_2 . Daarna is verdere reactie niet meer mogelijk
- huwelijk: in het algemeen sluit de verbinding tussen 1 man en 1 vrouw verdere relaties uit (afgezien van een *ménage à trois*)

In andere gevallen kunnen er echter nog nieuwe componenten toetreden tot de verbinding.

Voorbeelden:

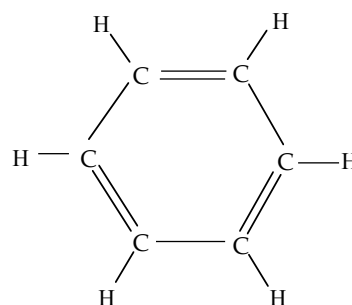
- polymeren zijn lange ketens van kleinere moleculen die onbeperkt kunnen groeien. DNA is bijvoorbeeld een polymeer
- de nietjes die in elkaar schuiven tot gevorkte ketens
- verenigingen die nieuwe leden blijven opnemen

Zulke “doorgroeiende” systemen hebben nog steeds “aanhechtingspunten” waaraan nieuwe componenten zich kunnen vasthaken. Elke bijkomende component gebruikt een aanhechtingspunt, maar voegt op zijn beurt een nieuw aanhechtingspunt toe. Het kan echter ook gebeuren dat de aanhechtingspunten onderling aan elkaar vasthaken. Bijvoorbeeld, een polymeer waarbij de laatste molecule van de keten zich bindt aan de eerste.

In zulk geval kunnen alle aanhechtingspunten “opgebruikt” raken. Alle componenten zijn nu volledig aan elkaar vastgehaakt, zonder ruimte voor verdere interactie met “buitenstaanders”. In dat geval spreken we van structurele *sluiting*. Het systeem heeft zich in zichzelf gesloten en verleent geen toegang meer tot buitenstaanders.

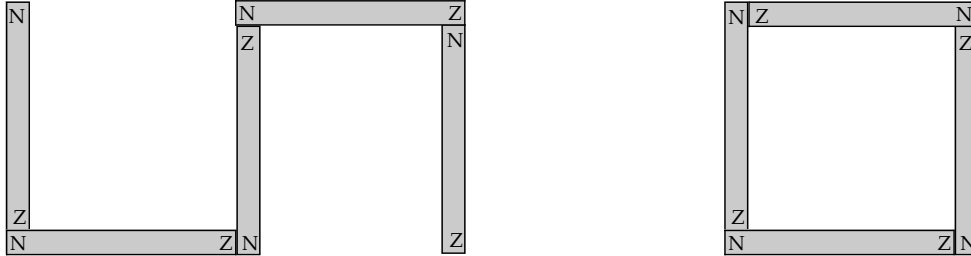
• Voorbeelden van sluiting

- een benzeen molecule bestaat uit een gesloten, zeshoekige ring van koolstof (C) atomen die elk ook gebonden zijn aan een waterstofatoom (H). Andere koolwaterstofverbindingen hebben de vorm van ketens die onbeperkt in lengte kunnen



toenemen door extra atomen aan de uiteinden te hechten

- in de figuur hieronder zie je staafmagneten aan elkaar gebonden via de aantrekkingskracht tussen hun Noord- en Zuidpolen. De linkse assemblage is “open”: er is nog plaats om nieuwe magneten toe te voegen. De rechtse is “gesloten”: alle aanhechtingspunten zijn opgebruikt



- Kenmerken van sluiting

- gesloten systemen hebben als voordeel dat ze stabiel zijn: alle componenten zitten vast aan alle aanhechtingspunten. Bij open systemen daarentegen zijn de componenten aan de “rand” maar gedeeltelijk aangehecht: ze kunnen dus gemakkelijker loskomen
- het nadeel van sluiting is dat een gesloten systeem niet langer kan groeien
- bij een gesloten systeem is er een duidelijkere distinctie tussen systeem (binnen) en omgeving (buiten), gezien open systemen nog steeds componenten uit de omgeving kunnen opnemen, of componenten verliezen wanneer die loskomen

13.6 Selectie van stabiele combinaties

Veronderstel verschillende systemen die met elkaar interageren. Na verloop van tijd produceert deze interactie verschillende bindingen. Verschillende combinaties van bouwstenen ontstaan toevallig. Degene die “werken” blijven behouden. De bouwstenen passen in elkaar, als de stukjes van een legpuzzel.

Als de combinatie gesloten is, zal ze niet meer groeien. Individuele componenten kunnen dan niet meer interageren met andere componenten. Een gesloten systeem kan echter nog wel interageren *als een geheel* met andere systemen. Dit zijn interacties van een ander type dan deze tussen de subsystemen onderling

Voorbeelden:

- voetbalspelers in een ploeg interageren door elkaar de bal te passeren; voetbalspelers interageren door tegen elkaar wedstrijden te spelen
- protonen en neutronen in een atoomkern interageren door de “sterke” nucleaire kracht tussen deeltjes; atomen interageren door de uitwisseling van elektronen

Deze interacties op het niveau van het supersysteem leiden ook tot bindingen tussen supersystemen. Dit resulteert in een super-supersysteem.

Deze bindingen op een hoger niveau zijn in het algemeen zwakker dan die op het lagere niveau. “Zwakker” wil zeggen minder stabiel, minder fit, gemakkelijker te verbreken. Reden: evolutie verkiest de meer fitte configuraties, en zal deze dus eerst uitproberen voor ze aan de minder fitte begint. Pas als alle mogelijke “sterke” bindingen gerealiseerd zijn, zal variatie de kans krijgen om de overblijvende “zwakke” bindingen uit te proberen

Voorbeelden:

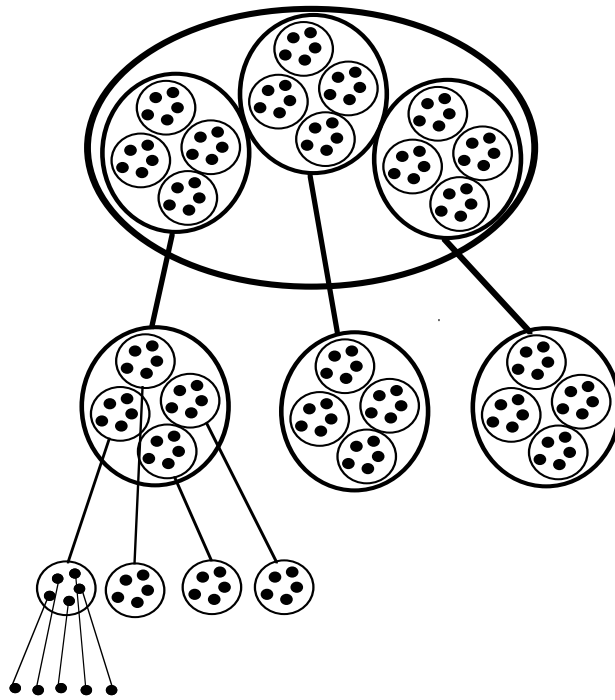
- de bindingen tussen elementaire deeltjes in een atoom zijn veel sterker dan de bindingen tussen atomen in een molecule. Men heeft reusachtige deeltjesversnellers die zeer veel energie produceren nodig om een atoom te splitsen. Om een molecule te splitsen is een chemische reactie in het algemeen voldoende
- mensen of dieren in een groep zijn gemakkelijker uiteen te drijven dan de cellen in hun lichaam

Conclusie: elk systeem kan als bouwsteen dienen voor een supersysteem van een hogere orde. Dit supersysteem zelf kan weer als bouwsteen optreden voor een supersysteem van nog hogere orde. Op die manier komen er steeds hogere niveaus van structurele complexiteit bij, bijvoorbeeld:

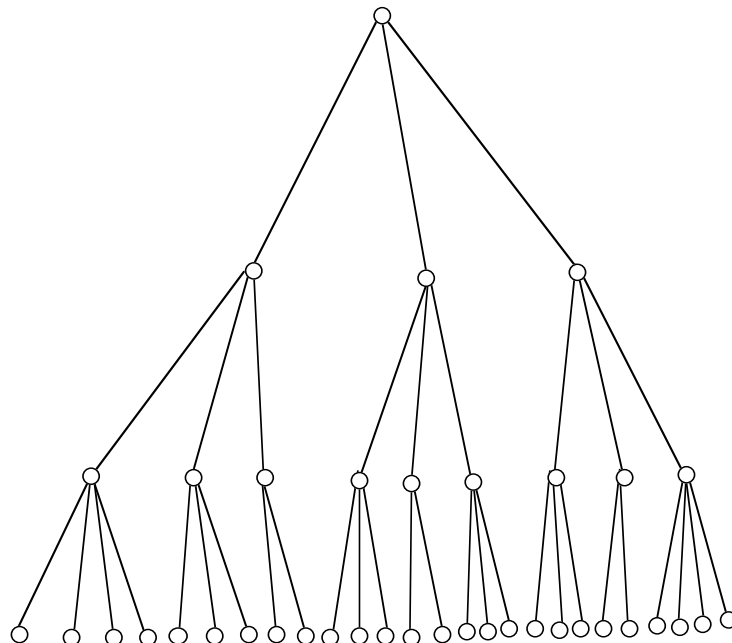
- elementaire deeltjes → atomen → moleculen → cellen → multicellulaire organismen → maatschappijen.
- rotsblokken → planeten → zonnestelsels → melkwegstelsels → clusters van melkwegstelsels

13.7 Hiërarchische architectuur

We hebben gezien dat evolutie steeds hogere niveaus van supersystemen genereert. Hoe complexer het systeem, hoe later het ontstaan is. Elk van deze systemen bestaat nog steeds uit alle componenten waaruit het oorspronkelijk gevormd werd. Aldus kan elk systeem geanalyseerd of “gedecomposeerd” worden in zijn constituenta subsystemen, die op hun beurt gedecomposeerd kunnen worden tot hun constituenten, enz., tot op het allerlaagste niveau, de elementaire deeltjes. Zoals we zagen in 4.4. noemt men dergelijke opeenvolgende lagen of niveaus van “subsystemen in systemen in supersystemen in ...” een **hiërarchie**.



Zulke hiërarchie is een voorbeeld van wat men in de wiskunde een “boomstructuur” noemt (stel je de tekening hieronder ondersteboven voor, met het beginpunt waaruit alles verder vertakt als “wortel” van een boom, en de rest als “takken”): deze wordt gedefinieerd door het feit dat elke kleinere tak (beneden) van de boom voortspruit uit precies één grotere tak (boven). Dit betekent dat in een hiërarchie elk systeem maar tot één enkel supersysteem kan behoren.



Opmerking: In de praktijk is dit niet altijd het geval. Een systeem kan een subsysteem zijn van meerdere, overlappende supersystemen tegelijkertijd. Een persoon kan bijvoorbeeld tegelijkertijd behoren tot een gezin, een voetbalploeg en een bedrijf. Dit komt echter zelden voor omdat de kans klein is dat eenzelfde toestand van het systeem aan verschillende, van elkaar onafhankelijke, dwangen of

bindingen zou voldoen. Omdat mensen zulke uiterst complexe systemen zijn, met zulke grote toestandsruimte, is het voor een persoon echter gemakkelijker om aan verschillende dwangen tegelijk te voldoen (verschillende “rollen te spelen” of functies te vervullen) dan voor een elementair deeltje.

In de praktijk is de waarschijnlijkheid van het vinden van een fitte combinatie door blinde variatie zeer klein, gezien er veel meer onfitte dan fitte toestanden zijn. Een bijkomende dwang waaraan de combinatie moet voldoen maakt de combinatie nog veel minder waarschijnlijk. Om die reden zijn de meeste complexe systemen hiërarchisch gestructureerd. Deze organisatievorm noemt H. A. Simon de “architectuur van de complexiteit”.

13.8 Bijna decomposeerbare systemen

De decompositie in subsystemen blijft steeds een *benadering* van de werkelijkheid. Door de decompositie hebben we de essentiële samenhang van het systeem verloren, dit wil zeggen de dwang of de binding die de delen tot een geheel verbindt, en die het systeem als zodanig zijn identiteit geeft. Het systeem op elk niveau is meer dan de som (aggregaat) van zijn subsystemen. Het heeft **emergente** eigenschappen, die door de dwang of binding gecreëerd werden.

Voorbeeld: een biljartbal is rond, en heeft geen oriëntatie of richting. Twee aan elkaar geplakte biljartballen vormen een soort halter of staaf, die in een welbepaalde richting wijst. Deze oriëntatie of “richting” is een emergente eigenschap

Toch is decompositie in de praktijk nuttig. Ze verbreekt immers de zwakkere bindingen die het supersysteem vormen, maar behoudt de sterkere bindingen die de subsystemen vormen. De componenten die overblijven na decompositie zijn stabiel en dan het oorspronkelijke systeem.

Om die redenen noemt men zulke systemen **bijna decomposeerbaar** (“nearly decomposable”, begrip geïntroduceerd door H.A. Simon). Ze zijn niet volledig analyseerbaar of reduceerbaar tot hun delen, maar vormen ook niet één, onsplitsbaar geheel. In de praktijk hebben dus zowel reductionisten als holisten ergens gelijk: er is een geheel dat meer is dan de som van de delen (holisme), maar het opsplitsen in delen behoudt toch tal van fundamentele eigenschappen, en is daarom een nuttige manier om de complexiteit te reduceren.

13.9 Besluit: toename van de structurele complexiteit

Variatie en selectie zullen spontaan componenten assembleren tot hoger orde systemen, en deze weer als bouwstenen gebruiken voor systemen van een volgend niveau. Hierbij nemen zowel distinctie als connectie toe:

- distinctie omdat binding of sluiting van een assemblage van componenten een duidelijke grens of onderscheid trekt tussen “binnen” en “buiten”, sluiting **differentieert** systemen van elkaar.
- connectie omdat de componenten binnen een supersysteem aan elkaar gebonden zijn: binding of sluiting **integreert** de subsystemen binnen een systeem.
- differentiatie + integratie = **complexificatie**

Deze complexificatie neemt in het algemeen de vorm aan van een steeds groeiende hiërarchie (meer niveaus, meer componenten per niveau).

Dergelijke complexiteit is echter nog zuiver statisch. Bindingen beperken bovendien de variatie, en verminderen dus flexibiliteit of beweeglijkheid. Wanneer we aan levende wezens, intelligentie, maatschappij en cultuur denken, dan ligt de complexiteit daarvan eerder in variabiliteit of aanpassingsvermogen. Om dit te begrijpen, moeten we een ander soort van systeembouwend mechanisme invoeren: de metasysteemtransitie.

Hoofdstuk 14. Metasysteemtransities

14.1 Aanpassingsvermogen

Alle systemen “streven” in zekere zin naar fitness, dit wil zeggen dat selectie impliciet de voorkeur geeft aan fitte systemen. Het is niet noodzakelijk dat het systeem een ingebouwd doel of plan heeft om toch fitness te bereiken.

Fitness is gebaseerd op interne stabiliteit en externe aanpassing aan de omgeving. Een systeem dat eenmaal een goede “niche” bezet heeft, is aangepast: het heeft een toestand bereikt die overleeft binnen de gegeven omgeving. Een subsysteem is bijvoorbeeld aangepast aan het systeem waarvan het deel uitmaakt. Eens aangepast, evolueert het systeem in het algemeen niet verder meer: het bevindt zich op de bodem van een vallei in zijn fitnesslandschap.

Wanneer de omgeving echter zelf verandert, dan volstaat het niet meer om perfect aangepast te zijn aan een gegeven situatie of niche. Wat op een gegeven moment fit was, zal dat in het algemeen niet langer zijn nadat de omgeving veranderd is.

Voorbeeld: op de ijsvlakte is het voor sneeuwwhazen fit om een witte kleur te hebben, zodat ze minder zichtbaar zijn voor roofdieren. Als het ijs smelt, valt de witte kleur echter juist op, en zal een witte haas dus sneller opgepeuzeld worden.

In een veranderlijke omgeving is het nuttig om zich *onmiddellijk* te kunnen aanpassen, eerder dan te moeten wachten tot variatie en selectie een nieuwe fitte toestand hebben laten evolueren.

Voorbeeld: als het warme klimaat lang genoeg aanhoudt, dan zal natuurlijke selectie de populatie van sneeuwwhazen een donkere pels geven door de lichter gekleurde exemplaren generatie na generatie te elimineren. Als het ijs echter enkel in de zomer smelt, om in de winter terug te komen, dan is er geen tijd om op natuurlijke selectie van de populatie sneeuwwhazen te wachten. In dat geval is het voor de sneeuwwhazen nuttig om de kleurverandering “voorgeprogrammeerd” te hebben: de witte haartjes vallen uit in de lente, en bruine groeien in hun plaats; het omgekeerde gebeurt in de herfst

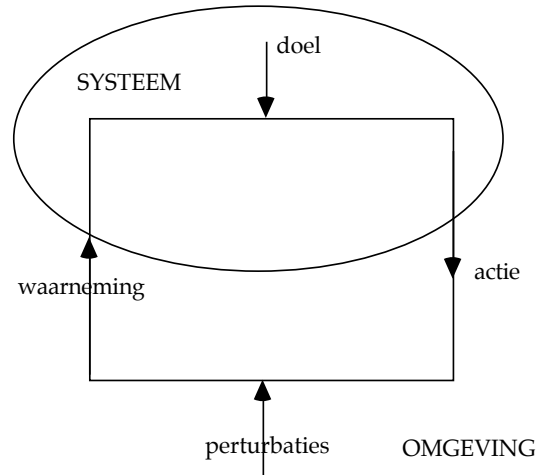
In dit voorbeeld is de verandering van omgeving altijd dezelfde, en dus voorspelbaar. Dit maakt het gemakkelijk voor de genen om een voorgeprogrammeerde aanpassing te evolueren. In het algemeen echter is de verandering in de omgeving onvoorspelbaar. In dat geval moet aanpassing flexibel zijn, niet voorgeprogrammeerd.

Voorbeeld: een kameleon of een inktvis kan onmiddellijk van kleur veranderen om zich aan de omgeving aan te passen, welke de omgeving ook is.

Definitie:

aanpassingsvermogen = het vermogen de toestand van een systeem te veranderen op zulke manier dat de veranderingen in de toestand van de omgeving gecompenseerd worden, en het systeem fit of aangepast blijft ondanks de veranderde omgeving.

In feite is aanpassingsvermogen (adaptiviteit) een vorm van **controle** (zie 5.3), maar nu met fitness als doel. Ter herinnering: controle vereist een lus met negatieve feedback, waarbij inkomende perturbaties (die leiden tot afwijkingen van de doeltoestand) na waargenomen te zijn, gecompenseerd worden door de juiste acties. Acties kunnen zowel de interne toestand (eigenschappen van de componenten, bijvoorbeeld kleur van de huid, temperatuur) als de externe toestand (relatie tot de omgeving, bijvoorbeeld nabijheid van een schuilplaats) veranderen.



14.2 Metasystemen

Stel dat een systeem aanpassingsvermogen heeft: het varieert als de omgeving varieert, maar zodanig dat zijn essentiële eigenschappen, zijn capaciteit tot overleven, steeds bewaard blijft. Dit betekent dat de variatie niet meer willekeurig is maar beheerst of gecontroleerd. Er moet dus een soort van controlesysteem aanwezig zijn dat de variaties van het systeem stuurt. De combinatie van het oorspronkelijke systeem (of systemen) en dergelijk controlesysteem noemen we een **metasysteem**. Het oorspronkelijke systeem dat door het metasysteem gecontroleerd wordt, noemen we het *objectsysteem*.

Een metasysteem is geen statische dwang, zoals een supersysteem, maar een dynamische dwang, die zich voortdurend aanpast.

Voorbeeld: een multicellulair organisme is meer dan een supersysteem bestaande uit cellen die aan elkaar gebonden zijn. Verschillende cellen van verschillende celtypes voeren verschillende handelingen uit, afhankelijk van de situatie: bijvoorbeeld spiercellen trekken al dan niet samen, zenuwcellen zenden al dan niet impulsen door. Deze cellen worden gecoördineerd door een controlesysteem, dat kan gelokaliseerd zijn (bijvoorbeeld in de hersenen), maar dat ook gedistribueerd (zie 3.3) kan zijn over alle cellen (bijvoorbeeld het DNA in elke celkern). In feite bevat ons lichaam een veelheid aan controlesystemen op verschillende niveaus, waarbij het ene de doelen van het andere aanpast.

Controle betekent dat de toestand op een welbepaalde manier gevarieerd wordt, afhankelijk van de waargenomen situatie. Dit betekent dat het systeem gecontroleerde variatie ondergaat eerder dan willekeurige of blinde variatie. Gecontroleerde variatie laat het systeem toe om zijn fitness in allerlei omstandigheden te behouden, en vermijdt het fitnessverlies dat het meest waarschijnlijke gevolg is van blinde variatie.

Gecontroleerde variatie vereist in het bijzonder dat het systeem **kennis** heeft over welke variatie aangewezen is in welke omstandigheden. Ter herinnering (sectie 5.8), kennis kan uitgedrukt worden door conditie-actieregels, van de vorm: ALS bepaalde situatie wordt waargenomen, DAN voer bepaalde, hieraan aangepaste actie uit. In de verkorte versie: conditie → actie

14.3 Hiërarchieën van metasystemen

Net zoals een supersysteem in het algemeen zelf omvat is in een hogere orde supersysteem, kan een metasysteem zelf onderworpen zijn aan een metasysteem van hogere orde, enzovoort. Dit leidt tot een veralgemeende controlehiërarchie (sectie 5.6), die verschillend is van de structurele hiërarchie die we hiervoor besproken hebben (13.7). De eenvoudige formule hiervoor is de volgende:

$$\text{metasysteem} = \text{controle van objectsysteem}$$

Het volgende niveau in de hiërarchie wordt dan beschreven door:

$$\text{meta-metasysteem} = \text{controle van metasysteem, enz.}$$

Voorbeeld: thermostaat = controle van verwarming; aanwezigheidssensor = controle van de thermostaat.

Dit kan ook uitgedrukt worden met behulp van conditie-actie regels. Het metasysteem van het eerste niveau varieert de toestand van het objectsysteem volgens bepaalde regels. De regels voor het metasysteem van het tweede niveau bepalen dan de variatie van de regels van het eerste niveau.

Voorbeeld: de thermostaat varieert de hoeveelheid warmte die wordt geproduceerd volgens de regels: temperatuur lager dan doeltemperatuur → verwarming aan; temperatuur hoog genoeg → verwarming uit. De aanwezigheidssensor varieert de instelling van de thermostaat, en dus de manier waarop de thermostaat de warmtetoevoer regelt, volgens de regels: iemand in kamer → stel doeltemperatuur in op 21°; kamer leeg → stel doeltemperatuur in op 16°

Net zoals evolutie spontaan leidt tot hogere niveaus van supersystemen, leidt ze ook tot hogere niveaus van metasystemen. Het ontstaan van zulk hoger niveau noemen we een **metasysteemtransitie** (begrip ingevoerd door V. Turchin). De reden waarom variatie en selectie dergelijk transitie voortbrengen is eenvoudig: een metasysteem heeft een groter aanpassingsvermogen dan een objectsysteem, en zal

dus fit zijn in meer diverse omstandigheden, maar een meta-metasysteem heeft een *nog* groter aanpassingsvermogen.

Waar een metasysteem altijd op dezelfde manier zal reageren op een bepaalde conditie, zal een meta-metasysteem zijn reactie kunnen aanpassen door rekening te houden met bijkomende condities, die typisch van een hoger, meer abstract niveau zijn. Een meta-meta-metasysteem zal op zijn beurt weer een groter aanpassingsvermogen hebben dan een meta-metasysteem. Elke vorm van aanpassing kan zelf weer voorwerp worden van een aanpassingsmechanisme op een hoger niveau. Hoe groter het aanpassingsvermogen, hoe groter de (interne of absolute) fitness, en dus hoe groter de kans dat zulk systeem vroeg of laat zal evolueren.

Beperkingen van metasysteemhiërarchieën

Een hiërarchie van metasystemen is echter wel veel complexer in zijn functioneren dan een systeem met één of twee niveaus. Om te beslissen welke actie moet uitgevoerd worden, moeten verschillende controleniveaus doorlopen worden, die elk hun eigen condities moeten checken om dan eventueel de instelling van het onderliggende controleniveau te veranderen. Elk niveau moet daarvoor informatie over de toestand krijgen van de onderliggende niveaus, deze informatie verwerken en interpreteren, en de beslissingen terugsturen naar de lagere niveaus. Een groot aantal controleniveaus vertraagt dus de besluitvorming over welke actie tenslotte moet worden uitgevoerd, en maakt de kans op fouten of miscommunicatie tussen de niveaus groter. Metaniveaus toevoegen heeft dus niet alleen voor-, maar ook nadelen.

Voorbeeld: complexe bureaucratieën met veel bestuursniveaus, zoals in ministeries of grote bedrijven, zijn over het algemeen traag en rigiede. Daarom is het in de mode om hiërarchieën in organisaties af te vlakken, en het aantal niveaus te verminderen.

De oplossing is om elk controleniveau zo intelligent en zo autonoom mogelijk te maken, zodat het zo veel mogelijk beslissingen op zichzelf kan maken, zonder de hogere niveaus te moeten raadplegen. Aldus moet er niet meer hiërarchie ingesteld worden dan strikt noodzakelijk. De cyberneticus Aulin heeft dit principe geformuleerd als de *wet van de benodigde hiërarchie* (law of requisite hierarchy): hoe meer controle de lagere niveaus hebben, hoe minder hiërarchische niveaus er nodig zijn om controle over de globale situatie te verkrijgen (en omgekeerd).

Voorbeeld: de vermindering van hiërarchie in een bedrijf of instelling is slechts mogelijk als de werknemers op de verschillende niveaus voldoende intelligent en voldoende geïnformeerd zijn om grotendeels autonoom te kunnen werken, zonder constante supervisie of bevelen van bovenaf. Dit is één van de redenen waarom “vlakke” bedrijfsstructuren veel meer voorkomen in het huidige tijdperk, met zijn

efficiënte informatietechnologie en goed opgeleide werknemers, dan een eeuw geleden.

In de evolutie lijkt het probleem van te veel metaniveaus niet echt op te treden: de creatie van een nieuw metaniveau door variatie en selectie is zeer moeilijk, en zal alleen plaatsgrijpen als er geen andere manier meer is om fitness te verbeteren. In een bureaucratie daarentegen is het gemakkelijk en verleidelijk om voortdurend nieuwe niveaus te creëren, zodat managers of ambtenaren steeds weer naar een volgend niveau kunnen gepromoveerd worden. In de evolutie echter zal eerst het bestaande niveau zo goed mogelijk uitgebouwd en op punt gesteld worden vòòr een nieuw niveau zal worden uitgetest.

Hierbij wordt de autonomie van de bestaande lagere orde systemen zo veel mogelijk in stand gehouden. Dit wil zeggen dat de meeste acties bij verstek (*by default*) ondernomen worden door de lagere orde systemen. Deze zijn daar immers door honderden miljoenen jaren van variatie en selectie zeer goed voor aangepast. Het hogere orde metasysteem zal pas interveniëren als de situatie echt te uitzonderlijk of te complex is om door het lagere orde systeem alleen opgelost te kunnen worden. Aldus worden de vertragingen en verwarringen die kunnen optreden door alle niveaus van de hiërarchie te doorlopen in 99,9... % van de gevallen vermeden.

Voorbeeld: onze ademhaling en onze reflexbewegingen (bijvoorbeeld hand wegtrekken van heet oppervlak) worden grotendeels gecontroleerd door een lagere orde, onbewust systeem, dat zeer snel, efficiënt en automatisch werkt. In bijzondere omstandigheden kan ons bewust denken (een hogere orde systeem) echter ingrijpen, en het lagere orde systeem doen afwijken van zijn normale instelling. Bijvoorbeeld, indien nodig kunnen we onze adem inhouden (bijvoorbeeld als we weten dat er gifgas aanwezig is), of onszelf dwingen om over gloeiende kolen te stappen. Ons bewustzijn zou echter overbelast worden moest het over elke hartslag of ademtocht moeten nadenken.

14.4 Metasysteemhiërarchie van Turchin

De Russisch/Amerikaanse cyberneticus Valentin Turchin heeft een sequentie opgesteld van de meest ingrijpende metasysteemtransities in de evolutie van het leven, van primitieve diersoorten tot menselijke cultuur. We zullen deze nu in het kort doorlopen.

- eenvoudige reflex = controle van de beweging

Dit eerste niveau wordt gekenmerkt door *reflexbewegingen* waarbij een specifieke gewaarwording door een zintuig via een zenuw direct een bepaalde spier in actie brengt. Hoewel wijzelf nog steeds zulke reflexacties hebben, is dit controleniveau typisch voor primitieve dieren, zoals zeeanemonen of wormen, die wel zenuwbogen

maar geen hersenen hebben. Deze dieren reageren altijd op dezelfde manier op dezelfde simpele prikkels. Bijvoorbeeld, aanraking → zeeanemoon trekt zich samen

- complexe reflex = controle van de eenvoudige reflex

Wanneer verschillende zenuwbogen, afkomstig van verschillende sensoren (zintuigcellen) samenkomen kan het organisme het belang van de verschillende prikkels of sensaties tegen elkaar afwegen, en een geïntegreerde reactie produceren, die rekening houdt met de verschillende aspecten van de waarneming.

Voorbeeld: als de sensatie “aanraking” wordt gecombineerd met de visuele waarneming “groot” of “klein”, kan het dier meer aangepast reageren: “aanraking” door iets “groots” → gevaar, wegtrekken; “aanraking” door iets “kleins” → prooidier, opeten

Dit controleniveau veronderstelt een knooppunt van zenuwen, waar de verschillende prikkels bij elkaar komen en met elkaar vergeleken worden voor ze doorgestuurd worden naar de spieren die de acties uitvoeren. Dit zenuwknooppunt vormt een rudimentair hersenstelsel.

- leren of associëren = controle van de complexe reflex

Complexe reflexen zijn nog steeds rigiede, en dezelfde combinatie van prikkels zal steeds tot dezelfde reactie leiden. Wanneer de omgeving echter complex en veranderlijk is, is het nuttig om zijn reacties aan te passen aan nieuwe verschijnselen, dit wil zeggen om nieuwe conditie-actieregels of conditie-conditieregels aan te **leren**. Kennis hoeft niet langer overgeërfd te worden, maar kan individueel geleerd worden. Leren is dus een gecontroleerde variatie van regels.

Leren werkt door *associatie*: als een waargenomen conditie *A* dikwijls gevolgd wordt door een conditie *B*, dan leert het organisme de associatie $A \rightarrow B$ te maken. Dit wil zeggen als *A* waargenomen wordt, creëert dit een min of meer sterke *verwachting* van *B*. Hoe meer de twee condities tesamen worden waargenomen, hoe sterker de associatie of de verwachting, en hoe meer kans dat de regel $A \rightarrow B$ effectief wordt toegepast om te voorspellen wat er zal gebeuren.

Voorbeeld: experiment van Pavlov: als een hond telkens eten krijgt kort nadat een bel gaat, dan zal de hond beginnen kwijlen zodra hij de bel hoort, omdat hij eten verwacht.

Leren werkt ook door beloning / bestraffing van acties (*reinforcement*): als een conditie *A* gevolgd wordt door een actie *B*, en het resultaat is positief (het organisme komt dichterbij de doeltoestand), dan wordt de associatie $A \rightarrow B$ versterkt of beloond. Als het resultaat daarentegen negatief is, dan wordt de associatie verzwakt of bestraft.

Voorbeeld: een rat die een hendeltje waarneemt en die op dat hendeltje drukt, wordt telkens beloond met voedsel. Deze rat zal snel leren om steeds op dat hendeltje te duwen. Als diezelfde rat echter een elektrische schok krijgt wanneer ze op dat hendeltje duwt, dan zal ze afleren om er nog aan te komen.

- denken = controle van het associëren

Leren door associatie kan enkel connecties leggen tussen fenomenen die *tesamen worden ervaren*. Fenomenen die men nooit tesamen heeft waargenomen, worden niet geassocieerd. Denken betekent het zich voorstellen van combinaties van fenomenen die men niet noodzakelijk in werkelijkheid heeft meegemaakt. Men kan dus regels leren zonder ze zelf te hebben ervaren. Dit is typisch voor de menselijke intelligentie, en ontbreekt in dieren.

Voorbeeld: wij kunnen ons een konijn met een bolhoed voorstellen, zonder er ooit één gezien te hebben, of overwegen hoe we een probleem zullen oplossen (bijvoorbeeld motorpech met een motorbootje) dat we nooit eerder hebben meegemaakt.

Denken maakt gebruik van concepten gerepresenteerd door symbolen (bijvoorbeeld woorden) die volgens bepaalde combinatieregels (bijvoorbeeld grammatica, logica) kunnen gecombineerd worden. Omdat de concepten abstract of symbolisch zijn, hangen ze niet af van concrete waarnemingen. Dit laat toe ze vrij met elkaar te combineren, onafhankelijk van wat er in de omgeving gebeurt. De combinatieregels zorgen ervoor dat dit proces van variatie toch in zekere mate gecontroleerd of beheersd blijft.

- cultuur = controle van het denken

De taal, concepten en redeneerregels die wij gebruiken hebben wij in het algemeen niet zelf uitgevonden, maar overgenomen van anderen, van de ideeën die in de maatschappij en gedurende onze opvoeding worden aangeboden. Deze afhankelijkheid beperkt ons in de vrijheid van ons denken, in onze creativiteit. Nieuwe concepten en nieuwe regels ontstaan in het algemeen door een cultureel, maatschappelijk proces, waar een individu geen controle heeft. Tot nu toe is deze culturele evolutie echter nog voornamelijk een proces van blinde variatie en natuurlijke selectie van de meest bruikbare concepten. Het is niet gestuurd, en dus niet erg efficiënt.

Naarmate maatschappij en cultuur complexer worden, ontstaan er echter systemen en methoden om systematisch nieuwe concepten te ontdekken. Bijvoorbeeld, de wetenschappelijke methode, filosofische analyse, artistieke exploratie, computerprogramma's voor de ontdekking van regulariteiten in gegevens, communicatietechnologie voor de uitwisseling en discussie van ideeën... Deze ontwikkeling lijkt als maar sneller te gaan. Het ziet naar uit dat wij aan de

vooravond staan van een nieuwe metasysteemtransitie naar een hoger niveau van organisatie. Een redelijk plausibel beeld voor dit hogere systeemniveau is het *globale brein*, dit wil zeggen het intelligente systeem dat ontstaat uit de integratie van alle mensen op deze planeet, waarbij het informatienetwerk de rol speelt van zenuwstelsel, dat informatie overbrengt, maar dat ook nieuwe concepten en theorieën helpt om te ontstaan.

14.5 Het ontstaan van het leven*

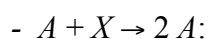
Wellicht de meest fundamentele metasysteemtransitie is het ontstaan van het leven zelf. Deze ontbreekt nog in de sequentie van Turchin. Levende wezens zijn systemen met ingebouwd aanpassingsvermogen. Dit betekent dat ze doelgericht zijn, met overleving of fitness als doel. Om te begrijpen hoe het leven kon ontstaan, moeten we ons de vraag stellen hoe variatie en selectie tot doelgerichte of controlesystemen konden leiden. De volgende overwegingen zijn nog grotendeels speculatief, maar bieden een plausibel beeld van de meest geheimzinnige transitie van allemaal.

In het algemeen gaat men ervan uit dat voor het meest primitief denkbare organisme (een soort rudimentaire bacterie) drie componenten nodig zijn geweest:

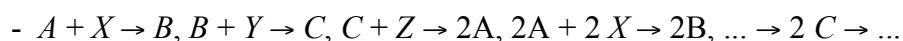
- 1) een *membraan* of celwand, dat het systeem afschermt van de omgeving maar toch voedsel binnenlaat
- 2) een “*geheugenmolecule*” of “replicator” (zoals DNA) die de werking van het organisme “onthoudt” en die kan gekopieerd (gerepliceerd) worden, en aldus doorgegeven aan nakomelingen, eventueel met variaties
- 3) een *autokatalytische cyclus* van chemische reacties die binnenkomende voedselmoleculen gebruikt om de interne componenten te produceren, herstellen of reproduceren

Katalyse is een term uit de scheikunde, die verwijst naar het proces waarbij een bepaalde stof (de katalysator) een reactie vergemakkelijkt of versnelt. Autokatalyse betekent dan zelfversterking of zelffacilitatie, dit wil zeggen de moleculen in de cyclus stimuleren hun eigen productie. Autokatalyse is een vorm van positieve feedback.

Voorbeelden:



A verdubbelt zichzelf door deze reactie. Dit is een cyclus omdat je met A begint en met A eindigt



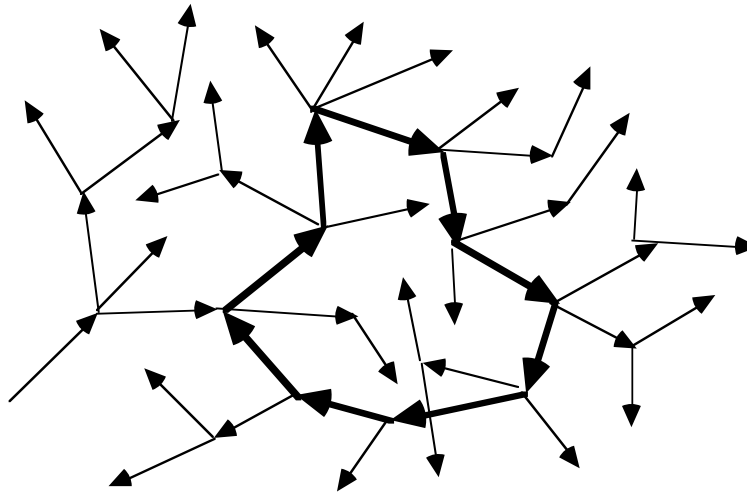
Deze meer complexe cyclus bestaat uit 3 tussenstappen (A, B, C), waarna we weer bij het beginpunt (A) aanbeldan, behalve dat we nu een dubbele

hoeveelheid hebben. X , Y , Z spelen de rol van “voedselmoleculen” die worden opgebruikt om meer A 's, B 's, en C 's te produceren

De wetenschappers zijn het er nog niet over eens welke van deze drie componenten de meest fundamentele is, en hoe, of in welke volgorde, deze componenten ontstaan zijn. Als we een levend wezen als een controlesysteem beschouwen, dan zien we dat het niet uitmaakt in welke volgorde ze ontstaan zijn, zolang ze maar op een zeker ogenblik geïntegreerd werden. Het is bijvoorbeeld mogelijk dat lege membranen, vrije “replicatoren” en autokatalytische cycli onafhankelijk van elkaar, in parallel, zouden ontstaan zijn. Membranen die toevallig een autokatalytische cyclus zouden omvat hebben, zouden het wellicht beter gedaan hebben omdat de moleculen geproduceerd door de cyclus mee het membraan doen groeien, terwijl de membranen op hun beurt de cyclus zouden afgeschermd hebben tegen storingen. “Replicatoren” die toevallig deel uitmaakten van een autokatalytische cyclus zouden het om de dezelfde reden beter gedaan hebben, terwijl ze de werking van de cyclus in hun “geheugen” zouden hebben opgeslagen, zodat deze cyclus gemakkelijker gereproduceerd kon worden.

- Hoe kunnen de componenten elk op zich ontstaan zijn?
 - *Membraan*: bepaalde eenvoudige, vetachtige moleculen (bilipiden) organiseren zich spontaan in de vorm van twee-dimensionale vellen, die zich sluiten en zo “cellen” vormen. Als het aantal bilipiden toeneemt, kunnen deze cellen zich spontaan in twee splitsen.
 - *Autokatalytische cyclus*: in een voldoende complex netwerk van reacties waarbij elke molecule één of meer nieuwe moleculen produceert, die op hun beurt weer nieuwe moleculen produceren, enz., zal vroeg of laat altijd een lus ontstaan, dit wil zeggen dat een van de inputmoleculen opnieuw als deel van de output verschijnt. De noodzaak van het verschijnen van zulke cyclus werd aan de hand van computersimulaties en wiskundige redeneringen betoogd door Stuart Kauffman, maar is in feite een tamelijk voor de hand liggend mechanisme. De dikke pijlen in de illustratie hieronder stellen een cyclus voor binnen een groter, willekeurig netwerk.

Zulke cyclus is een vorm van positieve terugkoppeling, maar ook van sluiting, zoals besproken in 13.5, zij het nu niet meer statisch maar dynamisch. Bovendien, per definitie van katalyse, wordt er meer geproduceerd dan waarmee de keten gestart is. Alle moleculen in de keten zullen dus in aantal toenemen, zolang er voldoende “voedsel” of “grondstof” moleculen aanwezig zijn om de reactie te laten voortduren.

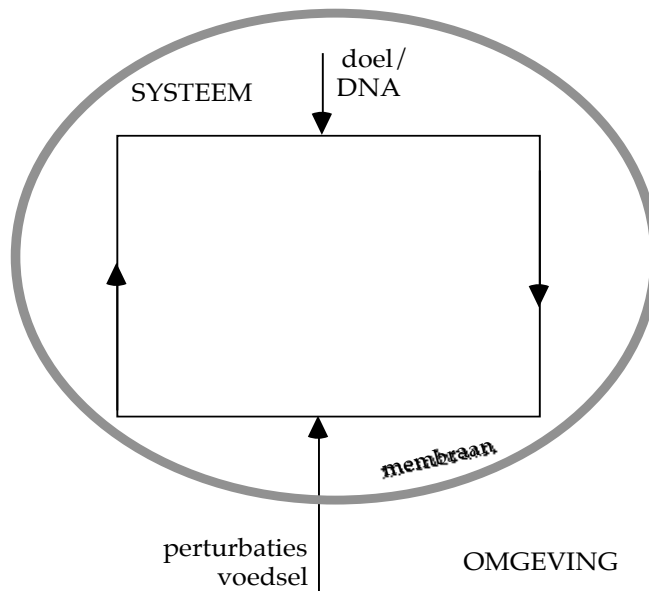


- *Geheugenmolecule*: het simpelste gekende type van dergelijke molecule is RNA, een enkelvoudige vorm van de “dubbele spiraal” van het DNA. Men heeft relatief eenvoudige vormen van RNA ontdekt die in staat zijn om zichzelf te reproducen. Er is op dit ogenblik nog geen concreet scenario voor het ontstaan van het eerste RNA, alhoewel de componenten van RNA relatief gemakkelijk te produceren zijn. RNA kan mogelijk ontstaan zijn als een “nevenproduct” van een autokatalytische cyclus, als een meer complexe vorm van een oorspronkelijk eenvoudiger molecule die nu niet meer voorkomt, of (weinig waarschijnlijk) rechtstreeks door combinatie en selectie van zijn componenten

14.6 Oorsprong van controle*

We zoeken nu een scenario dat een doelgericht, adaptief systeem spontaan laat ontstaan uit niet-doelgerichte componenten. Dit wil zeggen dat we de oorsprong van het leven gaan proberen te verklaren op basis van evolutionaire en cybernetische principes, eerder dan uit de chemische eigenschappen van moleculen en reacties.

- wat hebben we minimaal nodig voor een controlesysteem?
 - 1) **negatieve feedback**: zorgt ervoor dat perturbaties onderdrukt worden, en het systeem terugkeert naar een evenwichtstoestand
 - 2) een **doel** dat de geprefereerde toestand representeert: zorgt ervoor dat de toestand waar het systeem naar terugkeert inderdaad de meest fitte is, degene die tot lange termijn overleving leidt
 - 3) *amplificatie*: het effect van acties is groter dan het effect van perturbaties. Dit zorgt ervoor dat de onderdrukking voldoende krachtig is, zodat de afwijkingen ten gevolge van storingen nooit zo groot worden dat ze de overleving in gevaar brengen.



Zulk rudimentair controlesysteem voor een levende cel wordt hierboven afgebeeld. Merk op dat dit schema equivalent is aan het algemene schema voor een controlesysteem (5.5), behalve dat de waarnemingen en acties nu plaatsgrijpen *binnen* de systeemgrens gevormd door het membraan. De reden is dat de meest primitieve cellen nog geen externe sensoren of organen hebben waarmee zij direct kunnen interageren met hun omgeving: zij moeten wachten tot de omgeving zelf het systeem binnendringt, en de effecten hiervan onderdrukken (of eventueel versterken).

Alle drie de “levenscomponenten” hebben hun specifieke functie of rol te vervullen in de constructie van zulk controlesysteem:

- *geheugenmolecule*: opslaan van **kennis** en **doel**, die de autokatalytische cyclus sturen, dit wil zeggen zorgt ervoor dat de juiste moleculen geproduceerd worden in de gegeven omstandigheden.
- *membraan*: **buffering**, dit wil zeggen passieve demping van storingen uit de omgeving. Dit verzwakt het effect van storingen op het doel, en draagt dus bij tot amplificatie. Bovendien filtert het binnenkomende moleculen, zodat in de eerste plaats slechts “goede” (voedsel) moleculen binnen kunnen, en “slechte” (gifstoffen) niet.
- *autokatalytische cyclus*: produceren van voldoende krachtige “**acties**” om storingen te compenseren, en beschadigde componenten opnieuw te produceren. Dit draagt ook bij tot amplificatie, maar vereist energie in de vorm van voedsel.

De autokatalytische cyclus is echter een *positieve* feedbacklus: je eindigt met meer dan je begint. Zonder beheersing zou dergelijke cyclus leiden tot een ongebreidelde groei. Deze groei is echter afhankelijk van de voedselmoleculen: als deze “op” zijn, komt de cyclus tot stilstand. De voedselmoleculen op hun beurt hangen af van wat voorhanden is in de omgeving. Dit maakt de werking van de cyclus zeer

onbetrouwbaar: ofwel te snel, ofwel stilstaand. Wat we dus nog nodig hebben is een combinatie van deze componenten met negatieve feedback en dus beheersing.

- Mogelijk scenario voor de constructie van een controlelus uit de componenten

Stel dat een van de “grondstofmoleculen” nodig om de autokatalytische cyclus te laten functioneren niet uit de omgeving komt, maar uit de cel zelf. Dan kan deze molecule het tempo van de cyclus beperken, onafhankelijk van de omgeving. Immers de cyclus kan niets produceren zonder dat deze molecule tussenkomt. Deze molecule speelt dan de rol van een “doelmolecule”, die de cyclus onder controle houdt. Zolang er meer voedsel voorhanden is dan doelmoleculen zal het tempo van de autokatalytische reactie afhankelijk zijn enkel van de doelmolecule. De minst beschikbare molecule beperkt immers de productie van alle andere (ze vormt de “bottleneck” van het proces). Als deze molecule in aantal toeneemt, verhoogt het tempo; als deze afneemt, vermindert het tempo. Aldus kan een “doelmolecule” de reactie volledig beheersen.

Stel nu dat er verschillende types of varianten van de doelmoleculen zijn, die elk de cyclus in een andere richting sturen, dit wil zeggen dat er andere moleculen geproduceerd worden. Dan krijgt de doelmolecule niet alleen controle over de *hoeveelheid* maar ook over de *soorten* moleculen die geproduceerd worden. Dit laat toe om de geproduceerde moleculen aan te passen aan de specifieke omstandigheden.

Voorbeeld: verschillende soorten voedsel vragen de productie van verschillende soorten “verteringsenzymen” en dit vereist dat de doelmoleculen de cyclus in de juiste richting zouden sturen

Dergelijk aanpassingsvermogen kan bereikt worden door de doelmoleculen zelf te laten produceren door een afzonderlijke autokatalytische cyclus, die beïnvloed wordt door wat er in de omgeving gebeurt. Zulke cyclus die één of meerdere andere cycli controleert, noemt men een *hypercyclus* (begrip ingevoerd door de moleculair bioloog Manfred Eigen). Het ontstaan van een hypercyclus is een voorbeeld van een metasysteemtransitie. Eenmaal zulke hypercyclus ontstaan is, krijgen we een organisatie gelijkaardig aan die van een levende cel.

Voorbeeld: in een cel worden bepaalde stukken DNA “geactiveerd” door andere moleculen (onder invloed van de omgeving). Het geactiveerde DNA produceert specifieke RNA moleculen. De RNA moleculen katalyseren of sturen specifieke reacties, aangepast aan de omstandigheden.

Hoofdstuk 15. Besluit: het evolutionair-systemische wereldbeeld

15.1 Ontologie

We zullen nu de filosofische implicaties van de voorgaande hoofdstukken samenvatten, om aldus het overkoepelend **evolutionair-systemische wereldbeeld** (ESW) te schetsen. Elk filosofisch systeem is gebaseerd op een **ontologie**. Deze beantwoordt de vragen “wat is?”, “welke zijn de fundamentele categorieën van het bestaan?”

In het ESW zijn de fundamentele bouwstenen relationeel: distincties en connecties. Distincties en connecties zijn de bouwstenen van meer complexe structuren of vormen van organisatie: systemen. Systemen ontstaan spontaan (zelforganisatie) door variatie en selectie. Aanvankelijk zien we enkel eenvoudige systemen, waaruit gaandeweg meer complexe systemen evolueren. Systemen worden geselecteerd op basis van fitness: het vermogen om te overleven en geproduceerd of gereproduceerd te worden. Fitness kan bereikt worden door: 1) stabiliteit (intern); 2) aangepastheid (extern); 3) aanpassingsvermogen.

Vanaf een zekere graad van complexiteit kunnen systemen doelgericht zijn. Ze zijn dan niet meer passief onderworpen aan hun omgeving, maar gaan autonoom hun eigen doelstellingen nastreven, en hiervoor indien nodig ingrijpen in de omgeving. Doelgerichte systemen hebben aanpassingsvermogen: als de omgeving verandert passen ze zich direct aan, zonder te moeten wachten op evolutie. Om hiertoe in staat te zijn, hebben ze kennis nodig: in plaats van blinde variatie (trial-and-error) te moeten toepassen, “weten” ze wat te doen in gegeven omstandigheden.

Systemen vormen verschillende soorten hiërarchieën van complexiteit, waarbij het systeem op elk hoger niveau complexer is dan dat op het onderliggend niveau:

- **supersystemen** (statisch): atomen, moleculen, rotsen, planeten, enz. Supersystemen bestaan uit verschillende componenten of subsystemen (distincties) bijeengehouden door connecties (dwang).
- **metasystemen** (dynamisch, doelgericht): levende wezens, intelligentie, maatschappij, ... Metasystemen bestaan uit een controlemechanisme dat de processen in één of meer objectsystemen coördineert en stuurt naar een bepaald doel. Bij metasystemen die ontstaan zijn door evolutie is het uiteindelijke doel (hoogste metaniveau) steeds fitness. De doelen op lagere niveaus zijn ondergeschikt of instrumenteel en kunnen sterk variëren afhankelijk van overlevingsstrategie, systeem, omgeving en omstandigheden.

15.2 Epistemologie

Epistemologie is de tak van de filosofie die zich bezighoudt met kennis, en zich afvraagt wat goede of “ware” kennis onderscheidt van “valse”, en hoe we deze kunnen herkennen.

Volgens het ESW is kennis is een product van de evolutie: het komt niet uit een abstract rijk van de “ideeën” zoals Plato dacht (*idealisme*), maar is ook niet het resultaat van simpele, passieve observatie van de omgeving (*empiricisme*), die leidt tot een soort objectieve afbeelding of reflectie van de werkelijkheid (*naïef realisme*).

Kennis ontstaat door blinde variatie en selectie van potentiële kennisstructuren. Kennis moet door het systeem zelf geconstrueerd worden, door verschillende mogelijke regels of combinaties van regels uit te proberen, en zien wat werkt. De omgeving speelt hierbij niet meer dan de rol van selector (*selectionisme*), die slechte regels elimineert of bestraft maar die er niet bij vertelt wat de goede regels dan wel zijn. Het systeem krijgt dus geen *instructie* van de omgeving, zoals de leerlingen door hun onderwijzer geïnstrueerd worden, het is zelf verantwoordelijk voor de constructie van zijn kennis (*constructivisme*).

Voorbeeld:

Stel je een simpel organisme voor dat in de oceaan leeft, en dat om te overleven in de juiste temperatuurzone moet blijven door op en neer te bewegen naar warmere, respectievelijk koelere waterlagen. Het systeem onderscheidt drie toestanden of waarnemingen: $W = \{te\ koud, \text{ juist goed}, te\ warm\}$ en is in staat tot drie acties $A = \{naar\ omhoog, naar\ omlaag, stilstand\}$. De kennisstructuur van het organisme bestaat uit een functie of verzameling regels die elk van de elementen van de verzameling W afbeeldt op een element van de verzameling A : $f: A \rightarrow W$. Er zijn $3^3 = 27$ mogelijke combinaties van zulke regels, maar de enige echt fitte is degene die bestaat uit de regels: $te\ warm \rightarrow naar\ omlaag$, $te\ koud \rightarrow naar\ omhoog$, en $juist\ goed \rightarrow stilstand$. Alle andere 26 combinaties (bijvoorbeeld $te\ warm \rightarrow naar\ omhoog$, $te\ koud \rightarrow stilstand$, en $juist\ goed \rightarrow naar\ omlaag$) brengen het organisme vroeg of laat in problemen, zodat het door natuurlijke selectie zal geëlimineerd worden. Er is dus maar 1 kans op 27 dat het organisme door blinde variatie de juiste combinatie vindt.

Bij meer realistische organismen zijn er echter duizenden mogelijke waarnemingen en duizenden mogelijke acties wat het totaal aantal mogelijke combinaties van regels astronomisch groot maakt. In dit geval zal selectie door de omgeving op de blinde variatie van het systeem niet meer voldoende zijn om het juiste model te vinden. Daarom zal het organisme moeten beroep doen op interne selectiecriteria of regels, die reeds een “preselectie” van plausibele regels maken (zie ook 12.4). Deze interne regels spelen de rol van selectoren, die de plaats innemen van de natuurlijke selectie door de omgeving. De evolutionaire epistemoloog Donald T. Campbell

noemt deze *vicarious* (plaatsvervangende of gedelegeerde) *selectors*. Deze interne selectoren zijn echter zelf ontstaan door blinde variatie en selectie. Het ontstaan van zulke selector is een voorbeeld van een metasysteemtransitie, en *vicarious selectors* zullen dan ook in een controlehiërarchie georganiseerd zijn, waarbij de hogere niveaus de onderliggende variëren en selecteren.

Kennis is geen objectieve weerspiegeling van de omgeving, maar een hulpmiddel voor controle. Dit wil zeggen dat kennis een systeem helpt om zijn eigen, subjectieve doelen te bereiken. Kennis selecteert de juiste acties (of regels voor acties) vòòr dat selectie door de omgeving de kans krijgt om het systeem te elimineren. Verschillende systemen met verschillende doelen of verschillende strategieën om zich aan te passen zullen daarom verschillende vormen van kennis hebben, zelfs als ze in dezelfde omgeving leven.

15.3 Ethiek

Moraalfilosofie of ethiek is de tak van de filosofie die zich bezighoudt met de gedragsregels die wij moeten volgen om op een constructieve manier in groep te leven, zonder de anderen te schaden. Zoals we er reeds enkele malen op gealludeerd hebben (2.3, 6.7), biedt de evolutietheorie een diepgaande verklaring waarom zulke regels nodig zijn, en hoe ze ontstaan zijn.

- Evolutie van altruïsme

Er is steeds competitie voor schaarse levensmiddelen. Niet elk individu kan succes hebben, en dus wordt alleen de meest fitte geselecteerd, onafhankelijk van de anderen. Anderen helpen draagt in het algemeen niet bij tot de eigen overleving. Integendeel, het kost energie of moeite, terwijl het in de eerste plaats ten goede komt aan een concurrent, die immers dezelfde levensmiddelen nodig heeft. Daarom zal natuurlijke selectie in eerste instantie zelfzuchtige of egoïstische individuen voortbrengen, die enkel voor hun eigen belang opkomen. Het tegendeel van *egoïsme* is *altruïsme*, dit wil zeggen gedrag dat anderen ten goede komt, maar niet zichzelf. Bijvoorbeeld, in het water springen om iemand te redden die verdrinkt. Het probleem dat zich dan stelt is hoe altruïsme, dat ontegensprekelijk bestaat bij mens en dier, toch kan geëvolueerd zijn.

Een voor de hand liggende oplossing is *groepsselectie*: een groep waarin men elkaar helpt, zal in zijn geheel beter overleven. Voorbeeld: wolven die samenwerken kunnen veel grotere prooien (bijvoorbeeld elanden) doden, dan wanneer ze alleen zouden jagen. Om die reden komt altruïsme binnen de groep ten goede aan elk van zijn leden. Daarom zal er een selectie zijn van groepen met altruïsten ten koste van groepen met enkel egoïsten.

Er is echter een fundamenteel probleem met dit mechanisme: egoïsten binnen een altruïstische groep hebben meer voordeel bij altruïsme dan de altruïsten zelf. Zij

laten de anderen het vuile werk opknappen; ze dragen niet bij tot de kosten, maar plukken er wel de vruchten van. Bijvoorbeeld, wie niet betaalt op de metro profiteert van de bijdragen van anderen om het systeem in stand te houden. Daarom zullen binnen de altruïstische groep de egoïsten het meest fit zijn. Op die manier zal de neiging tot altruïstisch gedrag op lange termijn weggeselecteerd worden.

Hoe kan altruïsme, samenwerking, of moraal dan toch evolueren? Sociobiologen hebben twee fundamentele oplossingen voor dit probleem voorgesteld:

- “*Kin selection*”: selectie op basis van verwantschap. Hulp aan familieleden (in het bijzonder nakomelingen) komt de eigen genen ten goede. Daarom zal een gen voor “nepotisme” (bevoordelen van familie) geselecteerd worden. Dit verklaart onder andere de zorg van ouders voor kinderen, en de solidariteit tussen broers en/of zusters, maar ook de zeer complexe samenwerking in insectenkolonies. Alle bijen, mieren, enz. in de kolonie stammen immers af van één “koningin”, zodat iedereen er familie van iedereen is.
- *Wederzijds (reciprook) altruïsme*: de “tit-for-tat” strategie (zie 6.7): ik help jou als jij mij later ook helpt. Dit verklaart onder andere de solidariteit tussen vampiervleermuizen (zie 2.3). Om dit te laten slagen moet men echter vertrouwen hebben in de andere en dit vereist ervaring met de persoon. Dit is echter moeilijk in grote groepen waar men weinig mensen kent. Bijvoorbeeld, een winkelier kan een toerist gemakkelijk bedriegen, gezien deze waarschijnlijk toch niet terugkomt naar dezelfde winkel.

Deze mechanismen zijn echter nog niet voldoende als verklaring voor de zeer gesofisticeerde en uitgebreide solidariteit en samenwerking in onze maatschappij. Daarom zullen we de evolutie van moraal niet alleen als biologisch maar ook als cultureel verschijnsel moeten bestuderen.

- Culturele evolutie van moraal

Niet alleen de genen, ook de memen (ideeën, normen, tradities...) zijn aan evolutie onderhevig. Dit leidt in het algemeen tot *conformistische* verspreiding binnen een groep. Als iemand een goed idee heeft, is het voordelig dat te kopiëren (cfr. 6.8). Wederzijds altruïsme is een goed idee. Daarom zal het meer en meer nagebootst worden. Hoe meer mensen iets doen, hoe meer dat gedrag geïmiteerd wordt. Tenslotte zal *iedereen* in de groep het gedrag vertonen (conformisme), en niemand zal zich aan die conformistische druk kunnen onttrekken. Als gevolg worden individuele egoïsten buiten spel gezet, zodat ze niet meer kunnen profiteren van de inspanning van de anderen.

Dit leidt nu tot culturele groepsselectie. Als iedereen (wederzijds) altruïstisch is, dan kan men de reciprociteit vergeten. Het idee dat overblijft is altruïsme tegenover *iedereen binnen de groep*. Verschillende groepen met verschillende vormen van onderlinge hulp en solidariteit komen echter met elkaar in competitie. Die met het beste systeem van samenwerking zullen meest succesvol zijn. Het gevolg is dat hun

systeem zal overgenomen worden door de minder succesvolle groepen. Tenslotte zal iedereen een gelijkaardige moraal hanteren

Het moet opgemerkt worden dat niet alle regels van zulke geëvolueerde moraal effectief voordelig zullen zijn. Natuurlijke selectie elimineert alleen “slechte” ideeën, zoals mensenoffers, die de fitness van de groep omlaag halen. Neutrale of weinig terzake doende ideeën blijven in het algemeen bestaan. Ideeën die “toevallig” goed werkten, zullen door de conformistische druk blijvend nagevolgd worden: bijvoorbeeld niet eten van varkensvlees (Islam) of rundvlees (Hindoeïsme). Deze evolutie leidt in het algemeen tot ingewikkelde systemen van goden, precepten en tradities in verschillende culturen. Bovendien zijn ideeën die goed werkten in het verleden niet noodzakelijk nog van toepassing in het heden. De omgeving is immers veranderd. Het mechanisme van conformisme is conservatief: het is zeer moeilijk een nieuw idee te lanceren dat ingaat tegen de gevestigde ideeën. Om die redenen kan men een moraal niet grondvesten enkel op traditie, hoewel traditie een nuttig uitgangspunt biedt, gezien de traditionele regels een langdurige selectie hebben ondergaan die de niet werkende regels heeft geëlimineerd.

- **Het probleem van de moraal**

Het probleem blijft hoe we een moraal kunnen grondvesten op een meer wetenschappelijke basis. Hoe kunnen we de fitness van de componenten (individueen) en het geheel (groep, maatschappij, ecosysteem) optimaal op elkaar afstellen? Dit probleem is niet triviaal, want wat best is voor een subsysteem, is niet noodzakelijk best voor het systeem in zijn geheel, dat immers emergente eigenschappen heeft. Voor mij persoonlijk is het bijvoorbeeld beter om geen filter op de uitlaat van mijn auto te installeren, want dit brengt bijkomende kosten mee zonder noemenswaardig voordeel voor mezelf. Voor de wereld in zijn geheel is het echter beter dat alle uitlaatgassen gefilterd worden zodat pollutie wordt gereduceerd.

Men heeft een diepgaande evolutionair-systemische analyse nodig om de waarden van het individu of een subgroep zo goed mogelijk te verzoenen met die van de maatschappij in haar geheel. Zulke analyse zal ons hopelijk toelaten een moraal te ontwerpen die niet alleen zo veel mogelijk mensen ten goede komt, maar die ook gemakkelijk in de praktijk waar te maken is, zonder te veel hardhandige controlemaatregelen, zoals politie, rechtbanken en gevangenisstraffen om de overtreeders te bestraffen.

15.4 Antwoorden op de fundamentele vragen

Laat ons dit boek besluiten door het ESW samen te vatten in de vorm van antwoorden op de grote levensvragen die elk wereldbeeld zou moeten adresseren (1.1). De antwoorden hier zijn noodzakelijk kort en vereenvoudigd, maar samen

met de voorgaande begrippen en principes bieden zij hopelijk een aanvaardbaar beeld van onze plaats in de kosmos.

- Waarom is de wereld zoals hij is?

De huidige toestand van het universum is gedeeltelijk het resultaat van toeval (want variatie is intrinsiek onvoorspelbaar), gedeeltelijk van rationeel begrijpbare wetmatigheden (want het concept “fitness” en zijn afgeleiden, zoals sluiting, laat ons toe in zekere mate te voorspellen welke variaties geselecteerd zullen worden).

- Waar komt de wereld rondom ons vandaan?

Evolutionaire principes en concrete waarnemingen laten ons toe te reconstrueren hoe alle fundamentele systemen één na één uit elkaar geëvolueerd zijn: Big Bang, elementaire deeltjes, atomen, moleculen, sterren, planeten, cellen, meercelligen, dieren, mensen, ...

- Waar komen wij vandaan?

Mensen evolueerden uit dieren die het vermogen hadden te leren, door daarbovenop een metasysteemtransitie te ondergaan naar het niveau van denken. Alle details van deze transitie zijn nog niet bekend, maar ze heeft waarschijnlijk te maken met het beginnen gebruiken van een taal met grammatica door chimpanseeachtige protomensen. Chimpansees en hun verwanten (bonobo's, gorilla's) vertonen zeer grote gelijkenis met mensen in fundamentele biologische, sociale en zelfs mentale aspecten, tot het gebruik van werktuigen, een primitieve taal, en cultuur toe. Één of meerdere toevallige factoren (bijvoorbeeld een klimaatverandering die het oerwoud tot een savanne omvormde) hebben waarschijnlijk kleine veranderingen in levenswijze teweeggebracht (bijvoorbeeld rechtop lopen waardoor de handen vrij kwamen om beter werktuigen te gebruiken), die de evolutie van taal en cultuur plots hebben doen versnellen. De meer complexe taal en cultuur hebben geleid tot selectie voor hogere intelligentie (en dus grotere hersenen) in individuen. De toenemende intelligentie heeft op zijn beurt het verder complexifiëren van taal en cultuur gestimuleerd. Aldus hebben evolutie van cultuur en evolutie van hersenen elkaar versneld, in een positieve feedbacklus.

- Wie zijn wij?

Mensen vormen het voorlopig hoogste metaniveau. Dit geeft hen een ongehoorde macht en inzicht ten opzichte van andere organismen, en unieke eigenschappen zoals verbeelding, creativiteit, abstract denken, zelfbewustzijn, enz. Zij dragen in zich echter nog tal van de beperkingen die zij hebben overgeërfd van hun voorouders, zoals agressiviteit, gebrekkig redeneervermogen, jaloezie, chronische stressreacties, enz. Deze reacties waren misschien aangepast aan de omgeving van

onze voorouders, maar zijn in onze huidige omgeving eerder contraproductief. Een beter begrip van de evolutie zal ons toelaten ons meer bewust te worden van deze beperkingen, en er aldus beter mee te leren omgaan.

- Waar gaan wij naartoe?

De steeds snellere evolutie van wetenschap, technologie en cultuur lijkt een nieuwe metasysteemtransitie aan te kondigen. Deze zal leiden tot een systeem met alsnog onvoorstelbare capaciteiten tot adaptatie, creativiteit, denken, bewustzijn en actie. Wellicht de beste metafoor hiervoor is het “wereldwijde brein”, het denkend systeem dat ontstaat door de integratie via een intelligent computernetwerk van alle individuen op deze planeet.

- Wie ben ik?

Elk individu is een unieke combinatie van genen (behalve voor identieke tweelingen) en ervaringen. Hoewel de variëteit van het aantal mogelijke menselijke individuen oneindig groot is, is deze toch niet onbeperkt: er zijn wel degelijk vormen die “onleefbaar” of “onmenselijk” zijn. Dit betekent dat de variatie tussen mensen aan bepaalde dwangen voldoet, en dat het mogelijk wordt een oneindige “toestandsruimte” van mogelijke persoonlijkheidsvormen te definiëren, waar iedereen zijn eigen unieke kenmerken in kan terugvinden.

Psychologen hebben door grootschalige statistische analyse reeds een ruimte met 5 fundamentele persoonlijkheidsdimensies bepaald, de “big five”. Deze zijn: introvertie-extravertie, emotionaliteit-stabiliteit, openheid-conservatisme, behulpzaamheid-egoïsme, en gewetensvolheid-impulsiviteit. Elk heeft een evolutionaire betekenis die niet op zich goed of slecht is, maar waarvan de fitness afhangt van de omgeving (bijvoorbeeld “open” persoonlijkheden zullen meer nieuwe ervaringen proberen op te doen, maar daardoor ook meer risico lopen in gevaarlijke omgevingen; behulpzame karakters zullen beter passen in een altruïstische groep, maar uitgebuit worden in een egoïstische groep).

- Waar ga ik naartoe?

Elk individu zal vroeg of laat zijn eigen “niche” vinden, passend bij zijn unieke persoonlijkheid. Dit wil zeggen dat een persoon gedurende zijn ontwikkeling door trial-and-error verschillende keuzen zal maken, zoals studierichting, woonplaats, partner, vriendenkring, beroep ..., tot een situatie wordt bereikt waarin hij of zij zich goed voelt. Psychologisch onderzoek heeft aangetoond dat de uiteindelijke niche toch voor een aanzienlijk deel afhangt van de genetische achtergrond: identieke tweelingen die bij de geboorte gescheiden werden en dus verschillend opgevoed, blijken naarmate ze ouder worden toch meer en meer op elkaar te lijken wat betreft levenskeuzen, en onafhankelijk van elkaar dikwijls in hetzelfde beroep terecht te

komen (bijvoorbeeld secretaresse of brandweerman). Hoe beter men zijn eigen persoonlijkheid leert kennen, hoe gemakkelijker men een gepaste niche zal vinden en zich optimaal daarin verder zal kunnen ontplooien. Zo zal een introvert-stabiel-conservatief-gewetensvol karakter wellicht gelukkig zijn als boekhouder, terwijl een extravert-emotioneel-open-impulsief karakter eerder carrière zal maken als rockzanger of acteur, en een introvert-emotioneel-open-gewetensvol karakter als kunstschilder of dichter.

- Is er een ultiem doel?

Neen, evolutie streeft niet naar een welbepaald eindpunt (het punt “Omega” gepostuleerd door de evolutionaire theoloog Teilhard de Chardin), en zal nooit beëindigd zijn. Hoewel evolutie doelgerichte systemen voortbrengt, is ze zelf niet doelgericht. Evolutie blijft intrinsiek onvoorspelbaar. Toch is deze evolutie niet willekeurig, maar heeft een “voorkeursrichting”: toename van de fitness.

- Bestaat er een God of hogere macht?

In de evolutionaire visie is een verklaring teruggaand tot één of andere Schepper die het universum bestuurt niet alleen overbodig, maar eerder misleidend dan verhelderend. Wie dat wenst, kan echter het proces van de evolutie zelf, of het universum dat hierdoor werd voortgebracht, als “goddelijk” beschouwen, in de geest van het pantheïsme. In die zin kan men religieuze gevoelens hebben (verbondenheid met het geheel, ontzag tegenover de onvoorstelbare complexiteit van het universum, aantrekking tot het mysterie van alles wat nog niet verklaard is, vertrouwen in het vermogen van evolutie om steeds weer uit probleemsituaties te geraken) zonder in een persoonlijke God te geloven. De filosoof Leo Apostel noemde dergelijke houding “atheïstische religiositeit of spiritualiteit”.

- Wat zijn goed en kwaad?

Er bestaat geen absoluut goed of absoluut kwaad: wat goed is in bepaalde omstandigheden (bijvoorbeeld sex met zijn lief), kan kwaad zijn in andere (bijvoorbeeld sex met een onbekende zonder voorzorgsmaatregelen tegen AIDS). Er zijn geen absolute wetten, noch natuurlijke, noch goddelijke, waaruit men absolute waarden kan afleiden. Tenslotte is het de mens zelf die in elke specifieke situatie een specifieke keuze moet maken.

Er zijn echter wel evolutionaire *waarden* die ons een leidraad kunnen bieden bij deze beslissingen. Keuzen zijn dus niet puur subjectief of willekeurig. Uit de basiswaarde van fitness kunnen enkele algemene waarden afgeleid worden:

- stabiliteit, evenwicht, robuustheid, duurzaamheid
- variatie, innovatie, exploratie, experimentatie

- diversiteit, verscheidenheid
- autonomie, zelforganisatie
- adaptatie, inpassing in het grotere geheel
- vermogen tot (re)productie
- efficiënt gebruik van grondstoffen en energie

Specifiek voor doelgerichte systemen, en dus ook menselijke individuen en maatschappijen, kunnen we nog een aantal bijkomende waarden vermelden:

- inzicht in eigen doelen of voorkeuren
- controle, beheersing van de eigen situatie
- reserves, buffers
- sensitiviteit, waarnemingsvermogen
- kennis, intelligentie
- kracht, energie, vermogen tot actie

- Wat is waar en wat is onwaar?

Er zijn geen *absolute* waarheden. De “waarheid” van een theorie of model is niet meer dan haar vermogen om voorspellingen te produceren die in de praktijk uitkomen. Twee verschillende theorieën kunnen echter gelijkaardige voorspellingen maken zonder dat de ene waar is en de andere vals. Deze theorieën kunnen vergeleken worden met twee systemen die zich op een verschillende manier aan dezelfde werkelijkheid hebben aangepast. Beide zijn even fit, toch zijn ze heel anders georganiseerd.

Waarheid is echter niet enkel relatief, subjectief of cultuurafhankelijk. Er is wel degelijk een verschil tussen een theorie die betrouwbare voorspellingen maakt (bijvoorbeeld astronomie) en een theorie die dat niet doet (bijvoorbeeld astrologie). Van twee systemen die voor dezelfde niche concurreren zal de ene in het algemeen fitter zijn dan de andere, en er zijn wel degelijk objectieve verschillen, voor- of nadelen. Deze maken het mogelijk om de slechte theorieën te elimineren (“falsifiëren”).

- Waarom gaan wij dood?

Biologische fitness wordt bereikt door een combinatie van overleving en voortplanting. Elk levend systeem heeft een eindige hoeveelheid energie te investeren in fitness. Wat gebruikt wordt voor het ene (bijvoorbeeld voortplanting) is niet langer beschikbaar voor het andere (bijvoorbeeld overleving) (zie 11.3). Er moet dus een compromis gemaakt worden. Gezien het onmogelijk is om overleving in alle omstandigheden te garanderen (vanwege bijvoorbeeld ongelukken, ziektes,

roofdieren...) moet er voldoende geïnvesteerd worden in voortplanting om het onvermijdelijke verlies aan levens te compenseren. Daarom zal ons organisme niet maximaal investeren in overleving op lange termijn. Dit resulteert in veroudering of aftakeling eens de vruchtbare periode van voortplanting voorbij is. Deze evolutionaire verklaring van de veroudering heet de theorie van de “disposable soma” (wegwerplichaam): het belangrijkste is dat onze genen voortleven in onze nakomelingen, ons individuele organisme (“soma”) is bijkomstig, en kan opgeofferd worden.

- Hoe kunnen wij gelukkig zijn?

Geluk, dit wil zeggen positieve gevoelens of subjectief welzijn, is het biologisch geëvolueerde signaal dat alles goed gaat, dat het organisme zo mag verder doen. Dit wil zeggen dat het organisme fit is, en in staat alle praktisch voorzienbare problemen het hoofd te bieden. Met andere woorden dat het organisme controle heeft over zijn situatie en het zijn doelen kan bereiken. Het is niet zozeer de externe, objectieve situatie die geluk produceert, maar de perceptie of het gevoel dat men de situatie beheerst, dat er geen onoverkomelijke problemen zijn of zullen opduiken. Dit verklaart waarom zoveel mensen die schijnbaar alles hebben om gelukkig te zijn toch depressief worden of zelfmoord plegen.

Geluk op lange termijn vereist echter een aantal objectieve basisvoorwaarden: *gezondheid*, *kennis*, *sociale participatie* (persoonlijke relaties, aanvaard worden binnen een groep), *vrijheid* (zijn eigen keuzen kunnen maken), *gelijkheid* (niet gediscrimineerd worden), *welvaart*, en *veiligheid* (laag risico op ongelukken, misdaad, oorlog,...). De bijdrage van deze factoren tot geluk is aangetoond door empirisch onderzoek (Veenhoven's “world database of happiness”).

Deze voorwaarden kunnen echter ook theoretisch afgeleid worden uit de algemene evolutionair-systemische waarden hierboven, en de specifieke kenmerken van de mens als in groep levend dier. Gezondheid duidt bijvoorbeeld op interne fitness, veiligheid op de afwezigheid van te sterke perturbaties, en welvaart op de aanwezigheid van alle benodigde grondstoffen. Vrijheid en gelijkheid van hun kant wijzen op de afwezigheid van onderdrukking door dominante individuen of subgroepen, en participatie op coöperatie en ondersteuning door anderen.

- Wat is de zin van het leven?

“Moeder, waarom leven wij?” De essentie van het ESW kan worden samengevat in één frase: *de zin van het leven is het streven naar fitness*. Alle systemen hebben fitness als impliciet doel. In de praktijk weten we daarmee echter nog niet wat de beste manier is om fitness te vergroten voor een gegeven systeem. Fitness zelf is een zeer abstract, complex en multidimensioneel concept. Er zijn zeer veel, onderling verschillende manieren om fitness te verhogen. Iedereen moet dus nog

steeds zijn eigen keuzen maken, afhankelijk van zijn of haar specifieke situatie, maar het ESW biedt hierbij ongetwijfeld een leidraad.

Literatuur

Werken voor een breed publiek

De volgende publicaties zijn bedoeld voor een niet academisch publiek, maar zijn grotendeels door wetenschappers zelf geschreven (met uitzondering van de journalisten Gleick, Waldrop en Kelly), wat garant staat voor een correcte en diepgaande behandeling van de onderwerpen. Het aantal sterretjes (*) duidt aan hoe aanbevelenswaardig of relevant het boek is voor lezers van dit boek. Wanneer ik weet heb van een vertaling (er zijn er wellicht meer dan hier vermeld), heb ik de titel hiervan /na/ de oorspronkelijke titel vermeld. Publicaties met een webadres <<http://...>> zijn (gratis) op dat adres te downloaden.

Aerts, D., Apostel L., De Moor B., Hellemans S., Maex E., Van Belle *, Van Der Veken J. (1994): Wereldbeelden: van fragmentatie tot integratie / Worldviews: From Fragmentation to Integration, (VUB Press, Brussel). <http://pcp.vub.ac.be/books/Worldviews.html> **

een korte inleiding tot het concept wereldbeeld en zijn belang, met een reeks voorstellen voor verder onderzoek, onder andere rond het ESW

Casti J.L. Complexification: explaining a paradoxical world through the science of surprise, HarperCollins, 1994.

populariserende introductie tot een aantal voornamelijk wiskundige concepten en observaties die van belang zijn voor het ESW, zoals chaos, cellulaire automaten en catastrofes

Cziko G. Without Miracles: Universal Selection Theory and the Second Darwinian Revolution (MIT Press). <http://faculty.ed.uiuc.edu/g-cziko/wm/> **

variatie en selectie als universeel verklaringsmodel, toegepast onder andere op biologische evolutie, het immuunsysteem, de kennis, en controle

Davies, Paul: The Cosmic Blueprint: New Discoveries in Nature's Creative Ability to Order the Universe, 1988 Simon & Schuster / Blauwdruk van de kosmos, Uitgeverij Contact, Amsterdam. ***

een uitstekend en goed begrijpbaar overzicht van fundamentele inzichten en verschijnselen rond zelforganisatie, echter met de onlogische conclusie dat er misschien toch een “plan” bestaat dat de evolutie in de goede richting stuurt

Dawkins R. The Blind Watchmaker, Longman, London, 1986 / De Blinde horlogemaker (Uitgeverij Contact, Amsterdam) ***

een zeer goed geschreven argumentatie met tal van biologische voorbeelden over de kracht van de traditionele, Darwinistische evolutietheorie als verklaring voor biologische organisatie

Dawkins R. The selfish gene (2nd edition), Oxford University Press, Oxford, 1989 / Onze zelfzuchtige genen. Over evolutie, agressie en eigenbelang. Amsterdam: Contact. ***

een fascinerend betoog, zij het wat reductionistisch, over hoe de evolutie van “replicatoren” (genen of memen) dierlijk en menselijk gedrag stuurt; zowat het spannendste wetenschappelijke boek dat er te vinden is.

de Duve, Christian: Vital Dust: life as a cosmic imperative, BasicBooks, 1995. *

een Belgische Nobelprijs fysiologie brengt een gedetailleerde geschiedenis van ontstaan en evolutie van het leven met focus op de toename van de complexiteit, zij het zonder veel

referentie naar het ESW begrippenkader (zie ook de meer technische boeken van Maynard Smith & Szathmary)

de Rosnay, Joël: *Le Macroscopie / The Macroscopie: a new scientific world view*, Harper & Row, New York, 1979. <http://pespmc1.vub.ac.be/MACRBOOK.html> ***

een vlot leesbare, brede, en gedegen introductie tot het ESW, met toepassingen op het ecosysteem en de economie van de wereld in zijn geheel

de Rosnay, Joël : *L'Homme Symbiotique. Regards sur le troisième millénaire* (Seuil, Paris, 1996) / *The Symbiotic Man: A New Understanding of the Organization of Life and a Vision of the Future* / *De symbiotische mens. Visie op het derde millennium*, Addison Wesley Longman Nederland **

toepassing van het ESW om de huidige en toekomstige ontwikkeling van technologie en maatschappij beter te begrijpen

Gell-Mann, M., *The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex*, W.*. Freeman, San Francisco, 1994. / *De quark en de jaguar: avonturen in eenvoud en complexiteit*, Uitgeverij Contact, Amsterdam/Antwerpen.

een Nobelprijswinnaar fysica en medestichter van het Santa Fe instituut beschrijft zijn intellectuele ontwikkeling, en legt tussendoor een aantal ESW kernbegrippen uit

Gleick, J. 1987. *Chaos: Making of a New Science*, Penguin Books, New York. / *Chaos, de derde wetenschappelijke revolutie*, Uitgeverij Contact, Amsterdam.

biografisch verhaal over hoe een aantal wetenschappers mee de chaostheorie ontwikkeld hebben, helaas met weinig uitleg over de ideeën zelf

Heylighen F., Joslyn C. & Turchin V. (eds.) (1993-2004): "Principia Cybernetica Web" (<http://pcp.vub.ac.be/>). ***

veruit de belangrijkste website over het ESW met een schat aan informatie, maar een tamelijk complexe structuur

Kauffman S. A. *At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-Organization and Complexity*, Oxford University Press, Oxford, 1995. *

gepopulariseerde versie van Kauffman's belangrijke inzichten en CAS simulaties rond de oorsprong en evolutie van het leven, maar ietwat tegenvallend in stijl en organisatie

Kelly, Kevin: *Out of Control: The New Biology of Machines, Social Systems and the Economic World* (Perseus Press, 1995) <http://www.kk.org/outofcontrol/contents.html> ***

zeer leuke introductie tot de ideeën, geschiedenis en toekomstige ontwikkeling van het ESW, vol interessante anecdotes, en met de nadruk op toepassingen in de informatietechnologie en netwerkeconomie

Laszlo, Ervin: *The Systems View of the World: The Natural Philosophy of the New Developments in the Sciences* (1995 George Braziller) *

een korte, filosofische introductie tot de systeembenadering

Maturana H. R., & Varela F. J. *The Tree of Knowledge: The Biological Roots of Understanding*, (rev. ed.), Shambhala, Boston, 1992. / *De boom der kennis*, Uitgeverij Contact, Amsterdam

gepopulariseerde versie van de belangrijke maar moeilijke theorie van de autopoiese en haar implicaties voor kennistheorie

Prigogine, I. and Stengers, I. *La Nouvelle Alliance / Order Out of Chaos*, Bantam Books, New York, 1984 / *Orde uit chaos*, Uitgeverij Bert Bakker, Amsterdam **

wetenschappelijke en filosofische implicaties van Prigogine's inzichten over zelforganisatie, en in het bijzonder hoe deze het Newtoniaans wereldbeeld op losse schroeven zetten

Simon, *. A. *The Sciences of the Artificial* (3rd. edition) MIT Press, Cambridge MA, 1996.**

probleemoplossing door heuristische trial-and-error als universeel mechanisme om zich aan een complexe omgeving aan te passen, met toepassingen in psychologie, informatica, economie, organisaties en de evolutie van complexiteit

Stewart, John E. *Evolution's Arrow: The direction of evolution and the future of humanity* (Chapman Press, Australia, 2000): <http://www4.tpg.com.au/users/jes999/> **

een diepgaande argumentatie dat de evolutie leidt naar cooperatieve systemen van steeds grotere schaal en met steeds groter aanpassingsvermogen

Turchin, Valentin: *The Phenomenon of Science. A cybernetic approach to human evolution 1977* (Columbia University Press, New York). <http://pcp.vub.ac.be/POSBOOK.html> **

introdutie van en tot de theorie van de metasysteemtransities, met toepassingen vooral in de historische ontwikkeling van de wetenschappelijke kennis

Waldrop M. M. *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*, Simon & Schuster, New York, 1992/ Complexiteit. **

hoe de wetenschappers die aan de basis lagen van de CAS benadering en het Santa Fe instituut tot hun belangrijkste inzichten zijn gekomen

Wright, Robert. *Non-Zero. The Logic of Human Destiny* (Pantheon Books, 2000) **

een zeer goed geschreven boek dat enkele basisideeën van het ESW (vergelijkbaar met die van Stewart) toepast om de (pre)historische ontwikkeling van de beschaving (en in mindere mate van biologische organisatie) te verklaren

Meer technische werken

De volgende publicaties richten zich tot een meer beperkt publiek, maar vereisen in het algemeen nog niet te veel gespecialiseerde kennis.

Anderson P. W., K. J. Arrow, and D. Pines (Eds.). *The Economy as an Evolving Complex System*, Addison-Wesley, Redwood City CA, 1988.

Arthur, W. B.: Positive Feedbacks in the Economy, *Scientific American*, February 1990, pp. 92-99.

Ashby W. R. *An Introduction to Cybernetics*, Methuen, London, 1964. *** <http://pcp.vub.ac.be/ASHBBOOK.html>

Ashby, W. R. *Design for a Brain - The Origin of Adaptive Behaviour*. Chapman and Hall, London, 1960.

Axelrod R. M. *The Evolution of Cooperation*, Basic Books, New York, 1984. **

Bak P. and Chen K.: Self-Organized Criticality, *Scientific American*: January 1991, pp. 46-53.

Bak P., *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*, Springer, Berlin, 1996.

Bateson, Gregory: (1972) *Steps to an Ecology of Mind*, Ballantine, New York **

Bennett C. *. Dissipation, Information, Computational Complexity and the Definition of Organization. *Emerging Syntheses in Science*, Pines D. (ed.), Addison-Wesley, Redwood City CA, 1985, pp. 215-233. *

Boulding, Ken: (1956) "General Systems Theory - The Skeleton of Science", *General Systems Yearbook*, v. 1, pp. 11-17 **

Campbell, D. T. "Downward Causation" in *Hierarchically Organized Biological Systems*. *Studies in the Philosophy of Biology*, F.J. Ayala and T. Dobzhansky (eds), Macmillan, New York, 1974. *

Campbell, D. T. *Evolutionary epistemology*. in: *Evolutionary epistemology, rationality, and the sociology of knowledge*, G. Radnitzky and W. W. Bartley (eds.), Open Court, La Salle IL, 1987, pp. 47-89. **

- Checkland, Peter: (1981) *Systems Thinking, Systems Practice*, Wiley, New York *
- Crutchfield, J., Farmer, J.D., Packard, N., and Shaw, R.: *Chaos*, Scientific American, 255 (6): December 1986, pp. 46-57.
- Darwin C. *The origin of species by means of natural selection or the preservation of favoured races in the struggle for life*. (Edited with and introduction by J. W. Burrow). Penguin classics, 1985. (First published by John Murray, 1859) **
- Dennett D. (1996) *Darwin's dangerous idea: Evolution and the Meanings of Life / Darwins gevaarlijke idee* (new edition, Penguin Books). **
- Eigen M. and P. Schuster. *The Hypercycle: A principle of natural self-organization*, Springer, Berlin, 1979
- Eigen M., and R. Winkler-Oswatitsch. *Steps Toward Life: a perspective on evolution*. Oxford University Press, New York, 1992.
- Flood, Robert, and Ewart Carson. (1993). *Dealing with Complexity: An Introduction to the Theory and Application of Systems Science*. New York: Plenum. *
- Haken *. *Synergetics: an introduction*, Springer, Berlin, 1978. **
- Heylighen F. & Joslyn C. (2001): "Cybernetics and Second Order Cybernetics", in: R.A. Meyers (ed.), *Encyclopedia of Physical Science & Technology* (3rd ed.), Vol. 4 , (Academic Press, New York), p. 155-170. **
- Heylighen F. (1997): "Publications on Complex, Evolving Systems: a citation-based survey", *Complexity* 2 (5), p. 31-36. *
- Heylighen F. (1999): "The Science of Self-organization and Adaptivity", in: *The Encyclopedia of Life Support Systems* (EOLSS Publishers Co. Ltd) [in press]**
- Heylighen F. (2000): "Evolutionary Transitions: how do levels of complexity emerge?", *Complexity* 6 (1), p. 53-57
- Heylighen F. (2000): "Foundations and Methodology for an Evolutionary World View: a review of the Principia Cybernetica Project", *Foundations of Science*, 5, p. 457-490. **
- Heylighen F., Bollen J. & Riegler A. (eds.) (1999): *The Evolution of Complexity* (Kluwer Academic, Dordrecht). **
- Holland J.H. *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*, Addison-Wesley 1996. **
- Jantsch, E., *The Self-Organizing Universe: Scientific and Human Implications of the Emerging Paradigm of Evolution*, Oxford, Pergamon Press, 1979.*
- Kauffman S. A. *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, New York, 1993 *
- Kauffman S. A. *Antichaos and Adaptation*, Scientific American: August 1991, pp. 78-84 **
- Klir, George: (1992) *Facets of Systems Science*, Plenum, New York **
- Langton, C. G. (ed.), *Artificial Life: An Overview*, MIT Press, Cambridge, MA, 1995.
- Laszlo, Ervin: *Evolution, the Grand Synthesis* 1987) Shambhala *
- een holistische theorie van de evolutie op alle niveaus, fysisch, biologisch, mentaal
- Maynard Smith J. & Szathmáry E. (1995): *The Major Transitions in Evolution*, (W.*. Freeman, Oxford)
- Maynard Smith, John and Eörs Szathmáry (1999): *The Origins of Life: From the Birth of Life to the Origin of Language* (Oxford University Press). **
- Monod, J. *Le hasard et la nécessité / Chance and Necessity*, Collins, London, 1972.
- Morin, Edgar (1977) *La méthode: I. La nature de la nature* (Editions du Seuil).*
- Morin, Edgar "Introduction à la pensée complexe". ESF Editeur, Coll. Communication et complexité, Paris, 1990.

- Nicolis, G, and Prigogine, I. Self-Organization in Non-Equilibrium Systems, Wiley, New York, 1977.
- Nicolis, G. and I. Prigogine. Exploring Complexity, Freeman, New York, 1989. *
- Pettersson, Max (1996): Complexity and Evolution (Cambridge University Press)
- Prigogine, I. and Stengers, I. Entre le temps et l'éternité / The End of Certainty: Time, Chaos, and the New Laws of Nature / Tussen tijd en eeuwigheid, Uitgeverij Bert Bakker, Amsterdam.
- Prigogine, I. From Being to Becoming: Time and complexity in the physical sciences, Freeman, San Francisco, 1980.
- Shannon, C. E., and W. Weaver. The Mathematical Theory of Communication (5th ed.). University of Illinois Press, Chicago, 1963.
- Veld, J. in 't (1998). Analyse van organisatieproblemen: Een toepassing van denken in systemen en processen. Leiden: Stenfert Kroese. *
- von Bertalanffy L. General Systems Theory (Revised Edition), George Braziller, New York, 1973. ***
- von Foerster H. Cybernetics of Cybernetics (2nd edition). Future Systems, Minneapolis, 1996. **
- von Foerster H. Observing Systems: Selected papers of Heinz von Foerster. Intersystems, Seaside, CA, 1981. *
- von Foerster H. On self-organising systems and their environments. in: Self-Organising Systems, M.C. Yovits and S. Cameron (Eds.), Pergamon Press, London, 1960, pp. 30-50. **
- Weinberg, Gerald M.: (1975) An Introduction to General Systems Thinking, Wiley, New York **
- Wiener N. Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and Machine, M.I.T. Press, New York, 1961. *
- Wolfram S. Cellular Automata and Complexity: Collected Papers, Addison-Wesley, Reading MA, 1994.

Index

De definities van de kernbegrippen van het boek (aangeduid in **vetjes** in de text) kunnen snel teruggevonden via de volgende alfabetische index.

- aanpassingsvermogen, 139
- actie, 35
- acties, 33, 148
- agent, 42
- aggregaat, 131
- anticipeert, 39
- asymmetrisch, 96
- baan, 5, 74
- bénard rollen, 17
- bijna decomposeerbaar, 136
- binding, 130
- bit, 77, 84
- blind, 118
- blinde, 99
- buffering, 38, 148
- chaos, 21
- circulair, 27
- compensatie, 33
- complex adaptief systeem, 43
- complexe adaptieve systemen, 42
- complexificatie, 137
- complexiteit, 61
- conditie-actieregel:, 40
- connectie, 55, 58
- connecties, 61
- controle, 33, 139
- determinisme, 4
- differentiatie, 63
- differentieert, 137
- dissipatie, 83
- dissipatieve structuren, 16
- dissipatieve structuur, 22
- distinctie, 54
- distinctieconservatie., 87
- distinctiecreatie., 88
- distinctiedestructie, 88
- distincties 61
- doel, 30, 34, 147, 148
- dwang, 78
- dwang,, 131
- eigenschappen, 67
- emergente, 136
- emergentie, 24
- entropie, 80, 91
- epistemologie, 151
- evolutionair-systemisch, 2
- evolutionair-systemische wereldbeeld, 150
- feedback, 31, 35, 39
- feedforward, 39

fit, 110	negatieve feedback, 32, 147
fitness, 11, 109	newtoniaans, 3
fitnesslandschap, 116	niche, 115
functie, 30	niet-lineair., 20
gesloten, 21, 26	object, 66
globaal maximum, 118	ontologie, 53, 150
grens., 27	onzekerheid, 80
hiërarchie, 29, 134	open, 26
holisme, 24	orde, 57
identiteit van de ononderscheidbaren, 56	organisatie, 63
informatie, 83	output, 27
input.	overleving, 111
output, 27	palradeffect, 97
integratie, 63	parallel, 27
integreert, 137	perturbaties, 33, 35
irreversibel, 91	positief, 35
kennis, 35, 40, 140, 148	positieve feedback, 31
kennis:, 34	reductionisme, 4
leren, 143	reversibiliteit, 5
lineair, 19	selectie, 109
lokaal maximum, 118	sequentieel 27
magnetizatie, 16	spontane generatie, 111
metasysteem., 139	stapsteenprincipe, 102
metasysteemtransitie, 140	structuur, 30
metasystemen, 150	subsystemen., 28
model, 41	supersysteem, 28
natuurlijke selectie, 10	supersysteemtransitie, 129
negatief, 35	supersystemen, 150
	symbiose, 126

systeem, 25, 131
toestand, 4, 68
toestandsruimte, 70, 77
uurwerkuniversum:, 3
variatie, 109
variëteit, 77
voortplanting, 111
waarneming, 34, 35
wanorde, 59
wereldbeeld, 1
zelforganisatie, 16, 127