

# ERFGOED BRUSSEL



Een publicatie van het Brussels  
Hoofdstedelijk Gewest



DOSSIER  
DE KUNST VAN HET BOUWEN

N°003 - 004  
SEPTEMBER 2012



SPECIAAL NUMMER  
OPEN MONUMENTENDAGEN  
BRUSSELS HOOFDSTEDELIJK GEWEST



# De eeuw van de kathedralen

## DE GOTISCHE VERNIEUWING

PIERRE HALLEUX

Prof. dr. ir. emeritus hoogleraar van de  
Université libre de Bruxelles

De gotische bouwkunst ontstond in de 12de eeuw in West-Europa en ging gepaard met ingrijpende technische innovaties wat betreft de bouw van zowel religieuze als civiele of militaire gebouwen.

De grote restauratiecampagnes die hieronder worden besproken, geven een goed beeld hiervan en laten ook toe om de verspreiding van de technische kennis onder de loep te nemen. Wat we het meest associëren met deze bouwkunst is de ontwikkeling van het kruisribgewelf, maar daarnaast vormde het gebruik van ijzer om het stenen metselwerk te verstevigen eveneens een grote technische stap voorwaarts. De spits van de toren van het Brusselse stadhuis is op dit vlak een middeleeuws huzarenstukje.

**D**e 'eeuw van de kathedralen' is een betrekkelijk kort tijdvak in de middeleeuwen, een periode van ongeveer 140 jaar waarin overal in West-Europa bijzonder prestigieuze religieuze gebouwen oprezen. In deze periode, van de vroeg- tot de hooggotiek, vonden de meeste technologische vernieuwingen ingang. De bouwactiviteit was zo intensief dat het gebruikte volume stenen volgens sommigen dat van de grootste Egyptische bouwwerken overtrof.

De bloei van de gotische architectuur valt samen met nieuwe behoeften, ontstaan uit een bevolkingstoename gekoppeld aan de ontwikkeling van de landbouw en een bijzonder gunstig klimaat, dat de landelijke bevolking in staat stelde voor iedereen het noodzakelijke te produceren, terwijl anderen hun kans gingen wagen in de stad.<sup>1</sup> Het was een periode van stedelijke ontwikkeling. Eind 13de eeuw keerde het tij en in de 14de eeuw werd de toestand ronduit dramatisch. Het klimaat verslechterde: late vorst vernielde de jonge scheuten en teisterde de fruitoogst, regen en najaarsstormen vernielden de graanoogst en er heerste hongersnood, te meer daar ook de winters strenger werden. In westelijk Europa barstten nieuwe gewapende conflicten los en al snel brak

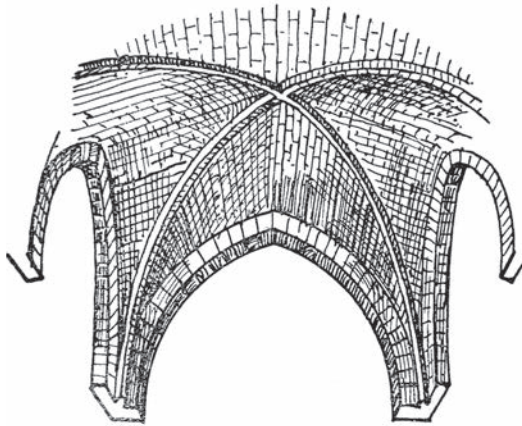
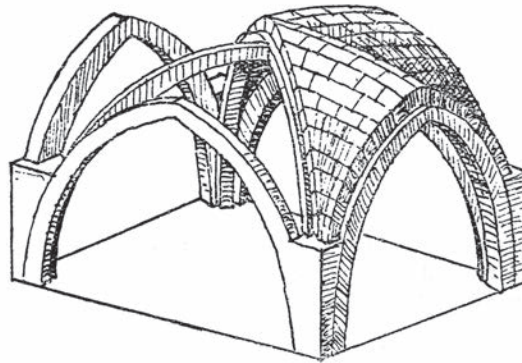
Beeld van de Heilige Michiel dat in 1993 voor restauratie van de toren van het Brusselse stadhuis werd gehaald (A. de Ville de Goyet ©MBHG).

de Honderdjarige Oorlog uit, met alle plunderingen en vernielingen van dien. Ook de grote pestepidemieën waarvan Europa al een tijdlang gespaard was gebleven, keerden weer. Er heerste een economische crisis, met een hollende inflatie die een bruuske rem zette op elke investering in de bouw.

Louter conventioneel bekeken zijn er twee historische feiten die deze periode afbakenen. De gotische architectuur zette haar eerste stappen omstreeks 1140 met de bouw door abt Suger van de abdijkerk van Saint-Denis, waar voor het eerst kruisribgewelven werden gebruikt. En in 1272 werd het koor van de Sint-Pieterskathedraal van Beauvais afgewerkt; de hoogte van 48 m tot aan de sluitsteen vestigde het absolute record, bijna het dubbele van de Sint-Michiël-en-Goedelekathedraal in Brussel. In 1284 stortte het koor gedeeltelijk in, een feit dat grote indruk maakte maar in wezen slechts een randverschijnsel was dat samen viel met het einde van een tijdperk.

De voornaamste technische vernieuwingen waren het resultaat van nieuwe opvattingen of aanpassingen of vloeiden voort uit de herontdekking van vergeten bouwtechnieken. De namen van bouwers hebben ons zelden bereikt. Een uitzondering hierop is die van Jan Van Ruysbroek, bouwmeester van de toren van het stadhuis en van het koor van de collegiale kerk Sint-Pieter-en-Guido in Anderlecht, die ook meewerkte aan de torens van de Sint-Michiels-en-Sint-Goedelekathedraal.

De gotische stijl onderging later nog tal van grote veranderingen, onder meer in de meesterwerken van onze Brabantse gotiek. Aan sommige bouwwerken werd heel lang gewerkt, zoals de dom van Milaan, die pas onder Napoleon werd voltooid, of de kathedraal van Keulen, afgewerkt omstreeks 1880. Dankzij hun vernieuwende ideeën werden de bouwmeesters van deze latere bouwplaatsten ook 'kathedralenbouwers', net als hun middeleeuwse voorgangers.



**Afb. 1a en 1b**

Uitleg over de gotische bouwwerken (Des MAREZ, G., *Traité d'architecture dans son application aux monuments de Bruxelles*, tekeningen van G. Rosenberg, Brussel, 1921, p. 69-70).

## HET KRUISRIBGEWELF

Het eerste belangrijke element uit de gotische architectuur is de introductie van het kruisribgewelf\* (afb. 1a en 1b). Dit was de opvolger van het romaanse kruisgewelf, de snijding van twee tongewelven\*<sup>2</sup>, diagonaal en volgens twee ellipsbogen die men toen nog niet correct kon tekenen - men verving ze door cirkelbogen. Deze diagonale bogen, die spitsbogen werden genoemd, worden dus verkeerdelijk als puntbogen beschouwd: enkel de gordelbogen en schildbogen zijn gepunt, de diagonale 'spitsboog' is wel degelijk cirkelvormig.

Elk gewelf, ongeacht zijn geometrie, heeft de neiging af te platten en op zijn dragers een intense horizontale druk

naar buiten uit te oefenen, zijdelingse druk\* genoemd. Het romaanse tongewelf oefent deze druk uit over de hele lengte van de gootmuren\*. Dit soort gewelf vereist dus dikke muren waarvoor veel materiaal nodig is, die niet te hoog zijn en die bescheiden muuropeningen hebben, zodat een betrekkelijk duister gebouw ontstaat. De druk verloopt anders in het geval van een kruisribgewelf. Dit gewelf rust op de hoekpijlers van de vierkante of rechthoekige tussenruimte. Het eigen gewicht van het gewelf dat op de kop van de pijler drukt, wordt, afhankelijk van het geval, verlicht of verhoogd door de werking van de luchtboog\*. De buitenwaartse krachtcomponent van de zijdelingse druk van het gewelf (horizontale werking),



**Afb. 2**

Gevels van het dwarschip, met glas-in-loodramen, en luchtbogen van de Sint-Michiels-en-Sint-Goedelekerk. Detail van een miniatuur (Getijdenboek van Margaretha van York © KBR, Kostbare Werken).



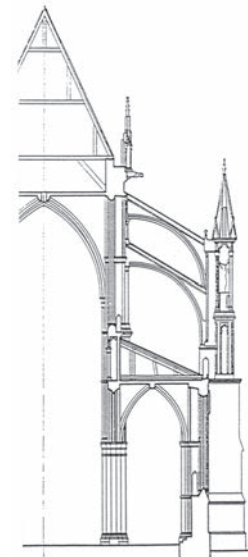
**Afb. 3**

Anoniem, triptiek van de Vier Gekroonde Martelaren, 16de eeuw, detail (© MSB).



**Afb. 4**

In de carnets van Villard de Honnecourt zien we hoe dit ontwerp van schoring voor de kathedraal van Reims, enkele jaren voorafgaand aan de werken, te laag geplaatste onderste luchtbogen bevatte (vergelijk met afb. 5). Mocht de kathedraal zo zijn gebouwd, dan bestond ze allang niet meer (© Bibliothèque Nationale de France).



**Afb. 5**

Doorsnede van de kathedraal van Reims, een klassiek voorbeeld van een gotisch gebouw. De bovenste rij luchtbogen brengt de winddruk op het dak naar de steunberen over, terwijl de onderste rij luchtbogen de zijdelingse druk naar de ruimte binnen het gewelf overbrengt.

die min of meer maar niet exact in de richting van de diagonale boog wordt uitgeoefend, wordt via de luchtboog overgebracht naar een steunbeer buiten het gebouw, terwijl zijn longitudinale drukcomponent in evenwicht wordt gebracht door de tegendruk van de aanpalende travee. De muren hadden dus niet langer een dragende functie en konden worden voorzien van brede muuropeningen met glas-in-loodramen, die de binnenzijde van het voorheen duistere gebouw verlichtten en zo bijdroegen tot de ontwikkeling van de glas-in-loodkunst<sup>3</sup> (afb. 2).

Men is het oneens over wat aan de basis kon liggen van deze architecturale formule, die zich voor het eerst in Noord-Frankrijk begon te ontwikkelen. Tijdens de middeleeuwen was het ontwerp van dit soort gewelf uiteraard empirisch, want men beschikte niet over wetenschappelijke dimensioneringstechnieken (afb. 3, 4 en 5). Eeuwenlang is gedacht dat de stenen diagonale bogen een draagstructuur vormden en de welfvlakken\* een gewone opvulling. Pas sinds een dertigtal jaar weten we, dankzij experimentele technieken voor de analyse van de belasting en digitale methoden uit de luchtvaart, dat de krachten binnen het gewelf rechtstreeks door de welfvlakken naar de dragers worden overgebracht en dat de spitsbogen een hoofdzakelijk decoratieve functie hebben. Ze dienden echter ook als drager voor de bekisting van de welfvlakken tijdens de bouw zelf.<sup>4</sup>

#### STANDAARDISATIE VAN DE MATERIALEN

Behalve in de Nederlanden, waar natuursteen vrij schaars was en er daarom ook gebruikgemaakt werd van baksteen, was de gotische architectuur in de eerste plaats een statige stenen architectuur. De bewerking van natuursteen kende toen ook een evolutie: geleidelijk aan deden standaardisatie en het logische uitvloeisel daarvan, prefabricatie, hun intrede. Dit had ingrijpende gevolgen voor de organisatie van de gotische bouwplaats.

Als eerste ging men de breukstenen die werden gebruikt voor de vestingwerken van kastelen en steden standaardiseren. Dit breidde zich geleidelijk uit tot andere civiele bouwwerken, zodat de stenen de bouwplaats meteen in de goede afmetingen bereikten en ze ter plaatse slechts occasioneel een aanpassing nodig hadden. Hierdoor kreeg de bouwmeester een grotere organisatorische verantwoordelijkheid. De bestellingen

**Als eerste ging men de breukstenen die werden gebruikt voor de vestingwerken van kastelen en steden standaardiseren. Dit breidde zich geleidelijk uit tot andere civiele bouwwerken, zodat de stenen de bouwplaats meteen in de goede afmetingen bereikten en ze ter plaatse slechts occasioneel een aanpassing nodig hadden.**

bij de steengroeve moesten heel nauwkeurig zijn en tijdig worden geleverd om de werkzaamheden niet te onderbreken. Voor de levering moest er rekening mee worden gehouden dat het vaak lokale boeren waren die voor het transport instonden; zij waren niet altijd beschikbaar, want ze gaven voorrang aan bepaalde taken op het land, zoals oogsten. De zware ossenkarren liepen vaak vast in de modder, en men moest dus ook rekening houden met de omstandigheden waarin de leveringen plaatsvonden. Daarenboven waren grote leveringen onmogelijk vanwege de beperkte opslagruimte op de bouwplaats, die niet te veel publieke ruimte mocht afnemen van het dichte stedelijke weefsel. Tot slot moest de in de kalkoven verhitte kalksteen de tijd krijgen om te worden geblust met water, om zo de kalk\* voor de metselmortel te leveren.

De prefabricatie zelf had een grote invloed op de organisatie van het beroep. Tot dan werd de bouwploeg telkens samengesteld in het voorjaar, wanneer het weer het toeliet de werkzaamheden te hervatten. Tegen Allerheiligen bedekte men de onafgewerkte muren met mest om ze tegen de vorst te beschermen en keerde iedereen naar huis terug, soms ver weg, om zich tot aan het volgende

seizoen met andere activiteiten bezig te houden. Het bouwvak was typisch nomadisch en seizoensgebonden en men wisselde elk jaar van bouwplaats. Door prefabricatie, die ook tijdens de winter kon doorgaan, werd het bouwvak sedentair en vast.

Het gebruik van stenen van groot formaat stamde al uit de oudheid maar was aan het begin van de middeleeuwen verloren gegaan; men gebruikte breuksteen of stenen van kleiner formaat die ter plaatse in de juiste afmetingen werden gehouden. De gotische architectuur greep terug naar de stenen van groot formaat, die soms een ton wogen. Uiteraard moesten ze vooraf correct worden gehou-

wen. Dit was des te belangrijker aangezien er, vertrekkend van eenzelfde blok steen, meer afval wordt voortgebracht om een grote steen te houwen dan een reeks kleine stenen. Tijdens de romaanse periode kon dat houwafval dienen als steengruisvulling tussen de binnen- en buitenparementen van de muren, die sowieso dik moesten zijn, maar deze functie van draagmuur verdween met de komst van de gotische architectuur. Dankzij de grote blokken kon men met een beperkter materiaalvolume hoger bouwen, want het aantal mortelvoegen was kleiner, en dus ook hun samengevoegde dikte over de hele hoogte van het metselwerk. Denk aan een stapel schoolschriften en een stapel kleine woordenboeken van hetzelfde formaat: op het moment dat de stapel schriften begint te wankelen, kan de stapel woordenboeken nog hoger worden gemaakt.

Dit is heel goed merkbaar in de kathedraal van Doornik, waarvan het schip romaans is en het koor volledig gotisch. Het verschil tussen het gedrongen karakter van het schip en de elegante verhevenheid van het koor is overduidelijk, met 21 m hoogte aan de sluitsteen\* voor het schip en 33 m voor het koor. Maar het is vooral het massieve uitzicht

van het schip in vergelijking met de lichtheid van het koor dat opvalt. En toch blijkt uit onze berekeningen dat de massa materiaal die per meter travee is gebruikt, in beide gevallen nagenoeg identiek is. Enerzijds zijn er de kleine breukstenen van het romaanse schip en anderzijds de grote blokken natuursteen van het gotische schip, niet te verwarren met de stenen die gebruikt werden voor de restauratie in de 19de eeuw.

Die evolutie had ook een grote economische weerslag: men hoefde slechts een kleiner volume materiaal van de steengroeve naar de bouwplaats te vervoeren voor een gebouw van gelijke grootte, terwijl precies de transportkosten heel hoog waren, gezien de talrijke tolhuizen langs het traject, zowel over de weg als langs het water. Er is een geval bekend waarin de prijs van het materiaal zeven maal groter was geworden bij aankomst op de bouwplaats dan bij het vertrek aan de groeve...

De kleine breukstenen uit de romaanse tijd konden door de mens worden gedragen, maar voor de zware gotische stenen waren krachtige hefwerktuigen nodig. Zo werden echte draaikranen ontwikkeld waarvan de aandrijfkracht werd geleverd door een 'opvoerwiel', dat in beweging werd gebracht door mannen die in een trommel stapten. Het was alweer de bouwmeester die deze werktuigen zou bedenken en aldus de *ingeniator* werd, de man van de machines, de ingenieur. Deze geavanceerde hefwerktuigen waren overigens niet echt een innovatie uit de tijd van de kathedralen, want ze waren al tijdens de oudheid bekend maar waren nadien in vergetelheid geraakt.<sup>5</sup>

## HET GEBRUIK VAN TRAS

Op het vlak van materiaalgebruik deed men aan het einde van de 15de eeuw, tijdens de laatgotiek, een herontdekking. Tijdens de Romeinse oudheid werd in de kalkmortel al een additief gebruikt, puzzolaanaarde\*, een vulkanische as waarvan de naam is afgeleid van Pozzuoli, een stadje op de noordelijke oever van de Golf van Napels.<sup>6</sup> Dit

additief geeft de mortel een interessante eigenschap, die het 'puzzolaan-effect' wordt genoemd. Het maakt een binding onder water mogelijk die niet alleen nuttig is voor hydraulische werken, maar die ook mortels voor waterdichte terrassen oplevert, en voegen die bijzonder goed bestand zijn tegen het slechte weer in onze luchtstreken. In onze contreien begon men hiervoor geleidelijk aan tras\* te gebruiken, een vulkanische rotssteen uit de Eifel.

De eerste bekende vermelding van tras bij ons, voor zover wij weten, betreft de allereerste restauratie van de grote toren van het Brusselse stadhuis in 1499, tijdens de laatgotiek. In de stadsrekeningen bevindt zich inderdaad, naast kalk en zand, een bestelling van tras. Omdat men zich voor een dergelijk prestigieus bouwwerk wellicht niet aan een experiment zal hebben gewaagd, kunnen we ervan uitgaan dat tras zich al eerder had bewezen.

## HET GOTISCHE METAAL

Slechts iets meer dan een kwarteeuw geleden hebben we ontdekt wat ongetwijfeld de allergrootste innovatie van de gotische bouwkunst is, namelijk dat het niet alleen een stenen architectuur is, zoals ze altijd is voorgesteld, maar ook de eerste grote metalen architectuur. Metalen versterkingen waren immers onontbeerlijk, en we kunnen echt van 'gewapende steen' spreken. IJzer is overal en in enorme hoeveelheden aanwezig in de gotische architectuur, maar behalve enkele spantbalken\* die hier en daar zichtbaar zijn, en de brugijzers\* waarin de glas-in-loodramen gevat zijn, zit het metaal weggestoken in het metselwerk zelf.

Dit metaal kwam slechts aan het licht tijdens de ingrijpende demontages waarmee de zware restauratiewerken gepaard gingen. In de 19de eeuw verwees Eugène Viollet-le-Duc naar het bestaan en het nut ervan, zonder zich echter de enorme massa metaal die nu

wordt ontdekt te kunnen voorstellen.<sup>7</sup> Dat het zolang geduurd heeft voordat de aanwezigheid van al dit metaal duidelijk werd, komt doordat het opsporen ervan niet altijd makkelijk is. Slechts in uitzonderlijke gevallen maakt men gebruik van radiografie, zoals voor het gewelf van het *Panthéon* in Parijs. Steen vereist vanwege zijn dikte een intense straling met heel lange belichtingstijden van verscheidene uren en is dus schadelijk voor het milieu. Doordat de bestudeerde zones doorgaans enkel via steigers bereikbaar zijn, wordt de klassieke detectie met een metaaldetector verstoord door de nabijheid van de steigerbuizen.

We kunnen gerust stellen dat de bloei van de grote kathedralen slechts mogelijk is geweest dankzij de ontwikkeling van de metaalnijverheid. Tot dan was ijzer te duur om op grote schaal in de architectuur te worden gebruikt. De laagoven produceerde bij elke bewerking een ijzerspons van ten hoogste enkele kilo's, die nadien langdurig manueel moest worden gesmeed. Hier en daar werd ijzer al in de bouw toegepast, maar het metaal werd vooral gebruikt voor wapens. De uitvinding van de hoogoven, die bij elke bewerking niet enkele kilo's maar enkele tientallen kilo's ijzer produceerde,

**IJzer is overal en in enorme hoeveelheden aanwezig in de gotische architectuur, maar behalve enkele spantbalken die hier en daar zichtbaar zijn, en de brugijzers waarin de glas-in-loodramen gevat zijn, zit het metaal weggestoken in het metselwerk zelf.**

bracht een grote verandering teweeg. Daarbij kwam dat de cisterciënzerorde in westelijk Europa een enorme uitbreiding kende. De cisterciënzers stonden bekend om hun uitzonderlijke beheersing van het water, en dus van de waterkracht: de molens drevan de blaasbalgen aan die nodig waren voor zowel de oven als de smidse, en de valhamer\* verving de arm van de mens bij het smeden. De kostprijs van het metaal daalde sterk en het gebruik ervan in de architectuur kon worden veralgemeend.

## LEERRIJKE RESTAURATIES

Er worden vandaag talloze ontdekkingen gedaan. We beperken ons dan ook tot enkele specifieke gevallen die het belang van ijzer aantonen: de kathedraal van Beauvais<sup>8</sup>, het eerste grote gotische bouwwerk waarvoor op dat gebied een gedetailleerd onderzoek werd ontwikkeld, en twee bouwplaatsen waarbij ikzelf betrokken was, namelijk de grote toren van het Brusselse stadhuis<sup>9</sup> en de kathedraal van Doornik<sup>10</sup>.

De kathedraal van Beauvais is een uitstekend voorbeeld (afb. 6). In Beauvais zijn de steunberen\* uitzonderlijk rijzige stenen platen, die met smeedijzeren spantbalken met elkaar waren verbonden. In 1982 constateerde de hoofdarchitect voor historische monumen-

**In de grote toren van het Brusselse stadhuis heeft de verregaande restauratie tussen 1987 en 1997 een ongelooflijke hoeveelheid metaal aan het licht gebracht dat in het metselwerk was ingewerkt.**

ten roestvorming aan de uiteinden van de staven, op de plaats waar ze de steen binnendrongen. Dit kan makkelijk worden verklaard, want dit is de ideale zone voor condensatie van het vocht. Het roest tastte uiteraard ook de steen aan. Maar de spantbalken zakten door onder hun eigen gewicht en men kan met het blote oog zien dat ze niet opgespannen waren: ze waren dus zowel gevaarlijk als ondoeltreffend en men besliste ze te verwijderen.<sup>11</sup> Kort nadien, tijdens een sterke windvlaag - volgens Météo France ligt Beauvais in een bijzonder winderige streek - bemerkte de opzichter van de bouwplaats dat de steunberen gevaarlijk begonnen te slingeren, zo erg zelfs dat de dag nadien een nieuwe boogsteen\* van een pas vervangen luchtboog verbrijzeld werd teruggevonden.

Pas sinds een tiental jaar is de functie van deze ogenschijnlijk nutteloze spantbalken via een digitale simulatie aan het licht gebracht. De turbulenties die zich tussen de hoge steunberen ontwikkelen, veroorzaken een ritmische belasting, jammer genoeg in fase met

de eigen oscillatiefases van deze structuren, die gezien hun lengte vrij soepel moesten zijn. De niet-opgespannen spantbalken houden de steunberen niet tegen maar fungeren als schokdempers die de spectra van hun eigen frequentie wijzigen, waardoor ze niet langer overeenkomen met de excitatiefrequenties opgewekt door de turbulenties. Zo zijn ze niet langer gevaarlijk, net als een schommel die stilvalt als men hem niet in een bepaald ritme duwt.

Een ander voorbeeld met betrekking tot Beauvais betreft de toren die in 1569 werd geplaatst op de viering van het dwarsschip en waarvan de spits hoger dan 150 m reikte - dit maakte er meteen het hoogste gebouw van Frankrijk van, want Straatsburg was toen nog niet Frans. De instorting van deze toren

terwijl de processie de kerk verliet op Hemelvaartsdag 1573 is lange tijd verklaard door het feit dat de toren slechts langs drie zijden werd geschraagd: het koor en de twee armen van het

dwarsschip, terwijl er voor het schip geen geld was. Recente onderzoeken hebben aangetoond dat de voet van de toren nooit van metalen hoepels is voorzien.<sup>12</sup> Deze banden zijn nochtans heel nuttig, zoals we zien bij bakstenen fabrieksschoorstenen. Bij het Brugse belfort vervullen dikke smeedijzeren staven deze functie. Het ongeluk zou dus te wijten zijn aan het feit dat men in die tijd koos voor stereotomie\* en mooi gehouwen stenen en neerkeek op de 'onbekwamen' uit de middeleeuwen die een beroep deden op metaal.

In de grote toren van het Brusselse stadhuis heeft de verregaande restauratie tussen 1987 en 1997 een ongelooflijke hoeveelheid metaal aan het licht gebracht dat in het metselwerk was ingewerkt (afb. 7, 8, 9, 10, 11, 12). Ik wil mijn toenmalige schatting van 15 ton bijstellen, want ik denk dat de massa smeedijzer gebruikt voor de bouw van de toren tussen 1449 en 1455 eerder 25 ton benadert.<sup>13</sup> Naast de meer klassieke versterkingen die elders zijn beschreven, deden we in dit bouwwerk nog verrassende ontdekkingen. De windvaan van



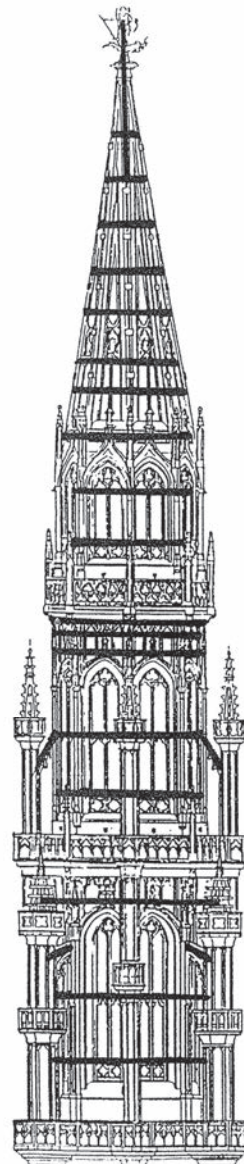
Afb. 6

Steunberen met een uitzonderlijke lengte in de cathédrale Saint-Pierre van Beauvais (foto van de auteur).



**Afb. 7**

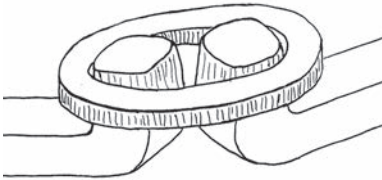
De toren van het Brusselse stadhuis (1449-1455) is 92,5 m hoog tot aan de voeten van Sint-Michiel (A. de Ville de Goyet, 2012 © MBHG).

**Afb. 8**

Schema van de toren van het Brusselse stadhuis, de drie bovenste galerijen en de spits. In vette lijnen, de oorspronkelijke metalen versterkingen: drie hoepels op de eerste galerij; vier hoepels en een ster op de tweede galerij; twee hoepels en een ster op de derde galerij; één basishoepel en zeven hoepels op de spits, de wapening van de luchtbogen en de schacht van de windvaan (tekening van de auteur).

**Afb. 9**

Oorspronkelijke metalen hoepel van de spits van het Brusselse stadhuis (foto van de auteur).

**Afb. 10**

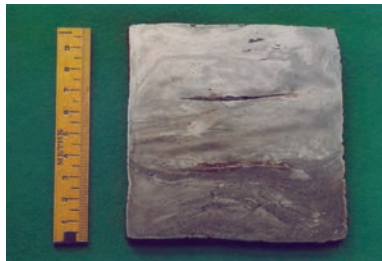
Schema van de assemblage, verzonken in het metselwerk, van de hoepelstaven (doorsnede ca. 5 x 3,5 cm) op de spits van het Brusselse stadhuis (1449-1455). Hetzelfde principe, van de hand van dezelfde bouwheer, Jan Van Ruysbroeck, treffen we aan in de hoepels van het koor van de collegiale Sint-Pieter-en-Sint-Guidokerk in Anderlecht (foto van de auteur).

**Afb. 11**

Metallografische analyse van een assemblage-ring van een hoepel op de spits van het Brusselse stadhuis: inwerking door nital (oplossing van salpeterzuur in alcohol) op een gepolijste doorsnede om de smeedstructuur aan het licht te brengen (foto van de auteur).

**Afb. 13**

De kathedraal van Doornik tijdens de restauratie (foto G. Focant ©SPW).

**Afb. 12**

Metallografische analyse van een snede in de schacht van de windvaan van het Brusselse stadhuis: vierkante doorsnede van 10 x 10 cm bestaande uit drie stukken van ca. 3 x 10 cm, los van elkaar gesmeed en geassembleerd door aansmeden (foto van de auteur).

**Afb. 14**

Het metaal bewijst ook zijn diensten tijdens de bouwwerken: al bij de bekisting oefent een kruisribgewelf zijn zijdelingse druk uit, waarvan de transversale component wordt overgenomen door de luchtbogen, terwijl de longitudinale component pas in evenwicht kan worden gebracht wanneer de volgende travee klaar is. Een voorlopige ketting tussen de aanzetten van de boog verzekert tijdelijk het evenwicht. In Doornik zijn de bevestigingsringen van de ketting hier en daar bewaard. De moderne steigerbuis is door de nog aanwezige middeleeuwse ring gestoken (foto van de auteur).

Sint-Michiel in gedreven koper is gemonteerd op een smeedijzeren schacht met een vierkante doorsnede van 10 x 10 cm. Men zou kunnen denken dat een verankering in het metselwerk van twee of drie meter voldoende was, maar peilingen hebben aan het licht gebracht dat deze schacht acht meter diep in het massief van de torenspits zat ingewerkt. Dit kan worden verklaard door het feit - dat ik heb kunnen berekenen - dat het samengestelde effect van de wind op de windvaan en op het metselwerk enkele meters onder de basis van Sint-Michiel een tractiezone schept die de mortelvoegen kan doen scheuren, en dat de schacht niet alleen dient als verankering van de windvaan maar ook als armatuur, een versterking van gewapende steen die de stabiliteit van de spits zelf moet verzekeren. Het gaat om een metalen staaf van ongeveer 800 kg. Een ander opmerkelijk voorbeeld is dat van de steunbogen die de hoofdturen verbinden met de schoortrentjes, die men een veeleer decoratieve rol toedichtte. Uit de resultaten van de digitale modellering bleek echter dat afhankelijk van de windrichting sommige luchtbogen overgingen in tractie, wat fysisch gezien abnormaal is omdat een luchtboog precies is ontworpen om te duwen. Eerst werd gedacht aan een fout in de gegevensinvoer. De stenen van deze luchtbogen waren echter in zo'n slechte staat dat we ze niet konden restaureren en ze door nieuwe moesten vervangen. Tijdens de demontage constateerden we dat de middeleeuwse bouwers zich ervan bewust waren dat er tractie kon optreden, want in het metselwerk was een metalen armatuur verzonken.

In augustus 1999 trof een tornado het stadscentrum van Doornik. Dit veroorzaakte veel schade aan de kathedraal, die op dat moment in restauratie was (afb. 13). Zo waaiden twee pinakels\* af. Deze 19de-eeuwse pinakels waren in neogotische stijl ontworpen op basis van gipsen modellen, die goedkoop waren aangekocht op de bouwplaats van de Keulense kathedraal die toen werd afgewerkt. Tijdens mijn bezoek aan de bouwplaats van Doornik enkele dagen na de wervelwind constateerde ik tot mijn grote verbazing dat de pinakels niet voorzien waren van de klassieke

metalen pennen die ze aan hun sokkel moesten bevestigen. Deze versterkingstechniek was nochtans al tijdens de oudheid bekend: alle tamboers van de zuilen waren aan elkaar gekoppeld met pennen, meestal van brons, die met lood in het marmer werden vastgezet. Men deed dit wellicht niet zozeer met het oog op de windweerstand dan wel op een grotere weerstand tegen de horizontale belasting veroorzaakt door een eventuele aardbeving. Geloofde men in Doornik in de 19de eeuw dat het gewicht van de pinakels voldoende was om ze te stabiliseren, of ging het om een onachtzaamheid op de bouwplaats? Hoe dan ook, indien er wél een metalen armatuur was geweest, dan zouden de pinakels de wervelwind van 1999 wellicht hebben doorstaan. Omgekeerd zijn er wel sporen van middeleeuws metaal in Doornik aangetroffen (afb.14).

De *Sainte Chapelle* in Parijs vertoont een ongelooflijke verscheidenheid van metalen versterkingen, want metaal, hoe duur het toen ook was, werd royaal toegepast in dit prachtwerk waarin relikwieën moesten worden ondergebracht. Zo zijn er nog tal van andere voorbeelden die de noodzaak bevestigen van metalen armaturen in de gotische architectuur, en niet uitsluitend in de religieuze architectuur. We hebben al verwezen naar de grote toren van het Brusselse stadhuis. Een ander te noteren voorbeeld is dat van de donjon van het kasteel van Vincennes, gebouwd tussen 1361 en 1369, waar de recente restauratie ook een enorme hoeveelheid smeedijzer aan het licht heeft gebracht - men schat ook daar een twintigtal ton metaal.

#### KENNISVERSPREIDING

Een laatste innovatie die de kathedraalbouwers introduceerden, en zeker niet de minste, was de brede en snelle informatieverspreiding. We moeten afstappen van de opvatting die is verspreid door veelgelezen werken die het hebben over de 'geheimen van de kathedraalbouwer'. Van geheimen zou pas later sprake zijn. Zo moest Jan Van

Ruysbroek in januari 1449 in Brussel, toen hij voor de schepenen de eed aflegde die hem bouwmeester maakte van de toren van het stadhuis - de tekst van de eed is in de archieven bewaard - beloven de stad niet zonder toestemming te verlaten voordat de werken beëindigd waren, om te beletten dat hij zijn kennis zou overdragen aan een concurrerende stad als Leuven, dat toen met Brussel wedijverde voor de titel van hoofdstad van de Bourgondische Nederlanden.

In de bloeitijd van de gotische bouwkunst circuleerde informatie vrij rond, en iedereen deelde zijn kennis met anderen. Een zeldzaam document uit die tijd, de *cartes de Villard de Honnecourt*<sup>14</sup>, gedateerd ca. 1235, bevat een beschrijving van alle toen bekende bouwprocedures. Zelfs al werden er geen octrooien genomen, de informatie werd niet geheimgehouden. We zijn ver verwijderd van Leonardo da Vinci, die schreef: "Onderwijs niet en je zal uitmuntend zijn"<sup>15</sup>, wat in die context betekende: 'Als je rijk wil worden, geef je kennis dan niet prijs'. Pas veel later dook de notie op van geheimen die uitsluitend waren

#### In de bloeitijd van de gotische bouwkunst circuleerde informatie vrij rond, en iedereen deelde zijn kennis met anderen.

bestemd voor de leden van het gilde. In de 13de eeuw, ten tijde van de kathedraalbouwers, was het verkeer van personen en ideeën vrij, ondanks soms gespannen situaties. De grote bouwmeesters waren gerenommeerde architecten, die men van ver liet overkomen. Zo voerden sommige Franse bouwers hun kennis naar Engeland of Zweden uit, of werd hun hulp ingeroepen als experts voor de dom van Milaan. Hoewel die gunstige situaties niet lang duurden, ligt daar wellicht de grootste uitvinding van de kathedraalbouwers: deze snelle en ruime verspreiding van informatie kondigde immers de vrije handel van een grote Europese markt aan.

**Pierre Halleux** was lid van het college van experts voor de restauratie van het stadhuis van Brussel en voorzitter van het college van experts voor de restauratie van de kathedraal van Doornik.

## GLOSSARIUM

**Boogsteen:** stuk natuursteen dat in trapeziumvorm wordt gehouwen om een boog te vormen. Wanneer de boog (spitsboog, luchtboog, gootmuur, gordelboog...) uit ronde blokken bestaat, zorgt de constante boogstraal ervoor dat alle boogstenen identiek zijn, wat standaardisering en dus ook prefabricatie mogelijk maakt.

**Brugijzer:** ijzeren staaf over de breedte van een vensteropening waarin de glas-in-loodramen werden bevestigd.

**Gootmuren:** de muren van het grote schip boven de grote beglaasde muuropeningen, vlak onder de dakrand en ter hoogte van de aanzet van het gewelf, die de regen opvangen.

**Kalk:** de verbranding van kalksteen boven 800°C produceert corrosieve 'ongebliste' of 'levende' kalk; wanneer deze met water wordt aangengeld, ontstaat 'gebluste' kalk; vermengd met zand en wat water vormt die een 'metselkalk' waarvan de binding heel traag is, waardoor het gebouw zich lange tijd zonder schade kan blijven aanpassen aan een eventuele zetting. Het koolzuurgas van de lucht zet de gebluste kalk langzaam in carbonaat om (vijf eeuwen voor een voeg van 50 cm diepte) en maakt op die manier opnieuw calciumcarbonaat aan, wat het belangrijkste bestanddeel is van de kalksteen waarvan men is vertrokken.

**Kruisribgewelf:** snijding van twee gewelven. In het geval van de cilindervormige romaanse gewelven (tongewelven) zijn de snijdingen ellipsvormig, een vorm die in de middeleeuwen moeilijk correct te tekenen was. Ze werden vervangen door ronde diagonale bogen, waarvan de ronding makkelijker te verwezenlijken was en waarvan de identieke boogstenen standaardisering en prefabricatie mogelijk maakten. Als gevolg daarvan werden de gordelbogen en schildbogen gepunte bogen.

**Luchtboog:** stenen boog van minstens een kwartcirkel die steunt op de kop van een pijler ter hoogte van de aanzet van het gewelf en die de zijdelingse druk naar een steunbeer aan de buitenkant overbrengt; dat is de rol van de onderste reeks luchtbogen. Hoger geplaatste luchtbogen steunen tegen de gootmuur en brengen de winddruk op het dak naar dezelfde steunbeer over; dit is de bovenste rij luchtbogen. Soms rust op de luchtboog een goot voor de afvoer van regenwater.

**Pinakel:** decoratief torentje boven de pijlers op de omgang van het dak, vooral op de steunberen. Door hun gewicht konden de pinakels de stabiliteit van de steunberen bevorderen.

**Puzzolaanaarde:** vulkanische as die werd gewonnen in Pozzuoli, een stadje op de noordelijke oever van de Golf van Napels. Wanneer deze as in de Romeinse tijd werd toegevoegd aan mortel, maakte ze binding onder water mogelijk voor hydraulische werken, en in elk geval een snellere binding en een betere waterdichtheid van de mortel, wat de levensduur ervan verlengde. Men spreekt ook over het 'puzzolaanefect'.

**Sluitsteen:** soms gebeeldhouwde boogsteen die zich in de top van een gewelf of een boog bevindt. In tegenstelling tot wat vaak wordt beweerd, wordt de sluitsteen als eerste en niet als laatste steen op de boog geplaatst. Om het gewelf vast te zetten hebben alle boogstenen trouwens zonder onderscheid dezelfde functie.

**Spantbalk:** ijzeren of houten staaf die trekkracht overbrengt.

**Stereotomie:** wetenschap die de snijding van gehouwen natuursteen behandelt, wat een goede beheersing van de geometrie vereist.

**Steunbeer:** diepe en massieve pijler die zich vaak aan de buitenkant van het gebouw bevindt en door zijn eigen gewicht weerstand biedt aan de druk die wordt uitgeoefend op een muur of een andere pijler, hetzij door direct contact met de muur die moet worden gesteund, hetzij via een luchtboog die er de horizontale buitenwaartse druk op overzet.

**Tongewelf:** een typisch romaans - en daarvoor Romeins - gewelf, gevormd door een ronde halve cilinder. De halve cilinder is soms gebroken, zoals in Autun.

**Tras:** vulkanische as gewonnen in de Eifel, met hetzelfde effect op de mortel als puzzolaanaarde. Dit materiaal werd via het water naar Brussel verscheept, langs de Rijn, de Schelde en tot slot de Zenne.

**Valhamer:** mechanische hamer die meestal in beweging wordt gebracht door een watermolen, ter vervanging van de manueel bediende hamer van de smid voor het bewerken van ijzer op het aambeeld.

**Welfvlak:** opvulling in natuur- of baksteen van het vlak van een gotisch gewelf gelegen tussen de bogen.

**Zijdelingse druk:** alle gewelven en bogen oefenen, ongeacht hun vorm, op hun dragers een verticale druk uit die met hun gewicht overeenstemt, alsook een horizontale druk naar de buitenkant, de zijdelingse druk; deze zijdelingse druk stemt overeen met de neiging van het gewelf om af te platten. Deze druk kan heel intens zijn, bijvoorbeeld van de orde van 15 ton in de kathedraal van Doornik.

## NOTEN

1. BECHMANN, R., *Les racines des cathédrales*, Payot, Parijs, 1984.
2. HALLEUX, P., 'La voûte gothique : une audace de bâtisseur?', *Annales des Travaux publics de Belgique*, 1989, 6, pp. 429-454.
3. HALLEUX, P., 'La compréhension de la pensée technique des bâtisseurs médiévaux : un long cheminement du XII<sup>e</sup> au XXI<sup>e</sup> siècle', *Sartonia*, vol. 15, 2002, pp. 155-207, en *Bulletin de liaison ICOMOS Wallonie-Bruxelles. Dossier 2002-2003*, 2003, pp. 1-30.
4. MARK, R., ABEL, J.F., O'NEILL, K., 'Photoelastic and Finite-element Analysis of a Quadripartite Vault', *Experimental Mechanics*, vol. 13, nr. 8, 1973, pp. 322-329, en *Proc. SESA*, vol. 30, nr. 2, 1973, pp. 322-329; MARK, R., 'Structural archeology: photoelastic and Finite-element modeling of historic architecture', in: LEMAIRE, R.P., VAN BALEN K. (red.), *Stable-Unstable?*, Leuven University Press, Leuven, 1988, pp. 79-91; SABOURET, V., 'Les voûtes d'arête nervurées. Rôle simplement décoratif des nervures', *Le Génie Civil*, 92, nr. 9, 1928, pp. 205-209.
5. BACHMANN, O. et al., *The History of cranes, Southfields*, 1997 (The classical Construction Series).
6. GELEYN, P., DE JONGE, K., 'New light on specialized XVI century construction techniques in the Low Countries', *Proceedings of the First International Congress on Construction History*, Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2003, pp. 987-995.
7. VIOLLET-LE-DUC, E., *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI<sup>e</sup> au XVI<sup>e</sup> siècle*, 10 vol., Parijs, 1854-1868.
8. TAUPIN, J.L., 'L'utilité du fer dans les cathédrales, résurgence d'une réflexion, le statut du fer à Beauvais', in: TIMBERT, A., *L'Homme et la matière, Colloque des 16-17/11/2006*, Noyon, Picard, Parijs, 2009, pp. 39-50.
9. HALLEUX, P., 'La déformabilité de la tour de l'Hôtel de Ville de Bruxelles sous les effets climatiques (vent et ensoleillement)', 4<sup>th</sup> National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Leuven, 1997, p. 489-492; HALLEUX, P., 'The gothic tower of Brussels town hall: a scientific approach to the problems and choices concerning restoration', in: *Sustained care of the cultural heritage against pollution*, Council of Europe Publishing, Straatsburg, 2000, pp. 63-94 (Cultural Heritage, nr. 40).
10. HALLEUX, P., 'Notre Dame de Tournai : sept siècles d'instabilité structurale', *Les cahiers de l'Urbanisme*, nr. 62, 2006, pp. 42-54.
11. BOIRET, Y., 'La cathédrale de Beauvais, les effets du vent', *Rencontres internationales pour la protection du Patrimoine culturel. 2<sup>e</sup> Colloque - les risques naturels*, Avignon, 1987, pp. 369-373; BOIRET, Y., 'La Cathédrale Saint-Pierre de Beauvais - Faiblesses structurales', in: LEMAIRE, R.P., VAN BALEN, K. (red.), *Stable-Unstable?*, Leuven University Press, Leuven, 1988, pp. 299-311.
12. TAUPIN, J.-L., *Mondelinge mededeling met betrekking tot de instorting van de toren van Beauvais*, 2009.
13. HALLEUX, P., 'Le métal d'origine dans la grande tour gothique de l'hôtel de ville de Bruxelles', *Bulletin de liaison ICOMOS Wallonie-Bruxelles. Dossier 2001*, 2001, pp. 2-9; HALLEUX, P., 'Le titane en grosses barres d'armature dans l'hôtel de ville de Bruxelles : une première mondiale en restauration', *Bulletin de liaison ICOMOS Wallonie-Bruxelles. Dossier 2001*, 2001, pp. 10-12; ESPION, B., ELINCK, S., HALLEUX, P., 'Wind Induced Stresses in the Spire of Brussels Town Hall Tower', *IABSE Symposium, Rome*, 1993, pp. 449-456.
14. BECHMANN, R., *Villard de Honnecourt. La pensée technique au XIII<sup>e</sup> siècle et sa communication*, Picard, Parijs, 1991; BARNES, C.F., 'Le problème Villard de Honnecourt', in: RECHT, R. (red.), *Les bâtisseurs de cathédrales gothiques*, Musée de la Ville de Strasbourg, Straatsburg, 1989, pp. 209-223.
15. PEDRETTI, C., *Léonard de Vinci Architecte*, Electa Moniteur, Milaan-Parijs, 1988 (Monographies d'architecture).

---

 The century of cathedrals, Gothic innovation
 

---

*Significant technical innovations in the construction of buildings, whether religious, civil or military, went hand in hand with the emergence and growth of Gothic architecture in Western Europe from the twelfth century. Some major restoration campaigns discussed here reveal the scale of the phenomenon and raise questions about the dissemination of technical knowledge. While the appearance of the ribbed vault is the most famous architectural feature associated with new Gothic construction systems, the standardisation of materials and the introduction of the use of "trass" in mortars were also significant. But the major innovation of the cathedral builders, recently revealed by Gothic architecture historians, is the use of iron to reinforce stone masonry. Despite the traditional view, Gothic architecture is built not only in stone but is also the first architectural style to make major use of metal. The spire of the town hall of Brussels is an outstanding example of this remarkable mediaeval technical progress. Later, technical knowledge sometimes seems to have been forgotten, to the extent that the tower of Beauvais Cathedral collapsed in 1573 and the restored flying buttresses split when the same building was restored in 1982, while two neo-Gothic pinnacles of Tournai cathedral collapsed in 1999.*

## REDACTIECOMITÉ

Jean-Marc Basy, Stéphane Demeter, Paula Dumont, Cecilia Paredes en Brigitte Vander Bruggen, met de medewerking van Anne-Sophie Walazyc voor het kabinet van de minister-president belast met Monumenten en Landschappen

## COÖRDINATIE PRODUCTIE

Koen de Visscher

## REDACTIE

**Dossier:** Patrick Burniat, Bernard Espion, Odile De Bruyn, Rika Devos, Benoît Fondu, Pierre Halleux, Leen Lauriks, Géry Leloutre, Piet Lombaerde, Michel Provost, Véronique Samuel-Gohin, Joris Snaet, Elisabeth Van Besien, Ine Wouters

**Plus:** David Attas, Paula Dumont, Michel Provost, Brigitte Vander Bruggen

## VERTALING

Hilde Pauwels, Eric Tack, Gitracom

## NALEZING

Mia Verstraete, Harry Lelièvre en de leden van het redactiecomité

## VORMGEVING

supersimple.be

## DRUK

Dereume Printing

## VERANTWOORDELIJKE UITGEVER

Philippe Piéreuse, Directie Monumenten en Landschappen van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest, CCN - Vooruitgangstraat 80, 1035 Brussel

*De artikelen zijn gepubliceerd onder de verantwoordelijkheid van de auteurs. Alle rechten voor het reproducieren, vertalen of herwerken zijn voorbehouden.*

## HERKOMST VAN DE FOTO'S

De meeste iconografische documenten werden ter beschikking gesteld door de auteurs en zijn afkomstig van verschillende verzamelingen (referentie vermeld bij elke illustratie).

*Mochten er ondanks onze inspanningen om alle reproductierechten te betalen toch nog gerechtigden zijn die niet gecontacteerd werden, dan worden zij verzocht zich kenbaar te maken bij de Directie Monumenten en Landschappen van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest.*

## FOTO OMSLAG

Paleis 5, Brussels Expo  
(Chr. Bastin & J. Evrard © MBHG)

## LIJST MET AFKORTINGEN

AAM - Archives d'Architecture Moderne  
ARB - Académie royale de Belgique  
ASB - Archief van de Stad Brussel  
KBR - Koninklijke Bibliotheek van België  
KIK - Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium  
KMGK - Koninklijke Musea voor Kunst en Geschiedenis  
KMSKB - Koninklijke Musea voor Schone Kunsten van België  
MBHG - Ministerie van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest - Documentatiecentrum van het Bestuur Ruimtelijke Ordening en Huisvesting  
MSB - Museum van de Stad Brussel  
SPW - Service public de Wallonie  
ULB - Université libre de Bruxelles

## ISSN

2034-578X

## WETTELIJK DEPOT

D/2012/6860/013

**Cette revue paraît également en Français sous le titre *Bruxelles Patrimoines*.**