

Het ontstaan van de Experimentele Methode

INLEIDING

Het is de bedoeling in dit artikel een bijdrage te leveren tot de verheldering van het inzicht in het wezen van wat men het « *experiment* » of, ruimer, de « *experimentele methode* » noemt. De term « wezen » heeft hierbij geen metafysische betekenis : we verwijzen ermee naar datgene wat men de « essentiële kenmerken » van deze methode zou kunnen noemen, m.a.w., deze kenmerken die onmiskenbaar bij het experiment aanwezig zijn, en er niet triviaal bij aanwezig zijn (om aan experiment te doen moet men zekere activiteiten uitvoeren ; dat men hierbij energie verbruikt en zich dus regelmatig moet voeden noem ik een triviaal kenmerk).

Om de niet triviale aspecten van deze methode te ontdekken gebruiken we twee benaderingswijzen : vooreerst wordt in een *historisch onderzoek* (I, II) nagegaan hoe deze nieuwe werkwijzen en inzichten ontdekt werden, en hoe die ontdekking begrijpelijk kan worden gemaakt en vervolgens (III) wordt de *methodologische literatuur* onderzocht om uit te maken vanaf welk ogenblik filosofen en wetenschapsmensen zich van deze kenmerken bewust geworden zijn, en op welke wijze ze dit inzicht geëxpliciteerd hebben. ⁽¹⁾

Hierbij zal wellicht duidelijk worden dat zowel deze ontdekking als haar expliciteering bijzonder moeilijk waren, maar tevens zal aangetoond worden dat deze vondst *begrijpelijk* kan worden gemaakt : de grote genieën, hoe

(1) De studie die hier voorligt sluit aan bij een vorige bijdrage die gepubliceerd werd in : ANAMNHCIC Gedenkboek Prof. Dr. E. A. Leemans, pp. 437-470, nl. : « *Het wetenschappelijk experiment in de Oudheid en de Middeleeuwen* » ; hierin werd, na een analyse van het woordgebruik sinds de Oudheid in de verschillende Europese talen m.b.t. het experiment, een overzicht gebracht van de theoretische visies en de feitelijke praktijk van de Ouden en de Middeleeuwers in verband met deze methode. Met name werd aangetoond dat in deze periodes van een volwaardig experiment nergens sprake kan zijn en tevens werd uitvoerig de stelling van Crombie weerlegd waar deze betoogt dat de moderne wetenschappelijke methode haar oorsprong zou vinden in het werk van Grosse-teste. Voor verdere details betreffende de punten onder « I » behandeld verwijzen we naar deze studie.

belangrijk hun rol ook geweest is, moeten niet als « deus ex machina » geïntroduceerd worden maar als mensen die adequaat konden reageren op de factoren die hen beïnvloedden.

Als eerste omschrijving van het object van deze studie kan een analyse van recente methodologische werken en ook Encyclopedie-artikels enig nut hebben ; resumerend kunnen we hieruit ongeveer de volgende definitie van de notie « experiment » distilleren :

(1) Wat betreft het *uiterlijk voorkomen* is het een menselijke *activiteit* die bestaat in het realiseren van een *situatie* waarvan men zekere voorwaarden onder *controle* heeft (d.i. desgevallend kan wijzigen) en zekere fenomenen *duidelijk* kan *waarnemen*.

(2) De *bedoeling* (die tevens het plan bepaalt) is ofwel, (a) het *testen* van een bepaalde *hypothese*, ofwel (b) het onderzoek van het *verband* tussen ingevoerde en waargenomen *variabelen*, of (c) het *meten* van zekere vaste eigenschappen van een fenomeen (bepalen van constanten).

(3) Als kenmerkende *voordelen* kan men aanhalen : (a) goede *waarnemings-condities* (situatie en tijdstip zijn vooraf bepaald en dus gekend, en meestal heeft men een vermoeden hoe het waargenomen fenomeen zich zal voordoen) ; (b) grote *betrouwbaarheid* en *controleerbaarheid* van de waarnemingen en aanvangssituaties, wegens de herhalingsmogelijkheid door de experimentator en door anderen ; (c) nauwkeurigheid van de *interpretatie* wegens het verband met hypothese enerzijds en de eliminatie van storende factoren anderzijds.

Elk van de aspecten van deze definitie is uiteraard voor kritiek en relativisering vatbaar ; ze wordt in deze studie daarom slechts als eerste oriëntering gebruikt. Onze aandacht gaat immers vooral uit naar een *historisch fenomeen* dat niemand uit de weg kan gaan : *het is een onmiskenbaar feit dat zich in de eerste helft van de 17^e eeuw iets decisiefs voorgedaan heeft in de geschiedenis van de wetenschappen* ; er is een explosie van wetenschappelijk onderzoek ontstaan en een opstapeling van definitieve resultaten, waarbij alle verworvenheden van de eeuwen van onderzoek ervoor als het ware in het niet verzinken. Een « experimentele methode », — hoe ook gedefinieerd — heeft in deze ontwikkeling een duidelijke rol gespeeld. Zeer zeker waren vroeger reeds procedures bekend die men experimenten kan noemen, maar het experiment in de 17^e eeuw is in deze zin iets *fundamenteels nieuws* dat het de hefboom geworden is van een ontwikkeling die zich nog steeds met grotere en grotere snelheid voortzet. Het experiment waarover hier gesproken wordt is precies dit dat de mogelijkheid geboden heeft tot dit *cumulatief proces*. Vooral het cumulatieaspect is dus het criterium om het voorwerp van onderzoek *af te bakenen* (m.a.w. in welke tak van de wetenschap vinden we het eerst experimenten met zulk een karakter ?) ; de verdere eigenschappen van deze nieuwe methode zullen

dan uit het onderzoek zelf moeten voortkomen. Het ligt dus voor de hand welke vragen we ons vooral moeten stellen :

- (a) in welk gebied van de wetenschap is het experiment ontstaan,
- (b) welke factoren hebben het ontstaan ervan bepaald,
- (c) waarom kon deze methode niet veel vroeger ontdekt worden, en
- (d) waarom niet op een ander gebied van de wetenschap?

I

1. Als aanloop tot het beantwoorden van deze vragen kan het nuttig zijn de situatie van de wetenschappen tegen het einde van de Middeleeuwen te beschouwen en na te gaan welke mogelijke relatie met het experiment hier zou kunnen bestaan.

a. We stellen vast dat op de volgende terreinen een zekere *feitelijke* kennis betreffende de natuur werd bereikt (met « feitelijke kennis » wordt bedoeld dat men gegevens verzameld had die enigzins met de werkelijkheid overeenkwamen en dus een blijvend karakter bezaten).

- 1) In de *biologie* werden een aantal observatiegegevens ingewonnen en zekere klassifikaties opgesteld. Van een eigenlijke theorie die samenhang en verklaring kon bieden is hier geen sprake ; het middel waardoor de gegevens verzameld werden is (levens-)ervaring, observatie (actieve ervaring) en enkele elementaire « experimenten ».
- 2) In de *anatomie* en de *geneeskunde* vinden we een verzameling van observatiegegevens en resultaten van « trial and error »-experimenten, met daarnaast zekere theorieën betreffende de werking van organen, die slechts in geringe mate met de observatiegegevens in verband staan ; sporadisch gebeurden ook enkele controle-experimenten.
- 3) *Technologie*, *alchemie* en *magie* : op deze gebieden (uiteraard vooral op het eerste) werden in de loop van de Oudheid, maar vooral in de Middeleeuwen, een groot aantal ontdekkingen van blijvende waarde gedaan ; het belang hiervan kan moeilijk overschat worden en de bijdrage van de Middeleeuwen tot de 17^e eeuwse wetenschap ligt grotendeels op dit terrein, veeleer dan op dit van de theoretische bespiegeling. Men kan nochtans opmerken dat het hier *niet* gaat om een *directe* invloed op het ontstaan van de experimentele methode als zodanig : de experimenten waren steeds « *trial and error* »-experimenten (alleen de positieve resultaten worden bewaard, negatieve hebben geen betekenis) ; ze stonden niet in relatie met een theorie, en breidden de *kennis* dus niet uit.

Naast deze verzameling van empirisch materiaal kende men in de Oudheid en de Middeleeuwen een drietal vakken die een reële overeen-

komst vertoonden met dat wat wij thans een wetenschappelijke theorie plegen te noemen.

- 4) In de *astronomie* vindt men een exacte mathematische theorie die direct uitspraak doet over een aanzienlijk aantal empirische gegevens, bekomen via een observatiemethode die reeds enkele trekken gemeen heeft met het huidige experiment. (Het gaat om continu variërende verschijnselen en de theorie staat interpolatie en extrapolatie toe; dit heeft voor gevolg dat men door middel van opzettelijk geplande observatie de theorie kan verifiëren). Dit is dus de eerste vorm van een bevredigende *theorie* voor wat betreft de *voorspelling* van *alle* observatiegegevens binnen een bepaald domein (posities van zon, maan en planeten). Voor de *verklaring* (geven van oorzaken) werd de theorie algemeen als onbevredigend beschouwd. De relatie met onze experimentele methode ligt hierin dat men nu de mogelijkheid inziet een exacte theorie op te bouwen die *op controleerbare wijze* uitspraak doet over een bepaalde verzameling van feiten. Negatief is echter dat het domein van verschijnselen afgesloten is: men kan geen volstrekt nieuwe feiten toevoegen. Men kon via de astronomie moeilijk op de gedachte komen aan een werkelijk actief experiment, dat nieuwe feiten genereert.
 - 5) Ook in de *statica* en de *hydrostatica* had men een exacte mathematische theorie die een beperkt domain van verschijnselen volledig kon voorspellen en zelfs verklaren. De relatie met een echt experimentele wetenschap is hier reeds sterk: de observaties waarop de theorie betrekking heeft, hebben reeds een geringer passiviteitskarakter dan in de astronomie, aangezien het kunstmatig voortgebrachte fenomenen betreft (het gaat over de *balans* en andere werktuigen die menselijke *creaties* zijn).
 - 6) De *optica*, in haar elementaire vorm, is eveneens een combinatie van een exacte wiskundige theorie met observatiegegevens, die met hoge precisie door de theorie voorspeld worden en dus tot nauwkeurige controle aanleiding geven. Ook hier is de relatie met het experiment reeds aanwezig: het zijn observaties met betrekking tot *artificiële* objecten (vlakke, concave en convexe spiegels, lenzen), en de verschillende observaties zijn het gevolg van *variatie* van vorm en positie van deze objecten t.a.v. de lichtstralen.
- b. Uit dit overzicht mogen we wellicht besluiten dat reeds in de Oudheid en de Middeleeuwen *onze huidige experimentele wetenschap a.h.w. in embryonale vorm bestond*. Dit betekent dat men, vertrekkend van *kunstmatig* gerealiseerde situaties, er toe komt preciese wetten te formuleren

die een aantal veranderlijken zo goed beschrijven dat ze door *variatie* van de omstandigheden niet worden weerlegd. Zowel de inductieve als de verifiërende rol van het experiment is hier in de kern aanwezig, alsook het karakter van *actieve* ingreep dat samenhangt met het artificiële van de verschijnselen. Men stelt ook vast dat binnenin deze wetenschappen (*statica* en *optica*) zich een langzame maar onmiskenbare vooruitgang heeft voorgedaan en dat ze, nadat de grondslag in de Oudheid werd gelegd, door de Arabieren en Middeleeuwen met een aantal nieuwe experimenten en theoretische bijdragen werden verrijkt.

2. Wanneer het inderdaad waar is dat dit in zekere mate een authentische vorm van wetenschap is, met een experimentele kern, dan wordt het natuurlijk belangrijk, — in het kader van onze probleemstelling —, na te gaan : (a) welke factoren tot de ontwikkeling ervan hebben geleid, maar tevens (b) waarom deze « experimentele » methode in embryonale vorm gebleven is en niet dadelijk tot de « cumulatieve » experimentele methode aanleiding heeft gegeven.

a. Op de eerste vraag zouden we antwoorden dat deze wetenschappen niet ontstaan zijn tengevolge van het uitdenken van een geniale *methodologie*, maar dat ze een volkomen logisch gevolg zijn van de ontwikkeling van de wiskunde in de Oudheid, en met name van de meetkunde. Het is onze thesis dat *optica* en *statica* als het ware een verlengstuk vormen van de wiskunde en als zodanig ook door de eerste beoefenaars werden beschouwd. De redenen hiervoor zijn voor de hand liggend : ieder meetkundige van formaat zal *spontaan* de relatie zien tussen zijn wetenschap en de *optische fenomenen* ; in de eerste plaats wegens de alomtegenwoordigheid ervan en verder wegens het klaarblijkelijk geometrisch karakter van de eenvoudigste eigenschappen van de lichtstralen ; overigens dringen enkele eenvoudige experimenten zich hier spontaan op, nl. rotaties en translaties van de objecten waarmee men werkt (spiegels). Zo komt men ertoe enkele *meetkundige wetten* te formuleren en er andere uit te deduceren die voor onmiddellijke en *nauwkeurige* controle vatbaar zijn. Een sterk argument voor onze opvatting betreffende deze directe relatie tussen meetkunde en *optica* schijnt wel het feit te zijn dat een *groot aantal wiskundig begaafden* uit de geschiedenis zich spontaan met *optica* hebben ingelaten : Euklides, Archimedes, Ptolemaios, Alhazen, en, na de wederopbloei van de wiskunde in de Renaissance : Mauricolo, Kepler, Galileí, Descartes, Fermat, Huygens, Newton.

Het verband tussen meetkunde en *statica* en *hydrostatica* is even manifest : deze studies betreffen een instrument dat zo verspreid is dat iedereen er een spontane kennis van heeft, dat gemakkelijk kan onderzocht worden en aanleiding geeft tot precisie in het onderzoek : de balans.

Ook hebben de meest elementaire werktuigen « statische » eigenschappen. Dat deze wetenschap als een normale uitbreiding van de wiskunde kan beschouwd worden is overigens begrijpelijk, als men bedenkt dat rekenkunde, meetkunde en statica a.h.w. de abstraherende wetenschappen zijn betreffende de meest elementaire menselijke precisieoperaties: *tellen, meten, en wegen*. Tenslotte is ook hier de interesse van veel wiskundigen duidelijk: Archimedes, al-Khazini, Jordanus Nemorarius, Simon Stevin, Galilei, Descartes, Pascal, Huygens, Newton, D. Bernouilli, enz... Ons betoog komt dus hierop neer: zodra minstens de meetkunde (in axiomatische vorm) bekend is, gaat men zich met optica en statica bezighouden zonder dat hiervoor nieuwe methodologische inzichten nodig zijn: men komt dus *spontaan* tot een « experimentele » wetenschap in embryonale (d.i. niet cumulatieve) vorm ⁽²⁾.

b. Hierbij komt natuurlijk onmiddellijk de vraag op waarom deze wetenschap geen cumulatief karakter gekregen heeft, m.a.w. waarom hier nog niet de experimentele methode in eigenlijke zin ontstond.

1) Een eerste reden hiervoor ligt in het feit dat door de Grieken het empirisch en zeker het experimenteel aspect van deze wetenschappen zoveel mogelijk werd weggemoffeld. Vooral Archimedes wil voortdurend de indruk geven dat hetgeen waardevol is aan zijn werk het *deductief* karakter ervan is. Hij stelt zijn fysica als een soort meetkunde voor en verdoezelt zoveel mogelijk alle empirische consideraties. Het is inderdaad zo dat de beginselen waarop men moet steunen om de elementaire statica op te bouwen, gering in aantal zijn en dank zij een paar kunstgrepen, — waarin Archimedes een meester is —, tot « vanzelfsprekendheden » kunnen herleid worden waarachter het empirisch karakter helemaal verdwijnt. Archimedes geeft wel toe dat hij nu en dan mechanische experimenten doet, maar hij gebruikt die slechts als heuristisch procédé; de eigenschappen die hij aldus ontdekt poogt hij dan zuiver mathematisch af te leiden. Op de kern van empirisch materiaal bij Archimedes werd voor het eerst duidelijk

(2) Bij het vermelden van gegevens over de geschiedenis van de wetenschappen, die algemeen aanvaard zijn, achten we het niet nodig telkens een referentie te geven. We verwijzen hiervoor in het algemeen naar enkele belangrijke werken als: R. TATON (ed.), *Histoire générale des sciences, I, II*, Paris P.U.F., 1958; E.J. DIJKSTERHUIS, *De mechanisering van het wereldbeeld*, Amsterdam Meulenhoff, 1950; A.C. CROMBIE, *Augustine to Galileo*, Cambridge (Mass.), Harvard U.P., 1953; *Histoire de la science in Encyclopédie de la Pléiade*, Paris, 1957; en als rijke verzameling van oorspronkelijke teksten: CLAGETT, MARSHALL, *The science of mechanics in the Middle Ages*, London Oxford U.P., 1959. Voor problemen in verband met de technologie doen we steeds beroep op C. SINGER (ed.) *A history of technology*, vol. I-III, Oxford Clarendon Press, 1957.

gewezen door *Ernst Mach*. (3). De grondige analyse die nodig is om tot dit inzicht te komen, bewijst manifest dat degenen die hier voor het eerst mee in contact kwamen, deze ervaringsbasis moeilijk konden onderkennen. Weliswaar ging men in dezelfde richting verder, en voegde men nieuw empirisch materiaal eraan toe, maar dit gebeurde niet op grond van een methodologisch inzicht : de toepassing van deze methode noopte er vanzelf toe, zonder dat men dit aspect ervan als belangrijk leerde beschouwen.

- 2) Deze hindernis voor verder onderzoek was wellicht overwonnen geworden wanneer men door een progressieve studie van meer en meer *technische problemen* ertoe gedwongen geweest was nieuwe gegevens te verwerken. Ook dit kon zich echter niet voordoen, enerzijds omdat de technologie nog onvoldoende was ontwikkeld, en anderzijds omdat de afstand tussen theoretici en ambachtslieden — zowel in de Oudheid als in de Middeleeuwen — interactie tussen technologie en theorie quasi ondenkbaar maakte.
 - 3) In de *optica* is het experimenteel aspect iets duidelijker naar voor gekomen, vooral bij de Arabieren en Middeleeuwers, en, zoals Crombie aantoot, was men zich daar wel enigzins van bewust. Dit zal te wijten zijn aan het feit dat de optische fenomenen in de natuur een grotere complexiteit vertonen, terwijl enkele *fascinerende* verschijnselen zoals de regenboog, zich aan een verklaring bleven onttrekken, hetgeen tot verder feitenonderzoek aanleiding kon geven. Toch was ook hier het gebied dat exact kon behandeld worden nog zeer beperkt en bleef men sterk afhankelijk van de stand van de techniek op het gebied van de fabricatie en het slijpen van glas.
 - 4) Tenslotte was het onmogelijk de methodes van de statica en de optica toe te passen op die gebieden van de fysica waar men het meest mee bezig was (val en worp), omdat er geen *mathematisch apparaat* bestond waarmee men deze problemen had kunnen formuleren. Zelfs indien dit had bestaan, dan was men technisch meestal onbevoegd om de experimenten die zo'n apparaat had kunnen uitlokken te realiseren.
- c. De lezer zal nu wellicht reeds inzien in welke richting ons betoog zal gaan : (a) de moderne experimentele methode ontstaat slechts daar waar een onderzoeker ertoe genoopt wordt bij het opbouwen van een bepaald mathematisch apparaat empirische gegevens te verzamelen om het contact met de werkelijkheid te bewaren ; deze werkwijze zullen we in het vervolg de *methode van Archimedes* noemen ; (b) ze kwam effectief tot

(3) MACH, ERNST, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, Leipzig, Brockhaus, 1933⁹ pp. 69-82.

stand in de statica en de optica, maar (c) in deze wetenschappen is het empirisch materiaal zo gering dat het experimenteel aspect niet eens wordt opgemerkt; tenslotte (d) vormen deze wetenschappen een betrekkelijk afgesloten geheel dat niet tot verdere ontwikkeling kon gebracht worden wegens de beperktheid van het wiskundig arsenaal, de weinig gevorderde stand van de techniek en het gebrek aan relatie tussen theoretici en de technici. (e) Onze hypothese luidt verder dat — onafhankelijk van theoretische of methodologische inzichten — de *Archimedische methode* vanzelf tot de *experimentele methode* zal leiden zodra de hierboven geschetste remmingen zijn opgeheven. In hetgeen volgt zullen we pogen aan te tonen op welke wijze dit proces zich heeft voltrokken.

II

1. In de loop van de 15^e en de 16^e eeuw heeft zich in Europa een ontwikkeling voorgedaan die het heeft mogelijk gemaakt dat het punt waarop deze kern van experimentele fysica stagneerde, kon en moest overschreden worden.

a. Vanaf de 16^e eeuw heeft de *technologie* een stadium bereikt dat nooit tevoren in de geschiedenis van de mensheid was geëvenaard. De uitvindingen die in de loop van de Oudheid en de Middeleeuwen waren opgestapeld, worden nu, onder invloed van het ontstaan van het kapitalisme, op grote schaal toegepast en verspreid. Deze ontwikkeling komt o.m. tot uiting in de *mijnbouw* en *metallurgie*: productie van ijzer, staal, koper, lood, tin en edele metalen (in dit verband worden ook allerlei technieken ontwikkeld om metalen te toetsen, bv. op hun sterkte); de mechanisatie van de *weefnijverheid*, de *glasindustrie* en het slijpen van *lenzen* (brillen ca 1300), de *bouwkunst* (Brunelleschi bouwt de koepel van Florence in 1420, men keert terug naar de Romeinse bouwkunst), technieken van *drainering*, *dijkenbouw* en *kanalisatie* (van vitaal belang in Nederland en de Po-Vlakte), *bruggenbouw*, *scheepsbouw* (driemaster), *militaire technologie* (kanonnen en vestingswerken), en verder de praktische wetenschappen zoals *cartografie* en *navigatiemethodes*. Een heel aparte plaats neemt natuurlijk de *boekdrukkunst* in (4). Deze ongehoorde ontwikkeling, die ongetwijfeld op alle maatschappelijke structuren zijn invloed uitoefent, heeft ook op het terrein van de wetenschap vérstrekende gevolgen.

(4) Cfr. voor deze technologische gegevens, het hoger vermelde door SINGER uitgegeven werk: *A history of technology*, vol. II en III.

- 1) Het belang en⁵⁾ de *complexiteit* van de *technische problemen* wordt op de duur zo groot dat de gewone ambachtsman ze niet meer aankan, en men meer en meer beroep moet gaan doen op hooggequalificeerde specialisten : ingenieurs. Er ontstaat dus een klasse van mensen die volop technici zijn, maar die daarnaast een *prestige* hebben dat niet moet onderdoen voor dit van de wetenschapsmens. Hier wordt een eerste kans geboden om de oude kloof tussen theoretici en technici op te heffen. De eersten die erin geslaagd zijn enigzins deze synthese te realiseren, waren niet de wetenschapsmensen, maar wel de *kunstenaars-ingenieurs*, waarvan BRUNELLESCHI de choryphee is (1377-1446), maar waarvan ook LEONARDO DA VINCI (1452-1519), ALBRECHT DÜRER (1471-1528) en BENVENUTO CELLINI (1500-1571) typerende voorbeelden zijn. De meest markante figuur is ongetwijfeld Da Vinci die met zeer uiteenlopende problemen van de techniek van zijn tijd vertrouwd was en overal poogde door *systematische experimenten* de praktische problemen te onderzoeken⁽⁵⁾. Door het feit dat men nu de technologie op een methodische manier gaat bedrijven, zal de brug met de wetenschap vlug geslagen zijn. Dit wordt vooral duidelijk als theoretisch gevormden zich met praktische problemen gaan inlaten (of practici werkelijk wetenschapsmensen worden) zoals dit tot uiting komt bij de wiskundigen REGIOMONTANUS (1436-1476) en PEDRO NUÑEZ (1492-1579) die zich met cartografie en navigatie bezighielden (ook MERCATOR (1522-1594) was wiskundig gevormd), of BOMBELLI, (1530-1572) die waterbouwkundig ingenieur was en tevens een van de grondleggers van de algebra, en TARTAGLIA, (1500-1557), eveneens wiskundige, die geografische instrumenten bouwde en de problemen van de artillerie wetenschappelijk poogde te benaderen, of de ingenieur-wiskundige BENEDETTI (1530-1590) die een groot meetkundige was en tevens pogingen deed om een mechanica op te bouwen. Tenslotte kunnen we als prototype van de in de techniek geëngageerde wetenschapsmens SIMON STEVIN vermelden (1548-1620), die in de wiskunde en de statica baanbrekend werk leverde, maar evenzeer bedrijvig en ingenieus was op het gebied van drainering, dijken- en vestingbouw en de constructie van molens en pompen. Uit deze opsomming blijkt reeds dat de oude kloof tussen theorie en praktijk hier gaandeweg meer gedelgd wordt en dat zo een van de essentiële remmingen die de ontwikkeling van het experiment in de

(5) Het belang van deze kunstenaars-ingenieurs werd voor ons duidelijk na lezing van het werk van DE SANTILLANA en ZILSEL : *The development of rationalism and empiricism*, in : *Foundations of the unity of science*, II, 1954.

weg stonden, stilaan wordt opgeheven. Naast het prestige dat deze mensen aan de techniek verlenen, dragen ze ook bij tot de vestiging van een nieuwe mentaliteit die aan alle wetenschapsmensen uit de 17^e eeuw zal eigen zijn en die in directe relatie staat met de experimentele werkwijze : de overtuiging dat kennis en wetenschap iets te maken hebben met de mogelijkheid om *macht* over de natuur uit te oefenen, er *actief op in te grijpen*.

- 2) De rol die de boekdrukkunst gespeeld heeft bij het versnellen van een reeks processen die anders reeds stilaan op gang kwamen, kan moeilijk overschat worden.
 - a) Dank zij dit nieuwe communicatiekanaal konden de *technologische vondsten* waarvan hoger sprake, snel over gans Europa *verspreid* worden hetgeen de ontwikkeling natuurlijk weer ten goede kwam en tevens het prestige en de kennis m.b.t. deze domeinen sterk verhoogde : in die tijd kon dit onmogelijk via de universiteiten gebeuren. Zeer bekend werden bvb. de werken over mijnbouw, metallurgie en mechaniek : « De re metallica » van AGRICOLA (1556), en « De la Pirotechnia », van BIRINGUCCIO (1540).
 - b) De mogelijkheid om op een betrekkelijk goedkope wijze informatie te verspreiden heeft ook de behoefte gescherpt van mensen die op bepaalde terreinen empirische kennis hadden, om die mede te delen ; daaraan beantwoordt dan tevens een steeds *groeïende belangstelling*. Men schat dat tussen 1450 en 1500 ongeveer 8 miljoen boeken (exemplaren) gedrukt werden ⁽⁶⁾ ; wanneer men bedenkt dat dit meer is dan alle Middeleeuwse kopisten samen ooit geschreven hebben, dan beseft men eerst wat een explosie van kennis en interesse in brede kring hierop moet gevolgd zijn.
 - c) Deze nieuwe soort informatie ontstaat en wordt verspreid *los van de universiteiten* : ze is niet meer gebonden aan de tot dan toe geldende eisen van theoretische bespiegeling en disputatie. Het nieuwe publiek van mensen die in het praktische leven staan en geen scholastische vorming hebben gehad, zal in de eerste plaats *empirische concrete gegevens* vragen.
- 3) Men kan besluiten dat thans voor het eerst de mogelijkheid ontstaat voor een wetenschap die onafhankelijk van de traditionele universitaire normen wordt opgebouwd en waarin als vanzelf besloten ligt een vraag naar *empirische gegevens* en een *breken met de autoriteit*. Symbolisch zou men het jaar 1543 als een keerpunt in deze richting kunnen beschouwen : zowel *De humani corporis fabrica* van VESALIUS als

(6) Cfr. SINGER, o.c., III, p. 377.

De revolutionibus orbium caelestium van COPERNICUS werden in dat jaar gepubliceerd. Het gaat hier evenwel om een verandering in de denkwereld die zich in de loop van de ganse 16^e eeuw heeft voltrokken en die op uitstekende wijze werd aangevoeld en tot een nieuwe *wetenschapsvisie* geproclameerd door FRANCIS BACON in zijn *Novum Organum* van 1620.

Deze bewustwording en eerste systematisatie wordt dikwijls ten onrechte als het vertrekpunt van de moderne wetenschappelijke methode beschouwd. Ze kan wellicht beter begrepen worden als een orgelpunt na de ontwikkeling die we hierboven hebben geschetst. De thema's van primaat van de *empirische gegevens* als object van belangstelling, het zoeken naar een *beheersing van de* natuur met praktische doeleinden, en het *breken* met de traditionele disputationemethodes en het *gezagsargument* — centrale gedachten van Bacon — hebben ongetwijfeld een belangrijke betekenis gehad bij het elimineren van de hinderpalen die de ontwikkeling van de experimentele methode in de weg stonden. Ze waren reeds latent in ruime mate aanwezig vóór ze expliciet geformuleerd werden en ze zullen later gemeengoed worden van alle grote denkers van de 17^e eeuw. Nochtans volstaan deze methodologische opvattingen niet om het eigenlijke experiment te doen ontstaan ; men is het er thans vrijwel over eens dat het werk van Bacon wel een atmosfeer heeft helpen scheppen, maar niet tot de ontwikkeling van concreet wetenschappelijk werk heeft geleid.

- b. Om een werkelijk verantwoord inzicht in dit complexe probleem mogelijk te maken moet eerst nog gewezen worden op een tweede belangrijk fenomeen dat zich in de loop van de 15^e-16^e eeuw voordeed (sterk bevorderd door de boekdrukkunst), nl. *de nieuwe bloeiperiode van de wiskunde*. Deze ontwikkeling is ten dele te danken aan het ruim contact dat nu mogelijk is met de werken van de grote Griekse wiskundigen (in 1482 wordt een Latijnse vertaling van Euklides uitgegeven, Archimedes in 1544, Apollonios in 1566, Diophantos in 1575), maar evenzeer aan de bijdrage van enkele grote wiskundigen die niet alleen het Griekse materiaal verwerkt hadden, maar die met behulp van de Arabische wiskunde een totaal nieuwe benaderingswijze hebben mogelijk gemaakt in de *rekenkunde*, de *algebra* en de *driehoeksmeting* (Regiomontanus, 1464 : driehoeksmeting ; Pacioli : 1494 : rekenkunde, algebra, meetkunde ; Cardano, 1545 : algebra ; Tartaglia, 1556 : algebra ; Bombelli, 1572 : algebra ; Stevin, 1585 : rekenkunde, algebra).

Pas door de ontwikkeling van deze nieuwe wiskundige apparatuur en het feit dat de wiskundigen die ze ontwikkelen tevens een grote vertrouwdeheid bezitten met de problemen van de technologie, zal het mogelijk

worden de alom aanwezige interesse voor ervaringsgevens tot een werkelijke experimentele methode te laten uitgroeien.

2. Thans rest ons natuurlijk nog het probleem in *welke wetenschap* deze doorbraak zich uiteindelijk voltrokken heeft, en waarom precies daar en niet elders.

a. Om dit duidelijk te maken moeten we even onze vroegere gedachtengang weer opnemen, nl. dat zodra een wiskundige over een mathematisch apparaat beschikt, hij dit als vanzelf gaat uitbreiden tot gebieden in de natuur waarvan hij de mathematische eigenschappen evident vindt: we noemen dit de *Archimedische methode*.

We kunnen dus verwachten dat bij deze nieuwe bloeiperiode van de wiskunde een analoog fenomeen zich zal voordoen. Dit is inderdaad het geval. Het eerste gebied waar het contact tussen wiskunde en empirie (of technologie) opnieuw gelegd wordt, is weerom de *statica*.

Na LEONARDO DA VINCI die wel bedreven was in techniek maar te weinig wiskundige was, werd het gebied op decisieve wijze aangevat door SIMON STEVIN die in 1586 zijn « Beghinselen der Weeghconst » en « Beghinselen des Waterwichts » publiceert. Hier wordt de ganse *statica* en *hydrostatica* opnieuw opgenomen, in de trant van Archimedes op axioma's gebaseerd en verder op een reeks praktische problemen toegepast.

Ook de *optica* wordt door de wiskundigen op vernieuwde wijze bestudeerd, o.m. door MAURICOLO (1494-1575) die een systematisch onderzoek doet van prisma's, sferische spiegels en het gezichtsmechanisme; maar vooral door KEPLER die in 1611 in zijn *Dioptrice* een geometrische studie brengt, gebaseerd op de uitvindingen van Galilei betreffende lenzen en telescoop.

b. Na de uitbreidingen van de *statica* en de *hydrostatica* door Stevin uitgewerkt, was er in dit nieuwe wiskundig en technologisch milieu maar een stap meer nodig om de Archimedische methode progressief naar andere terreinen uit te breiden. Inderdaad kondigt de grote wiskundige TARTAGLIA reeds in 1537 de ontdekking van een nieuwe wetenschap aan: « Nova Scientia », nl. de ballistiek. Het betreft hier de eerste poging om enkele wetten van de mechanica op wiskundige wijze te beschrijven; spijtig genoeg bevindt hij zich hier op een terrein waar experimentele controle uiterst moeilijk is (het onderzoek van het traject van een kanonbal) en dit brengt hem ertoe zijn wiskundig model aan te passen aan de gangbare opvattingen die hierover bestonden. Een tweede poging om de traditionele mechanica te vervangen door een wiskundige werd uitgevoerd door BENEDETTI (1530-1590), die er zich sterk van bewust is dat hij een uitbreiding zoekt van de *statica* van Archimedes. Ook hij mislukte omdat hij zich nog niet voldoende kon losmaken van de traditionele

Aristotelische opvattingen — hetgeen er feitelijk op neerkomt dat hij de Archimedische methode niet ten volle consequent toepast! —.

Uit deze pogingen blijkt nochtans dat de tijden rijp waren om een decisieve stap te wagen buiten het traditionele gebied van optica en statica en dat de aandacht hierbij als vanzelf op de *mechanica* gericht werd. Deze overgang is heel natuurlijk als men bedenkt dat uit de hydrostatica de notie « soortelijk gewicht » was voortgekomen die zo'n manifeste rol speelt bij de behandeling van problemen van val en worp, terwijl anderzijds elke concrete toepassing van de statica problemen van beweging en krachten oproept. Om de doorbraak te forceren was echter niet alleen het wiskundig talent van Tartaglia voldoende: men moest evenzeer beschikken over de practische vaardigheid van een Da Vinci en daarbij de onafhankelijkheid van geest en denkkraft bezitten om zich volkomen van de Aristotelische invloeden te kunnen losmaken. Die drie kwaliteiten bezat GALILEÏ (1564-1642) in uitzonderlijk mate, en zo is hij de grondlegger kunnen worden van de moderne *mechanica* en *daardoor* eveneens van de *experimentele methode*. De resultaten van zijn ontdekkingen werden, zoals men weet, neergelegd in zijn *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (1638).

c. De kern van ons betoog komt hierop neer: (a) Galileï heeft niet een nieuwe wetenschappelijke methode gevonden en deze daarna op de fysica toegepast; hij volgt slechts de werkwijze die Archimedes en anderen tot de statica en optica heeft gebracht, (b) maar toch heeft juist via deze toepassing op de mechanica het eigenlijk wetenschappelijk (cumulatief) experiment zijn intrede in de geschiedenis gedaan.

1) Om het eerste deel (a) van deze thesis te staven, kunnen een aanzienlijk aantal argumenten worden aangehaald.

(1^o) Nergens kunnen we bij Galilei enige aanduiding vinden die er op zou wijzen dat hij de indruk had een nieuwe « experimentele » methode te hebben ontdekt; integendeel, hij herhaalt voortdurend dat hij een *wiskundige* demonstratie brengt van een reeks feiten betreffende de beweging van lichamen; hij wijst erop dat dit precies *hetzelfde* is als wat *Archimedes* voor de statica gedaan heeft en hij drukt er zelfs zijn verwondering over uit dat wiskundigen zoals Archimedes, Euklides en Apollonios niet reeds veel vroeger het probleem van de versnelling op deze manier hebben behandeld. (7).

(2^o) Verder distancieert hij zich uitdrukkelijk van al degenen die hetzij op zuiver *empirische* wijze, hetzij volgens de methode van Aristoteles de problemen van val en worp hebben behandeld. Hij vindt

(7) Cfr. GALILEI, *Two new sciences*, transl. by H. Crew, N. Y, Dover pp. 242-243.

dat hij een *nieuwe* wetenschap maakt omdat hij als eerste dank zij de *wiskunde* de problemen op redelijke wijze oplost.

(3^o) Door het verloop van de betogen in de « Discorsi » kan men opmaken dat hij steeds wil aantonen dat de experimenten weliswaar een belangrijke rol spelen, maar dat dit hoofdzakelijk een dienende en heuristische rol is : telkens hij een experimenteel gegeven bekomen heeft, is hij er op uit om aan te tonen dat men dit ook op basis van redenering alleen had kunnen uitmaken (8) ; deze redenering is er echter steeds een van mathematische aard en heeft alleen betrekking op de onderlinge relaties tussen de gedefinieerde concepten.

(4^o) Reeds een oppervlakkige studie van de « Discorsi » toont ten andere aan dat het werk in het verlengstuk van de *statica* en *hydrostatica* ligt : de « eerste nieuwe wetenschap » betreft de weerstand die vaste lichamen bieden tegen breuk en de oorzaken van de cohesie.

We kunnen dus besluiten dat *Galileï* eigenlijk een *Archimedes* is met (i) een machtiger wiskundig apparaat, (ii) een vertrouwdheid met een veel verder ontwikkelde technologie en (iii) een grotere interesse voor technologische problemen, hetgeen samengaat met de typisch 17^e eeuwse opvatting over de wetenschap als een middel om het « imperium hominis » over de natuur te vestigen.

- 2) Wanneer het waar is dat *Galileï* slechts de *Archimedische* methode toepast, dan moeten we nog verklaren waarom op deze manier het *experiment* ontstond (b). We hebben hoger reeds gesuggereerd dat in de elementaire *statica*, *hydrostatica* en *optica* het aantal empirische (of experimentele) gegevens waarop de theorie moet steunen om de relatie met de werkelijkheid te bewaren, betrekkelijk gering is. Deze gegevens krijgen daardoor het karakter van een *alledaagse intuïtieve kennis* ; ze worden geformuleerd in axioma's die de indruk van « vanzelfsprekendheid » geven. Wanneer men dan nog expliciet op experimenten beroep doet, zijn het « *gedachtenexperimenten* » : door de wijze van formuleren vertonen ze analogie met het plan van een concreet experiment, maar ze worden direct opgelost dank zij de intuïtieve empirische kennis. (Men weet ook dat bij *Simon Stevin* het *gedachtenexperiment* nog een centrale rol speelt zoals bij het bekende « wonder en is gheen wonder » : het kogelkransbewijs voor de wet van het hellend vlak).

Bij de toepassing van de wiskundige methode op de *mechanica* wordt nu iets decisief nieuws gebracht : de *intuïtieve ervaringskennis* schiet op dit terrein in hoge mate tekort om het contact met de werkelijk-

(8) Cfr. o.c., pp. 163-164.

heid te bewaren ; het opzettelijk beroep op de empirische gegevens via het experiment dringt zich als onmisbare noodzaak op.

Nu zou men kunnen opmerken dat dit in om het even welke poging tot theorievorming over dit gebied het geval is. Dit is waar, maar alleen de wiskundige (Archimedische) methode blijkt hier rechtstreeks naar het volwaardig wetenschappelijk experiment te leiden omdat zij automatisch enkele eisen stelt die de onderzoeker bijna noodgedwongen in de goede richting duwen : (1^o) de getallen en andere wiskundige noties waarmee men werkt *verliezen alle betekenis* wanneer ze niet teruggaan tot *preciese metingen* op de gegeven objecten ; men is dus verplicht een experimentele situatie te creëren die deze metingen mogelijk maakt. Dit laatste heeft voor gevolg (2^o) dat men er zich vlug van bewust wordt dat bepaalde grootheden niet kunnen gemeten worden voor men een *meettechniek* heeft ontwikkeld, en dat de te meten variabele hetzij moeilijk direct bereikbaar is, hetzij door andere invloeden wordt gestoord. Zo komt men er toe *kunstmatige situaties* in het leven te roepen die een betere kans bieden om het wiskundig model te toetsen. Het feit tenslotte (3^o) dat wiskundige modellen algemene wetten formuleren die met precisie voorspelling en interpolatie toelaten, brengt de onderzoeker spontaan tot het *controle-experiment* en de *variatie*.

Dit alles kan misschien abstract en aprioristisch lijken, maar het werk zelf van Galileï illustreert deze stappen op markante manier ; men hoeft slechts na te gaan hoe hij ertoe komt een methode uit te denken om het *tijdsverloop* te meten, en hoe hij via het *hellend vlak* tot een kunstmatige situatie komt die storingen uitschakelt en variatie toelaat. Het is bovendien van decisieve betekenis (4^o) voor de ontwikkeling van het cumulatief experiment dat zowel onverwachte (negatieve) als verwachte uitslagen nauwkeurig kunnen geformuleerd worden en op hun belang getoetst, zodat ze kunnen bijdragen tot een verbetering van het theoretisch model.

Men begrijpt dus waarom pas op het niveau van de mechanica de Archimedische methode overgaat in de experimentele : *pas op dit niveau wordt het voor iedereen duidelijk dat de controle van de theorie en het contact met de werkelijkheid niet op intuïtieve manier kan gebeuren maar slechts via het actieve experiment.* (9) De complexiteit van de gegevens is zo groot geworden dat de alledaagse kennis niet meer

(9) Dat het een overgangsfase betreft, blijkt hieruit dat ook het « gedachten experiment » nog een zekere rol speelt ; dit was bij Archimedes en Stevin bijna uitsluitend het geval.

volstaat : men begrijpt nu voor het eerst dat er soms zeer ingewikkelde technieken nodig zijn om de relevante gegevens te achterhalen ; anderzijds wordt het ook meer en meer manifest dat men met empirie en experimenten niets kan aanvangen als men geen preciese taal bezit — de wiskundige — waarin de resultaten zonder verlies aan informatie kunnen geformuleerd worden. De Aristotelische speculatie die zich op alledaagse « empeiria » meende te kunnen beroepen, wordt hierdoor achterhaald, maar evenzeer de ongecontroleerde « trial and error »-experimenten die men in de technologie en de alchemie had leren kennen.

Zowel degenen die de experimentele methode willen funderen in de magische en alchemische experimenten van de Middeleeuwen, als zij die de basis ervan in de Aristotelische en Middeleeuwse fysica zoeken, houden te weinig rekening met het feit dat het cumulatief experiment slechts mogelijk is door de relatie met een exacte *theorie* of minstens een exacte *taal* : anders bestaat er geen mogelijkheid om *precieze informatie in te winnen, laat staan deze te bewaren en op te stapelen*.

Veeleer dan Galileï aan het eind van een evolutieketting te plaatsen die vertrekt van Aristoteles en gaat over Philoponos, Averroës, Thomas, Buridan en Oresme (of nog : Grosseteste, Bacon, Albertus, Bradwardine, Oresme) moet het als zijn grote verdienste beschouwd worden, dat hij zich aan dit dispuut heeft kunnen onttrekken. Integendeel, volgens onze hypothese is Galileï niets anders dan een volgende schakel in een normaal logische evolutie van de wiskunde en natuurwetenschap, die begint met Euklides en Archimedes, en waarbij men poogt enkele empirische gegevens onder te brengen in een deductief mathematisch kader, volkomen analoog aan de werkwijze van de meetkunde. Deze mathematische strengheid heeft als automatisch gevolg dat men met preciese gegevens werkt en dat elke afwijking tussen theorie en werkelijkheid vlug aan het licht komt.

Nadat deze methode gedurende lange tijd alleen op de statica en optica was toegepast, komt er normaal een ogenblik waarop men ze tot meer complexe problemen uitbreidt. In de Oudheid was dit onmogelijk wegens de te geringe vorderingen van wiskunde en technologie en de onmogelijkheid van interactie tussen beide. In de 16^e eeuw werden deze beperkingen gaandeweg opgeheven zodat een toepassing op de mechanica zich als vanzelf opdrong. Deze uitbreiding stelt echter zulke verrassend nieuwe eisen aan de verificatiepogingen dat de *Archimedische methode* dan meteen *experimentele methode* wordt.

Het feit dat we deze overgang *begrijpelijk* pogen te maken, doet niets af van de genialiteit van Galileï. Er was ontzaglijk veel talent,

kennis en vaardigheid nodig, om datgene wat impliciet door de vooruitgang was aangeboden, ook te expliciteren : genialiteit bestaat er niet in onbegrijpelijke dingen te doen, maar een feilloos inzicht te hebben in wat kan en moet gedaan worden.

- 3) Hoewel het zelden expliciet geformuleerd werd, hebben de navolgers van Galilei de experimentele fysica volgens de wegen ontwikkeld die hij was voorgegaan. Galilei's eerste uiteenzettingen over de weerstand van materialen en zijn opvatting over het vacuum (noodzakelijke voorwaarde voor zijn wiskundig model) leidden op volkomen redelijke wijze zijn leerling TORRICELLI tot het meten van de « horror vacui » en zo tot nieuwe vondsten in de statica, de hydro-statica, en de aerostatica, die door PASCAL en VON GUERICKE werden voortgezet. Dit leidde dan verder tot de experimenten van BOYLE en MARIOTTE over de samendrukbaarheid van gassen. HUYGENS van zijn kant zal met verhoogde nauwkeurigheid de experimenten van Galilei overdoen en uitbreiden, waardoor zijn theorie van de slingerbeweging ontstaat en tevens het nieuwe uurwerk mogelijk wordt ; ook m.b.t. de stoot en de middelpuntvliedende kracht zal hij de mechanica verder uitbouwen. Steeds zal men bij deze onderzoekers vaststellen dat de wiskundige theorie (dus de Archimedische methode) aan de grondslag van hun onderzoekingen ligt ; gaandeweg wordt, door de overvloed van ingenieuze proefnemingen, het experimenteel aspect van deze methode steeds meer duidelijk, zodat men tegen het einde van de 17^e eeuw tenvolle het belang van deze twee polen van Galilei's methode inziet. Toch zal men op het eerste aspect de nadruk blijven leggen : Galilei sprak over « . . . dimostrazioni matematiche . . . » en als Newton in 1687 zijn synthese van astronomie en experimentele fysica publiceert, heet het nog steeds : « *Philosophiae naturalis principia mathematica* ».

- d. Wellicht is nu voldoende aangetoond dat de experimentele methode ontstaan is via de Archimedische, en dat dit in de mechanica gebeurt is. Er zal echter een laatste vraag openblijven wanneer we niet kunnen inzichtelijk maken waarom deze doorbraak nu juist in deze wetenschap kon lukken en niet in om het even welke andere.

In dit verband is het nuttig nog even de aandacht te vestigen op deze essentiële kentering van de Archimedische methode dat men hierin *algemene wetten* wil formuleren die de mogelijkheid bieden een verzameling van fenomenen restloos te beschrijven en te verklaren. Om te weten hoe men tot deze methode komt en hoe men ze uitbreidt is het dus noodzakelijk na te gaan van welke aard de beschreven fenomenen zijn en hoe ze met deze theorie in relatie staan.

- 1) In haar meest algemene vorm is dit soort wetenschap wellicht voor het eerst in de *astronomie* tot stand gekomen. Weliswaar moest men hier een betrekkelijk groot aantal observatiegegevens systematiseren, maar daarnaast is er het voordeel, zodra men een techniek van waarnemen en optekenen heeft ontwikkeld, dat deze verder geen problemen meer stelt. De *wijzigingen* in de fenomenen doen zich zeer traag voor en de *alledaagse tijdrekening* in dagen, maanden en jaren biedt een zeer bevredigend stramien om ze op te tekenen. Verder treden er omzeggens *geen storende* factoren op zodat de *regelmaat* in de verschijnselen vlug merkbaar wordt. De primitieve opvatting dat de hemellichamen cirkelvormige banen om de aarde beschrijven, levert al onmiddellijk de aanloop tot een meetkundig model dat dan door vergelijking met de onbetwistbaar vaststaande waarnemingen tot verdere verfijning aanleiding geeft.
- 2) Hoe men vanuit de meetkunde tot de *statica* komt werd hoger reeds aangetoond. Dat er eenvoudig uitdrukbare relaties bestaan tussen de lengte van de armen van balans en hefboom, en de gewichten die men er aan hangt, is zaak van alledaagse ervaring, tenminste voor iemand met wiskundige interesse. De relatie tussen theorie en empirie is hier ofwel intuïtief aanwezig — wegens de alomtegenwoordigheid van deze elementaire instrumenten —, ofwel volstaan enkele zeer eenvoudige experimenten die geen andere operaties veronderstellen dan die welke elke winkelier of werkman dagelijks uitvoert. *Storingen* op de waarneming zijn hier ook quasi onmogelijk, en de *taal* waarin de gegevens geformuleerd worden behoort eveneens tot de alledaagse verworvenheden (maten voor afstanden en gewichten). Hier is dus eveneens het empirisch materiaal *onmiddellijk* en op on-dubbelzinnige wijze voorhanden.
- 3) Hetzelfde geldt voor de *optica* waar we wezen op het evident karakter van de geometrische eigenschappen van het licht. De elementaire experimenten die men moet uitvoeren stellen geen speciale problemen; het zijn ofwel wijzigingen van de *vorm* van de gebruikte objecten (vlakke, concave of convexe spiegels) ofwel veranderingen van de *positie* ervan tegenover de lichtstralen door eenvoudige *rotaties* of *translaties*. Alle verschillende mogelijkheden kunnen zonder speciale technieken gerealiseerd worden en zonder moeite met de elementaire meetkunde beschreven. *Storingen* zijn miniem en de relatie tussen theorie en gegevens is opnieuw zeer direct.
- 4) In de *mechanica* worden ongetwijfeld enkele supplementaire problemen gesteld die het leggen van de relatie tussen wiskundige en empirische gegevens sterk bemoeilijken. In de eerste plaats is het *onmogelijk*

spontaan een nauwkeurige intuïtieve kennis over snelheden en versnellingen op te doen, omdat we geen exact gevoel voor *tijdsverloop* hebben. De apparaatjes waarvan men zich vroeger bediende om tijd te meten waren veel te grof, zodat eenvoudige experimenten hieraan niets konden verhelpen. Voor het eerst wordt dus een variabele bestudeerd die *niet naar mensenmaat* is, m.a.w. waarbij ons normaal onderscheidingsvermogen en de alledaagse instrumenten ons niet meer kunnen helpen. Onze discriminatiemogelijkheid wordt ten tweede sterk verminderd door het feit dat, in normale omstandigheden, de *storingen* die kunnen optreden (weerstand, wrijving) van ongeveer dezelfde grootte-orde zijn als de regelmatigigheden die we onderzoeken. Opnieuw wijkt het bestudeerde object af van de normale mensenmaat. Het lijkt dus heel waarschijnlijk dat deze bijzondere situatie mede een oorzaak is van de lange stagnatie van het onderzoek na de ontwikkeling van de statica. Bovendien is het aantal onderzochte variabelen reeds groter en zijn hun onderlinge relaties complexer: dit brengt een supplementaire moeilijkheid mee om een relatie tussen theorie en empirisch gegeven te leggen.

Toch is Galileï erin geslaagd deze moeilijkheden te overbruggen. Abstract geformuleerd gaat hij hierbij als volgt te werk: hij reduceert de observaties die nodig zijn tot *observaties* waartoe men vroeger reeds in staat was: dus tot observaties *naar mensenmaat*; eveneens worden de *operaties* die bij het experiment moeten worden uitgevoerd naar mensenmaat teruggebracht. Het probleem van meting van het tijdsverloop, bv., wordt *gereduceerd* tot een probleem van *weging* van water dat gedurende de bedoelde tijdspanne is uitgelopen! De moeilijkheden van het *onderscheiden* van verschillende *snelheden* wordt omzeild door ze aanzienlijk te vertragen op het *hellend vlak*; de invloed van de *storingen* tenslotte wordt nagegaan door duidelijk onderscheidbare *variëaties* in helling van het vlak, omvang van de bollen en gewicht in te voeren.

Er was dus a.h.w. telkens maar één stap nodig, één enkele ingreep van de mens, om de fenomenen tot onderscheidbaarheid te brengen. Hier ligt de reden waarom men voor het eerst in de *mechanica* tot de experimentele methode gekomen is. Per slot van rekening zijn wij zelf in de eerste plaats *mechanische wezens*: de operaties die we met ons lichaam uitvoeren — naar buiten toe althans — zijn *mechanische* operaties (en niet bv. chemische of electromagnetische!) Actieve ingreep betekent voor de mens in de eerste plaats mechanische ingreep. We zullen dus het best tot preciese controle in staat zijn wanneer we slechts *vormveranderingen* moeten aanbrengen ofwel *rotaties* of *trans-*

laties op objecten uitvoeren. Ook wat onze *observatie*-mogelijkheden betreft kan hetzelfde gezegd worden: problemen van snelheid en beweging kunnen gereduceerd worden tot problemen van opeenvolgende bepalingen van *plaats* en *richting* en op dit gebied is ons onderscheidingsvermogen het meest nauwkeurig. (Voor electro-magnetisme hebben we geen gevoel, voor elektriciteit slechts bij hoge ampères, wat dan nog gepaard gaat met pijn, voor gewicht en stoot is het onderscheidingsvermogen eerder grof, en geluiden en kleuren zijn te zeer variabel bij wijziging van de omgeving).

Het experiment is dus in de mechanica ontstaan omdat de verschijnselen die men onderzoekt en het meetinstrument dat men nodig heeft, bijna direct kunnen herleid worden tot een niveau waar alledaagse waarneming en meting met grote betrouwbaarheid mogelijk is; tevens zijn de krachten die men moet ontplooien om de *variëties* mogelijk te maken, van dezelfde *aard* en grootte-orde als die welke de mens bij zijn normale arbeid ontwikkelt.

- 5) Totaal anders zal het worden wanneer men op het gebied van de *scheikunde* de echte experimentele methode zal moeten toepassen. Men beschikt daar oorspronkelijk slechts over één variabele die nauwkeurig kan onderzocht worden: het gewicht; alle andere variabelen die een rol zullen spelen zijn bij het begin van het onderzoek onbekend. De resultaten van de proeven die men zal uitvoeren zijn moeilijk in eerste benadering te onderscheiden (behalve het gewicht; verkleuringen spelen slechts een bijkomstige rol en onze reukorganen zijn weinig gevoelig en geraken vlug geadapteerd). De krachten die men moet uitoefenen om variëties te realiseren (b.vb. verhitten, verbranden) vergen een kunstmatige apparatuur en zijn aanvankelijk moeilijk onder controle te houden. Tenslotte is het aantal variabelen en de mogelijkheid tot storing ontzaglijk veel hoger: het is bv. moeilijk een experiment te herhalen omdat men nooit zeker is dat men precies dezelfde grondstof gebruikt. Overigens leverde de wiskunde geen enkel model dat direct het onderzoek van chemische problemen kon uitlokken (10).

Dezelfde opmerking kan gemaakt worden betreffende de *elektricititeit*, het *electromagnetisme* of de *fysiologie*: ook hier zijn de krachten die moeten ingebracht worden om de significante variabelen op te

(10) Het is wellicht illustratief in dit verband op te merken dat de wiskunde wel kon tussenkomen om te preciseren wat de beste vorm en constructie van lenzen en optische apparaten was, maar van geen enkel nut was bij de samenstelling van de ingrediënten waarmee men glas maakt: dit probleem was door de Venetianen via « trial and error » opgelost!

zoeken van een totaal andere aard en grootte-orde dan die welke ons onmiddellijk ter beschikking staan: men moet over een complex instrumentarium beschikken vooraleer men ze kan ontwikkelen en detecteren.

- 6) Wellicht kan men opwerpen dat deze opvatting in het gedrang wordt gebracht door de vaststelling dat ook op het gebied van het *magnetisme* reeds vroeg enkele werkelijke experimenten werden verricht, vooreerst door PETRUS PEREGRINUS (13^e eeuw), maar vooral door WILLIAM GILBERT (1540-1603; « De Magnete », 1600). Bij nader toezien merkt men echter dat het experiment bij Gilbert bestaat in het uitvoeren van systematische variaties die van elementair mechanische aard zijn (rotaties, translaties) en zonder moeite voor nauwkeurige inspectie vatbaar (het resultaat betreft bijna altijd een verandering van positie of richting). Variaties van dit type kende men reeds bij de statische en optische experimenten. Wel voert hij ook enkele wijzigingen van meer kwalitatieve aard in, zoals vergelijking van de invloed van de magneet op allerlei stoffen, maar ook dan stijgt de complexiteit niet uit boven het niveau van het alledaagse.

Vanuit het standpunt van de aard van de variaties die worden ingevoerd, brengt het werk van Gilbert dus onze stellingen niet in het gedrang. Er blijft echter een probleem dat iets neteliger is. We vinden hier een vorm van onderzoek die in hoge mate als echt experimenteel werk kan beschouwd worden, terwijl men nochtans niet kan zeggen dat hier de Archimedische methode in de volle zin van het woord wordt toegepast: er wordt geen algemeen model opgesteld dat door deductie tot voorspelling van fenomenen kan aanleiding geven. Hoe kan dan verklaard worden dat het experiment hier als vanzelf optreedt?

Men moet opmerken, dat de studies betreffende het magnetisme een heel speciale plaats innemen in de geschiedenis van de wetenschap. Het betreft een beperkt geheel van verschijnselen dat losstaat van de rest van de fysica en reeds vlug als curiosum de aandacht heeft gaande gemaakt. Verder werden hierover de meest eigenaardige beweringen geuit, terwijl die nochtans door een ernstig man mits enkele eenvoudige proeven konden weerlegd worden. Om nu de situatie van GILBERT te begrijpen moet men weten dat magneten in de 16^e eeuw in ruime kring bekend waren, hetzij als kompas, hetzij onder de vorm van eigenaardig speelgoed. Verder is het van kapitaal belang dat dank zij de scheepvaart een aantal waarnemingen waren verricht betreffende de wijzigingen in inclinatie en declinatie van magneetnaalden op verschillende plaatsen van de aarde. Men kan zich voorstellen dat Gilbert

vertrekt van deze waarnemingen en poogt er een samenhangende verklaring voor te geven. Gezien in het licht van de opkomende cartografie en navigatietechnieken is zulk een poging begrijpelijk. Zijn vondst bestaat er nu in dat hij de (sferische) magneet beschouwt als *model* van de aardbol en vice versa; de waarnemingen die hem bekend waren, suggereren dus een aantal overeenkomstige onderzoeken op de magneet. De andere proefnemingen hebben meestal tot doel verkeerde opinies van anderen recht de zetten en in elk geval is het onmiskenbaar dat *meetkundige voorstellingen* hierbij herhaaldelijk het onderzoek richten en tevens toelaten de resultaten precies te formuleren; in enkele gevallen krijgen deze formuleringen zelfs het karakter van wetten. Men kan dus ongetwijfeld een *analogie* met de Archimedische werkwijze ontdekken, ook al gaat die niet volledig op, omdat het vooraf aanwezig zijn van een reeks onverklaarde observatiegegevens eveneens een belangrijke stimulans voor het onderzoek was. Het is echter wegens dit onvolkomen karakter in de toepassing van de wiskundige methode — en de beslotenheid van het onderzochte gebied — dat van daar uit geen uitbreiding tot een experimentele fysica kon gebeuren: aangezien de essentiële kenmerken van het experiment hier al te onduidelijk naar voor kwamen, was navolging en extrapolatie tot andere gebieden priori zeer onwaarschijnlijk. Wat te verwachten was is door de geschiedenis bevestigd: GILBERT is een geniaal maar alleenstaand onderzoeker gebleven.

III

Nu we onze visie op het ontstaan van het experiment in grote lijnen geschetst hebben, kan het interessant zijn ter controle en wellicht ook tot beter inzicht, na te gaan op welke wijze de fysici en filosofen in de eerste eeuw na deze ontdekking hierover gereflecteerd hebben en ons af te vragen wat *voor hén* het essentiële en het nieuwe van deze methode was.

1. We merkten reeds op dat GALILEI zelf bij zijn methodologische consideraties de nadruk legt op het mathematisch aspect van zijn werkwijze hij beschouwt het als zijn belangrijkste vondst dat hij de wereld kan leren dat de Archimedische methode op de *ganse fysica* van toepassing is. Men herinnere zich in dit verband de beroemde passage uit *Il Saggiatore*: « La filosofia è scritta en quel grandissimo libro, che continuamente ci sta aperto innanza agli ochi (io dico l'universo), ma non si puo intendere se prima non s'impara a intender la lingua e conoscer i caratteri, nè'quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica e i caratteri sono triangoli, cerchi, ed

altri figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola... » (11). Het is natuurlijk niet voldoende deze taal te kennen ; men moet het universum ook erin *ondervragen* en dus via het experiment onderzoeken wat het antwoord is. Dit was voor Galilei vanzelfsprekend door zijn omgang met technologische problemen en vooral wegens zijn inzicht in de kapitale rol van de observatie in de astronomie (men denke aan zijn triomfantelijke « *Sidereus nuncius* » van 1610 waarin hij de eerste resultaten van zijn waarnemingen met de telescoop aan de wereld kond deed).

Wellicht is deze vanzelfsprekendheid de reden waarom hij het experimenteel aspect van zijn methode veel minder beklemtoont : hij heeft zich niet ten volle gerealiseerd dat het *experiment* zoals hij het in de mechanica invoerde een volstrekt originele ontdekking was en een volwaardige tegenpool voor de wiskundige component van zijn nieuwe natuurwetenschap.

Toch was hij zich goed bewust van de verschillende denkstappen die hij bij zijn onderzoeken deed en zo komt het dat hij *terloops* bij zijn uiteenzettingen enkele essentiële aspecten van het experiment naar voor brengt. Men kan er bv. de passage op nalezen waarin Salviati (Galilei zelf) het verhaal brengt over het experiment met het hellend vlak (12).

Eerst stelt hij voorop dat het bewijzen van de principes in de wetenschappen die op wiskundige demonstratie beroep doen (astronomie, statica, optica, musica), gebeurt door te vertrekken van enkele welgekozen « *esperienze* » ; hier is het nog niet duidelijk of hij het heeft over « *ervaringsgegevens* » of « *experimenten* ». De verdere uiteenzetting die hij dan geeft, toont aan dat het in dit geval een actieve ingreep moest zijn die een groot aantal van de typische karakteristieken van het experiment vertoont. Hij vestigt de aandacht op het uiterst zorgvuldig verzorgen van het experimenteel materiaal om *storing* te voorkomen ; hij merkt op dat het experiment *herhaalde* malen opnieuw werd overgedaan om zeker te zijn van de betrouwbaarheid ervan ; tevens vermeldt hij alle *variaties* die werden ingevoerd, zowel van het traject van de bal als van de inclinatie van het vlak ; tenslotte legt hij tot in detail uit welke voorzorgen genomen werden om een nauwkeurige *meting* van de tijd te bekomen.

Heel even wordt ook opgemerkt dat de resultaten van het experiment reeds vooraf door de theorie waren voorspeld ; hier komt dus dit ander belangrijk aspect van het moderne experiment naar voor : dat het *gepland* wordt in functie van een *theorie* en er derhalve een *test* van is.

Er valt dus niet aan te twijfelen dat Galilei als eerste de essentie van zijn methode zoniet heeft verwoord, dan toch impliciet begrepen ; ook bij de

(11) GALILEI, *Opere*, Firenze, 1968 vol VI, p. 232.

(12) GALILEI, *Two new sciences*, p. 178-179.

overige experimenten die hij heeft verricht en de vele die hij heeft gesugereerd, vindt men dezelfde kenmerken. Anderzijds is het opmerkenswaardig dat hij dat alles zo vanzelfsprekend achtte dat hij niet de indruk had dat het expliciet in een methodologie moest geformuleerd worden.

Het is gemakkelijk aan te tonen dat hij zich in dit laatste punt heeft vergist : Descartes, en de meeste rationalistische denkers, zijn er niet in geslaagd de decisieve betekenis van de nieuwe methode te begrijpen : zo komen ze tot een kennistheorie en methodologie die eigenlijk een aanzienlijke stap achteruit betekenen.

2. Het geval van DESCARTES (1596-1560) is in dit opzicht bijzonder revelerend omdat hij nagenoeg door dezelfde historische situatie bepaald werd als Galilei (slechts één generatie verschil), en tevens gelijkaardige theoretische achtergronden had : hij was even vertrouwd met de scholastiek en evenzeer wiskundige, wellicht genialer dan Galilei ; ook hij is doordrongen van de nieuwe geest die wil breken met de autoriteit en reële kennis opdoen. Toch is zijn inzicht in het wezen van de nieuwe wetenschap duidelijk verschillend.

Galilei heeft de taal van het universum leren kennen (de wiskunde) en zal nu vragen stellen in die taal en het antwoord afwachten. Descartes is daar niet mee tevreden ; door een reflectie op het wezen van de deductieve wiskunde meent hij dat niet alleen de taal maar ook de inhoud van wat gezegd wordt door het subject a priori kan worden geponoerd. Deze zienswijze is niet alleen op de wiskunde maar evenzeer op de natuurkunde toepasselijk. De laatste verklaringsbeginselen moeten door het subject autonoom kunnen gevonden worden en de concrete gegevens uit deze principes gededuceerd. Men kan de situatie ook als volgt verhelderen : Archimedes zag het empirisch aspect van zijn statica niet, omdat het inderdaad gering was ; Galilei beseft spontaan dat hij voor de mechanica op het actieve experiment beroep moet doen — zonder dit nochtans in zijn methodologie te beklemtonen — ; Descartes daarentegen is blijkbaar zo door het deductief aspect van de wiskunde geobsedeerd dat hij zelfs in de mechanica de manifeste rol van het experiment niet inziet.

Het zou overdreven zijn te beweren dat Descartes de betekenis van de actieve en passieve ervaring helemaal uitschakelt. Integendeel, men kan wijzen op het slot van Regula V waar hij het heeft tegen « ... Philosophi qui neglectis experimentis veritatem ex proprio cerebro, quasi Iovis Minervam, orituram putant »⁽¹³⁾. Toch is er een onmiskenbaar verschil tussen de benaderingswijze van Galilei en Descartes. Voor Galilei is er een directe overbreekbare band tussen de mathematische modellen die hij gebruikt

(13) DESCARTES, RENÉ, *Regulae ad directionem ingenti*, uitg. Le Roy, Parijs, 1933, pp. 43-44.

en de concrete gegevens die hij moet verklaren ; het model dient om exacte relaties te formuleren tussen de variabelen die in een bepaald studieobject optreden. Daardoor kan het model de onderzoeker tot zeer gedetailleerde experimenten dwingen. Bij Descartes speelt wiskunde helemaal niet dezelfde rol. Wat hem vooral getroffen heeft is het indrukwekkend deductief gebouw dat de wiskunde te zien geeft en waarbij men, uit enkele axioma's vertrekend, het ganse systeem kan ontwikkelen. De fysica wil hij *analoog* zien aan de daar gebruikte werkwijze : eveneens een totaalsysteem, vertrekkend van enkele beginselen waaruit de rest kan verklaard worden. Deze beginselen zijn volgens hem van mechanische aard en het beeld van de wereld moet dus een deductieve mechanica zijn. Zijn fysica wil dus niet in de eerste plaats gedetailleerd en exact zijn, maar een *totaalfysica* met laatste oorzaken ; dit heeft voor gevolg, paradoxaal genoeg, dat het in de eerste plaats een *mechanistische* eerder dan een *mathematische* fysica is, en tevens dat het typisch Galileiaanse experiment er moeilijk een plaats vindt. Op dit gebied is zijn kritiek op Galilei in een brief aan Mersenne zeer illustrerend : hij vindt het wel positief dat Galilei de fysische objecten op wiskundige wijze onderzoekt, maar voegt er onmiddellijk het verwijt aan toe : « sans avoir considéré les premières causes de la nature, il a cherché des raisons de quelques effets particuliers et ainsi il a bâti sans fondements ». Dit wat de geniale innovatie van Galilei was, vindt Descartes het essentieel gebrek ! Als Galilei over zwaarte nadenkt, zoekt hij welke variabelen met elkaar in relatie staan, stelt een wiskundige hypothese hiervoor op en gaat die dan testen ; Descartes wil eerst weten *wat zwaartekracht is* ⁽¹⁴⁾. Men merkt op dat Descartes hier nog altijd vasthangt aan de *Aristotelische* denkwijze die vooral de « eerste oorzaken » wil opzoeken, een onderzoek waarover Galilei zich met superieure humor had uitgelaten als iets wat voor hem, simpele ambachtsman, te moeilijk was ⁽¹⁵⁾. De wijziging die Descartes aan de Aristotelische benadering aanbrengt is natuurlijk dat hij het oude begrip schema vervangt door een mechanisch model waarin quasi-wiskundige deductie mogelijk is. Bij de werkelijke constructie van dit model zal hij zich opnieuw door Aristotelische misvattingen laten leiden. Zo denkt hij dat men het voor opstellen van de eerste principes niet op gedetailleerde experimenten moet beroep doen maar zich eerder laten leiden door de alledaagse « empeiria » ! Het enige dat hij van Galilei schijnt geleerd te hebben, is het inzicht dat het niet mogelijk is de zeer concrete verschijnselen a priori te voorspellen ; hij legt dit uit door op te merken dat de algemene verklaringsbeginselen ver-

(14) Cfr. ENRIQUES, F., *Descartes et Galilée*, in : *Études sur Descartes*, Parijs, Colin, 1937, vooral p. 231.

(15) GALILEI, *Two new sciences*, p. 194.

schillende concrete realisaties kunnen voor gevolg hebben : het experiment moet dan uitmaken welke van de voorgestelde concrete modellen zich werkelijk voordoet : het is dus een typisch « *experimentum crucis* » en op dit gebied komt Descartes zeker niet boven het niveau van Bacon van wie deze term afkomstig is. Deze opvatting over het experiment vindt men in het zesde deel van de *Discours de la Méthode* (1637) : « Même je remarquais, touchant les expériences, qu'elles sont d'autant plus nécessaires qu'on est plus avancé en connaissance : car, pour le commencement, il vaut mieux ne se servir que de celles qui se présentent d'elles mêmes à nos sens, et que nous ne saurions ignorer, ... que d'en chercher de plus rares et étudiées... ». Verder : « Puis, lorsque j'ai voulu descendre à celles (*causes*) qui étaient plus particulières il s'en est tant présenté en moi de diverses, que je n'ai cru qu'il fut possible à l'esprit humain de distinguer les formes ou espèces de corps qui sont sur la terre d'une infinité d'autres qui pourraient y être ... si ce n'est qu'on vienne au devant des causes par les effets, et qu'on se serve de plusieurs expériences particulières » (16).

3. De onmacht van de rationalistische denkers van de 17^e eeuw om de experimenten ten volle naar waarde te schatten, komt eveneens tot uiting bij MALEBRANCHE (1638-1715) die lange tijd meende dat ze alleen moesten dienen als demonstratie voor zwakkere geesten die niet in staat zijn de strengheid van het deductief betoog te volgen (17). De beste illustratie van dit onbegrip vindt men echter bij SPINOZA (1632-1677) van wie een interessante briefwisseling met ROBERT BOYLE (1627-1691) over dit onderwerp bewaard is (18). Ook Spinoza vertrekt van een mechanistische opvatting, in duidelijke tegenstelling met het Aristotelisme : men kan de natuur niet verklaren bij middel van *begrippen* die ontleend zijn aan het populair woordgebruik of aan de *zintuiglijke* verschijningwijzen, maar alleen door *zuivere noties* die de natuur weergeven zoals ze in zichzelf is, zoals beweging, rust, en de wetten hierover. Boyle kan daar in principe mee akkoord gaan, maar vindt dat het werk dan pas begint. Men moet deze mechanische structuur via het *experiment* onderzoeken. Spinoza verwondert zich over dit laatste : hij is ervan overtuigd dat de uiteindelijke mechanische grondslagen voor onze verklaringen zich op zulk een microscopisch niveau bevinden dat de ervaring hier onmogelijk toegang kan krijgen ; slechts strenge deductie

(16) DESCARTES, R., *Discours de la méthode, Œuvres*, publ. par Adam et Tannery, Paris, 1902, vol. VI, p. 63

(17) Cfr. ROBINET, A., *Du rôle accordé à l'expérience dans la physique de Malebranche*, in *L'aventure de l'esprit, Mélanges Alexandre Koyré*, Parijs, Hermann, 1964, II, pp. 400-410.

(18) Cfr. RUPERT, A., en BOAS HALL, M., *Philosophy and natural Philosophy : Boyle and Spinoza*, in : *L'aventure de l'esprit, Mélanges Alexandre Koyré*, Parijs, Hermann, 1964, II, pp. 241-256.

vanuit basisprincipes kan een oplossing brengen. In dit verband maakt hij weer de vergissing van Descartes door te menen dat, als men toch empirie moet binnenbrengen, deze niet op complexe experimenten moet berusten maar eerder op zeer *algemene ervaringen* ⁽¹⁹⁾. Het contrast tussen de twee voornaamste denkwijzen van de 17^e eeuw wordt zeer duidelijk als men vaststelt dat Spinoza blijkbaar tevreden is als hij kan aantonen *dat* alles volgens bepaalde grondprincipes kan verklaard worden, terwijl Boyle er voortdurend op uit is te weten *hoe* het in detail moet verklaard worden en of de mechanistische interpretatie wel met de experimentele feiten klopt. Spinoza drijft dus de rationalistische wetenschapsvisie op de spits door bijna alle interesse voor de concrete feiten te verliezen, terwijl Boyle zo sterk naar de andere pool overhelt dat hij de eerste wordt die expliciet en uitvoering over het *experimenteel* aspect van de nieuwe methode uitweidt. Eén van de eerste luciede inzichten die hem reeds onmiddellijk van de rationalisten onderscheidt, is zijn opvatting over het verschil tussen *alledaagse ervaring* en experiment. Tegen Spinoza, die daar geen oog voor heeft, merkt hij op : « there is a great difference between ordinary experiments, where we do not know what nature contributes and what other factors intervene, and those experiments where it is known for certain what these factors are » ⁽²⁰⁾.

Dit is de eerste maal dat de waarde van het experiment voor het afzonderen van de significante variabelen op duidelijke wijze wordt geformuleerd. Een tweede even belangrijk inzicht waardoor hij zich opnieuw van de rationalisten distantieert, is zijn nadruk op het *activiteitsaspect* en de relatie tussen experiment en natuurbeheersing. « There are two distinct ends that men may propound to themselves in studying natural philosophy. For some men care only to know nature, others desire to command her... » ⁽²¹⁾. Hij voegt daaraan toe dat de Cartesiaanse principes vooral voldoen aan degenen die speculatieve neigingen hebben en kennis van de oorzaken verlangen ; de andere soort mensen, die de natuur willen beheersen, streven hun doel na door experimenten en observaties te doen : zo leren ze hoe ze de wijzigingen kunnen aanbrengen in de kwaliteiten van de voorwerpen die ze bestuderen en die ook ten nutte maken in het leven. De invloed van de technologie op de evolutie van de wetenschap is voor hem zonneklaar : degenen die met magneet en kompas experimenten deden, hebben volgens hem meer gerealiseerd voor het mensdom dan alles wat ooit werd gedaan door Leukippos,

(19) Cfr. RUPERT, a.c. p. 246.

(20) Cfr. *ibidem*, p. 252.

(21) Boyle's opvatting over het experiment ligt het duidelijkst geëxpliciteerd in zijn tractaat van 1661 : *In defense of experimental essays* ; men vindt het in : BOAS HALL, M., *Robert Boyle on natural philosophy*, Bloomington, Indiana U.P., 1965, pp. 119-131 ; de geciteerde passage : p. 127.

Epikouros, Aristoteles of Telesius van Campanella, zonder dat ze hierbij een notie hadden van de eerste oorzaken van de magnetische fenomenen. Als derde centrale stelling kan men zijn wantrouwige houding tegenover *theorieën* vermelden. Hij levert een vinnige kritiek op degenen die met een theorie de ganse natuur willen verklaren maar niet eens notitie nemen van het tiende deel van de fenomenen die ze willen uitleggen. Wel geeft hij toe dat men moet redeneren over de experimenten, maar men moet zich onthouden van het opstellen van een theorie als men niet een aantal experimenten gedaan heeft dat enigzins in verhouding is met de omvang van het systeem dat men wil opbouwen ⁽²²⁾.

We staan hier voor het merkwaardig fenomeen van een man die er door zijn controverse met de rationalisten toe gebracht wordt als eerste enkele basiskarakteristieken van het experiment glashelder te formuleren en op de onvervangbare rol ervan te wijzen, terwijl dezelfde controverse er hem toe drijft bijna in de tegenovergestelde fout van zijn opponenten te vervallen. Hoewel hij evenals Galilei een uitstekende experimentator was en evenzeer met mathematische modellen werkte, legt hij zijn bij methodologisch overzicht al te weinig de nadruk op het mathematisch en theoretisch aspect van de experimentele methode. Volgens zijn methodologie — niet volgens zijn concrete werkwijze — staat het experiment zo los van de planificerende en voorspellende theorie dat het gemakkelijk in het « trial and error »-experiment zou kunnen overslaan, dat typisch is voor de techniek. Ook Boyle blijkt dus niet tenvolle begrepen te hebben waarin de ware kracht van het Galileaanse experiment bestond. Dit hoeft ons helemaal niet te verwonderen ; de werkwijze van de nieuwe fysica week op zoveel punten van de traditionele scholastische methodes af dat het uiterst moeilijk was het essentiële van het bijkomstige te onderscheiden. De rationalisten waren gefascineerd, deels door het mathematisch apparaat, deels ook door de pogingen van de fysici om alle fenomenen vanuit een mechanistische grondslag te verklaren ; geboeid door deze nieuwe kans tot totaalverklaring waren ze blind voor het feit dat de theorie stap voor stap met exact waargenomen feiten moet kunnen in verband gebracht worden. De fysici die de praktijk van het experimenteel werk kenden — vooral zij, die, zoals Boyle, zich niet tot het strict fysische domein beperkten maar ook in randgebieden aan onderzoek deden — werden zich met de jaren meer bewust van de doorslaggevende rol die het actief experiment speelde, en waren hierdoor geneigd het belang van de wiskundige of theoretische pool te onderschatten.

4. In de tweede helft van de 17^e eeuw was de situatie op methodologisch gebied dus helemaal nog niet duidelijk en er was het genie van NEWTON

(22) BOAS HALL, o.c., pp. 123-124.

(1643-1727) nodig om een synthese van fysica en astronomie te brengen, waarin zowel het mathematisch kader als het experimenteel materiaal op volkomen evenwichtige wijze verenigd zijn. Door zijn resolute opvatting van de fysica als een mathematische theorie, distancieert hij zich ondubbelzinnig van een beperkt empiristisch en blind experimenteren, maar toch krijgt het experiment zijn volle betekenis doordat het zich bij hem — zoals bij Galileï — als een noodzakelijke eis voordoet voor een theorie die direct de empirische gegevens moet beschrijven. Door zijn « hypotheses non fingo » wil hij klaarblijkelijk niet het belang van de theorie in twijfel trekken, maar wel wil hij een eind stellen aan de bespiegelingen van rationalisten die een deductief gebouw willen optrekken zonder enige voeling met de werkelijkheid. Wat de kern de zaak van betreft, heeft Newton dus het werk van Galileï opnieuw overgedaan maar ditmaal met zulk een vloed van empirisch materiaal en daarnaast zulk een machtig mathematisch apparaat, dat zowel het theoretisch als het experimenteel karakter van de nieuwe wetenschap nu voor iedereen tenvolle kan duidelijk worden.

5. De methodologische formulering van deze werkwijze heeft Newton — behoudens enkele schaarse opmerkingen — grotendeels aan anderen overgelaten en het is uiteindelijk IMMANUEL KANT (1724-1804) die er wellicht voor de eerste maal in slaagt op heldere en evenwichtige wijze de essentiële karakteristieken van het Galileaanse experiment te formuleren in de *Vorrede* tot de tweede uitgave van de *Kritik der reinen Vernunft*, in 1787, honderd jaar na Newton's « *Philosophiae naturalis principia mathematica* » (1687).

« Als Galilei seine Kugeln die schiefe Fläche mit einer von ihm selbst gewählten Schwere herabrollen, oder Torricelli die Luft ein Gewicht, was er sich zum voraus dem einer ihm bekannten Wassersäule gleich gedacht hatte, tragen liess, oder in noch späterer Zeit Stahl Metalle in Kalk und diesen wiederum in Metall verwandelte, indem er ihnen etwas entzog und wiedergab; so ging allen Naturforschern ein Licht auf. Sie begriffen, dass die Vernunft nur das einsieht, was sie selbst *nach ihrem Entwurfe* hervorbringt, dass sie mit Principien ihrer Urteile nach beständigen Gesetzen vorangehen und die *Natur nötigen müsse auf ihre Fragen zu antworten*, nicht aber sich von ihr allein gleichsam am Leitbände gängeln lassen müsse; denn sonst hängen zufällige, nach keinem vorher entworfenen Plane gemachte Beobachtungen gar nicht in einem notwendigen Gesetze zusammen, welches doch die Vernunft sucht und bedarf. Die Vernunft muss *mit ihren Principien*, nach denen allein übereinkommende Erscheinungen für Gesetze gelten können, in einer Hand, *und mit dem Experiment*, das sie nach jenen ausdachte, in der anderen, an die Natur gehen, zwar um von ihr belehrt zu werden, aber nicht in der Qualität eines Schülers, der sich alles vorsagen lässt, was der Lehrer will, sondern eines bestellten Richters, der die Zeugen nötig auf

die Fragen zu antworten, die er ihnen vorlegt. Und so hat sogar Physik die so vorteilhafte Revolution ihrer Denkart lediglijk dem Einfalle zu verdanken, demjenigen, was die Vernunft selbst in die Natur hineinlegt, gemäss, dasjenige in ihr zu suchen, (nicht ihr anzudichten), was sie von dieser lernen muss, und wovon sie für sich selbst nichts wissen würde. Hierdurch ist die Naturwissenschaft allererst in den sicheren Gang einer Wissenschaft gebracht worden, da sie so viel Jahrhunderte durch nichts weiter als ein blosses herumtappen gewesen war ». (Onderstreept door ons) ⁽²³⁾

Wanneer Kant zegt dat voor alle natuurvorsers plots een licht opging, dan is dit natuurlijk overdreven ; integendeel, we hebben gemerkt dat dit « licht », dat inderdaad sinds Galilei in feite aanwezig was, slechts langzaam de duisternis heeft kunnen overwinnen en dat het nog decennia geduurd heeft voor het volle inzicht op werkelijk bevredigende en algemene aanvaarde wijze kon doorbreken.

Meer dan eender welke argumentatie toont deze langzame bewustwording aan dat de moderne experimentele methode niet pasklaar uit het brein van een of meerdere geniale methodologen gesproten is, maar eerder het resultaat is van een complexe interne ontwikkelingsgang van de fysica zelf, die slechts door interactie van verschillende factoren werd voltooid en pas daarna het voorwerp van bewuste reflectie en explicatie kon worden.

BESLUIT

Hoewel het waar is, wat Kant zegt, dat de mens nu een stadium bereikt heeft waarin hij de natuur dwingt op zijn vragen te antwoorden, dan is het evenzeer waar, dat hij deze werkwijze niet vanzelf gevonden heeft maar er eveneens door de natuur der dingen zelf toe gedwongen werd. De normale mens is blijkbaar een betrekkelijk zelfgenoegzaam wezen en we stellen voortdurend in de loop van de geschiedenis vast dat hij rustig vertrouwt op zijn gewone levenservaring en zijn alledaagse evidenties, zolang er niet een speciale prikkel aanwezig is die hem dwingt een stap verder te zetten en aan *actief* onderzoek te doen. Het is, hopen wij, uit deze studie gebleken, dat deze « doorn in het vlees » die tot experiment noopt, van tweeërlei aard kan zijn. Men vindt die vooreerst in de *technologie* waar het levensnoodzakelijk is een voorwerp te produceren dat zo goed mogelijk aan de eisen van bruikbaarheid voldoet. Ongetwijfeld is het « experiment » dat hier steeds aanwezig is, met het typisch karakter van « gissen en missen », een uiterst belangrijke motor van de vooruitgang geweest. Het blijft nochtans onloochenbaar dat

(23) KANT, I., *Kritik der reinen Vernunft*, herausg. Adicke, Berlin, Mayer en Müller, 1889, pp. 17-18.

het resultaat van deze bemoeiingen veeleer als *kunde* of kunst dan als *kennis* moet beschouwd worden.

Kennis en wetenschap ontstaan pas dan, wanneer men over een medium beschikt waarin de informatie die via de ervaring wordt opgedaan, op betrouwbare en blijvende wijze kan opgeslagen worden. Het is immers evident dat er weinig overdracht van het geleerde aan volgende generaties mogelijk is, en dus ook weinig *cumulatiemogelijkheid*, wanneer ieder individu en iedere generatie telkens opnieuw dezelfde leerprocessen moeten doorlopen om met de natuur vertrouwd te geraken. De alledaagse *taal*, waarover we beschikken, is, zoals men weet, een eerste substraat waarin een aantal ervaringen kunnen gecodeerd worden en dit is natuurlijk de grondslag waarop alle cultuuroverdracht — en dus cumulatie — gebaseerd is (afgezien van de uitbreiding van de materiële cultuur die het gevolg is van de technologie).

De merkwaardige vaststelling die we in ons historisch overzicht gedaan hebben, komt nu hierop neer dat de alledaagse taal wel een middel verschaft om kennis op te slaan, maar dat zij geen enkele dwang uitoefent op de wijze waarop men deze kennis verzamelt. In tegenstelling met de *technologie*, die tot voortdurende verbetering van de *productietechnieken* aanspoort, speelt de alledaagse taal in de evolutie van de kennis een hoofdzakelijk passieve rol en dwingt de denker helemaal niet tot verbetering van zijn *observatietechnieken*. Het blinde vertrouwen op de « empeiria », waarop we herhaaldelijk moesten wijzen, hangt hier ten nauwste mee samen.

Wanneer nu noch de alledaagse taal, noch de technologie de zoekende mens in de richting van de experimentele methode stuwen, moest een nieuwe factor gezocht worden die als katalysator hiervoor kon optreden (wanneer men althans niet in de mythe van het bovenmenselijk genie wenst te geloven).

Het is de thesis van dit artikel dat de invoering van de *wiskundige taal* aan de basis ligt van de ontwikkeling van het *volwaardig experiment*. Zonder hierbij te willen loochenen dat ook andere elementen noodzakelijk aanwezig moesten zijn, lijkt het ons toch van decisieve betekenis dat de wiskundige taal (en theorie) door haar extreme *precisie in de formulering* hierin van de gewone taal verschilt, dat ze niet zo maar op de werkelijkheid kan worden toegepast, maar dat dit alleen mogelijk is, als men de *gegevens* die beschreven worden tot *dezelfde nauwkeurigheid dwingt*. De onderzoeker wordt dus verplicht zijn alledaags discriminatievermogen door speciale technieken aan te vullen. Dit is een eerste stap naar het experiment. Een tweede stap is het gevolg van die eigenschap van wiskundige theorieën dat men er met dezelfde nauwkeurigheid voortdurend *algemene wetten* formuleert: dit zal de wetenschapsmens ertoe brengen controle en variatie op zijn gegevens uit te voeren. Dit alles lijkt a priori evident; blijft slechts het probleem hoe men ertoe komt deze abstracte taal inderdaad op de werkelijkheid

toe te passen, en op de *ganse* werkelijkheid. Om de evolutie van dit proces inzichtelijk te maken, hebben we moeten aantonen hoe men eerst, zonder merkbare overgang, aan de meetkunde de *statica* en de *optica* toevoegt, en hoe de uitbreiding van technologie en wiskunde in de 16^e eeuw het mogelijk maakte uiteindelijk naar de *mechanica* over te gaan, waar dan voor het eerst alle belangrijke aspecten van het moderne experiment gemanifesteerd worden.

Ons laatste deel, waarin de eerste methodologische reflecties werden onderzocht, getuigt ervoor dat, zelfs na deze ontdekking, het inzicht in het belang ervan slechts moeizaam tot explicatie kon komen. Wellicht zouden argumenten voor en tegen de nieuwe methode nog lang het voorwerp van controverse tussen grote geesten geweest zijn, wanneer niet de overweldigende resultaten het pleit definitief hadden beslecht. Men kan het een overdreven pessimisme noemen t.a.v. de menselijke denkkraft, maar we krijgen de indruk dat hetgeen de motor van de technologische ontwikkeling is, nl. de bruikbaarheid en het succes, ook hier tot de uiteindelijke doorbraak heeft geleid.

Etienne VERMEERSCH